

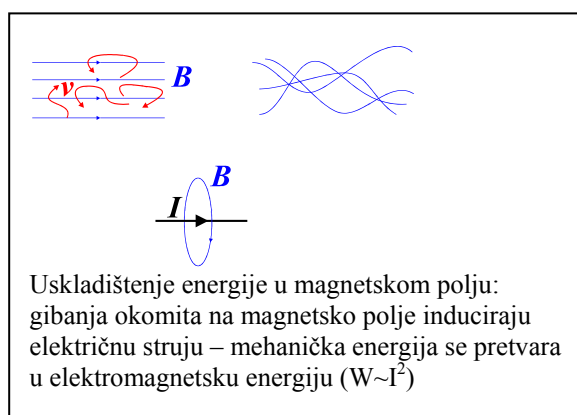
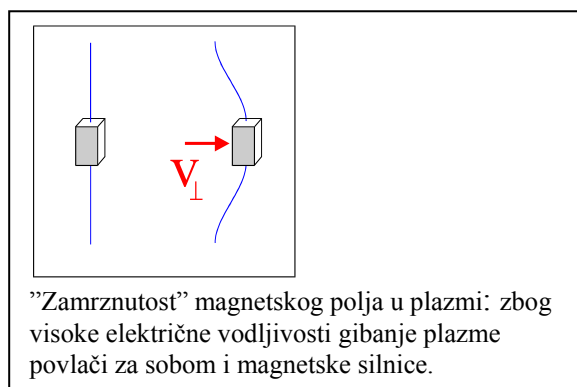
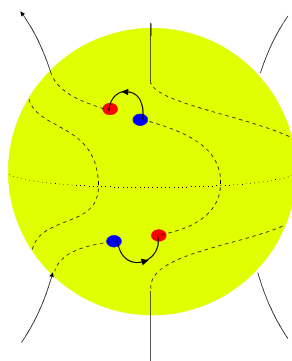
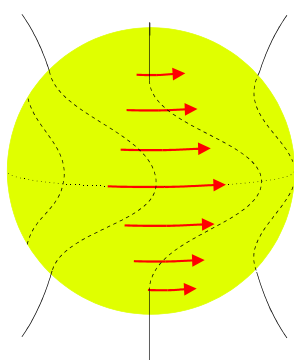
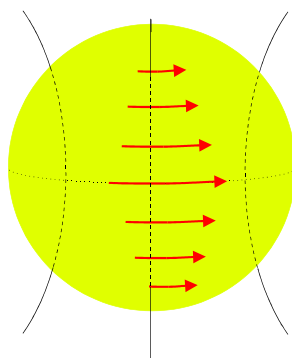
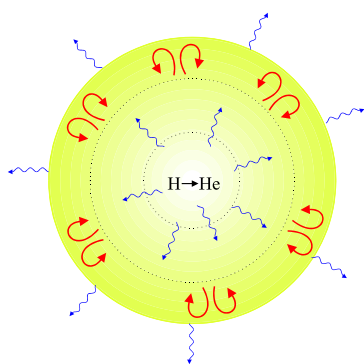
Sunce – svemirski fizikalni laboratorij

Bojan Vršnak

Opservatorij Hvar, Geodetski fakultet

Sunce je izuzetno složen plazmeni sustav¹ koji u kojem se odvijaju najrazličitiji procesi, od fuzije vodika u helij do mikro-plazmenih nestabilnosti. S obzirom da se ti procesi odvijaju u ekstremnim uvjetima kakve je nemoguće postići u laboratoriju, Sunce nam podastire izuzetne mogućnosti produbljivanja znanja o ponašanju plazmenih sustava. Posebno su zanimljive razne dinamičke pojave u atmosferi Sunca (bljeskovi, erupcije, udarni valovi) koje su posljedica magnetske aktivnosti. Najdulje poznata pojava vezana uz Sunčevu magnetsku aktivnost su Sunčeve pjege (uočili su ih već staro-kineski astronomi prije nekoliko tisuća godina)², čija se brojnost mijenja u 11-godišnjim ciklusima.

