

demita in prvo v občini Kobarid. V Krnskem pogorju smo jo do zdaj poznali le pod Rdečim robom in Pelcem ter v Slemenskih pečeh, vse nad dolino Tolminke. Njena robna nahajališča v drugih nebesnih smereh so: najbolj proti vzhodu pod Hočem nad Podporeznom (občina Železniki), najbolj proti severovzhodu v Homah pod Črno goro (občina Bohinj) in najbolj proti jugu pri Hudičevem robu pod Kojco (občina Cerklje). Največ nahajališč je še vedno v občini Tolmin, predvsem v zgornjem delu Baške doline.

V Kneški grapi sem jo iskal in je nisem našel, a me je njeno iskanje pripeljalo k venerinim laskom (kot že pred tridesetimi leti h kortuzovki pod Črnim vrhom nad Batavo). Kdo me je pripeljal k njenemu nahajališču v povirju Kozjaka? Nihče drug kot Rafko Terpin! Brez njegovega telefonskega klica bi me vsaj to poletje pod Krnčico skoraj gotovo ne bilo. Hvala, prijatelj, za to pozornost.

*Literatura:*

Dakskobler, I., Martinčič, A., 2021: *New localities of *Adiantum capillus-veneris* and *Moehringia villosa* in the southern Julian Alps. Folia biologica et geologica, 62 (1): 33-57.*

V iskanju severnega sija • Fizika

## V iskanju severnega sija

Lovrenc Fortuna

Prirojena človeška radovednost po odkrivanju novega in nepoznanega nas že od nekdaj vodi k opazovanju različnih naravnih pojavov okoli nas. Pogled proti nebu je še posebej zanimiv, saj ponuja nevsakdanje prizore. Razgibane zelene in rdeče zaves, ki se na nebu pojavijo in nato izginejo, so bile predmet opazovanj naših prednikov. Različni poskusi razlag nastanka teh razburljivih prizorov se povezujejo s starimi zgodbami, miti in nadnaravnim. Z načrtnim znanstvenim raziskovanjem in s sodobnimi dognanji o Zemljinem magnetizmu danes razumemo in lahko pojasnimo nastanek severnega sija kot posledico vzajemnega delovanja med nabitimi delci s Sonca ter atomi in molekulami plinov v našem ozračju.

Severni sij je človeštvu privlačen že od davnine. O tem pričajo začetki opazovanj, ki segajo daleč v preteklost. Nekoč so nastanek povezovali z delovanjem bogov in nadzemskih sil. Zaradi značilne rdeče barve in redkejšega pojavljanja na zmernih zemlje-

pisnih širinah so ga nekatera ljudstva imeli za znanilca vojn in bolezni. V nasprotju s tem pa so mu številni skandinavski narodi pripisovali nadnaravne in čudežne lastnosti. Zaradi visoke pogostosti pojavljanja severnega sija je ta postal ena izmed njihovih pomembnih kulturnih značilnosti. Opise, opazovanje in pojavljanje severnega sija zato lahko zasledimo v številnih literarnih delih. Inuitsko ljudstvo iz okolice Hudsonovega zaliva je severnemu siju pripisovalo pomembno mitološko vrednost. Po njihovem naj bi bile na nebu luknjice, skozi katere duhovi pokojnih prehajajo na nebeško stran. Pot do tja jim ostali pokojni iz nebes osvetljujejo z baklami. Prav to svetlobo bakel pa naj bi videli kot severni sij (slika 1).

Eden izmed prvih, ki je pojav opisal, je bil antični filozof Aristotel (384–322 pred našim štetjem). V svojem delu *Meteorologija* ga je opisal kot svetlobo, podobno gorečemu plinu. Pojavlja se na nebu v jasni noči kot različne oblike žarkov rdeče barve.

