

Od Galileja do danas

Putovanje kroz vreme i „vreme”

Milan Milošević

Department za fiziku

Prirodno-matematički fakultet u Nišu



svetlost stara i do 13 milijardi godina

Prvo duboko polje teleskopa Džejms Veb · NASA, ESA, CSA, STScI

Svetlost nije beskonačno brza

299 792 km/s

brzina svetlosti u vakuumu

- Za jednu sekundu obiđe Zemlju 7,5 puta.
- Svetlosna godina je rastojanje, a ne vreme: oko 9 500 milijardi kilometara.
- **Zato je svaki pogled u nebo - pogled u prošlost.**



Mesec: 1,3 sekunde u prošlosti

Mesec · Gregory H. Revera, CC BY-SA 3.0

Koliko je stara svetlost koju vidimo?

vreme putovanja svetlosti: $t = d / c$



Mesec

1,3 s

384 400 km



Sunce

8 min 20 s

150 miliona km



Jupiter

35–52 min

zavisi od položaja



Orionova maglina

≈ 1 350 god.

rađاونica zvezda



Andromeda

≈ 2,5 mil. god.

najbliža velika galaksija



Najdalje galaksije

≈ 13,5 mlrd. god.

snimio teleskop Veb

bliže · skoro „sada”

dalje · dublje u prošlost

Slike: G. H. Revera (CC BY-SA 3.0) · G. Elston (CC BY 4.0) · NASA/ESA/A. Simon · NASA/ESA/M. Robberto · A. Evans (CC BY 2.0) · NASA/ESA/CSA/STScI

Razglednica stara 2,5 miliona godina

Svetlost koja nam večeras stiže sa Andromede krenula je pre oko 2,5 miliona godina.

Tada su Afrikom hodali prvi pripadnici roda Homo.

Vidimo je onakvu kakva je bila - ne kakva je danas.

vidljiva golim okom - pod tamnim nebom



Galaksija Andromeda (M31) · Adam Evans, CC BY 2.0

Plan putovanja

01

Galilej, 1609.

Prvi teleskop
uperen u nebo

02

**Od sočiva do
ogledala**

Četiri veka rasta - i
aberracije, greške
slike

03

**Šta teleskop
čini moćnim**

Prečnik, žižna
daljina i formule
koje iz njih slede

04

**„Vreme” iznad
nas**

Atmosfera, planine i
svemir

05

**Do početka
vremena**

Najstarija svetlost
koju možemo da
uhvatimo

Svaki pogled kroz teleskop je putovanje kroz vreme. Krenimo od početka.

01

Galilej, 1609.

Komad cevi, dva sočiva i hrabrost da se pogleda gore



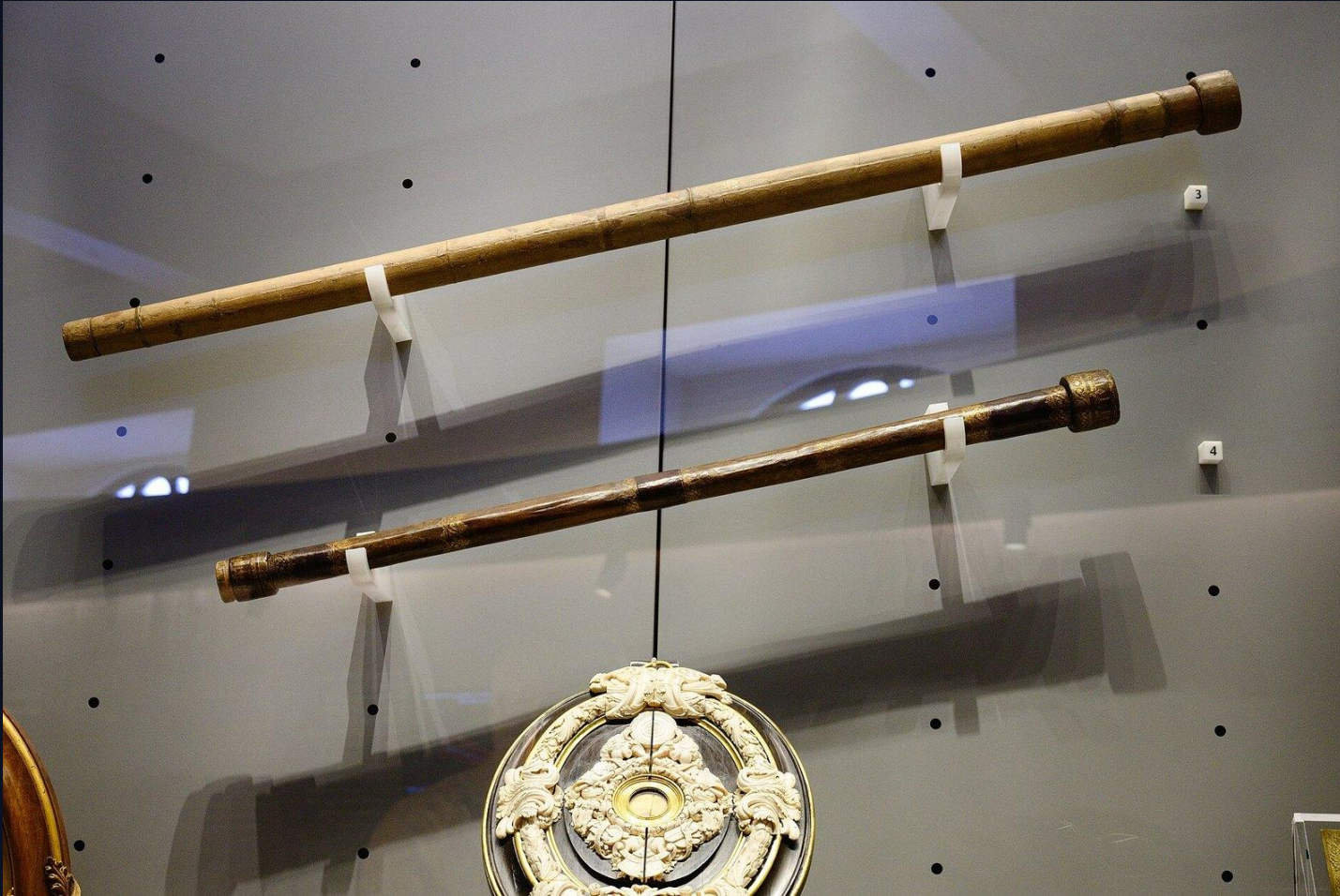
Kako je sve počelo



Galileo Galilei · portret: J. Sustermans, 1636.

- **1608.**
Holandski majstor naočara Hans Lipershej traži patent za „spravu za gledanje u daljinu”.
- **1609.**
Galilej čuje za izum, sam brusi sočiva i za nekoliko meseci pravi teleskop koji uvećava oko 20 puta.
- **Januar 1610.**
Upire teleskop u Jupiter i otkriva četiri meseca koja kruže oko njega.
- **Mart 1610.**
Objavljuje knjigu „Zvezdani glasnik” (Sidereus Nuncius) - naučni bestseler svog vremena.

Galilejev teleskop



Galilejevi teleskopi, Museo Galileo, Firenca · foto: Zde, CC BY-SA 4.0

$\approx 20\times$ uvećanje

$\approx 3\text{ cm}$ prečnik sočiva
(objektiva)

$\frac{1}{2}$ vidno polje: pola
prečnika punog
Meseca

Ispupčeno sočivo napred, udubljeno kod oka:
slika je uspravna, ali vidno polje je vrlo malo.

Šta je Galilej video



Galilejevi crteži Meseca, 1609–1610.

Mesec ima planine

Senke otkrivaju krater i planine - Mesec nije savršena kugla.

Jupiter ima pratioce

Četiri meseca kruže oko Jupitera, a ne oko Zemlje.

Mlečni put su zvezde

Mutna traka se raspada na bezbroj slabih zvezda.

Venera ima mene

Menja oblik kao Mesec - znak da kruži oko Sunca.

Sunce ima pege

Pege putuju preko diska: Sunce se okreće.

Saturn ima „uši“

Prstenove nije mogao da razazna - video je dva „ispupčenja“.

Jupiterovi meseci: nebo u pokretu



Galilej je noć za noći crtao položaje „zvezdica” pored Jupitera.

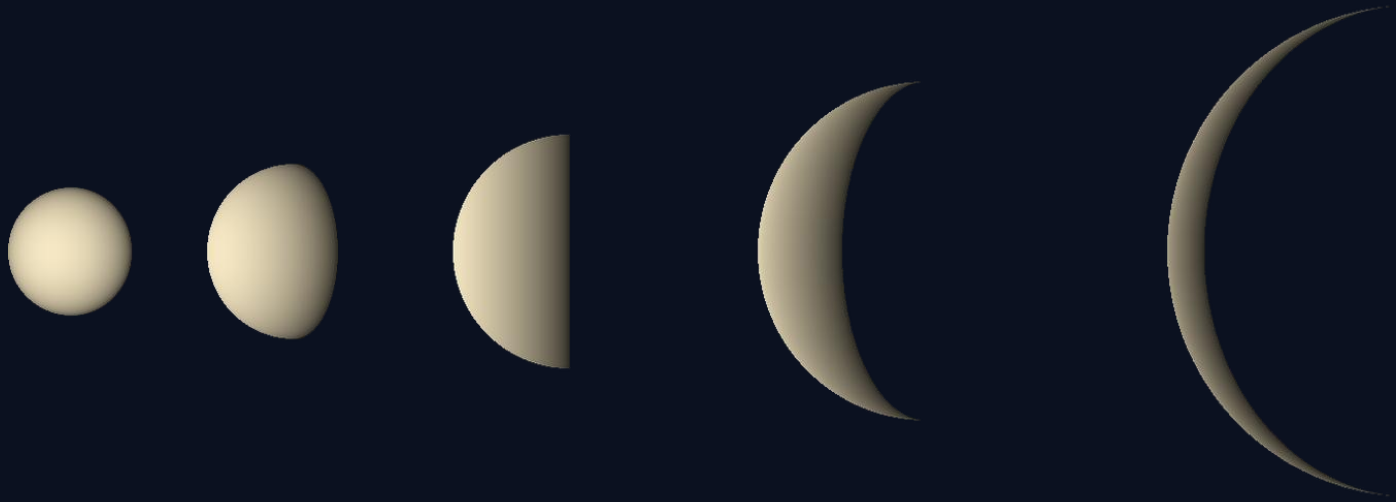
Menjale su mesta, nestajale iza planete i ponovo se pojavljivale.

