

**МАТЕМАТИЧКА ГИМНАЗИЈА  
У БЕОГРАДУ**

**МАТУРСКИ РАД  
из астрономије  
НЕУНИШТИВИ ВЕТЕРАН – ХАБЛОВ ТЕЛЕСКОП**

**ментор: Слободан Спремо**

**ученик: Сања Којић, IVe**

**Београд, јун 2023.**



# САДРЖАЈ

1. Увод.....	1
2. Историја телескопа.....	2
2.1 Потреба за свемирским телескопима.....	2
2.2 Историја Хабловог телескопа.....	2
3. Наука иза телескопа.....	5
3.1 Основни принципи рада.....	5
3.2 Инструменти и њихове карактеристике.....	6
3.2.1 Camere.....	6
3.2.2 Инструменти за обраду и анализу слике.....	12
3.2.3 Оптички систем.....	18
3.2.3.1 Проблем са примарним огледалом.....	20
3.2.4 Остали делови телескопа.....	22
3.2.4.1 Контролни центар телескопа.....	23
3.2.4.2 Инструменти за комуникацију.....	23
3.2.4.3 Инструменти за производњу енергије.....	24
3.2.4.4 Систем за усмеравање и позиционирање телескопа.....	24
4. Сервисне мисије.....	26
4.1 Сервисна мисија 1.....	26
4.2 Сервисна мисија 2.....	27
4.3 Сервисна мисија 3А.....	28
4.4 Сервисна мисија 3Б.....	29
4.5 Сервисна мисија 4.....	30
5. Најзначајнија открића.....	32
6. ULLYSES програм.....	35
7. Џејмс Веб телескоп – Хаблов наследник.....	36
8. Закључак.....	37
9. Литература.....	38



# 1. Увод

Човеков поглед је одувек био усмерен ка звездама. Од давних времена из страха од временских неприлика, па све до данас у циљу уочавања правилности и закона који владају у универзуму – ван наше планете, као и оних на њој, који су у нераскидивој вези. Временом, изучавање васионе постало је прецизније и опширније захваљујући развоју науке и технологије. Тако су телескопи, људски прозори у космос, унапређивани из оних који су га посматрали са Земље у оне који су лансирани у свемир и самим тим прикупљали квалитетније, односно прецизније слике и пружали поузданије информације. Такав, савременији и још много пута од његовог лансирања у свемир унапређивани, 33-годишњи ветеран своје врсте, јесте Хаблов телескоп.

У овом раду ће такође бити речи о физици која стоји иза сваког функционалног телескопа и детаљније о деловима и карактеристикама Хабловог телескопа. Фокус ће бити на деловима и системима који су тренутно у примени у оквиру телескопа, јер је, као што је претходно напоменуто, био унапређиван и надограђиван више пута од његовог лансирања.

Поред тога, у оквиру овог рада, осврнућемо се и на циљеве сваке појединачне сервисне мисије. С обзиром да је телескоп иницијално и био дизајниран за периодично сервисирање, ове мисије су биле кључне за несметан рад и продужетак животног века овог неуништивог ветерана.

У овом раду ће неизоставно бити речи и о најзначајнијим научним открићима Хабловог телескопа. Од процеса настанка звезда и планета, до лоцирања масивних црних рупа и тамне материје, постоји читав дијапазон феномена који су научници успели да истраже и разумеју уз помоћ овог телескопа.

Такође, као релативно младом и актуелном програму, у овом раду ће бити речи и о „ULLYSES“ програму, односно о *Ultraviolet Legacy Library of Young Stars as Essential Standards* програму који је започет 2020. године и своју трогодишњу експедицију завршава ове, 2023. године. Циљ овог пројекта је праћење и детаљније проучавање живота младих звезда, с обзиром на то да је Хаблов телескоп тренутно једини који има способност уочавања ултраљубичасте светлости у високој резолуцији.

У овом раду ће бити споменут и Џејмс Веб телескоп који је наследник Хабловог телескопа. Његов главни задатак је прикупљање података о најудаљенијим свемирским објектима до којих Хаблов или било који други телескоп до сада нису успели да досегну.

Све ово ће наравно бити употпуњено како сликама самог телескопа, његових делова и скицама одређених компоненти и система, тако и тек неким од небројено много очаравајућих слика космоса који нас окружује и којег смо и сами део, које је Хаблов телескоп успео да направи током свог дугог и успешног животног века који и даље траје.

## **2. Историја телескопа**

### **2.1 Потреба за свемирским телескопом**

Као што је напоменуто у уводу, потреба за свемирским телескопима произилази из потребе за квалитетнијим, односно прецизнијим астрономским посматрањима од оних која су телескопи на Земљи у могућности да пруже. Главна препрека са којом се суочавају телескопи на Земљи јесте посредство атмосфере између површине Земље на којој се налазе и посматраног небеског објекта.

Највећи проблем јесте што небеска тела емитују електромагнетно зрачење у веома великом распону таласних дужина, од гама зрака до радио таласа, које се у незанемарљивој количини апсорбује у Земљиној атмосфери. Чак постоје и спектралне области за које је атмосфера потпуно непрозрачна, односно то зрачење уопште не стиже до Земљине површине.

У циљу превазилажења овог проблема и многих других изазваних посредством атмосфере телескопи на Земљи, односно читаве опсерваторије се граде на високим планинама. Такође, унапређење самих телескопа, односно повећање пречника њихових објектива, побољшање квалитета материјала и читавих делова од којих су телескопи састављени су значајно смањили сметње које атмосфера уноси у астрономска посматрања. Међутим, постоји један проблем са којим се суочавају и који се са Земље не може превазићи. То је управо горе поменута непрозрачност атмосфере за одређене спектралне области.

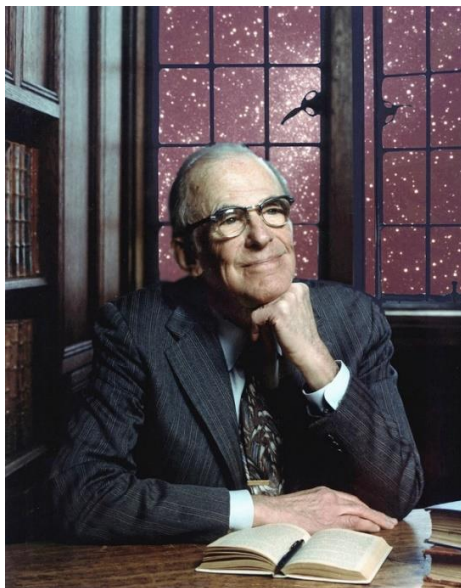
Астрофизичар Лајман Спицер, који се сматра оцем Хабловог телескопа, први је дошао на идеју свемирских телескопа 1946. године у оквиру *RAND Corporation* студије, која је за циљ имала лансирање експерименталне летелице за испитивање свемира у Земљину орбиту. Његова мотивација и главни аргумент је био да ће телескопи у свемиру моћи да се усмере и прате било који жељени свемирски објекат и омогуће далеко квалитетнија астрономска посматрања захваљујући видљивости ширег опсега спектра електромагнетног зрачења. Свој научни рад на тему предности астрономских посматрања из свемира објавио је исте године, где је такође и предложио идеју лансирања *Великог свемирског телескопа*. У то време у Земљину орбиту и даље није био лансиран ниједан вештачки сателит.

### **2.2 Историја Хабловог телескопа**

У периоду од 1922. до 1923. године уз помоћ Хукеровог телескопа на планини Вилсон у Калифорнији, у то време највећим и најмоћнијим са пречником огледала од 2.5 метра, астроном Едвин Хабл је показао да се рецесиона брзина галаксија сразмерно повећава њиховим удаљеностима од Земље, што условљава ширење свемира. Овај однос познат је под називом *Хаблова константа* и сматра се највећим достигнућем овог научника.

Идеја за Хабловим телескопом се појавила 1946. године и његово иницијално име било је *The Large Space Telescope*, односно *Велики свемирски телескоп* и рад на њему и његов развој до лансирања у свемир 24. априла 1990. године трајао је деценијама. Од његовог лансирања Хаблов телескоп је успешно обавио велики број астрономских посматрања која су потпуно изменила човеково поимање универзума. Од утврђивања старости универзума до посматрања драматичних промена на небеским телима у Сунчевом систему, Хаблов телескоп је постао један од најзначајнијих научних инструмената човечанства.

Астрофизичар Лајман Спицер са Универзитета Јејл је 1946. године објавио научни рад на тему предности истраживања свемира из свемира, тј. ван планете Земље и представио идеју *Великог свемирског телескопа*.



Слика 1: Лајман Спицер

СССР је успешно лансирао први вештачки сателит 4. октобра 1957. године – *Спутник 1*. Спутник 1 је био сферног облика, са пречником од 58 центиметара, тежио је 83.6 килограма и требало му је 98 минута да обиђе Земљу. Лансирање Спутника 1 започело је „свемирску трку“ између СССР и САД. Већ следеће године, 31. јануара 1958. године САД је лансирао свој први вештачки сателит – *Експлорер 1*.

Након лансирања Спутника 1 1957. године, америчка влада је наложила формирање *Националне ваздухопловне и свемирске администрације*, познатије као *NASA (National Aeronautics and Space Administration)* у јуну 1958 године. NASA је званично почела са радом 1. октобра исте године.

Национална академија наука 1969. године објављује рад под називом „Научне употребе Великог свемирског телескопа“ и тиме пружа свој допринос и подршку пројекту. Астрофизичари и инжењери NASA-е су 1974. године одржали први састанак на коме су развили концепте за Велики свемирски телескоп, техничке захтеве за летелицу и одредили буџет. Финансирање пројекта изградње Великог свемирског телескопа одобрено је од стране Конгреса САД 1977. године и сама израда летелице је коначно отпочела.

Иницијални радови на изградњи Великог свемирског телескопа подразумевали су израду примарног огледала пречника 2.4 метра. Улога примарног огледала је да фокусира надолazeћу светлост посматраних свемирских објеката. Перкин-Елмер корпорација израдила је огледало у својој највећој фабрици за израду оптичких инструмената у Данберију, у Конектикату.

Већ од почетка развоја концепта, Велики свемирски телескоп био је дизајниран за сервисирање од стране астронаута, који су већ од 1979. отпочели обуку за будуће сервисне мисије.

Велики свемирски телескоп 1983. године мења назив у *Хаблов телескоп*, како га ми данас познајемо, у част асронуу Едвину Хаблу, који је доказао да постоје друге галаксије у нашем универзуму, поред наше и да се што су даље од наше галаксије удаљују све брже.

Спејс-шатл Чаленџер распао се 73 секунде након лансирања 28. јануара 1986. године, 4 године пре лансирања Хабловог телескопа. Након трагедије одлучено је да се издвоји 32 месеца за истрагу несреће и израду одговарајућих побољшања. Овај догађај одложио је лансирање како Хабловог телескопа, тако и осталих летелица у оквиру NASA-иног спејс-шатл програма.

Коначно, 24. априла 1990. године лансиран је спејс-шатл Дискавери у оквиру мисије STS-31 из Свемирског центра Кенеди у Флориди и превозио је 5 астронаута и Хаблов телескоп. Већ 25. априла, само дан касније, Хаблов телескоп је отпочео своју самосталну авантуру по свемиру.