V letih od 1349 do 1350 je v *Knjigi o naravi*



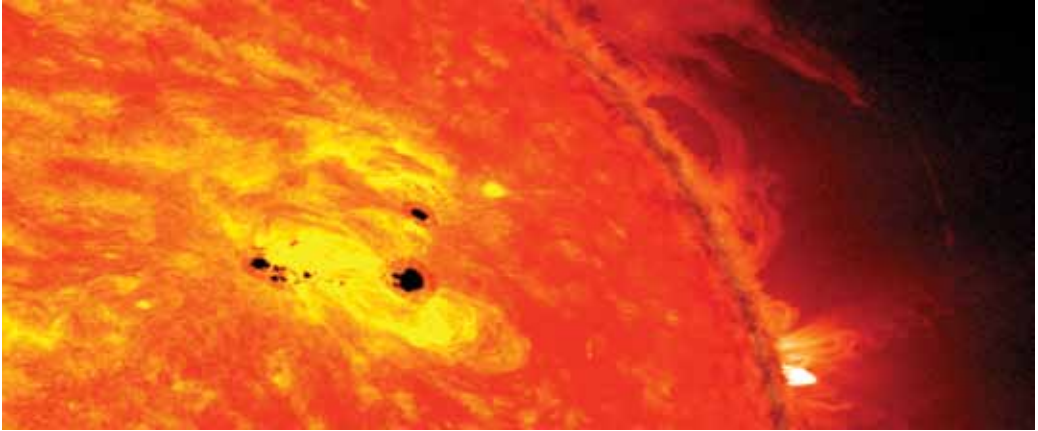
Slika 1: Severni sij nad okolico Tampereja na Finskem. Posneto avgusta leta 2019. Foto: Lovrenc Fortuna.

nemški učenjak Konrad von Megenberg opisal barvne spremembe pri pojavljanju sija. Opis severnega sija najdemo tudi v *Bibliji*. V stari zavezi ga je prerok Ezekijel opisal kot vihar z velikim oblakom, ki prihaja s severa. Oblak je poln plapolajočega ognja. Obdaja ga svetlobni sijaj, ki sveti iz notranjosti. Poimenovanje pojava severni sij prav tako kot prvotne razlage nastanka izvira iz mitologije. Za polarni sij, ki je skupen izraz za sij na severni in južni polobli, v strokovni literaturi najdemo izraz avrora. Ime ima po rimski boginji zore. Glede na poloblo pojavljanja je poimenovanje različno. Na severni se imenuje Aurora Borealis, na južni pa Aurora Australis.

Z razvojem znanosti, novimi spoznanji, boljšimi razmerami za natančno opazovanje in preučevanje vesolja ter težnjo po globljem razumevanju pojava se je pokazalo, da omenjene mitološke razlage in pojmovanja nastanka severnega sija niso niti grob približek

dejanskega nastanka pojava. Na začetku 18. stoletja so številni raziskovalci namenili veliko pozornosti znanstvenemu opazovanju avrore. Med njimi je angleški astronom Edmund Halley ugotovil, da je nastanek polarnega sija povezan z Zemljinim magnetizmom. Prav tako je bil eden izmed prvih pomembnejših korakov k razumevanju pojava prispevek Andersa Celsiusa. Sredi 18. stoletja je opazil, da se magnetne igle ob močnih avrorah obračajo. Zaradi te ugotovitve je pojav tudi on povezal z magnetizmom.

V začetku 19. stoletja je bil v Nemčiji postavljen eden od prvih observatorijev za zaznavanje sprememb v Zemljinem magnetnem polju. Izsledki raziskav in meritev so povezali nastanek polarnega sija s številom peg na Soncu. Ugotovitev je nadgradil Sophus Tromholt, ki je pojasnil, da pogostost pojavljanja sijev ni stalna, ampak se spreminja s številom Sončevih peg (slika 2). S tem so dokazali, da Sonce poleg oddajanja

