

FIZIKA POLARNEGA SIJA

DAVID TEGELTIJA

Fakulteta za matematiko in fiziko
Univerza v Ljubljani

Polarni sij, ali s tujko *aurora polaris*, je izraz, s katerim opišemo svetleče nebo, ki je značilno za arktični krog. Ta pojav se lahko pojavi tako na severnem kot na južnem polu in ni specifičen samo za Zemljo. Prav nasprotno, gre za pojav, ki smo ga opazili že na drugih planetih v našem Osončju. Le-ta nastane tako, da visokoenergijski nabiti delci iz vesolja, ujeti znotraj magnetnega polja, pridejo do planeta, ki ima svoje lastno magnetno polje. Za primer planeta Zemlje, vir takih delcev predstavlja Sonce. Magnetni polji med sabo interagirata in s tem omenjeni visokoenergijski delci pridejo do atmosfere planeta, kjer svoj višek energije predajo atomom in molekulam v tej atmosferi. S tem jih vzbudijo v višja kvantna stanja. Vzbujeni atomi in molekule emitirajo višek energije v obliki fotonov, ki so lahko v vidnem spektru, kar se na nebu pojavi kot polarni sij.

THE PHYSICS OF POLAR LIGHTS

Aurora polaris, commonly known as the polar lights is an expression used to describe the natural light display in the Earth's sky, typical for the arctic circle. The phenomenon can occur on the North or South pole and is not exclusive for planet Earth. On the contrary, it has been observed on other planets in our Solar System. The origin for this phenomenon comes from the collision between high-energy particles from outer space, trapped inside a magnetic field, and a planet's own magnetic field. In the case of planet Earth, the Sun is the source of such particles. The colliding magnetic fields interact with each other and consequently the aforementioned high-energy charged particles reach the planet's atmosphere where they give their excess energy to surrounding atoms and molecules in that atmosphere. With this, they excite them into higher quantum states. The excited atoms and molecules then emit their excess energy in the form of photons that can be in the visible spectrum which we then see as the polar lights.

1. Uvod

Polarni sij ljudje poznajo že tisočletja. Prvi zapisi o tem naravnem pojavu segajo nazaj vse do antičnih Grkov, Rimljanov in celo Kitajcev okoli 2000 let pred našim štetjem. Ljudje so si skozi celotno zgodovino ta veličasten pojav razlagali na različne načine. Vse od tega, da naj bi barve na nebu predstavljale duhove prednikov, kot so si to tolmačili Inuiti, do tega, da naj bi polarni sij predstavljal most do neba, ki so ga zgradili bogovi, kot so si to razlagali Vikingi.

V moderni zgodovini je bil eden izmed prvih, ki so polarni sij preučevali kot naravni pojav, razsvetljenski francoski znanstvenik Gassendi. Po nekaterih virih naj bi ga on tudi poimenoval *aurora borealis* oziroma severna zora (ang. *northern dawn*). Spet drugi viri pravijo, da naj bi ga tako poimenoval Galileo Galilei po Aurori, rimski boginji zore, beseda *borealis* pa naj bi izhajala iz imena starogrškega boga severnega vetra, Boreas. Kakorkoli že, ime v slovenščino prevajamo kot severni polarni sij. Ta pojav pa ni značilen samo za severni pol. Prvi, ki ga je opazil na južnem polu, je bil James Cook leta 1773, ki je pojav nato poimenoval *aurora australis* [1]. Če govorimo o tem pojavu na splošno, torej zajamemo tako severni kot južni sij, uporabljamo izraz polarni sij ali pa *aurora polaris*.

Z razvojem moderne fizike in raziskovanjem vesolja danes vemo, kaj povzroča severni sij. V članku si bomo pogledali kaj privede do njegovega nastanka, poleg tega pa tudi lastnosti samega pojava.

2. Sonce - izvor nabitih delcev

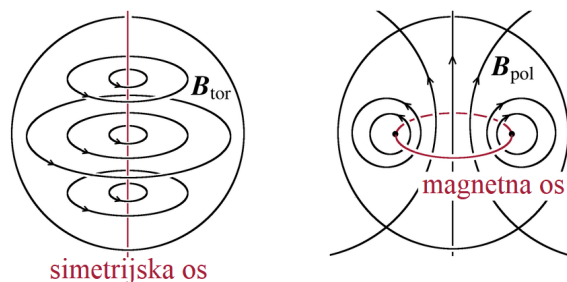
Zgodba o polarnem siju se začne na Soncu. V njem poteka fuzija, zlivanje jeder, s čimer iz lažjih jeder (H) nastajajo težja (He), pri tem pa se sproščajo ogromne količine energije. V njem so zato prisotne tako visoke temperature, da se delci ionizirajo, kar pomeni, da so elektroni prosto gibljivi,

torej ločeni od jedra. Takemu stanju snovi, ki mu nekateri rečejo tudi četrto agregatno stanje, rečemo plazma. Sonce je torej v celoti zgrajeno iz plazme, supervroče mešanice elektronov in ionov.

2.1 Sončevo magnetno polje

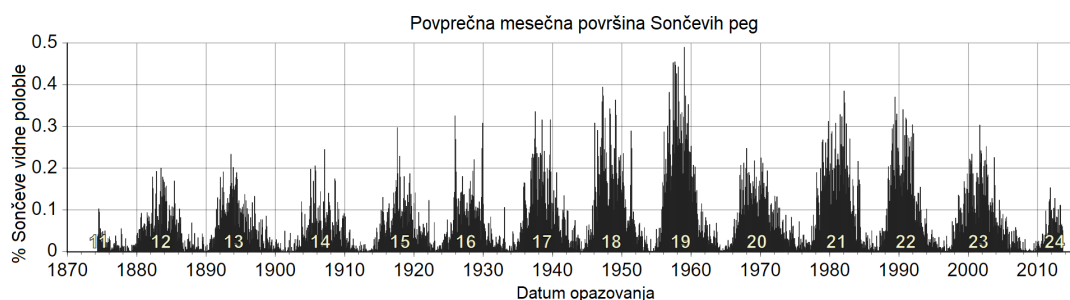
Plazma se premika navzven, proti površju Sonca, zaradi konvekcije. Rotacija Sonca samo še dodatno povzroča njeno mešanje. Gibanje nabitih delcev posledično povzroča magnetno polje znotraj in okoli Sonca. Imamo torej opravka s tokovi nabitih delcev (električnimi tokovi), ki ustvarjajo magnetno polje, kar pa še dodatno vpliva na gibanje teh tokov. Poleg tega električna nevtralnost plazme zahteva, da se ti plazemski tokovi povežejo v električne tokokroge. Tako nastala „vezja“ posedujejo lasten upor in induktivnost, kar še dodatno oteži obravnavo sistema. V splošnem ga je treba obravnavati tako, da upoštevamo vse lastnosti takšnega vezja [2]. Hitro lahko opazimo, da imamo opravka z zelo zapletenim in sklopljenim sistemom vzrokov in posledic med nabitimi delci in polji, ki jih obdajajo. Tak sistem imenujemo sončev dinamo (ang. *solar dynamo*).

Sončev dinamo težko opišemo samo z modeli, zato na tej točki pridejo na vrsto eksperimentalna opažanja Sonca. Obliko Sončevega magnetnega polja nad njegovo atmosfero lahko opazujemo preko plazme, ki jo ta polja vodijo. Poleg tega lahko s pomočjo inštrumenta, imenovanega magnetograf, merimo jakost in smer magnetnega polja na Sončevi površini oziroma fotosferi. Tovrstna opažanja so za magnetni sistem Sonca pokazala, da sledi 11-letnemu ciklu. V tem ciklu pride tako do Sončevega maksimuma kot do Sončevega minimuma njegove aktivnosti. Oba sta posledici izmenjave energije med toroidnimi (ang. *toroidal*) in poloidnimi (ang. *poloidal*) magnetnimi polji Sonca, katera sta prikazana na sliki 1.