Слика 2: спејс-шатл Дискавери



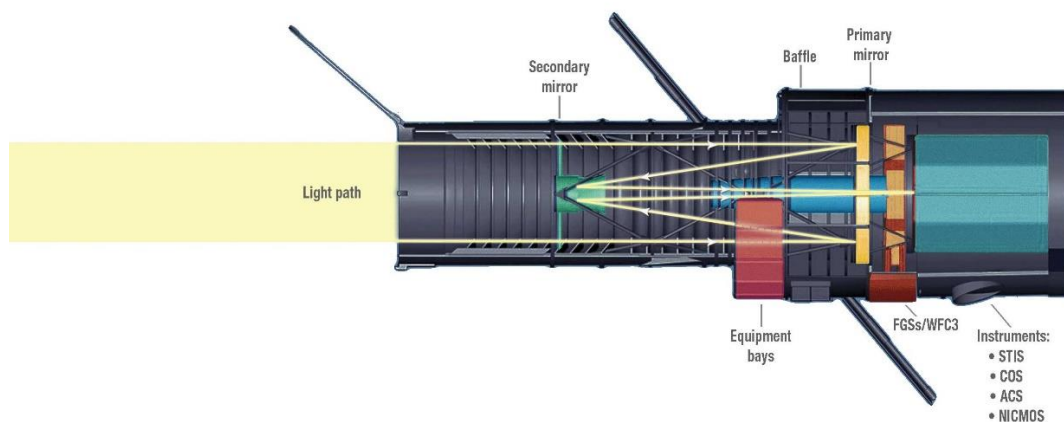
## 3. Наука иза телескопа

### 3.1 Основни принципи рада

Орбитирајући високо изнад Земљине површине, Хаблов телескоп има јасан поглед на свемир неометан од стране замагљујућих или чак потпуно апсорбујућих ефеката Земљине атмосфере. Поред могућности да региструје видљиву и блиско-инфрацрвену светлост, Хаблов телескоп може да региструје и ултраљубичасту светлост, коју Земљина атмосфера потпуно апсорбује и видљива је само из свемира.

Хаблов телескоп опише пун круг око Земље у року од 97 минута крећући се брзином од 8 km/s. Док се креће, примарно огледало Хабловог телескопа региструје и усмерава надолazeћу светлост коју емитују посматрани свемирски објекти ка осталим инструментима телескопа.

Хаблов телескоп је *Cassegrain рефлектор телескоп*. Код телескопа овог типа светлост коју емитују посматрани небески објекти првенствено путује кроз једну цев, затим бива рефлектована од једног конкавног огледала које називамо примарним ка једном мањем конвексном огедалу које називамо секундарним. Затим, секундарно огледало рефлектује светлост назад ка примарном огледалу, али овај пут тачно кроз отвор на центру примарног огледала. Светло се на тај начин фокусира на једну малу површину коју називамо жижном равни, са које даља читавања и формирање слике врше остали инструменти телескопа.

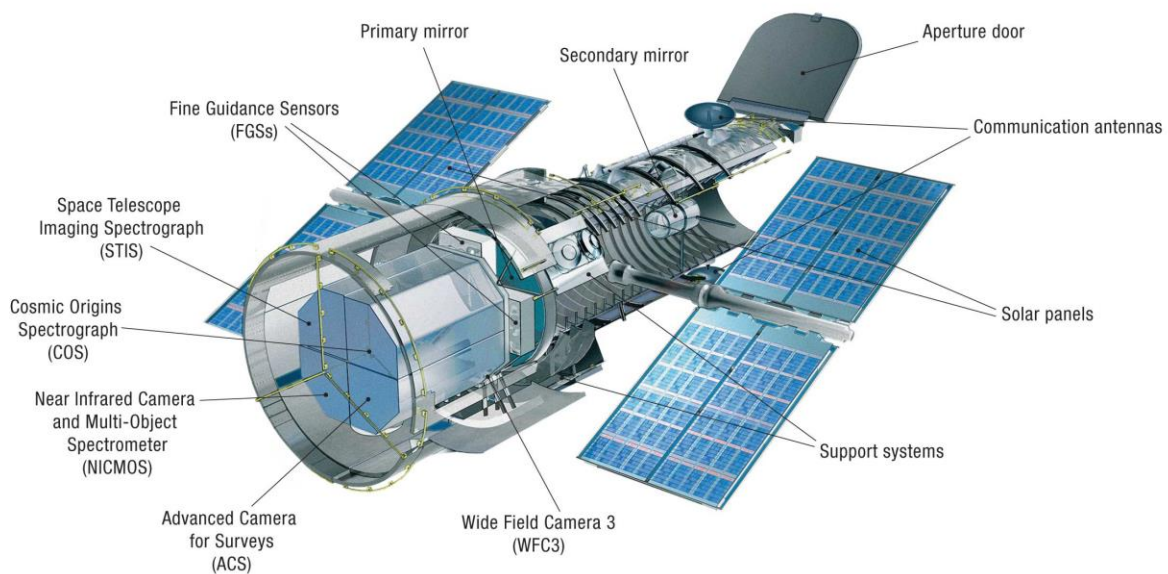


Слика 3: Cassegrain рефлектор телескоп на примеру Хабловог телескопа

Неретко се сматра да је главна улога телескопа да увеличава посматране објекте. Заправо, улога телескопа је да региструје више светлости него што људско око може. Што је веће огледало телескопа, региструје више светлости и слика је јаснија. Примарно огледало Хабловог телескопа је пречника 2.4 метра, а секундарно 0.3 метра. Ове димензије су мале у односу на димензије пречника данашњих телескопа на Земљи, који имају пречнике дужине и до 10 метара, али Хаблов телескоп и даље производи најјасније слике захваљујући својој позицији ван Земљине атмосфере.

## 3.2 Инструменти и њихове карактеристике

Хаблов телескоп је састављен од 6 различитих инструмената, од којих сваки посматра и анализира свемир на јединствен начин. Телескоп се састоји од неколико камера које производе чувене Хаблове фотографије и спектрографа који разбијају светлост на спектар боја ради даље анализе. У наредна два потпоглавља ће бити речи о сваком од инструмената који се тренутно налазе у оквиру Хабловог телескопа.

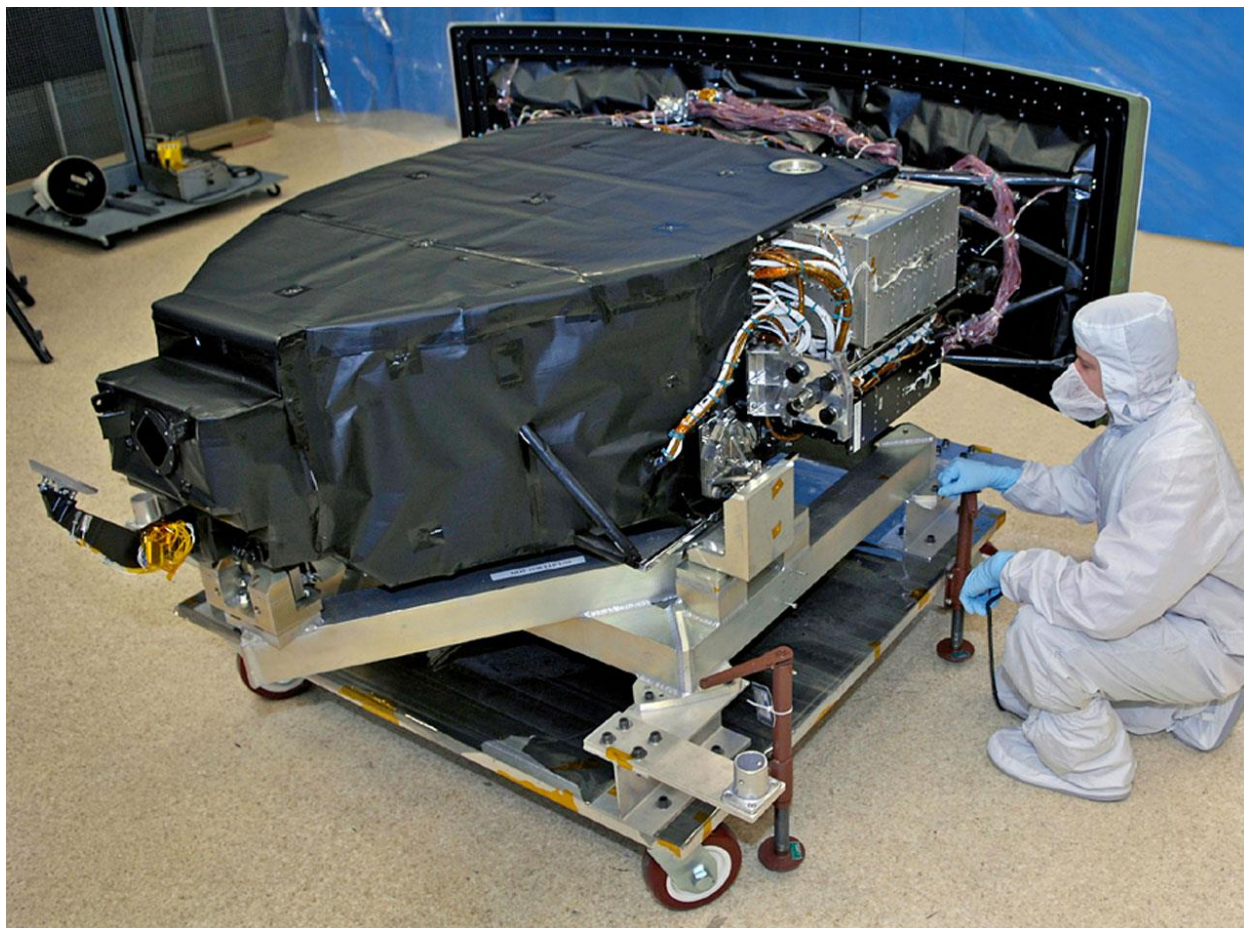


Слика 4: шематски приказ инструмената Хабловог телескопа

### 3.2.1 Camere

*Широкоугаона камера 3 (Wide Field Camera 3 или WFC3)* инсталирана је на телескоп 2009. године у оквиру *Сервисне мисије 4*. Ова камера омогућила је телескопу даљи домет и шире видно поље захваљујући ширем опсегу регистровања ултраљубичасте, видљиве и инфрацрвене светлости. Опсег регистровања светлости ове камере је од 200 nm до 1700 nm. Ова камера заједно са *Спектрографом раног космоса (Cosmic Origins Spectrograph)*

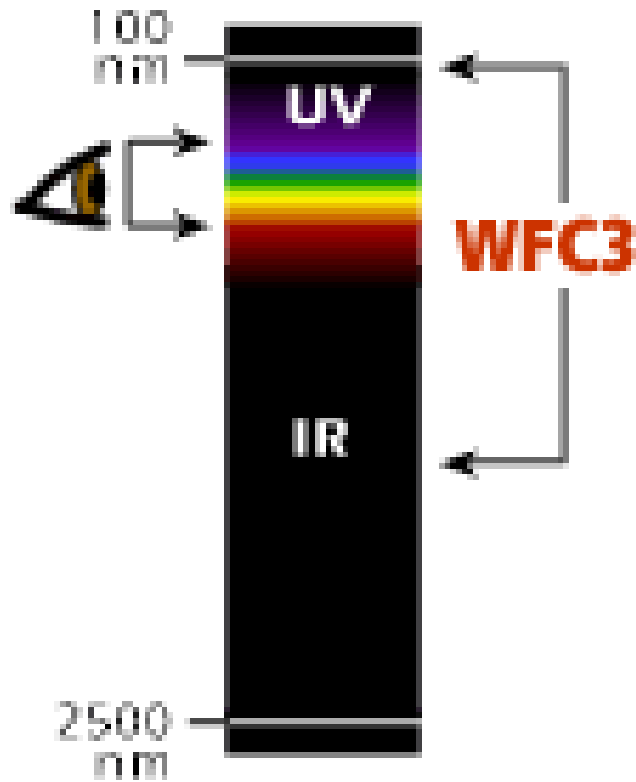
заслужна је за многа досадашња важна научна открића Хабловог телескопа.



Слика 5: тестирање WFC3 пре лансирања

Овај инструмент поседује два међусобно независна канала кроз које светлост путује. Један од њих региструје ултраљубичасту и видљиву светлост, односно светлост у опсегу од 200 nm до 800 nm који служи за посматрање ближих галаксија, а други региструје инфрацрвену светлост, односно светлост у опсегу од 800 nm до 1700 nm и служи за проучавање светлости која потиче од далеких галаксија, јер је та светлост управо у опсегу инфрацрвене услед „развлачења“ током путовања кроз свемир који се шири. Управо ова могућност регистровања већег дела спектра од огромног је значаја за астрономе, који уз помоћ слика добијених овом камером у комбинацији са сликама добијеним другим инструментима производе до тада немогуће јасне слике. WFC3 је заслужна за реализацију пројеката као што је програм *Frontier Fields*, у оквиру којег су посматрани најудаљенији делови свемира, који су до тада били недостижни. Посматрање удаљених делова свемира заправо нам даје увид у историју и еволуцију свемира.

