

# POLARNI SIJ

JAKA ZAPLOTNIK

Fakulteta za matematiko in fiziko  
Univerza v Ljubljani

V tem članku je fizikalno pojasnjen nastanek polarnega sija. Uvodna poglavja predstavijo zgodovino raziskovanja tega pojava, osnovno fiziko plazme in gibanje nabitih delcev v magnetnem polju. Sledi opis Sončevega vetra in zgornje plasti zemeljske atmosfere – ionosfere. Osrednji del članka obravnava magnetno polje in značilna območja plazme v okolici Zemlje, transport plazme v atmosfero in svetlobo polarnega sija. Zaključna poglavja predstavijo napovedovanje polarnega sija, polarni sij na drugih planetih in nekatere sodobne raziskave s tega področja fizike.

## POLAR LIGHTS (AURORA)

The aim of this article is to explain physics behind the formation of auroras. The first part which presents some basics of plasma physics is followed by chapters about solar wind, ionosphere, magnetic field in the vicinity of the Earth and transport of plasma into the atmosphere. Colours and shapes of aurora are explained as well. The ending chapters focus on aurora forecasts, auroras on other planets and current research in this field of physics.



Slika 1. Polarni sij nad mestom Tromsø, Norveška [37]

### 1. Zgodovinski uvod

Polarni sij je človeštvu že od nekdaj zanimiv in privlačen pojav. Nekoč so ga povezovali z bogovi in nadnaravnimi silami. Na zmernih geografskih širinah, kjer se pojavlja redkeje in v rdeči barvi, so ga razumeli tudi kot napoved vojne. Marsikateri misleci so želeli pojav razložiti že v antiki, a se je izkazalo, da je bilo njihovo razumevanje napačno. V literaturi polarni sij (angl. *polar lights*) imenujejo tudi *Aurora*, in sicer *Aurora Borealis* na severni ter *Aurora Australis* na južni polobli. To ime je po rimski boginji zore, Avrori, najverjetneje vpeljal Galileo, kar dokazuje, da tudi on pravega izvora tega naravnega pojava še ni poznal. Prvi resen korak k razumevanju avrore sta v sredini 18. stoletja (še pred Biotovimi, Savartovimi in Amperovimi spoznanji o povezavi med tokom in magnetnim poljem) prispevala Anders Celsius in Olav Hiorter, ko sta opazila obračanje

magnetnih igel ob močnih avrorah. Polarni sij so zato takrat povezali z magnetizmom. Da se avrora pojavlja na višinah nad 100 km, je v začetku 20. stoletja s triangulacijo ugotovil Carl Størmer, ki je kot prvi izračunal tudi tirnice nabitih delcev v dipolnem magnetnem polju Zemlje. V istem obdobju je Kristian Birkeland s pomočjo laboratorijskega eksperimenta postavil teorijo, da polarni sij povzročajo nabiti delci s Sonca, ki se ujamejo v Zemljino magnetno polje ter vzdolž silnic pripotujejo v atmosfero. V 20. stoletju se je hkrati razvijala kvantna mehanika, ki je pojasnila spekter polarne svetlobe. Tega je sicer že leta 1867 izmeril Anders Jonas Ångström. Trideseta leta 20. stoletja so prinesla spoznanja o magnetnih nevihtah in stalnem Sončevem vetru, kar so potrdili z meritvami v vesolju v šestdesetih letih. K spoznavanju avror so veliko pripomogle nenehne meritve magnetnega polja na Zemljinem površju in snemanje celotnega neba s t.i. *all-sky* kamerami, še bolj odločilno pa so na poznavanje vzrokov polarnega sija vplivale meritve elektromagnetnega polja ter pretokov nabitih delcev v Zemljini okolici z vesoljskih plovil in satelitov, ki jih imenujemo meritve *in situ*. Pomembno je zavedanje, da so, še posebej v drugi polovici 20. stoletja, bližnje vesolje ter plazmo, ki se nahaja v Zemljini okolici, raziskovali iz zelo različnih nagibov in so bila spoznanja o polarnem siju le eni izmed mnogih “stranskih produktov”.

## 2. Fizika plazme

Ker vzroke za pojav polarnega sija iščemo v Sončevem vetru in zgornjih plasteh atmosfere, ki je ionizirana, spoznajmo najprej nekaj osnovnih fizikalnih lastnosti take snovi, ki ji rečemo tudi plazma.

Plazma je stanje snovi (zaradi svojevrstnih lastnosti jo včasih označujemo kot četrto agregatno stanje), ki sestoji iz pozitivnih ionov in elektronov. Tipične temperature faznega prehoda med plinom in plazmo so  $\sim 10^4$  K –  $10^5$  K. Za ionizacijo enega atoma vodika ( $\text{H} \rightarrow \text{H}^+ + e^-$ ) je potrebnih 13,6 eV in 12,5 eV za atom kisika ( $\text{O} \rightarrow \text{O}^+ + e^-$ ). Plazma ima praviloma majhno gostoto, zato so trki med posameznimi delci v njej zanemarljivo redki. Pomemben numerični parameter plazme je *Debyejeva* dolžina

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{k_B T_e \epsilon_0}{n_0 q_e^2}},$$

kjer je  $k_B$  Boltzmannova konstanta,  $T_e$  temperatura elektronov (ki je definirana s povprečno hitrostjo elektronov  $v_e$  in zvezo:  $3k_B T_e/2 = m v_e^2/2$ ),  $\epsilon_0$  influenčna konstanta,  $n_0$  številska gostota elektronov in  $q_e$  osnovni naboj. Debyejeva dolžina  $\lambda_D$  je razdalja, do katere zaradi senčenja seže električni potencial posameznega delca  $\psi = (q_e/4\pi\epsilon_0 r)e^{-r/\lambda_D}$ . Da je snov znotraj opazovalnega sistema s karakteristično dolžino  $L_c$  smiselno obravnavati kot plazmo, mora veljati  $\lambda_D \ll L_c$ . Za Sončev veter znaša  $\lambda_D \sim 10$  m. Najbolj pogost zemeljski pojav, kjer je prisotna plazma, je strela, medtem ko v vesolju po nekaterih ocenah predstavlja kar 99 % vse snovi. Trke delcev pri fizikalnem opisu plazme zanemarimo, elektromagnetnih sil pa ne moremo. Gibanje posameznega delca plazme lahko opišemo s sistemom naslednjih enačb. Za gostoto naboja in gostoto tokov:

$$\rho = \frac{\sum q_k}{\Delta V} \quad \text{in} \quad \mathbf{J} = \frac{\sum \mathbf{v}_k q_k}{\Delta V},$$

kjer je  $\Delta V$  majhen izbrani volumen, in  $q_k$  naboj ter  $\mathbf{v}_k$  hitrost  $k$ -tega delca, veljajo Maxwelllove enačbe za jakost in gostoto električnega polja ter za jakost in gostoto magnetnega polja:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\partial \mathbf{B} / \partial t, \quad \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \partial \mathbf{D} / \partial t, \quad \nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \quad \nabla \cdot \mathbf{D} = \rho.$$

Veljata tudi zvezi:  $\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}$  in  $\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E}$ , kjer je  $\mu_0$  induksijska konstanta. Gibanje  $k$ -tega delca opiše drugi Newtonov zakon z Lorentzevo silo:

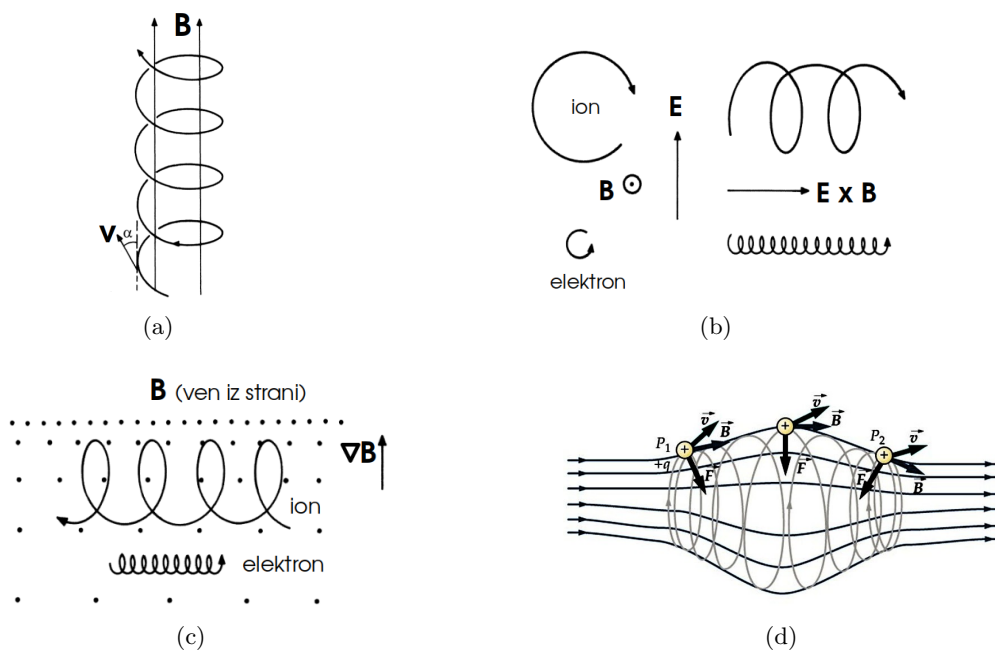
$$m_k \mathbf{a}_k = q_k (\mathbf{E} + \mathbf{v}_k \times \mathbf{B})$$

