

МАТЕМАТИЧКА ГИМНАЗИЈА

МАТУРСКИ РАД

из предмета **ФИЗИКА**

**СУНЦЕ: ОСНОВНЕ
КАРАКТЕРИСТИКЕ**

Ученик

Предраг Кљаић, 4ц

Ментор

Слободан Спремо

Београд, 2026.

Садржај

1	Увод	1
2	Астрономски контекст и положај	2
2.1	Положај у Млечном путу	2
2.2	Удаљеност од Земље	3
3	Физички параметри и састав	5
3.1	Основне величине	5
3.2	Температура и сјај	6
3.3	Хемијски састав	7
4	Унутрашња структура Сунца	8
4.1	Језгро: термонуклеарна фузија	10
4.2	Радијативна и конвективна зона	10
5	Атмосфера Сунца	11
5.1	Фотосфера: видљива површина	11
5.2	Хромосфера и корона	13
5.3	Корона: највиши слој Сунчеве атмосфере	14
6	Енергетски процеси	15
6.1	Протон-протон ланац	15
6.2	Сунчеви неутрини	16
7	Еволуциони пут Сунца	17
7.1	Формирање и главни низ	17
7.2	Будуће фазе	17
8	Сунце и Земља	20
8.1	Утицај на климу и живот	20
8.2	Културни значај	21
9	Закључак	22

1 Увод

Сунце је средиште нашег планетарног система – најближа звезда која непрекидно даје светлост, топлоту и енергију, без којих живот на Земљи не би постојао. Иако га свакодневно гледамо и чини нам се непроменљиво, Сунце је заправо живо, сложено и динамично тело, које непрестано ради као огромни мотор. Оно припада **спектралној класи G2V**¹ и састоји се претежно од водоника² и хелијума.

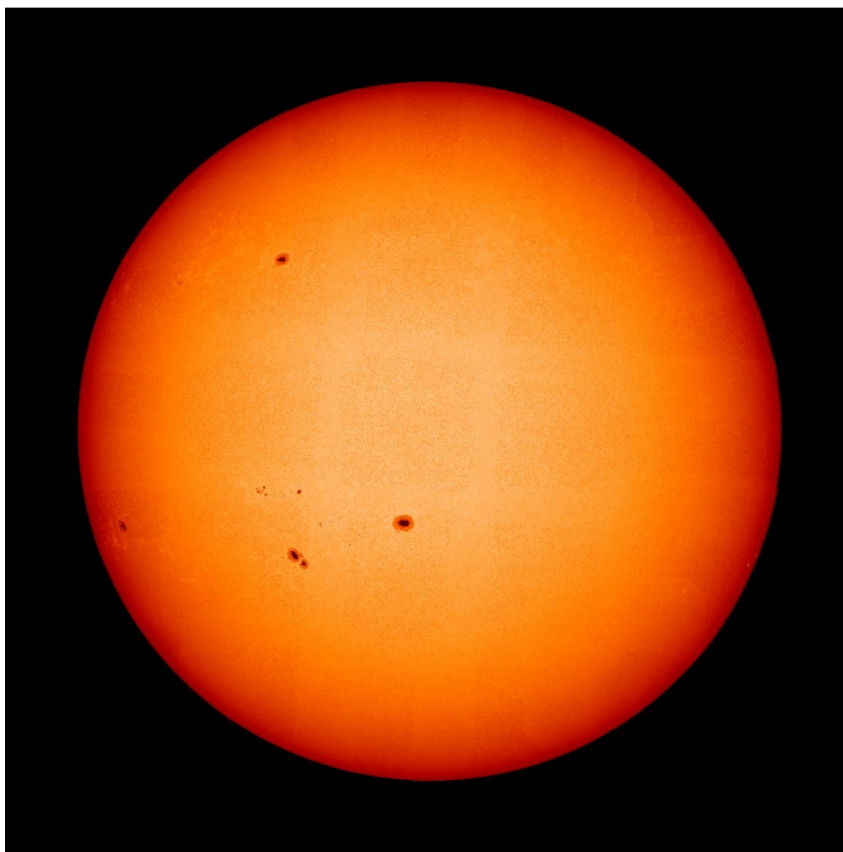
Материја Сунца је у стању **плазме** – врела и јонизована супстанца која не личи ни на једну чврсту планету. Сунце нема праву површину као Земља или Марс. Његова „површина“ – фотосфера – је слој где плазма постаје довољно танка да видимо светлост. То није општа граница као код планета, већ постепено прелази у дубље слојеве, као да гледамо кроз маглу која светлуца.

У самом језгру, на температурама око 15 милиона степени и под огромним притиском, Сунце непрекидно спаја водоник у хелијум, процес који се зове **термонуклеарна фузија**. Сваке секунде, око 600 милиона тона водоника претвара се у хелијум, при чему се део масе претвара у енергију. Та енергија путује кроз унутрашње слојеве звезде милионима година пре него што као светлост стигне до нас – и то је оно што нам омогућава да видимо дан и да живимо на Земљи. Замислите само: сваки зрак сунчеве светлости је резултат огромног процеса који се одвија у самом центру Сунца!

Проучавање Сунца није само посматрање једне звезде – то је као да учимо законе Универзума на делу. Циљ овог рада је да кроз анализу структуре и живота Сунца покажемо како наша звезда функционише, како се мења током времена и зашто је њен опстанак услов за све што живи на Земљи. Сунце је, у ствари, прави шампион: оно је мотор, учитељ и извор живота у исто време, а ми смо ту да га разумемо.

¹G2V: G - жути патуљак (5.300–6.000 K), 2 - подтип, V - звезда главног низа.

²Хемијски састав по маси (Asplund et al. 2009): H 73,46%, He 24,85%, O 0,77%, C 0,29%, Fe 0,16%, остали 0,47%.



Слика 1: Сунце - наша најближа звезда (Извор: NASA)

2 Астрономски контекст и положај

2.1 Положај у Млечном путу

Сунце се налази у спољашњем делу **спиралне галаксије**³ Млечни пут, на удаљености од приближно **26.000 светлосних година** од **галактичког центра**⁴. Док је центар галаксије препун звезда и под јаким утицајем супермасивне црне рупе, део кроз који наше Сунце описује своју галактичку путању је миран и стабилан, као удобна лука где планете могу да постоје дуго времена.

Сунце се налази у делу наше галаксије који се зове **Орионов крак**. Замислите галаксију као огроман спирални диск са „крацима“ (рукавцима) - Сунце је у једном таквом краку. Овај део галаксије је прилично миран и стабилан. У њему има облака гаса и прашине у којима се и даље рађају нове звезде. Једно од најпознатијих места где се то дешава је **Орионова маглина (M42)** - као „породилиште“ за звезде. Наш

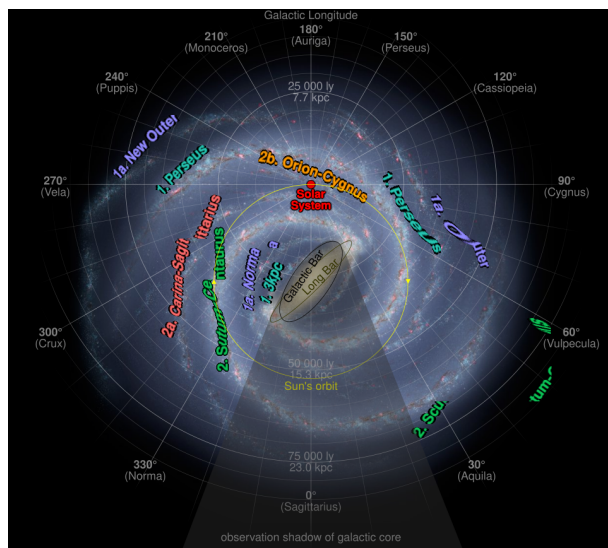
³Спирална галаксија је врста галаксије са централном испупчењем (булџем) и спиралним крацима који садрже младе, плаве звезде, међузвездани гас и прашину. Млечни пут је типична спирална галаксија.