## WHAT LIGHT DOES WFC3 SEE?



Слика 6: интервал спектра таласне дужине светлости коју WFC3 региструје

WFC3 такође има бољу резолуцију, тј. производи јасније слике поред тога што има и шири опсег регистровања светлости у односу на камеру коју је заменила – *Широкопојасну планетарну камеру 2 (Wide Field and Planetary Camera 2 или WFPC2)*. Резолуција се може посматрати као минимална потребна раздаљина између два објекта да их ми на слици не бисмо видели као један. Астрономска јединица за резолуцију је лучка секунда и док најбољи телескоп на Земљи имају резолуцију од приближно 1'', Хаблов телескоп, односно WFC3 има резолуцију мању од 0.1'', тј. 10 пута бољу. Ово је један од главних разлога зашто је Хаблов телескоп толико значајан. WFC3 је заслужна за врло широк дијапазон слика, од слика блиских сазвежђа, до слика веома удаљених галаксија.



*Слика 7: „Стубови стварања“ (“Pillars of Creation”) у маглини Орао (Eagle Nebula)*

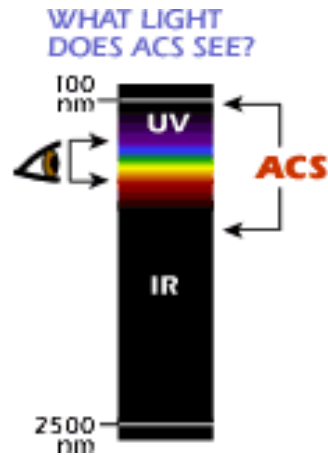
Ова слика направљена је на дан прославе 25. годишњице лансирања Хабловог телескопа у част слике исте појаве из 1995. године направљене користећи WFPC2. Слика је добила овај назив јер се у овом процесу истовремену рађају и умиру звезде утицајем оближњих новорођених звезда.

Напредна камера за снимање (*Advanced Camera for Surveys* или *ACS*) постала је део Хабловог телескопа 2002. године у оквиру *Сервисне мисије 3Б*. Заменила је *Камеру за објекте слабог интензитета* (*Faint Object Camera* или *FOC*), која је у том тренутку била последњи преостали инструмент иницијалне конструкције Хабловог телескопа. Ова камера поседује широк дијапазон могућности и од своје инсталације показала се као најкориснији инструмент Хабловог телескопа. Међу њеним карактеристикама које је издвајају међу осталим инструментима Хабловог телескопа су шири опсег регистровања светлости захваљујући чак 3 међусобно независна канала кроз која светлост путује, ширем видном пољу захваљујући широкоугаоној технологији и појачаној осетљивости која је заслужна за удесетостручење ефикасности Хабловог телескопа од када је инсталирана.



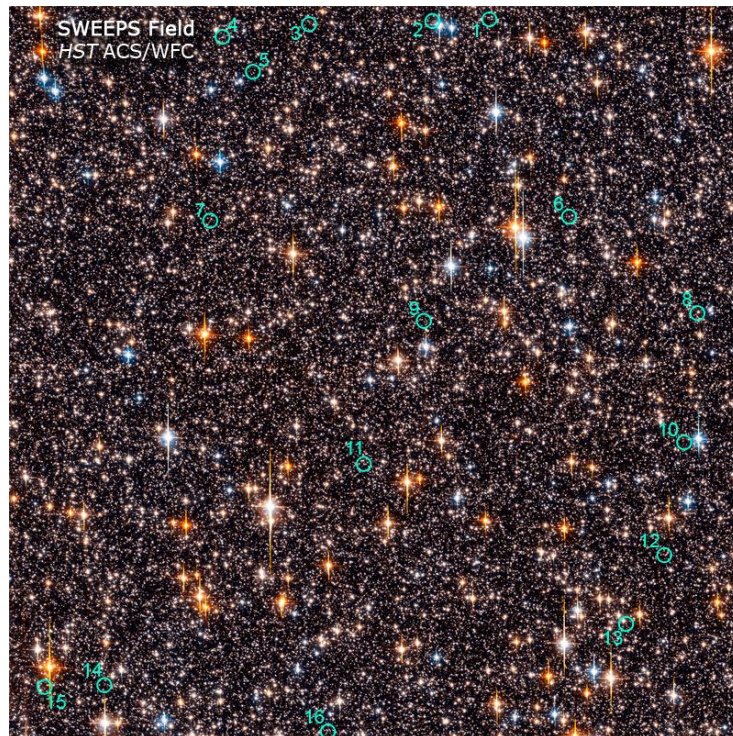
Слика 8: тестирање *ACS* пре лансирања

Ова камера региструје таласне дужине од ултраљубичасте до инфрацрвене светлости уз помоћ своја 3 међусобно независна канала кроз које светлост путује. Опсег регистровања светлости ове камере је од 115 nm до 1100 nm.



Слика 9: интервал спектра таласне дужине светлости који ACS региструје

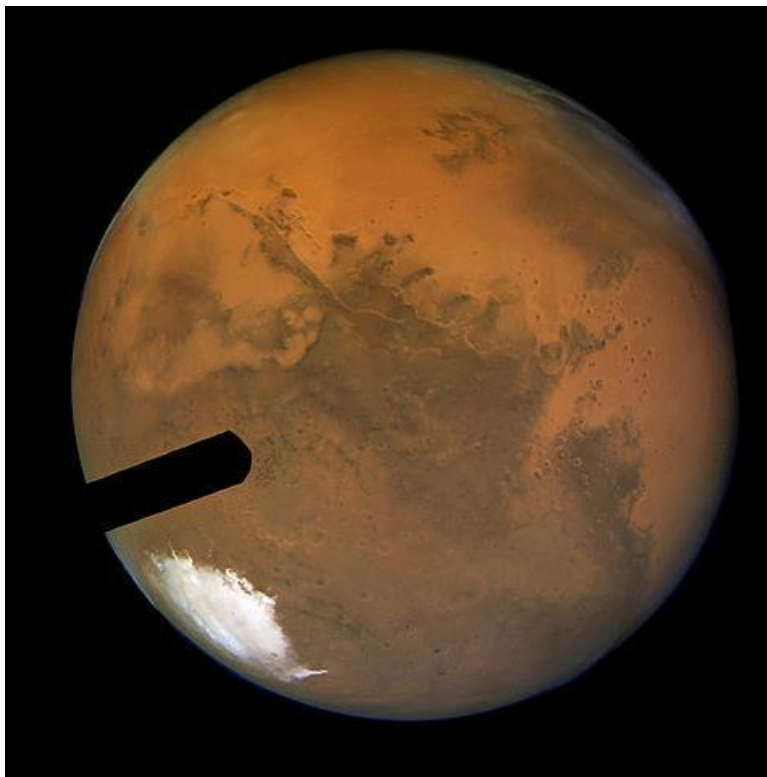
Први и најкоришћенији канал је широкоугаони канал. С обзиром да он пружа шири опсег слике који омогућава проучавање удаљених небеских објеката његова примена је у изучавању природе и распореда најудаљенијих галаксија, одакле сазнајемо о историји и еволуцији свемира.



Слика 10: слика локација 16 откривених екстрасоларних планета у Стрелац-1 прозору направљена користећи широкоугаони канал ACS-а

Други канал јесте канал високе резолуције. Нажалост, његов даљи рад је био онемогућен 2007. године услед квара, који је већим делом био надокнађен инсталацијом

WFC3. Овај канал је био коришћен за прављење детаљних слика унутрашњих, односно мањих делова галаксија. Уз помоћ њега су створане прецизне слике планета које се налазе на малој раздаљини од звезда, као и планета у Сунчевом систему.



Слика 11: слика Марса направљена користећи канал високе резолуције ACS-a

Трећи и последњи канал ACS-a је канал који користи заклањање Сунца (при фотографисању околних објеката). Овај канал се заправо може користити и као замена за *Спектрограф свемирског телескопа са могућношћу поређења спектра (Space Telescope Imaging Spectrograph или STIS)* у случају квара.

### 3.2.2 Инструменти за обраду и анализу слике

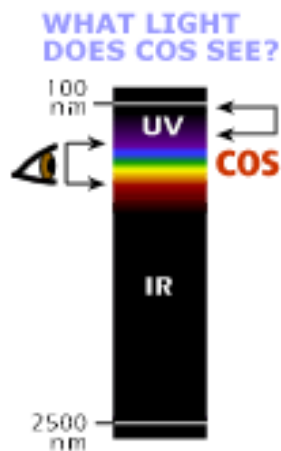
*Спектрограф раног космоса (Cosmic Origins Spectrograph или COS)* постао је део Хабловог телескопа 2009. године у оквиру *Сервисне мисије 4* заједно са WFC3. За разлику од до сада обрађиваних камера, овај инструмент не прави врсту слика која се иначе повезује са Хабловим телескопом. Спектрограф је инструмент који рашчлањује светлост на спектар боја чијом анализом научници могу добити разне податке о објекту који емитује то електромагнетно зрачење, као што су хемијски састав, температура, густина, брзина кретања итд.





Слика 12: тестирање COS-а пре лансирања

Опсег регистровања светлости COS-а је од 90 nm до 320 nm. Овај спектрограф региструје искључиво ултраљубичасту светлост и то уз помоћ 2 главна канала. Први од њих је *Far Ultraviolet (FUV)* канал који региструје ултраљубичасту светлост у опсегу од 90 nm до 205 nm. Други је *Near Ultraviolet (NUV)* канал који региструје светлост у опсегу од 170 nm до 320 nm.



Слика 13: интервал спектра таласне дужине светлости који COS региструје

Највећа употреба овог спектрографа је у анализи тачкастих светлосних извора као што су звезде и квазари – удаљене галаксије које зраче огромну количину светлости из својих централних региона, док се STIS, други спектрограф Хабловог телескопа, користи за посматрање небеских објеката веће површине, као што су галаксије. Овај инструмент заједно са WFC3 заслужан је за велики број научних открића остварених уз помоћ Хабловог телескопа. Поред тога, Хаблов телескоп је, са COS-ом на челу, и даље у потрази за одговорима на велика питања о историји и еволуцији свемира, као и о још увек необјашњеним појавама и неистраженим деловима свемира.

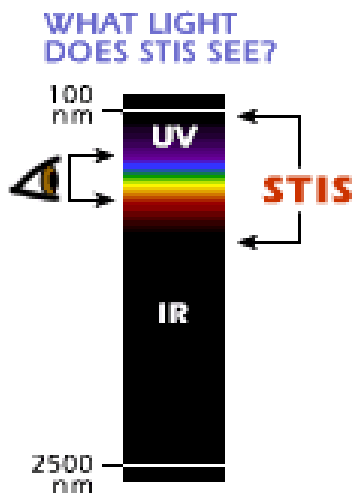
Овај инструмент је у оквиру *Сервисне мисије 4* заменио *COSTAR* – инструмент који је до тада исправљао нејасан вид телескопа изазван проблемом са примарним огледалом. О овоме ће бити више речи до краја овог поглавља.

*Спектрограф свемирског телескопа са могућношћу поређења спектра (Space Telescope Imaging Spectrograph или STIS)* је други спектрограф у склопу Хабловог телескопа. Овај спектрограф је инсталиран 1997. године у оквиру *Сервисне мисије 2*. Инструмент је иницијално био дизајниран да ради 5 година, међутим успешно је радио чак 2 године дуже. Након квара 2004. године, био је ван употребе све до *Сервисне мисије 4* (2009. године) од када је поново у употреби. Овај спектрограф, за разлику од претходно обрађеног, поседује и камеру која производи фотографије.



