

# Magnetizam u svemiru

---

**Marić, Vedrana**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2020**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Department of Physics / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Odjel za fiziku**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:160:238261>

*Rights / Prava:* [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-14**



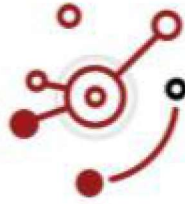
*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Department of Physics in Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU**

**ODJEL ZA FIZIKU**



**VEDRANA MARIĆ**

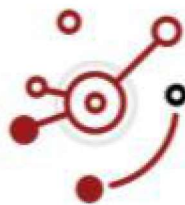
**MAGNETIZAM U SVEMIRU**

**Završni rad**

**Osijek, 2020.**

**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU**

**ODJEL ZA FIZIKU**



**VEDRANA MARIĆ**

## **MAGNETIZAM U SVEMIRU**

**Završni rad**

Predložen Odjelu za fiziku Sveučilišta J. J. Strossmayera u Osijeku

Radi stjecanja zvanja prvostupnice fizike

**Osijek, 2020.**

**"Ovaj završni rad izrađen je u Osijeku pod vodstvom doc. dr. sc. Darija Hrupeca u sklopu Sveučilišnog preddiplomskog studija na Odjelu za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku".**

## MAGNETIZAM U SVEMIRU

VEDRANA MARIĆ

### Sažetak

Na samom početku ovoga rada opisan je nastanak magnetskog polja i njegova uloga u svemiru. Opisano je opažanje Sunčevih pjega, koje su začetnici magnetizma u svemiru. Također, obrađena je tema opažanja magnetskih polja te povijest opažanja magnetskih polja.

U radu je obrađena tema Sunčevog magnetskog polja i jedna vrsta neutronske zvijezde, magnetar s naj snažnijim magnetskim poljem u svemiru. Opisana je uloga magnetskog polja u formiranju zvijezda. Opisano je Zemljino magnetsko polje i svjetlosna pojava aurora. Uz magnetsko polje Mliječnog puta opisana su neka buduća istraživanja.

(18 stranica, 5 slika, 14 literaturnih navoda)

**Rad je pohranjen u knjižnici Odjela za fiziku**

**Ključne riječi:** Magnetizam / Magnetsko polje / Magnetizam u svemiru

**Mentor:** doc. dr. sc. Dario Hrupec

**Ocjenjivač:** doc. dr. sc. Dario Hrupec

**Rad prihvaćen:** odlukom Odbora za završne radove

## **MAGNETISM IN THE UNIVERSE**

**VEDRANA MARIĆ**

### **Abstract**

The origin of magnetic field and its role in the universe are described at very beginning of this thesis. Observation of Sunspots, which is the first place where a cosmic magnetic field was found, is also described. In addition, the topic of magnetic field observations with an insight into the history of magnetic field observations is covered.

The paper deals with the topic of the Solar magnetic field and a type of neutron star, magnetar, which has the strongest magnetic field in the universe. The role of magnetic field in star formation is described. The Earth's magnetic field and the light appearance of aurora are described. In addition to the Milky Way magnetic field, some future research is described.

(18 pages, 5 figures, 14 references)

**Thesis deposited in Department of Physics library**

**Keywords:** Magnetism / Magnetic field / Magnetism in the universe

**Supervisor:** Dario Hrupec, Assistant Professor

**Reviewer:** Dario Hrupec, Assistant Professor

**Thesis accepted:** by decision of Committee for Bachelor thesis

## Sadržaj

1. Uvod.....	2
2. Opažanja magnetskih polja .....	4
3. Sunčevo magnetsko polje .....	5
3.1. Dinamo efekt .....	7
3.2. Geomagnetske oluje .....	7
4. Magnetsko polje neutronske zvijezde.....	8
4.1. Radiopulsar.....	8
4.2. Magnetar.....	8
5. Utjecaj magnetskog polja na formiranje zvijezda.....	11
6. Zemljino magnetsko polje.....	13
6.1. Polarna svjetlost.....	15
7. Magnetsko polje Mliječnog puta .....	17
8. Zaključak.....	19
9. Literatura.....	20
Životopis.....	22

## 1. Uvod

Opažanja Sunca, osobito Sunčevih pjega, pokazala su veliku ulogu magnetizma u životu naše zvijezde. Sunce prolazi kroz jedanaestogodišnji ciklus aktivnosti Sunčevih pjega, koje nastaju magnetskim poljem stvorenim okretajima Sunca na vrhuncu njegove aktivnosti. To je omogućilo izravno mjerenje Zeemanovog efekta u magnetskim poljima u Sunčevim pjegama 1908. godine.

Kao što naboji u mirovanju stvaraju električno polje, stacionarne struje i naboji u gibanju stvaraju magnetsko polje, koje označavamo znakom  $\vec{B}(\vec{r})$ .

Stalne struje koje nastaju kao posljedica slobodnih naboja u gibanju, promatrali smo većinom kao linijsku struju. Za daljnja razmatranja potrebna je površinska struja, odnosno struja u prostoru, a u našem razmatranju to je svemirski prostor.

Magnetsko polje možemo promatrati kao područje u prostoru koje vizualiziramo magnetskim silnicama. Jakost magnetskog polja određena je gustoćom magnetskih silnica. Jedna vrsta neutronske zvijezde, magnetar, ima magnetsko polje vrijednosti 10 – 100 GT. Druga vrsta neutronske zvijezde, pulsar, ima magnetsko polje iznosa 0,1 – 1 GT. Magnetsko polje Sunca iznosi 100  $\mu\text{T}$ . Magnetsko polje Zemlje na polovima iznosi, 60  $\mu\text{T}$ , dok je na ekvatoru 30  $\mu\text{T}$ , a kada gledamo općenito površinu Zemlje iznosi 45  $\mu\text{T}$ . Magnetsko polje Mjeseca iznosi 35 nT. Mjerenje magnetskog polja za ljudsko srce daje rezultat od 50 pT i za ljudski mozak 100 fT.

Na električki nabijenu česticu koja se giba u magnetskom polju, djeluje Lorentzova sila. Lorentzova sila je sila koja djeluje na naboj koji se giba u električnom i magnetskom polju. Lorentzova sila dana je izrazom  $\vec{F} = q\vec{E} + q(\vec{v} \times \vec{B})$ , gdje  $\vec{E}$  označava električno polje i  $\vec{B}$  magnetsko polje. Iz jednadžbe se može zaključiti da dok električno polje može povećati brzinu čestice i kinetičku energiju, sila kojom magnetsko polje djeluje na česticu je okomita na smjer čestice i s time ne povećava kinetičku energiju. Umjesto toga, uzrokuje da čestica skreće. S obzirom da je smjer čestice okomit na magnetsko polje, sila koja djeluje na česticu  $\vec{F} = q(\vec{v} \times \vec{B})$  djeluje kao centripetalna sila.