Korijeni Sunčeve aktivnosti (izvor i prijenos energije u Suncu)



U središnjim dijelovima Sunca, pri temperaturama od petnaestak milijuna kelvina odvija se termonuklearni proces fuzije vodika u helij. Svake sekunde 600 milijuna tona vodika pretvori se u helij i pri tome oslobodi energiju od $4 \cdot 10^{26}$ J. Većim dijelom Sunčeve unutrašnjosti energija se prenosi elektromagnetskim zračenjem. Međutim u

¹ Plazma je ionizirani plin. Zvijezde i većina međuzvezdane tvari je u plazmenom stanju. Jedno od glavnih svojstava plazme je visoka električna vodljivost.

² Velike grupe pjega mogu se uočiti prostim okom, npr. za vrijeme guste magle, ili pri jednolikoj naoblaci primjerene propusnosti, kada se zbog umanjenog sjaja može gledati Sunčev disk.

vanjskim dijelovima dominantan oblik prijenosa postaje konvekcija (mješanje plina) – vrući plin se izdiže do površinskih slojeva (tzv. fotosfera), tamo se hladi zbog gubitaka elektromagnetskim zračenjem (svjetlost), te ohlađen i zgusnut pada nazad u dublje slojeve. Površinski efekt konvekcije je tzv. granulacija i supergranulacija.

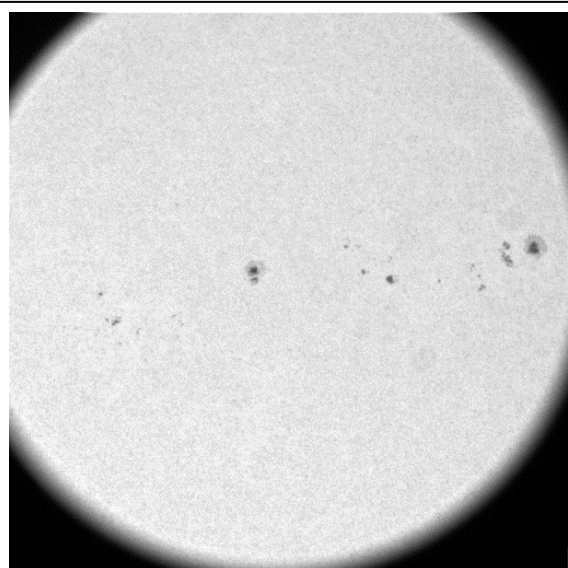
U takvom turbulentnom gibanju, plazmeni elementi koji rotiraju brže od prosjeka bivaju zbog djelovanja centrifugalne sile preseljeni prema ekvatoru, a sporiji prema polovima. Zbog toga Sunce ne rotira poput krutog tijela, već ekvatorska područja imaju veću kutnu brzinu, a polarna manju. Takovu vrtnju nazivamo diferencijalna rotacija.

Zbog diferencijalne rotacije dipolno magnetsko polje postaje izobličeno – pojavljuje se i pojačava toroidalna komponenta polja, s vremenom stvarajući po jedan magnetski torus na svakoj hemisferi. Ovakvo pojačavanje magnetskog polja u plazmi visoke vodljivosti, nazivamo magnetohidrodinamički (MHD) dinamo.