Zaključak: one kruže oko Jupitera. Ne kruži sve oko Zemlje!

Jupiter: svetlost putuje 35–52 minuta

Ilustracija u duhu Galilejevih beležaka iz januara 1610.

Venerine mene: presuda starom modelu



Venera kroz teleskop tokom nekoliko meseci (ilustracija): što je srp tanji, Venera je bliža i veća.

1 · Šta je video

Venera menja oblik kao Mesec - od skoro pune do tankog srpa - i pri tome menja veličinu.

2 · Stari model

Da Venera kruži oko Zemlje, uvek bi bila između nas i Sunca i nikad ne bi bila skoro puna.

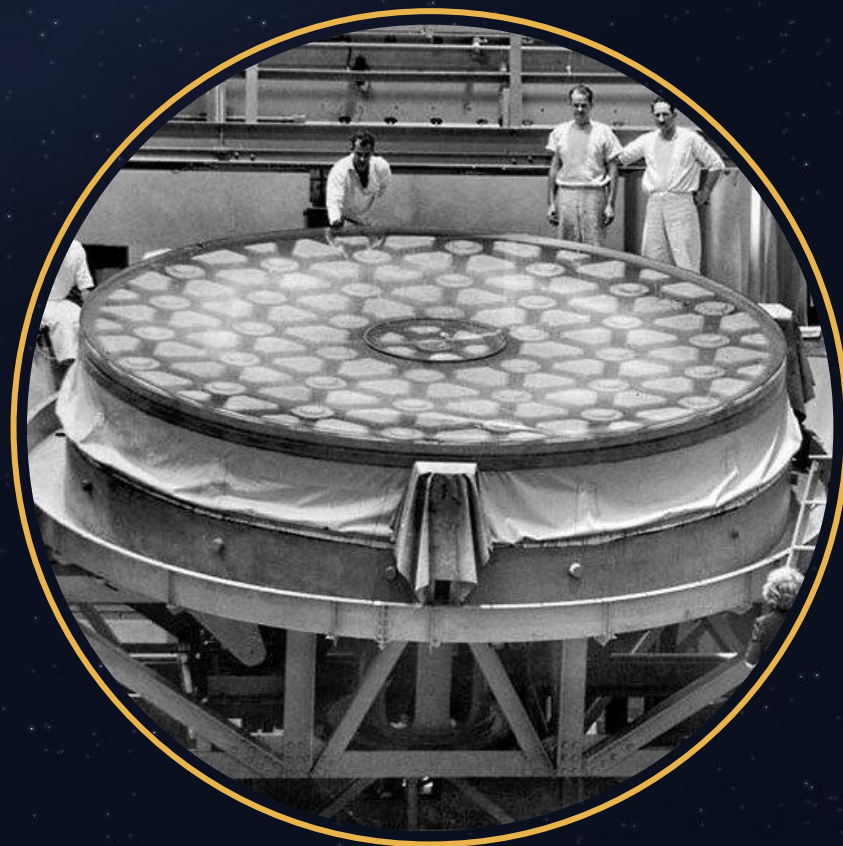
3 · Zaključak

Venera kruži oko Sunca. Teleskop daje prvi direktan dokaz protiv slike sveta sa Zemljom u centru.

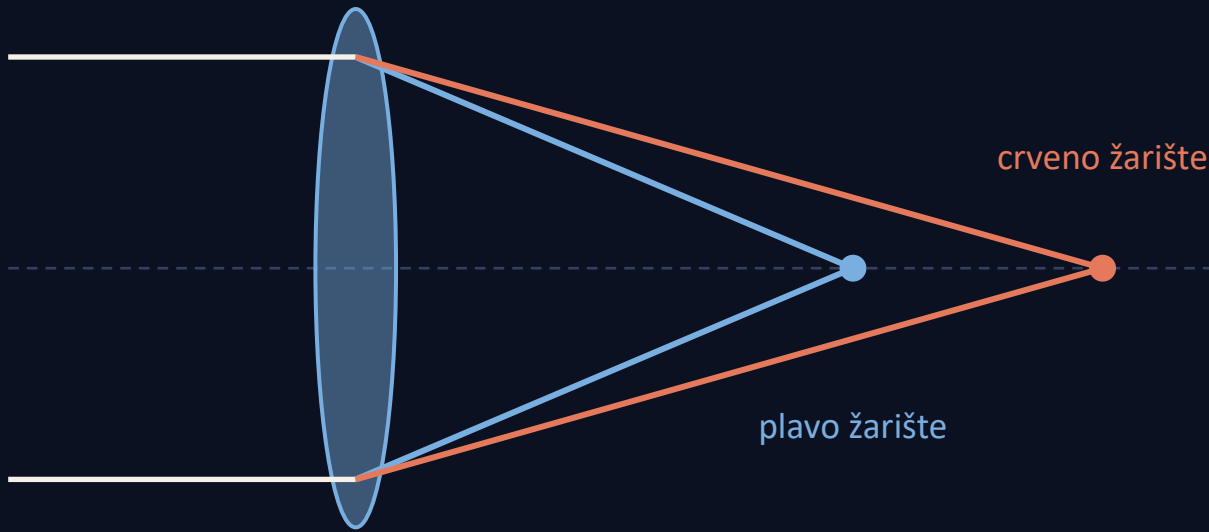
02

Od sočiva do ogledala

Kako su teleskopi rasli - i zašto su sočiva morala da ustupe mesto ogledalima



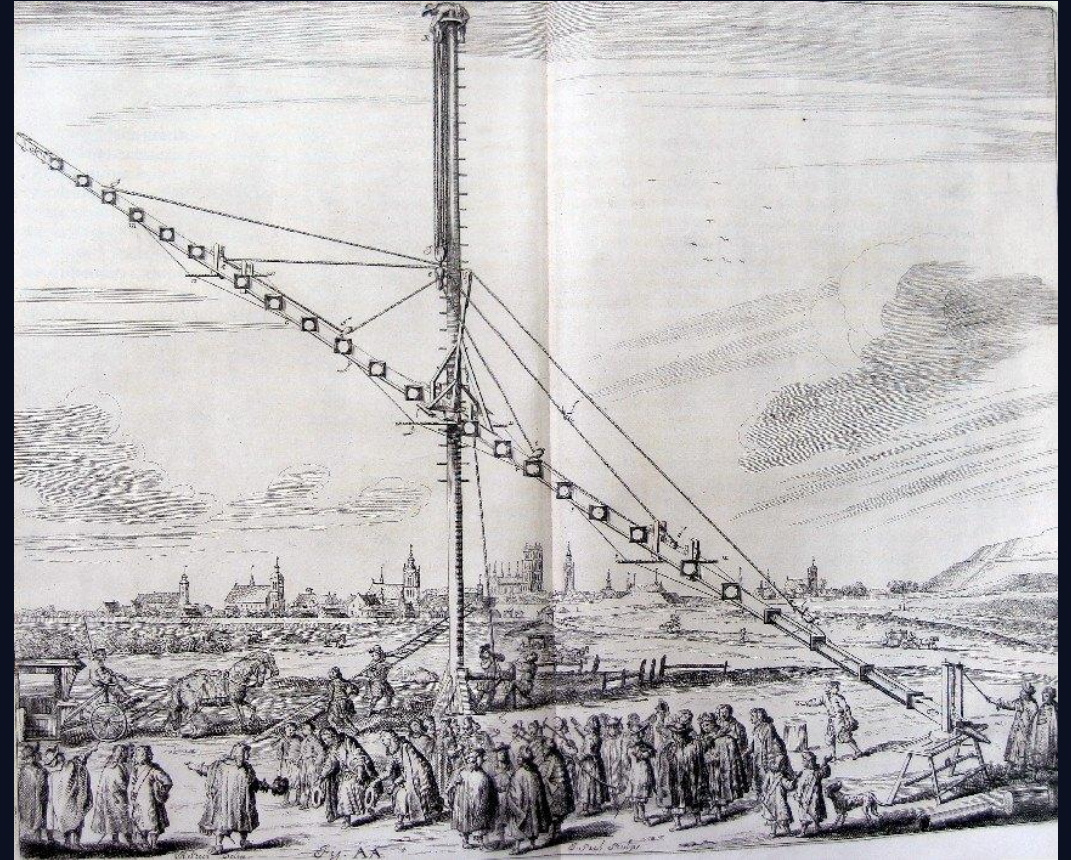
Problem sa sočivima: obojene ivice



Disperzija: staklo prelama plavo jače od crvenog, pa svaka boja ima svoju žižu.