⁴Галактички центар Млечног пута налази се у сазвежђу Стрелац (Sagittarius A*). У њему се налази супермасивна црна рупа од 4 милиона соларних маса, окружена густим звезданим јатом.

положај у Орионовом краку је добар јер нас одваја од буке и опасности центра галаксије, а и даље нам даје довољно материјала за развој планета.

Сунце се креће око галактичког центра брзином од приближно **220 km/s**, при чему један пун обилазак, познат као **галактичка година**, траје између 225 и 250 милиона година. За 4,6 милијарди година постојања, Сунце је обишло галактички центар око двадесет пута, одржавајући стабилне услове у Сунчевом систему. Да би се ова временска разлика лакше разумела, може се направити једноставно поређење: ако би једна галактичка година трајала као један људски дан, онда би Сунце од свог настанка „доживело“ тек нешто више од двадесет дана. Ово показује колико су галактички процеси спори и стабилни у поређењу са људским временом, али управо та спорост омогућава дуготрајно постојање планета и живота.

По хемијском саставу, Сунце припада **Популацији I** — звездама богатијим тешким елементима. Ова чињеница је од пресудног значаја за настанак стеновитих планета⁵ и представља један од кључних предуслова за развој сложених структура, укључујући и живот.



Слика 2: Шематски приказ Млечног пута са означеним спиралним крацима. Црвена тачка означава положај Сунца у Орионовом краку.

2.2 Удаљеност од Земље

Удаљеност између Земље и Сунца представља основну мерну јединицу планетарне астрономије — **астрономску јединицу (АЈ)**:

$$1 \text{ AJ} = 149\,597\,870\,700 \text{ m}.$$

Астрономска јединица (АЈ) је најприроднија мера у Сунчевом систему. То је растојање од Земље до Сунца, а сва остала планетарна растојања се изражавају у односу на то. Сматрамо да је најприроднија зато што сви знамо где је Земља јер живимо на њој, а сви знамо где је Сунце зато што га видимо сваки дан и то је

⁵Меркур, Венера, Земља, Марс

најлакше растојање које могу сви људи да замисле. И онда се због тога у планетарној астрономији сва растојања изражавају преко астрономске јединице.

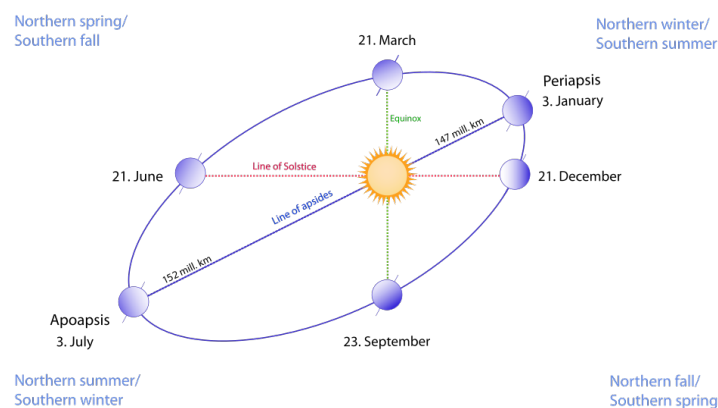
Ова удаљеност, која одговара времену од око 8,3 минута колико је светлости потребно да стигне са Сунца до Земље, значи да наша планета добија тачно онолико топлоте колико јој је потребно. Захваљујући томе, вода на Земљи може да остане у течном стању, а клима да буде релативно стабилна. Да је Земља ближе Сунцу, било би превруће, а да је даље, било би прехладно за живот какав познајемо.

Астрономска јединица, односно растојање између Земље и Сунца, није одувек била позната са великом тачношћу. У прошлости су људи покушавали да је одреде помоћу геометрије и посматрања положаја небеских тела, касније кроз посматрање проласка Венере испред Сунца. Данас се ово растојање мери савременим методама, као што су радарска мерења и праћење свемирских сонди, па је његова вредност позната веома прецизно.

Земљина орбита је благо елиптична. **Елиптична орбита** значи да Земља не обилази Сунце по идеалној кружници, већ по благо издуженој елипси. Због тога се удаљеност мења током године:

- **Перихел** (3. јануар): Земља најближе Сунцу - 147 милиона km
- **Афел** (4. јул): Земља најдаље од Сунца - 152 милиона km

Прави узрок је нагиб Земљине осе од $23,5^\circ$. Када је наша хемисфера нагнута ка Сунцу, Сунчеви зраци падају под стрмијим углом и дају више топлоте — то је лето. Када је нагнута од Сунца, зраци падају косо и дају мање топлоте — то је зима. Познавање астрономске јединице представља темељ за одређивање маса небеских тела, прорачун орбиталних параметара и навигацију свемирских летелица. У том смислу, она није само мера растојања, већ кључ за разумевање нашег планетарног система.



Слика 3: Елиптична орбита Земље око Сунца (ексцентрицитет 0,0167). Перихел се јавља почетком јануара, а афел почетком јула.

3 Физички параметри и састав

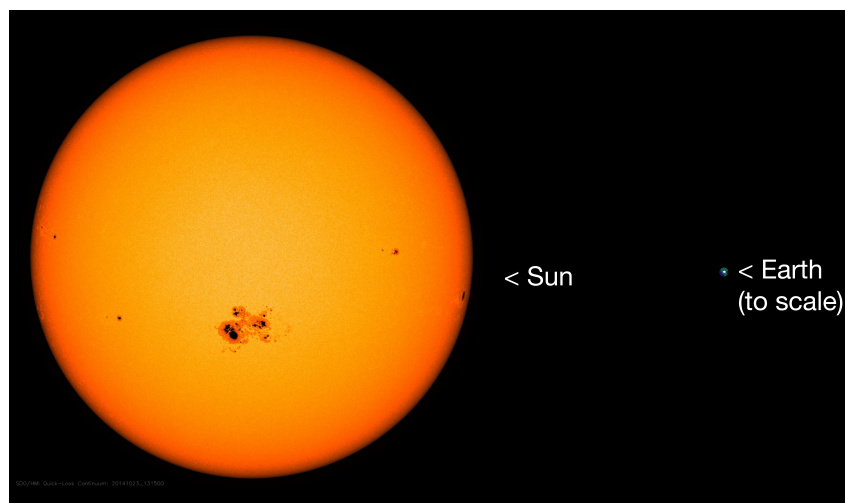
3.1 Основне величине

Сунце као мерна јединица – Као што користимо метар да меримо дужину или килограм за масу, тако астрономи користе Сунце као „меру“ за звезде. Сви његови параметри постављени су на вредност 1, па се све друге звезде упоређују са њим.

Табела 1: Фундаментални физички параметри Сунца

Параметар	Вредност	Јединица	Поређење са Земљом
Маса	$1,989 \times 10^{30}$	kg	333 000× већа
Пречник	1 392 700	km	109× већи
Средња густина	1,41	g/cm ³	26% Земљине
Површинска гравитација	274	m/s ²	28× већа
Луминозитет	$3,828 \times 10^{26}$	W	–

Ови бројеви нису само цифре на папиру – они нам говоре ко је Сунце и зашто је баш такво какво јесте.