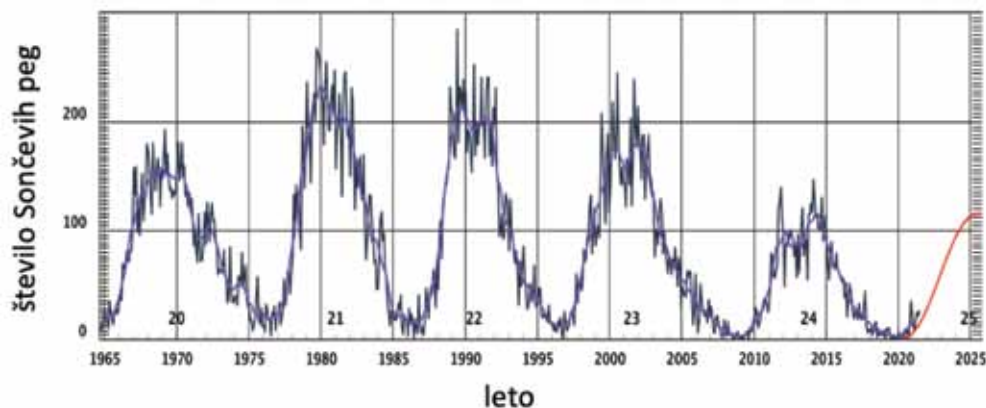


Slika 2: *Sončeve pege na površju Sonca. Povzeto po ameriški vesoljski agenciji NASA 8. julija leta 2021 (<https://spaceplace.nasa.gov/solar-activity/en/solar-activity2.en.jpg>).*

svetlobne in toplotne energije tudi drugače pomembno vpliva na planet Zemlja. Na začetku 20. stoletja sta s triangulacijo opazovanja pojava na različnih mestih Carl Størmer in John Dalton določila višino plasti, iz katerih izvira in v katerih se pojavlja. Zatem je Kristian Birkeland objavil teorijo, da polarni sij povzročajo nabiti delci s Sonca. Ti se ujamejo v Zemljino magnetno polje in tako pripotujejo v ozračje. Tam reagirajo z atomi in molekulami plinov, ki ga sestavljajo. V istem obdobju so izmerili tudi svetlobni spekter avrore ter predstavili spoznanja o magnetnih nevihtah in stalnem Sončevem vetru. Ob velikem napredku je pri raziskavah prihajalo tudi do nekaterih napačnih razlag. Jean-Baptiste Biot je tako na primer zmotno mislil, da avrora nastane zaradi delcev, ki jih izbruhajo ognjeniki.

Omenili smo, da je severni sij pojav, ki nastane pri medsebojnem delovanju Sonca in Zemlje. Sonce v medplanetarni prostor oddaja magnetno valovanje. Poleg tega nenehno oddaja tudi snov v obliki plazme. Tok u nabitih delcev rečemo Sončev veter. To je plin električno nevtralne mešanice negativnih elektronov in pozitivnih ionov – gre predvsem za protone atomskih jeder vodika. Kot primer znanega Zemljinega pojava, pri

katerem je udeležena plazma, je strela. Sončev veter izvira iz korone Sonca, zunanjega dela njegove atmosfere. Delci v njem imajo dovolj veliko hitrost, da ubežijo težnosti Sonca in odletijo v medplanetarni prostor. Sonce zapuščajo s hitrostjo približno od 450 do 700 kilometrov na sekundo. Gostota, hitrost in pogostost izbruhov vroče plazme so odvisne od aktivnosti Sonca, ki se povezuje s številsko gostoto Sončevih peg. Te temne lise, po velikosti primerljive Zemlji, so izhodišče eksplozivnih delcev, ki v vesolje sproščajo svetlobo, Sončev material in energijo. Kadar je na Soncu večja skupina peg, lahko na tem območju pričakujemo več izbruhov. Aktivnost Sonca lahko tako spremljamo po številu peg na njegovem površju. Število se s časom periodično spreminja. Značilen je enajstletni cikel, ki je razviden na grafu 1. Kadar je izbruh usmerjen proti Zemlji, delci na poti od Sonca po približno osemnajstih urah pridejo v stik z Zemljinim magnetnim poljem. To nastane okoli planeta, ki izpolnjuje dva pogoja – telo mora imeti v svoji notranjosti tekočo in električno prevodno notranjost (jedro) ter se mora vrteti okoli svoje osi. Izvor magnetnega polja Zemlje so električni tokovi staljenega železa v njeni sredici. William Gilbert je že leta 1600