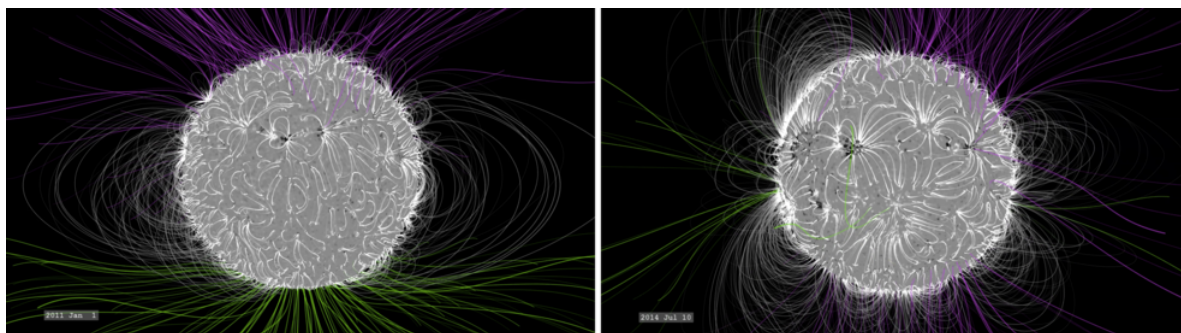
Slika 1. S črnimi zaključnimi zankami so na levi sliki prikazana Sončeva toroidna magnetna polja, na desni sliki pa Sončeva poloidna magnetna polja [16]

Izvor za izmenjavo energije med tema dvema poljema se skriva v tem, da se Sončeva magnetna pola na približno 11 let zamenjata. Slika 2 prikazuje tovrstno zamenjavo polov s tem, da prikazuje delež Sončeve vidne poloble, s čimer lahko opišemo tudi povprečno površino, ki jo predstavljajo Sončeve pege. Površina Sončevih peg pove kako aktivno je Sonce, torej posredno predstavlja Sončev cikel.



Slika 2. Sončev 11-letni cikel prikazan skozi stoletja opažanj deleža Sončeve vidne poloble oziroma Sončevih peg [17].

Z večanjem Sončeve aktivnosti se večajo tudi zanke magnetnega polja, ki izstopajo iz njegove površine in lahko dosežejo velikosti planeta Zemlje. Za različne čase v Sončevem ciklu so prikazane na sliki 3. Te zanke magnetnega polja se lahko tudi zlomijo in s tem izvržejo velikanske količine nabitih delcev (plazme) in energije, čemur rečemo Sončev veter. Takemu dogodku rečemo tudi Sončev izbruh. Z vsakim Sončevim izbruhom se njegovo magnetno polje malce zgladi, dokler ne doseže osnovnega stanja, ki mu rečemo Sončev minimum. V tem obdobju so Sončevi izbruhi manj pogosti. Po tem Sončevo magnetno polje skozi čas postaja vedno bolj zapleteno, dokler njegova aktivnost ne doseže vrhunca, ki mu prikladno rečemo Sončev maksimum, približno 11 let po prejšnjem maksimumu, kar na sliki 2 predstavljajo vrhovi [3].



Slika 3. Primerjava Sončevega magnetnega polja in njegove kompleksnosti za različna časa v njegovem ciklu. Leva slika je bila posneta januarja 2011, tri leta po Sončevem minimumu. Polje je, na tej sliki, še relativno enostavno in skoncentrirano pri polih, povsem drugačno pa je na desni sliki, ki je bila posneta julija 2014, pri Sončnem maksimumu. Hitro lahko opazimo razliko v kompleksnosti polja. Magnetne silnice povsod izstopajo od površine samega Sonca, kar je idealno za Sončeve izbruhe [3].

2.2 Sončev veter

Sonce iz svoje zgornje plasti atmosfere, ki ji pravimo tudi korona, v Osončje nenehno pošilja nabite delce (večinoma elektrone in protone) in energijo (elektromagnetno valovanje). Tej emisiji pravimo Sončev veter. Sončeva korona ima temperaturo približno 10^6 K in je občutno bolj vroča kot njegova površina, za kar še vedno ni natančnega pojasnila. Ena izmed možnih razlag je ta, da so v plazmi prisotna „električna vezja“, ki shranjujejo magnetno energijo. Ta energija se lahko, če se tokokrog plazme prekine (na primer s plazemsko nestabilnostjo), sprosti, kar povzroči ogrevanje plazme in njeno pospeševanje [2]. Z ogrevanjem plazme se ogreva tudi korona. Ker je približno 10-milijonkrat redkejša kot površina Sonca, je na pogled tudi veliko bolj meglena, zaradi česar jo težko zaznamo. Izjema je Sončev mrk, med katerim je lepo vidna tudi s prostim očesom.

Kljub visoki temperaturi Sončeve korone je povprečna hitrost delcev v tem delu okoli 145 km/s. Hitrost, potrebna za pobeg Sončevi gravitaciji, je okoli 618 km/s, kar pomeni, da delci ne morejo z lahkoto pobegniti Soncu. Vseeno pa se najdejo nekateri, ki jim to uspe, ti pa potem tvorijo Sončev veter. Ta se po vesolju giblje s povprečno hitrostjo 400 km/s. Zaradi Sončevega vetra Sonce dobesedno „izhlapeva“, saj vsako sekundo izgubi približno 1.3×10^{36} delcev, kar se prevede na masno izgubo $1.3 \times 10^6 - 1.9 \times 10^6$ ton/s. Vseeno pa nam ni treba skrbeti, da bomo zaradi tega izgubili Sonce, saj je v vsem času, odkar obstaja, izgubilo le 0.1% svoje začetne mase [4].

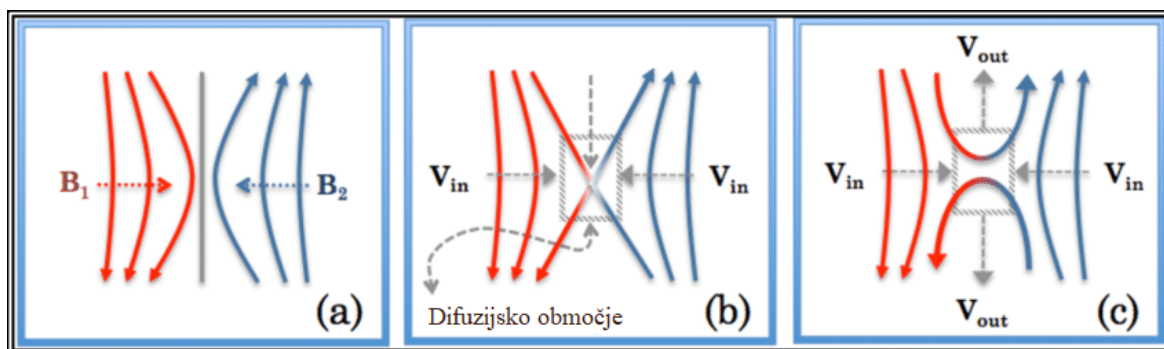
V Sončev veter je lahko vključena tudi večja količina plazme, ki se od Sonca odcepi zaobjeta v njegovo magnetno polje. Takrat govorimo o koronalnem masnem izbruhu (ang. *coronal mass ejection*, CME). Prav prisotnost takih izbruhov je ključna za nastanek polarnega sija. Izvor za CME se skriva v pojavu, ki ga imenujemo magnetna rekombinacija, o katerem bomo malce več povedali v nadaljevanju. Pri tem pojavu se sprostijo velike količine energije magnetnega polja tako, da se magnetne silnice med sabo ponovno povežejo v drugačni konfiguraciji kot prej. V tem primeru se od površine Sonca odcepi večja masa plazme, ki lahko doseže hitrosti tudi do več milijonov km/h.

