

*„Budi astronom na jedan dan“
23. decembar 2023, PMF Niš*



Praktična astronomija

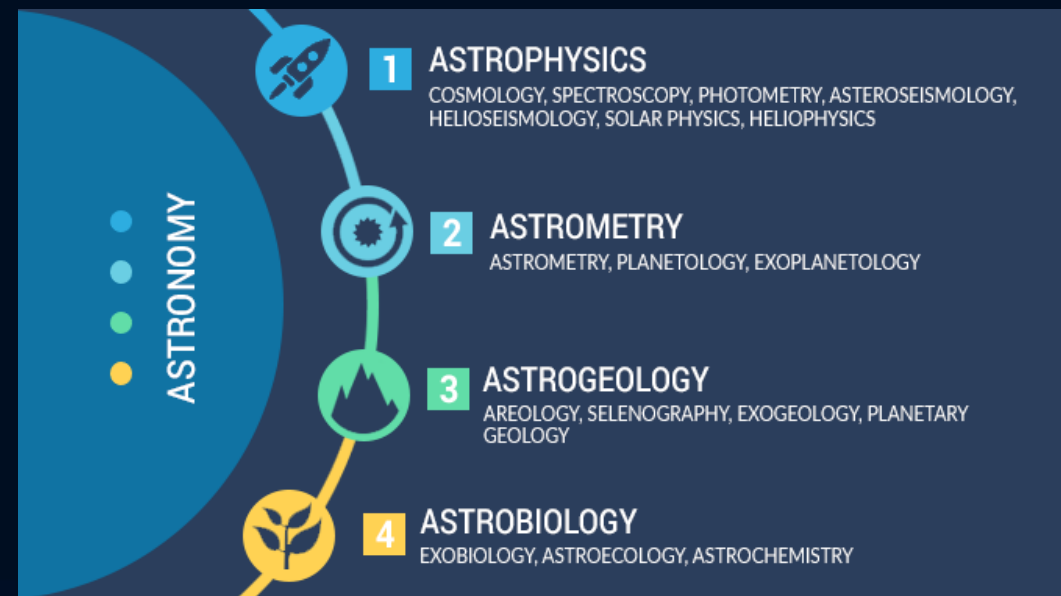
Milan Milošević
Departman za fiziku, PMF / AD „Alfa“

Deo aktivnosti AD Alfa u 2022/23. godini realizuju se u okviru projekta „Kako dohvatiti zvezde“, uz podršku Centra za promociju nauke



Astrofizika

- Astronomija – jedna od najstarijih (najstarija?) prirodnih nauka
- Astrofizika – „mlađa sestra“ astronomije (tj. novija oblast astronomije)
 - Izuzetno brz razvoj, naročito početak XXI veka
- Najveći doprinos razvoju astrofizike
 - Razvoj tehnologije i novih posmatračkih tehnika