Kada se govori o magnetizmu u svemiru, neizostavno je obraditi temu kozmičkih zraka. Čestice kozmičkih zraka su uglavnom jezgre vodika i nešto jezgara helija te u manjoj mjeri jezgre ugljika, kisika i težih elemenata. Svi su u potpunosti ionizirani. Jedan postotak kozmičkih zraka čine elektroni. Kao što se vidi njihov kemijski sastav odgovara našem Sunčevom sustavu. Njihov energijski spektar proteže se od  $10^9 \text{ eV} - 10^{20} \text{ eV}$ . Prema energijskom sadržaju, čestice kozmičkih zraka možemo podijeliti u tri kategorije. Galaktičke kozmičke zrake s iznosima  $E <$



$3 \cdot 10^{15}$  eV dolaze pretežno iz naše galaksije Mliječni put. Anomalne kozmičke zrake proširile su razumijevanje ioniziranog iona, ubrzanje čestice i znanje o nuklearno atomskim pojavama u međuzvezdanom mediju. Njihov energijski spektar proteže se od  $3 \cdot 10^{15}$  do  $10^{18}$  eV. Sunce je također izvor kozmičkih zraka. Ubrzanje iona, elektrona i protona povezano je sa Sunčevim zrakama i izbacivanjem koronalnih masa osigurano detekcijom različitih zračenja sa Sunčevom atmosferom i Sunčevim magnetskim poljem i izravnim opažanjem čestica u međuplanetarnom prostoru i Zemlji.

Zemljino magnetsko polje i atmosfera tvore dva zaštitna sloja protiv kozmičkog zračenja na površini Zemlje. Pri kozmičkom zračenju, ako čestice imaju energiju veću od energije magnetskog polja Zemlje, proći će magnetosferu i doći do gornjeg sloja atmosfere. Ako je energija čestica nedovoljna, one će slijediti magnetske silnice i doći do polova. To je razlog zašto je zračenje veće kod polova nego kod ekvatora. Drugi zaštitni sloj je atmosfera. Dolaskom u gornji dio atmosfere, čestice kozmičkog zračenja sudaraju se s atomima koje susretnu i time stvaraju nove čestice koje proizvode uzastopno manju energiju nuklearne raspada.

## 2. Opažanja magnetskih polja

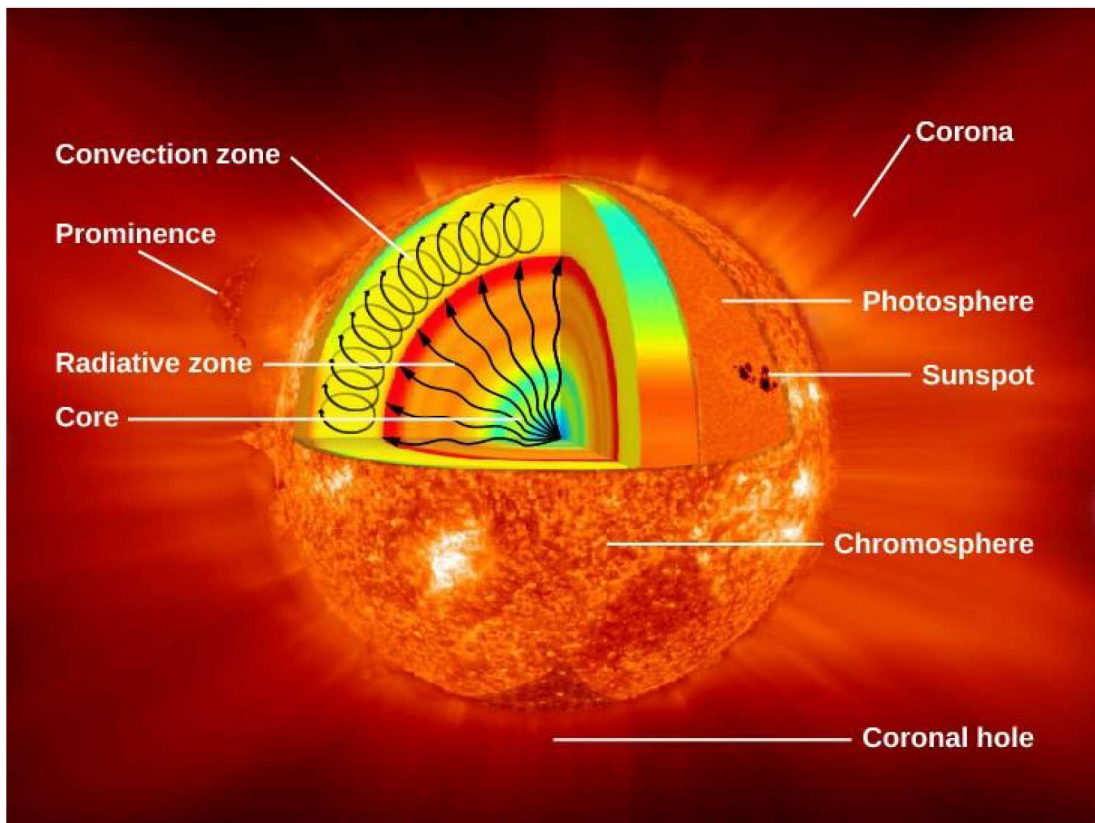
Prva opažanja magnetskih polja u svemiru počela su u 20. stoljeću. G. E. Hale je opažao Sunčeva magnetska polja pomoću Zeemanovog efekta. Jaka magnetska polja mijenjaju valne duljine na kojima atom zrači. Pretpostavio je da su Sunčeve pjege mjesta anomalije magnetskog polja Sunca. Poslije 40-ak godina počela su opažanja magnetskih polja u zvijezdama pomoću Zeemanovog efekta. Opažanja naše Mliječne staze počela su 1949. Magnetska polja su opažena i u svim galaksijama. Astronomi Tautenburg i Bonna su pomoću radioteleskopa Effelsberga našli izuzetno uređena magnetska polja. 1978. godine imamo opažanja polarizirane radioemisije iz galaksije u Andromedi.

Svemirske objekte možemo promatrati izravno zahvaljujući svjetlosti koju emitiraju, a magnetska polja su nevidljiva optičkim teleskopima. Za detekciju magnetskih polja koristi se polarizirano zračenje i Zeemanov efekt. Neke metode opažanja i tehnike su optička polarizacija svjetlosti zvijezda međuzvjezdanim zrcima koji su poravnati s magnetskim poljem i kroz Zeemanovo cijepanje spektralnih emisijskih linija iz izvora okolnim poljem. Postoji još linearno polarizirana radiosinkrotonska emisija koja je proizvedena relativističkim česticama ubrzanim u magnetskom polju nekog izvora, te Faradayjeva rotacija koja omogućuje mjerenje magnetskog polja objekta na osnovi zakreta ravnine polarizacije za kut razmjernan jakosti magnetskog polja i gustoći medija.