Слика 4: Поређење Сунца и Земље (Извор: grade8science)

Прво, маса Сунца од $1,989 \times 10^{30}$ kg није насумичан број. Израчунава се из кретања планета (Кеплерови закони):

$$M_{\odot} = \frac{4\pi^2 a^3}{GT^2},$$

где је a удаљеност планете, T период орбите, а G гравитациона константа. Ова маса ствара гравитацију довољно јаку да држи планете на окупу, али не прејаку да их усиса.

Друго, средња густина од 1,41 g/cm³ нам открива да Сунце није чврсто тело попут Земље. То је огромна лопта вреле плазме – материје толико вреле да су атоми раздвојени на протоне, неутроне и електроне. У таквом стању, притисак и температура одржавају облик, а не чврстину.

Треће, упоредимо Сунце са комшијама. У нашем делу галаксије (у радијусу од пар стотина светлосних година), већина звезда су црвени патуљци – мање, хладније и слабије од Сунца. Сунце спада у горњих 20% по маси, што га чини прилично масованим, али не и екстремним.

Четврто, и најважније – снага Сунца (луминозитет од $3,828 \times 10^{26}$ W) је баш онаква какву живот на Земљи захтева. Да је Сунце $10\times$ јаче, Земља би била преврућа; да је $10\times$ слабије, Земља би била замрзнута. Ова „златна средина“ омогућава да вода остане течна, да клима буде стабилна и да еволуција има времена да створи сложене организме — укључујући и нас.

3.2 Температура и сјај

Зрачење Сунца може се приближно описати зрачењем такозваног црног тела — идеалног физичког модела који служи за опис начина на који врела тела емитују светлост и топлоту. Иако Сунце није савршено црно тело, његово понашање је довољно слично да се овај модел успешно примењује.

Ефективна температура фотосфере Сунца може се одредити применом **Штефан–Болцмановог закона**:

$$L = 4\pi R^2 \sigma T_{\text{eff}}^4,$$

где је L укупна снага зрачења Сунца (луминозитет), R полупречник Сунца, σ Штефан–Болцманова константа, а T_{eff} ефективна температура фотосфере. Ова формула показује да количина енергије коју Сунце зрачи зависи од његове величине и, још значајније, од температуре, при чему и мало повећање температуре доводи до великог пораста зрачења.

Сунчева светлост обухвата широк опсег таласних дужина, али највећи део енергије зрачи у видљивом делу спектра, који људско око може да региструје. Максимум тог зрачења налази се око 500 nm, у жуто-зеленом делу спектра. Управо због тога Сунце делује жућкасто и пружа светлост која је најповољнија за живот на Земљи.

Температурни профил Сунца (од центра ка споља):

- **Језгро:** 15.700.000 K – нуклеарна фузија
- **Радијативна зона:** 7.000.000 K $\rightarrow$ 2.000.000 K
- **Конвективна зона:** 2.000.000 K $\rightarrow$ 5.772 K
- **Фотосфера:** 5.772 K (видљива површина)
- **Корона** ⁶ : 1.000.000 K – 10.000.000 K (атмосфера)

Енергија која настаје у језгру Сунца не стиже одмах до његове површине. Светлост која се створи у центру звезде мора да прође кроз веома густу плазму, при чему се непрестано судара са честицама и мења правац кретања. Због овог спорог „пробијања“ кроз унутрашње слојеве, енергији је потребно око **170.000 година** да стигне до

⁶Напомена: Корона је топлија од фотосфере испод ње – једна од највећих мистерија соларне физике и указује на кључну улогу магнетних поља, Алфвенових таласа и магнетне реконекције.

фотосфере. Када сунчева енергија стигне до Земље, она се може измерити и описати величином која се назива **соларна константа**. Она представља количину енергије која у једној секунди падне на један квадратни метар површине изван Земљине атмосфере и износи приближно **1.361 W/m²**.

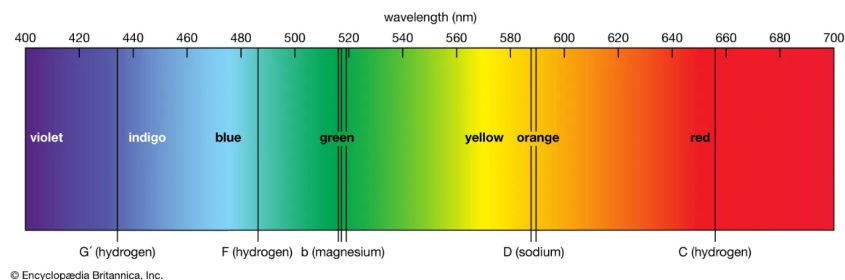
Вредност соларне константе није потпуно иста у сваком тренутку. Она благо варира услед промене удаљености Земље од Сунца током године (око $\pm 3,3\%$), као и због променљиве активности Сунца у оквиру његовог приближно 11-годишњег циклуса (око $\pm 0,1\%$).

3.3 Хемијски састав

Хемијски састав Сунца представља поуздану слику елемената од којих је изграђен Сунчев систем. Као звезда **Популације I**, Сунце је богато елементима тежим од хелијума, који у астрономији заједнички носе назив „метали“.

Табела 2: Хемијски састав сунчеве фотосфере (масени проценти)

Елемент	Симбол	Масени удео
Водоник	H	73,46%
Хелијум	He	24,85%
Кисеоник	O	0,77%
Угљеник	C	0,29%
Неон	Ne	0,17%
Гвожђе	Fe	0,16%
Остали елементи	—	0,30%



Слика 5: Хемијски састав спектралне линије (Извор: Britanica)

Металичност Сунца означава удео елемената тежих од водоника и хелијума у његовом саставу. За Сунце она износи $Z = 0,0134$, што значи да око 1,3% његове масе чине елементи као што су кисеоник, угљеник и гвожђе. Однос металичности и водоника, $Z/X = 0,0229$, показује колика је количина ових тежих елемената у поређењу са водоником, који је главна компонента Сунца.

Оваква хемијска структура сврстава Сунце међу такозване хемијски зреле звезде, настале из материјала који је већ био обогаћен тешким елементима. Управо захваљујући томе, у Сунчевом систему су могле да се формирају стеновите планете.

Током свог живота, унутрашњи састав Сунца се полако мења. У његовом језгру водоник се постепено претвара у хелијум, што доводи до веома спорог, али сталног

повећања сјаја Сунца. Ова промена се одвија током милијарди година и представља природни део еволуције звезда.

Хемијски састав Сунца није важан само за разумевање саме звезде. Он служи као:

- референтна тачка за анализу других звезда,
- основа за разумевање настанка планета,
- показатељ дугорочне стабилности Сунчевог система.

Проучавајући Сунце, схватамо да оно није само врела кугла на небу – то је **живи систем** који одржава живот на Земљи. Као што шампион у спорту постиже савршену равнотежу између снаге и прецизности, тако је и Сунце нашло тачно оно што треба: довољно масе да држи планете заједно, довољно енергије да нас загреје, али не превише да нас спали. У тој занимљивој хармонији крије се читава прича о томе како је живот на Земљи постао могућ – и како ће се одржати још милијардама година.