<https://earthhow.com/what-is-astronomy/>

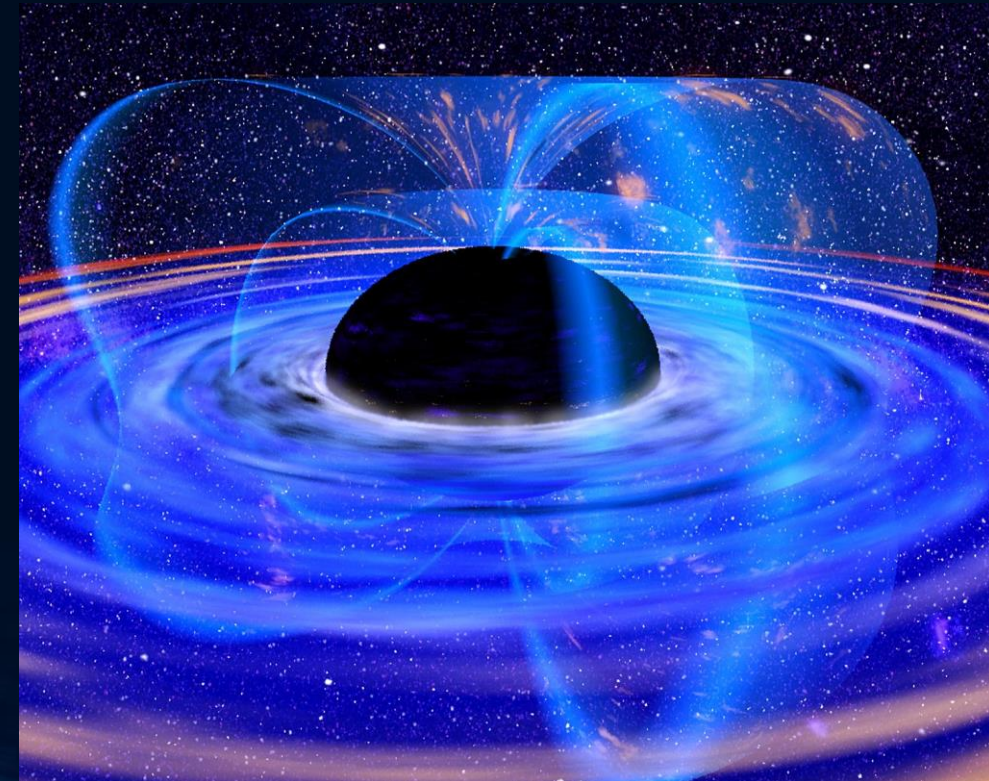
Astronomija/astrofizika

- Posmatračke nauke
 - (najčešće) nisu eksperimentalne
 - Neke oblasti – potpuno eksperimentalne, ali to je više fizika (npr. potraga za tamnom materijom)
- „Domaći“ naziv – praktična astrofizika
- **Praktična astrofizika** - bavi se izučavanjem instrumenata, metodama posmatranja i načinom obrade posmatračkih podataka koji se dobijaju u istraživanjima fizičkih osobina nebeskih tela.



Praktična astrofizika

- Prikupljanje podataka – jedan od najvažnijih elemenata istraživanja
 - Astronomiji – posmatranje jedini način
 - Ne možemo da utičemo na fizičke procese na nebeskim telima
- Metode prikupljanja podataka u astronomiji **značajno se razlikuju** od drugih nauka.
 - Fizika – ponavlja eksperiment, kontrolišu uslovi
- Posmatrač – ne može da utiče na proces