Planira se izrada radioteleskopa, Square Kilometre Array, čija bi opažanja počela 2020. godine. Teleskop bi davao snimke svemirskih objekata s dosad najvećom rezolucijom i detektirao emisije tisuća vrlo udaljenih galaksija slabog sjaja.

### 3. Sunčevo magnetsko polje

Sunce je zvijezda koja se nalazi u središtu našeg Sunčevog sustava. Struktura Sunca se dijeli na unutrašnji dio Sunca koju čine vruća jezgra, zonu zračenja i konvekcijska zonu, a površinski dio se sastoji od fotosfere, kromosfere i korone. Unutrašnjost Sunca sastoji se od plinovite vruće plazme kroz koju se prostire magnetsko polje. Sve Sunčeve aktivnosti mogu se složiti u 11-godišnji ciklus.



Slika 1: Struktura Sunca

(Izvor: [10])

Poznato da su bljeskovi i izbacivanja koronalnih masa rezultati intenzivne magnetske aktivnosti. Izbacivanje koronalnih masa je glavni poremećaj koji potječe iz solarne korone. Događaj se promatra kao balon koji izlazi iz korone, razbija se i baca svoj sadržaj u solarni vjetar. Solarna polja i izbacivanja koronalne mase pojavljuju se češće kada je Sunce blizu maksimalne aktivnosti. To samo po sebi znači da duguju svoje postojanje Sunčevom magnetskom polju. Sunčeve pjege koje se nalaze u podnožju tih magnetskih lukova imaju intenzitete magnetskog polja koje mogu biti velike do 2000 G. Sunčeve pjege su tamni dijelovi koji se pojavljuju i nestaju na vremenskim skalama u rasponu od dana do godina, i nastaju zbog lokalne, intenzivne

magnetske aktivnosti. Sunčeve baklje odgovaraju iznenadnom oslobađanju energije reda veličine  $10^{23} - 10^{25}$  erg, što je  $10^{-7}$  J, u razdoblju od nekoliko sekundi do sati. To je eksplozivni događaj koji proizvodi emisiju zračenja koji se može opaziti u svim područjima elektromagnetskog spektra.

Procvat u istraživanju Sunčevih pjega dogodio se tek 1908. godine kada je Hale iz Sunčevih pjega procijenio magnetsku aktivnost. To su ujedno bila i prva mjerenja Sunčevog magnetskog polja izvan Zemlje iz kojih se došlo do zaključka da je magnetsko polje pravi uzrok nastanka Sunčevih pjega. Sunčeve pjege imaju jakost magnetskog polja od otprilike 0,25 – 0,35 T u unutrašnjosti, dok na samoj površini taj iznos pada na otprilike 0,07 – 0,1 T. Jakost magnetskog polja na površini je homogena te iznosi oko 0,15 T. Na velikim udaljenostima, Sunčev vjetar dominira i uzdužno usmjerava linije magnetskog polja što u kombinaciji sa Sunčevom rotacijom rezultira spiralnim oblikom magnetskog polja. Magnetska polja na površini imaju velike vrijednosti magnetskog toka i dug vijek trajanja. Najveća aktivna područja dosežu magnetski tok od oko  $10^{15}$  Wb i trajanje od nekoliko mjeseci, dok ona najmanja imaju magnetski tok od oko  $10^{11}$  Wb i traju manje od jednog dana.

Prominencija je svijetla pojava u koroni iznad ruba Sunčeva kruga s temperaturom od oko 10000 K. Prominencije su smještene iznad područja snažnijeg magnetskog polja s kojim su povezane. Sunčeva baklja nastaje u obliku velike eksplozije u Sunčevoj atmosferi, nalik prominenciji, a smatra se da nastaje kada se promjene i zajedno povežu magnetske linije dvaju magnetskih polja koja imaju suprotan smjer.

U prostorima konvekcijske zone stvaraju se „toplinski stupovi“ koji prenose vruću plazmu od zone zračenja sve do fotosfere. Toplinski stupovi predstavljaju jednu vrstu prečaca, a takvo turbulentno kretanje plazme uzrokuje stvaranje magnetskog polja na površini tih stupova. Nakon nastanka magnetskog polja dolazi do pojave „problem skladištenja“ koja je važna jer opisuje kako se zapravo magnetsko polje izbacuje na površinu.

Kromosfera je sloj koji se prostire iznad najnižeg sloja, debljine oko 2000 km, dok korona čini vanjski sloj Sunčeve atmosfere izrazito visoke temperature. Podaci o magnetskom polju u tim područjima su uglavnom vrlo nejasni i do njih se ne može doći direktnim proučavanjem. Sunčeva korona je najbolji pokazatelj koliko važnu ulogu ima magnetsko polje u formiranju Sunčeve atmosfere. Oko 20 – 30% Sunčeve površine je prekriveno rupama korone, a to su područja koja su magnetski povezana s vanjskom heliosferom. Heliosfera čini ogroman prostor koji okružuje cijeli Sunčev sustav. Ovdje magnetsko polje više nema bitnu ulogu.

### **3.1. Dinamo efekt**

Teorija dinama predlaže mehanizam kojim nebesko tijelo poput Zemlje ili zvijezde stvara magnetsko polje. Teorija dinama opisuje proces kroz koji fluid može održavati magnetsko polje u astronomskim vremenskim skalama. Imamo dva procesa, ovisno o tome je li polje uređeno na skalama manjim ili većim od razmjera turbulentnih gibanja.

Mali dinamo generira magnetska polja koja su smještena na energetskim ljuskama turbulentnih pokreta. Turbulencija nastaje uslijed nestabilnosti kao što je konvekcija u zvijezdama, ili je potaknuta drugim silama, kao što su supernove u galaksijama. U turbulentnom toku tekućine se nasumično gibaju i tako se proširuju magnetska polja. Kada više linija prolazi kroz određeno područje ono pojačava magnetsko polje. Brzina rasta polja uslijed slučajnog rastezanja usporediva je s Jouleovom toplinom. Magnetsko polje može rasti pod uvjetom da je Reynoldsov broj povezan s turbulencijom iznad vrijednosti reda 100.