17. vek: ogromne žižne daljine - Hevelijev teleskop bio je dug oko 45 metara.

18. vek: ahromat - spoj krunskog i flint stakla dovodi dve boje u istu žižu.



Johanes Hevelije, „Machina coelestis”, 1673. · javno dobro

Njutn, 1668: ogledalo umesto sočiva



Replika Njutnovog teleskopa · Science Museum, CC BY 4.0



- Ogledalo odbija sve boje jednako - nema obojenih ivica.
- Oslanja se celom poledinom, pa može da bude mnogo veće od sočiva.
- Njutново ogledalo imalo je samo oko 3 cm i bilo je od uglačanog metala.

Aberacije: zašto zvezda nije savršena tačka

Stvarna optika ne skuplja sve zrake u jednu tačku. Šest klasičnih grešaka slike (simulacije):

Hromatska aberacija



Svaka boja ima svoju žižu: obojeni oreol oko zvezde.

Lek: ahromat ili ogledalo

Sferna aberacija



Ivični zraci seku osu bliže od centralnih: zvezda u oreolu.

Lek: parabolično ogledalo

Koma



Zvezde van ose izgledaju kao male komete.

Lek: korektor kome; Riči–Kretjen dizajn

Astigmatizam



Dve žižne linije umesto tačke: zvezda je krst ili crtica.

Lek: precizna izrada i poravnanje

Zakrivljenost polja



Oštra slika leži na zakrivljenoj površi: centar oštar, ivice mutne.

Lek: izravnjivač polja

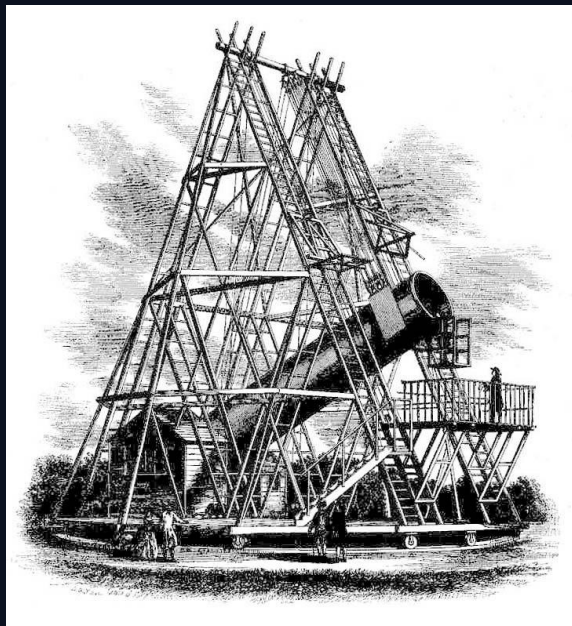
Distorzija



Slika je oštra, ali iskrivljena: prave linije se savijaju.

Lek: korektor ili kalibracija

Veliki reflektori: Heršel i lord Ros



1789. • Heršel

„Teleskop od 40 stopa” sa ogledalom od 1,2 m - najveći na svetu pola veka. Heršel je 1781. otkrio Uran (teleskop od 16 cm).



1845. • lord Ros

„Levijatan” sa ogledalom od 1,8 m, u oblačnoj Irskoj. Najveći teleskop na svetu sve do 1917.



1845. • spirala M51

Ros prvi vidi spiralnu strukturu „magline” M51. Tek 80 godina kasnije znamo: to je druga galaksija.

Granica sočiva: Jerks, 1897.



Refraktor opservatorije Jerks · Kb9vrg, javno dobro

102 cm

najveći teleskop sa sočivom ikada korišćen u astronomiji



Sočivo se drži samo za ivicu - savija se pod sopstvenom težinom.



Svetlost prolazi kroz debelo staklo, koje deo nje upija.



Staklo mora biti besprekorno u celoj zapremini, a ne samo na površini.

Od tada, svi veliki teleskopi koriste ogledala.

Od oka do čipa: kako „hvatamo“ svetlost



Ljudsko oko

0,1 s

trajanje „ekspozicije“

Oko ne sabira svetlost: slika se „osvežava“ desetak puta u sekundi.



Fotografska ploča

sati

trajanje „ekspozicije“

Od kraja 19. veka duge ekspozicije otkrivaju blede objekte, ali ploča iskoristi tek nekoliko procenata svetlosti.



CCD i CMOS čip

dani

trajanje „ekspozicije“

Od 1970-ih: čip beleži i do 90% fotona, a snimci se sabiraju danima. Isti princip je u kameri telefona.

Isti teleskop + bolji detektor = dublji pogled u prošlost.

Džinovi 20. veka



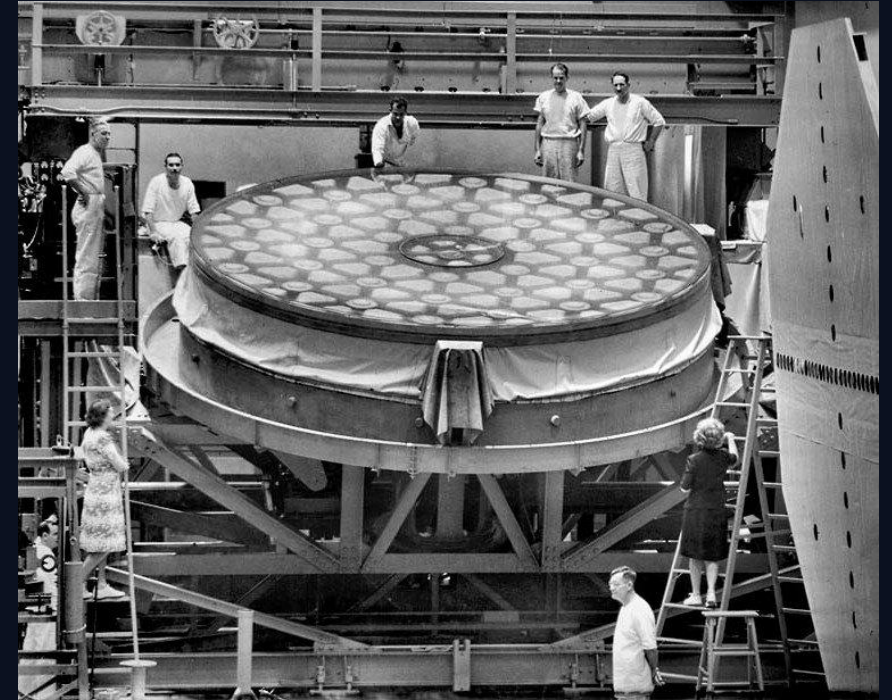
Teleskop Huker · Ken Spencer, CC BY-SA 3.0

1917. · Huker, 2,5 m

Maunt Vilson, Kalifornija. Edvin Hابل njime otkriva da je Andromeda druga galaksija (1923–24) i da se svemir širi (1929).

1948. · Hejl, 5 m

Palomar. Najveći teleskop na svetu skoro 30 godina. Brušenje i poliranje ogledala trajalo je više od deset godina.



Brušenje ogledala teleskopa Hejl, 1945. · javno dobro

Za nekoliko godina svemir je „porastao” sa jedne galaksije na bezbroj njih.

Ogledala iz delova

1993. Kek, 10 m

36 šestouganih segmenata ponaša se kao jedno ogledalo.

1998. VLT, 4 × 8,2 m

Tanka ogledala koja računar stalno „doteruje” (aktivna optika).