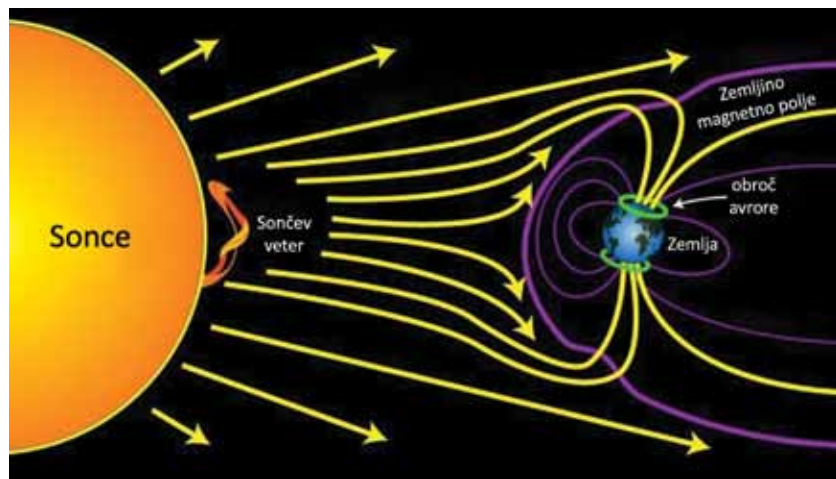


Graf 1: Prikaz periodičnega spreminjanja števila Sončevih peg glede na leto. Povzeto po: Space Weather Prediction Center (Središču za napovedovanje vremena v vesolju) 7. julija leta 2021 (<https://www.swpc.noaa.gov/products/solar-cycle-progression>).

trdil, da je Zemlja velik magnet. To so kasneje tudi potrdili. Magnetno polje si lahko predstavljamo kot nevidno silo okoli magnetna, ki je najmočnejša ob tečajih magnetna. Tako kot vsak magnet ima tudi Zemlja severni in južni magnetni tečaj. Magnetno polje našega planeta ni omejeno le na površje, temveč sega daleč v vesolje. Njegova pomembna naloga je, da varuje planet pred energetsko nabitimi delci, ki pridejo s Sonca. Kljub temu pa nekateri izmed njih vseeno pridejo v stik z Zemljinim magnetnim

poljem na približni razdalji deset Zemljinih polmerov od središča planeta. Ujeti v Zemljin magnetno polje potujejo po njem. Naelektreni delci se stekajo in potujejo vzdolž magnetnega polja proti severnemu in južnemu tečaju (slika 3).

Nabitni delci elektronov in protonov, ki so ujeti v Zemljinem magnetnem polju v ozračju na višini okoli sto kilometrov in več, začnejo trkati v molekule in atome plinov. To se zgodi na omejenem območju pasov okoli tečajev. Zaradi tega je tudi polarni sij



Slika 3: Poenostavljeni shematski prikaz potovanja Sončevega vetra s Sonca proti Zemlji in medsebojnih vplivov med njim in Zemljinim magnetnim poljem. Povzeto po ameriški vesoljski agenciji NASA 7. julija leta 2021 (<https://bit.ly/3hoITGX>).

zemljepisno omejen. Pri medsebojnem vplivu teh delcev ter nevtralnih ali ioniziranih molekul in atomov kisika, dušika in vodika ( $O_2$ ,  $O$ ,  $N_2$ ,  $N$ ,  $H$ ) pride do kemijskih reakcij. Pri njih nastanejo produkti v vzbujenem energetskem stanju. Pri prehodu nazaj v osnovno stanje te molekule in atomi izsevajo značilno svetlobo s specifično valovno dolžino. To vidimo kot polarni sij. Barva polarnege sija je odvisna od višine, na kateri nastane, saj je število posameznih ionov, atomov in molekul v ozračju na različnih višinah različno. V spektru prevladujejo zelena (višina od 90 do 150 kilometrov), rdeča (višina od 150 do 600 kilometrov) in modrovijoličasta (višina nad 1.000 kilometrov). Najpogostejša barva polarnege sija je zelenorumena. Nastane pri značilni reakciji med dušikovim protonom,  $N^+$ , in molekulo kisika,  $O_2$ , na višini od 90 do 150 kilometrov. Reakcijo opisuje naslednja kemijska enačba:  $N^+ + O_2 \rightarrow NO^+ + O(^1S)$ . Nastali kisik v vzbujenem stanju med relaksacijo odda foton z valovno dolžino 555,7 nanometra, kar vidimo kot polarni sij zelenorumene barve. Polarni sij je razgiban pojav, saj pogosto spreminja obliko. Prepoznamo lahko nekaj značilnih oblik, kot so pasovi, žarki, loki, zavese, oblaki, vrtinci in podobno.