Promjena u turbulentnom djelovanju dinama nastaje ako je turbulencija spiralna ili ciklotronska. Primjer je ciklon u Zemljinoj atmosferi čije čestice tekućine rastu i zakreću se zbog Coriolisove sile koja dovodi do spiralnih pokreta. [3]

### **3.2. Geomagnetske oluje**

Geomagnetska oluja je privremeno ometanje Zemljine magnetosfere, koje uzrokuju Sunčeve aktivnosti, a to su oblak magnetskog polja Sunčevog vjetra, Sunčevim bakljama i koronalno izbacivanje mase.

Kada val Sunčevog vjetra dospije do Zemlje, dolazi do mnogih promjena u magnetosferi. Za vrijeme geomagnetske oluje, struje na višim zemljopisnim širinama se brzo mijenjaju. Ove struje proizvode svoja vlastita magnetska polja koja se udružuju sa Zemljinim magnetskim poljem. Na površini Zemlje nastaje promjenjivo magnetsko polje koje inducira struje u svim prisutnim vodičima, koje nazivamo geomagnetski induciranim strujama.

Geomagnetske oluje javljaju se na cijeloj Zemlji, a mogu trajati nekoliko dana. Za vrijeme geomagnetskih oluja česte su pojave polarne svjetlosti.

Sunčeve oluje mogu snažno utjecati na tehnologiju kojom se koristimo. Geomagnetske oluje zagrijavaju Zemljinu gornju atmosferu i time uzrokuje njezino širenje. Zagrijani zrak se podiže i gustoća na području satelitskih orbita značajno raste, što dovodi do usporavanja satelita. Solarne erupcije oslobađaju visokoenergijske čestice koje mogu biti opasne po ljude.

## **4. Magnetsko polje neutronske zvijezde**

Pojam neutronske zvijezde odnosi se na zvijezdu mase oko 1,5 mase Sunca i polumjera otprilike 12 km. Jedna je od najgušćih tvari u vidljivom svemiru.

Magnetsko polje neutronske zvijezde iznosi od 1 MT do 100 MT.

Brza vrtnja zvijezde i jaka magnetska polja na zvijezdama stvaraju nabijene čestice. Te nabijene čestice se gibaju duž magnetskih silnica koje se rotiraju sa zvijezdom i emitiraju snop elektromagnetskog zračenja.

### **4.1. Radiopulsar**

Pulsar je visoko magnetizirana rotirajuća neutronska zvijezda ili bijeli patuljak koji emitira snop elektromagnetskog zračenja. Većina poznatih pulsara je vidljiva u radiopodručju elektromagnetskog spektra. Prvi pulsar je otkrili su Jocelyn Bell i Antony Hewish 1967.

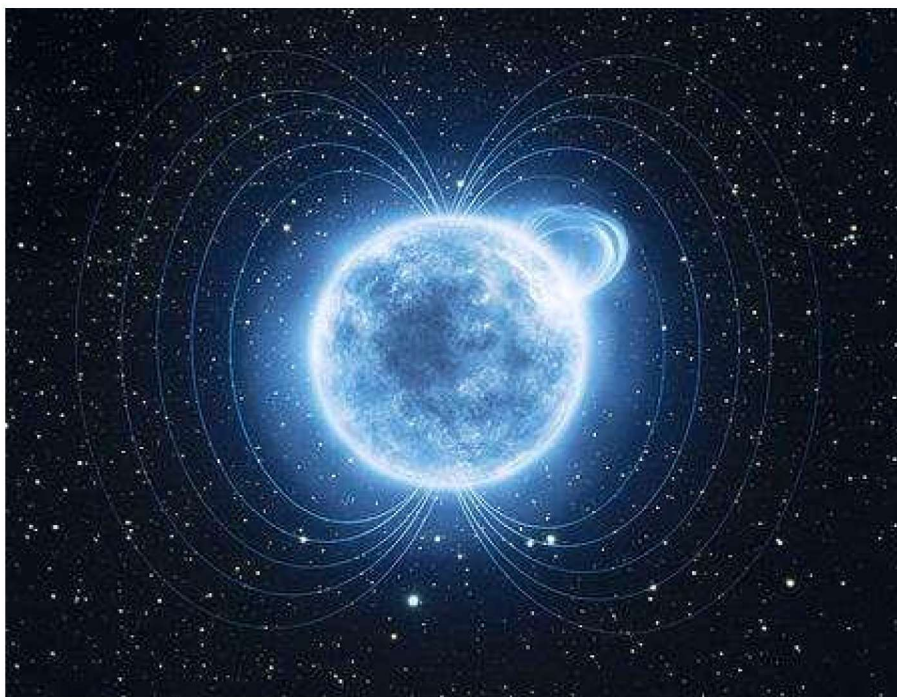
Radiopulsari su prihvaćeni kao visoko magnetizirane neutronske zvijezde sa svjetlosnim snopom zračenja koji proizvodi pulsnu emisiju. Okreću se brzinom od otprilike jednom u sekundi. Najbrži pulsar može se rotirati brzinom to 650 puta u sekundi. Period pulsa ovisi o dobi pulsara.

Pulsar nastaje kada se jezgra masivne zvijezde komprimira tijekom supernove, koja se uruši u neutronske zvijezde. Neutronska zvijezda zadržava većinu svoje kutne količine gibanja, a budući da uzima samo mali dio prijašnjeg radijusa, formira se vrlo velikom brzinom rotacije. Zraka zračenja emitira se duž magnetske osi pulsara, koji se vrti s rotacijom neutronske zvijezde. Magnetska os određuje smjer elektromagnetskog snopa i ona nije ista kao rotacijska os. Snop se vidi jednom za svaku rotaciju osi, što dovodi do njegove pulsirajuće prirode.

Jedna vrsta pulsara su magnetari gdje raspad ekstremno jakog magnetskog polja osigurava elektromagnetsku snagu. [5]

### **4.2. Magnetar**

Magnetar je neutronska zvijezda s brzim rotacijskim periodom, nekoliko ms, i s jakim magnetskim poljem, do  $10^{11}$  G. Pokazuju dramatičnu varijabilnost kroz elektromagnetski spektar, osobito kod gama-zraka i rendgenskih zraka, u rasponu bljeskova od nekoliko milisekundi do mjesečnih ispada. Emisiju magnetara pokreće raspad ogromnih unutarnjih magnetskih polja. Magnetari proizvode pulsacije X-zraka u rasponu od 2 do 12 sekundi. Magnetari ne mogu biti stariji od 100000 godina.