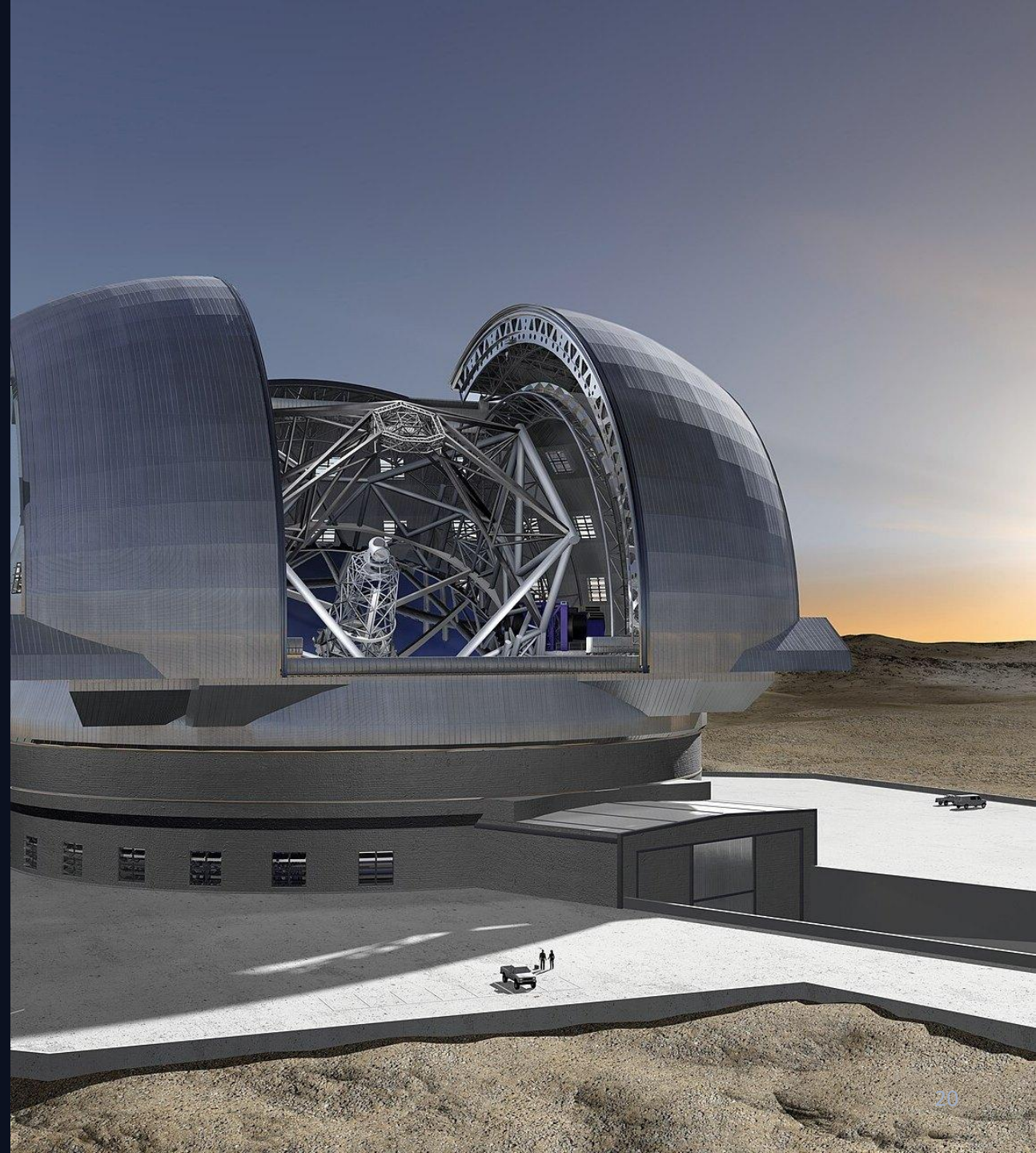
2025. Vera Rubin, 8,4 m

Snima celo južno nebo svakih nekoliko noći - film o promenljivom svemiru.

Uskoro ELT, 39 m

798 segmenata - najveće „oko” ikada okrenuto ka nebu.

Desno: ELT, umetnička vizija · ESO/H. Zodet, CC BY 4.0

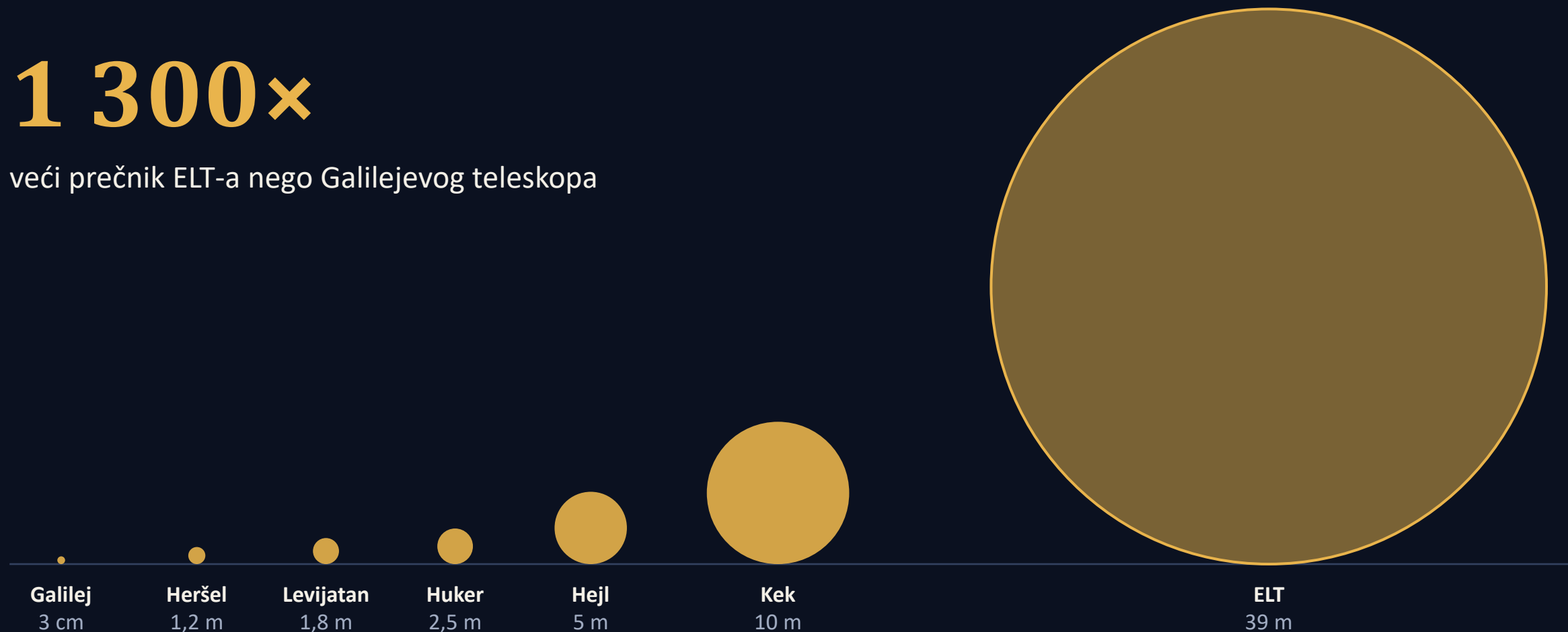


Koliko su porasli?

Prečnici glavnih ogledala i sočiva

1 300×

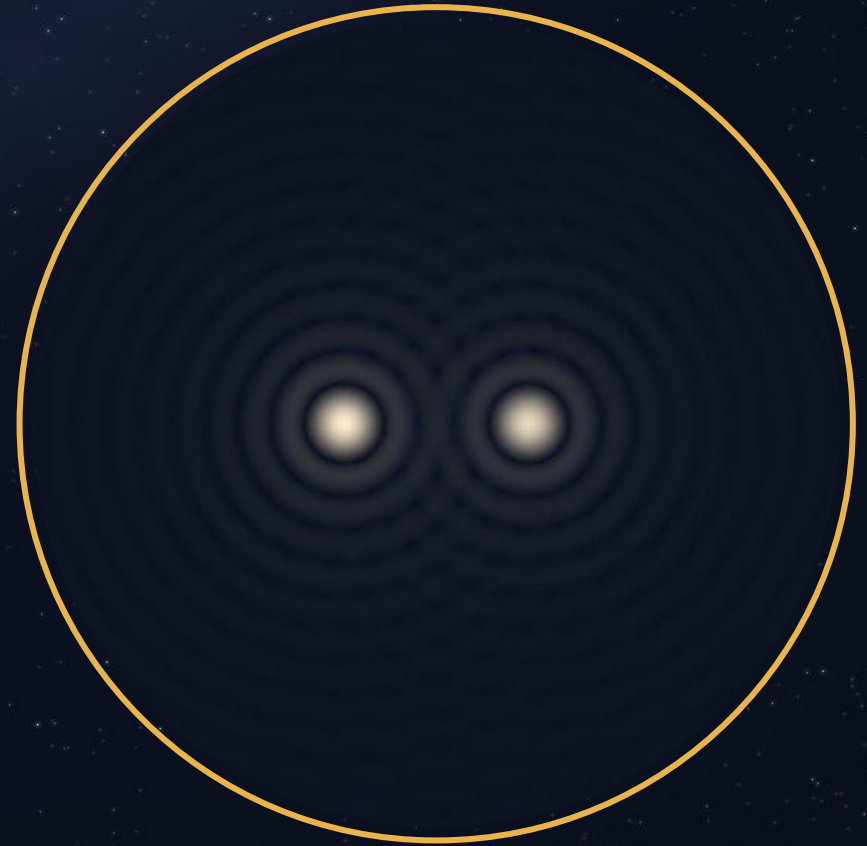
veći prečnik ELT-a nego Galilejevog teleskopa