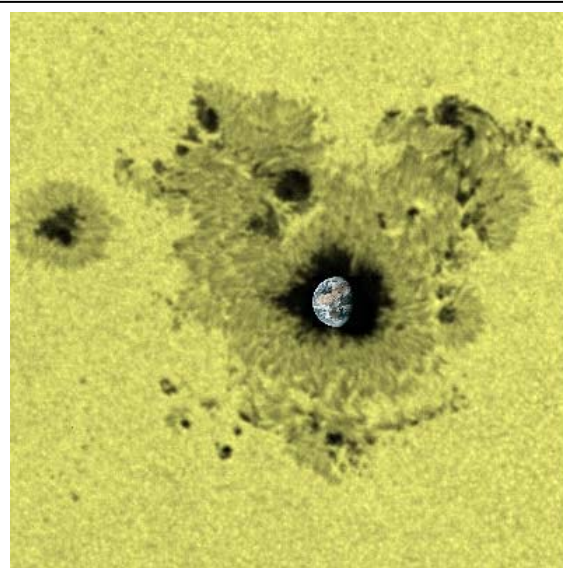
Kada jakost magnetskog polja postane veća od kritične, toroidalno polje postaje nestabilno i njegovi dijelovi počinju izranjati na površinu. Na tim mjestima nastaju bipolarnе grupe Sunčevih pjega: sve grupe na danoj hemisferi imaju isto ustrojstvo: npr. zapadni dio (tzv. pjege vodilje) pokazuje sjeverni magnetski polaritet (silnice “izlaze” iz Sunca), a istočni dio (pjege pratilje) južni polaritet (silnice “ulaze” u Sunce). U isto vrijeme, na suprotnoj hemisferi vodilje su južnog polariteta, a pratilje sjevernog. U sljedećem 11-godišnjem ciklusu ustrojstvo postaje obrnuto – Sunčev magnetski ciklus zapravo traje 22 godine.

Sunčeve pjege i aktivna područja

Sunčeve pjege zapažamo kao oštro obrubljena tamnija područja na Sunčevu disku. Sastoje se od središnjeg tamnijeg dijela (umbra) i nešto svjetlijeg okolnog dijela (penumbra). Sniženi intenzitet zračenja posljedica je snižene temperature – normalna površinska temperatura Sunca iznosi 5800 K, dok je u pjezi temperatura niža i do 2000 stupnjeva. Tipične dimenzije jedne pjege iznosi nekoliko desetaka tisuća kilometara.



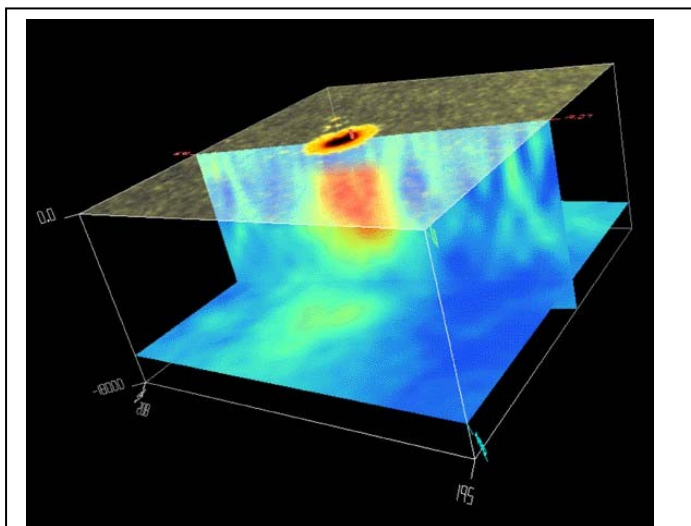
Pjege na Sunčevom disku.



Grupa Sunčevih pjega u usporedbi s veličinom Zemlje.