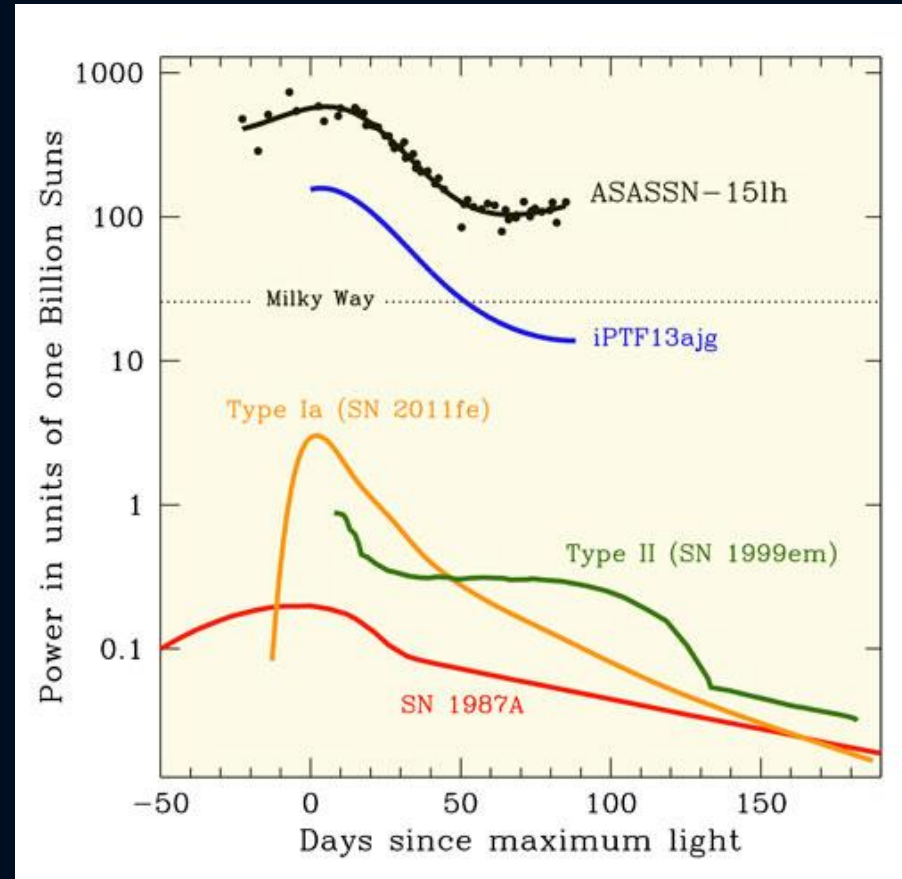
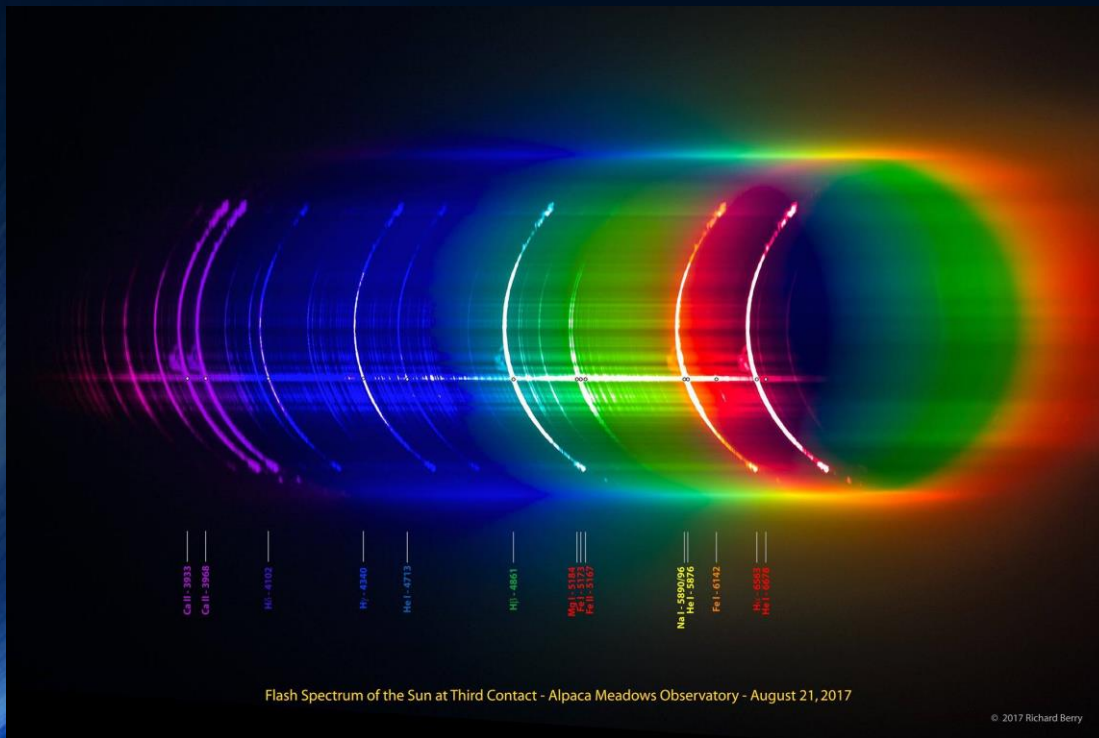
Praktična astrofizika

- Posmatrač **nije u mogućnosti** da:
 - promeni uslove pod kojima posmatrana pojava nastaje,
 - da posmatranje pojave ponovi koliko puta želi.
- Uslovi pod kojima se ta pojava odigrala u međuvremenu mogu se **promeniti** nezavisno od njegove volje.
- Astronom najčešće **nema ni informaciju** o tome pod kojim uslovima se posmatrana pojava odigrala
- Posmatrač stalno mora biti svestan toga da u jednom trenutku neizmereni podatak ostaje **zauvek izgubljen**.