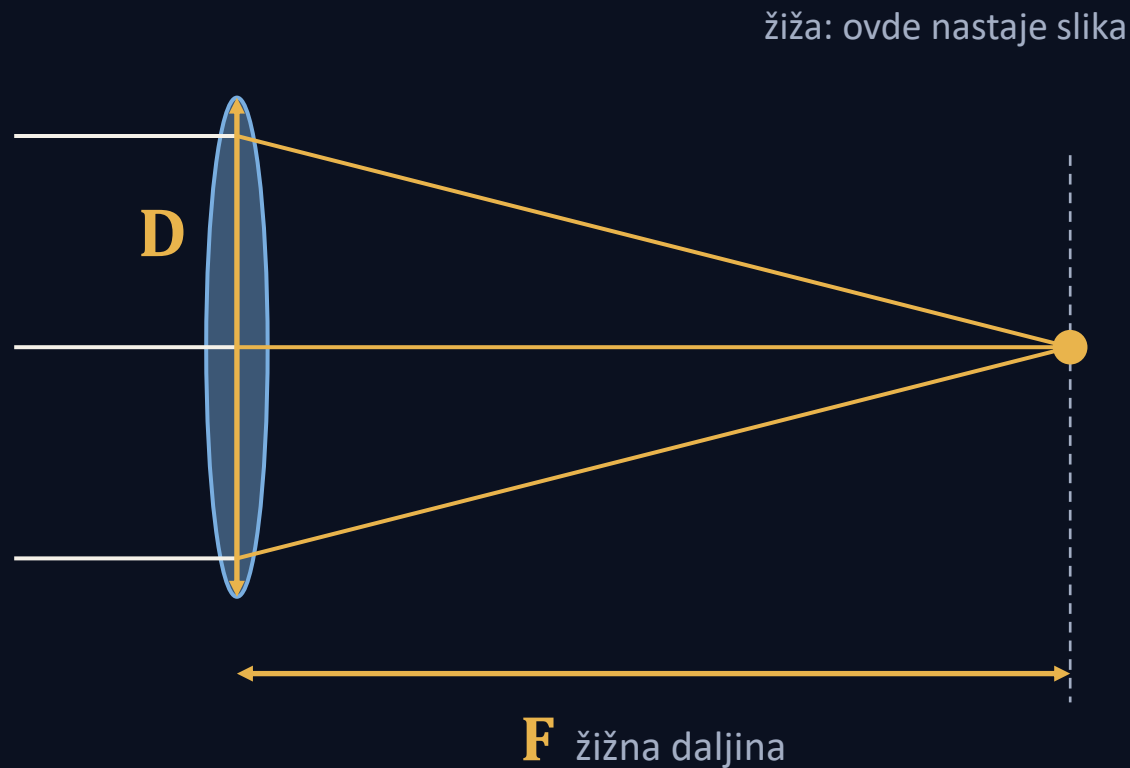
03

Šta teleskop čini moćnim

Prečnik, prečnik, prečnik - a uvećanje tek na kraju



Dva broja koja određuju teleskop



Primer: $D = 200 \text{ mm}$, $F = 1000 \text{ mm} \rightarrow N = F / D = 5$, „f/5”

D · prečnik otvora

$$L \propto D^2 \quad \theta \propto \lambda / D$$

Koliko svetlosti sakuplja i koliko sitne detalje razlikuje.

F · žižna daljina

$$s = 206\,265'' / F \quad M = F / f_{\text{ok}}$$

Razmera slike u žižnoj ravni; f_{ok} je žižna daljina okulara.

N = F / D · svetlosni odnos

$$\text{osvetljenost slike} \propto 1 / N^2$$

Manji N = „brži” teleskop: kraće ekspozicije za maglice i galaksije.

Teleskop je „kofa“ za svetlost

D²

Sakupljena svetlost raste sa površinom otvora: $L \propto D^2$.

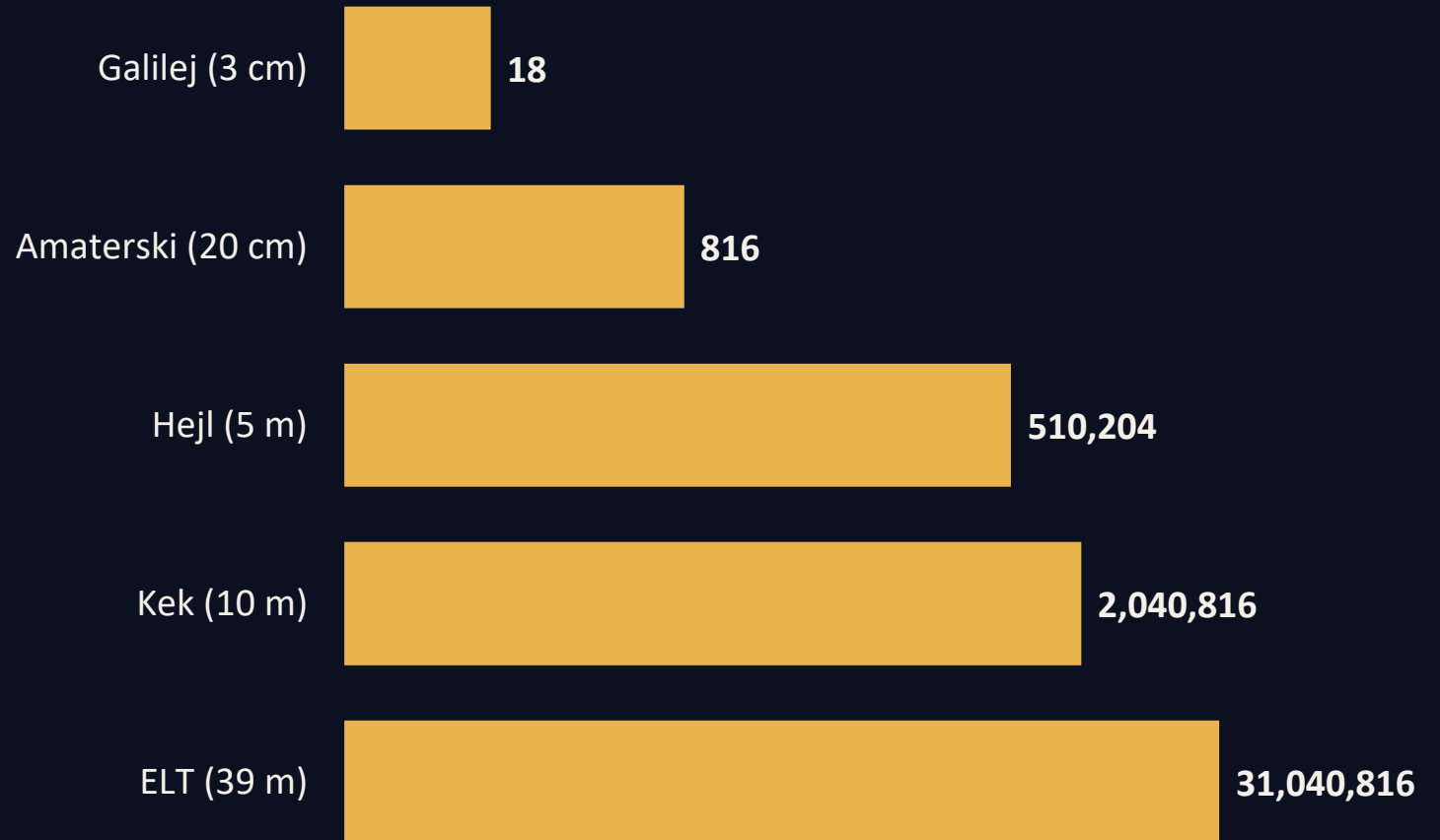
u odnosu na oko (zenica ≈ 7 mm)

$$L / L_{\text{oko}} = (D / 7 \text{ mm})^2$$

20 cm: $(200 / 7)^2 \approx 816$

Više svetlosti = slabiji i dalji objekti = dublji pogled u prošlost.

Koliko puta više svetlosti od ljudskog oka (oko = 1; logaritamska skala)



Koliko slabe zvezde vidimo?

Pogsonova skala: 5 veličina = 100 puta slabije

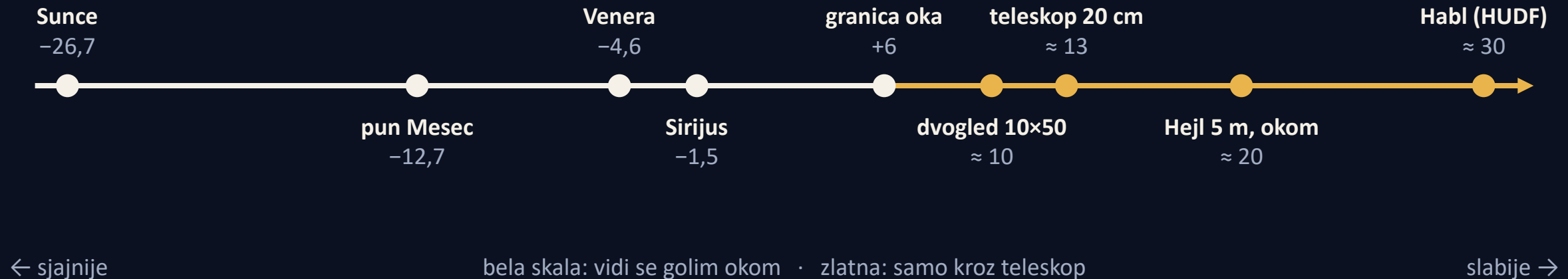
$$m_1 - m_2 = -2,5 \cdot \log_{10}(I_1 / I_2)$$

veći broj = slabiji objekat; I – osvetljenost

granična zvezdana veličina teleskopa (vizuelno, tj. okom)

$$m_{\text{lim}} \approx 6 + 5 \cdot \log_{10}(D / 7 \text{ mm})$$

udvostručen prečnik: +1,5 veličina



Moć razlaganja: Rejljev kriterijum

Zbog difrakcije zvezda je Erijev disk sa prstenovima.
Dve zvezde razlikujemo dok maksimum jedne ne padne u prvi minimum druge.