4 Унутрашња структура Сунца

Иако Сунце свакодневно видимо као светлу лопту на небу, његова права природа је много сложенија и фасцинантнија. Унутра се одвијају процеси који производе енергију за живот на Земљи и обликују услове у целом Сунчевом систему. Унутрашњост Сунца је као прецизно подешен мотор: гравитација, топлота и нуклеарне реакције раде заједно тако да енергија полако путује од густог језгра ка површини. Један фотон светлости може да путује милион година кроз ове слојеве пре него што стигне до наших очију.

Главне зоне

Унутрашњост Сунца дели се на три главна слоја, различита по томе како преносе енергију:

- **Језгро:** овде се водоник претвара у хелијум и производи енергију кроз термонуклеарну фузију. То је „мотор“ Сунца.
- **Радијативна зона:** густ слој плазме кроз који енергија полако путује ка површини. Фотони се стално сударају са честицама, што успорава пут.
- **Конвективна зона:** топлота се преноси покретима вреле плазме ка површини, попут кључале воде у шерпи у којој се мехурићи уздижу ка површини.

Како меримо шта се дешава унутра

Ми не можемо да завиримо директно у Сунце, али користимо савремене методе:

- **Хелиосеизмологија:** као да слушамо вибрације Сунца, што нам каже колико је густо и колико топлоте има у различитим слојевима.
- **Неутринска астрономија:** меримо честице које долазе директно из језгра Сунца и кажу нам колико се енергије производи.

Енергија путује дуго

Енергија настала у језгру не стиже одмах до површине. Због честих судара фотона са честицама плазме, њен пут траје око **170.000 година!** Сваке секунде, око **600 милиона тона водоника** претвара се у хелијум, а око **4 милиона тона масе** постаје енергија по формули:

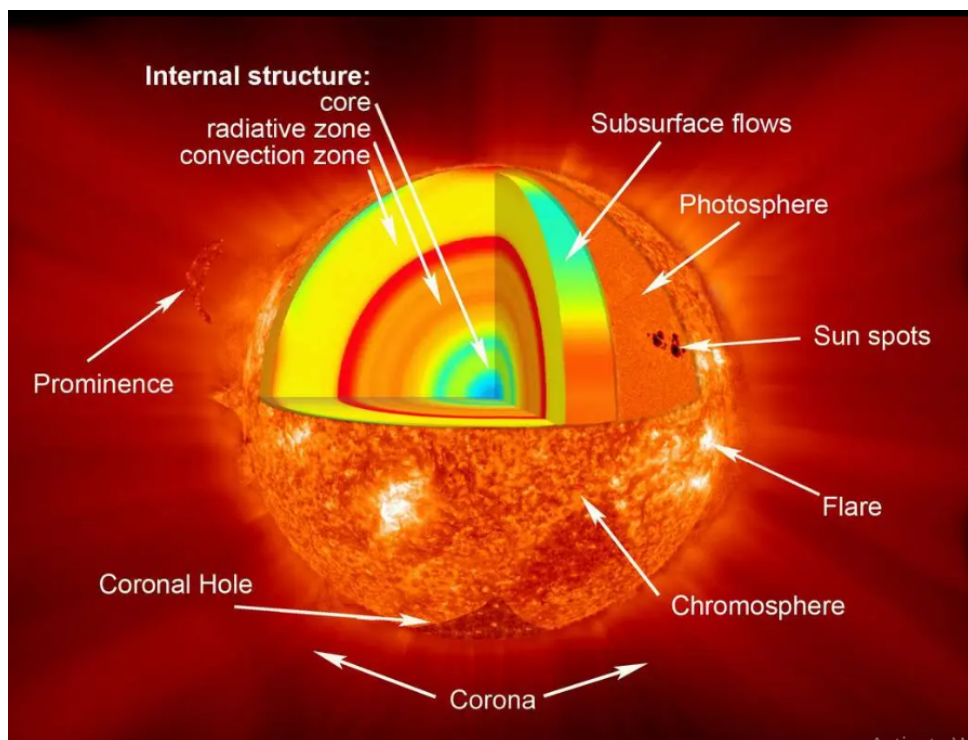
$$E = mc^2$$

где је:

- E – енергија која се ослобађа,
- m – маса која се претвара у енергију,
- c – брзина светлости у вакууму ($c \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$).

На Земљиној орбити, ова енергија се осећа као **соларна константа** од око **1.361 W/m²**. Мала колебања се јављају:

- сезонска ($\pm 3,3\%$) због елиптичности орбите,
- током 11-годишњег сунчевог циклуса ($\pm 0,1\%$).

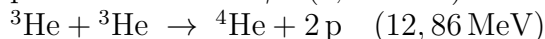
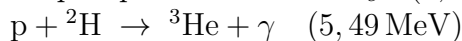
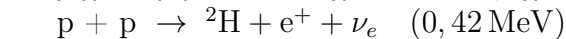


Слика 6: Шема унутрашње структуре Сунца (Извор: NASA)

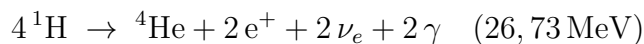
4.1 Језгро: термонуклеарна фузија

Језгро је срце Сунца, централни део до око $0,25 R_{\odot}$, где се стварно „кува“ енергија. Иако заузима само 1,6% запремине Сунца, у њему се налази око 34% масе и управо оно ствара скоро сву енергију која осветљава и загрева планете. Услови су овде невероватни: температура до 15,7 милиона К, притисак око 250 милијарди атмосфера и густина 150 g/cm^3 .

Протони у језгру савладавају одбијање између позитивних наелектрисања и крећу у ланац реакција зван **протон-протон (p-p) ланац**. Четири воденикова језгра спајају се у један хелијум, ослобађајући огромну количину енергије:



Нето ефекат:



Табела 3: Карактеристике сунчевог језгра (SSM)

Параметар	Вредност	Јединица	Напомена
Гранични радијус	$0,25 R_{\odot}$	–	Око 175.000 km
Запремински удео	1,6%	–	Мали део запремине
Температура (центар)	15,7	$\times 10^6 \text{ K}$	Врело као 15 милиона Сунца!
Притисак (центар)	250	$\times 10^9 \text{ bar}$	250 милијарди атмосфера
Густина (центар)	150	g/cm^3	$150 \times$ густина воде
Масени удео H	0,34	–	Смањен због фузије
Масени удео He	0,64	–	Повећан јер настаје фузијом
Стопа производње енергије	$2,5 \times 10^{-4}$	W/kg	Колико енергије прави 1 кг материје

Докази: сунчеви неутрини долазе директно из језгра за само неколико секунди, што потврђује да фузија заиста ради.

4.2 Радијативна и конвективна зона

Од $0,25$ до $0,71 R_{\odot}$ налази се **радијативна зона**, где енергија путује полако кроз густу плазму као да пролази кроз маглу. Фотони се стално апсорбују и поново емитују, а пут од језгра до површине траје око **170.000 година** – светлост коју данас видимо је стара као цивилизација!

$$F_{rad} = -\frac{16\sigma T^3}{3\kappa\rho} \frac{dT}{dr}$$

- Температура: $7 \times 10^6 \rightarrow 2 \times 10^6 \text{ K}$
- Густина: $20 \rightarrow 0,2 \text{ g/cm}^3$
- Пренос: само радијацијом

Од $0,71$ до $1,00 R_{\odot}$ је **конвективна зона** — „бурна мора“ вреле плазме. Стубови топлоте се уздижу, хладе и спуштају назад, стварајући динамично кретање које обликује магнетно поље Сунца.