Slika 2: Magnetar (Umjetnički prikaz)

(Izvor: [11])

Prvi rad o detekciji SGR magnetara bio je objavljen 1979. godine kada su na međuplanetarnim sondama Venere 11 i 12 pomoću instrumenata s gama-zrakama viđeni ponovljeni bljeskovi. Godine 1998. zabilježeno je prvo mjerenje SGR-a i utvrđena je jačina polja od  $8 \cdot 10^{10}$  T. Izravno mjerenje modela je ono što je za većinu astrofizičkih zajednica zapečatilo identificiranje SGR-a kao magnetara. Ako su anomalni rendgenski pulsari ili AXP-ovi bili mlade neutronske zvijezde s zbunjujuće jakim izvorom energije i periodima od nekoliko sekundi mogli su biti i magnetari. To je potvrđeno šest godina kasnije otkrićem bljeskova tipa SGR iz dva AXP izvora. Praskovi su danas karakteristično svojstvo AXP-a, toliko da granica između njih i SGR-a više ne postoji. Velika većina poznatih magnetara otkrivena je putem njihovih kratkih rendgenskih snimaka, zahvaljujući Burst Alert Telescope (BAT) na svemirskoj letjelici Swift i Gamma Burst Monitor (GBM) i svemirskoj letjelici Fermi. Ovi instrumenti su dizajnirani za proučavanje izbijanja gama zraka tako da su podešeni na pronalaženje kratkih, svijetlih praskova preko cijelog neba.

Otkriće radiopulseva iz magnetara veza je između radio pulsara i magnetara. Međutim, radio-svojstva magnetara razlikuju se od konvencionalnih radiopulsara. Profili radiopulseva magnetara su s radnim ciklusima koji se približavaju 100%. Frakcije s rendgenskim zrakama (udio emisije točkastog izvora koji je pulsiran) su otprilike 30%. Metoda određivanja vremena koristi se kod

magnetara. Svaka rotacija pulsara se računa, omogućujući precizna mjerenja perioda i usporavanje vrtnje. Fazno koherentno mjerenje vremena je postignuto za 5 najsjajnijih magnetara koristeći RXTE i Swift. Najkraći magnetar ima relativno dugo razdoblje od 2 s, što je zasigurno rezultat brzog magnetskog kočenja. Glitch je nagli porast u rotacijskoj frekvenciji pulsara, koji se smanjuje zbog kočenja izazvanim emisijom zračenja i čestica visoke energije. Magnetari su među najčešće poznatim glitching neutronske zvijezde.

Magnetar doživljava evoluciju u prvim minutama svoga života. Kratki bljesak je najčešći tip zračenja magnetara. Bljesak je događaj koji traje nekoliko milisekundi i kojega prate dugovječni repovi. Luminoznost vrhunca bljeska je u rasponu od  $10^{36}$  do  $10^{43}$  erg/s, gdje je erg jednako  $10^{-7}$  J. Bljesak traje od nekoliko ms do nekoliko s. Ispad je događaj magnetara koji se sastoji od velikog iznenadnog povećanja u izvoru toka polja X-zraka, ponekad i do  $10^{36}$  erg/s. Najveća među ispadima magnetara je divovska baklja. Dosad su pronađena tri takva događaja, svaki energije preko  $10^{44}$  erg/s. Baklje i praskovi magnetara emitiraju X-zrake većih energija i stoga moraju biti proizvedene izvan neutronske zvijezde. Baklje su aktivirane nestabilnošću koja dovodi do naglog izbacivanja magnetske energije iz jezgre u magnetosferu.

Neutronska zvijezda ima temperaturu jezgre  $T_{core} \sim 10^8$  K, a površine je  $T_s \sim 10^6$  K što vodi do luminoznosti površine  $10^{33}$  erg/s. Magnetar ima luminoznost oko  $10^{35}$  erg/s što pokazuje da su oni snažno zagrijani nekim mehanizmom. [1]



## 5. Utjecaj magnetskog polja na formiranje zvijezda

Godine 1990. pojavile su se dvije pretpostavke o ulozi magnetskog polja u procesu formiranja zvijezda. Prema prvoj magnetska su polja jedan od bitnijih činitelja u formiranju zvijezda uz gravitaciju, a prema drugoj turbulencija međuzvezdane materije je glavni činitelj. Godine 1995. Hubbleov teleskop je snimio nekoliko zvijezda u procesu rađanja.

Važni činitelji u različitim fazama nastanka protozvijezde su gravitacijska sila, rotacija, turbulencije i magnetska polja. Važnu ulogu imaju kutna količina gibanja jezgre i magnetizam. Diskovi i mlazovi nastalih protozvijezda na neki način odvođe kutnu količinu gibanja koja je uvjet raspada protozvijezde zbog prebrze vrtnje. Ako bi protozvijezda zadržala sav magnetski tok svoje jezgre, imala bi prejak površinsko magnetsko polje.

To je složen i kaotičan proces, budući da su molekularni oblaci prilično nepravilne strukture i imaju nadzvučne unutarnje turbulentne pokrete. Nekoliko struktura razlikujemo u molekularnom plinu, a to su oblaci, nakupine i jezgre. Najosnovnije jedinice formiranja zvijezda su jezgre oblaka koje imaju relativno malu unutarnju strukturu. Jezgre imaju veličinu reda 0,1 pc i masu reda jedne solarne mase.

Formiranje zvijezda događa se kada se dio oblaka prašine počne stiskati pod svojom gravitacijskom silom, urušava se i centar postaje topliji sve dok nuklearna fuzija ne počne u jezgri. Molekularni oblaci često sadrže i do milijun solarnih masa plina. Međuzvezdani oblak počinje se kontrahirati, potaknut udarcem ili tlakom iz obližnje zvijezde. Oblak se fragmentira na manje dijelove. Pojedini fragmenti počinju propadati. Kada je gustoća dovoljno visoka, proces staje. Unutrašnjost fragmenta počela se grijati do oko 10000 K. Dovoljno je vruća da ionizira vodik. Unutrašnjost se dodatno zagrijava do nekoliko milijuna stupnjeva. Jezgra oblaka postala je protozvijezda. Njezina svjetlost se smanjuje čak i kad temperatura raste jer postaje kompaktnija. Protozvijezda mora imati 0,08 mase Sunca da bi bila što gušća i toplija za pokretanje fuzije. Jezgra je dostigla 10 milijuna K i počinje nuklearna fuzija. Protozvijezda je postala zvijezda. Dosegla je glavnu sekvencu i ostatak će takva sve dok ima vodika za proces fuzije.