3. Nabiti delci in magnetna polja

Za polarni sij nabiti delci in magnetna polja predstavljata osnove za njegov nastanek. Ta dva pojma sta tesno povezana skozi celotno zgodbo polarnega sija. Že pri izvoru nabitih delcev je na Soncu prisotno magnetno polje. Ko se kasneje plazma, zaobjeta v del Sončevega magnetnega polja, približuje planetu z lastnim magnetnim poljem, je ravno interakcija med tema dvema poljema, ki poteka preko magnetne rekombinacije, ključnega pomena za nastanek polarnega sija. Pri tem pa so zelo pomembni tudi nabiti delci, na katere omenjena interakcija močno vpliva.

3.1 Magnetna rekombinacija

Magnetna rekombinacija (ang. *magnetic reconnection*) je osnovni mehanizem, s katerim se magnetna energija sprošča v vesolju, saj dovoljuje, da magnetne silnice spremenijo svojo topologijo. V najbolj osnovni obliki njena razlaga vsebuje nasprotno usmerjeni magnetni polji, ki se lahko, če med njima ni drugega polja, premikata drugo proti drugemu. Ko se polji stakneta, razpadeta oziroma „počita“, njuni polovici pa se potem ponovno povežeta. Ta proces, v poenostavljeni obliki, prikazuje slika 4.

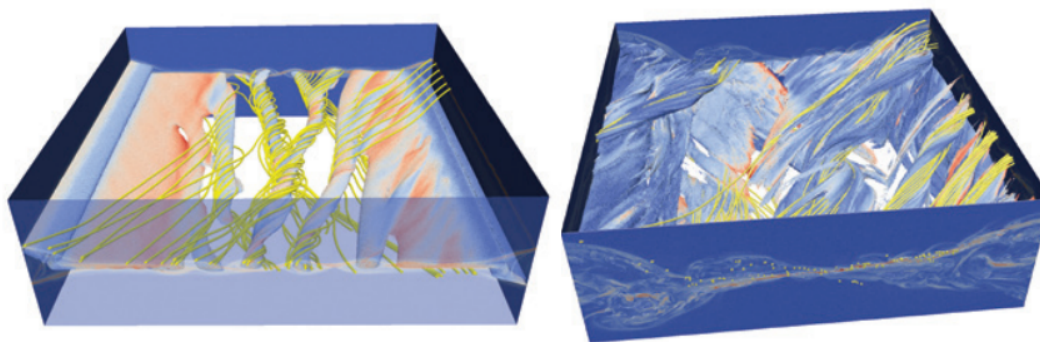


Slika 4. Dvorazsežna predstava magnetne rekombinacije. Slika a) prikazuje začetno stanje magnetne rekombinacije, ko se nasprotno usmerjeni polji približujeta eno drugemu. Slika b) predstavlja dejanski proces magnetne rekombinacije, slika c) pa potem končno sliko tega pojava, ko se polji oddaljajeta eno od drugega [18].

Ko pride do tega, silnice polja tvorijo močno zaobljene „frače“, ki se obnašajo kot gumijast trak. To pomeni, da se med sabo odbijajo in s tem plazmo vlečejo stran od kraja prvotnega stika. Tukaj silnice polja tvorijo značilno obliko X. Lahko si predstavljamo, da se točka stičišča, katere bližina je znana kot območje difuzije, razteza v tretjo dimenzijo, pravokotno na ravnino, v kateri poteka rekombinacija [5].

Ker imamo prisotno dinamično magnetno polje, nam Maxwelllove enačbe narekujejo, da mora biti zraven prisotno tudi električno polje. Skupaj z magnetnim poljem se torej rekombinira tudi električno polje, za katerega mora v območju difuzije veljati, da vzdržuje tok naboja skozi to območje. To se zgodi s pospeševanjem plazme, ki vstopa v difuzijsko območje. Hkrati pa morajo rekombinirajoča se električna polja to plazmo tudi segrevati, da se ohranja ravnovesje tlaka z zunanjim sistemom [6].

V splošnem se lahko magnetna polja stikajo pod poljubnimi koti. Zaradi tega ta proces vsebuje vse tri prostorske dimenzije in vključuje dinamične tokove, vključno z vrtinci, podobnimi tornadom, ki tvorijo vrvi magnetnega pretoka (cevi magnetnih silnic, ki se premikajo skupaj s plazmo, katero zaobjemajo). Slika 5 prikazuje simulacijo magnetne rekombinacije v treh dimenzijah.



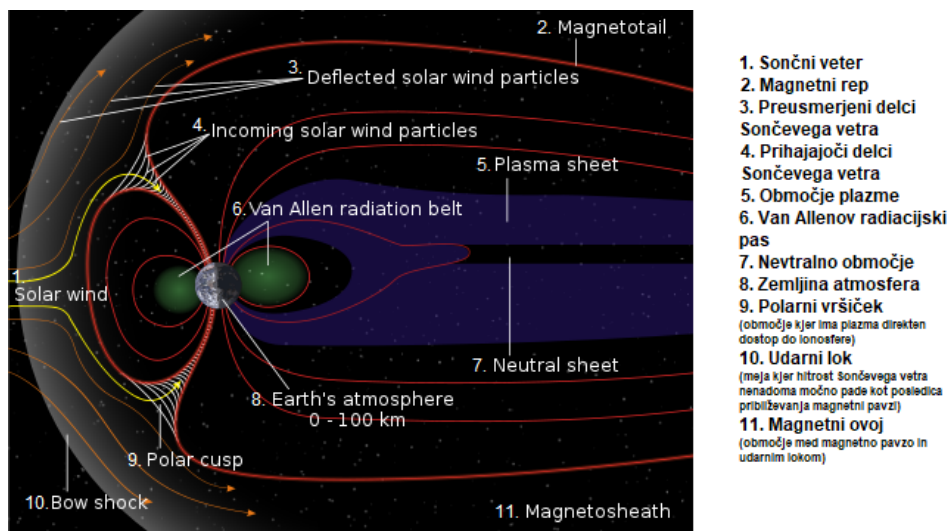
Slika 5. Trirazsežna predstava magnetne rekombinacije. Leva slika prikazuje prepletene vrvi magnetnega pretoka, ki se tvorijo na začetku procesa. Desna slika prikazuje sekundarne vrvi magnetnega pretoka, ki se razvijejo v kasnejših časih procesa magnetne rekombinacije. Izopovršine delčne gostote so pobarvane z odtenki modre in rdeče, kar prikazuje magnitudo gostote električnega toka, z rumeno barvo pa so označene magnetne silnice. Plazma v tem primeru, v območje na sliki, vstopa iz zgornje in spodnje ploskve, izstopa pa preko leve in desne stranice [5].

Pojav magnetne rekombinacije je v resnici zelo zapleten. Združuje elektromagnetizem z magnetohidrodinamiko, pri čemer je potrebno upoštevati splošen Ohmov zakon za električne tokove, ki tečejo skozi tekočine, zmožne prevajanja, ki jih predstavlja plazma. Poleg tega so v pojavu prisotne tudi magnetne turbulence, ki se pojavijo zaradi različnih hitrosti nabitih delcev znotraj območja difuzije, a se v vse te podrobnosti ne bomo spuščali [5].