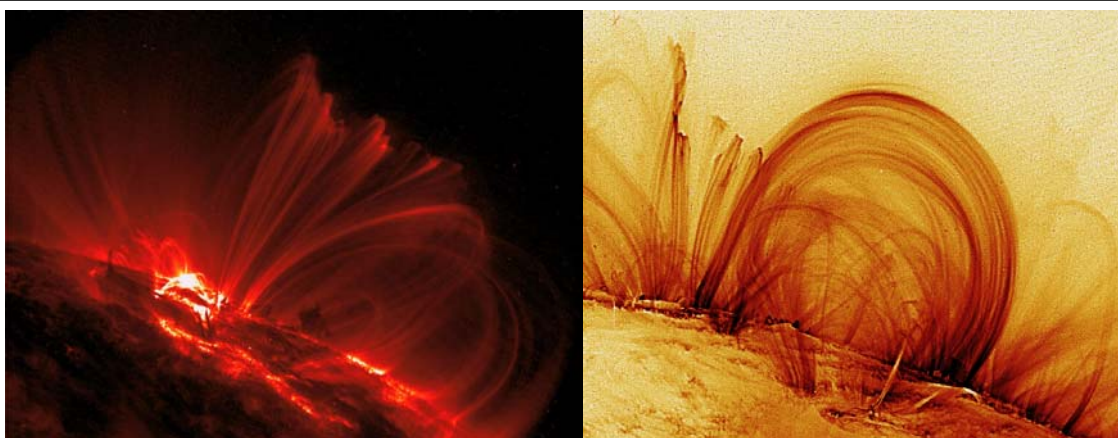
Pjege se obično pojavljuju u grupama koje prekrivaju područja veličine i do 200.000 km. Oko grupe pjega prostire se područje povećanog sjaja (fakula, ili baklja). Takvo ustrojstvo nazivamo aktivno područje. Velika većina eruptivnih procesa odvija se u aktivnim područjima s velikim grupama pjega.

Aktivna područja nastaju na mjestima gdje podpovršinsko magnetsko polje pojačano MHD-dinamom izranja na površinu. Magnetska polja posebice su jaka u pjegama, gdje magnetska indukcija može doseći vrijednosti i do 0.4 T. Jako magnetsko polje sprječava mješanje plina (konvekciju) pa je spriječen i pritek topline. Zbog toga su pjege hladnije od fotosfere.



Praćenjem širenja zvučnih i gravitacijskih valova (helioseizmologija) moguće je steći uvid u gibanja plazme ispod Sunčeve površine.

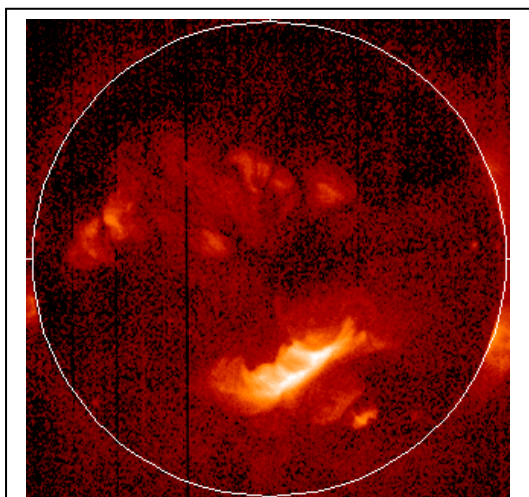
Korona (Sunčeva atmosfera) iznad aktivnih područja je veće gustoće i temperature nego li iznad mirne fotosfere. Snimke pokazuju mnoštvo vrlo finih struktura (koronine petlje) koje razotkrivaju silnice magnetskog polja. Temperatura koronine plazme iznosi 1.5–2 milijuna kelvina. Ovakvo stanje uspostavlja se na principu obrnutog Carnotovog procesa: tijelo niže temperature (fotosfera) može zagrijavati tijelo više temperature samo ako se pri tome ulaže rad. Miješanje plina u podpovršinskim slojevima stvara MHD valove (mehanički rad) koji se kroz fotosferu djelomično prenose u koronu, a disipacija valova u koroni zagrijava plazmu do vrlo visoke temperature. U jačim magnetskim poljima (pjege) mješanje plina je posebno otežano, što pospješuje stvaranje MHD valova, tj. veći je utrošak mehaničke energije. Zbog toga je iznad pjega (ohlađena područja fotosfere) opisani obrnuti Carnotov proces izraženiji pa je i korona jače zagrijana nego li u područjima bez pjega.