Tega sistema ni težko razumeti, a je računsko zahteven. Zato obstajajo enostavnejši opisi plazme, ki delujejo ob različnih predpostavkah. Že leta 1945 je A.A. Vlasov plazmo opisal statistično s porazdelitveno funkcijo  $f(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t)$ , za katero velja enačba Vlasova (izpeljana v [1], str. 27):

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \frac{\partial f}{\partial \mathbf{r}} + \frac{q}{m}(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \frac{\partial f}{\partial \mathbf{v}} = 0 .$$

Ob tem  $f(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t)d\mathbf{r}d\mathbf{v}$  predstavlja pričakovano število delcev ob času  $t$  s koordinatami med  $\mathbf{r}$  in  $\mathbf{r} + d\mathbf{r}$  ter hitrostmi med  $\mathbf{v}$  in  $\mathbf{v} + d\mathbf{v}$ . S sklopitvijo enačbe Vlasova za  $f$  in Maxwellovih enačb lahko izračunamo tudi makroskopske količine: masno gostoto, povprečno hitrost, kinetično energijo, gostoto naboja in tokov in tudi makroskopske zveze med njimi. Vseeno je tudi tako zastavljen problem težko rešljiv. Tretji način predstavitve plazme je magnetohidrodinamska (MHD) teorija fluidov, ki plazmo obravnava na makroskopskem nivoju kot tekočino. Ta teorija sloni na enačbah za ohranitev gibalne količine, energije in kontinuitetni enačbi ter Maxwellovih enačbah. Za marsikatero pojave, ki jih v kasnejših poglavjih opišemo le fenomenološko, obstajajo matematični modeli, ki se ravna po MHD teoriji.

## 2.1 Gibanje nabitega delca v zunanem polju



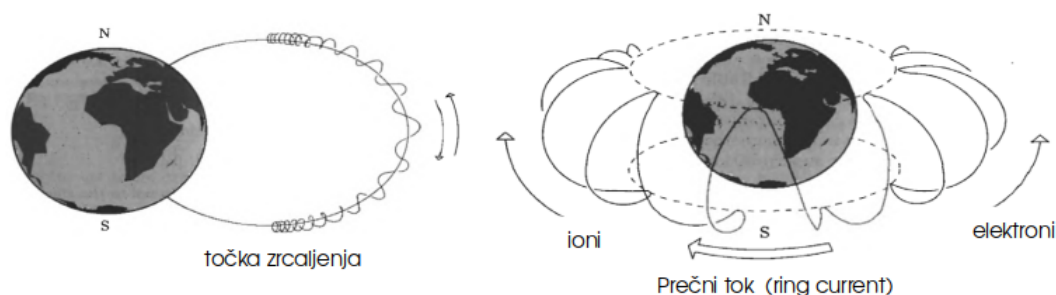
**Slika 2.**

- (a) Gibanje nabitega delca v homogenem magnetnem polju. Skica je v perspektivi. Prirejeno po [7].
- (b) Kroženje nabitega delca v homogenem magnetnem polju (levo) in “kroženje z zamikom” zaradi prečnega električnega polja (desno). Skica je tlorisna. Prirejeno po [7].
- (c) Gibanje nabitega delca v magnetnem polju s prečnim gradientom nabiranja. Skica je tlorisna. Prirejeno po [7].
- (d) Gibanje nabitega delca v “magnetni steklenici”. Ujet delec se giblje v vijačnici med točkama zrcaljenja. Prirejeno po [27].

Na delec z nabojem  $q$ , maso  $m$  in hitrostjo  $\mathbf{v}$  v zunanem polju deluje Lorentzeva sila:  $\mathbf{F}(\mathbf{r}) = m \frac{d\mathbf{v}(\mathbf{r})}{dt} = q\mathbf{E}(\mathbf{r}) + q\mathbf{v}(\mathbf{r}) \times \mathbf{B}(\mathbf{r})$ . Ta diferencialna enačba v splošnem ni rešljiva analitično. S poznavanjem posebnih rešitev lahko bolje razumemo gibanje plazme v okolici Zemlje in s tem transport nabitih delcev v atmosfero, ki povzročajo polarni sij. Brez izpeljav, ki jih najdemo v [1], predstavimo nekaj značilnih vzorcev gibanja. V homogenem magnetnem polju (slika 2.a) se

delec s hitrostjo  $\mathbf{v} = \mathbf{v}_\perp + \mathbf{v}_\parallel$ , kjer je  $\mathbf{v}_\perp$  komponenta hitrosti, pravokotna na magnetno polje, in  $\mathbf{v}_\parallel$  komponenta, vzporedna polju, giblje po vijačnici s polmerom  $\rho = mv_\perp/|q|B$  vzdolž magnetnih silnic. Če bi magnetnemu polju dodali še prečno električno polje, bi se središče spirale premikalo v stran (angl. *drift motion*) in ukrivljenost trajektorije ne bi bila več konstantna kot pri kroženju (slika 2.b). Podoben učinek ima tudi prečni gradient magnetnega polja (slika 2.c). V nehomogenem magnetnem polju, ki je na dveh koncih gostejše kot na sredini (slika 2.d), je delec ujet. Giblje se od ene zrcalne točke do druge po vijačnici, katere polmer je največji na sredini (kjer je velikost polja manjša), najmanjši pa pri zrcalnih točkah (kjer je velikost polja največja).

S poznavanjem gibanja nabitih delcev v opisanih primerih na sliki 2 lahko razumemo tudi gibanje nabitih delcev v dipolnem magnetnem polju v okolici Zemlje. Tirnice delcev v tem primeru kaže slika 3.



**Slika 3.** V Zemljinem dipolnem magnetnem polju delci potujejo po vijačnicah okrog magnetnih silnic. Zaradi zgostitve magnetnega polja ob Zemlji se delec “odbije” v točki zrcaljenja, podobno kot na sliki 2.d. Zaradi nehomogenosti polja v radialni smeri pride tudi do prečnega zamikanja trajektorije, kar je enak pojav kot tisti, ki ga prikazuje slika 2.c. Prirejeno po [10].

### 3. Sončev veter

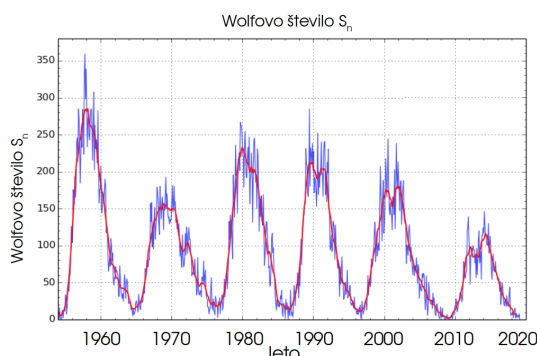
Sonce je običajna in po velikosti ter temperaturi povprečna zvezda. Sestoji iz približno 9/10 vodika in 1/10 helija ter maloštevilnih drugih elementov. Ker so v Soncu termične energije zaradi jedrskih in elektrodinamskih reakcij višje od vezavnih energij atomov, je snov v njem ionizirana. Zunanji del Sončeve atmosfere je korona. Njeno razširjanje v medplanetarni prostor imenujemo Sončev veter. Najvišja temperatura korone dosega  $10^6$  K, kar povzroča, da ima 50% elektronov in manj kot 1% protonov dovolj velike termične hitrosti, da ubežijo gravitacijskemu potencialu Sonca. Če med protoni in elektroni ne bi delovala električna sila, bi bežali večinoma elektroni in korona bi postajala vse bolj pozitivno nabita. V resnici pa elektroni prek električne sile s seboj ženejo še protone. V ravnovesju sta zato korona in Sončev veter (makroskopsko) nevtralna. Povprečna hitrost Sončevega vetra v okolici Zemlje je 300–900 km/s, njegova številna gostota pa je  $\sim 7/\text{cm}^3$ . Temperatura znaša okrog  $\sim 10^5$  K. Gostota in hitrost sta odvisni od aktivnosti Sonca, le-ta pa od števila Sončevih peg. Aktivnost s časom niha z 11-letno periodo.

Na površju Sonca gostota magnetnega polja meri  $\sim 10^{-4}$  T, na razdalji ene astronomske enote (AU – razdalja med Zemljo in Soncem) pa okrog  $\sim 10^{-9}$  T. To se ne ujema z dipolnim poljem, katerega velikost z razdaljo  $r$  pada kot  $\sim r^{-3}$  in napoveduje velikost  $\sim 10^{-11}$  T. To kaže, da se po MHD teoriji (ki je skladna tudi z meritvami) polje razširja “zamrznjeno” skupaj s Sončevim vetrom še mnogo dlje, kot sežejo znatne velikosti dipolnega polja. Sončevo magnetno polje imenujemo *medplanetarno magnetno polje* (angl. *interplanetary magnetic field, IMF*).