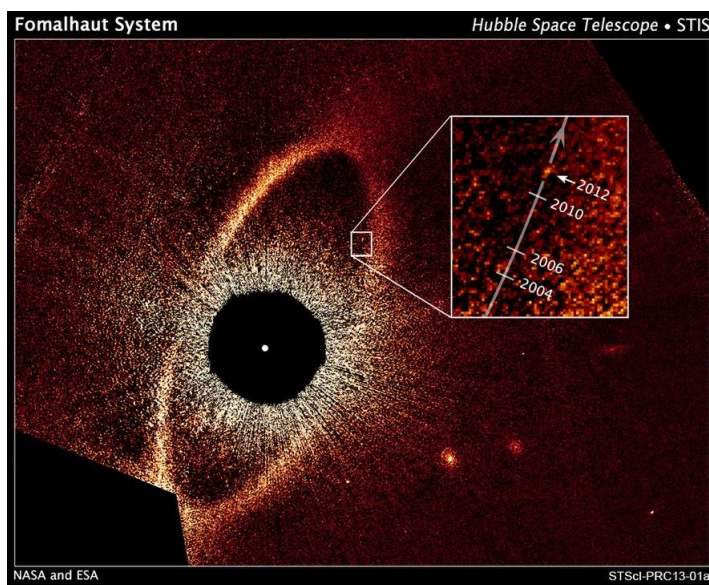
Слика 14: процес састављања STIS-а

Још једна разлика у односу на COS је опсег регистровања светлости који је од 115 nm до 1030 nm, тј. има дијапазон регистровања светлости од ултраљубичасте, преко видљиве, до инфрацрвене.



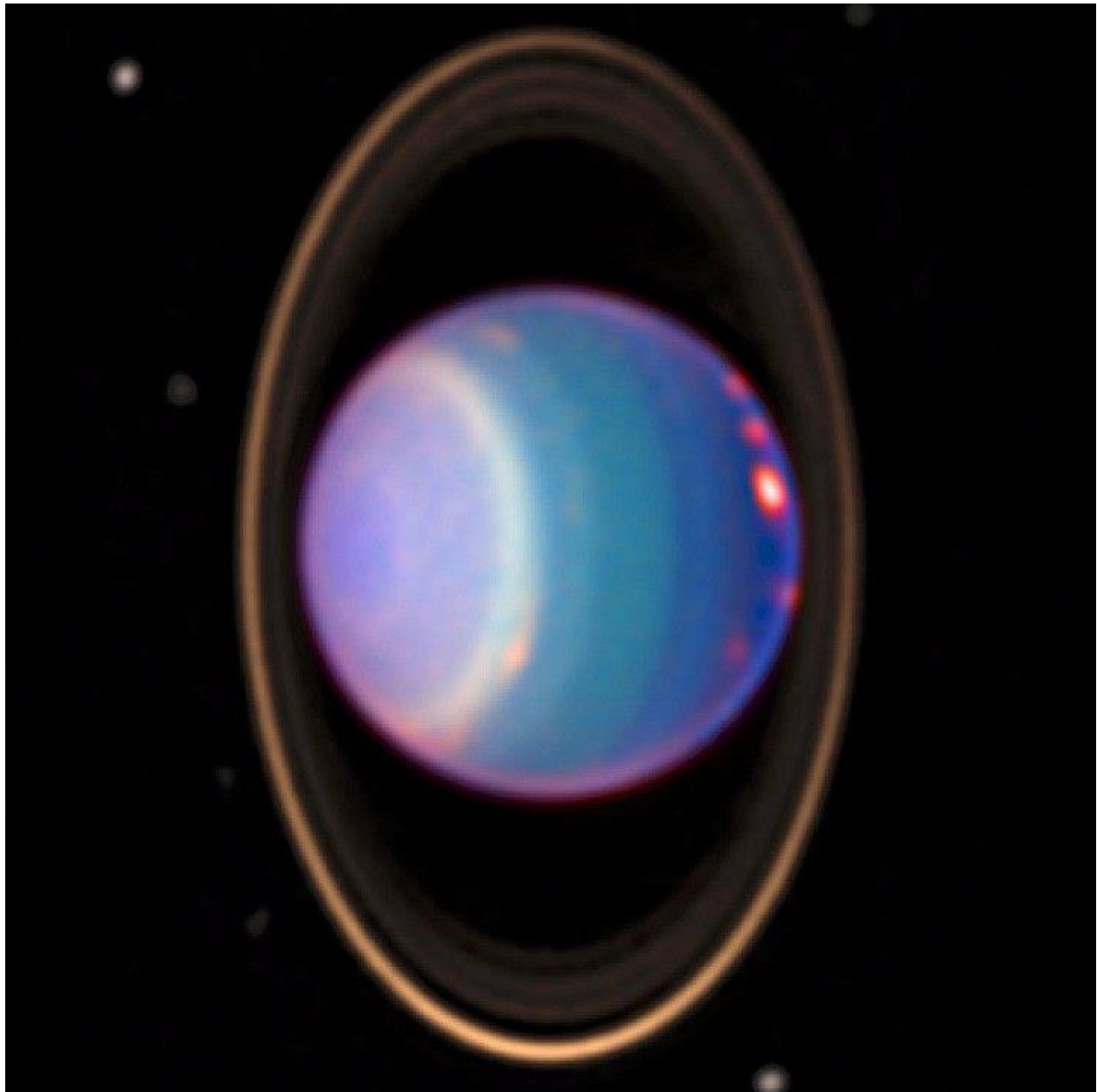
Слика 15: интервал спектра таласне дужине светлости који STIS региструје

С обзиром да STIS поседује и камеру и спектрограф, које користи паралелно, у могућности је да створи фотографију која такође носи податке о температури, хемијском саставу, густини и кретању посматраног небеског објекта. Такође, с обзиром на широк спектар таласних дужина електромагнетног зрачења који овај инструмент региструје, у могућности је да проучава појаве у свемиру од црних рупа, преко црвених џинова и атмосфера у околини других звезда, до интергалактичког медијума – плазме између галаксија.



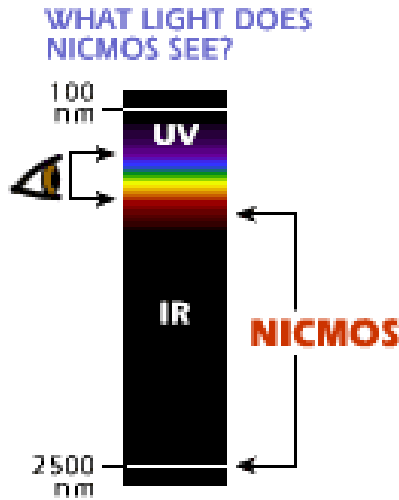
Слика 16: диск протопланетарног материјала око звезде Фомалхаут

*Спектрометар са могућношћу снимања више објеката у блиско-инфрацрвеној области (Near Infrared Camera and Multi-Object Spectrometer или NICMOS) инсталиран је 1997. године у оквиру Сервисне мисије 2 заједно са STIS-ом и био је у функцији од 1997. до 1999., па поново од 2002. до 2008. године. Овај инструмент региструје инфрацрвену светлост, коју људи перципирају као топлоту, па га у том смислу можемо назвати „топлотним сензором“ Хабловог телескопа, како он производи слике које садрже информације о блиско-инфрацрвеној области спектра на њима.*



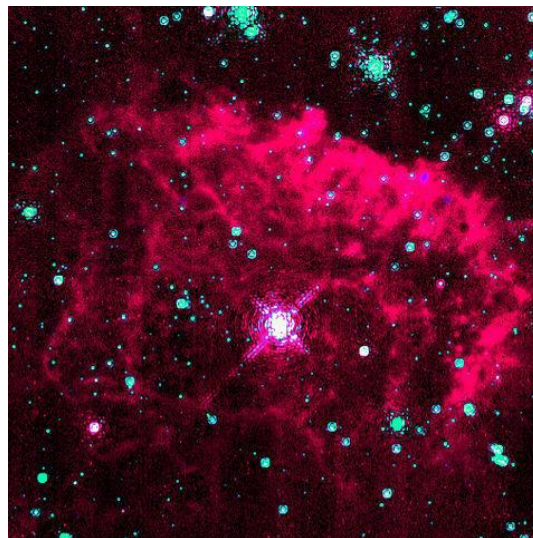
*Слика 17: фотографија Урана фотографисана NICMOS-ом 1998. године*

Овај инструмент се састоји од 3 камере, од којих све 3 региструју међусобно различите опсеге инфрацрвеног дела спектра. Управо та висока осетљивост на инфрацрвену светлост омогућава NICMOS-у да види удаљене галаксије, сазвежђа и планете.



Слика 18: интервал спектра таласне дужине светлости који NICMOS региструје

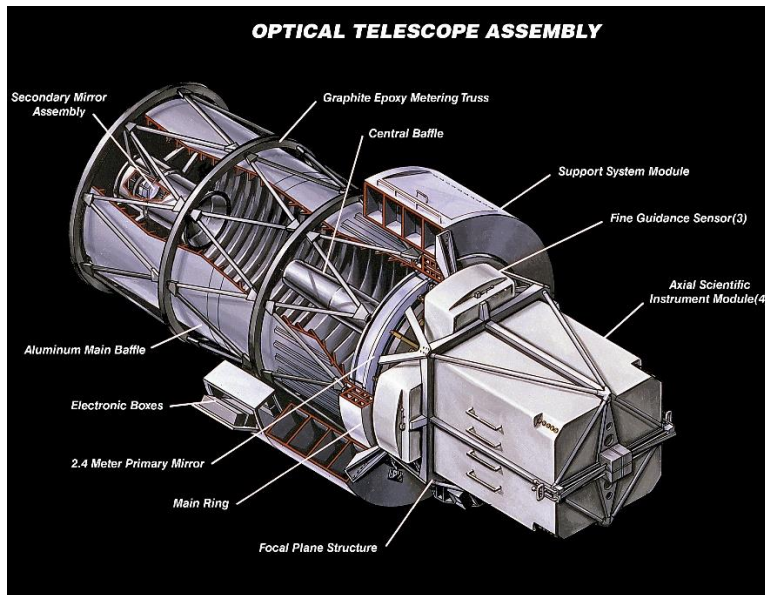
NICMOS чак има могућност посматрања и анализе небеских објеката сакривених облацима космичке прашине, као што су на пример звездана сазвежђа. Уз помоћ овог инструмента научници су добили одговоре на многа питања о стварању звезда, соларних система и галаксија, како ти небески објекти емитују инфрацрвену светлост која пролази чак и кроз космичку прашину за разлику од видљиве. Осим тога, светлост коју емитују удаљени објекти се претвара у инфрацрвену, па је NICMOS захваљујући осетљивости на управо овај део спектра понудио одговоре на многа питања о историји и еволуцији свемира.



Слика 19: Пистол звезда и Пистол небула фотографисане NICMOS-ом

### 3.2.3 Оптички систем

Несумњиво је да научни инструменти поменути у претходна два поглавља имају пресудну улогу у самом раду и успешности Хабловог телескопа. Међутим, да би они уопште били у могућности да стварају очаравајуће слике свемира и врше комплексне анализе његових компоненти, снопови светлости који из њега долазе првенствено морају проћи кроз *Оптички склоп телескопа (Optical Telescope Assembly или ОТА)* Хабловог телескопа да би дошли и до његових комплекснијих компоненти.



Слика 20: илустрација Оптичког склопа телескопа

ОТА је подржан скелетом од графит епоксида. Управо је графит епоксид изабран за израду скелета јер је лак, крут, јак и веома отпоран на контракције и експанзије које могу изазвати екстремне температурне промене у току самог орбитирања око Земље.