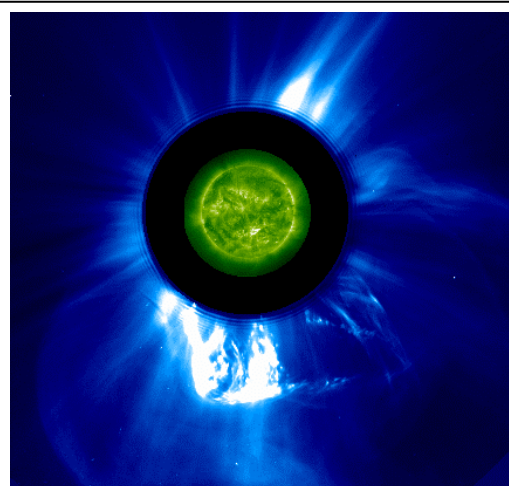
Sunčevi bljeskovi i erupcije

Sunčevi bljeskovi i erupcije

Zbog konvektivnih gibanja u fotosferi i podfotosferskim slojevima konfiguracija magnetskog polja u aktivnim područjima postaje sve složenija. Lokalni MHD dinamo pobuđuje električne struje, unoseći tako slobodnu energiju (energiju koja se može pretvoriti u rad) u magnetsko ustrojstvo korone iznad aktivnog područja. Energija se uskladištava sve dok magnetska struktura ne postane nestabilna. Nestabilnosti magnetskog ustrojstva oslobađaju uskladištenu energiju u obliku Sunčevih bljeskova i erupcija. Oslobađanje energije odvija se vrlo silovito – više od 10^{25} J može se osloboditi u svega nekoliko minuta.



Snimka Sunčevog bljeska u području mekog X-zračenja (satelit Yohkoh)



Koronin izbačaj (koronograf LASCO na svemirskom opservatoriju SOHO)

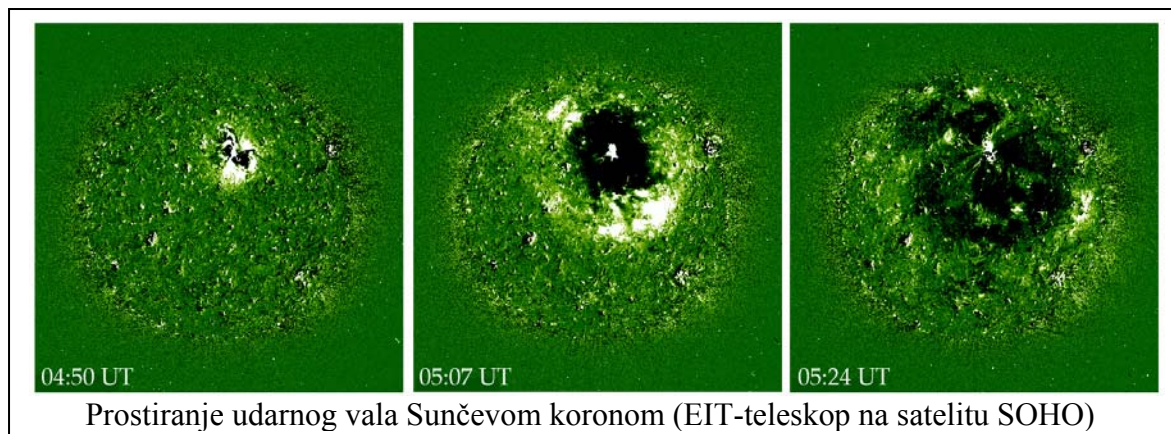
U Sunčevom bljesku (engl. *solar flare*) plazma korone iznad aktivnog područja može biti zagrijana i do blizu 100 milijuna kelvina. Osnovni proces je prespajanje magnetskih silnica (magnetska rekonekcija) kojim se početno vrlo složeno magnetsko ustrojstvo pojednostavljuje u konfiguraciju niže energije. U procesu rekonekcije inducira se jako električno polje koje ubrzava čestične snopove – elektroni mogu biti ubrzani do energija reda veličine MeV, a protoni do reda GeV. Zakočno zračenje elektrona u velikim bljeskovima uzrokuje povećanje toka X-zračenja sa Sunca i za nekoliko desetaka tisuća puta.