Masivne zvijezde se formiraju u iznimno gustim sredinama, a stvaraju se plinovitim nakupljanjem i zvjezdanim zblizavanjem. Diskovi male mase i nepravilne galaksije imaju tendenciju da budu izolirane, formiraju zvijezde i zadržavaju veliku količinu plina. Mogu formirati zvijezde u malim lokalnim događajima gdje god je gravitacija plina važna i posebno su osjetljivi na blage interakcije. Mali sustavi su osjetljivi na brojne učinke koji mogu potisnuti ili

poboljšati formiranje zvijezda. Velike galaksije čine većinu svojih zvijezda na velikim crvenim pomacima, dok patuljaste galaksije čine većinu svojih zvijezda na skromnijim crvenim pomacima. [4]

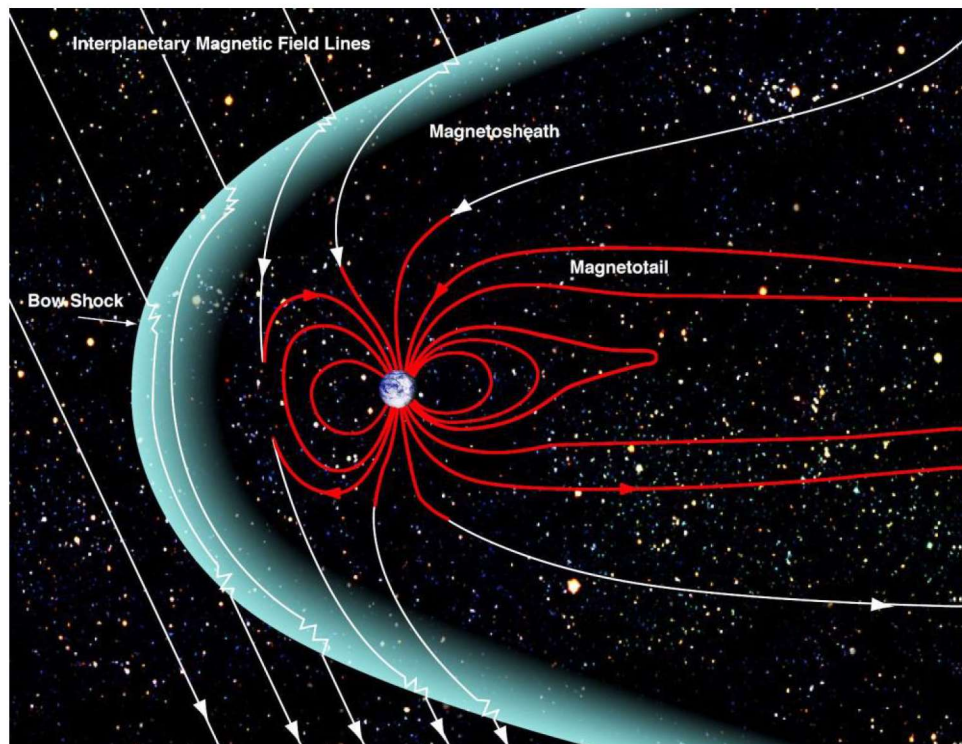
## 6. Zemljino magnetsko polje

Bez magnetskog polja život na Zemlji ne bi mogao postojati zato što Zemljino magnetsko polje štiti okolinu blizu Zemlje od opasnog zračenja i visoke energije plazme od Sunca. Međutim, uvijek postoji dio plazme i zračenja koji mogu prodrijeti kroz barijeru magnetskog polja, što dovodi do magnetskih poremećaja oko Zemlje.

Kompas je bio prvi instrument koji se koristio za mjerenje geomagnetskog polja, korišten za mjerenje smjera polja. Godine 1832. Carl Friedrich Gauss otkrio je način mjerenja iznosa magnetskog polja.

Zemlja se sastoji od kore i plašta koji okružuju tekuću metalnu jezgru koja se zatvara oko unutrašnje krute jezgre i sastoji od željeza i nikala. Zemlja je najbrži rotator u unutrašnjem dijelu Solarnog sustava. Zarotira oko svoje osi svakih 23 sata i 56 minuta. Magnetsko polje se proizvodi kruženjem električnih struja u vrlo vodljivoj vanjskoj jezgri. Složeno kretanje struja pokreće se konvekcijom i rotacijom Zemlje. Apsolutna jakost magnetskog polja na Zemljinoj površini varira od 23  $\mu\text{T}$  do 62  $\mu\text{T}$ . Najjače je oko polova i najslabija oko ekvatora.

Magnetsko polje na Zemlji naziva se geomagnetsko polje. To je superpozicija magnetskih polja koja generiraju različiti izvori. Polje koje generira magnetni dinamo u Zemljinoj tekućoj jezgri nazivaju se glavnim poljem i daleko je dominantnije. Glavno polje i polje kore, koje generiraju magnetizirane stijene na Zemljinoj kori, kategoriziraju se kao unutarnje polje i prilično su stabilne u vremenu u usporedbi s vanjskim poljem. Vanjsko polje se sastoji od polja koje stvaraju električne struje u ionosferi i magnetosferi. Tu je i magnetsko polje proizvedeno induciranim strujama u kori, ogrtačima i oceanima što pridonosi ukupnom geomagnetskom polju. Ukratko, komponente geomagnetskog polja koje čine ukupno geomagnetsko polje su: glavno polje, vanjsko polje i inducirano polje.



Slika 3: Magnetosfera

(Izvor: [12])

Područje u kojem magnetno polje Zemlje dominira i kontrolira gibanje čestica definira se kao magnetosfera. Na strani Zemlje okrenute prema Suncu, magnetosfera je komprimirana zbog solarnog vjetrova i ima paraboloidnu površinu koja se naziva magnetopauza. Magnetopauza je vanjska granica magnetosfere. Kada se nadzvučni solarni vjetar, koji se kreće s prosječnom brzinom od oko 400 km/s u odnosu na Zemlju, sudari s magnetosferom, stvara se luk. To se događa na udaljenosti od oko 13 polumjera Zemlje. Na tamnoj strani Zemlje magnetosfera se proteže daleko u svemir, više od 100 polumjera Zemlje, formirajući magnetni rep. Magnetna sfera štiti Zemlju od upadnog Sunčevog vjetrova, ali uvijek postoji određena količina elektrona i iona koji mogu prodrijeti kroz "štit" i nakon toga postati dio magnetosfere. Trajektorija nabijenih čestica u magnetosferi regulirana je Lorentzovom silom koja čini čestice da se gibaju spiralom oko linija magnetskog polja. Mjesto na kojem je polje čisto vertikalno nazivaju se južni i sjeverni magnetski polovi i nisu isti kao zemljopisni polovi označeni osi rotacije Zemlje. Kada se nabijene čestice približe polarnim regijama, gdje su linije magnetskog polja guste, a polje jače, usporavaju se kao odbijanje i vraćaju se na hemisferu. Kada dosegnu hemisferu, proces se ponavlja. Te čestice, koje okružuju Zemlju i putuju naprijed-nazad između hemisfera, tvore Zemljine radijacijske pojaseve.