Prvi predlogi za obstoj Sončevega vetra so nastali ob opazovanju kometov in ugotovitvi, da so njihovi repi vedno obrnjeni proč od Sonca. V sredini 20. stoletja je Ludwig Biermann pokazal, da samo elektromagnetna energija tega pojava ne bi mogla povzročiti in očitno Sonce nanj deluje



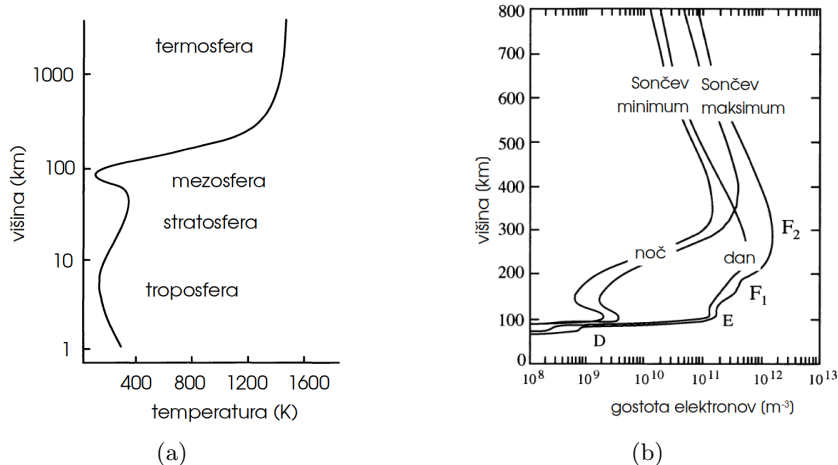
drugače. Hipoteze o stalnem Sončevem vetru so kasneje potrdile meritve z vesoljskih plovil.



**Slika 4.** Wolfovo število (tudi mednarodni indeks Sončevih peg)  $S_n$  skozi leta. Večje število pomeni večjo Sončevo aktivnost in večjo verjetnost za pojavljanje polarnega sija. Leti 2019 in 2020 tako ne bosta najboljši za opazovalce polarnega sija. Prirejeno po [28].

#### 4. Ionosfera

Zgornje plasti Zemljine atmosfere (na višinah med 60 km in 1500 km) so zaradi Sončevega ultravijoličnega sevanja in rentgenskih žarkov delno ionizirane in zelo vroče. Tamkajšnje temperature so med 300 K in 1400 K. Temperaturno odvisnost atmosfere od višine prikazuje slika 5.a. To območje, ki sovпада z atmosferskima plastema mezosfero in termosfero, imenujemo *ionosfera*. Za primerjavo z magnetosfero, ki jo obravnavamo v naslednjem poglavju, posebej poudarimo, da se ionosfera vrtili skupaj z Zemljo in preostalo (neionizirano) atmosfero.



**Slika 5.** (a) Plasti atmosfere in temperatura v odvisnosti od višine. (b) Številska gostota elektronov v odvisnosti od višine. Prirejeno po [2].

Z višino gostota atmosfere pada, številka gostota ionov in elektronov v njej pa se kljub temu povečuje vse do 300 km višine, kjer je največja. Na višinah nad 600 km postane povprečna prosta pot ionov in elektronov že zelo velika, zato so trki in s tem rekombinacija z ioni tam zanemarljivo redki. Makroskopsko je ionosfera nevtralna – številski gostoti pozitivnih ionov in elektronov sta enaki. S poskusi z radijskimi valovi so določili šibko razmejene pasove ionosfere. Najnižje je na višinah med 65 km in 80 km plast D, kjer prevladujejo ioni  $NO^+$  in  $O_2^+$ . Od plasti E se loči po tem,

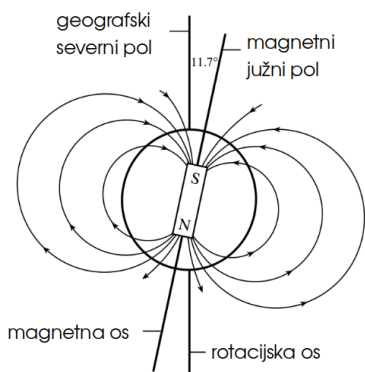
da absorbira radijske valove. Rekombinacija je zaradi dovolj velike gostote nevtralnih atomov in molekul pogosta. Nad plastjo D je med 85 km in 140 km nad površjem Zemlje plast E, ki radijske valove dobro odbija. Vzrok ionizacije so večinoma žarki X, na polarnih območjih pa jo ionizirajo tudi nabiti delci, ki povzročajo polarni sij. Nad 140 km višine je plast F1, v kateri prevladujejo ioni  $NO^+$ ,  $O_2^+$  in  $O^+$ , ki nastanejo zaradi UV sevanja. Najvišje, nad 200 km, je plast F2, ki vsebuje samo še ione  $O^+$ ,  $He^+$  in  $H^+$ . Tudi ti nastajajo predvsem zaradi UV sevanja. Število inoiziranih atomov in molekul čez dan narašča, ponoči pa se ioni in elektroni rekombinirajo, kar povzroči, da nekateri pasovi dnevno nastajajo in izginjajo. Za primer: v plasti E je dnevna koncentracija elektronov  $\sim 10^5 \text{ cm}^{-3}$ , medtem ko je nočna  $\sim 10^3 \text{ cm}^{-3}$ . Z Zemlje lahko nočno rekombinacijo ionov opazimo kot šibko svetlikanje neba (angl. *airglow*). Pomembno na stopnjo ioniziranosti vpliva še aktivnost Sonca, kar je razvidno tudi s slike 5.b.

Tehnološko zanimivo odritje, ki je vzpodbudilo raziskovanje ionosfere, je že leta 1901 uspelo Guglielmu Marconiju, ki je prvi vzpostavil radijsko zvezo prek Atlantika. Leto kasneje je Oliver Heaviside ugotovil, da se je moralo valovanje za pot okrog Zemljine krivine odbiti na ionizirani plasti. Za odboje radijskih valov je najbolj uporabna plast E, še posebej ponoči, ko je absorpcija v plasti D šibkejša.

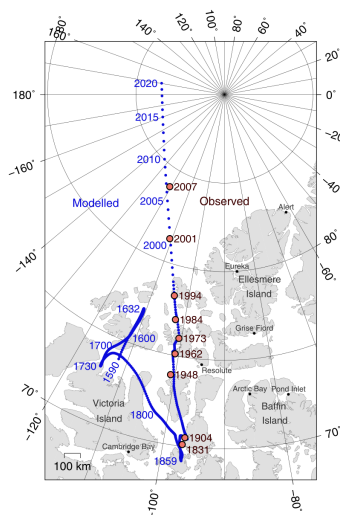
## 5. Magnetno polje v okolici Zemlje

### 5.1 Magnetno polje notranjega izvora

Že leta 1600 je William Gilbert zatrdil, da je Zemlja velik magnet. Kasneje so njegovo trditev potrdili in ugotovili, da je polje tolikšno, kot da bi v središču Zemlje tičal dipolni magnet z dipolnim momentom  $8 \times 10^{22} \text{ Am}^2$ , ki je za  $11^\circ$  nagnjen od rotacijske osi.<sup>1</sup> Magnetne silnice na površju Zemlje tečejo ob magnetnem ekvatorju vzporedno s tlemi od juga proti severu. Ko se približujemo poloma, se povečuje tudi normalna (navpična) komponenta, na polih pa ima polje le navpično komponento. Velikost gostote magnetnega polja je okrog  $65 \mu\text{T}$  na polu in približno  $25 \mu\text{T}$  na ekvatorju.



(a) Zemljino notranje magnetno polje. Prirejeno po [14].



(b) Gibanje severnega magnetnega pola [29]

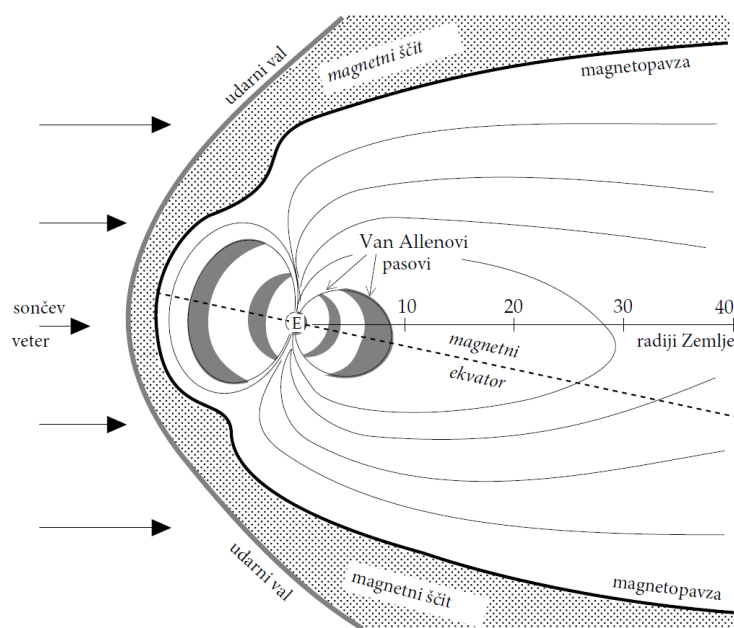
Slika 6

<sup>1</sup>Natančneje polje ustreza dipolu, ki je iz središča izmaknjen za 342 km v smeri  $6.5^\circ\text{N}$ ,  $161.8^\circ\text{E}$ . Še precej bolj izmaknjen magnetni dipol imata planeta Uran (za 0,30 svojega polmera) in Neptun (za 0,55 svojega polmera).