Rejljev kriterijum (θ u radijanima)

$$\theta = 1,22 \cdot \lambda / D$$

λ – talasna dužina, D – prečnik

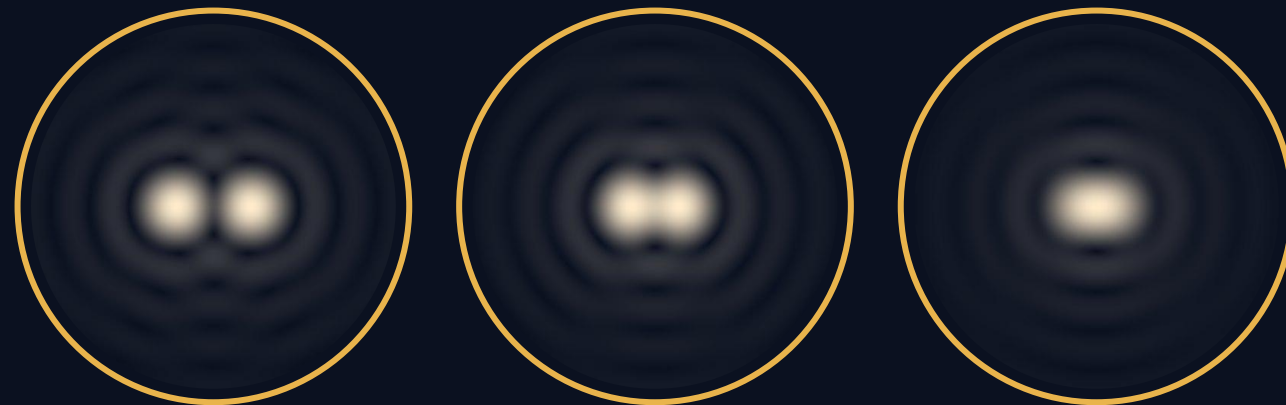
vidljiva svetlost ($\lambda = 550 \text{ nm}$)

$$\theta \approx 138'' / D_{\text{mm}}$$

interferometar: $D \rightarrow$ razmak antena B

$$\theta \approx \lambda / B$$

Dve jednake zvezde na tri rastojanja (simulacija)



1,6 θ

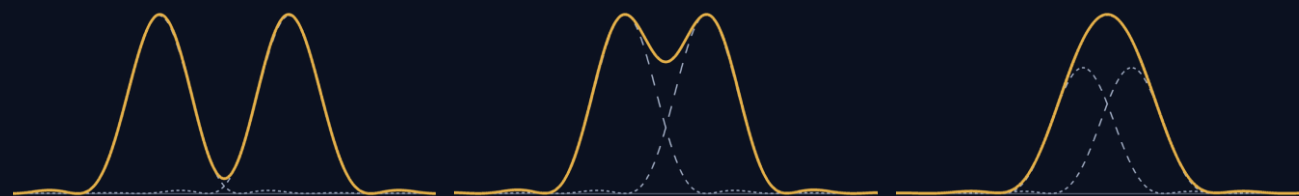
jasno razdvojene

θ

granica: pad $\approx 26 \%$

0,6 θ

stapaju se u jednu



Presek: pojedinačne zvezde (isprekidano) i ono što vidimo (puna linija)

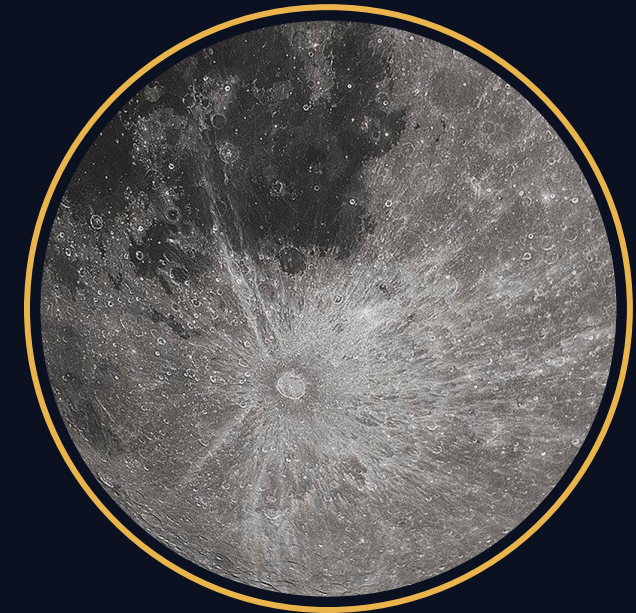
Koliko sitno vidimo? Primer: Mesec

Instrument	Prečnik	Ugao θ	Detalj na Mesecu
Ljudsko oko	7 mm	$\approx 60''$ *	≈ 100 km
Amaterski teleskop	20 cm	0,69''	$\approx 1,3$ km
Habl	2,4 m	0,058''	≈ 100 m
ELT (u teoriji)	39 m	0,0036''	≈ 7 m

detalj $\approx \theta \cdot \text{rastojanje}$ (θ u radijanima; 1 rad = 206 265'')

- Oko razdvaja farove automobila (1,5 m) do oko 5 km daljine.
- Habl bi razdvojio dva svica udaljena 6 cm - sa 200 km (Beograd–Niš).

* oko ne ograničava difrakcija, nego gustina čulnih ćelija mrežnjače



Može li Habl da vidi Apolo na Mesecu?

Ne. Lunarni modul je širok oko 9 m - desetak puta manje od najsitnijeg detalja koji Habl razlikuje.

Uvećanje: najprecenjeniji broj na kutiji

$$M = F / f_{ok}$$

uvećanje: žižna daljina objektiva
÷ okulara

$$M_{max} \approx 2 \cdot D_{mm}$$

korisna granica; preko nje je
„prazno uvećanje”

$$M_{min} \approx D / 7 \text{ mm}$$

ispod toga deo svetlosti promaši
zenicu oka

$$d_{izl} = D / M$$

izlazna zenica: širina snopa iz
okulara

$$\varphi \approx \varphi_{ok} / M$$

pravo vidno polje: prividno polje
okulara ÷ M

Primer: D = 200 mm, F = 1000 mm, okular 10 mm → 100×,
 $d_{izl} = 2 \text{ mm}$, $\phi \approx 0,5^\circ$

Jupiter kroz teleskop od 70 mm (ilustracija)



60×

oštro, ali sitno



140×

najbolje što može



600×

veće - ali mutno i tamno

Pasoš teleskopa: najvažnije formule

Veličina	Formula	Primer: D = 200 mm, F = 1000 mm
Svetlosni odnos	$N = F / D$	f/5
Sakupljena svetlost	$L / L_{\text{oko}} = (D / 7 \text{ mm})^2$	≈ 816 × oko
Granična zvezdana veličina	$m_{\text{lim}} \approx 6 + 5 \cdot \log_{10}(D / 7 \text{ mm})$	≈ 13,3
Moć razlaganja	$\theta = 1,22 \cdot \lambda / D \approx 138'' / D_{\text{mm}}$	≈ 0,69''
Razmera slike	$s = 206\,265'' / F$	≈ 206'' po mm
Uvećanje	$M = F / f_{\text{ok}}$	okular 10 mm → 100×
Korisno uvećanje	$D / 7 \text{ mm} \dots 2 \cdot D_{\text{mm}}$	≈ 29× ... 400×
Izlazna zenica	$d_{\text{izl}} = D / M$	pri 100×: 2 mm

Udvostručite D: 4× više svetlosti · +1,5 zvezdane veličine · 2× sitniji detalji

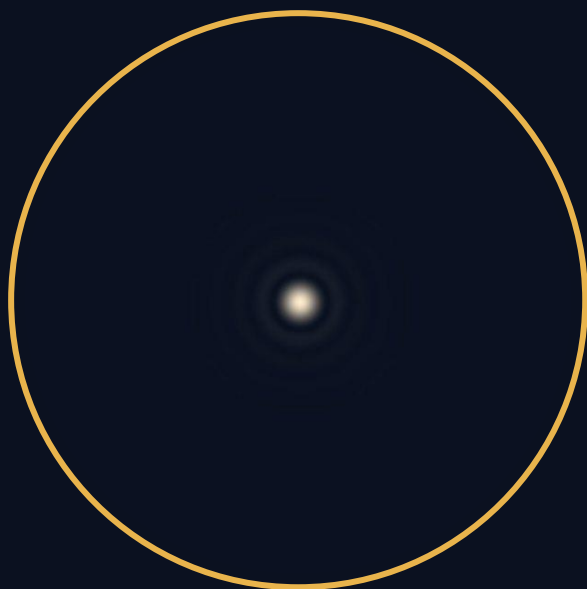
04

„Vreme” iznad nas

Zašto zvezde trepere i zašto teleskope nosimo na planine i u svemir

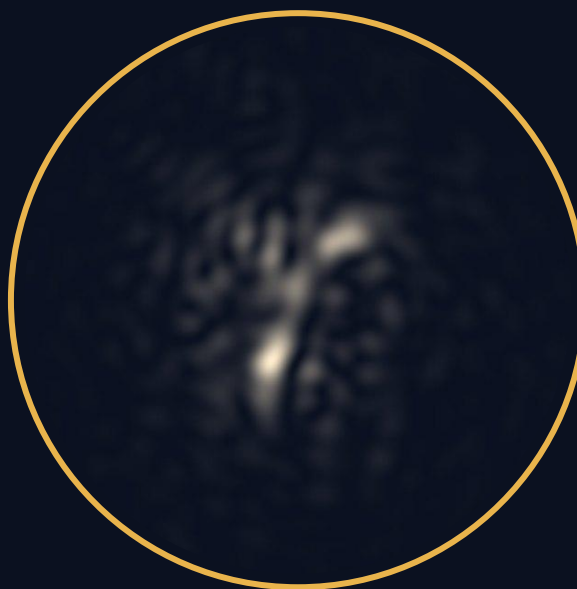


Zašto zvezde trepere?