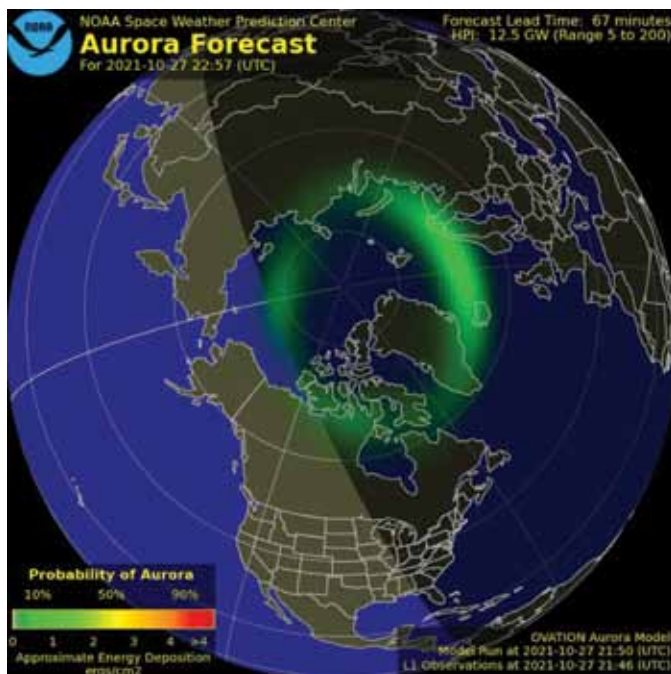
Ugotovitve večletnega opazovanja in beleženja pojavljanja polarnege sija na severni polobli nakazujejo na najpogostejše pojavljanje v obroču avror. Ta sega v polmeru približno 2.500 kilometrov od severnega tečaja. Omenjeni pas sega čez območja Skandinavije, Islandije, Grenlandije, severnega dela Kanade, Aljaske in Sibirije (slika 4). Eden izmed najprimernejših krajev za opazovanje severnega sija je mesto Andenes na zahodni obali Norveške. Poročila naznanjajo možnost opazovanja pojava skoraj vsako temno in jasno noč. Redkeje pa je severni sij viden tudi z manj skrajnih severnih leg. Ob veliki aktivnosti Sonca in močnih izbruhih plazme je tako viden tudi s srednjeevropskih zemljepisnih širin. Ker se ne pojavlja v tako intenzivnih zelenih barvah, kot bi pričako-

vali, ga pogosto spregledamo in ne zaznamo. Pojavljanje na območju Slovenije spremljajo številni raziskovalci že več let. Nekateri objavljeni prispevki poročajo o videnem severnem siju leta 1981 z observatorija pri Črnem vrhu. Viden je bil tudi leta 2000, leta 2003 v zgornji Savinjski dolini, leta 2011 na Pohorju in leta 2015 iz neposredne bližine Ljubljane. Vsa ta leta je bila aktivnost Sonca zelo velika, kar lahko razberemo tudi z grafa 1, ki prikazuje spreminjanje števila Sončevih peg glede na leto. Za opazovanje severnega sija je treba izbrati primerni čas in mesto. Najprimerneje je ponoči v temi, tam, kjer ni veliko svetlobnega onesnaženja. Višje kot gremo, bolje ga bomo videli, saj je tam prosojnost zraka večja. Močna Luna lahko naše opazovanje moti, prav tako tudi oblaki.

S spremljanjem aktivnosti Sonca se ukvarjajo profesionalne nacionalne meteorološke agencije. Dober primer je Space Weather Prediction Center (Središče za napovedovanje vremena v vesolju). Na podlagi analize meritev pretoka nabitih delcev, magnetnega polja in opazovanja Sonca s satelita DSCOVR (**D**eep **S**pace **C**limate **O**bservatory) izdeluje in javno objavlja napoved s predvidenim pojavljanjem avrore v prihajajočih urah in dneh (slika 5).