Izvor magnetnega polja Zemlje so konvekcijski tokovi staljenega železa v njeni sredici. Ker ti tokovi niso stacionarni, se jakost in smer magnetnega polja nenehno spreminjata. Magnetni pol se je od leta 1904 do danes premaknil za več kot 1100 km, po letu 1970 pa je hitrost spreminjanja njegove lege z  $9 \frac{\text{km}}{\text{leto}}$  opazno narasla na približno  $41 \frac{\text{km}}{\text{leto}}$ . Tudi jakost zadnjih nekaj stoletij pada s hitrostjo  $30 \frac{\text{nT}}{\text{leto}}$ . Magnetna pola se včasih zamenjata<sup>2</sup>. Dolžina časovnega intervala med posameznimi obrati je precej naključna – znaša med 0.1 in 50 milijoni let. Zadnji obrat se je zgodil pred 780.000 leti. Med obračanjem polov je magnetno polje okrog Zemlje čudnih oblik. Takrat bi se tudi polarni sij videlo na nepredvidljivih lokacijah širom planeta.

## 5.2 Magnetno polje zunanjega izvora in magnetosfera

Če upoštevamo lastnost multipolnega razvoja magnetnega polja, bi pričakovali, da bo Zemljino magnetno polje z oddaljenostjo od površja vse bolj podobno polju majhnega dipola. V resnici v okolici Zemlje to ne velja. Iz meritev *in situ* magnetnega polja v šestdesetih letih prejšnjega stoletja vemo, da se že nekaj Zemljinih polmerov ( $R_Z \approx 6370$  km) proč od površja dipolni model izkaže za napačnega. V toku nabitih delcev s Sonca, ki s seboj prenašajo “zamrznjeno” interplanetarno magnetno polje (IMF), Zemljino magnetno polje predstavlja “votlino”, ki jo imenujemo magnetosfera in jo prikazujeta sliki 7 in 8.



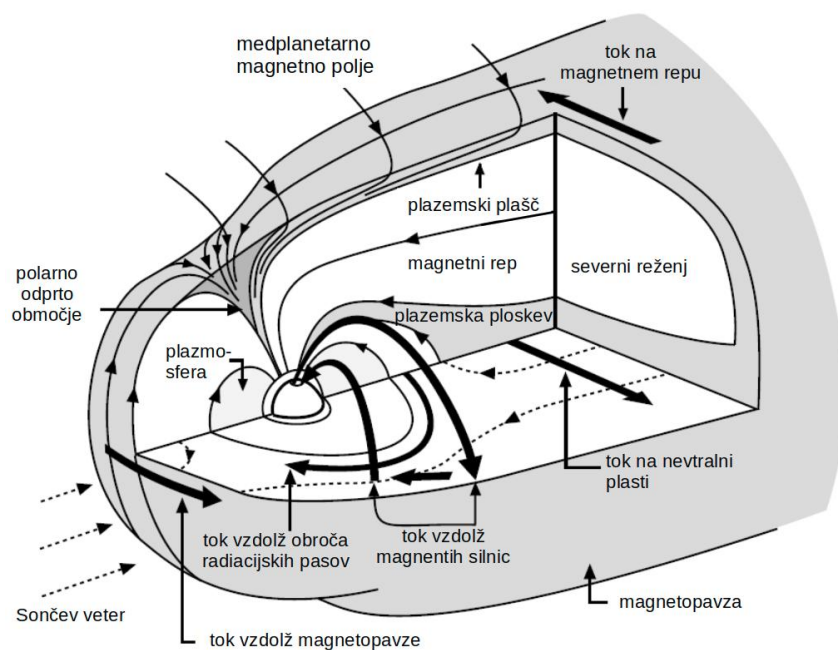
Slika 7. Sončev veter preoblikuje Zemljino dipolno magnetno polje v **magnetosfero**. Prirejeno po [14].

Magnetosfera na sončni (poldnevni) strani v povprečju sega  $10 R_Z$  od Zemlje, na senčni (polnočni) strani pa se njen magnetni rep razteza še daleč preko Lunine orbite, več kot  $1000 R_Z$  proč. Obe dimenziji se močno spreminjata z aktivnostjo Sonca. Tako se občasno, ob močnem Sončevem vetru, tudi poldnevni del magnetosfere stisne na manj kot  $6.6 R_Z$ , kjer je geostacionarna orbita in z njo veliko komunikacijskih ter meteoroloških satelitov. V taki situaciji so zelo izpostavljeni nabitim delcem. Mejo magnetosfere imenujemo magnetopavza.

Ker ima Sončev veter hitrost 300–900 km/s in ker je hitrost zvoka v njem le okrog 50 km/s,

<sup>2</sup>Magnetno polje se ob strjevanju lave ohrani v nastali kamnini. Na območjih s pretežno konstantnim dotokom lave (Severnoatlantski hrbet na dnu Atlantika) torej lahko z analizo starosti kamnin in njenih magnetnih lastnosti ugotovimo, kakšno smer je imelo magnetno polje v preteklosti.

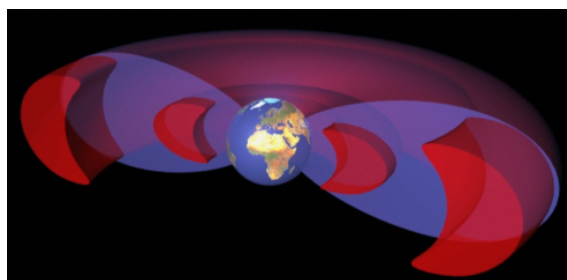
že nekaj  $\sim R_Z$  pred magnetosfero in magnetopavzo nastane lokasti udarni val (angl. *bow shock*)<sup>3</sup>. Spominja na udarni val pred ladjo, ki je hitrejša od vodnih valov. Sončev veter se tu upočasni, segreje in zgosti. Upočasnjeno plazmo, ki obteka magnetosfero, imenujemo magnetni ščit. Na nočni strani magnetosfere je magnetni rep, v katerem magnetne silnice v severnem režnju kažejo proti, v južnem pa proč od Zemlje. Med njima je tanka, skoraj nevtralna plast, kjer je šibko magnetno polje v severni smeri in se magnetne silnice sklenejo. Magnetopavza zaključuje magnetosfero in predstavlja mejno območje med IMF in plazmo Sončevega vetra na eni ter zemeljskim magnetnim poljem in plazmo iz ionosfere na drugi strani. Včasih je definirana tudi kot območje, kjer je gostota tokov največja. Poleg tokov, ki tečejo po njeni površini, obstajajo tudi manjši prečni tokovi (v smeri normale), ki so posledica dinamike v magnetnem ščitu in so zelo pomembni za prehod delcev Sončevega vetra v notranjost magnetosfere. Tik pod magnetopavzo je zato dobro določeno območje plazme, ki ga imenujemo plazemski plašč (angl. *plasma mantle*). Plazma Sončevega vetra v magnetosfero ne prihaja le skozi magnetopavzo, temveč v notranjost prodira tudi na odprtih polarnih območjih (angl. *polar cusps*). Drugi izvir plazme je ionosfera, ki smo jo opisali v 4. poglavju. Poleg plazemskega plašča je v magnetosferi še nekaj značilnih območij plazme. Zemlji najbližje je kot podaljšek ionosfere v nizkih in srednjih geomagnetnih širinah relativno hladna ( $\sim 10^3$  K) plazmosfera. Plazma v to območje prihaja difuzijsko iz ionosfere. Zaradi stika z ionosfero se tudi plazmosfera delno vrtil skupaj z Zemljo. Magnetne silnice, ki potekajo skozi to območje, se Zemlji priključijo na zmernejših geografskih širinah. Plazma je tu hladna in zato njeni delci z nizkimi energijami ne morejo povzročiti polarnega sija.



**Slika 8.** Območja plazme in tokovi v magnetosferi: polarno odprto območje (angl. *polar cusp*), plazmosfera (angl. *plasma sphere*), Sončev veter (angl. *solar wind*), plazemski plašč (angl. *plasma mantle*), plazemska ploskev (angl. *plasma sheet*), severni reženj (angl. *northern lobe*), magnetni rep (angl. *magnetic tail*), medplanetarno magnetno polje (angl. *interplanetary magnetic field*), magnetopavza (angl. *magnetopause*), tok vzdolž obroča radiacijskih pasov (angl. *ring current*), tok vzdolž magnetnih silnic (angl. *field aligned current*), tok na magnetnem repu (angl. *tail current*), tok na nevtralni plasti (angl. *neutral sheet current*). Prirejeno po [9].

<sup>3</sup>Udarni valovi v nevtralnem plinu nastanejo kot posledica binarnih trkov molekul, zato je njihova debelina odvisna od povprečne proste poti molekul v njem. Udarni val, ki se pojavi pred magnetosfero, pa ne nastane prek opisanega mehanizma, saj je na oddaljenosti ene astronomske enote od Sonca povprečna prosta pot v plazmi Sončevega vetra  $\sim 10^{12}$  m. Ta dolžina je primerljiva z 1 AU, torej trkov skorajda ni in mora udarni val nastati z nekim drugim – še ne dokončno raziskanim – mehanizmom.