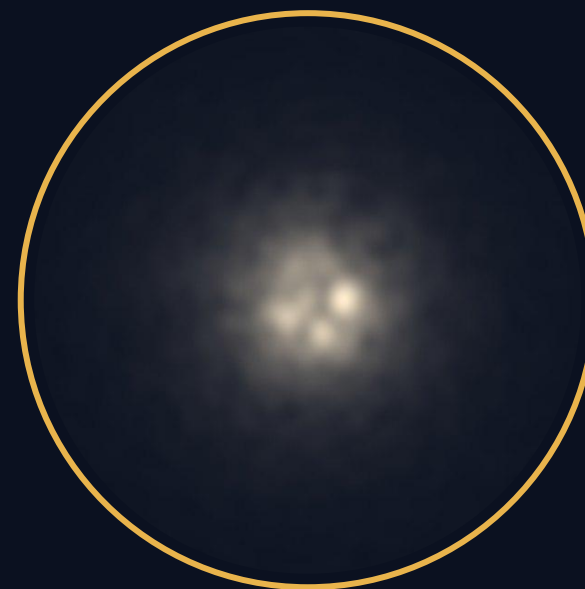
bez atmosfere

oštar disk sa prstenovima



trenutak kroz atmosferu

treperava „mrlja” od tačkica



duža ekspozicija

razmazan disk

$$\theta_{\text{seeing}} \approx \lambda / r_0$$

Topli i hladniji slojevi vazduha „dele” otvor na ćelije prečnika $r_0 \approx 10\text{--}20$ cm (Fridov parametar). Zato je $\theta \approx 0,5\text{--}1''$, ma koliki bio D - teleskop od 10 m bez pomoći nije oštrije od amaterskog od 15–30 cm.

Simulacija: ista zvezda, isti teleskop

Tri rešenja za loše „vreme”



Popnite se visoko

Atakama (Čile), Mauna Kea (Havaji), La Palma: visoko, suvo, iznad oblaka i daleko od gradskih svetala.



Ispravite treperenje

Adaptivna optika: laser pravi „veštačku zvezdu”, a savitljivo ogledalo ispravlja sliku i do hiljadu puta u sekundi.



Pobegnite iz atmosfere

U svemiru nema treperenja, a vide se i zračenja koja vazduh ne propušta: UV, X-zraci, veći deo infracrvenog.

Habl: više od tri decenije iznad oblaka

Iznad atmosfere, ogledalo od 2,4 m daje oštrinu kakvu sa Zemlje tada nije imao niko.

Prve slike bile su mutne zbog sferne aberacije: ivica ogledala bila je ravnija za oko 2 mikrona - 50 puta manje od debljine vlasi.

1993. astronauti su mu „ugradili naočare”. Od tada je Habl promenio skoro svaku oblast astronomije.



Svemirski teleskop Habl, 2009. · NASA, javno dobro

2,4 m

ogledalo

1990.

lansiran

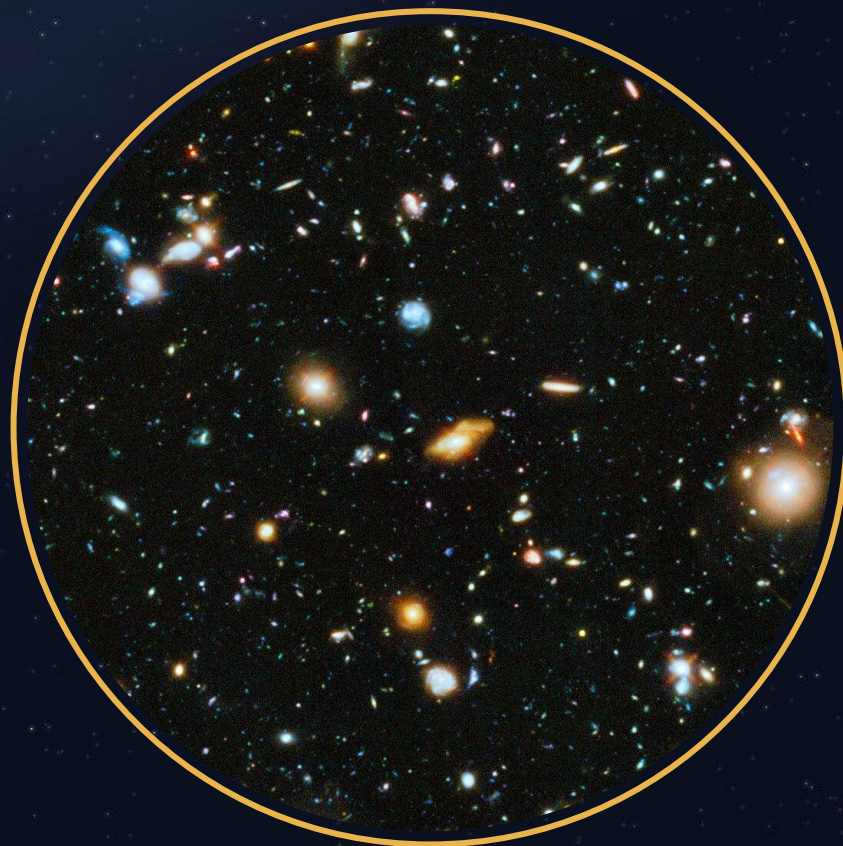
≈ 0,05"

moć razlaganja (vidljivo)

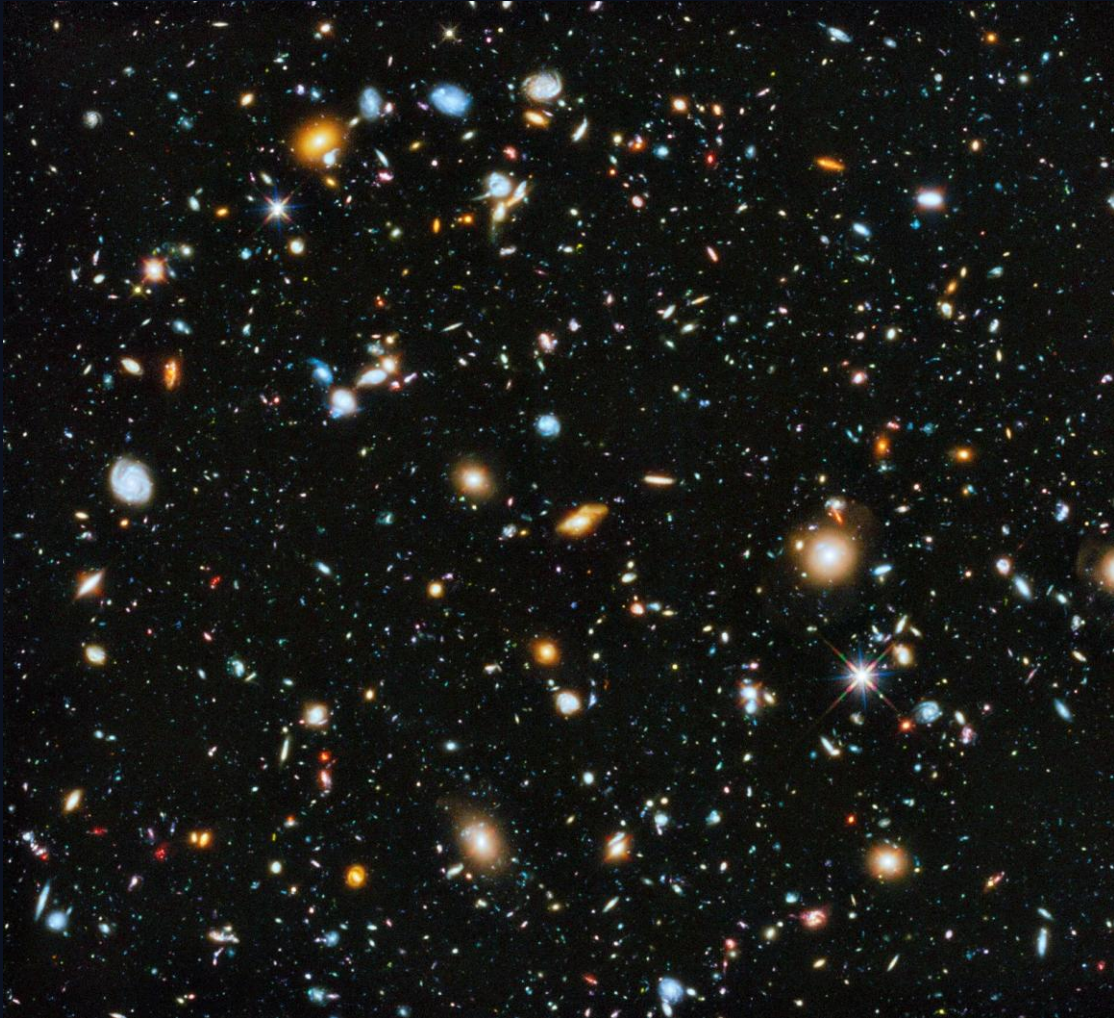
05

Do početka vremena

Najstarija svetlost koju ljudi mogu da uhvate



Hablovo ultraduboko polje



Hubble Ultra Deep Field 2014 · NASA, ESA, H. Teplitz, M. Rafelski i dr.

≈ 10 000

galaksija na parčetu neba ($3' \times 3'$) čiji je prečnik desetina prečnika punog Meseca

- Skoro svaka tačkica je galaksija sa milijardama zvezda.
- Ukupna ekspozicija: više od 11 dana.
- Najslabije galaksije su nekoliko milijardi puta slabije od najslabije zvezde koju vidi golo oko.
- Mnoge vidimo kakve su bile pre više od 12 milijardi godina.