- Температура: $2 \times 10^6 \rightarrow 5.772 \text{ K}$
- Густина: $0,2 \rightarrow 2 \times 10^{-7} \text{ g/cm}^3$
- Време преноса: 1 недеља

Како знамо шта се дешава унутра:

- **Хелиосеизмологија:** слуша вибрације Сунца и каже нам густину и температуру унутрашњих слојева.
- **Неутринска астрономија:** детектује честице које долазе директно из језгра и показује нам колико енергије се производи.

Сунце производи енергију у свом језгру и постепено је преноси ка површини, док кретање унутрашњих слојева ствара магнетно поље које штити Земљу од штетног зрачења.

5 Атмосфера Сунца

Сунчева атмосфера је скуп спољашњих слојева Сунца кроз које енергија и материја напуштају звезду. У тим слојевима настају светлост коју видимо, ултраљубичасто и рендгенско зрачење, као и наелектрисане честице које се шире кроз Сунчев систем. За разлику од Земљине атмосфере, Сунчева атмосфера **нема оштру границу**, већ се постепено проређује и прелази у међупланетарни простор. Проучавање ових слојева показује на који начин Сунце шаље светлост, топлоту и наелектрисане честице кроз свемир, као и како се његова активност временом мења. Те промене утичу на климу, магнетно поље Земље и услове за живот на планетама.

Испод ове структуре непрекидно се одвијају физички процеси који се могу директно посматрати. На фотосфери се виде грануле — мале области у којима се врела плазма подиже, док се хладнија спушта назад. У вишим слојевима атмосфере, посебно у корони, дешавају се процеси који доводе до њеног неочекивано високог загревања. Сваки слој, од фотосфере до короне, мења начин на који се сунчева енергија преноси у свемир и стиже до Земље.

5.1 Фотосфера: видљива површина

Фотосфера је слој из ког долази **99% светлости коју видимо**. Иако га зовемо „површином“, то је у ствари **танка мембрана плазме**, дебела $300\text{--}500 \text{ km}$. У унутрашњости Сунца материја је веома густа, па се светлост стално судара са честицама и споро напредује. Тек у фотосфери плазма постаје довољно ретка да фотони могу да напусте Сунце и као видљива светлост стигну до Земље.

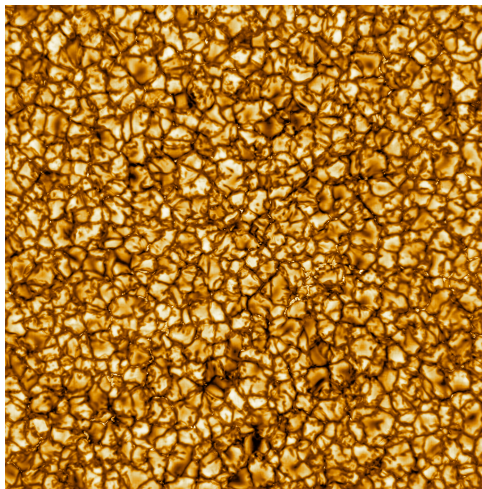
У фотосфери температура није свуда иста: топлија плазма из унутрашњости избија ка површини, а хладнија тоне назад. Због тога настају **грануле** — светлије

области где се врела плазма подиже и тамнији рубови где се хладнија плазма спушта. Свака гранула је величине мањег града и постоји око 8–10 минута. Ово стално кретање показује да се енергија у Сунцу непрекидно преноси ка површини.

Табела 4: Карактеристике фотосфере

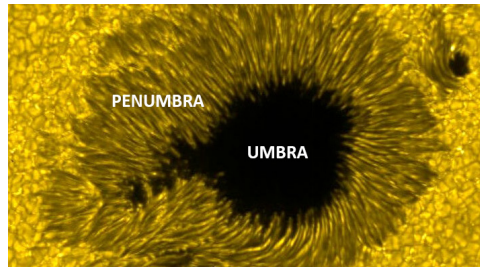
Параметар	Вредност	Јединица
Дебљина	300–500	km
Температура (дно)	6.600	K
Температура (врх)	4.400	K
Просечна температура	5.772	K
Густина (дно)	2×10^{-7}	g/cm ³
Густина (врх)	3×10^{-8}	g/cm ³
Притисак (дно)	$1,2 \times 10^4$	Pa (0,12 bar)

Гранулација фотосфере настаје услед конвекције плазме. **Светле грануле** представљају области у којима се врела плазма из унутрашњости Сунца подиже ка површини, док су **тамније области** канали у којима се охлађена плазма спушта назад у унутрашње слојеве. Овај процес ствара неправилан узорак који се непрестано мења, са карактеристичним временом трајања појединачне грануле од око 8–10 минута.



Слика 7: Гранулација фотосфере (Извор: Wikipedia)

Сунчеве пеге су тамније области фотосфере јер имају нижу температуру од околине. Њихово настајање је последица **јаког магнетног поља** које успорава конвективно струјање плазме и тиме смањује пренос топлоте ка површини.



Слика 8: Сунчеве пеге (Извор: spaceweather)

5.2 Хромосфера и корона

Хромосфера је слој Сунца који се налази изнад фотосфере. Није видљив нормалним оком, осим током потпуног помрачења Сунца, када се појави као танка ружичаста линија око Сунца.

Температура хромосфере достиже значајно високе вредности. Она расте са дна ка врху: од око 4.500 K до 20.000 K.

У овом слоју се дешавају мали млазови вреле плазме који се називају **спикуле**. Ови млазови се дижу према спољним деловима Сунца и показују како топлота и енергија из језгра Сунца стижу према спољним слојевима атмосфере.

Изнад хромосфере, **корона** се протеже милионима километара у свемир, разређена до 10^{-15} g/cm^3 , али врела до 1–10 милиона K. Овај екстремни контраст густине и температуре представља једну од највећих мистерија соларне физике. **Протуберанце** – облаци релативно хладне плазме који лебде у врелој корони – илуструју интеракцију између температуре, магнетизма и плазме.



Слика 9: Сунчев протуберанц (Извор: NASA)

Они могу бити мирни, трајајући недељама, или еруптивни, ослобађајући енергију у свемир као део короналних избачаја масе (СМЕ).

Табела 5: Преглед хромосфере и короне				
Слој	Дебљина	Температура	Густина	Кључни феномени
Хромосфера	2.000 km	4.400–20.000 K	10^{-11} – 10^{-13} g/cm ³	Спикуле, H- емисија
Транзициона зона	~100 km	20.000 K – 1 МК	10^{-14} g/cm ³	Јонизациони скокови
Корона	> 3 $R_{\odot}$	1–10 МК	10^{-15} g/cm ³	Петље, СМЕ, сун.ветар

5.3 Корона: највиши слој Сунчеве атмосфере

Корона је спољни слој Сунца који се простира милионима километара у свемир. Она је веома разређена, али изузетно врућа — температура достиже и до милион K. То је супротно очекивању, јер је корона далеко од језгра, главног извора топлоте. Ово је познато као **коронални парадокс**.



Слика 10: Сунчева корона виђена током помрачења (Извор: NASA)

Научници сматрају да корону загревају три главна процеса:

- **Магнетна реконекција:** магнетне линије се преуређују, ослобађајући огромну количину енергије која убрзава честице и загрева гас.
- **Алфвенови таласи:** таласи у магнетним пољима преносе енергију од унутрашњих слојева ка корони.
- **Нанобљесци:** милиони малих мини-експлозија у нижој корони постепено загревају цео слој.

Ови процеси не утичу само на Сунце само по себи — они обликују целокупни Сунчев систем:

- **Сунчев ветар** је континуирани проток наелектрисаних честица који обавија све планете и ствара магнетосфере.

- **Соларни бљесци и коронални избачаји масе** могу да ометају сателитске сигнале, навигацију и електричне мреже на Земљи.
- **Размена енергије и честица** утиче на атмосфере планета, што може бити важно за настанак и одржавање живота.

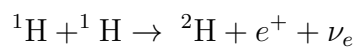
6 Енергетски процеси

Енергетски процеси у Сунцу омогућавају да оно светли, загрева планете и остане стабилно дуже време. Најзначајнији процес је **термонуклеарна фузија**, која се одвија у језгру под екстремним условима температуре и притиска. Енергија која се направи у језгру се полако преноси ка спољним слојевима пре него што се ослободи у свемир.

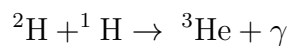
6.1 Протон-протон ланац

Протон-протон (p-p) ланац је примарни нуклеарни реакциони пут у Сунцу, одговоран за преко 99% енергије која се производи у његовом језгру. Овај процес спајања водоника у хелијум одвија се у неколико корака:

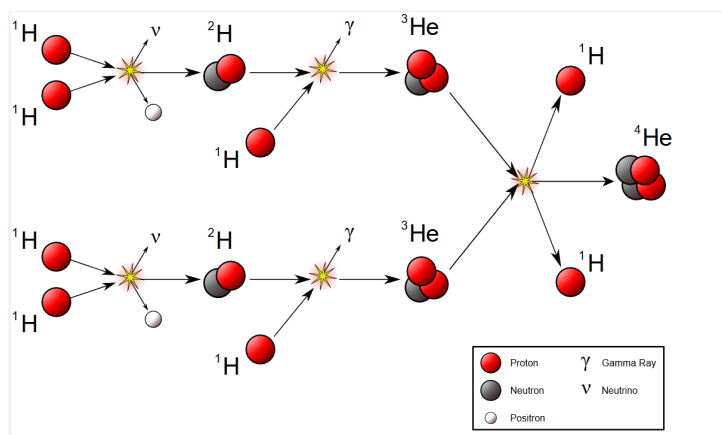
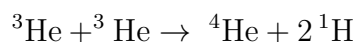
1. Два протона (^1H) се спајају, формирајући тешки водоников изотоп (деутеријум, ^2H), са емисијом позитрона (e^+) и електронског неутрина (ν_e):



2. Деутеријум се спаја са још једним протоном, формирајући хелијум-3 (^3He) и ослобађајући гама-зраке (γ):



3. Два језгра хелијума-3 се спајају, производећи хелијум-4 (^4He) и ослобађајући два протона:



Слика 11: Протон-протон ланац (Извор: Wikipedia)

Нето резултат читавог циклуса је конверзија (пребацавање) четири протона у једно језгро хелијума-4, при чему се део масе претвара у енергију према Ајнштајновој једначини $E = mc^2$. Укупна ослобођена енергија по реакцији износи око 26,73 MeV.

Протон-протон ланац је изузетно осетљив на температуру – стопа реакције пропорционална је температури на степен између 4 и 6 ($\epsilon_{pp} \propto T^n$, где је $n \approx 4 - 6$). У Сунчевом језгру, где температура достиже око $1,57 \times 10^7$ K, ова реакција одржава стабилну производњу енергије од приближно $3,828 \times 10^{26}$ W.

6.2 Сунчеви неутрини

Неутрини су врло лагане, субатомске честице које настају у језгру Сунца као „сапутници“ термонуклеарних реакција (погледати р-р ланац у 4.1). За разлику од светлости (фотона), која мора да се пробија кроз густу плазму милионима година, неутрини **готово да не сударају** са материјом. Због тога они напуштају Сунце за само неколико секунди и доносе нам директну информацију о томе шта се дешава у самом срцу наше звезде.

Дуго времена научници су имали проблем назван „**проблем сунчевих неутрина**“: детекторима је стизало само око трећине или половине броја неутрина које је стандардни соларни модел предвиђао. Ово је решено открићем **неутринских осцилација**, феномена у коме неутрини мењају „тип“ током путања кроз простор. Захваљујући овом открићу, сазнали смо да неутрини ипак имају масу, што је важна информација за физику честица и разумевање свемира.

Савремени детектори као што су **Супер-Камиоканде (Super-Kamiokande)**, **Судбери неутринска опсерваторија (SNO)** и **Борексин (Borexino)** омогућавају да „слушамо“ ове честице. Они могу да разликују неутрине различитих енергија из различитих реакција у језгру Сунца. Ова грана астрофизике, зване **неутринска астрономија**, нам омогућава да директно видимо шта се дешава у срцу Сунца и тестирамо наше теорије о томе како звезде производе енергију и како се развијају.

- Неутрини носе око 2% енергије коју Сунце производи.
- Њихова брзина омогућава да откријемо процесе који су се одиграли само неколико минута раније.
- Детектори нам пружају директан увид у нуклеарне реакције у језгру.

Табела 6: Основне карактеристике сунчевих неутрина

Реакција / Извор	Макс. енергија (MeV)	Проц. флуks ($\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)
$pp \rightarrow de^+\nu$	0,42	$6,0 \times 10^{10}$
${}^7\text{Be} + e^- \rightarrow {}^7\text{Li} + \nu$	0,86 (90%)	$4,8 \times 10^9$
${}^8\text{B} \rightarrow {}^8\text{Be}^* + e^+ + \nu$	15	$5,6 \times 10^6$
Хеп процеси	18	$8,0 \times 10^3$

7 Еволуциони пут Сунца

Животни пут Сунца зависи од две ствари: колико је масивно и од чега је направљено.

- **Маса:** Сунце има масу отприлике колико и свака „просечна“ звезда попут њега у Млечном путу. Маса звезде одређује брзину њеног сагоревања: масивније звезде троше нуклеарно гориво знатно брже од мање масивних.
- **Састав:** На почетку је Сунце имало много водоника, мало хелијума и још мање тешких елемената („метала“ у астрономском језику). Тај састав утиче на то колико дуго ће Сунце остати стабилно.

Сунце је сада отприлике на половини свог живота. Око 4,6 милијарди година већ је прошло у стабилној фази, коју зову **главни низ**, а укупно ће овако стабилно „светлити“ око 10 милијарди година. Након тога ће полако постајати црвени џин, а на крају ће завршити као бели патуљак.

7.1 Формирање и главни низ

Сунце се формирало од облака гаса и прашине у свемиру који је под својом тежином почео да се скупља. Како је облак постајао све гушћи, унутрашњост се загревала све више, све док температура није била довољно висока да почну термонуклеарне реакције. Тада је Сунце постало звезда и ушло у фазу коју астрономи зову **главни низ** (Main Sequence).

У овом „свакодневном животу“ Сунца, водоник у његовом језгру се спаја у хелијум, ослобађајући енергију која нам даје светлост и топлоту. Сунце проводи највећи део свог живота – око 90% – у овој стабилној фази.

Током милијарди година, Сунце полако постаје сјајније и мало веће. На пример, од како је постало звезда пре око 4,6 милијарди година, његова светлост је порасла за око 30%. Овај спор, али сталан пораст светлости утиче и на климу на Земљи, показујући како живот наше планете зависи од Сунца.

7.2 Будуће фазе

За око 5 милијарди година, Сунце ће потрошити сав водоник у свом језгру. Тада ће започети нову фазу свог живота и постати **црвени џин** (Red Giant). Језгро, сада пуно хелијума, ће се све више сажимати и загревати, док ће спољашњи слојеви Сунца да се прошире стотине пута више него данас. Огромна светла сфера која се шири до орбите Земље или Марса — то ће бити наше Сунце у овој фази.