Sedaj, ko vemo, kako poteka proces magnetne rekombinacije, to znanje uporabimo na primeru nastanka severnega sija. Kot smo že omenili, plazma po vesolju potuje ujeta v lastno magnetno polje, z izvorom na Soncu, ki se pod normalnimi okoliščinami ne uniči ali združi z drugim poljem. Ko pa se to polje približa nekemu drugemu polju, na primer Zemljinemu, se pod pravimi pogoji celoten vzorec in obnašanje obeh polj spremeni, čemur pa, kot smo opisali zgoraj, rečemo magnetna rekombinacija. Topologija obeh polj se pri tem prerazporedi v drugačno konfiguracijo kot prej, pri čemer se sprostito velike količine energije. Magnetna rekombinacija torej sprošča energijo, shranjeno v magnetnih poljih, ki pa se pri tem procesu pretvarja v toplotno in kinetično energijo delcev. Gre torej za ključen proces, zaslužen za nastanek mnogih vesoljskih naravnih pojavov, med katerimi je tudi polarni sij.

3.2 Magnetosfera

Zemlja ima zaradi svojega železno-niklovega jedra lastno magnetno polje, ki jo v celoti zaobjema in se razteza daleč v vesolje. To prostornino v vesolju, ki je pod vplivom Zemljinega magnetnega polja, imenujemo magnetosfera. Zemljo ščiti pred Sončevim vetrom in ostalimi škodljivimi kozmičnimi sevanji. Odbija večino nabitih delcev iz Sončevega vetra in jim preprečuje vstop v Zemljino atmosfero. Njena oblika in velikost se nenehno spreminjata, saj jo ves čas bombardira Sončev veter. Lahko si celo predstavljamo, da Sončev veter "pritiska" na magnetosfero, s čimer jo na sončni strani stisne. S tem se magnetosfera na nasprotni strani Zemlje, kjer je noč, raztegne v nekakšen rep, usmerjen stran od Sonca [7]. Tej tvorbi, ki se lahko razteza tudi do 500 000 km (to je približno 38 premerov Zemlje) stran od Zemlje v vesolje, rečemo magnetni rep (ang. *magnetotail*). Pravi razlog za nastanek magnetnega repa je magnetna rekombinacija. Ta rep je pomemben pri vstopu nabitih delcev v Zemljino atmosfero in je, poleg drugih pomembnih delov interakcije Sončevega vetra z Zemljino magnetosfero, prikazan na sliki 6.



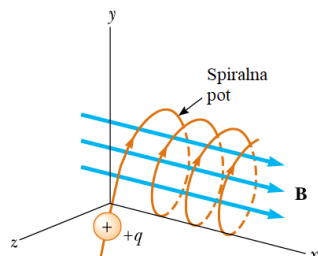
Slika 6. Poenostavljena interakcija Sončevega vetra z Zemljino magnetosfero. Z rumenimi črtami je predstavljen prihajajoč Sončni veter, z oranžnimi odbiti delci Sončevega vetra, z rdečimi črtami pa so predstavljene silnice Zemljinega magnetnega polja. Tvorba magnetnega repa je prikazana kot zvitje magnetnih silnic na nasprotni strani vpadnega Sončevega vetra [19].

Tako kot sončni veter, v katerem je plazma skozi celotno potovanje skozi vesolje prisotna zaradi nizke gostote prostih elektronov v njem oziroma dobrega vakuumu, tudi magnetosfera vsebuje plazmo, saj le-ta sestavlja 99% vidnega vesolja, torej je prisotna tudi v tistem delu prostora. Prisotnost plazme omogoča, da lahko snov prevaja elektriko. To pomeni, da bi se načeloma energija med Sončnim vetrom in magnetosfero lahko prenašala preko električnih tokov, ki jih ustvari pojav dinamika (ang. *dynamo effect*), ki ga je odkril Michael Faraday. Ta pravi, da če se dva prevodnika - ki ju v našem primeru predstavljata tako Sončni veter, kot tudi magnetosfera, saj je v obeh prisotna plazma - nahajata v zunanjem magnetnem polju in se premikata drug glede na drugega, poleg tega pa sta povezana v sklenjen električni krog, potem v tem krogu začne teči električni tok. V praksi se to ne zgodi zaradi močno anizotropne prevodnosti plazme, ki prevaja dobro v smeri magnetnih silnic in slabo pravokotno nanje. Posledično se mora energija iz sončnega vetra na Zemljino magnetosfero prenašati na drugačen, bolj učinkovit način. Na tem mestu nastopi magnetna rekombinacija [8].

3.3 Vstop delcev v Zemljino atmosfero

Preden lahko nabiti delci v plazmi dosežejo Zemljino atmosfero, morajo prvo postati del njene magnetosfere. To se lahko, s pomočjo magnetne rekombinacije, zgodi preko čelnega trka Sončevega vetra in Zemljinega magnetnega polja. Poleg tega pa obstaja še drug način, kako lahko nabiti delci pridejo v magnetosfero. Ta način poteka v magnetnem repu, ki je, kot smo že omenili, del Zemljine magnetosfere, ki se razteza na njeni nočni strani daleč v vesolje. Nastanek repa je posledica Sončevega vetra, ki preko magnetne rekombinacije na nočno stran Zemlje pošlje rekombinirane silnice Zemljinega magnetnega polja in magnetnega polja, ki je pred rekombinacijo zaobjemalo plazmo. S tem se v magnetni rep prenese tudi magnetni pretok. Takšne rekombinirane silnice se lahko, zaradi „tlaka“ Sončevega vetra, raztegnejo tako daleč, da počijo, tako nekako kot počii gumica, kadar jo preveč napnemo [9]. Pri tem zlomu silnic zopet ne gre za nič drugega kot za magnetno rekombinacijo. Del novih magnetnih polj se odcepi v smeri stran od Zemlje, v vesolje, del pa se usmeri nazaj proti Zemlji. Slednji je zaslužen za večino nočnih pojavov polarnega sija, saj prinese visokoenrgijske delce, ki dobijo energijo preko magnetne rekombinacije, na pole planeta tudi takrat, ko je magnetosfera na sončni strani stacionarna.

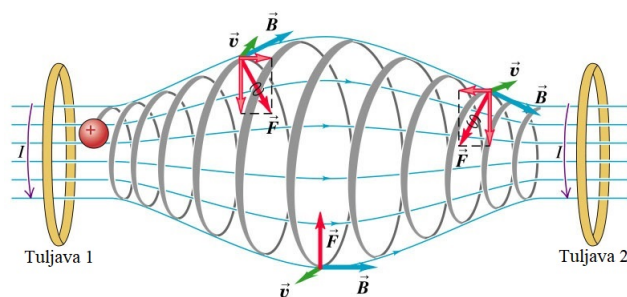
Ob vstopu nabitih delcev v magnetosfero se njihovo gibanje naenkrat spremeni. Kot vemo, imamo opravka z nabitimi delci v magnetnih poljih, za katere veljajo enačbe elektromagnetnega polja. Te nam narekujejo, da magnetno polje delcev ne pospešuje, ampak jim samo spremeni trajektorijo, kar pomeni, da se nabiti delci okoli magnetnih silnic vrtijo zaradi Lorentzove sile $\mathbf{F} = e\mathbf{E} + e\mathbf{v} \times \mathbf{B}$. Gibanje nabitega delca v zunanjem magnetnem polju je prikazano na sliki 7.