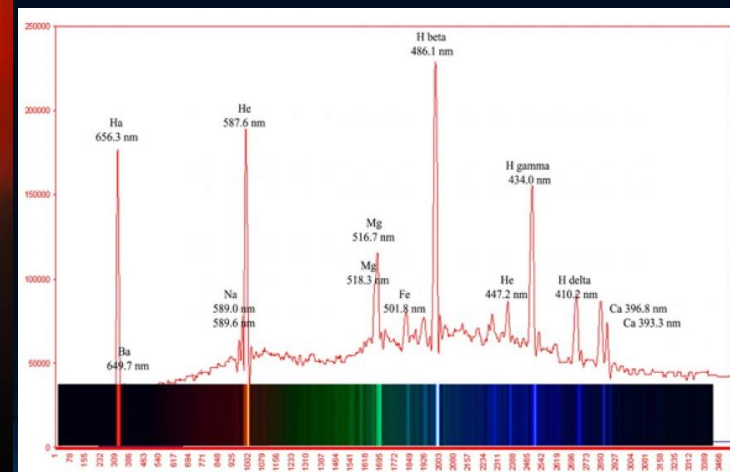


Praktična astrofizika

- Neki primeri:
 - posmatranje eruptivnih zvezda (nove i supernove)
 - Fleš spektar za vreme totalnog pomračenja Sunca



<https://skyandtelescope.org/astronomy-news/brightest-supernova-baffles-astronomers-0115201667/>



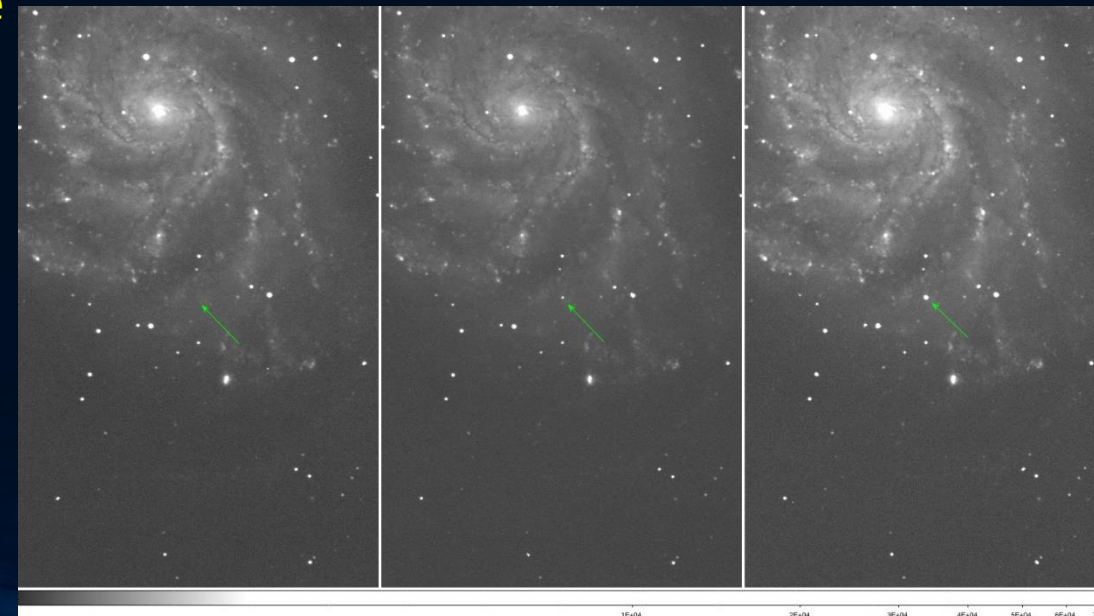
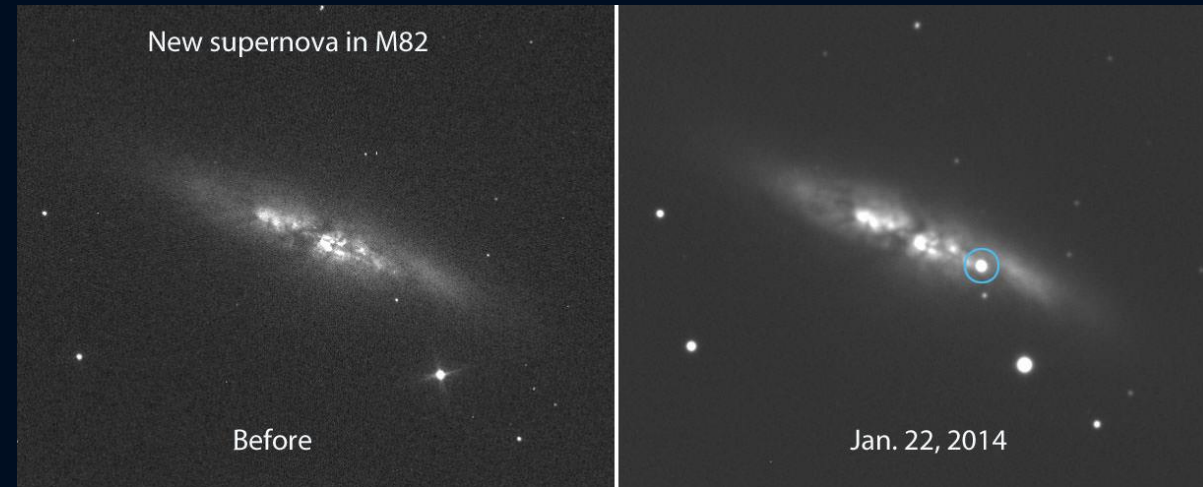
<http://dailysolar.weebly.com/>

Praktična astrofizika

- Posmatranja u astrofizici se moraju **planirati** veoma sveobuhvatno i sa velikom pažnjom
- Prilikom posmatranja mogu da se dese i **nepredviđene promene** na posmatranom objektu
 - Beleženje tih promena često je od ogromnog značaja za razumevanje fizičkih procesa na nebeskim telima i zbog toga posmatrač mora biti osposobljen i uvek spreman da na pravi način i veoma brzo prilagodi svoju mernu aparaturu novonastaloj situaciji.
- Posmatrač mora veoma **dobro da poznaje mogućnosti svog posmatračkog pribora** da bi ga na pravi način mogao brzo prilagoditi efikasnom merenju određenih parametara nastale pojave.

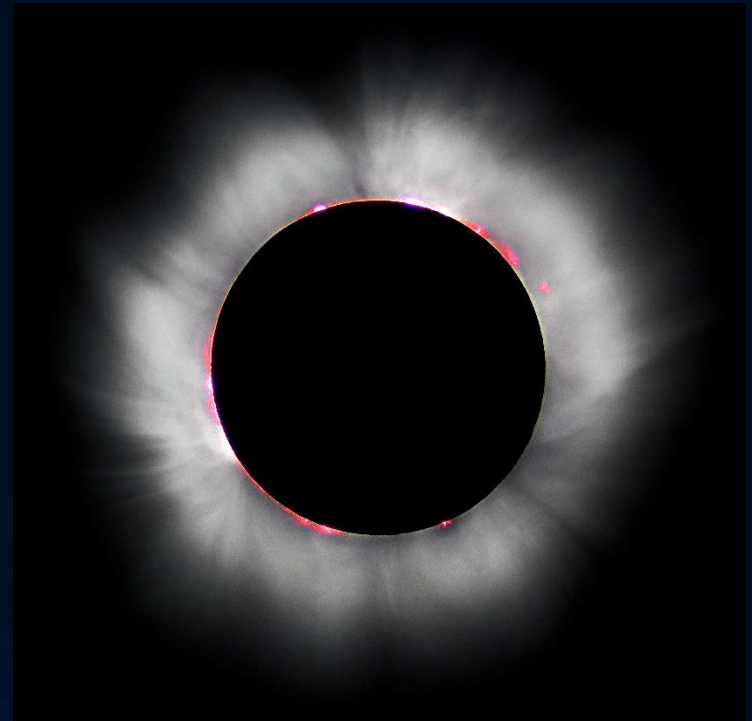
Praktična astrofizika

- Primer:
 - Patrolno posmatranje eruptivnih zvezda
 - Nije moguće **predvideti intenzitet** erupcije
 - Neka erupcija može da bude **isuviše jaka** i „sjajna“, merni uređaji izlaze iz opsega
 - Posmatrač – mora brzo da **podesi merne uređaje** tako da merena veličina bude u **granicama merenog opsega**
 - Može se desiti i obrnuto – neophodan **izbor osetljivijeg** mernog opsega
 - Uspešnost posmatranja zavisi od posmatrača



Proces saznanja

- Postoji specifičnost i u **procesu saznanja naučne istine**
 - Fizičar – nakon izvršenog eksperimenta/merenja traži uzrok posmatrane pojave
 - Astrofizičar – isti pristup možda odvede do pogrešnog zaključka
- Redosled izučavanja:
 1. Posmatranje
 2. Otkrivanje drugih pojava