Слика 21: састављање скелета Оптичког склопа телескопа

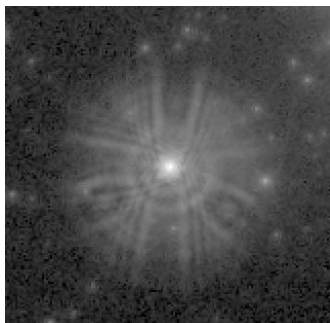
Као што је већ поменуто, Хаблов телескоп је Cassegrain рефлектор телескоп са 2 огледала, као и већина телескопа који се користе за научна истраживања. Ипак, Хаблова огледала су хиперболично закривљена, што значи да имају дубљу кривину од стандардних, параболичних Cassegrain огледала. Ова варијација названа Ritchey-Chrétien дизајном пружа оштрије слике у ширем видном пољу. Пречник примарног огледала износи 2.4 метра, док пречник секундарног огледала износи свега 30.5 центиметара. Величина примарног огледала му омогућава да сакупи чак 40 000 пута већу количину светлости од људског ока. Иако је примарно огледало великог пречника, дизајнирано је да буде што је лакше могуће. Да би се тежина примарног огледала минимизовала његово језгро није сасвим испуњено, већ је попут пчелињег саћа (са отворима облика правилног шестоугла). Такође, оба огледала су премазана танким слојевима алуминијум флуорида и магнезијум флуорида. Доњи слој алуминијум флуорида поспешује рефлексивност огледала, док горњи слој магнезијум флуорида спречава оксидацију доњег слоја и повећава рефлексивност огледала када је у питању ултраљубичаста светлост. Наравно, огледало је изузетно глатко, тј. има изузетно низак коефицијент трења.



*Слика 22: тестирање непремазаног примарног огледала пре лансирања 1990. године*

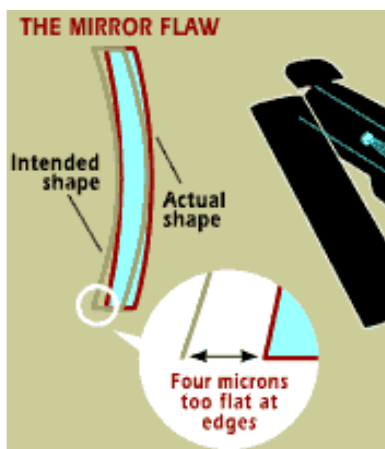
### 3.2.3.1 Проблем са примарним огледалом

Већ у року од неколико недеља након лансирања Хабловог телескопа појавио се први озбиљан проблем. Иако су добијене слике биле јасније од слика телескопа са Земље, њихова јасноћа није била на жељеном нивоу и у том тренутку чак драстично мања од очекиване. Резолуција огледала је била преко 1" уместо 0,1".



Слика 23: исечак слике фотографисане у току првих пар недеља од лансирања, где радијус светлости коју емитује звезда заузима већу површину од очекиваних само неколико пиксела

Анализом ове и других слика установљено је да је примарно огледало било избрушено у погрешан облик. Даљом анализом са Земље установљено је да је брушење изведено сасвим према плану, али да је један од инструмената за брушење био за 1.3 mm погрешно позициониран. Упркос томе што се веровало да је ово једно од најпрецизније израђених огледала икада, са могућношћу грешке од само 10 нанометара, крајеви огледала били су равнији за приближно 2200 нанометара. Иако наизглед мала, грешка у производњи је била катастрофална и довела је до незанемарљивих сферних аберација – немогућности сферног огледала да сакупи све паралелне зраке у исти фокус.



Слика 24: илустрација проблема са примарним огледалом



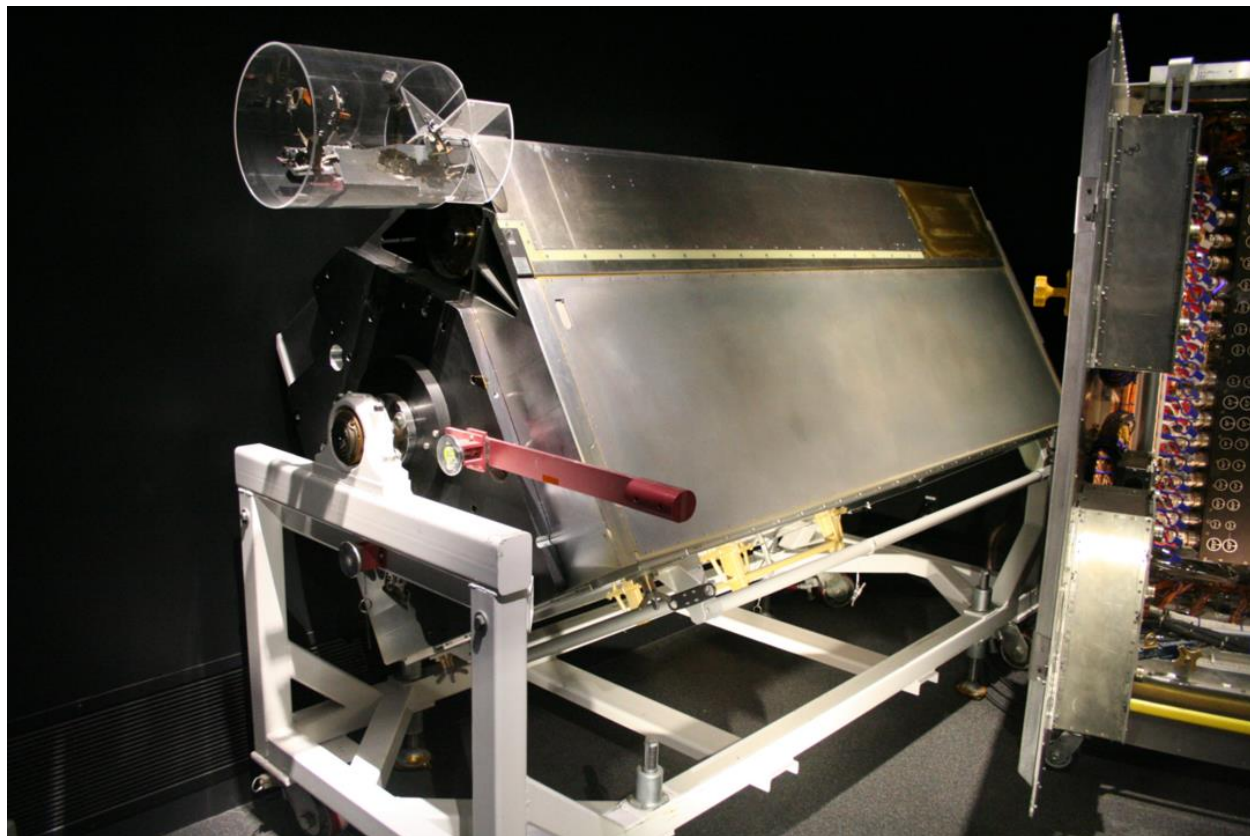
Утицај мане примарног огледала на астрономска посматрања Хабловог телескопа зависио је од конкретног посматрања – посматрање светлих објеката у високој резолуцији је било могуће, док је посматрање блеђих или високо-контрастних објеката било отежано. То је значило да је скоро сва планирана истраживања немогуће извршити, јер су захтевала посматрање изузетно бледих објеката. Упркос томе, у току прве 3 године мисије, пре оптичких корекција, извршен је велики број посматрања мање захтевних циљева. С обзиром да је грешка била исправно уочена и окарактерисана, а непроменљива, астрономи су били у могућности да делимично компензују ману огледала користећи напредне технике обраде слике.



Слика 25: еволуција Хабловог оптичког система приказана на примеру слике спиралне галаксије M100

С обзиром да је Хаблов телескоп био је дизајниран за сервисирање од стране астронаута од самог почетка, одмах након уочавања проблема са примарним огледалом отпочето је осмишљање решења које би било имплементирано већ у оквиру прве сервисне мисије заказане за 1993. годину. Огледало није било могуће заменити у орбити, а враћање читавог телескопа на Земљу ради поправке овог инструмента би захтевало превише времена и новца. С тога су научници смислили решење које је подразумевало својеврсне „наочаре“ за телескоп, тј. додавање огледала које има комплементарну грешку оној на примарном огледалу. Тако је поред *Широкоугаоне и планетарне камере 2 (Wide Field and Planetary Camera 2 или WFPC2)* у току *Сервисне мисије 1*, која је била планирана за инсталацију у току прве сервисне мисије невезано за ману огледала и требало да замени *Широкоугаону и планетарну камеру 1 (Wide Field and Planetary Camera 1 или WFPC1)*, био инсталиран и *Corrective Optics Space Telescope Axial Replacement (COSTAR)*, који је садржао 2 огледала од којих је једно било одговарајуће корективно огледало. Да би COSTAR био инсталиран, један од инструмената Хабловог телескопа је морао бити жртвован и астрономи су одлучили да ће то бити инструмент за мерење јачине и поларности брзомењајућих небеских објеката *High Speed Photometer (HSP)*. WFPC2 је у себи имала корективне факторе, док је COSTAR био екстерни корективни инструмент за све остале инструменте. У оквиру *Сервисне мисије 3Б (2002. године)* замењен је и последњи инструмент Хабловог телескопа

без сопственог корективног система. COSTAR је 2009. године враћен на Земљу након успешно обављене *Сервисне мисије 4* и од тада је изложен у Смитсоновском музеју у Вашингтону.



*Слика 26: COSTAR у Смитсоновском музеју у Вашингтону*

### **3.2.4 Остали делови телескопа**

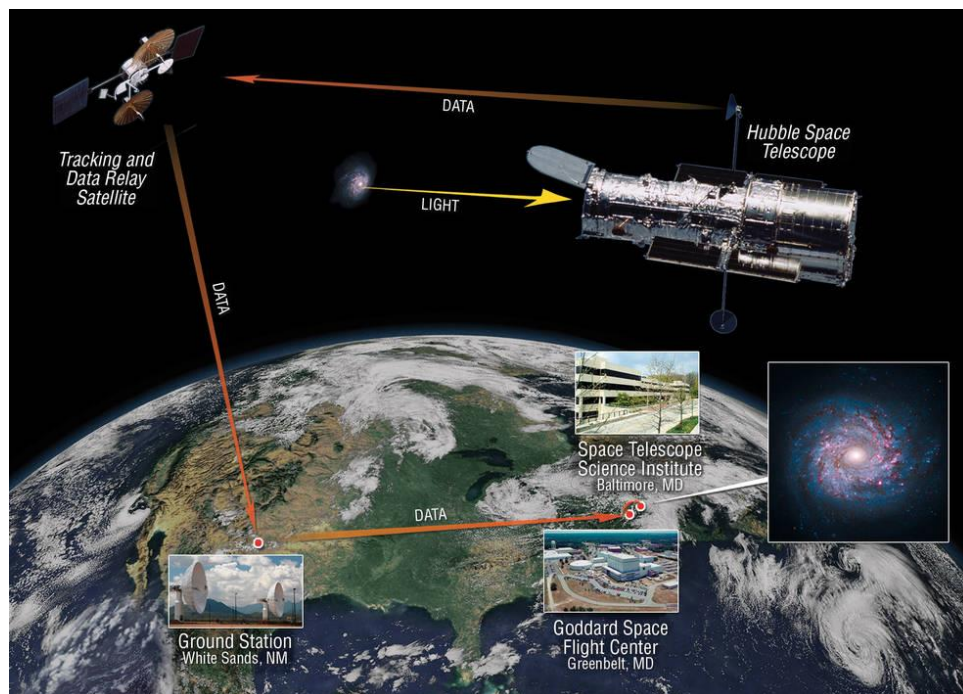
Наравно, поред оптичког система и главних инструмената, Хаблов телескоп поседује и још неке инструменте и системе који му омогућавају рад у свемиру. У овом поглављу ћемо се осврнути управо на те компоненте летелице. Све ове уређаје носи јединствена свеобухватна конструкција отпорна на сурове услове у свемиру. Проблеми које је дизајнирана да превазиђе су нулта гравитација и драстичне промене температуре у току само једне ротације око Земље. Решење је вишеслојна конструкција, односно изолација инструмената. Слој изолације који облаже и носи оптички систем изграђен је од графита, због чврстине, лакоће и отпорности контракцијама и експанзијама услед промена температуре, док алуминијумско кућиште облаже и носи читаву апаратуру телескопа.

### 3.2.4.1 Контролни центар телескопа

Како би све компоненте Хабловог телескопа исправно функционисале и сарађивале, Хаблов телескоп поседује врсту контролног центра који има управо ту улогу. Састоји се од главног процесора, неколико компјутера и неколико микропроцесора који се налазе како ван, тако и у склопу самих инструмената. Постоје два главна компјутера од којих је један задужен за комуникацију са Земљом, а други за управљање жирокопима, системом за усмеравање и позиционирање телескопа и другим сличним системима. Микропроцесори унутар самих инструмената комуницирају са главним процесором и обезбеђују синхронизован рад свих делова телескопа. Првобитни главни процесор је био DF-224 дизајниран у току седамдесетих са веома ограниченим могућностима у односу на данашње стандарде. Већ током прве сервисне мисије 1993. године инсталиран је додатни ко-процесор базиран на Intel-овом 80386 процесору, да би их током друге сервисне мисије 1999. године заменио нов процесор базиран на Intel-овом 80486 процесору. Међутим, током најскорије сервисне мисије 2009. године је и тај процесор замењен новим, неупоредиво модерним процесором.

### 3.2.4.2 Инструменти за комуникацију

Хаблов телескоп има напредан комуникациони систем који омогућава телескопу да прима команде научника са Земље и да шаље прикупљене податке, као и податке о свом стању. Логистика тока информација између Хабловог телескопа и научника на Земљи се може видети на слици испод.



Слика 27: илустрација тока информација између летелице и научника на Земљи

*Сателитски систем за праћење и слање података (Tracking and Data Relay Satellites или TDRS)* се састоји од 5 сателита. TDRS је задужен за све команде и податке које треба проследити са телескопа или ка телескопу. Како би се постигла успешна комуникација између телескопа и TDRS-а потребно је да се макар један од сателита TDRS-а налази у видном пољу телескопа. Уколико ниједан од сателита није у видном пољу у жељеном тренутку посебна меморија у оквиру телескопа/сателита памти податке/команде и шаље их чим се макар један од сателита поново нађе у видном пољу телескопа.

### **3.2.4.3 Инструменти за производњу енергије**

Хабловом телескопу је потребна велика количина електричне енергије за напајање свих својих уређаја. Да би се та потреба задовољила, Хаблов систем за производњу енергије прикупља, складишти и дистрибуира електричну енергију за цео систем. Главне компоненте Хабловог система за производњу енергије су соларни панели, батерије, јединица за контролу потрошње електричне енергије, јединице за дистрибуцију електричне енергије и њихова помоћна електроника.

Два сета соларних панела постављена симетрично у односу на тело телескопа налик на крила прикупљају Сунчеву енергију и претварају је у електричну. Хабл је имао 3 различита пара сетова соларних панела од свог лансирања 1990. године. Астронаути су мењали соларне панеле у оквиру 3 од укупно 5 сервисних мисија које су до сад имали. Последњи пар који је тренутно у употреби се састоји од укупно 8 панела.

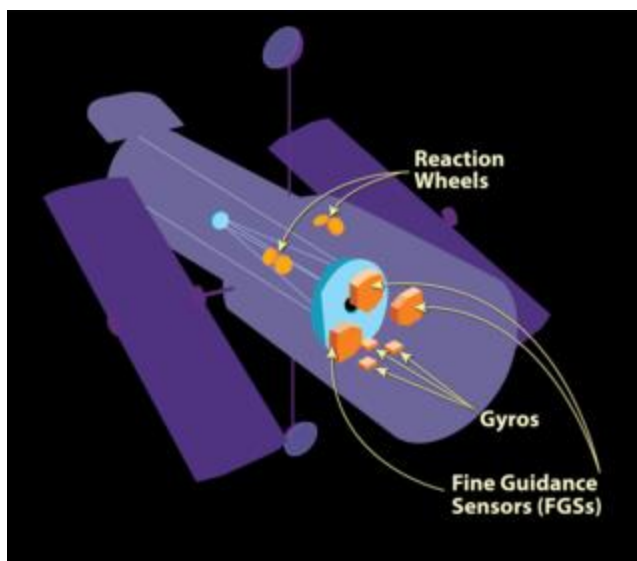


*Слика 28: систем за производњу енергије Хабловог телескопа*

### **3.2.4.4 Систем за усмеравање и позиционирање телескопа**

Орбитирајући око Земље, Хаблов телескоп се ослања на робустан систем за усмеравање и позиционирање који му омогућава да одреди правац и смер у којем је

усмерен, усмери се према жељеном небеском објекту и остане фокусиран на њега у току посматрања. Главне компоненте овог система су жирокопи, реакциони точкови и сензори за фино навођење.



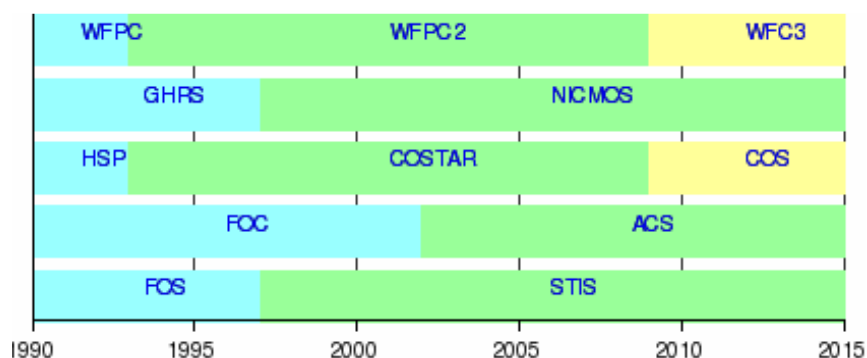
Слика 29: главне компоненте система за усмеравање и позиционирање телескопа

У оквиру система за усмеравање и позиционирање телескопа се налази 6 жирокопа. Жирокопи су врло корисни уређаји за оријентацију у простору у овом случају, како су посебно корисни у инерцијалним системима у којима магнетни компаси нису прецизни. Заједно са жирокопима, у оквиру Хабловог телескопа ради 4 уређаја за ротацију телескопа под називом реакциони точкови. Жирокопи региструју када телескоп треба да се преусмери. Они затим шаљу наредбу главном процесору да телескоп треба заротирати, који ту наредбу прослеђује ротационим точковима. Након тога се, на основу Трећег Њутновог закона, телескоп ротира у супротном смеру од смера убрзавања реакционих точкова. Како су сви правци оса ротација точкова међусобно различити, комбинацијом њихових интензитета убрзавања телескоп се може преусмерити у било ком правцу и смеру.

Сензори за фино навођење обезбеђују информације о положају телескопа потребне при ротацији и одржавању фокуса телескопа на основу одстојања од других објеката у свемиру. Два од три сензора служе за усмеравање телескопа, док трећи служи за одржавање фокуса на жељеном објекту. Усмеравање телескопа се врши тако што два одговарајућа сензора проналазе „звезде водиле“ у односу на које одређују релативну позицију самог телескопа. Грешка ових уређаја је максимално 0.01”, што их чини веома прецизним. Трећи сензор може да измери карактеристике попут „климања“ звезда, што је последица кружења планета око њих, дужине пречника посматраних небеских објеката итд.

## 4. Сервисне мисије

Као што је већ поменуто, Хаблов телескоп је од самог почетка био дизајниран за периодично сервисирање у циљу омогућавања несметаног рада и продужења животног века. Између 1993. и 2009. астронаути су обишли Хаблов телескоп 5 пута да би заменили уређаје ограниченог животног века као што су батерије, жirosкопи и помоћна електроника и застареле инструменте новим и савременим инструментима. Управо због тога што су сервисне мисије биле део плана од самог почетка, Хабл је дизајниран тако да се свим инструментима предвиђеним за сервисирање у неком тренутку може лако прићи. Величина до сада замењених инструмената обухвата широк дијапазон – од уређаја величине кутије за ципеле до оних величине телефонске говорнице, па се од алата за њихову замену такође користе разноврсни инструменти од специјалних кључева до електричних алата. Сервисирање је омогућило Хабловом телескопу успешан и продуктиван животни век који и даље траје.



Слика 30: преглед инструмената током времена

### 4.1 Сервисна мисија 1

Сервисна мисија 1 трајала је од 2. до 13. децембра 1993. године. Како се већ на самом почетку испоставио квар на примарном огледалу, кључном делу телескопа, решавање овог проблема је постало приоритетни циљ ове мисије. Тим астронаута је у току мисије на свејс-шатлу *Endeavour*, којим су допутовали до Хабла, интензивно радио на телескопу. Инсталирали су два нова уређаја – WFPC2 уместо до тада коришћене WFPC и COSTAR, инструмент који је кориговао ману примарног огледала. Током мисије су такође инсталирани нови соларни панели како би се смањило подрхтавање целог телескопа изазвано прекомерним савијањем соларних панела у Земљиној орбити у току преласка из хладног и тамног дела дана у топлији и светлији, нови жirosкопи и помоћна електроника. Успех ове мисије није само побољшао Хаблов вид, што је довело до низа открића врло брзо након саме мисије, већ је и доказао да сервисирање у Земљиној орбити може бити успешно.



*Слика 31: астронаути инсталирају COSTAR у оквиру Сервисне мисије 1*

## **4.2 Сервисна мисија 2**

Хаблове камере прве генерације су нам омогућиле невероватан поглед на удаљене галаксије. Међутим, светлост која долази од најудаљених галаксија прелази у инфрацрвену путујући кроз свемир који се шири. Да би видео и анализирао и ове галаксије, Хабл је у оквиру *Сервисне мисије 2* добио инструменте који су регистровали управо инфрацрвену светлост. У току ове мисије која је трајала од 11. до 21. фебруара 1997. године тим астронаута у свејс-шатлу *Дискавери* је допутовао до Хабловог телескопа са два нова

инструмента за инсталацију. То су били NICMOS и STIS, који су као што је већ поменуто осетљиви на инфрацрвену светлост, од којих је STIS у могућности чак и да прави фотографије небеских објеката и трага за црним рупама. Оба инструмента су имала већ уграђене корективне факторе за ману примарног огледала. Уз то, поседовали су технологију која није била позната научницима који су дизајнирали Хабл 1970-их, а која је Хаблу омогућила шире видно поље. Нови инструменти заменили су до тада коришћене *Goddard High Resolution Spectrograph* и *Faint Object Spectrograph*. Уз то, у оквиру ове мисије су инсталирани и један савременији сензор за фино навођење, нова јединица за складиштење Хаблових података која је била флексибилнија и могла да складишти 10 пута више података од претходне и резервни реакциони точкови.



Слика 32: астронаути у завршној фази Сервисне мисије 2

### 4.3 Сервисна мисија 3А

NASA је одлучила да подели трећу сервисну мисију на две – *Сервисну мисију 3А* и *Сервисну мисију 3Б*, након што је трећи од шест жirosкопа претпрео квар (Хаблу је у том тренутку било неопходно 3 жirosкопа за оријентацију у простору). Након што је и четврти жirosкоп престао са радом 13. новембра 1997. године Хабл је ушао у такозвани „безбедни мод“. Хабл у безбедном моду није могао да посматра жељене небеске објекте, али је његова безбедност била осигурана. То у ствари значи да је Хаблом могло бити управљано са Земље,



али са само два преостала жirosкопа није био у могућности да са прецизношћу потребном за научна истраживања лоцира и фиксира посматрани небески објекат. Научници у командном центру на Земљи су затворили отвор који је омогућавао оптичком систему да региструје светлост из свемира и стабилизовали летелицу да би осигурали да њени соларни панели добију адекватну количину соларне енергије. *Сервисна мисије 3А* трајала је од 19. до 27. децембра 1999. године и њен главни задатак је био замена жirosкопа. Тим астронаута који је до телескопа допутовао у спејс-шатлу *Дискавери* је успешно заменио свих 6 жirosкопа. Уз то, инсталирани су још један напреднији сензор за фино навођење, нови предајник, напреднији главни процесор, дигитални снимач података, помоћна електроника, батерије и нови спољашњи термо-изолаторни слој.