Človek najlažje in najpogosteje zazna severni sij kot značilne pasove zelene barve na nebu. Poleg vidne zaznave pa pojavljanje avrore vedno pogosteje povezujemo tudi z različnimi zvoki. Številni opazovalci poročajo o zvokih pokanja, bobnanja in klikanja, ki naj bi postajali glasnejši z večanjem jakosti avrore. Od leta 2000 v razvojnem centru Univerze Aalto na Finskem načrtno raziskujejo ta pojav. Številni znanstveniki so še vedno skeptični glede resničnega obstoja zvokov avrore. V ta namen so letos v mestu Jyväskylä na Finskem zasnovali raziskovalni projekt z več kot dvesto prostovoljci. Z njim želijo posneti in natančno določiti lokacijo zvokov in s tem potrditi domneve o pojavljanju zvoka pri avrori.





Slika 5: Primer napovedi pojavljanja severnega sija prikazuje predvideno območje z verjetnostjo, da bo viden, v odstotkih. Povzeto po: Space Weather Prediction Center (Središču za napovedovanje vremena v vesolju) 7. julija leta 2021 (<https://www.swpc.noaa.gov/products/aurora-30-minute-forecast>).

Slika 4: Severni sij, viden na Laponskem na Finskem. Posneto decembra leta 2019. Foto: Lovrenc Fortuna.

Slika 5: Zgoraj levo: Center za napovedovanje vesoljskega vremena Napoved Avrore (severnega sija). Za 27. 10. 2021 ob 22.57 (UTC). Univerzalni koordinirani čas. Zgoraj desno: Forecast Lead Time = Čas od objave napovedi do pojava sija: 67 minut. HPI (hemispherical power input) = Hemisferična moč: 12,5 GW (obseg 5 do 200). Spodaj levo: Verjetnost nastanka avrore. Približna raven energije ( $\text{erg}/\text{cm}^2$ ).

Desno spodaj: Ovation Model Avrore. Prikaz modela 27. 10. 2021 ob 21.50 (UTC). L1 Opazovanja 27. 10. 2021 ob 21.46 (UTC).



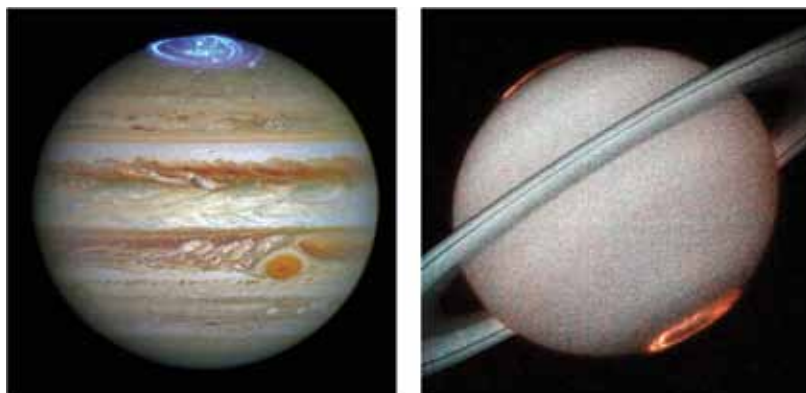
Slika 6: *Pas vijolične barve po imenu STEVE*. Povzeto po: Eos.org 7. julija letos (<https://eos.org/wp-content/uploads/2019/02/steve-circle-lake-sky-stars-800x600.jpg>).

Zanimive so tudi raziskave v zadnjih petih letih o ozkem osvetljenem pasu vijoličaste barve, ki so ga poimenovali STEVE (Strong Thermal Emission Velocity Enhancement). Do nedavnega je bilo zmotno mišljeno, da med njim in polarnim sijem ni razlike. Po študiji primerjave satelitskih meritev in slik se je pokazalo, da ga v nasprotju s polarnim sijem ne povzročijo nabiti ioni in elektroni. Do tega trenutka zanesljive razlage nastanka še nimamo. Lahko pa si pogledamo številne posnetke te različice (slika 6).

Pojavljanje avrore največkrat povezujemo s severnim tečajem. Vendar pa to ni pojav, ki je edinstven samo na našem planetu, saj lahko nastane tudi na drugih planetih. Raziskave na tem področju so še precej nove, saj se ti planeti od planeta Zemlje razlikujejo

po velikosti, položaju in razmeram v ozračju – dostop in meritve teh podatkov pa so težavne. V teoriji pa velja podoben princip nastanka avrore kot na Zemlji. Nastane lahko na tistem planetu, ki ima dejavno magnetno polje. Primeri takih planetov v našem Osončju so Jupiter, Saturn, Uran in Neptun (sliki 7 in 8).