Posebni območji plazme sta Van Allenova radiacijska pasova, ki v ekvatorialni ravnini obkrožata Zemljo, kot kaže slika 9. Vsebujeta visokoenergijske elektrone (nekaj MeV) in protone (10 MeV – 700 MeV), za katere so nekdanj zmotno trdili, da povzročajo polarni sij. Notranji pas je od Zemljinega ekvatorja oddaljen 1–2  $R_Z$  in vsebuje elektrone ter protone, ki izvirajo iz ionosfere in Sončevega vetra. Zunanji je oddaljen 4–7  $R_Z$ , v njem pa so le elektroni iz Sončevega vetra. Ker imajo delci visoke energije, predstavljajo pomembno oviro za vesoljske polete.<sup>4</sup> Delci so znotraj teh pasov omejeni in se gibljejo po tirnicah, ki jih v poglavju 2.1 prikazuje slika 3. Po teoretičnih izračunih trajektorij so se v preteklosti spraševali, kako je mogoče, da nabiti delci sploh pripotujejo v Van Allenove pasove. Izkazalo se je, da v ionosferi zaradi kozmičnih žarkov nastajajo tudi nevtroni, ki odletijo v vseh smereh. Z razpadom beta iz nevtrona nastaneta proton in elektron, ki pa se zaradi svojega naboja ujameta v Zemljino magnetno polje.



Slika 9. Van Allenova pasova (rdeča) in plazmosfera (vijolična) [30]

Dlje od Zemlje na nočni strani je vroča ( $\sim 10^6$  K) plazemska ploskev (angl. *plasma sheet*), ki predstavlja zalogo delcev za polarni sij. Magnetne silnice, ki povezujejo to območje z Zemljo, se stekajo na Zemljo v nočni del obroča avror (angl. *auroral oval*). V sredini plazemske ploskve je nevtralna plast, po kateri – upoštevajoč magnetno polje v magnetnem repu in v skladu z Amperovim zakonom – teče tok v smeri zora→mrak.

### 5.2.1 Transport nabitih delcev v atmosfero

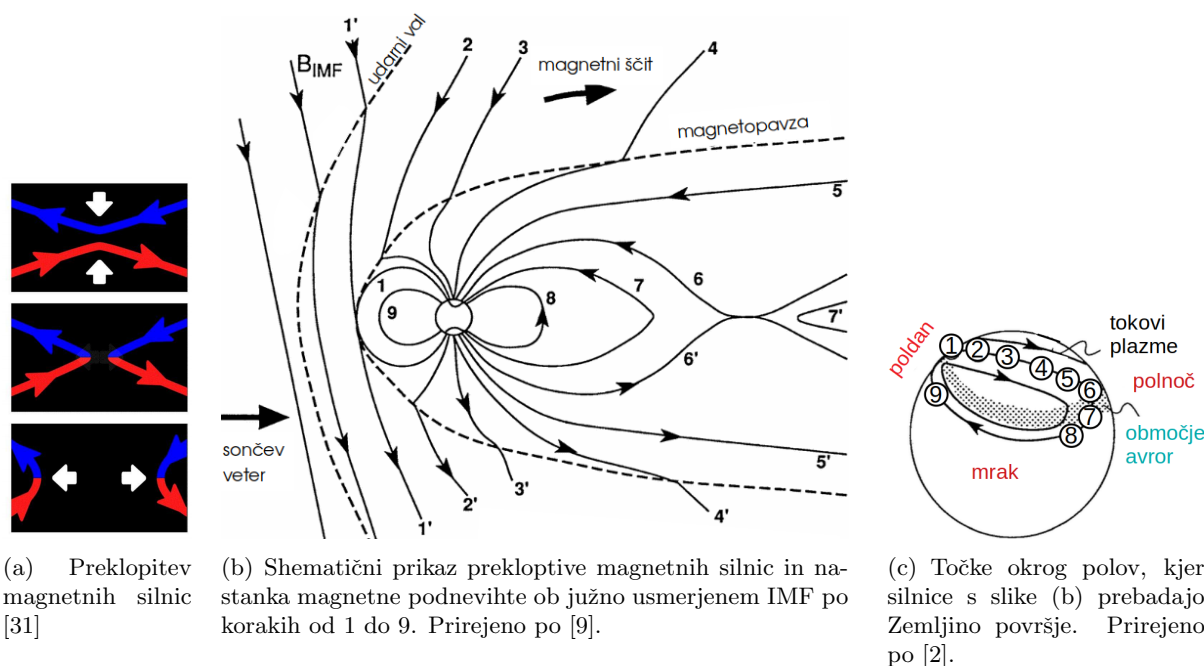
Nabiti elektroni in protoni, ki priletijo proti magnetosferi s sončne strani, se na magnetopavzi večinoma odbijejo v smeri nazaj. Pri tem se v navpičnem magnetnem polju polkrožno obrnejo, tako da tok, ki je označen tudi na sliki 8, teče v smeri zora→mrak. Kljub temu manjši delež delcev prek magnetopavze prečno vstopa v magnetosfero in vzdolž magnetnih silnic nadaljuje pot proti Zemlji – natančneje proti južnemu in severnemu ovalnemu obroču pogostih avror, kjer nastane šibak in difuzen polarni sij. S prostim očesom je viden samo pozimi v dovolj visokih geografskih širinah, ko je ves dan temno. Obroča avror ležita na približno  $70^\circ$  južne oz. severne geomagnetne širine. Široka sta okrog  $10^\circ$ . Severni je razviden tudi s slike 15 v 7. poglavju. Na istih geomagnetnih širinah nastajajo tudi nočne avrore, ki so izrazitejše.

Polarni sij na nočni strani nastane drugače kot na dnevni. Vzrok za nastanek so povečevanje energije v magnetosferi s pritekanjem delcev vanjo in nestabilnosti v magnetnem repu, te pa so posledica stalnega, vendar naključnega obračanja medplanetarnega magnetnega polja (IMF). Obrne se večkrat na dan. Najintenzivnejši pojavi polarnega sija nastanejo takrat, ko je IMF usmerjen proti jugu. Tedaj se na poldnevni strani magnetne silnice medplanetarnega polja, ki kažejo proti jugu,

<sup>4</sup>Leta 1958 so na satelit Explorer 1 namestili tudi Geiger-Müllerjev števec kozmičnih delcev za eksperiment dr. Jamesa Van Allena. Števec je deloval normalno in kazal predvidene vrednosti, dokler satelit ni prišel v območje, ki ga danes imenujemo Van Allenov pas. Tam je števec padel na ničlo. Van Allen je sklepal, da je satelit naletel na intenziven tok delcev in je zato števec odpovedal. Dva meseca kasneje so njegovo hipotezo o obstoju pasov potrdili in območji visokoenergijskih delcev poimenovali po njem.



in magnetne silnice magnetosfere, ki kažejo proti severu, preklopijo. Ta pojav prikazuje slika 10.a, zgodi pa se na območju, kjer se na sliki 10.b preklopita silnici 1 in 1'. Preklopitev povzroči "erozijo" (in s tem zmanjšanje) magnetosfere na sončni strani, za seboj pa pusti neskljenjene silnice 2, 3, 4, ki se zaradi Sončevega vetra zakrivijo proti magnetnemu repu (silnica 5). Tam se zato magnetni pretok in magnetna energija povečujeta, kar v sredini magnetnega repa, v plazemski ploskvi, povzroči novo preklopitev magnetnih silnic (silnici 6 in 6'). Nabiti delci z visokimi energijami, ki so bili do preklopitve ujeti v nevtralni plasti z zelo šibkim magnetnim poljem, se tedaj vzdolž preklopljenih silnic (na sliki silnici 7 in 8) pospešijo proti Zemlji v območju avror.<sup>5</sup>



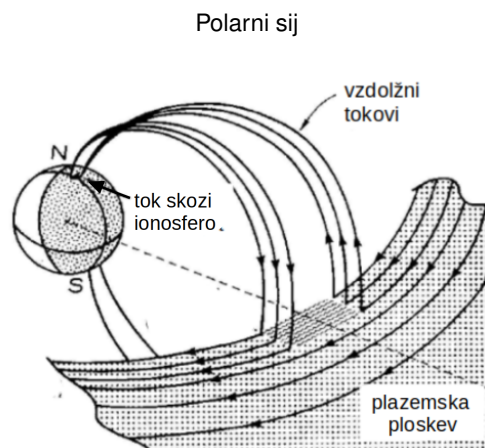
Slika 10

Za pospeševanje delcev mora biti prisotno tudi električno polje. Njegov obstoj je z meritvami potrjen, ni pa še povsem jasno, kako nastane. Delci bi sledili magnetnim silnicam tudi brez njega, le prepočasni bi bili in polarnega sija ne bi bilo. Tokovom nabitih delcev iz plazemske ploskve do ionosfere pravimo tudi Birkelandovi tokovi. Ker se ob preklopitvi silnic poveča upornost<sup>6</sup> v plazemski ploskvi v smeri zora→mrak, tok steče po daljši poti – vzdolž silnic najprej proti ionosferi, kjer se obrne in teče vodoravno skozi ionosfero (angl. *auroral electrojet*), kar je označeno tudi na sliki 10.c in se vrne nazaj v plazemsko ploskev. Omenjene tokove prikazuje slika 11. Celoten opisani proces, ki je tudi najpomembnejši mehanizem za nastanek polarnega sija, imenujemo magnetna podnevihta (angl. *magnetic/auroral substorm*). Običajno traja od ene do nekaj ur.