 3. Teorijsko objašnjenje



Proces saznanja

- Tri faze – međusobno povezane i nerazdvojive
- Proces realizuje na dva načina
 - **1. način:** korišćenjem već **poznatih posmatračkih podataka** sastavi model; rezultati modela/simulacije **predviđaju neke fizičke osobine** posmatranog objekta ili fizičkih procesa na njemu; ako posmatranja ne potvrđuju te predviđene osobine, model (hipoteza) se odbacuje ili se koriguje (metoda probe i grešaka).
 - **2. način:** određuju se **slobodni fizičkih parametri modela** posmatranog objekta, koji su u modelu međusobno povezani poznatim fizičkim zakonitostima; pri tome se slobodni **parametri modela menjaju** se sve dok se izračunate vrednosti iz modela i posmatrane veličine ne slažu međusobno u unapred zadatim granicama tačnosti (metoda obrnutog zadatka)

Proces saznanja

- Oba načina – provera zasniva na posmatračkim podacima!
- Izuzetno važno sakupljanje što više i što preciznijih posmatračkih podataka
- Neophodna tačna obrada i analiza
- Velike međunarodne kolaboracije, baze podataka itd.



Astrofizičke informacije

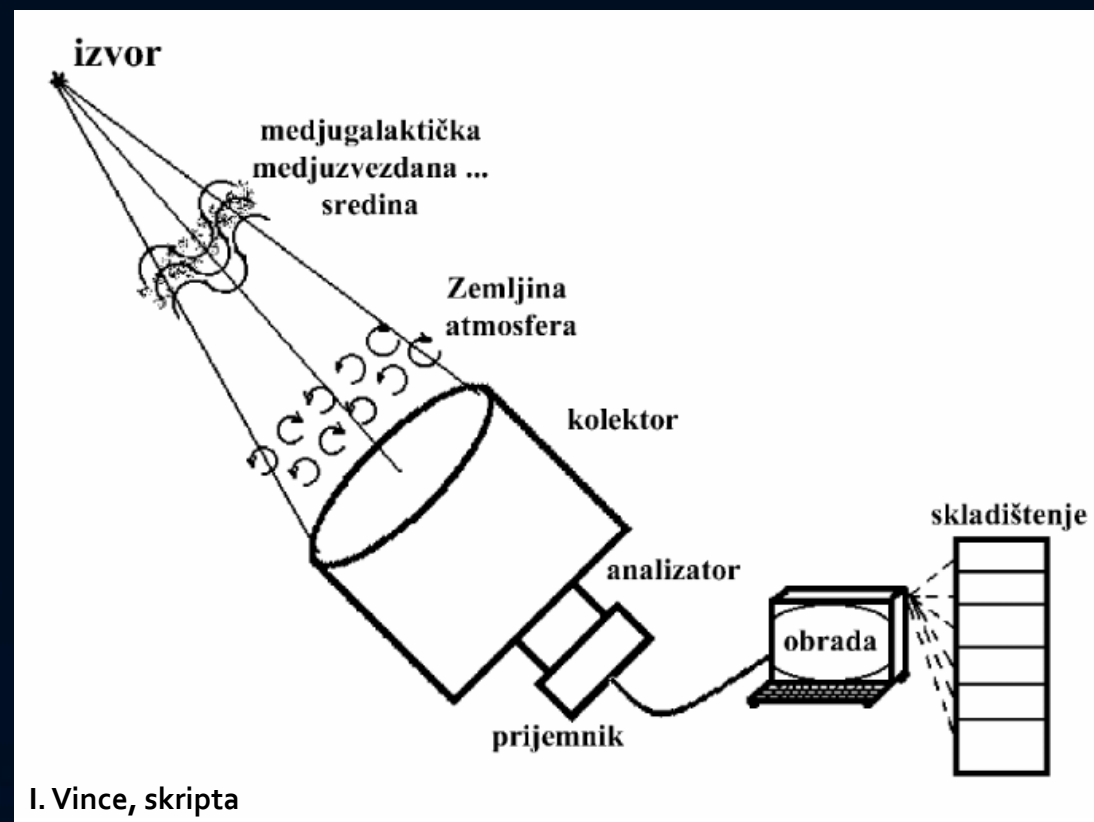
The background features a dark blue gradient on the left, transitioning into a complex, glowing blue structure on the right. This structure consists of numerous thin, parallel lines that curve and spiral inward, creating a sense of depth and movement, similar to a tunnel or a data stream visualization.