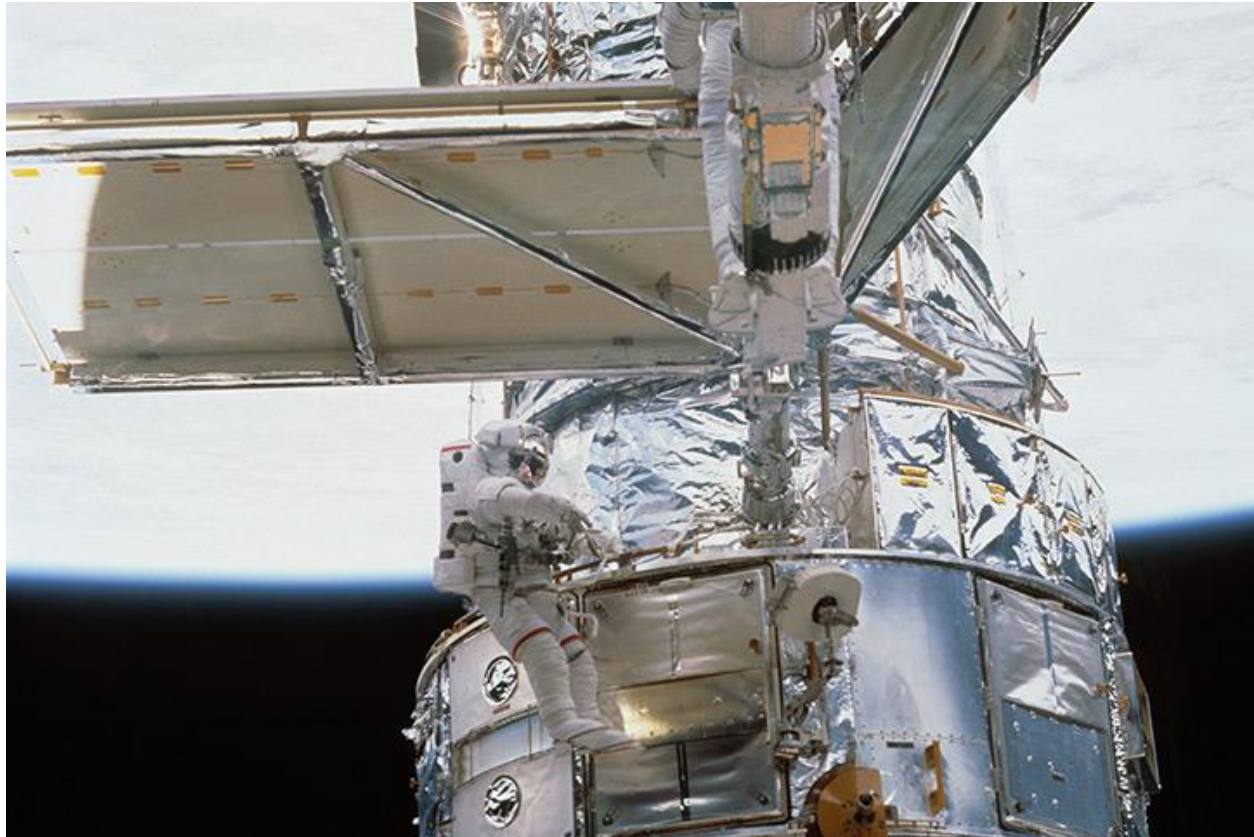


*Слика 33: инсталација новог сензора за фино навођење у оквиру Сервисне мисије 3А*

#### **4.4 Сервисна мисија 3Б**

*Сервисна мисија 3Б* трајала је од 1. до 12. марта 2002. године и њен главни циљ била је инсталација нове савремене камере – ACS. Како је до тада последња замена неких од

главних инструмената обављена 1997. године, инсталација ове камере је увела скоро 12-годишњи телескоп у 21. век. Захваљујући свом ширем видном пољу, јаснијим сликама и већој осетљивости ова камера је удвостручила величину видног поља телескопа и омогућила 10 пута брже прикупљање података од до тада коришћене WFPC2. Уз то, у оквиру ове мисије су вршена побољшања система за производњу енергије, система за усмеравање и позиционирање и NICMOS-а.



*Слика 34: рад на летелици у оквиру Сервисне мисије 3Б*

## **4.5 Сервисна мисија 4**

*Сервисна мисија 4* иницијално је заказана за 2004. годину, као последња планирала сервисна мисија Хабловог телескопа. Нажалост, након велике трагедије која се догодила 2003. године у којој је читава посада свејс-шатла Колумбија изгубила своје животе и у којој је и сам свејс-шатл уништен, ова мисија је одложена, па затим сасвим отказана. Међутим, након успешног опоравка свејс-шатл програма и процена ризика четврте сервисне мисије NASA је ипак одобрила још једну финалну мисију. Ово је вероватно најизазовнија и инајинтензивнија Хаблова сервисна мисија са великим бројем комплексних задатака које је требало извршити, а који изискују више времена и концентрације од свих претходних мисија. Тим астронаута је у оквиру ове мисије инсталирао два важна инструмента – WFC3 и COS. Ови инструменти су телескоп учинили чак 100 пута моћнијим него што је био када

је лансиран. Као што је већ поменуто WFC3 региструје ултраљубичасту, видљиву и инфрацрвену светлост, али не симултано, има много бољу резолуцију и много шире видно поље од WFPC2 коју је заменила, док COS региструје искључиво ултраљубичасту светлост, али са макар 10 пута већом осетљивошћу, чак 70 пута већом при посматрању бледих објеката од свих осталих Хаблових инструмената. COS је заменио Хаблов корективни инструмент COSTAR, како су сви до тада инсталирани уређаји укључујући и сам COS имали уграђене корективне факторе за ману примарног огледала, па COSTAR више није био потребан. Крајем септембра 2008. године за када је први пут одложено лансирање се догодио квар на Хабловом телескопу. Квар је погодио један од командних система телескопа који управља инструментима и контролише проток података међу њима. Проблем је привремено решен пребацивањем на резервни систем, али NASA је одлучила да одложи мисију до маја 2009. године како би њени научници и инжењери имали довољно времена да конструишу потпуно нов и готово идентичан командни систем телескопа. Мисија је реализована у трајању од 11. до 24. маја 2009. године. У оквиру мисије успешно је извршена поправка чак два важна инструмента у свемиру, што креатори телескопа нису могли ни да замисле као могућност. Оба инструмента у тренутку поправке нису била у функцији, ACS након кратког споја 2007. године, а STIS након нестанка струје 2004. године. Успешна поправка ова два инструмента и инсталација још два нова обезбедила је Хабловом телескопу 5 функционалних инструмената за будућа посматрања. Уз то, астронаути су у оквиру ове мисије успели да обнове и побољшају основне системе за функционисање телескопа у свемиру.

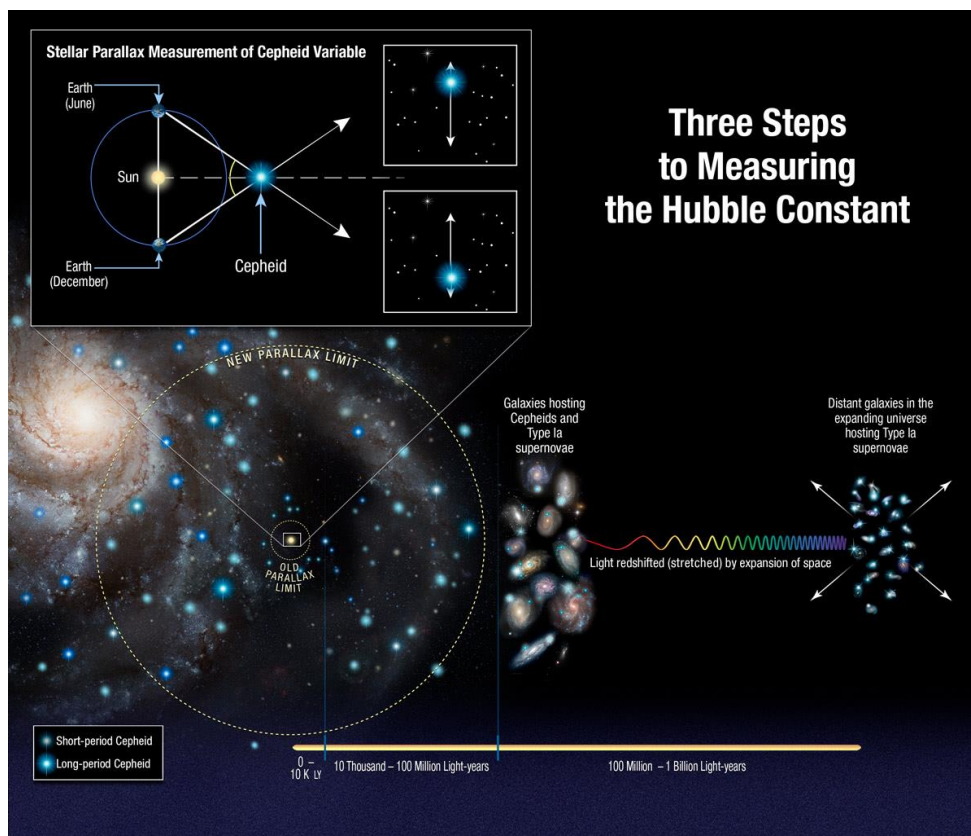


*Слика 35: инсталација WFC3 и оквиру Сервисне мисије 4*

## 5. Најзначајнија открића

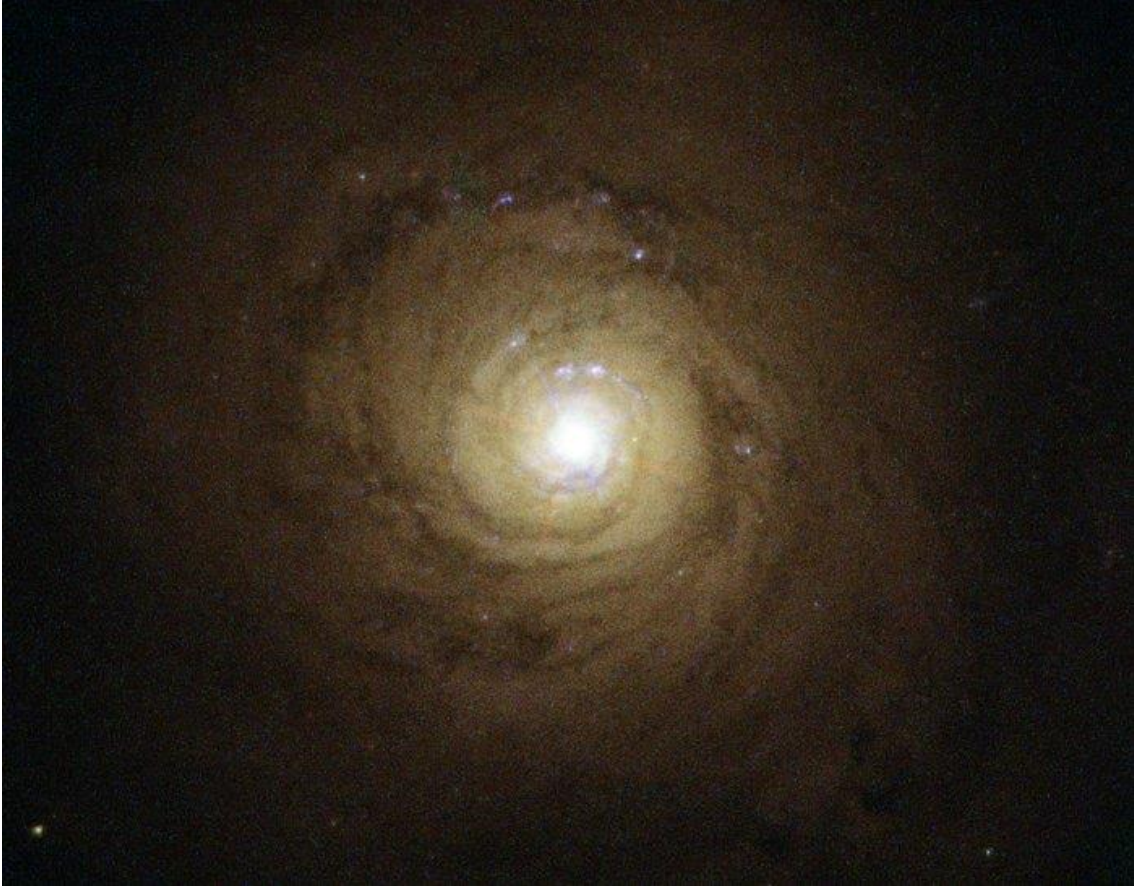
Хаблов свемирски телескоп је један од најамбициознијих и најплодоноснијих људских подухвата икада. Открића Хабловог телескопа револуционизују готово све области астрономије, стално стварајући нове погледе на свемир који су већи део људске историје само могли бити домаштавани. Поред открића, посматрања Хабловог телескопа су довела до отварања нових питања, а неки од резултата су захтевали развој потпуно нових теорија да би их објаснили. Стварајући пут за будуће свемирске телескопе, Хабл представља везу између интелектуалне радозналости наше врсте, изоловане на усамљеној планети, са бесконачно чудесним и величанственим свемиром. У овом поглављу ћемо се осврнути на нека од најзначајнијих открића овог неустрашивог ветерана своје врсте.