Donja granica magnetosfere označava gornji dio ionosfere. Ionosfera se nalazi na visini između 50-600 km i to je električno provodni dio gornje atmosfere. Sunčevo ultraljubičasto zračenje uzrokuje njezinu ionizaciju. Mjerenja geomagnetskih polja i druge geološke studije pokazuju da se Zemljino magnetsko polje značajno mijenja s vremenom od ljestvice sekundi do milijuna godina. Dugoročne varijacije dolaze iz dinamike Zemljine unutrašnjosti, dok kratkoročne varijacije imaju vanjsko podrijetlo. Dugoročne varijacije su na skali od pet godina ili više. Kratkoročne varijacije mogu biti na ljestvici sekundi ili više, ali njihovo trajanje jedva prelazi godinu dana. Često uzrokuju intenzivne varijacije u polju i uglavnom ih proizvode struje u magnetosferi i ionosferi, ali i inducirane struje u Zemljinoj kori i oceanima.

Danas se mjerenja vektora Zemljinog magnetskog polja provode na približno 170 geomagnetskih opservatorija širom svijeta. Geomagnetski opservatorij je mjesto gdje se kontinuirano mjerenja geomagnetskog polja obavljaju za dulja vremenska razdoblja s najboljom mogućom točnošću.

### **6.1. Polarna svjetlost**

Aurora borealis i aurora australis su pojave na visokim sjevernim i južnim širinama, rjeđe na srednjim geografskim širinama i rijetko viđene u blizini ekvatora. Dok je obično zelenkaste boje, aurora također može pokazivati crvenu, plavu, ljubičastu, ružičastu i bijelu boju.



Slika 4: Polarna svjetlost

(Izvor: [13])

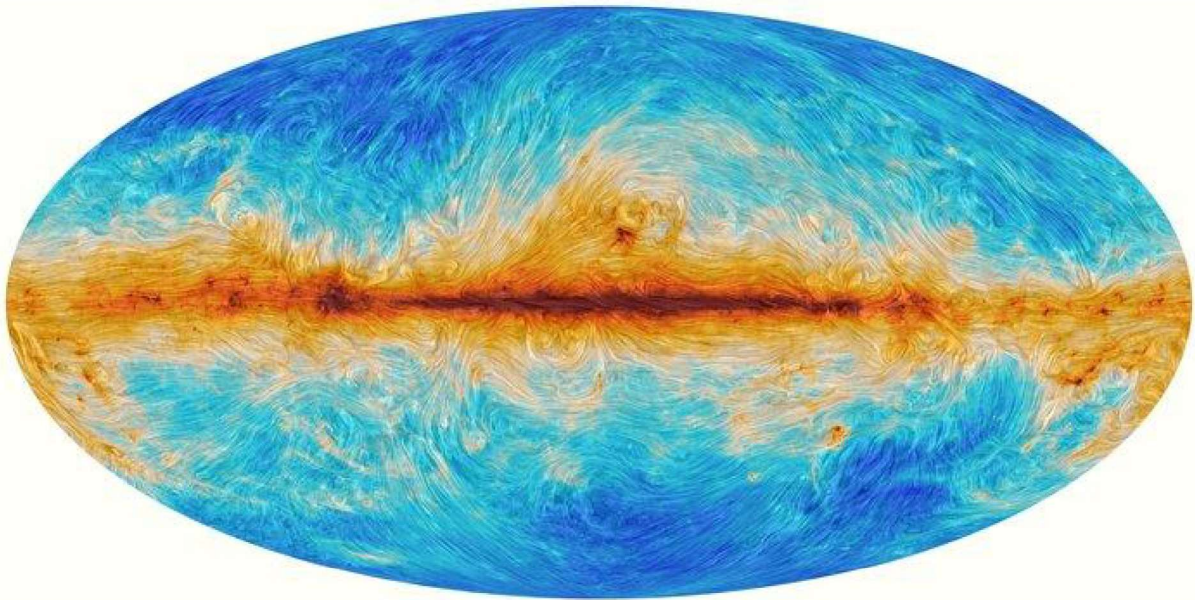
Aurore su spektakularan znak da je naš planet električno povezan sa Suncem. Ove svjetlosne emisije potaknute su energijom Sunca i potaknute električno nabijenim česticama zarobljenim u

Zemljinoj magnetskoj površini. Neke čestice imaju dovoljno energije da mogu prodrijeti u gornju atmosferu Zemlje. Tamo se sudaraju s atomima i gube energiju. Ovi sudari dovode do aurore jer se atomi u Zemljinoj atmosferi pobuđuju sudarima i emitiraju elektromagnetsko zračenje u vidljivom rasponu kada se one ne pobuđuju.

Aurore se obično pojavljuju u prstenastim područjima promjera oko 4000 km oko magnetskih polova Zemlje. Budući da je aurora mnogo tamnija od Sunčeve svjetlosti, ona se ne može vidjeti danju. Najbolji prikazi nastaju u nekoliko sati prije ponoći. Aurore su promatrane na Jupiteru, Saturnu i Uranu, ali ne na Marsu, Veneri ili Merkur. Svaki planet s magnetskim poljem i atmosferom vjerojatno ima aurore. [7]

## 7. Magnetsko polje Mliječnog puta

U našem Mliječnom putu jakost polja je  $6 \mu\text{G}$  u blizini Sunca i povećava se na 20 do  $50 \mu\text{G}$  blizu središta. Magnetsko polje velikih razmjera u našoj Galaksiji, Mliječnom putu, približno prati gustoću spiralnih krakova.



Slika 5: Magnetsko polje Mliječnog puta

(Izvor: [14])

Nije moguće samo na temelju optičke polarizacije modelirati magnetsko polje Mliječnog puta. Promatranje ukupnog intenziteta radiokontinuumu u frekvencijskom području od oko 300 MHz-10 GHz savršena je metoda za istraživanje magnetskih polja. Analiza ukupne sinkrotronske emisije daje jakost ukupnog polja od  $(6 \pm 2) \mu\text{G}$  u lokalnom susjedstvu i  $(10 \pm 3) \mu\text{G}$  na polumjeru 3 kpc. Radijalna eksponencijalna duljina skale ukupnog polja oko 12 kpc. Vrijednosti su slične onima u vanjskim galaksijama. Kutna razlučivost se poboljšala tako da su za sada dostupna istraživanja svih neba s razlučivošću ispod  $1^\circ$ .

Struktura magnetskog polja u disku Mliječnog puta vjerojatno je vrlo složena i pokazuje detalje koji se još ne mogu riješiti u vanjskim spiralnim galaksijama. Halo Mliječnog puta ima dipolarni uzorak, za razliku od onog u vanjskim galaksijama. Mliječni put možda još nije stvorio koherentno polje velikih razmjera preko cijelog diska. Vremenski okvir za potpuno koherentna polja može biti dulji od starosti galaksije. Dok opažanja Mliječnog puta mogu pratiti magnetne strukture na mnogo manje ljestvice nego u vanjskim galaksijama, polje je mnogo teže izmjeriti u

Mliječnom putu. Mnogi novi pulsari omogućit će nam da promatramo detaljnu strukturu magnetskog polja u Mliječnoj stazi.