Treba se je zavedati, da se avrore na teh planetih precej razlikujejo od Zemljinih. Najočitnejše so razlike v barvnem spektru, velikosti, obliki in pogostosti pojavljanja. Leta 2016 so bile s Hubblovim teleskopom posnete fotografije avrore na Jupitru. Te s prostim očesom ne bi bile vidne. Naše oči namreč niso sposobne zaznati rentgenskih in ultravijoličnih žarkov, ki jih tam seva avrora. Zanimiv primer je tudi planet Mars.



Sliki 7 in 8: *Aurora na Jupitru na levi in Saturnu na desni. Povzeto po: ameriški vesoljski agenciji NASA 7. julija leta 2021 (<https://www.nasa.gov/sites/default/files/thumbnails/image/hs-2016-24-a-print-new.jpg> in [https://www.nasa.gov/sites/default/files/images/227191main\\_slide22high\\_full.jpg](https://www.nasa.gov/sites/default/files/images/227191main_slide22high_full.jpg)).*

Čeprav nima več dejavnega magnetnega polja, je raziskovalna odprava *Mars Express* leta 2004 prvič zaznala avroro na njem. V petnajstih letih raziskav je odprava zbrala podatke, ki pričajo o tem, da za pojavljanje avrore magnetno polje ni vedno nujno potrebno. Za natančnejše razumevanje nastanka avrore v tem primeru so potrebne nadaljnje raziskave.

Severni sij je izjemno zanimiv, saj še danes pritegne pozornost številnih raziskovalcev. O tem pričajo številni novi izsledki, ki vedno znova nadgrajujejo razumevanje tega pojava. Kljub temu pa ostajajo neznanke, ki jih želimo pojasniti v prihodnosti. Morda bodo nova odkritja nekoč imela celo širšo uporabno vrednost.

#### Literatura:

- Atanackov, J., Kac, J., 2004: *Polarni sij nad Slovenijo: 20. novembra 2003. Spika*, 12 (1): 34–36.
- Jeremiab, J., 1870: *Early Mention of the Aurora Borealis. Nature*, 3: 174–175.
- Herman, M., 1981: *Polarni sij nad Slovenijo. Proteus*, 43 (9/10): 364–365.
- Kambič, B., 2000: *Polarni sij, viden iz Slovenije! Gea*, 10 (8): 52.
- Laine, U. K., 2019: *Auroral crackling sounds and Schumann resonances: Proceedings of the 26th International Congress on Sound and Vibration, ICSV 2019. Canadian Acoustical Association.*
- Lovell, A., Clegg, J., Ellyett, C., 1947: *Radio Echoes from the Aurora Borealis. Nature*, 160: 372.

- Mende, S. B., Harding, B. J., Turner, C., 2019: *Subauroral Green STEVE Arcs: Evidence for Low-Energy Excitation. Geophysical Research Letters*, 46 (24): 14256–14262.
- Miller, S., 2021: *Planetary Aurorae. Oxford Research Encyclopedias of Planetary Science.*
- Moborič, A., 2018: *Polarni sij in Zemljino magnetno polje. Obzornik za matematiko in fiziko*, 65 (1): 12–25.
- Schröder, W., 2011: *The first accurate description of an aurora. Eos, Transactions American Geophysical Union*, 87 (51): 584.
- Smrekar, M., 2012: *Severni sij. Presek*, 39 (5): 21–24.
- Strnad, J., 1993: *Polarni sij. Proteus*, 56 (2): 51–57.
- Zaplotnik, J., 2019: *Polarni sij. Matrika*, 6 (2): 1–17.
- Zupan, J., 2000: *Aurora borealis – severni sij. Kvarkadabra: časopis za tolmačenje znanosti*, 6.



**Lovrenc Fortuna** je študent programa razredni pouk na Pedagoški fakulteti v Ljubljani. Zanima ga področje poučevanja naravoslovnih vsebin najmlajših osnovnošolcev. Prosti čas najraje preživlja v naravi na kolesu.