Хаблова константа је све до открића Хабловог телескопа била одређена са грешком од 50%. Прво од њих смањило је грешку на 10%, чиме су научници већ били одушевљени, међутим сада, уз истрајност и прецизна посматрања, научници се приближавају одређивању вредности Хаблове константе са грешком од само 1%. Даље је уз помоћ Хабловог телескопа показано да брзина ширења свемира није константна, већ да се свемир убрзано шири. То откриће заједно са другим посматрањима довело је до закључка о старости свемира која износи 13.7 милијарди година.



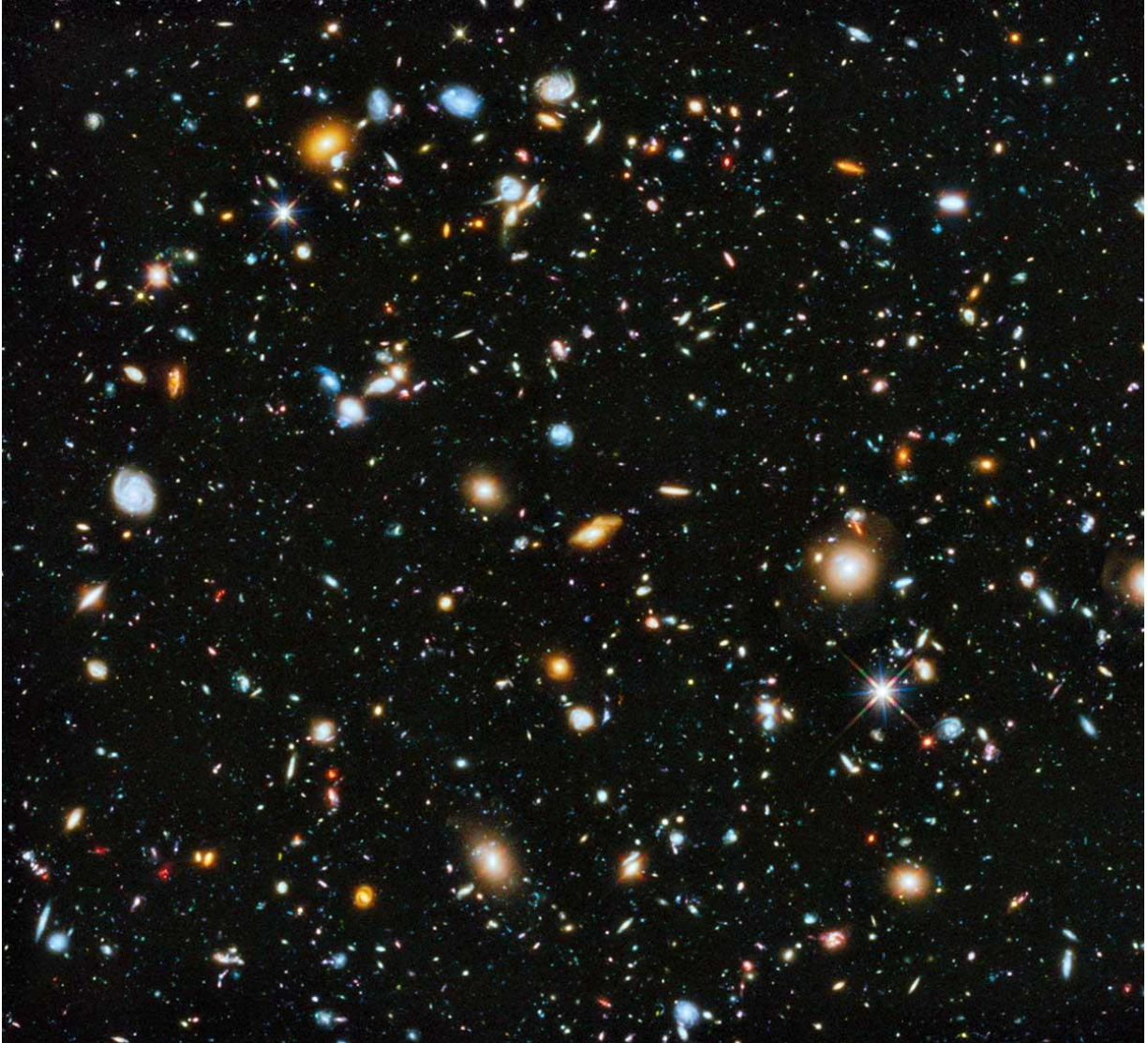
Слика 36: илустрација начина на који телескоп утврђује величину Хаблове константе

Хабл је уочио, што је поткрепљено и теоријом, да се у центрима већине галаксија налазе супермасивне црне рупе са милионима или чак милијардама пута већом масом од масе Сунца. Даља Хаблова посмтрања инсинуирају да постоји веза између масе црне рупе галаксије и масе звезда концентрисаних око њеног центра, односно црне рупе – што је већа маса звезда, то је већа маса црне рупе.



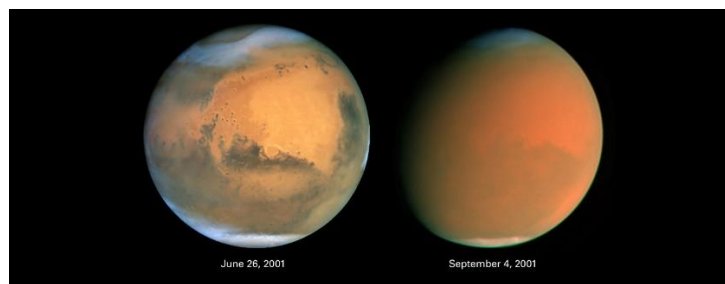
*Слика 37: галаксија NGC 5548 са супермасивном црном рупом у центру*

Хаблов телескоп је такође заслужан за пружање слике о историји и еволуцији космоса све до 400 милиона година након Великог праска, о рађању и умирању звезда, о броју галаксија из различитих еволутивних епоха, о расту разноврсности хемијских једињења кроз време, о животу галаксија, њиховим спајањима итд.



*Слика 38: Хабл открива 100 никада до тада виђених галаксија 1995. године, откривајући нове облике и хемијске саставе галаксија*

Хаблов телескоп је заслужан и за откриће егзопланета, односно планета ван Сунчевог система које круже око других звезда у свемиру. До данас је пронашао преко 4000 егзопланета, а астрономи процењују да би могло да постоји чак 8 милијарди планета налик на нашу планету Земљу. Иако су ове планете превише мале да би их Хабл уочио, и даље може да допринесе њиховој карактеризацији. Хабл је такође заслужан за велики број проналазака у нашем Сунчевом систему.



Слика 39: Хаблова фотографија пешчане олује на Марсу

## **6. ULLYSES програм**

Астрономи су вековима посматрали звезде и проучавали њихове тачне позиције и састав да би сазнали како настају. Тек са лансирањем свемирских телескопа у орбиту су добили одговор на то питање. Ултраљубичаста светлост је карактеристична за процесе који ослобађају највећу количину топлоте и енергије, у које спада и формирање звезда. Хаблов телескоп је тренутно једини телескоп који може да направи фотографије ултраљубичасте светлости у високој резолуцији и управо зато је на трогодишњој мисији проучавања новонасталих звезда под називом *Ultraviolet Legacy Library of Young Stars as Essential Standards (ULLYSES)*. Хабл ће као резултат овог програма конструисати базу података не уз помоћ слика, већ уз помоћ спектра посматраних звезда, који носе информације о температури, брзини, удаљености и хемијском саставу звезда.



Слика 40: формирање звезда у Писмис 24-1 небули

## 7. Џејмс Веб телескоп – Хаблов наследник

Ове године Хабл слави своју 33. годишњицу. Јединствени дизајн Хабловог телескопа који је дозвољавао поправке и побољшања телескопа у орбити од стране астронаута учинио га је једном од NASA-иних најдуговечнијих и највреднијих свемирских опсерваторија, деценијама шаљући слике које су заувек трансформисале астрономију. Слика испод објављена је поводом 30. годишњице Хабловог телескопа 2020. године.



*Слика 41: фотографија регије у којој се формирају звезде удаљене 163000 светлосних година од Земље названа „Космички гребен“*

Џејмс Веб телескоп се сматра наследником Хабловог телескопа. Његов главни задатак је прикупљање података о најудаљенијим објектима у свемиру до којих Хаблов и телескопи на Земљи нису успели да досегну. Овај телескоп је заједнички пројекат NASA-е, Европске свемирске агенције и Канадске свемирске агенције и пружа знатно побољшану резолуцију и сензитивност у односу на Хабл. Поред тога, Џејмс Веб телескоп се налази на већој удаљености од Земље од Хабла и примарно огледало му је пречника 6.5 метара, између 2 и 3 пута веће од Хабловог. Његови главни циљеви су истраживање најудаљенијих објеката и догађаја у свемиру – формирање првих галаксија, формирање звезда и планета и директно снимање егзопланета и нова (један од најбоље проучених типова еруптивних променљивих звезда). Џејмс Веб телескоп лансиран је 25. децембра 2021. године.





*Слика 42: Џејмс Веб телескоп*

## **8. Закључак**

Телескопи су, као прозори у свемир, кључни медијум астронома са пољем изучавања. Зато је допринос Хабловог телескопа као првог икада свемирског телескопа, који уз ту титулу успева да опстане у свемиру већ 33. годину, ствара величанствене слике свемира и прикупља податке од изузетне важности за људско поимање свемира, немерљив. Овај заиста неуништиви ветеран је револуционизовао истраживање свемира и започео једну нову научну епоху. Упркос томе што ће поред Џејмс Веб телескопа уследити и многи други наследници Хабловог телескопа, он ће заувек остати синоним за неуништивног и неустрашивог ветерана који је отворио врата ка прошлости, садашњости и будућности космоса. Надам се да сам у овом раду успела да макар мало приближим значај и величанственост овог свемирског пионира.

## **9. Литература**

- Милан С. Димитријевић, Александар С. Томић, *Астрономија за IV разред гимназије*, Београд, 2005. године
- Наташа Каделбург, Весна Рапайћ, *Физика 3 - уџбеник за трећи разред Математичке гимназије*, Београд, 2011. године
- Мирјана Вукићевић-Карабин, Олга Атанацковић, *Опита астрофизика*, Београд, 2010. године
- David J. Shayler, David M. Harland, *Hubble Space Telescope – from concept to success*, Њујорк, 2016. године
- David J. Shayler, David M. Harland, *Enhancing Hubble’s vision – service missions that extended our view of the universe*, Њујорк, 2016. године
- NASA, званични сајт о Хабловом телескопу, <https://hubblesite.org/home>
- NASA, званични сајт, [https://www.nasa.gov/mission\\_pages/hubble/main/index.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/hubble/main/index.html)
- ESA, званични сајт о Хабловом телескопу, <https://esahubble.org/>
- „Хаблов телескоп“, [https://en.wikipedia.org/wiki/Hubble\\_Space\\_Telescope](https://en.wikipedia.org/wiki/Hubble_Space_Telescope)
- NASA, званични сајт о Џејмс Веб телескопу, <https://webb.nasa.gov/>
- „Џејмс Веб телескоп“, [https://en.wikipedia.org/wiki/James\\_Webb\\_Space\\_Telescope](https://en.wikipedia.org/wiki/James_Webb_Space_Telescope)