SKA će također omogućiti mjerenje Zeemanovog efekta u mnogo slabijim magnetskim poljima u Mliječnom putu i također u obližnjim galaksijama. Naša galaksija Mliječni put je sama po sebi prečkasta spiralna galaksija. Ove galaksije sadrže oko  $10^{11}$  zvijezda, koje su zajedno sa svojim međuzvezdanim medijem, u njihovoj rotaciji, na tankom disku koji je podržan od gravitacije.

[2]



## 8. Zaključak

Kao što je prikazano, magnetizam je sveprisutan u svemiru, s planetima, zvijezdama, međuzvezdanim plinom i galaksijama. Razumijevanje svemira nemoguće je bez razumijevanja magnetskih polja. Elektromagnetska sila jedna je od temeljnih sila u prirodi, kao i gravitacija.

Važnost njegovog postojanja vidimo u procesu formiranja zvijezda, štiti nas od opasnog zračenja koje dolazi do nas iz svemira, popunjava međuzvezdani prostor, utječe na evoluciju galaksija i skupova galaksija i kontrolira raspodjelu kozmičkih zraka u međuzvezdanom mediju.

Kozmička magnetska polja su prvobitno nađena na Suncu, pomoću Zeemanovog efekta mjereno je magnetsko polje Sunčevih pjega. Sinkrotronska emisija mjeri snagu polja, dok njegova polarizacija prinosi orijentaciji polja. Faradeyeva rotacija prinosi punoj trodimenziskoj slici pružajući informacije o komponenti polja duž linije vidljivosti, dok Zeemanov efekt pruža neovisna mjerenja jakosti polja u oblacima plina.

Na Zemlji naše magnetsko polje pomaže u usmjeravanju struje čestica iz Sunca tvoreći zanimljivu pojavu auroru koja se vidi u visokim sjevernim i južnim geografskim širinama. Također su promatrane na vanjskim plinskim divovskim planetima, što pokazuje koliki je utjecaj Sunčevog vjetra. Među najvećim vrijednostima polja našle su se neutronske zvijezde mase od 1,5 masa Sunca.

Bitno je opažanje magnetskih polja u intergalaktičkom mediju, kojim bi odgovorili na mnoga pitanja o formiranju struktura u ranom svemiru.

## 9. Literatura

[1] Kaspi, M. Victoria, *Magnetars*, 28. 2. 2017.

<https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1302/1302.5663.pdf>, 20. 7. 2019.

[2] Beck, Rainer, *Magnetic Fields in the Milky Way and in Galaxies*,

<https://arxiv.org/pdf/1703.00068.pdf>, 18. 7. 2019.

[3] *Magnetic Fields in the Universe*,

<https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1809/1809.03543.pdf>, 3. 7. 2019.

[4] M. de Gouveia Dal Pino, Elisabete, *Cosmic Magnetic Fields*,

<https://arxiv.org/ftp/astro-ph/papers/0603/0603065.pdf>, 3. 7. 2019.

[5] *Pulsar*, <http://astronomy.swin.edu.au/cosmos/P/Pulsar>, 26. 6.2019.

[6] *Cosmic Magnetism*, <https://www.skatelescope.org/magnetism/>, 19. 7. 2019.

[7] *Aurora*, [https://pwg.gsfc.nasa.gov/polar/EPO/auroral\\_poster/aurora\\_all.pdf](https://pwg.gsfc.nasa.gov/polar/EPO/auroral_poster/aurora_all.pdf), 20. 7. 2019.

[8] Gunnarsdóttir, Edda Lína, *The Earth's Magnetic Field*,

[https://skemman.is/bitstream/1946/12177/1/the\\_earths\\_magnetic\\_field.pdf](https://skemman.is/bitstream/1946/12177/1/the_earths_magnetic_field.pdf), 27. 6. 2017.

[9] Larson, B. Richard, Summary: *Modes of Star Formation*,

<http://www.astro.yale.edu/larson/papers/Heidelberg00.pdf>, 20. 7. 2019.

[10] [https://s3-us-west-2.amazonaws.com/courses-images/wp-content/uploads/sites/1095/2016/11/03160111/OSC\\_Astro\\_15\\_01\\_Sun.jpg](https://s3-us-west-2.amazonaws.com/courses-images/wp-content/uploads/sites/1095/2016/11/03160111/OSC_Astro_15_01_Sun.jpg)

[11] <https://3c1703fe8d.site.internapcdn.net/newman/csz/news/800/2013/magneticstar.jpg>

[12] [http://www.nasa.gov/sites/default/files/images/470162main\\_magnetosphere-orig\\_full.jpg](http://www.nasa.gov/sites/default/files/images/470162main_magnetosphere-orig_full.jpg)

[13]

[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/a/a4/L%27Eyjafjallaj%C3%B6kull\\_sous\\_les\\_aurores\\_bor%C3%A9ales.jpg/300px-L%27Eyjafjallaj%C3%B6kull\\_sous\\_les\\_aurores\\_bor%C3%A9ales.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/a/a4/L%27Eyjafjallaj%C3%B6kull_sous_les_aurores_bor%C3%A9ales.jpg/300px-L%27Eyjafjallaj%C3%B6kull_sous_les_aurores_bor%C3%A9ales.jpg)

[14]

[https://www.esa.int/var/esa/storage/images/esa\\_multimedia/images/2015/02/polarised\\_emission\\_from\\_milky\\_way\\_dust/15238556-1-eng-](https://www.esa.int/var/esa/storage/images/esa_multimedia/images/2015/02/polarised_emission_from_milky_way_dust/15238556-1-eng-GB/Polarised_emission_from_Milky_Way_dust_node_full_image_2.jpg)

[GB/Polarised\\_emission\\_from\\_Milky\\_Way\\_dust\\_node\\_full\\_image\\_2.jpg](https://www.esa.int/var/esa/storage/images/esa_multimedia/images/2015/02/polarised_emission_from_milky_way_dust/15238556-1-eng-GB/Polarised_emission_from_Milky_Way_dust_node_full_image_2.jpg)

## **Životopis**

Vedrana Marić rođena je 5. svibnja 1996. u Slavonskom Brodu. Osnovnu školu „Ivan Meštrović“ završila je u Vrpolju. Završetkom osnovne škole upisuje Tehničku školu u Slavonskom brodu. Godine 2015. svoje obrazovanje nastavlja na preddiplomskom studiju fizike na Odjelu za fiziku, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku.