

МАТЕМАТИЧКА ГИМНАЗИЈА
У БЕОГРАДУ

МАТУРСКИ РАД
из физике
ЈУПИТЕР

ментор: Слободан Спремо

ученик : Вукман Вукадиновић, IVa

Београд, мај 2025.

С А Д Р Ж А Ј

1. Увод.....	1
2. Основне карактеристике Јупитера	2
3. Унутрашња грађа и атмосфера.....	5
4. Природни сателити.....	7
4.1 Ија	8
4.2 Европа.....	9
4.3 Ганимед	11
4.4 Калисто.....	12
5. Јупитерово магнетно поље и прстенови	15
5.1 Магнетно поље и магнетосфера	15
5.2 Јупитерови прстенови	16
6. Истраживање Јупитера.....	18
7. Закључак.....	26
8. Литература.....	27

1. Увод

Јупитер је пета планета од Сунца и највећа планета у Сунчевом систему – масивнија од свих осталих планета заједно. Ова гасовита планета пречника око 143.000 км представља правог дијана: њен пречник је око 11 пута већи од Земљиног, а маса око 318 пута већа од масе Земље. Јупитер је познат још од давнина као сјајна „лутајућа звезда“ на ноћном небу, а телескопска посматрања од 17. века открила су његове природне сателите и детаље у облацима на планети.

Као највећи планетарни свет у нашем систему, Јупитер има огроман утицај на околне објекте – поседује преко 90 познатих природних сателита и моћно магнетно поље. Због својих јединствених карактеристика, Јупитер је често био предмет митова и научних истраживања. У овом раду биће представљене основне особине Јупитера, његова унутрашња грађа и атмосфера, четири највећа природна сателита (Галилејеви месеци), као и Јупитерово магнетно поље и прстенови. Такође ћемо описати најзначајније мисије којима је Јупитер истражен (од првих прелета до савремених орбитера), те укратко приказати улогу Јупитера у митологији и култури. На крају рада изложени су закључци и наведена коришћена литература.



Слика 1: Јупитер – највећа планета Сунчевог система, са видљивим шарама облака и Великом црвеном пегом (диновском олујом).

2. Основне карактеристике Јупитера

Јупитер спада у гасовите џинове – велике спољашње планете састављене претежно од гасова и течних материјала без чврсте површине. Удаљен је од Сунца у просеку око 778 милиона километара (5,2 АЈ) и обилази око Сунца једном у ~11,86 земаљских година. Путања му је благо елиптична (растојање од Сунца варира између ~4,95 и 5,46 АЈ). Јупитерова ротација је веома брза – један дан на Јупитеру траје око 9 часова и 56 минута, што је најкраћи дан међу планетама. Због брзе ротације Јупитер је спљоштен на половима (екваторијални пречник ~142.984 км наспрам поларног ~133.708 км) и испољава снажне ветрове и вртлоге у атмосфери. Основне физичке карактеристике Јупитера дати су у табели 1.

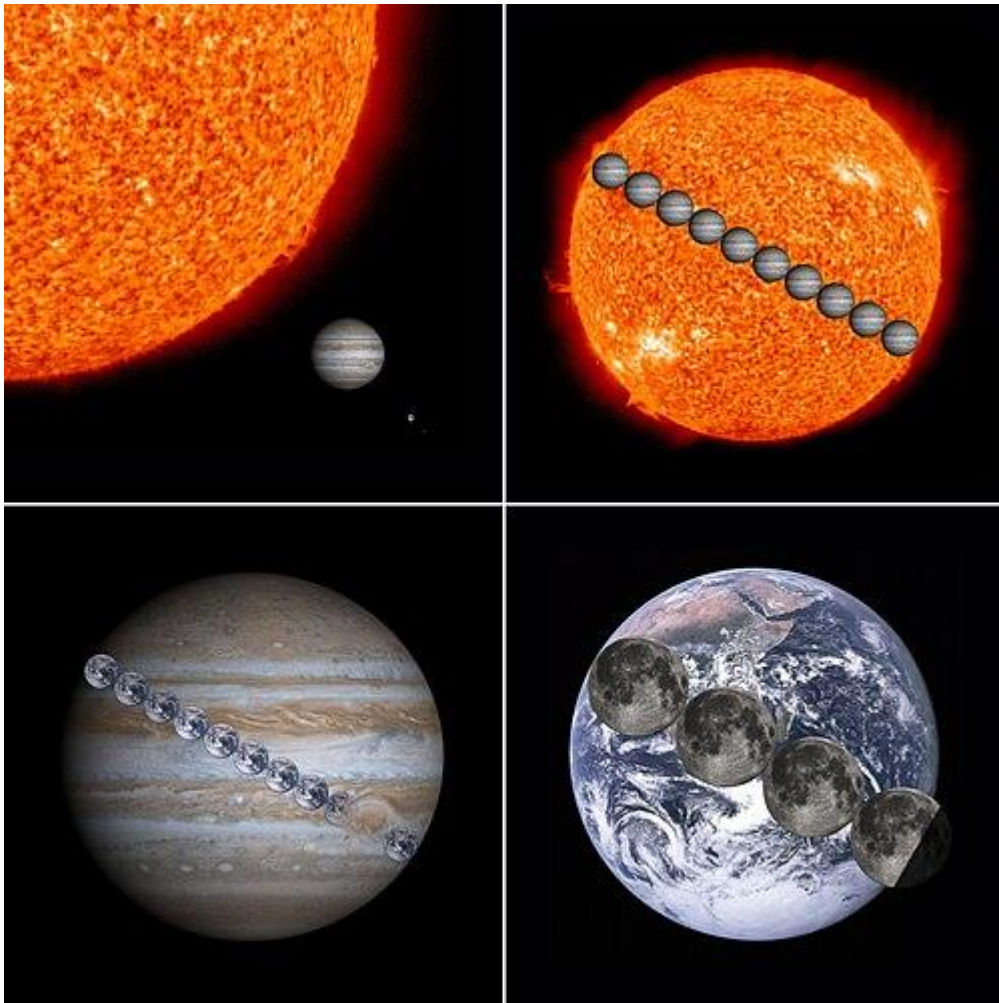
Табела 1: Основни подаци о планети Јупитер:

- Полупречник (екваторијални): ~71.500 км ($\approx 11 \cdot \text{Земљин}$)
- Маса: $1,898 \times 10^{27}$ кг ($\approx 318 \cdot \text{Земљина}$)
- Густина: 1,33 г/см³ (4 пута мања од Земљине)
- Гравитација на облацима: $\approx 24,8 \text{ м/с}^2$ ($\approx 2,53 \cdot \text{Земљине}$)
- Састав: ~90% водоник и ~10% хелијум (по маси)
- Средња удаљеност од Сунца: 778 милиона км (5,20 АЈ)
- Орбитални период (година): 11,86 година
- Период ротације (дан): 9 х 55 мин
- Нагиб осе ротације: $\sim 3^\circ$ (скоро усправна ротација)
- Број познатих сателита: 95 (четири највећа: Ија, Европа, Ганимед, Калисто)

Јупитерова маса износи $1,8986 \times 10^{27}$ кг, што је 2,5 пута више од збира маса свих осталих планета Сунчевог система. Занимљиво је да је толико масиван да заједнички барицентар (центар масе) Јупитера и Сунца лежи мало изван самог Сунца. Ипак, и поред огромне масе, просечна густина Јупитера је само $\sim 1,33$ г/см³, јер је састављен од лаких елемената (претежно водоника). Запремина Јупитера је око 1321 пута већа од Земљине, али је његова маса ~ 318 пута већа од Земљине. То значи да је просечна густина Јупитера четвртина Земљине. Јупитер би морао имати око 80 пута већу масу да би у његовој унутрашњости отпочеле нуклеарне реакције и постао звезда. Дакле, упркос неким поређењима, Јупитер је далеко испод прага да буде “неуспешна звезда”.

По хемијском саставу, Јупитер је сличнији Сунцу него Земљи. Атмосфера и спољашњи слојеви планете састоје се углавном од молекуларног водоника (H_2) и хелијума, уз мале примесе метана, амонијака, водене паре и угљоводоника. Спектралне анализе показују трагове сложенијих органских молекула у траговима. Јупитер нема чврсту површину – прелазак из атмосфере у унутрашњост је постепен, уз пораст притиска и температуре са дужином. Због тога летелица не може слетети на Јупитер, а не може ни пролетети дубоко кроз планету: екстремни притисци и температуре би zdroбили и истопили сваку сонду много пре достизања било каквог чврстог тла.

Јупитер зрачи $\sim 1,5$ пута више енергије него што прима од Сунца. То није последица унутрашњих нуклеарних реакција, већ тзв. Келвин–Хелмхолцовог механизма – полагањем гравитационог сажимања и ослобађања потенцијалне енергије у облику топлоте. Овај процес одржава Јупитеров снажан топлотни флуks: процењује се да би за опажену снагу зрачења било довољно да се планета скупља брзином од око 1 мм годишње



Слика 2: Јупитер у поређењу са Сунцем (горе) и Земљом (доле). На слици доле десно је поређење Земље и Месеца.

3. Унутрашња грађа и атмосфера

Унутрашња структура: Мерења гравитационог поља и модели указују да Јупитер има густо језгро од тежих елемената у дубини – вероватно мешавину стена и леда масе око 10–15 пута веће од Земљине масе. Изнад језгра простире се огроман слој такозваног металног водоника дебљине стотина милиона метара. На притисцима већим од $\sim 2 \times 10^{11}$ Па (око 2 милиона атмосфера), молекули водоника бивају тако збијени да се електрони ослобађају, па водоник прелази у течно метално стање и постаје добар проводник струје. Овај метални водоник (помешан са нешто хелијума и других примеса) чини већину Јупитерове унутрашњости. Изнад металног, умереним прелазом долази слој флуидног молекуларног водоника и хелијума који ближе површини прелази из течног у гасовито стање. Видљива “површина” Јупитера је заправо врх слоја облака у атмосфери, на месту где притисак износи око 1 бар. Изнад те “површине” протеже се још хиљаде километара ређе атмосфере.

Врхови Јупитерових облака имају температуру око 160 К (–113 °Ц). Температура расте са дубином, достижући процењено ~ 20.000 К у средишту планете. Унутрашњи притисак од више десетина милиона бара чини да се и релативно ретки гасови понашају као густа течност. Због таквих услова Јупитерова унутрашњост остаје недоступна непосредном истраживању – наше знање потиче од посредних метода (гравитациона и магнетна мерења, теоријски модели, лабораторијски експерименти).

Савремена сазнања мисије Јуно указују да Јупитерово језгро можда није оштро одвојено од остатка унутрашњости. Подаци о гравитационом пољу сугеришу да је језгро “разблажено” или дифузно – делимично растворено у околном слоју металног водоника, без јасне границе. Другим речима, тешки елементи су вероватно распрострањени у ширем централном региону планете, што је интригантно откриће које мења раније представе о малом, компактном језгру. Ово указује и на начин настанка Јупитера: масивно језгро се можда делимично распало мешањем са омотачем након формирања, или га је разбио рани гигантски удар неког прототела.

Атмосфера и облаци: Јупитерова атмосфера је огромна и комплексна. Састав горње атмосфере чини $\sim 75\%$ водоника и $\sim 24\%$ хелијума (по маси), уз око 1% других

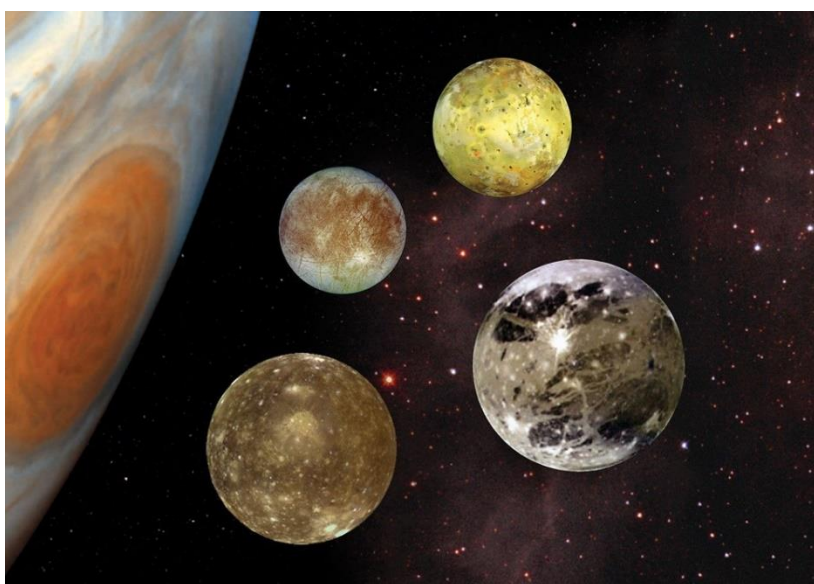
гасова – водене паре, метана (CH_4), амонијака (NH_3), сумпороводоника, итд. Ови гасови кондензују на различитим висинама формирајући слојевите облаке. Према мерењима и моделима, разликују се три главна слоја облака до висине ~ 1000 км изнад дубине на којој притисак одговара 1 бар. Највиши облаци ($\sim 50\text{--}100$ км дебљине) састоје се од кристала амонијака и они формирају бледожуте и беле зоне. Испод њих налази се слој тамнијих облака од кристала амонијум-хидросулфида (NH_4SH) и воде, који дају браонкасте и сивкасте тонове Јупитерових појасева. Још дубље, очекује се слој облака од водене паре/воде, што потврђује и појава муња – детектовани су бљескови олуја и до тих дубина, сличних онима на Земљи које настају у воденим облацима. Ове муње могу бити и до 1000 пута снажније од земаљских.

Јупитер је на снимцима препознатљив по тамним појасевима и светлим зонама који се смењују паралелно са екватором. Ови шарени пругасти обрасци последица су динамичке циркулације: гас у зонама се уздиже и хлади формирајући светле облаке, док се у појасевима спушта ка дубини остављајући тамније облаке видљивим. Ветрови дувају паралелно са појасевима и зонама у супротним смеровима и достижу брзине од ~ 100 м/с (360 км/х). Јупитер нема наглашен аксијални нагиб (само $\sim 3^\circ$), па нема ни изражена годишња доба; циркулација топлоте из унутрашњости помаже да и поларна подручја добију довољно енергије и температуре облака буду уједначене по ширини. Појасеви и зоне мењају боју и ширину током година, али остају стабилно распоређени да су добили и посебна имена по географској ширини.

Најпознатија особина Јупитерове атмосфере је Велика црвена пег – циновска овална олуја црвенкасте боје пречника око 12.000×25.000 км. Она је довољно велика да унутар ње стане цела Земља. Посматрана је најмање од 17. века (верује се да је уочена још 1665. године), што значи да бесни већ стотинама година. Ветрови унутар ове антициклонске олује прелазе 600 км/х. У новије време примећено је да се Велика црвена пег постепено смањује и мења облик, али је и даље упадљива карактеристика Јупитеровог диска. Поред ње, читава Јупитерова атмосфера је врло турбулентна и испуњена многим другим олујним структурама – беле пеге (мање олује), тамни и светли “баржни” облачни облици, циклони и антициклони који интерагују итд. Слојеви облака полако циркулишу и премештају ове структуре, стварајући динамичан и визуелно богат приказ који непрестано изненађује посматраче.

4. Природни сателити – Галилејански месеци

Јупитер има изузетно богат систем природних сателита, налик малом планетарном систему. До сада је откривено 95 Јупитерових месеца (природних сателита) који су званично потврђени од стране Међународне астрономске уније. Већина су мали, неправилни месеци пречника свега неколико километара, али се истиче четири велика сателита позната као Галилејеви месеци: Ија, Европа, Ганимед и Калисто. Ова четири највећа месеца открио је Галилео Галилеј далеке 1610. године посматрајући Јупитер својим телескопом, што је био први проналазак месеца око неке друге планете. Галилејеви сателити су величином и саставом налик малим планетама; највећи (Ганимед) чак превазилази пречник планете Меркура. Они су посебно интересантни јер поседују разнолике особине: од активних вулкана до подземних океана. У наставку су описане карактеристике сваког од Галилејевих месеца.



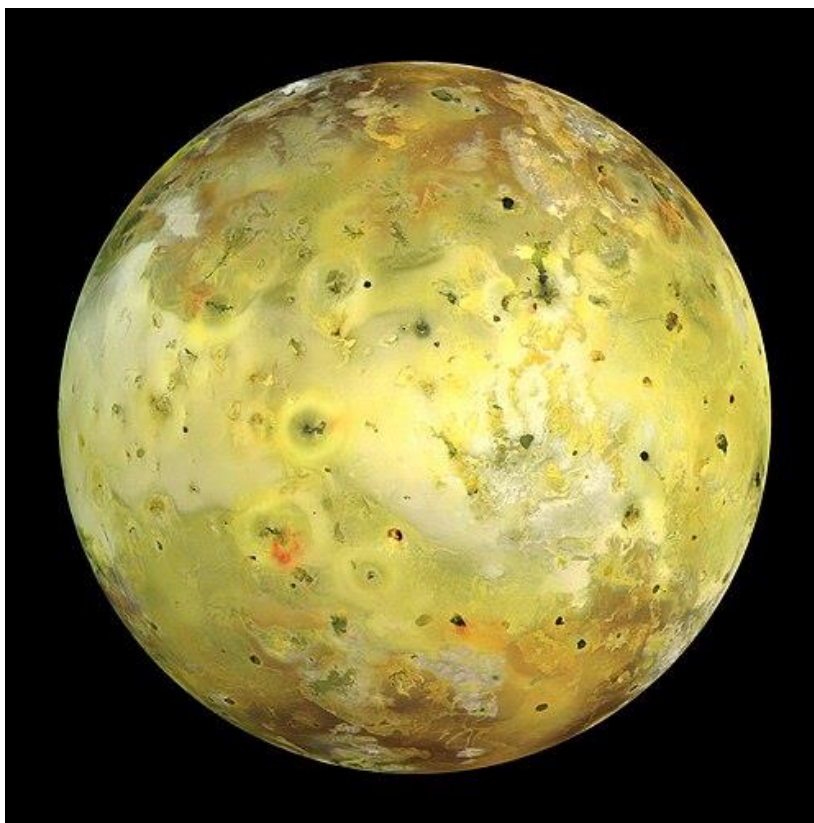
Слика 3: Композитни приказ Јупитера и његова четири највећа месеца (Галилејевих сателита). Са леве стране приказан је део Јупитеровог диска са Великом црвеном пегом. Десно су, поређани од горе ка доле по растојању од Јупитера: Ија (жућкаста, са вулканским областима), Европа (глатка са пукотинама), Ганимед (сиво-шатиран са светлим и тамним пределима) и Калисто (тамносмеђи, кратерисан).

4.1. Ија

Ија (Ио) је Јупитеров најближи велики сателит и најспецифичнији по својој геолошкој активности. Пречник Ије је око 3643 км (мало већи од Земљиног Месеца). Оно што Ију чини јединственом јесте екстремна вулканска активност – то је геолошки најактивније тело у Сунчевом систему. На Ији постоји преко 400 активних вулкана који непрестано избацују лаву и гасове. Огромни вулкански гејзири избацују облаке сумпора и сумпор-диоксида и до 300–500 км изнад површине. Површина Ије је прекривена стврднутим лавиним пољима и наслагама сумпора разних боја (жуте, наранџасте, црвене, црне и зелене нијансе), дајући месецу шаролик изглед. За разлику од већине спољашњих месеца који су богати ледом, Ија је састављена углавном од стена (силиката) и металног језгра – практично нема леда ни воде на површини.

Главни узрок Ијине вулканске хиперактивности је плимно загревање. Ија је под снажним гравитационим утицајем Јупитера, али и својих суседних месеца Европе и Ганимеда. Ија обилази око Јупитера за само 1,77 дана и налази се у орбиталној резонанцији 1:2:4 са Европом и Ганимедом – на свака 4 Ијине орбите, Европа направи тачно 2, а Ганимед 1 орбиту. Ова резонанција узрокује да се Ијина орбита непрестано мало издужује и мења, што доводи до великих плимских сила: Јупитер својим огромним гравитационим привлачењем растеже и сабија Ију током сваке орбите. Трење унутар Ијине унутрашњости од тих тидалних деформација генерише топлоту која топи стене и одржава подземне магматске коморе активним. Резултат је континуирана вулканска активност – практично “вулкан на вулкану”.

Вулкани на Ији драматично утичу и на околни свемир. Ијин танак атмосферски омотач од сумпор-диоксида једва опстаје – велики део материјала бива избачен у свемир. Јупитерово магнетно поље убрзава наелектрисане честице из вулканских избачаја и ствара око Ијине орбите плазма торус – прстенасто подручје испуњено јонима сумпора и кисеоника. Такође, постоји електрични ток (тзв. Ијин флукс-тубус) од око 5 милиона ампера који тече дуж силница Јупитеровог магнетног поља између Ије и Јупитера. Ови феномени чине Ију кључним објектом за проучавање планетарних магнетосфера и представљају фасцинантан пример интеракције сателита и матичне планете.



Слика 4: Фотографија Ије у правим бојама коју је снимила сонда Галилео.

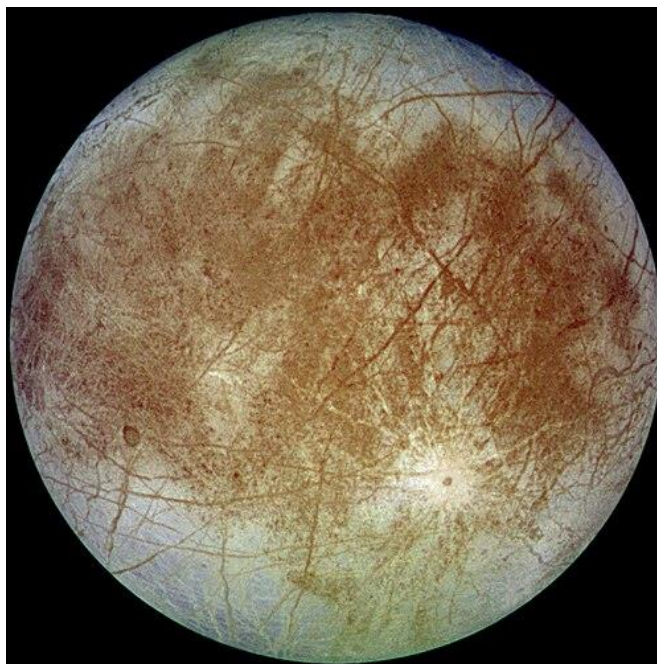
4.2. Европа

Европа је други по удаљености Галилејев месец и један од најинтригантнијих објеката у Сунчевом систему. Са пречником од око 3122 км Европа је незнатно мања од нашег Месеца. Површина Европе је изузетно глатка и сјајна – најглаткија у Сунчевом систему. Прекривена је ледом воде, са тек понеким кратерима, што указује да је геолошки веома млада и да се стално обнавља. Уместо планина и кратера, по површини се пружа мрежа тамних пруга и пукотина (линеа) које пресецају ледену кору. Ове линије су вероватно настале пуцањем и померањем ледене коре услед деловања плимских сила и кретања материјала испод ње. Беле и смеђе нијансе на површини потичу од леда помешаног са малим количинама минерала или соли.

Најважније откриће о Европи је постојање подземног океана течне воде испод њене ледене коре. Анализе магнетних мерења које је обавила сонда Галилео 1990-их показале су да Европа индукује променљиво магнетно поље док пролази кроз Јупитерово магнетно поље – што снажно сугерише да испод површине има проводљив слој, највероватније слани течни океан. Процене су да је ледена кора дебела око 15–25 км, а

да испод ње постоји глобални океан дубине можда ~ 100 км. У том океану укупна количина воде могла би да буде већа него у свим Земљиним океанима заједно. Европа дакле посједује све три кључне саставнице “воде, топлоте и хемије” потребне за живот: течну воду (океан), извор енергије (плимско загревање које греје унутрашњост) и вероватно присуство есенцијалних хемијских елемената. Због тога се Европа сматра једним од најперспективнијих места за тражење ванземаљског живота у Сунчевом систему.

Површинска температура на Европи је око 50–110 К (од -223 °Ц на половима до -163 °Ц на екватору), тако да је лед тврд и крут. Ипак, испод те ледене “скорје” кретање течног океана може изазивати пукотине кроз које повремено избија вода у виду гејзира. Постоје посредни докази за такве водење вулкане или перјанике – нпр. Хаблов телескоп је забележио знакове облака водене паре изнад јужног пола Европе 2012. и 2016. године, што се тумачи као ерупција водених перјаника висине и до 200 км. Ако се ови гејзир потврде, моћи ће релативно лако да се узоркује материјал из подземног океана проласком свемирске летелице кроз те млазове. Управо се планира НАСА мисија Еуропа Цлиппер (лансирана 2024. године) која ће детаљно изучавати Европу почетком 2030-их и покушати да утврди дебљину коре, састав океана и потенцијално присуство хемијских трагова живота. И Европска свемирска агенција лансирала је 2023. мисију ЈУИЦЕ која ће посетити Европу (и друге Јовијанске месеце) средином наредне деценије.



Слика 5: Европа у природној боји

4.3. Ганимед

Ганимед је највећи Јупитеров сателит и уједно највећи месец у читавом Сунчевом систему – пречника око 5268 км, чак је већи од планете Меркур (4879 км). Масом је такође најмоћнији месец (тежи од Месеца ~ 2 пута) и чини око $2/3$ укупне масе свих Јупитерових сателита. Ганимед је посебано јединствен по томе што поседује сопствено магнетно поље – једини месец са таквом појавом. Открила га је сонда Галилео 1996. године, и сматра се да настаје динамо ефектом у течном металном језгру Ганимеда (слично као Земљино поље). Ово магнетно поље ствара поларне светлости на Ганимеду и интерагује са Јупитеровим огромним магнетним омотачем.

Састав Ганимеда је мешавина стена и леда. Сличан је по грађи свом мањем суседу Европи – верује се да има метално језгро (Fe, FeS), силикатни стеновити омотач, а затим дебели слој леда и можда течне воде. Постоје индиције да и Ганимед има подземни океан слане воде између слојева леда. Посматрања Хабловог телескопа 2015. показала су промене у аурорама Ганимеда које се најбоље објашњавају постојањем проводљивог течног океана испод површине, који утиче на магнетно поље. Океан Ганимеда би могао бити око 100 км дубок, “сандвичиран” између слојева леда, и садржати огромну количину воде. Међутим, за разлику од Европе, Ганимедова површина је много старија и геолошки мање активна, па је питање колико тај евентуални океан комуницира са површином.

Површина Ганимеда показује две врсте терена: тамније, веома кратерисане и старе области, и нешто светлије, “изрезбарене” области испресецане браздама и усецима. Светлији терени су вероватно настали тектонским процесима – пукотинама и померањем ледене коре у ранијој геолошкој историји, док су тамне области остале релативно нетакнуте од настанка. Кратери на Ганимеду нису тако избочени; због присуства леда, током времена су се спљоштили. Неки већи удари су изазвали тектонске процесе – пукотине радијално од кратера итд. Све у свему, Ганимедова површина одражава комплексну историју смрзавања океана и тектонике леда. Ганимед ће бити главна мета поменуте ЕСА мисије ЈУИЦЕ, која планира да уђе у орбиту око Ганимеда ~ 2032 . То ће бити прва свемирска летелица која орбитиће око једног месеца друге планете. Очекује се да ће ЈУИЦЕ детаљно испитати Ганимедово магнетно поље, унутрашњу структуру (укључујући потврду и карактеристике подземног океана) и површинске облике, чиме ћемо добити много јаснију слику овог највећег месеца.



Слика 6: Ганимед снимљен 1998. помоћу сонде Галилео

4.4. Калисто

Калисто је четврти Галилејев сателит по удаљености од Јупитера и други по величини (после Ганимеда). Пречник Калиста је око 4820 км, што га чини трећим највећим сателитом у Сунчевом систему (после Ганимеда и Сатурновог Титана). Калисто је посебно познат по томе што има најстарију и најкратерисанију површину од свих месеца. Заиста, површина Калиста је препуна ударних кратера свих величина, и чини се да се геолошки није знатније обнављала милијардама година. То значи да Калисто вероватно није геолошки активан – нема тектонике ни вулканизма који би “ресетовали” површину.

Састав Калиста је мешавина леда и стена у приближно подједнаким количинама. Његова просечна густина ($\sim 1,83 \text{ г/см}^3$) мања је него код Ганимеда, што указује на виши удео леда. За разлику од Ганимеда, Калисто изгледа да није диференциран или је само делимично диференциран – то јест, није дошло до потпуног одвајања језгра и омотача у унутрашњости. Разлог томе може бити што унутрашњост Калиста никада није била довољно загрејана да лед у потпуности истопи и омогући тешким елементима да потону. Ипак, занимљиво је да су и за Калисто летелице Галилео детектовале могуће назнаке подземног океана – индуковано магнетно поље слично као код Европе и Ганимеда. Ако постоји, тај океан би се налазио на великој дубини (100-200 км испод површине), између слојева леда, и вероватно би био веома таман и богат амонијаком (који служи као антифриз). За сада ово остаје несигурно, јер Калисто није у орбиталној резонанцији и нема значајног плимног извора топлоте, па је питање да ли може имати течан слој унутра.

Релјеф Калиста је доминираан кратерима. Највеће структуре су огромни вишерингични басени настали древним ударима. Најпознатији је Валхала, светао концентрични прстенасти систем пречника преко 3000 км настао ударом који је скоро разбио Калисто. Упркос тако драматичним ударима, Калисто се некако задржао спојен – вероватно због већег учешћа леда који ублажи удар (лед апсорбује енергију деформацијом). Пошто нема унутрашње активности, Калисто представља нешто као "фосилну" површину из раног доба Сунчевог система, сачувану готово нетакнуту ~ 4 милијарде година.

Калисто је најудаљенији од Галилејевих месеца (око 1,88 милиона км од Јупитера) и једини није увучен у резонанцију са осталима. Због тога трпи најмање плимне утицаје и лежи изван главног радијационог појаса Јупитера. То значи да је зрачење на његовој површини много мање него на Ији, Европи или Ганимеду. Неки истраживачи су због тога разматрали Калисто као потенцијално погодну локацију за будућу базу или станицу ако би људи истраживали Јупитеров систем – јер пружа релативно мирно и безбедније окружење. За сада су то само идеје, а непосреднија истраживања Калиста обавиће ЈУИЦЕ мисија кроз неколико пролазака.

Поред четири Галилејева месеца, Јупитер има и мноштво мањих сателита груписаних у више група (по орбиталним карактеристикама). Ту су неправилни месеци који обично круже далеко од Јупитера, често ретроградно (уназад у односу на ротацију планете), за које се сматра да су заробљени астероиди или остатак разбијених већих тела. Јупитеров систем месеца је толико богат да се понекад назива „мини Сунчев систем“.

Интеракције Јупитера и његових сателита (нпр. плимне силе, магнетне споне са Ијом, гравитациона резонанција Ије-Европе-Ганимеда) чине ово окружење посебно интересантним за науку. Сваки од Галилејевих месеца је свет за себе, а њихово заједничко проучавање са Јупитером пружа увид у процесе формирања планета и сателита, интеракције унутар планетарних система и могућност услова за живот на леденим световима..



Слика 7: Калисто снимљен 2001. помоћу сонде Галилео

5. Јупитерово магнетно поље и прстенови

5.1. Магнетно поље и магнетосфера:

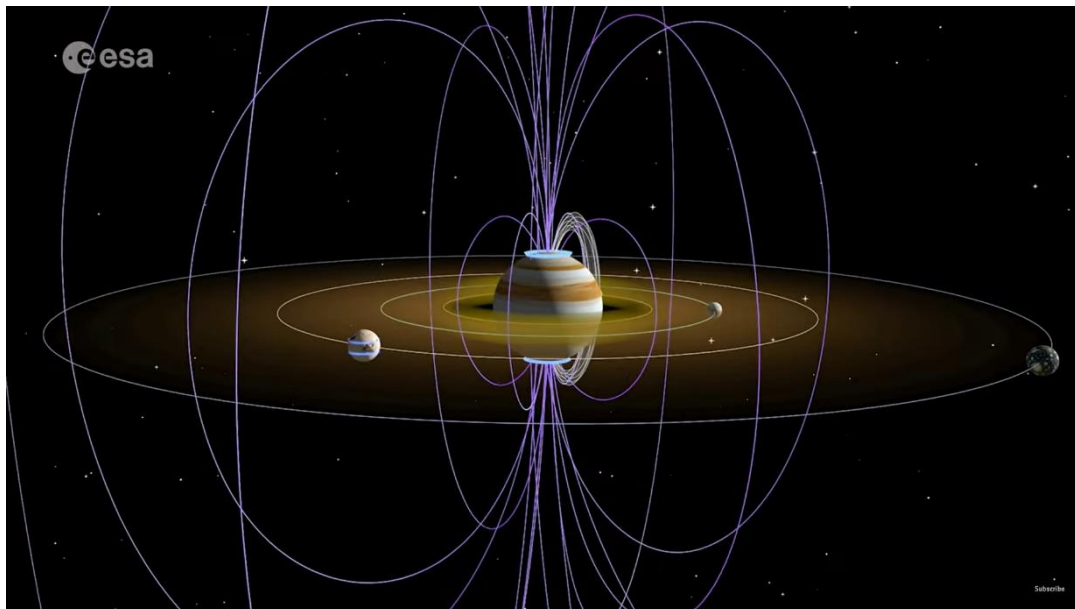
Јупитер ствара изузетно снажно магнетно поље – најјаче планетарно поље у читавом Сунчевом систему. Његова магнетосфера, односно простор у којем доминира утицај тог магнетног поља, веома је обимна: простире се око 3 до 7 милиона километара према Сунцу, а у супротном смеру формира издужену „репну“ структуру која се протеже чак до орбите Сатурна, што је око 650 милиона километара иза Јупитера.

На екватору, Јупитерово магнетно поље достиже јачину од око 420 микротесла (0,42 милитесла), што је приближно 14 пута јаче од Земљиног ($\sim 30 \mu\text{T}$). На поларним пределима поље достиже и до 1 милитесла. Ова изузетна снага резултат је присуства великог слоја металног водоника у унутрашњости планете, који уз брзу ротацију Јупитера изазива такозвани динамо ефекат. Јупитерова магнетна оса нагнута је за око 10 степени у односу на осу ротације, што је слично као и код Земље. Због тога и Јупитер има своје „геомагнетске полове“.

Снажно магнетно поље задржава велику количину наелектрисаних честица – протона, електрона и јона – који формирају радијационе појасеве око планете. Они су знатно јачи од Земљиних Ван Аленових појасева – процене указују на чак десетоструко већи флуks честица. Ово чини околину Јупитера веома неповољном за свемирске летелице и људску посаду. Мисије попут "Галилео" и "Јуно" морале су бити опремљене дебелом заштитом електронике како би издржале у таквом окружењу.

Јупитерова магнетосфера значајно утиче и на његове сателите, нарочито на Ио. Вулкански материјал који Ио избацује у свемир се јонизује и формира плазма торус дуж његове орбите. Наелектрисане честице из тог тора усмеравају се дуж линија магнетног поља према поларним областима, што доводи до појаве поларне светлости – аурора. Јупитер, као и Земља, има ауроре – светлцање у атмосфери око полова настало сударима наелектрисаних честица с гасовитим слојевима. Међутим, Јупитерове ауроре су међу најсјајнијим у Сунчевом систему и емитују снажно у ултравиолетном и X-зрачењу. Примећене су сталне ауроралне „ореоле“ око полова, као и изненадни „рафали“ светлости када појачане струје честица стигну, на пример, услед утицаја Сунчевог ветра или интеракције са Иом. Ови аурорални феномени јасно показују колико је Јупитерова

магнетосфера активна и динамична – она функционише као велики природни акцелератор честица.



Слика 8: Илустрација магнетног поља око Јупитера

5.2. Јупитерови прстенови:

Једно од великих изненађења које је донела мисија "Војаџер 1" 1979. године било је откриће да и Јупитер, попут Сатурна, има систем прстенова. За разлику од блиставих Сатурнових прстенова сачињених углавном од леда, Јупитерови прстенови су тамни, дифузни и углавном сачињени од врло ситних честица прашине. Због тога су невидљиви са Земље обичним телескопом (осим у посебним условима), па су откривени тек приликом блиских пролаза свемирских сонди.

Јупитеров систем прстенова чине три главна дела:

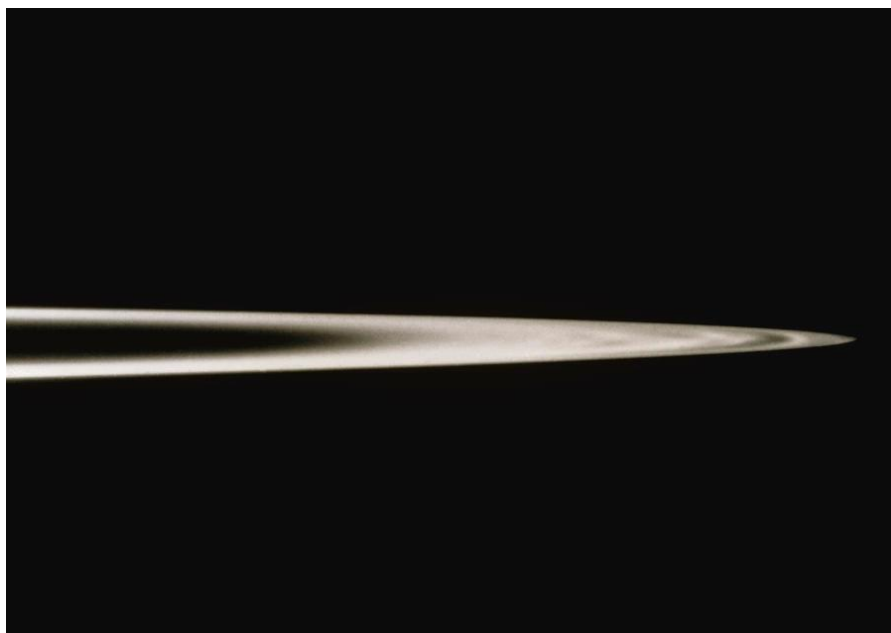
- **Хало прстен:** унутрашњи, дебљи прстен у облику торуса, који се протеже од самих врхова облака до висине од око 20.000 километара. Састоји се од врло ситних честица које формирају облак прашине близу саме планете.
- **Главни прстен:** наставља се на хало и протеже се између 122.500 км и

129.000 км од центра Јупитера. Иако је најсјајнији део прстенова, он је и даље веома таман. Обухвата орбите два мала сателита – Метиде и Адрастеје – а верује се да управо њихови судари с микрометеоритима ослобађају прашину која стално обнавља овај прстен.

- **Госамер прстенови:** ово су спољашњи, врло дифузни и прозирни прстенови који се простиру иза главног прстена све до орбита сателита Амалтеје и Тебе (до око 222.000 км). И они настају од материјала који потиче са ових сателита услед удара метеорита, па се називају Амалтејин и Тебин прстен. Назив „госамер“ значи „пауколика“ структура – због њихове изузетне прозирности и фине прашине.

Укупна ширина Јупитерових прстенова достиже око 250.000 километара, али су веома танки и једва видљиви. Честице у прстеновима имају величине од неколико микрона до неколико милиметара и претежно су састављене од тамне прашине – вероватно силицијумских честица прекривених органским материјама. За разлику од Сатурнових прстенова, који одлично рефлектују светлост, Јупитерови рефлектују врло мало и најбоље се уочавају када су осветљени позади (када сонда гледа према Сунцу кроз прстен).

Осим "Војаџера", и друге мисије као што је "Галилео" детаљно су снимале Јупитерове прстенове из различитих углова и потврдиле важну улогу малих сателита у њиховом одржавању. Јупитерови прстенови показују да чак и највећа планета Сунчевог система има динамичан систем прашине и сателита који је окружују.



Слика 9: Слика Јупитеровог прстена

6. Истраживање Јупитера – свемирске мисије

Јупитер је од краја 20. века интензивно проучаван помоћу аутоматских свемирских сонди. Прва летелица која је посетила Јупитер била је НАСА Pioneer 10, која је пролетела поред планете у децембру 1973. године (лансирана 1972). За њом је уследио Pioneer 11 (прелет 1974). Ове пионирске мисије пружиле су прве изблиза фотографије Јупитера, измериле његово магнетно поље и радијационе појасеве и потврдиле постојање поларне светлости. Ипак, праве револуције у схватању Јупитера дошле су са наредним сондама, опремљеним бољим инструментима.

Voyager 1 и 2: Лансиране 1977. године, НАСА-ине сонде Voyager 1 и Voyager 2 стигле су до Јупитера 1979. и извршиле спектакуларна посматрања. Воијажери су открили Јупитерове прстенове по први пут, снимиле на стотине фотографија шарене атмосфере и – драматично – откриле активне вулкане на сателиту Ију. Voyager 1 је пролазећи иза Јупитера снимио Ију и ухватио обрису вулканских ерупција како избацују материјал, што је било прво откриће ванземаљске вулканске активности. Такође, Воијажери су уочили пукотине на леду Европе (назнаке геолошке активности), мапирали разлике на површинама Ганимеда и Калиста и открили неколико нових малих сателита. Ти прелети су знатно проширили знање о Јупитеру. Подаци су показали и да је радијационо окружење око Јупитера јаче него што су Пионеери индицирали.

Ulysses: 1992. године, сонда Ulysses (заједнички пројекат ЕСА и НАСА намењен проучавању Сунца) искористила је гравитациони маневар око Јупитера за скретање у орбиту преко Сунчевих полова. Ulysses није имао камере за Јупитер, али је током проласка прикупио податке о Јупитеровом магнетном пољу и соларном ветру у том региону. Забележио је и феномен међусобне интеракције Јупитерове магнетосфере и Сунчевог ветра.

Галилео орбитер (1989–2003): НАСА-ина мисија Галилео била је прва која је ушла у орбиту око Јупитера. Лансирана 1989, стигла је до Јупитера крајем 1995. и остала у орбити до 2003. Галилео је извео мноштво орбита око Јупитера, пролазећи близу разних месеца и детаљно их снимајући. Такође је Галилео спустио атмосферску сонду у Јупитер 1995 – малу сонду која је ушла у Јупитерову атмосферу падобраном и директно мерила састав, температуру, притисак и ветрове до дубине од око 150 км (при чему је достигла 22 бара притиска и 153 °C пре него што је изгубљен сигнал). Ова сонда је открила да је

Јупитерова атмосфера сувља и да има мање облака него што се очекивало на месту уласка, као и присуство племенитих гасова аргона, криптона и ксенона у већој количини него на Сунцу, што је дало нове трагове о настанку планете.

Орбитер Галилео је током својих 8 година направио кључна открића: потврдио је постојање течног океана испод ледене коре Европе (магнетометријска мерења и снимци пукотина), открио је магнетно поље Ганимеда (први месец са динамо-језгром), и снимио детаље о вулканима на Ији (укључујући ерупције и површинске промене). Такође је открио постојање могуће слане воде и на Калисту (индукована магнетна аномалија). Галилео је посматрао и Јупитерову атмосферу – нпр. посматрао је ударе фрагмената комете Шумејкер-Леви 9 који су 1994. спектакуларно пали на Јупитер, остављајући тамне “ожиле” у облацима. То је био први директан посматрани судар два тела у Сунчевом систему (комете са планетом), а Галилео је као сонда у близини допринео проучавању тог догађаја. Мисија Галилео завршена је контролисаним усмеравањем орбитера у Јупитер (септембар 2003) како би се избегло да евентуално падне на Европу и контаминира је микроорганизмима са Земље.

Каснији прелети: Након Галилеа, Јупитер су посетиле још неке сонде у пролазу. НАСА-ин Касини је пролетео поред Јупитера 2000. на путу ка Сатурну и снимио прелазне феномене у Јупитеровој атмосфери (попут нестанка једне екваторијалне појасеве) и дао најдетаљнију глобалну фотографију Јупитера у то време. Касини инструменти су заједнички са Галилеом паралелно проучавали Јовијански систем неколико месеци, пружајући двоструку перспективу.

2007. НАСА-ина сонда New Horizons (ка Плутону) имала је брзи прелет Јупитера, током кога је обавила опсежна мерења: снимила је вулканске ерупције на Ији у високој резолуцији, мапирала Јупитерову магнетосферу и пружила нове податке о спољашњим месецима и прстеновима. New Horizons је забележила и настанак нових олуја у Јупитеровој атмосфери (попут тада нове “Црвене пеге Јр.”). Ови “гости” су дали додатне информације али се нису задржавали у Јупитеровом систему.

Јуно (2016 – данас): Тренутно, око Јупитера кружи НАСА-ина сонда Јуно, која је у поларну орбиту ушла јула 2016. Јуно је прва сонда која је ишла поларном путањом, пролазећи изнад северног и јужног пола Јупитера при сваком обиласку. Њени главни циљеви су гравитациона и магнетна мерења ради проучавања унутрашње структуре и састава, испитивање поларне магнетосфере и аурора, те снимање атмосфере у високој резолуцији са специфичне поларне перспективе. Јуно је већ донела значајне увиде: утврдила је да Јупитерово магнетно поље није једноставно диполно већ прилично

неуједначено и “квргаво” на појединим местима; открила је групе огромних циклона на половима (по 8 или 9 циклонских олуја поређаних у многоугао око једног централног циклона на оба пола); и, као што је поменуто, пружила доказе да Јупитерово језгро није компактно већ дифузно. Јуно је снимила и запањујуће фотографије облака Јупитера из непосредне близине, приказујући вртлоге и олује у финим детаљима. Мисија Јуно је продужена и активна је и 2025. године – током продужене мисије врши и блиске прелете месеца (пролетела је поред Ганимеда 2021, Европе 2022. и више пута поред Ије 2023–24). Ова преусмерења омогућила су додатна истраживања месеца високом резолуцијом (нпр. Јуно је радаром завирила испод површине Европе и снимила активне вулкани на Ији).

Будуће мисије: И наредна деценија биће узбудљива за истраживање Јупитера. Европска мисија JUICE (Jupiter Icy Moons Explorer), лансирана априла 2023, путује ка Јупитеру где ће стићи 2031. године. JUICE ће фокус ставити на ледене месеце – извршиће серију прелета Европе, Ганимеда и Калиста, а потом ће 2034. ући у орбиту око Ганимеда (постајући прва орбитер-мисија неког месеца другог света). Њени инструменти испитаће детаљно океане испод леда и услове за хабитабилност тих месеца, као и саму планету и магнетосферу. Са друге стране океана, НАСА спрема мисију Europa Clipper (лансирање октобра 2024) која би требало да стигне до Јупитерове система око 2030. Ова сонда ће бити посвећена детаљном мапирању и истраживању Европе – планирано је неколико десетина блиских прелета кроз наредних неколико година, током којих ће се радаром, камерама и спектрометрима “снимити” унутрашња структура леда, дебљина океана, хемијски састав површине и евентуални гејзири. Europa Clipper има циљ да процени да ли Европа има услове погодне за живот.