<sup>5</sup>Slikovito je proces preklopitve prikazan v posnetku na tej povezavi: [https://www.youtube.com/watch?v=i\\_x3s80DaKg](https://www.youtube.com/watch?v=i_x3s80DaKg)

<sup>6</sup>Prevodnost je v plazmi, ki se nahaja v magnetnem polju, anizotropna. Posplošen Ohmov zakon  $\mathbf{J} = \underline{\sigma} \cdot \mathbf{E}$  vsebuje tenzor  $\underline{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_P & \sigma_H & 0 \\ -\sigma_H & \sigma_P & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{\parallel} \end{bmatrix}$ , kjer je  $\sigma_P$  Pedersenova prevodnost v smeri pravokotne komponente električnega polja glede na magnetno polje,  $\sigma_H$  Hallova prevodnost v smeri, pravokotni na električno in magnetno polje, in  $\sigma_{\parallel}$  prevodnost v smeri, vzporedni magnetnemu polju. Definicije vseh treh prevodnosti najdemo v [3] (poglavje 3.8.3). Pomembno pa je, da se ob preklopitvi silnic spremeni smer magnetnega polja in s tem zaradi anizotropnosti tudi prevodnost v smeri zora→mrak.





Slika 11. Birkelandovi tokovi vzdolž magnetnih silnic med plazemsko ploskvijo in ionosfero. Prirejeno po [32].

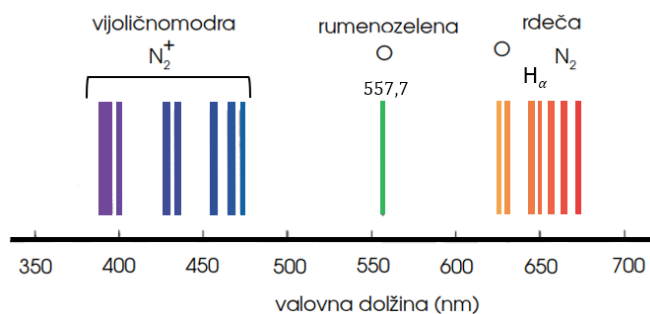
## 6. Polarni sij kot svetlobni pojav



Slika 12. Nasin posnetek polarnega sija z mednarodne vesoljske postaje (3. februarja 2012). Nad izrazitimi zelenimi žarki na obzorju se vidi tudi rdečo difuzno svetlobo. [33]

Iz magnetosfere proti Zemljini atmosferi vzdolž magnetnih silnic po vijačnicah priletijo večinoma elektroni in protoni. Tipične energije elektronov so 1–15 keV, protonov pa tudi prek 20 keV. Na višinah okrog 100 km in tudi nekaj 100 km višje trkajo z nevtralnimi ali ioniziranimi molekulami oz. atomi kisika, dušika in vodika ( $O_2$ ,  $O$ ,  $N_2$ ,  $N$ ,  $H$ ) ter sprožajo kemijske reakcije. Pri teh nastajajo produkti v vzbujenih (nestabilnih) energijskih stanjih. Redke so reakcije, kjer elektroni oz. protoni neposredno vzbujajo atmosferske delce. S prehajanjem nazaj v osnovna stanja molekule ali atomi izsevajo za posamezen prehod značilno svetlobo, kar vidimo kot polarni sij. Spekter vidne svetlobe, ki nastaja pri polarnem siju, prikazuje slika 13. Poleg vidne nastajata tudi ultravijolična in infrardeča svetloba. Posebej intenzivni črti atomarnega kisika sta pri 130,4 nm in 135,6 nm.

Opazujemo ju lahko samo iz vesolja s posebnimi detektorji. Ne prek vzbujenih stanj, temveč prek mehanizma zavornega sevanja nastajajo tudi rentgenski žarki.

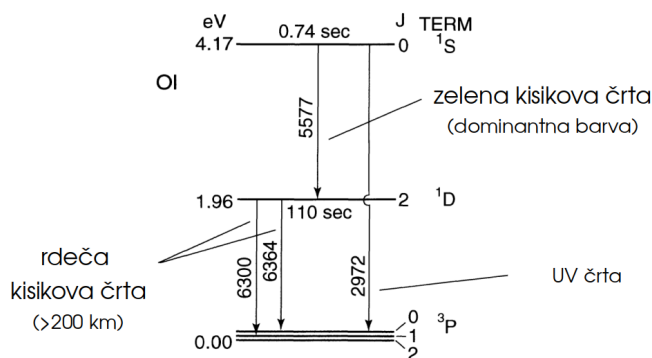
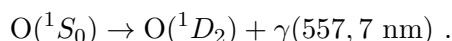


Slika 13. Spekter vidne svetlobe pri polarnem sijju. Prirejeno po [12].

Najbolj pogosta barva polarnega sija je zelenorumenena z valovno dolžino 557,7 nm. Pogoji za nastanek te svetlobe je reakcija

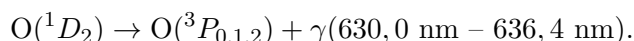


pri kateri nastane kisik v vzbujenem stanju  $^1S_0$  z razpadnim časom 0,74 sekunde. Kot prikazuje slika 14, sledi relaksacija v stanje  $^1D_2$ :



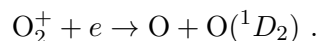
Slika 14. Prehodi med vzbujenimi stanji kisika. Prirejeno po [2].

Tak prehod ni dipolen in mu zato pravimo tudi prepovedan prehod, ki je mogoč samo v izjemno redkem plinu. Zgornji deli atmosfere temu pogoju zadoščajo, medtem ko je tak prehod v laboratoriju malo verjeten ali celo nemogoč, saj bi atom energijo najverjetneje oddal prek trka, še preden bi izseval foton. Drugi pomemben prehod je iz stanja  $\text{O}(^1D_2)$  v energijsko najnižje (tripletno) stanje kisika  $\text{O}(^3P_{0,1,2})$ , pri katerem se izseva rdeča svetloba z valovno dolžino med 630,0 nm in 636,4 nm:

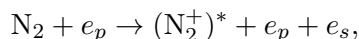


Razpadni čas stanja  $\text{O}(^1D_2)$  je 110 sekund, kar je bistveno več od razpadnega časa  $\text{O}(^1S_0)$ . To pomeni, da atomi v dolgoživem stanju lahko v času izsevanja prepotujejo že znatno razdaljo. Posledično je rdeča avrora bolj difuzna kot zelena, ki lahko tvori tudi opazne oblike (zavese, žarke). Zaradi dolgega življenjskega časa se ta proces tudi ne more zgoditi nižje od 200 km, ker je tam

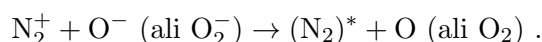
gostota atmosfere večja in bi že pred izsevanjem trčil z drugim delcem in ob tem prešel v drugo stanje. Stanje  $O(^1D_2)$  lahko nastane tudi v neposredni reakciji z vpadnim elektronom:



Reakcija



kjer  $e_p$  pomeni primarni ter  $e_s$  sekundarni elektron, opisuje nastanek molekularnih ionov dušika v vzbujenem vibracijskem stanju, kar označimo z zvezdico. Pri relaksaciji v druga vibracijska stanja se lahko izseva ves spektralni pas modrovijolične svetlobe. Rdečo svetlobo poleg kisika povzroči tudi relaksacija iz vzbujenih stanj nevtralne dušikove molekule  $N_2$ . Vzbujanje  $N_2$  poteka prek reakcije



Navedli smo barve polarnega sija, ki jih povzročajo elektroni. Manjši delež svetlobe prispevajo tudi protoni. Ti se pri upočasnjevanju v atmosferi prek trkov z nevtralnimi molekulami ( $O_2$  ali  $N_2$ ) in z izmenjavo naboja transformirajo v vzbujeni vodik, ki izseva značilni svetlobi  $L_\alpha$  (121,6 nm, UV) in  $H_\alpha$  (656,3 nm, rdeča). Valovni dolžini sta Dopplerjevo premaknjeni, zato so lahko še pred neposrednimi meritvami v vesolju ocenili hitrosti (energije) vpadnih delcev.

Zaradi različne zastopanosti posameznih ionov, atomov in molekul na različnih višinah je barva polarnega sija posredno odvisna tudi od višine. Za nekaj primerov to odvisnost prikazuje Tabela 1.