Astrofizičke informacije

- Cilj astrofizike – opiše, objasni i predviđa fizičke procese koji se dešavaju u univerzumu.
- Fizički sadržaj univerzuma (materija i energija) klasifikovan u poznate kategorije objekata - planete, zvezde, galaksije
 - Osnova ove klasifikacije – informacije prikupljene posmatranjem
 - Na osnovu prikupljenih podataka napravljeni fizički modeli objekata, opisana evolucija, predviđeni događaji na njima
- Zadatak posmatrača – da definiše strategiju prikupljanja podataka
 - Izabere fizičke veličine koje treba meriti, obadi prikupljene podatke (bitna informacija ne sme da se izgubi, ali ne sme ni da se pripíše preveliki značaj nekoj informaciji)

Proces posmatračkog rada

1. Izbor **izvora** informacija (zvezda, galaksija, međuzvezdani oblak itd.)
2. Izbor **nosioca informacija** (vidljiva svetlost, radiozračenje, kosmičko zračenje itd.)
3. Praćenje **uticaja sredine između izvora i posmatrača** na nosioce informacija (međuzvezdana prašina, galaktičko magnetno polje, gravitaciono polje, atmosfera Zemlje itd.)
4. Izbor **kolektora** informacija (optički teleskop, radioteleskop, neutrinski teleskop itd.)
5. Izbor **analizatora informacija i metode posmatranja** (optički filteri, spektralni uređaji, fotometrija, polarimetrija itd.)
6. Izbor **prijemnika** informacija (oko, fotoploča, fotomultiplikator, komora za pražnjenje itd.)
7. **Obrada** posmatračkih podataka
8. **Dokumentacija** (skladištenje) posmatračkih podataka