Slika 7. Gibanje nabitega delca, ujetega v magnetnem polju.

Točno to se dogaja tako v Sončevem vetru, v katerem je plazma ujeta v delčku Sončevega magnetnega polja, kot tudi v primeru, kjer so delci ujeti znotraj Zemljine magnetosfere. Pričakovali bi, da ko delec pride do severnega ali južnega pola, z lahkoto preide v atmosfero. Tam izgubi višek svoje kinetične energije - ki je posledica magnetne rekombinacije - in s tem povzroči polarni sij. A stvar v resnici ni tako preprosta.

Delci ujeti v Zemljinem magnetnem polju se od polov dobesedno odbijajo. To se dogaja zaradi pojava, ki ga imenujemo magnetno ogledalo (ang. *magnetic mirror*). Pri tem pojavu imamo prisotno območje z naraščajočim magnetnim poljem na obeh koncih le-tega, kot to prikazuje slika 8. Za primer Zemlje to predstavlja njeno magnetno polje, katerega jakost z bližanjem polom raste. Delci, ki se približujejo temu delu prostora, kjer se magnetne silnice zgoščujejo, začnejo čutiti komponento Lorentzove sile, ki je usmerjena v nasprotni smeri njihovega gibanja. To lahko ponovno vidimo na sliki 8, kjer je Lorentzova sila razstavljena na komponente, ki povzročajo delčevo vrteče se gibanje in tiste, ki obračajo njegovo smer gibanja. To se zgodi zaradi zvitih magnetnih silnic. Sčasoma je ta komponenta tako velika, da obrne smer gibanja nabitega delca. Učinek magnetnega zrcala se pojavi samo za delce znotraj omejenega razpona hitrosti in vpadnih kotov. Delci zunaj teh meja bodo lahko pobegnili, zaradi česar ogledalom ponavadi rečemo, da „puščajo“.



Slika 8. Slika umetnega magnetnega ogledala. Načelo delovanja je enako za Zemljino magnetno polje, kjer robova z gostejšimi silnicami predstavljata severni in južni pol [20].

Zmožnost magnetnega ogledala, da ujame delce, je odvisna od kota pod katerim te delci vstopajo v magnetno polje. Ta je definiran kot kot med vektorjem hitrosti \mathbf{v} in vektorjem lokalnega magnetnega polja \mathbf{B} . Nekaterim nabitim delcem se kot naklona dovolj zmanjša, da lahko trčijo v ionosfero, ionizirani del zgornje Zemljine atmosfere, ki se razteza med 48 km in 965 km višine, in postanejo del nje. Spet drugi delci pa izpolnjujejo take pogoje, da je njihova mejna točka odboja (ang. *mirror point*) dovolj nizko, da lahko trčijo z ionosfero in postanejo del nje na tak način [1].

Ko visokoenergijski delci enkrat vstopijo v atmosfero, so izpolnjeni vsi pogoji za nastanek polarne sija. Svojo odvečno energijo oddajo okoliškim molekulam in atomom v atmosferi s trki. Ob tem se atmosferski delci vzbudijo, kar pomeni, da jim je bila dovedena zadostna energija, da se njihovi elektroni premaknejo iz osnovnih orbital v višje. Ker taka stanja niso stabilna, sledi deekscitacija, pri čemer vzbujeni delci sevajo svetlobo. Če je ta svetloba v vidnem spektru, to prepoznamo kot polarni sij.

4. Lastnosti polarne sija

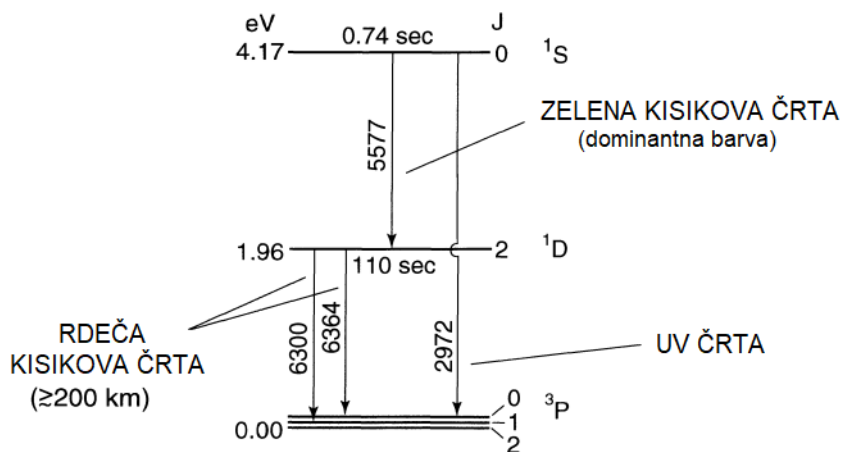
4.1 Barve polarne sija

Omenili smo že, da se pri trkih nabitih delcev, ki prihajajo iz ionosfere, energija prenaša na delce v Zemljini atmosferi, s čimer se ti delci vzbudijo. Vzbujeni delci lahko potem oddajo odvečno energijo z različnimi prehodi med višje energijskimi vzbujenimi atomskimi stanji in nižje energijskimi osnovnimi atomskimi stanji. Barva izsevane svetlobe, in s tem barva polarne sija, je odvisna od tega, kateri element se vzbudi in prehod med katerimi atomskimi stanji se zgodi. Pomembno pa je tudi, koliko energije je bilo elementu pri trku dovedene. Valovna dolžina izsevane svetlobe je od energije, oddane pri deekscitaciji vzbujenega atoma, odvisna preko enačbe

$$\Delta E = \hbar\omega = h\nu = h\frac{c}{\lambda}, \quad (1)$$

kjer ΔE predstavlja energijsko razliko med vzbujenim in osnovnim atomskim stanjem, ν in λ pa predstavljata frekvenco in valovno dolžino izsevane svetlobe.

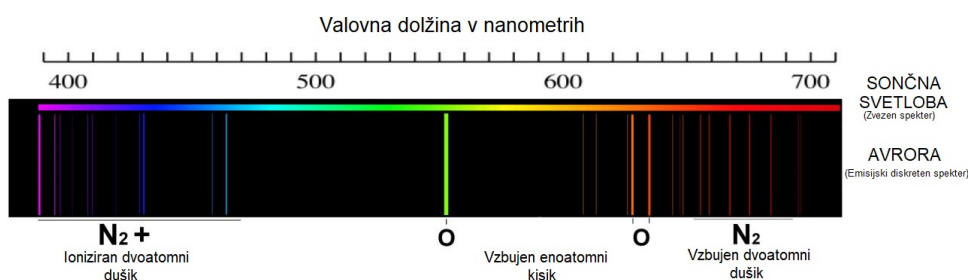
Večino molekul v Zemljini atmosferi predstavljata kisik in dušik, zato je skoraj vsa svetloba polarne sija sestavljena iz emisijskih črt nevtralnih ali ioniziranih N_2 , N , O_2 in O . Najbolj značilna in pogosta barva polarne sija, zelena barva valovne dolžine 557.7 nm, izvira iz prehoda atoma kisika med stanjema $^1S \rightarrow ^1D$, kar je, poleg ostalih možnih prehodov za kisik, prikazano na sliki 9 [7].



Slika 9. Vzbujena stanja atoma kisika in njihovi življenjski časi [7].