Када се црвени џин „умори“ од ширења, Сунце ће одбацити своје спољашње слојеве у свемир, формирајући лепу, светлећу **планетарну маглину**. Оно што остане у средини – језгро богато хелијумом – постаће **бели патуљак** (White Dwarf): густо и вруће тело величине Земље, које ће током милијарди година полако хладити, све док не постане само мирно светлеће језгро.

За звезде веће од Сунца, крај је много драматичнији – експлодирају као супернове и остављају неутронске звезде или црне рупе. Али Сунце, као звезда средње

величине, има мирни крај: и даље светли, али без великих експлозија, полако се повлачи из сцене, остављајући нову магичну планетарну маглину као успомену на свој живот.

Детаљна хронологија еволуције Сунца:

- **Пре 4,6 милијарди година:** Формирање Сунца из колапсирајућег молекуларног облака (протосоларне маглине) у региону Орионовог крака Млечног пута. Процес укључује гравитациони колапс, формирање прото-звезданог диска и почетак термонуклеарних реакција.
- **4,5 милијарди година:** Сунце улази у фазу **Т Теста**-типа, млада звезда са јаким звезданим ветром и променљивом светлошћу. У овој фази се дефинитивно формира планетарни систем.
- **4,5 до 4,6 милијарди година:** Сунце достиже хидростатичку равнотежу и улази у фазу **главног низа** (Main Sequence). Почиње стабилно сагоревање водоника у језгру протон-протон ланцем.
- **4,6 милијарди година - данас (тренутна фаза):** Сунце је у средишњој фази главног низа. Током овог периода:
 - Језгро се полако обогаћује хелијумом („хелијумским пепелом“)
 - Луминозитет Сунца се постепено повећава (30% од почетка)
 - Температура језгра полако расте
 - Сунце одржава релативно стабилан полупречник
- **1 милијарду година од сада:** Сунчева сјајност ће се повећати за 10%, што ће довести до значајног загревања Земље и могућег прекида карбонатно-силикатног циклуса.
- **3,5 милијарде година од сада:** Сјајност Сунца ће бити 40% већа од данашње. Океани на Земљи ће почети да испаравају, што ће изазвати неуправљачки ефекат стаклене баште и учинити Земљу непогодном за живот какав познајемо.
- **5 милијарди година од сада:** Исцрпљивање водоника у језгру. Сунце напушта главни низ и улази у **пост-главни низ** фазу.
- **5,1 милијарди година од сада:** Почиње **фаза подцина**. Сунце почиње да се шири док водоник сагорева у лушти ⁷ око језгра богатог хелијумом.
- **5,4 милијарди година од сада:** Сунце улази у фазу **црвеног цина** (Red Giant). Језгро се сажима и загрева док се спољашњи слојеви драматично шире:
 - Сунце достиже 100-200 пута већи полупречник од садашњег
 - Луминозитет се повећава 1000-5000 пута
 - Површинска температура пада на 3000-4000 К

⁷ спољни слој око језгра где се одвија нуклеарна фузија

- Спољашњи слојеви достижу или прелазе орбиту Земље
- **5,6 милијарди година од сада: Хелијумски бљесак** - у језгру богатом хелијумом достиже се температура од 100 милиона К и започиње троструки-алфа процес (спајање три језгра хелијума у угљеник). Ово доводи до краткотрајног периода нестабилности.
- **5,6 до 6,0 милијарди година од сада: Хоризонтална грана** - Сунце улази у фазу стабилног сагоревања након хелијумског бљеска, сагоревајући хелијум у језгру и водоник у лушти. Проводи око 100 милиона година у овој фази.
- **6,0 милијарди година од сада: Асимптотска грана цинова** (Asymptotic Giant Branch - AGB) - Сунце поново постаје црвени цин, сагоревајући хелијум у лушти око језгра богатог угљеником и кисеоником. Фаза карактерисана:
 - Изразитим звезданим ветром и губитком масе
 - Пулсацијама и променљивом светлошћу (Mira-тип променљиве)
 - Термичким бљесцима (thermal pulses) услед хелијумског сагоревања у лускама
- **6,1 милијарди година од сада: Одвајање планетарне маглине** - интензивни звездани ветар одваја спољашње слојеве, формирајући протопланетарну маглину која полако шири и расветљава околни међузвездани медијум.
- **6,2 милијарди година од сада: Формирање планетарне маглине** - јонизовани гас одбачених спољних слојева светли под утицајем ултраљубичастог зрачења из откривеног врелог језгра. Маглина је видљива десетинама хиљада година.
- **6,2 милијарди година од сада (након одвајања маглине):** Откривено врело језгро постаје **бели патуљак** (White Dwarf):
 - Маса: $0,5-0,6 M_{\odot}$ (половина почетне масе изгубљена звезданим ветром)
 - Полупречник: сличан Земљином (6000 km)
 - Густина: 10^6 g/cm^3 (једна кашичица тежила би тону на Земљи)
 - Почетна температура: $>100.000 \text{ K}$
- **6,2 милијарди година до трилиони година у будућности: Хлађење белог патуљка:**
 - Првих неколико милиона година: бели патуљак зрачи углавном у УЉ и рендгенском делу спектра
 - Након 1 милијарде година: температура пада испод 30.000 К, почиње да зрачи у видљивом спектру
 - Након 5 милијарди година: постаје **жути патуљак**, температура 5000 К
 - Након десетина милијарди година: постаје **црвени патуљак**, температура $<4000 \text{ K}$

– Након стотина милијарди година: постаје **црни патуљак** - објект толико хладан да више не зрачи значајно у видљивом спектру, препознатљив само по гравитационом утицају

- **Ван временске скале ($>10^{15}$ година):** Теоретски, **протонски распад** (ако постоји) би довео до распада материје од које је сачињен бели патуљак. У супротном, бели патуљак ће опстати до краја Стелиферне ере универзума.

Напомена о утицају на Сунчев систем: Током фазе црвеног џина, планете Сунчевог система ће доживети драматичне промене:

- Меркур и Венера ће вероватно бити прогутани
- Земља ће или бити прогутана или ће јој орбита бити знатно проширена због смањења Сунчеве масе
- Спољни планети ће добити проширене орбите, а њихови месеци ће се отопити
- Сноулинија (Snow line) ће се померити ка спољним деловима система

8 Сунце и Земља

Однос Сунца и Земље је темељ свега што познајемо на нашој планети – од светлости и топлоте која омогућава живот, преко ветрова, кише и годишњих доба, до утицаја на наше мисли, науку па и сам живот земаљски.

8.1 Утицај на климу и живот

Сунце је примарни извор енергије за Земљу, и његова активност директно утиче на нашу климу и животну средину. **Сунчев циклус**, који траје у просеку 11 година, карактерише се променом броја сунчевих пега и нивоа сунчеве радијације.

Сунце није само ужарена гасовита лопта, већ кључни извор енергије без којег живот на Земљи не би био могућ. Његова активност се периодично мења, што се огледа у појави сунчевих пега и соларних бљескова, појава које и данас изазивају велико интересовање научника.