Закључно, од 1970-их до данас Јупитер је посетило укупно 9 свемирских сонди (од тога 2 орбитера), а две нове мисије су на путу ка њему. Ове мисије револуционарно су промениле наше разумевање Јупитера: од мутне диск куглице са неколико пруга, Јупитер је постао свет чуда – са комплексном атмосфером пуном олуја, прелепим прстеновима од праха, вулканским месецима и леденим световима са подземним океанима. Свака нова сонда донела је нова изненађења и поставила нова питања, која мотивишу будућа истраживања.

7. Закључак

Јупитер, “краљ планета”, представља изузетно важан и фасцинантан део нашег Сунчевог система. Као највећа планета, он чува кључ о настанку и еволуцији планетарног система – према савременим моделима, Јупитер је вероватно прва планета која је настала око Сунца, акумулирајући већину преосталог гаса након формирања звезде. Његов састав (доминантно водоник и хелијум) подсећа на звезде, што Јупитеру даје статус нечег између звезде и планете. Истраживање Јупитерове атмосфере, унутрашњости и магнетосфере пружа нам увид у процесе који обликују гасовите цинове, не само у нашем систему већ и око других звезда (егзопланете типа “Јупитер” су честе у галаксији).

Досадашња посматрања и мисије откриле су нам прегршт занимљивих појава: од Велике црвене пеге, антициклона који вековима бесни, до хиљада мањих олуја и трака облака који чине Јупитер динамичном “атмосферском лабораторијом”. Унутрашњост Јупитера остаје скривена под облацима, али мерења гравитације и магнетног поља (нарочито од сонде Јуно) указују на комплексну структуру са могућим дифузним језгром и огромним слојевима егзотичног металног водоника. Јупитерова магнетосфера импресивних размера пружа природну лабораторију за проучавање феномена попут аурора, радијационих појасева и интеракција магнетног поља са сателитима.

Ниједна планета не би била комплетна прича без свог “дружевља”, а Јупитеров систем сателита је практично мали планетарни систем за себе. Четири Галилејева месеца показала су се невероватно занимљивим световима: Ија са вулканима који мењају лице тог месеца у стварном времену, Европа са тихом спољашњошћу која крије дубоки океан и можда живот, Ганимед са својим магнетским срцем и скривеним слојевима океана и леда, Калисто као древна временска капсула раног Сунчевог система. Сваки од њих проширује наше разумевање онога шта месечеви светови могу бити – не само пуки пратећи објекти, већ кључна места научних истраживања.

Истраживања Јупитера од стране свемирских сонди представљају једну од великих прича планетарне науке у последњих пола века. Од првог бојажљивог проласка Пионеера 10, преко смелих Војажера који су нам отворили очи са открићима вулкана и прстенова, до орбитер-мисије Галилео која је провела године дивећи се Јупитеру и његовим месецима, па све до савремене Јуно која завирује под облаке – свака мисија

открила је нову димензију Јупитера и покренула нова питања. Научили смо да Јупитер није само “гасна лопта”, већ сложен свет: има хемијске слојеве, климу, циклоне величине континената, па чак и ситне прстенове од праха који га обавијају. Схватили смо и да без Јупитера наш планетарни систем не би био исти – његова гравитација стабилизује орбите, али и скреће комете; могуће је и да је миграција Јупитера током формирања Сунчевог система утицала на распоред унутрашњих планета.

Будуће мисије обећавају још узбудљивих сазнања, посебно о потенцијалу настањивости Јупитерових месеца. Ако у наредним деценијама откријемо трагове живота испод ледене површине Европе или Ганимеда, то ће бити откриће које превазилази оквире планетарне науке и улази у домен филозофије и астробиологије. Јупитер ће и у том сценарију играти индиректну улогу – кроз плимне силе он греје унутрашњост тих месеца и омогућава океанима да остану течни.

На крају, Јупитер задржава свој двоструки идентитет: с једне стране, он је далеки, негостољубиви свет дивовских олуја и високог зрачења, али с друге стране, он је и заштитник живота на Земљи (склањајући претње из спољашњег свемира) и потенцијални инкубатор живота на својим месецима. У људској култури остаје симбол моћи и грандиозности – било кроз митолошку персонификацију врховног бога, или кроз задивљујуће фотографије које нам шаље Јуно, Јупитер наставља да инспирише страхопоштовање. Како наша истраживачка средства напредују, можемо бити сигурни да ће највећа планета Сунчевог система још дуго чувати понеку тајну и чекати да је нове генерације научника открију. Јупитер нам показује колико су чуда могућа чак и у нашем “космичком дворишту” и подсећа нас колико још тога имамо да научимо о планетама и животу у свемиру.

8. Литература

- **NASA Science: Jupiter – Overview and Facts.** Jupiter – NASA Solar SystemExploration. <https://science.nasa.gov>
– Основне карактеристике и састав Јупитера на званичном NASA сајту.
- **Википедија (sr): Јупитер.** <https://sr.wikipedia.org>
– Детаљан чланак на српском језику о физичким карактеристикама Јупитера, атмосфери, сателитима, историји истраживања и културном значају.
- **NASA JPL: Cassini Jupiter Portrait.** Cassini snimak Jupitera 2000. <https://nasa.gov>
– Мозаик фотографија Јупитера у правим бојама који је начинила сонда Cassini током прелета 2000. године (приказује облаке и Велику црвену пегу).
- **NASA JPL Mission: Galileo.** <https://jpl.nasa.gov>
– Кратак опис успеха мисије Galileo на Јупитеру: откриће океана на Европи, вулканизма на Ији и магнетног поља Ганимеда.
- **NASA Science: Auroras on Jupiter – Hubble.** <https://science.nasa.gov>
– Извештај о посматрањима поларне светлости на Јупитеру помоћу свемирског телескопа Хабл, укључујући UV снимак аурора (слика приказана у раду).
- **Space.com: Callisto: Jupiter’s Second Largest Moon.** <https://space.com>
– Популарно-научни чланак о Калисту, описује старост површине (~4 милијарде година) и екстремну кратерисаност овог месеца.
- **Science.org: Huge ocean confirmed underneath Ganymede.** <https://science.org>
– Вест о Хабловом открићу доказа подземног океана на Ганимеду који садржи више воде него Земљини океани.
- **NASA Solar System Exploration: Jupiter’s Moons.** <https://science.nasa.gov>
– Ажурирани подаци о броју Јупитерових сателита (95 потврђених) и именовању месеца по митолошким личностима повезаним са Јупитером/Зевсом.
- **Britannica: Jupiter – Basic Data.** <https://en.wikipedia.org>
– Енциклопедијски сажетак астрономских података: димензије Јупитера у поређењу са Сунцем, удаљеност од Сунца и др.