Poleg značilne zelene barve polarnega sija je atomarni kisik odgovoren tudi za izsevanje rdeče svetlobe pri valovni dolžini 630 nm, kar se zgodi pri prehodu $^1D \rightarrow ^3P$ [7]. Za ostale tipične barve polarnega sija pa je zaslužen molekularni dušik. Nevtralna molekula N_2 je odgovorna za emisijo rdeče oziroma temno rdeče svetlobo z valovno dolžino, ki se giblje med 650 nm in 680 nm, ioniziran molekularni dušik N_2^+ pa je pri deekscitaciji zmožen izsevati vijolično svetlobo z valovno dolžino 391.4 nm ali temno modro svetlobo z valovno dolžino 427.8 nm. To pa ne pomeni, da so emitirani fotoni omejeni samo na vidni spekter, ravno nasprotno, tako kisik kot tudi dušik lahko oddajata tudi ultravijolično svetlobo [7, 10].

Poleg zelene, rdeče in modre barve polarnega sija obstajajo vse mogoče kombinacije teh barv. Dokumentirani so bili polarni siji vijolične, rumene in celo roza barve. Celoten spekter vidne izsevane svetlobe, ki je mogoča zaradi deeksitacije atmosferskih delcev, je prikazana na sliki 10.



Slika 10. Značilni spekter svetlobe v polarnem siju (spodaj). Za primerjavo je prikazan tudi spekter Sonca (zgoraj). Poleg tega je na sliki narisana tudi skala valovne dolžine svetlobe v nm [10].

Slika 9, poleg možnih prehodov med stanji atomarnega kisika, prikazuje tudi življenjske čase posameznih stanj. Preberemo lahko, da je življenjski čas metastabilnega stanja 1S le 0.74 s, kar pa je vseeno precej več kot 10^{-7} s za spontano emisijo modre svetlobe pri 391.4 nm in vijolične svetlobe pri 427.8 nm, ob prehodih ioniziranega dušika N_2^+ . Še daljši življenjski čas ima prehod v atomarnem kisiku, ki odda rdečo svetlobo [7]. Življenjski čas prehoda je neposredno povezan z višino, na kateri se pojavi polarni sij z določeno barvo. Nazorna slika značilnih višin, pri katerih se izsevajo posamezne barve, je prikazana na sliki 11.



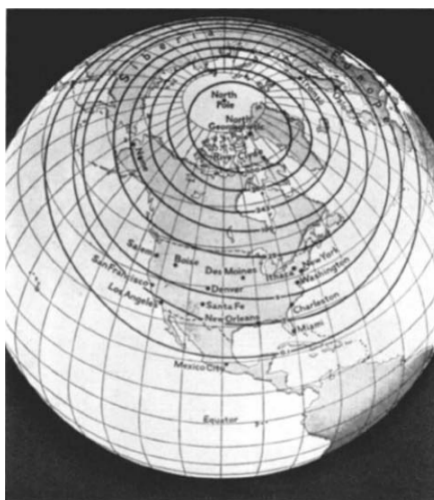
Slika 11. Značilne višine, pri katerih se izsevajo posamezne valovne dolžine svetlobe, ki določajo barvo polarnega sija. Na levi strani so zapisana imena atmosferskih plasti. Slika ni narisana v merilu [9].

Ker lahko vzbujeni atomi z daljšim življenjskim časom prepotujejo daljše razdalje, to pomeni, da bo rdeča svetloba bolj razpršena kot na primer zelena svetloba. Izvor rdeče svetlobe se nahaja v višji atmosferi zaradi manjše frekvence trkov, ki je posledica nižje gostote atmosfere. Prehod odgovoren za rdečo svetlobo zamre pod približno 200 km. Pod 100 km pa zamre tudi prehod iz stanja S, ki daje zeleno svetlobo. To se zgodi zato, ker vse večja gostota atmosfere povzroča, da se delci spustijo v osnovna stanja preko trkov, in ne preko emisije fotonov. Na še nižjih višinah pa potem že primanjkuje atomarnega kisika, zato določanje barve prevzameta N_2 in N_2^+ . Dušik je večinoma odgovoren za modro svetlobo z valovno dolžino 428 nm, prav tako pa lahko odda tudi vijolično svetlobo. Ti prehodi so značilni za večje aktivnosti Sonca in močnejše CME, prav tako pa imajo veliko krajši življenjski čas, kot ga imajo prehodi kisika.

Obstajajo tudi različne geometrijske oblike polarnega sija, česar v tem članku nismo obdelali. Oblika naj bi bila posledica tega, od kod v magnetosferi nabiti delci prihajajo in zaradi katerega pojava sploh gredo v atmosfero.

4.2 Kje lahko opazimo polarni sij

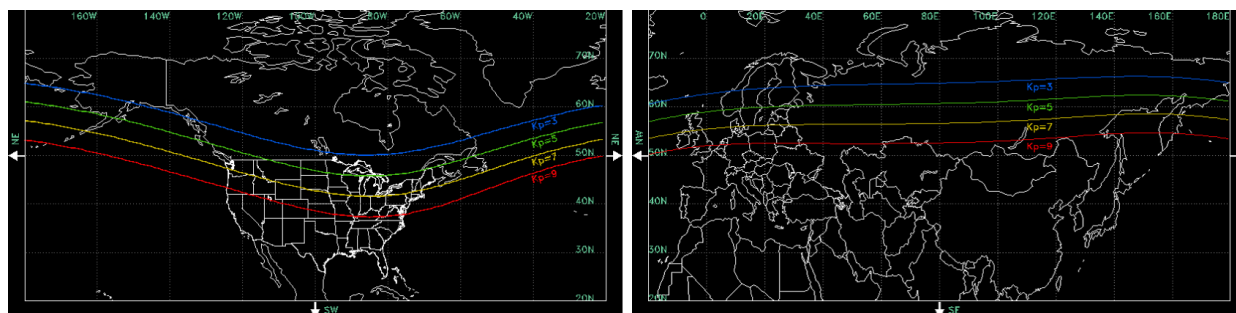
Opazovanja polarnega sija so dokumentirali skozi stoletja. Šele s primerjavo vseh opažanj so kasnejši znanstveniki, ki so se ukvarjali s preučevanjem tovrstnih dogodkov, lahko opazili kraje, kjer se je vedno znova pojavil polarni sij. Prvi, ki je te podatke sestavil v celoto, je bil Hermann Fritz [1]. Ustvaril je prvi zemljevid, ki je prikazoval enake pogostosti vidljivosti polarnega sija. Te je prikazal s sklenjenimi črtami, ki jih je poimenoval izohazme (ang. *isochasms*). Njegov zemljevid izohazem je prikazan na sliki 12.



Slika 12. Črte enake pogostnosti vidljivosti polarnega sija, povprečenega čez več let, kot jih je narisal Fritz (1873) [1].

Hitro se da ugotoviti, da so to ovalne krivulje, ki pa niso centrirane okoli severnega geografskega pola, kot bi to morda intuitivno pričakovali. Centrirane so okoli Zemljine magnetne dipolne osi (severni in južni magnetni pol). Ta se trenutno, leta 2020, nahaja na 80.7° S in 72.7° Z na otoku Ellesmere v Kanadi. Glede na geografski pol je severni magnetni pol premaknjen za približno 10° proti Severni Ameriki. To pomeni, da imajo ljudje, ki živijo tam, več možnosti, da so priča polarnem siju, kot pa ljudje, ki živijo na enaki geografski širini na primer v Sibiriji. Polarni sij je v Severni Ameriki pogosto viden južneje v primerjavi z Evropo ali pa Azijo, ki sta bolj oddaljeni od magnetnega pola. Enako velja tudi za južno poloblo, kjer je južni magnetni pol veliko bližje Avstraliji kot Afriki ali Južni Ameriki. Zato polarni sij pogosto opazijo tudi na Novi Zelandiji in Tasmaniji, pri čemer ga na drugih kontinentih na isti geografski širini ne opazijo.