**Tabela 1.** Značilne valovne dolžine izsevane svetlobe za  $N^+$ , O in  $N_2$  ter višine, na katerih se avrora takšnih barv pojavlja

valovna dolžina (nm)	sevajoči atom, ion ali molekula	višina (km)	barva
391,4	$N^+$	1000	modrovijolična
427,8	$N^+$	1000	modrovijolična
557,7	O	90 – 150	zelena
630,0	O	> 150	rdeča
636,4	O	> 150	rdeča
656,3	$H_\alpha$	200 – 600	rdeča
661,1	$N_2$	65 – 90	rdeča
669,6	$N_2$	65 – 90	rdeča
676,8	$N_2$	65 – 90	rdeča
686,1	$N_2$	65 – 90	rdeča

Zanimivo je, da je manj kot 1 % vse energije vpadnih elektronov in protonov izsevane v obliki svetlobe. Največ energije (približno 50 %) se porabi v obliki toplote. Pomemben del (okrog 30 %) se je pretvori v kemijsko potencialno energijo. Preostali del se odbije v magnetosfero.

Ločimo štiri osnovne oblike polarnega sija: (1) mirni pasovi v smeri vzhod–zahod, (2) kombinacije različno dolgih žarkov, (3) difuzni “oblaki” in (4) vrtinčaste oblike. Difuzne oblike na višinah nad 150 km povzročijo delci z energijami nekaj 100 eV. Tisti z energijami nekaj keV oblikujejo različne oblike. Pri tem je pomemben tudi kot, pod katerim elektroni oz. protoni priletijo v atmosfero. V polarnih območjih so magnetne silnice in z njimi tirnice delcev skoraj navpične in pot do nižjih delov ozračja ni tako dolga kot v zmernejših geografskih širinah. Tja delci priletijo poševno z manjšo navpično komponento hitrosti. Posledično energijo oddajo v obliki rdeče difuzne svetlobe, še preden bi prileteli do plasti, kjer nastaja polarni sij zelene barve.

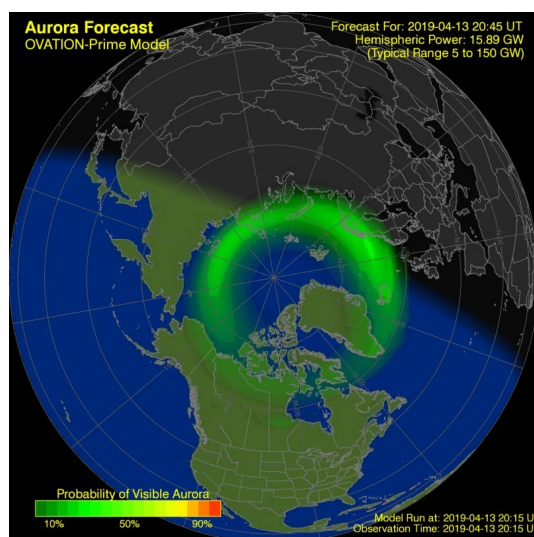
## 7. Napovedovanje polarnega sija

Polarni sij se najpogosteje pojavlja v obroču avror. Ob izjemno močnih spremembah Sončevega vetra nastane tudi v zmernejših geografskih širinah. Na nekaj let se pojavlja tudi v Sloveniji, vendar samo

v rdeči barvi. Za občutek opišimo pogostost pojavljanja polarnega sija za nekaj različnih delov sveta v času solarnega maksimuma. Skoraj popoln kraj za opazovanje polarnega sija je mestoce Andenes (geografska širina  $69^\circ$ ), ki leži na enem izmed mnogih otokov ob zahodni obali Norveške. Tam se pojavlja skoraj vsako temno in jasno noč. V Fairbanksu na Aljaski (geografska širina  $64^\circ$ ) opazujejo polarni sij približno petkrat do desetkrat na mesec, v norveški prestolnici (geografska širina  $59^\circ$ ) trikrat na mesec, na severnem delu Škotske (geografska širina  $58^\circ$ ) pa v povprečju zgolj enkrat na mesec. Na kanadsko-ameriški meji (geografska širina  $49^\circ$ ) se pojavi dvakrat do štirikrat na leto in le enkrat ali dvakrat na desetletje na Mediteranu (geografska širina  $\sim 40^\circ$ ).

Napovedi polarnega sija, ki bi bile tako točne, kot so današnje vremenske napovedi, ne obstajajo. "Vesoljskih vremenskih postaj", ki bi nenehno na istih mestih merile koncentracije in tokove plazme v magnetosferi in Sončevem vetru, za natančno opazovanje tako zapletenega pojava nimamo dovolj. Vseeno lahko tudi ljubiteljski astronomi, ki opazijo spremembe na Soncu, pričakujejo motnjo v Sončevem vetru in, upoštevaje njegovo hitrost ter razdaljo med Zemljo in Soncem, tudi povečano verjetnost za polarni sij nekaj dni kasneje.

S profesionalnim napovedovanjem se ukvarjajo večinoma nacionalne meteorološke agencije držav, ki ležijo na območjih polarnega sija. Primer je *Space Weather Prediction Center* pod okriljem ameriške *National oceanic and atmospheric administration*, *NOAA*. Prek satelitskih meritev pretoka nabitih delcev, meritev magnetnega polja, opazovanja Sonca in meritev magnetnega polja z Zemlje izdelujejo napovedi za nekaj ur ali za nekaj dni vnaprej. Primer napovedi, ki jo ponujajo javnosti, je na sliki 15.



Slika 15. Napoved polarnega sija za 13. april 2019 (Aurora Forecast; OVATION-Prime model) [34]

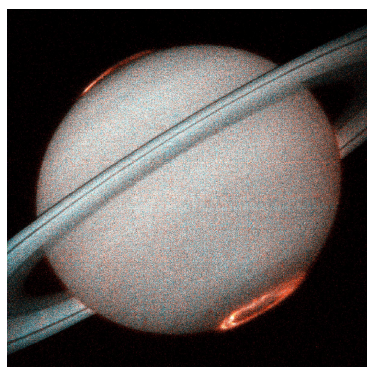
Od leta 2015 pomembne meritve za kratkoročne napovedi (in opozorila pred močnejšimi izbruhi iz Sončeve korone) prispeva satelit *DSCOVER* (*Deep Space Climate Observatory*), ki se nahaja v Lagrangeovi točki L1 (tam ima vsota gravitacijskega potenciala Sonca in Zemlje ničeln odvod, zato satelita ni težko obdržati v njeni bližini). Instrumenti na njem merijo elektromagnetno polje in pretok nabitih delcev. Hkrati tam nastajajo tudi fotografije osvetljene strani Zemlje. Izstrelitev je izvedla organizacija Space X, upravljata pa ga NOAA in NASA. Pomembne meritve prispevajo tudi starejši sateliti. Od leta 2006 v heliocentričnih orbitah krožita satelita *STEREO* (*Solar-Terrestrial Relations Observatory*) A (pred Zemljo, *A – ahead*) in *STEREO* B (za Zemljo *B – behind*). Gledano iz heliocentričnega sistema se satelita vsako leto glede na Zemljo zamakneta za  $22^\circ$ . Pomembne meritve pretokov nabitih delcev in magnetnega polja prispevajo tudi sateliti sistemov *POES* (*Polar Orbiting Environmental Satellites*) in *GOES* (*Geostationary Operational Environmental Satellite*), ki sicer večinoma služijo potrebam meteorologije ter opazovanju Zemljinega površja.



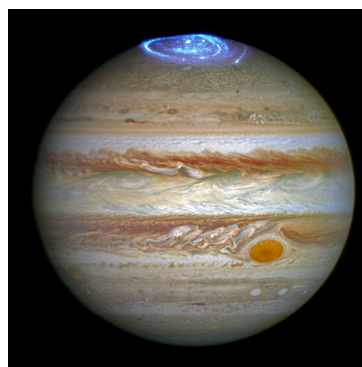
Danes, ko je turizem v vzponu, narašča število obiskovalcev severnih dežel, ki se tja odpravljajo (tudi) z namenom, da bi videli polarni sij. Prav med njimi so napovedi najbolj zaželene. Poleg tega pa vesoljsko vreme zanima tudi upravljalce električnih omrežij. V času močne Sončeve aktivnosti se občutno poslabša signal GPS, kar največje težave povzroča (sicer na tem območju redkemu) letalskemu in letalskemu prometu.

## 8. Polarni sij na drugih planetih

Polarni sij ni zemeljska posebnost. Na enak način nastaja tudi na drugih planetih. Zaradi drugačnih oblik magnetnega polja se razlikujejo oblike in območja polarnega sija. Tudi atmosfere planetov so različne, zato so spektri svetlobe raznovrstni.



(a) Saturn [12]



(b) Jupiter [35]

**Slika 16.** Atmosferi Saturna in Jupitra večinoma sestavlja vodik. Polarni sij je ultravijoličen (UV), zato sta sliki (a) in (b) sestavljeni iz po dveh posnetkov: obarvanega posnetka v UV spektru in drugega v vidnem spektru. Sliki sta z Nasinega teleskopa Hubble.

## 9. Današnje raziskave

Ker sta južno in severno območje polarnega sija na Zemlji povezana z magnetnimi silnicami in ker polarni sij povzročajo delci, ki se gibljejo vzdolž njih, so znanstveniki do leta 2009 verjeli, da sta pojava na jugu in severu zrcalna. Opazovanja so pokazala, da to vendarle ne drži. Vse do leta 2018 so vzroke za asimetrijo iskali pri združevanju magnetnih silnic v magnetnem repu. Najnovejše študije pa predvidevajo, da ta pojav celo izboljšuje simetrijo, asimetrija pa naj bi nastala ob jugozahodni usmerjenosti IMF ([24], [25]) Takrat naj bi se magnetno polje na nočni strani Zemlje nagnilo in povzročilo razliko med severnim in južnim polarnim sijem. Vsekakor raziskovanje tega področja s to študijo še ni zaključeno.