Provala X- i EUV-zračenja uzrokuje dramatične promjene u Zemljskoj ionosferi (engl. *sudden ionospheric disturbance, SID*) i predstavlja prvi poremećaj koji uzrokuje bljesak (kašnjenje iznosi 8.5 minuta, koliko svjetlosti treba da stigne do Zemlje). Nakon nekoliko desetaka minuta Zemlju "zapljusnu" snopovi visokoenergetskih elektrona, a uskoro i snopovi visokoenergetskih protona. Čestično zračenje može dovesti do oštećenja, ili čak uništenja elektronskih naprava na umjetnim satelitima, a djelomično utječe i na Zemljinu magnetosferu. Snažno čestično zračenje povezano s najjačim bljeskovima može biti fatalno za astronaute.

Koronine erupcije (ili koronin izbačaj mase; engl. *coronal mass ejection, CME*) proces je u kojem se pohranjena energija oslobađa u obliku kinetičke energije

velike mase plazme ($>10^{13}$ kg) koja biva izbačena u međuplanetarni prostor brzinama reda veličine 1000 km/s. Vrlo često eruptirajuće ustrojstvo poprima oblik ekspanirajućeg usukanog magnetskog torusa, što ukazuje da je izbačaj posljedica tzv. kink nestabilnosti (nestabilnost usukanog magnetskog polja).

Pojave erupcije i bljeska usko su povezane. Naveći bljeskovi nastaju u "podnožju" erupcije kao posljedica prespajanja magnetskih silnica "istegnutih" erupcijom.



Prostiranje udarnog vala Sunčevom koronom (EIT-teleskop na satelitu SOHO)

Bljeskovi i erupcije uzrokuju pojavu globalnih udarnih MHD valova koji se prostiru koronom i međuplanetarnim prostorom. Udarni val uzrokovan bljeskom nastaje na sličan način kao zvučni udarni val nakon eksplozije. S druge strane, udarni val povezan s erupcijom sličan je čeonom udarnom valu ispred tijela koje se giba nadzvučnom brzinom. Čeonni udarni valovi pokretani erupcijama putuju međuplanetarnim prostorom do Zemlje dva do tri dana.

Nekoliko sati nakon udarnog vala do Zemlje pristiže i tzv. magnetski oblak, tj. magnetoplazma izbačena koronom erupcijom. Interakcija magnetskog oblaka s magnetskim poljem Zemlje vrlo je burna ako su silnice u magnetskom oblaku usmjerene suprotno od magnetskog polja Zemlje. Tada dolazi do prespajanja silnica između ta dva ustrojstva što dovodi do pojave geomagnetskih oluja.



Posljedice geomagnetskih oluja: polarna svjetlost (lijevo) i prepoterećenje dalekovoda.

Prilikom prespajanja magnetskih silnica nabijenim česticama visokih energija otvara se prolaz u magnetsko polje Zemlje. Tu čestice ostaju zarobljene (tzv. magnetska boca) te se uglavnom zadržavaju u polarnim područjima gdje je polje najjače. Zračenje zarobljenih čestica stvara polarnu svjetlost.

Druga posljedica geomagnetskih oluja su inducirane struje na površini Zemlje, nastale zbog promjena magnetskog polja. Ova pojava naročito je izražena u dalekovodima. Zbog preopterećenja ponekad stradavaju transformatorski sustavi što je u nekoliko navrata dovelo do kolapsa velikih elektro-distributerskih sustava i nestanka električne energije na velikim područjima (npr. kolaps elektro-energetskog sustava u Kanadi 1989. godine).