Te ugotovitve lahko danes prevedemo na tako imenovani planetarni K-indeks (K_p). Indeks K_p je lestvica, ki se uporablja za označevanje magnitude geomagnetnih motenj. Večja kot je njegova vrednost, bolj je verjetno, da se bo polarni sij pojavil južneje, če se nahajamo na severni polobli oziroma severneje, če smo na južni polobli. Geografska predstava različnih vrednosti tega indeksa za severno poloblo je prikazana na sliki 13, kjer vsaka krivulja predstavlja svojo vrednost indeksa K_p , ki pa je na njej konstantna. To pomeni, da je na vsaki točki krivulje enaka verjetnost, da se v njej opazi polarni sij. Slika 14 prikazuje krivulje konstantnega indeksa K_p za celoten svet.

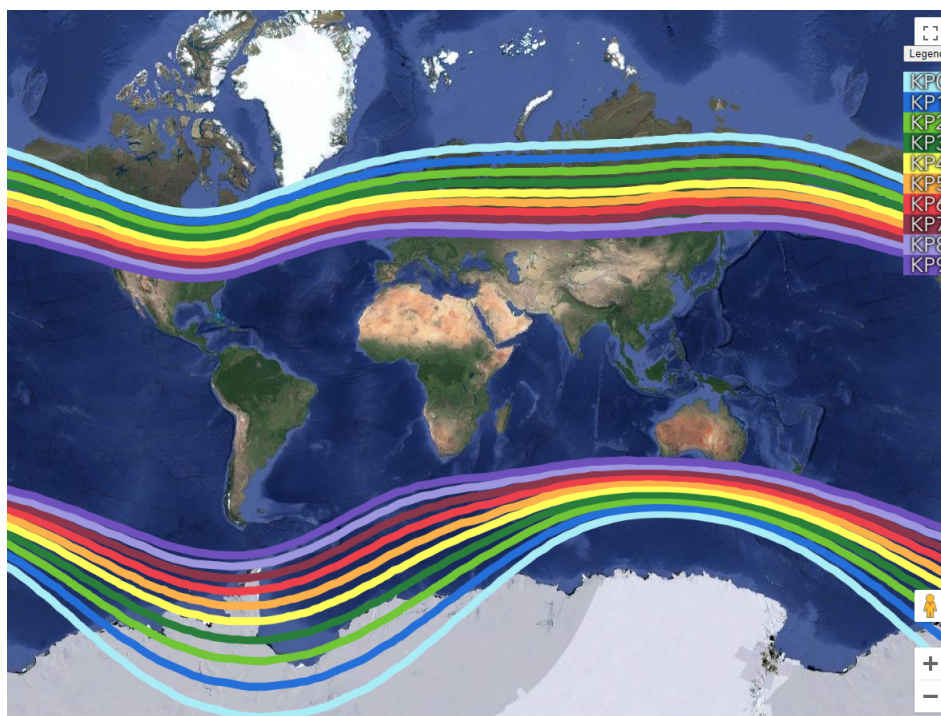


(a) Indeks K_p za Severno Ameriko [9].

(b) Indeks K_p za Evrazijo [9].

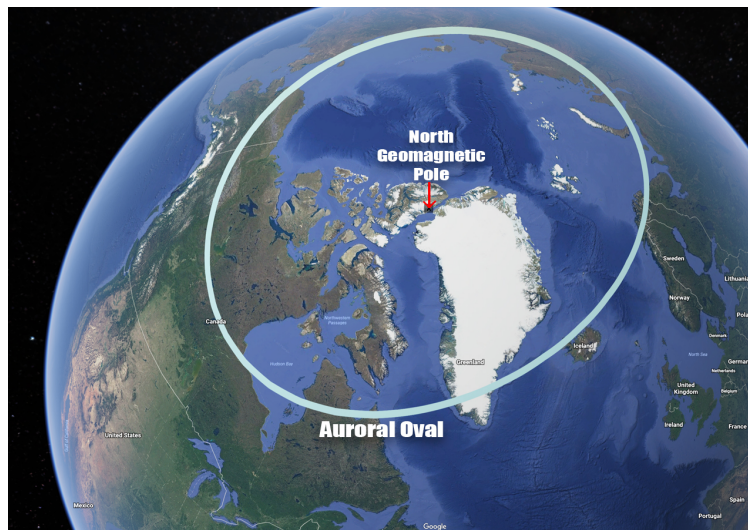
Slika 13. Indeks K_p za severno poloblo. Izohazme večjih vrednosti indeksa K_p sovpadajo s tem, da je izohazma južneje.

Izračunamo ga tako, da z napravami, imenovanimi magnetometri, na izbranem mestu merimo jakost Zemljinega magnetnega polja. Če gledamo podatke, pridobljene samo iz ene merilne postaje, smo s tem določili K-indeks. Kombinacija podatkov, pridobljenih s takimi meritvami, izvedenimi po vsem svetu, pa nam potem definirajo želeni planetarni indeks K_p , ki pove jakost Zemljinega magnetnega polja na globalni ravni [11].



Slika 14. Indeks K_p za Zemljo [11].

Na sliki 14 smo s Kp0 označili lokacijo avrornega ovala. To je krog, ki se razteza okoli Zemljinih magnetnih polov in prikazuje območje, pod katerim je severni sij viden skoraj vsako noč ob lepem vremenu, torej brez oblakov, ki bi pojav zakrili. Slika osnovnega avrornega ovala na severni polobli je prikazana na sliki 15.



Slika 15. Avrorni oval okoli severnega pola [11].

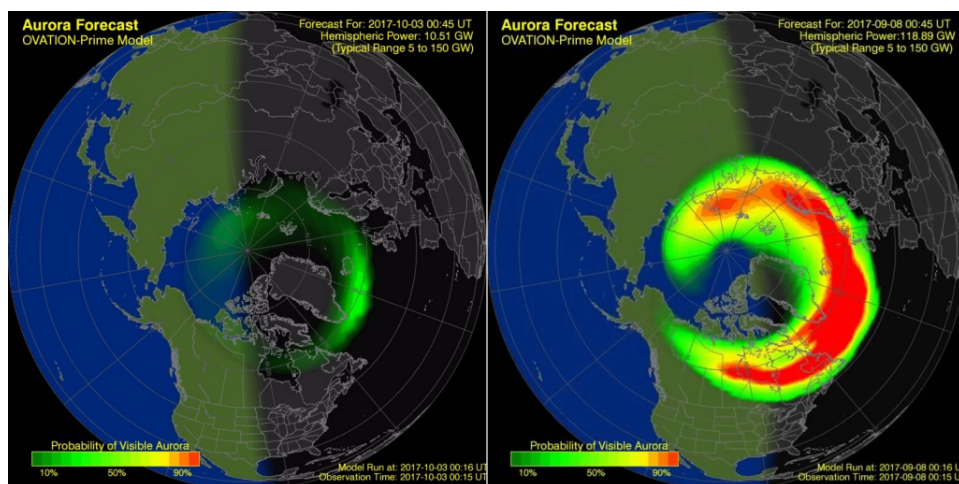
Avrorni oval predstavlja območje, ki ločuje magnetne silnice Zemlje, rekombinirane z magnetnimi silnicami Sončevega vetra in zaključene magnetne silnice Zemlje. To so tiste, ki potekajo med severnim in južnim magnetnim polom Zemlje. Severno od ovala imamo prisotne rekombinirane silnice, južno pa zaključene [12]. Posledica tega je, da se oval pri močnejšem Sončevem vetru, kar sovpada z višjim indeksom Kp, premakne bolj proti ekvatorju, saj imamo ob tem prisotno večje število rekombiniranih magnetnih silnic. Oblika ovala je posledica električnih tokov, ki konstantno tečejo noter in ven iz ionosfere. Tokovi, ki jih predstavljajo nabiti delci, tečejo vzdolž magnetnih silnic, oval pa potem sovpada z območjem, kjer te delci „tečejo“ v ionosfero [13].