Nabitni delci, ki povzročajo polarni sij, vplivajo na navigacijske sisteme. Objave zadnjih let kažejo, da znanstveniki aktivno preučujejo mehanizme polarnega sija, ki kvarijo navigacijske signale in iščejo tehnologije, ki bi težave odpravile. Dolgo so za motnje krivili obstoj turbulenc, leta 2017 pa so raziskovalci z Univeze v Bathu (Velika Britanija) spoznali, da turbulenc v polarnem siju ni, torej motnje očitno nastanejo zaradi drugih pojavov ([22], [23]).

Novost v raziskavah je tudi ozek in vijolično osvetljen pas na nebu, ki ga prikazuje slika 17. Ljubiteljski astronomi so ga opazovali in fotografirali že desetletja. Brez posebnih razlogov so ga poimenovali Steve, znanost pa je kasneje iz tega imena skovala ime *Strong Thermal Emission Velocity Enhancement* in s tem kratico STEVE. Pojavlja se v istih, pogosteje pa celo v nižjih geografskih širinah kot polarni sij. Raziskovalci so se s tem pojavom začeli ukvarjati šele pred nekaj leti, saj so bili do tedaj večinoma prepričani, da med njim in pravim polarnim sijem ni razlike. Izkazalo se

je, da to ne drži. STEVE je svojevrsten pojav, so poročali avgusta 2018 v *Geophysical Research Letters* ([21]). S primerjanjem slik in satelitskih meritev so potrdili, da očitno ne nastane zaradi ionov in elektronov, ki sicer povzročajo polarni sij, zanesljive razlage nastanka pa še niso ponudili. Ne izključujejo možnosti, da bi ga povzročili vpadni protoni iz magnetosfere z energijami, manjšimi od 50 eV, mogoče pa je tudi, da pojav sploh ne izvira iz magnetosfere, temveč nastane v ionosferi. Vsekakor bo za podrobnejšo razlago treba počakati naslednje študije.

Četudi so polarni sij lahko opazovali že tisočletja, ga začeli znanstveno raziskovati pred več kot sto leti, še vedno zaposluje raziskovalce po vsem svetu. Nastajajo celo novi raziskovalni centri: med drugim so leta 2018 na Islandiji odprli kitajsko-islandski opazovalni center CIAO (*China-Iceland Arctic Observatory*). Zanimanje za raziskovanje polarnega sija je torej veliko in zato lahko tudi na tem področju fizike še vedno pričakujemo nova, morda nekoč tudi tehnološko uporabna odkritja.



Slika 17. STEVE na levi in polarni sij na desni strani neba [36]

## 10. Zahvala

Za vse popravke, nasvete in komentarje ter za čas, ki si ga je vzela zame, se zahvaljujem mentorju prof. dr. Simonu Širci.

## LITERATURA

- [1] Parks G. K., *Physics of Space Plasmas, An Introduction, second edition*, Westview Press (2004).
- [2] Paschmann G., Haaland S., Treuman R., *Auroral Plasma Physics*, Springer Netherlands (2003).
- [3] Fälthammar C. G., *Space Physics, Second Edition*, Royal Institute of Technology (2001).
- [4] Bone N., *Aurora: Observing and Recording Nature's Spectacular Light Show*, Springer-Verlag New York (2007).
- [5] Mohorič A., *Polarni sij in Zemljino magnetno polje*, Obzornik za matematiko in fiziko, letnik 65, št. 1, DMFA (2018), str. 12–25.
- [6] Zupan J. *Aurora Borealis – severni sij*, <https://kvarkadabra.net/2000/01/severni-sij/>, 21. 1. 2000., datum ogleda: 10. 3. 2019
- [7] Bittencourt J.A., *Fundamentals of Plasma physics, Third Edition*, Springer-Verlag New York (2004).
- [8] Kivelson M.G. in Russel C.T., *Introduction to Space Physics*, Cambridge University Press (1995).
- [9] Moldwin M., *An Introduction to Space Weather*, Cambridge University Press (2008).
- [10] Prölss G.W., *Physics of the Earth's Space Environment – An Introduction*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg (2004).
- [11] Kelley M.C., *The Earth's Ionosphere, Plasma Physics and Electrodynamics, Second Edition*, Academic Press (2009).



- [12] Lang K.R., *The Cambridge Guide to the Solar System, Second Edition*, Cambridge University Press (2011).
- [13] Scherer K., Fichtner H., Heber B., Mall U., *Space Weather, The Physics Behind a Slogan*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg(2005).
- [14] Lowrie W., *Fundamentals of Geophysics, Second Edition*, Cambridge University Press (2007).
- [15] Karttunen H., Kröger P., Oja H., Poutanen M., Donner K.J., *Fundamental Astronomy, 5th Edition*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg (2007).
- [16] Zmrzlikar J., *Zemljina magnetizem*, Seminar 1, Fakulteta za matematiko in fiziko, Univerza v Ljubljani (2012), [http://mafija.fmf.uni-lj.si/seminar/files/2011\\_2012/Zemljina\\_Magnetizem\\_1\\_2.pdf](http://mafija.fmf.uni-lj.si/seminar/files/2011_2012/Zemljina_Magnetizem_1_2.pdf), datum ogleda: 26.8.2019.
- [17] <http://stream1.cmatc.cn/pub/comet/SpaceWeather/comet/ha0/aurora/>, datum ogleda: 17. 3. 2019
- [18] <http://www.physics.usyd.edu.au/~cairns/teaching/>, datum ogleda: 17. 3. 2019
- [19] Takahiro O. *The Magnetosphere*, <http://www.nict.go.jp/publication/shuppan/kihou-journal/journal-vol149no3/0301.pdf>, datum ogleda: 30. 3. 2019
- [20] Keyser J., Stankov S., Verhulst T. *Earth's magnetosphere and ionosphere*, Journal of the Royal Belgian Association of Electrical Engineers, vol. 130, junij 2014.
- [21] Gallardo-Lacourt B., Liang J., Nishimura Y., Donovan E. *On the Origin of STEVE: Particle Precipitation or Ionospheric Skyglow?*, Geophysical Research Letters, vol. 45, avgust 2018.
- [22] GPS World, *Turbulence not the culprit for Northern Lights' effect on GNSS*, <https://www.gpsworld.com/turbulence-not-the-culprit-for-northern-lights-effect-on-gnss/>, datum ogleda: 26. 8. 2019
- [23] Forte B., Coleman C., Skone S., Häggström I., Mitchell C., Da Dalt F., Panicciari T., Kinrade J., Bust G. *Identification of scintillation signatures on GPS signals originating from plasma structures detected with EISCAT incoherent scatter radar along the same line of sight*, Journal of Geophysical Research: Space Physics, 122, str. 916–931, november 2016.
- [24] *New study presents surprising explanation for differences in southern and northern lights*, <https://news.agu.org/press-release/new-study-presents-surprising-explanation-for-differences-in-southern-and-northern-lights/>, datum ogleda: 26. 8. 2019
- [25] Ohma A., Østgaard N., Reistad J. P., Tenfjord P., Laundal K. M., Snekvik K., Haaland S. E., Fillingim M. O. *Evolution of asymmetrically displaced footprints during substorms*. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 123, str. 10030–10063, december 2018.
- [26] <https://www.ngdc.noaa.gov/stp/satellite/poes/productinfo.html>, datum ogleda: 26. 8. 2019
- [27] <https://slideplayer.com/slide/7371906/>, prosojnica 14, datum ogleda: 13. 4. 2019
- [28] <http://www.sidc.be/silso/monthlyssnplot>, datum ogleda: 13. 4. 2019
- [29] [https://en.wikipedia.org/wiki/Polar\\_drift](https://en.wikipedia.org/wiki/Polar_drift), datum ogleda: 13. 4. 2019
- [30] <http://sci.esa.int/cluster/52831-earth-plasmasphere-and-the-van-allen-belts/>, datum ogleda: 13. 4. 2019
- [31] [https://www.cfa.harvard.edu/~namurphy/Lectures/Ay253\\_10\\_Reconnection.pdf](https://www.cfa.harvard.edu/~namurphy/Lectures/Ay253_10_Reconnection.pdf), datum ogleda: 13. 4. 2019
- [32] <https://www.kth.se/social/files/57f255b1f276542f1a16d622/Lecture%209-2016.pdf>, datum ogleda: 14. 4. 2019
- [33] <https://www.nasa.gov/image-feature/aurora-and-manicouagan-crater/>, datum ogleda: 14. 4. 2019
- [34] <https://www.swpc.noaa.gov/products/aurora-30-minute-forecast>, datum ogleda: 13. 4. 2019
- [35] <http://hubblesite.org/images/news/release/2016-24>, datum ogleda: 13. 4. 2019
- [36] <http://www.astronomy.com/news/2018/08/steve-the-aurora-isnt-an-aurora-after-all>, datum ogleda: 14. 4. 2019
- [37] <https://www.best-served.co.uk/destinations/norway/itineraries/northern-lights-in-troms-norway-135747>, datum ogleda: 14. 4. 2019