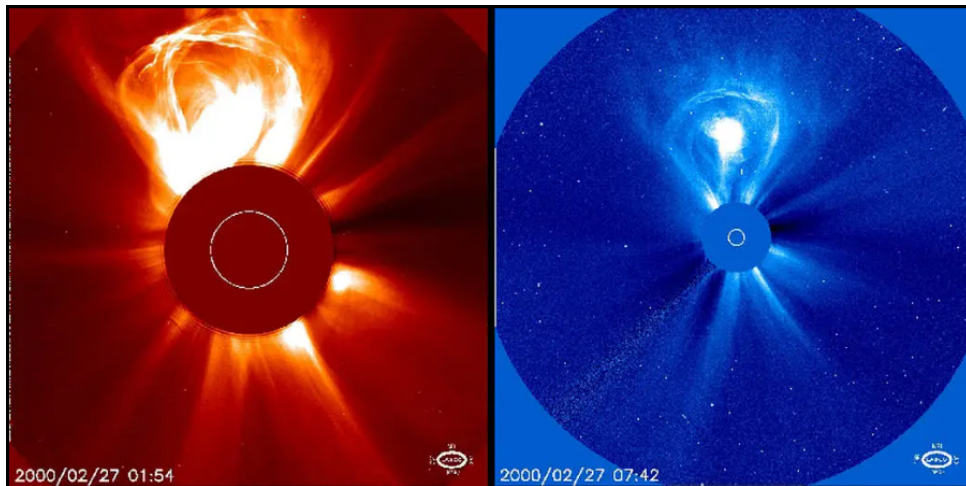
Ови процеси ослобађају значајну количину енергије која утиче на горње слојеве Земљине атмосфере и може довести до суптилних промена у атмосферским кретањима. Иако ти утицаји нису довољно снажни да изазову нагле промене времена или глобалне климе, они ипак указују на сложену и непрекидну повезаност између Сунца и Земље, која и даље представља предмет истраживања и дивљења.

Ове ситне сунчеве промене показују нам да и највећи и најјачи објекти у свемиру нису имуни на динамичке промене. Свако треперење пеге или мали бљесак на Сунцу прича причу о енергији која путује милионе километара, све до наших очију и ваздуха који удахнемо.

Сунце повремено испушта велике „пакете“ енергије и наелектрисаних честица, који се зову **сунчеве бакље** и **коронални избачаји масе (CMEs)**. Када ови пакети стигну до Земље, они могу да узбуркају магнетно поље планете, стварајући **геомагнетне олује**. Ове олује могу да „покваре“ рад сателита, GPS навигацију и

електричне мреже, као да Земљина магнетосфера узрокује промене у раду технологије коју свакодневно користимо.

Због тога научници пажљиво прате Сунце и развијају паметне моделе који могу да предвиде када ће се појавити такви „свемирски временски таласи“, како би нас заштитили и омогућили да наша технологија настави да ради без прекида.



Слика 12: Слика короналног избачаја (Извор: NASA)

8.2 Културни значај

Сунце је одувек било више од обичне светлости на небу – оно је за људе значило живот, време, ред и смисао. Давне цивилизације гледале су га с дивљењем и страхопоштовањем. Египћани су обожавали Ра, бога Сунца, градећи величанствене храмове и подижући обелиске који су „показивали“ његов пут по небу. Инке, на другом крају света, градили су своје соларне обсерваторије и храмове, пажљиво мерећи кретање Сунца како би знали када ће стићи време сетве и жетве. Стари Словени и други народи у Европи гледали су на Сунце као на извор топлоте и снаге, уз молитве и обреде који су често били централни у њиховом свакодневном животу.

С временом, како су људи научили да мере и броје, Сунце је постајало и знак знања. Астрономи средњег века и ренесансе подизали су обсерваторије и направили прве прецизне калкулаторе кретања небеских тела, увек са Сунцем као централним водичем. Сунце је постало симбол истраживања и разумевања природе, али и симбол културне инспирације – песници, сликари и филозофи гледали су у њега као у вечни знак светлости, живота и истине.

У модерној науци, Сунце наставља да нас учи. Његова близина омогућава да га посматрамо детаљно, да меримо температуре, магнетне таласе и чак енергију коју ствара у свом језгру. Свемирске мисије попут SOHO, SDO и Parker Solar Probe данас непрекидно „слушају“ и „гледају“ Сунце, откривајући чудне и невероватне феномене, попут загревања његове короне, који су милионима година били скривени од људског ока.

Тако, кроз векове, Сунце је остало више од физичког тела на небу – оно је симбол живота, знања и истраживања. Од древних храмова до савремених свемирских телескопа, оно је непрекидна нит која повезује људску радозналост, културу и науку.

9 Закључак

Сунце није само звезда на небу – то је срж живота, светлост која покреће наш свет и сила која обликује све што видимо око себе. Као наша најближа звезда, оно нам открива тајне свемира и показује како се природни закони спроводе у екстремним условима, далеко од било каквог лабораторијског простора. Сваки пламен у његовом језгру, сваки талас магнетског поља и свака варница на фотосфери говоре причу о снази, упорности и реду природе – причу коју можемо разумети само ако посматрамо и слушамо са пажњом.

Кроз изучавање структуре Сунца, од његовог грејаног језгра до далеке короне, учимо како енергија путује, како звезда расте, како се магнетни таласи пробијају кроз плазму, и како сваки од ових процеса утиче на нашу планету. Сунце нам је као природни учитељ – оно показује ред и хармонију, али и снагу која изазива страхопоштовање. Истраживања Сунца преко свемирских мисија, телескопа и детектора неутрина откривају нове тајне, као што је загревање короне, али нам постављају и питања на која тек треба да нађемо одговоре.

За нас који поштујемо традицију, веру и јединство са природом, Сунце је и више од физичког објекта – оно је **извор живота**, гарант постојања и реда на Земљи. Оно обликује климу, води воде, храни усеве, а његова светлост и енергија инспиришу све људе ма којих год професија били.

Зато, проучавање Сунца није само наука – то је част, дужност и инспирација. Свако ново откриће нам показује колико је свет леп, сложен и моћан, а наше разумевање универзума нас чини способнима да га чувамо, штитимо технологију од свемирских олуја и обезбедимо живот за генерације које долазе. Сунце је наш учитељ, наш чувар и вечни извор снаге – баш као српски дух који никада не посустаје!

Литература

- [1] NASA Solar Dynamics Observatory. (2023). *Sun Fact Sheet*. NASA Goddard Space Flight Center. Преузето са: <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/sunfact.html>
- [2] "Sun," *Encyclopædia Britannica*, Encyclopædia Britannica, Inc., <https://www.britannica.com/place/Sun>
- [3] Димитријевић М, Томић А. (1995). *Астрономија за IV разред гимназије*. Завод за уџбенике, Београд.
- [4] Carroll, B. W., Ostlie, D. A., *An Introduction to Modern Astrophysics*, 2nd edition, Cambridge University Press, Cambridge, 2017.
- [5] Др Манојловић Предраг (2003). *Математичка географија*. Универзитет у Београду Географски факултет, Београд.
- [6] European Space Agency (ESA), *Official Website*, <https://www.esa.int/>
- [7] NOAA Space Weather Prediction Center, *Solar Activity and Space Weather*, <https://www.swpc.noaa.gov/>
- [8] ESA / NASA, *SOHO – Solar and Heliospheric Observatory*, <https://soho.nascom.nasa.gov/>
- [9] NASA, *Solar Dynamics Observatory (SDO)*, <https://sdo.gsfc.nasa.gov/>
- [10] Атанацковић, О., *Астрономија, уџбеник за IV разред гимназије природно-математичког смера*, Издавач Klett, Београд, 2016.