S pomočjo slike 14 si oglejmo še povezavo indeksa Kp z močjo solarne nevihte. S pojmom solarna nevihta povzamemo vse sončne izbruhe, ki vplivajo na t. i. vesoljsko vreme. Med te štejemo sončne izbruhe visokoenergijskih žarkov, Sončev veter in tudi CME. Moč Sončevih dogodkov definira energijo delcev, ki priletijo v Zemljino magnetosfero, s tem pa tudi položaj polarnega sija.

Indeks Kp	Moč solarne nevihte
Kp0	brez nevihte
Kp1	brez nevihte
Kp2	brez nevihte
Kp3	nemirno vesoljsko vreme
Kp4	aktivno vesoljsko vreme
Kp5	majhna nevihta
Kp6	zmerna nevihta
Kp7	močna nevihta
Kp8	huda nevihta
Kp9	ekstremna nevihta

Tabela 1. Korelacija med močjo solarne nevihte in njenim vplivom na indeks Kp [11].

Čeprav lahko nekatere vrednosti indeksa Kp dosežemo brez solarne nevihte, to ne pomeni, da se polarni sij pojavi brez nabitih delcev. V resnici je Zemlja konstantno obstreljevana z različnimi nabityimi delci, ki pridejo iz vesolja, kar nam povzroči osnovni aurorni oval pri indeksu Kp0. S pojavom Sončevega vetra in večanjem njegove moči pa sledi, da se magnetosfera bolj deformira. Sončni veter prinaša delce z večjimi energijami, kar skupaj z večjo deformacijo magnetosfere pomeni, da je polarni sij možno videti bolj proti ekvatorju. To sovpada z višjim indeksom Kp, pri katerem se aurorni oval razširi in premakne proti ekvatorju, kot je to vidno na sliki 14 in 16. Slika 16 prikazuje simulacijo polarnega sija oziroma pripadajočega avrornega ovala brez solarne nevihte in z njo.



Slika 16. Simulacija avrornega ovala, ko je vesoljsko vreme mirno (leva slika) in med sončevo nevihto (desna slika), kjer se lepo vidi njegov premik proti ekvatorju [21].

Polarni sij ni značilen samo za Zemljo. Sonce oddaja CME oziroma sončev veter po celotnem prostorskem kotu in torej zadene tudi druge vesoljske objekte. Pogoji za njegov nastanek je ta, da CME zadene objekt z lastno atmosfero in magnetosfero, da lahko pride do magnetne rekombinacije in seveda vzbujanja delcev v tej atmosferi. Avrore so opazili že na Jupitru, Saturnu in Uranu.

5. Zaključek

Dolgo časa je šlo pri preučevanju polarnega sija samo za empirična opazovanja. Skozi stoletja pa je raziskovanje tega pojava pripomoglo k razumevanju Sonca, obnašanja njegovih magnetnih polj in posledično z odkritjem magnetne rekombinacije tudi razumevanje splošnega pojava, ki se dogaja po celotnem vesolju. Razumevanje polarnega sija in mehanizmov, ki so odgovorni za njegov nastanek, pa je danes zelo aktualno. Sonce za človeštvo zaradi svojih izbruhov predstavlja nevarnost, ki je brez magnetosfere ne bi preživel. V današnji civilizaciji, ko smo vedno bolj odvisni od elektronike, je napovedovanje takšnih pojavov zelo pomembno. Kot smo videli, pa le-to ni tako preprosto, četudi razumemo zaporedje dogodkov zaslužnih za njegov nastanek. V ta namen sta preučevanje polarnega sija in njegova napoved uporabna in aktualna še danes.

LITERATURA

- [1] S. Chapman, *Auroral physics*. Annu. Rev. Astron. Astrophys, 61 - 86 (1970)
- [2] *Plasma* (2022). <https://www.plasma-universe.com/plasma/> [dostop 12.3.2022]
- [3] R. Garner, *NASA: Understanding the Magnetic Sun* (2016). <https://www.nasa.gov/feature/goddard/2016/understanding-the-magnetic-sun> [dostop 12.3.2022]
- [4] *Solar wind* (2022). https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_wind [dostop 12.3.2022]
- [5] T. E. Moore, J. L. Burch in R. B. Torbert, *Magnetic reconnection*. Nature Physics 11, 611–613 (2015)
- [6] M. Hesse, T. Neukirch, K. Schindler, M. Kuznetsova in S. Zenitani, *The Diffusion Region in Collisionless Magnetic Reconnection*. Space Science Reviews 160, 3–23 (2011)

- [7] G. Paschmann, S. Haaland in R. Treumann, *Auroral Plasma Physics* (Kluwer Academics Publishers, 2002)
- [8] *Aurora* (2022). <https://www.plasma-universe.com/aurora> [dostop 12.3.2022]
- [9] S. Spence, *The science behind the aurora borealis* (2018). <https://magazine.scienceconnected.org/2018/09/the-science-behind-aurora-borealis/> [dostop 12.3.2022]
- [10] AURORA live by North-Star Invest AS, *Aurora borealis colors explained* (2022). <https://aurora.live/2020/04/aurora-borealis-colors-explained/> [dostop 2.5.2022]
- [11] K. Palmer, *Kp index explained* (2017). <https://seetheaurora.com/kp-index-explained> [dostop 15.3.2022]
- [12] S. P. Blake, A. Pulkkinen, P. W. Schuck, A. Gloer in G. Tóth, *Estimating Maximum Extent of Auroral Equatorward Boundary Using Historical and Simulated Surface Magnetic Field Data*. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 126 (2021)
- [13] H. U. Frey, *Localized aurora beyond the auroral oval*. *Reviews of Geophysics* 45 (2007)
- [14] M. S. Afify, R. E. Tolba in W. M. Moslem, *The mechanism that drives electrostatic solitary waves to propagate in the Earth's magnetosphere and solar wind*. *Contributions to Plasma Physics* (2022)
- [15] S. Sahu, B. Joshi, A. C. Sterling, P. K. Mitra in R. L. Moore. *Homologous compact major blowout-eruption solar flares and their production of broad CMEs*. *The Astrophysical Journal* 930, 41 (2022)
- [16] M. Herbrik in K. D. Kokkotas, *Stability Analysis of Magnetised Neutron Stars - A Semi-analytic Approach*. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 466 (2015)
- [17] NASA, *Average daily sunspot area (% of visible hemisphere)* (2016). <https://solarscience.msfc.nasa.gov/images/bfly.gif> [dostop 28.5.2022]
- [18] K. J. Genestreti, L. M. Kistler in C. Mouikis, *The role and dynamics of oxygen of ionospheric origin in magnetopause reconnection*. *Diplomska naloga* (2012)
- [19] NASA, *Structure of the magnetosphere* (2014). https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Structure_of_the_magnetosphere_LanguageSwitch.svg [dostop 15.3.2022]
- [20] A. Wesley, *Magnetic mirror image* (2004). <https://www.physicsforums.com/threads/magnetic-mirror-bottle.861710/> [dostop 15.3.2022]
- [21] K. Palmer, *What causes the aurora* (2017). <https://seetheaurora.com/what-causes-the-aurora> [dostop 15.3.2022]