Džejms Veb: zlatno oko za najstariju svetlost



Ogledalo teleskopa Veb, NASA Godard · NASA, javno dobro

6,5 m

18 segmenata od berilijuma,
presvučenih zlatom

1,5 mil. km

od Zemlje, iza štita od Sunca veličine
teniskog terena

-230 °C

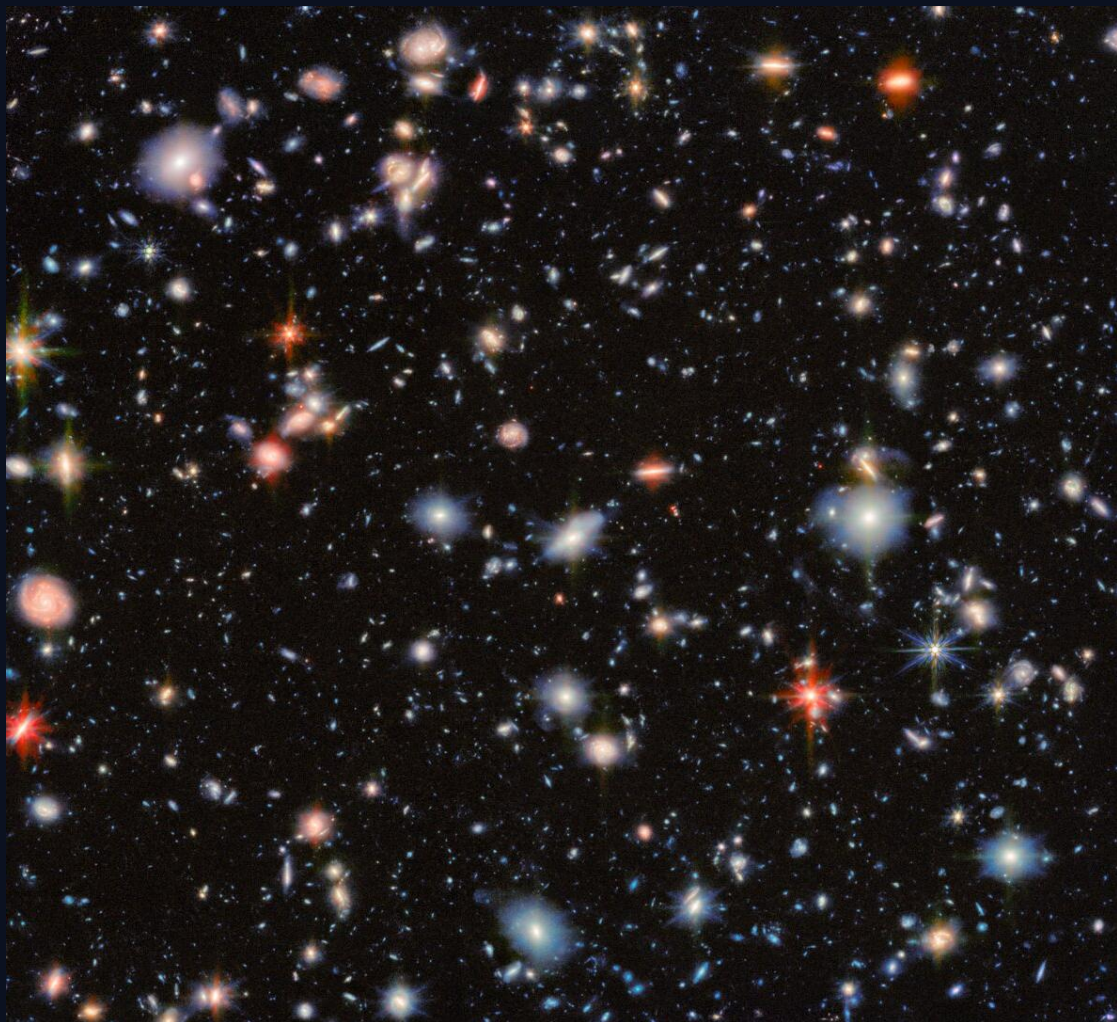
radna temperatura: toplota bi
„zaslepila” infracrvene kamere

2021.

lansiran decembra 2021; prve slike
objavljene u julu 2022.

***Registrovao bi toplotu bumbara na udaljenosti
Meseca.***

JWST ultraduboko polje



> 2 500

izvora svetlosti u delu Hablovog polja veličine $2,1 \times 1,8$ lučnih minuta

- Isti deo neba kao na Hablovom snimku, ali u infracrvenoj svetlosti.
- MIRI je polje posmatrao skoro 100 sati: najduže Webbovo posmatranje jednog vangalaktičkog polja.
- Stotine izrazito crvenih galaksija, obavijenih prašinom ili punih starih zvezda.
- Najudaljenije vidimo oko 380 miliona godina posle Velikog praska.

Zašto infracrveno? Svemir rasteže svetlost



Svetlost putuje milijardama godina, a za to vreme se svemir širi - i rasteže njene talase.

Ultraljubičasta i plava svetlost prvih galaksija stiže kao infracrvena - nevidljiva oku i uglavnom van domašaja Habla. Zato Veb gleda u infracrvenom.

Koliko daleko u prošlost vidimo?

13,5 milijardi godina

toliko je putovala svetlost najudaljenijih galaksija koje je pronašao Veb ($z \approx 14$) - 98% puta unazad do Velikog praska



Prve galaksije koje vidi Veb

≈ 300 miliona godina posle Velikog praska

Nastaju Sunce i Zemlja

pre 4,6 milijardi godina

Veliki prasak

za 380 000 godina svemir postaje transparentan - to je najstarija svetlost uopšte

Danas

13,8 milijardi godina

Dalje od toga svetlošću ne možemo: pre toga je svemir bio neproziran - kao gusta magla.

Od Galileja do danas



1610.

- ≈ 3 cm prečnik, $\approx 20\times$ uvećanje
- Mesečeve planine, Jupiterovi meseci, Venerine mene
- Najdalje: zvezde Mlečnog puta - svetlost stara stotinama i hiljadama godina



416 god.



Danas

- Ogledala do 39 m: oko 1 300 puta veći prečnik
- Oko 1,7 miliona puta više svetlosti
- Najstarija svetlost: 13,5 milijardi godina

A princip je ostao isti: uhvatiti što više svetlosti - i što starije.

Kako da i vi putujete kroz vreme



Počnite dvogledom

Oznaka 10×50: 10 je uvećanje, 50 je prečnik u mm. Već on otkriva Jupiterove satelite - kao Galilej!



Birajte prečnik, ne uvećanje

Dobar prvi teleskop: sočivo od 70–90 mm ili ogledalo od 15–20 cm. Zaobiđite kutije sa „600×“.



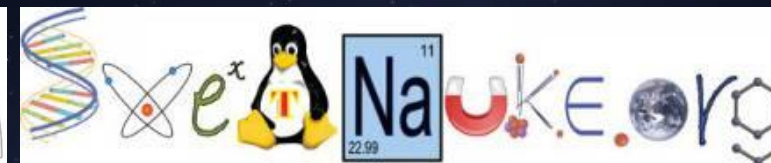
Dajte očima vremena

Oku treba 20–30 minuta da se privikne na mrak. Bežite od gradskih svetala.



Ne putujte sami

Astronomska društva i javne opservatorije organizuju posmatranja. Ove jeseni potražite Andromedu!



Hvala!

Sledeći put kad pogledate u nebo - setite se da gledate u prošlost.

Pitanja?

- **dr Milan Milošević**
Departman za fiziku
Prirodno-matematički fakultet u Nišu
- mmilan@svetnauke.org
- www.mmilan.com
www.facebook.com/mmilan
www.instagram.com/mmilan81/
- **Svet nauke**
www.svetnauke.org
www.facebook.com/svetnauke.org

- **Departman za fiziku PMF-a**
<http://fizika.pmf.ni.ac.rs>
www.facebook.com/fizika.nis
- **Astronomsko društvo Alfa**
<http://www.alfa.org.rs>
www.facebook.com/alfa.nis



2,5 miliona godina u prošlost

Andromeda · Adam Evans, CC BY 2.0

Izvori slika

Duboko polje teleskopa Veb (2022): NASA, ESA, CSA, STScI - javno dobro

Mesec: Gregory H. Revera - CC BY-SA 3.0

Sunce: Geoff Elston - CC BY 4.0

Jupiter: NASA, ESA, A. Simon (GSFC) - javno dobro

Orionova maglina: NASA, ESA, M. Robberto (STScI/ESA) - javno dobro

Andromeda: Adam Evans - CC BY 2.0

Portret Galileja: Justus Sustermans, 1636. - javno dobro

Galilejevi crteži Meseca, 1609–1610. - javno dobro

Galilejevi teleskopi, Museo Galileo: Zde - CC BY-SA 4.0

Hevelijev teleskop, „Machina coelestis”, 1673. - javno dobro

Replika Njutnovog teleskopa: Science Museum - CC BY 4.0

Heršelov teleskop od 40 stopa (gravira) - javno dobro

Levijatan lorda Rosa: Royal Museums Greenwich - javno dobro

Crtež galaksije M51, lord Ros, 1845. - javno dobro

Refraktor Jerks: Kb9vrg - javno dobro

Teleskop Huker: Ken Spencer - CC BY-SA 3.0

Ogledalo teleskopa Hejl, 1945.: Paul Calvert / LA Times - javno dobro

ELT (umetnička vizija): ESO/H. Zodet - CC BY 4.0

Laser za adaptivnu optiku, VLT: ESO/Y. Beletsky - CC BY 4.0

Svemirski teleskop Hابل: NASA - javno dobro

Hablovo ultraduboko polje 2014: NASA, ESA, H. Teplitz, M. Rafelski i dr. - javno dobro

Ogledalo teleskopa Veb: NASA Goddard - javno dobro

Simulacije (dvojne zvezde, Rejljev kriterijum, aberacije, treperenje, Jupiter, Venera, spektar): izrađene za ovo predavanje