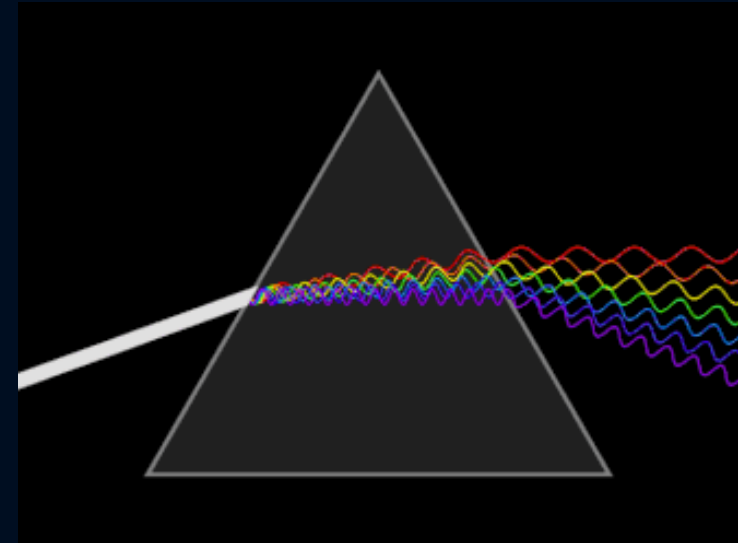


Nosioci informacija

- Fotoni
- Čestice materije
- Gravitacioni talasi

Fotoni

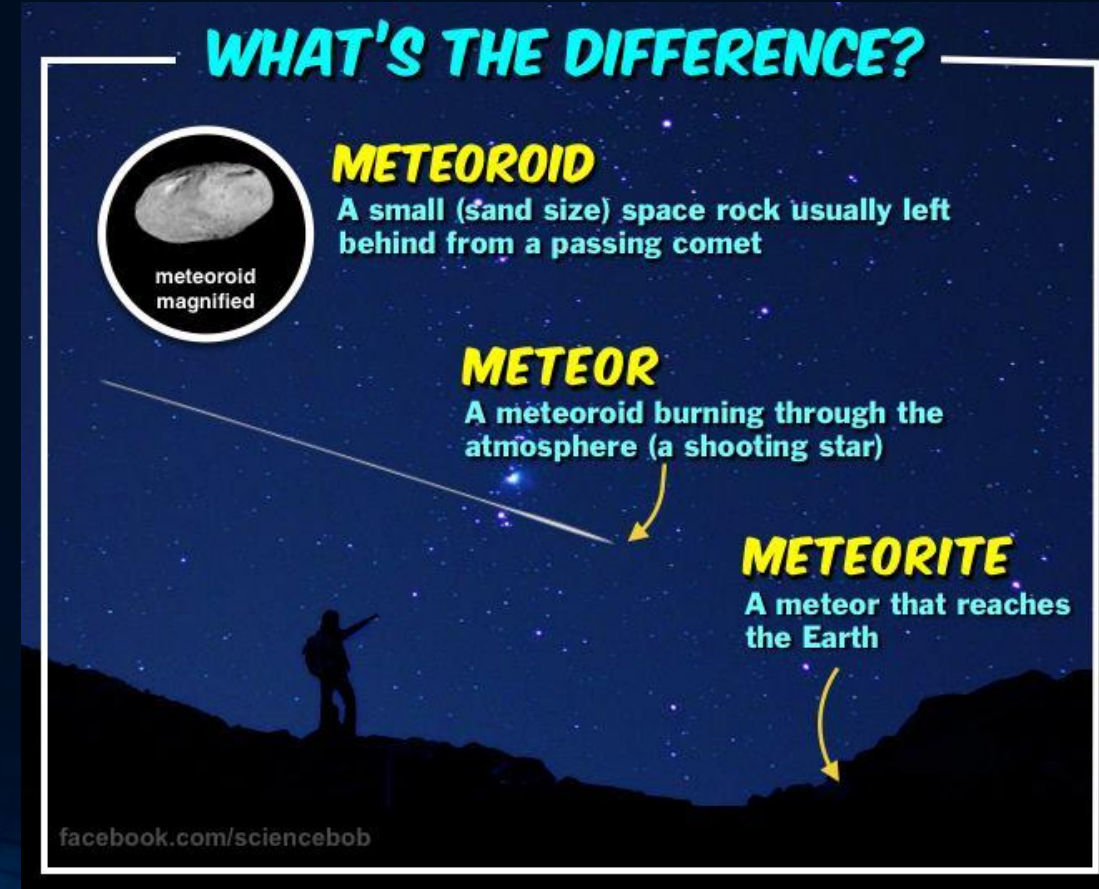
- Najvažniji, skoro sve informacije u astrofizici dobijene preko fotona
- Najosetljiviji i najtačniji detektori konstruisani za fotone
- Fotoni – direktno povezani sa fizičkim **stanjem izvora** zračenja (temperatura, pritisak, gustina...) i sa **prirodom i kretanjem njegovih komponenata** (atomi, molekuli, čestice prašine...)
- Fotoni – grupa najstabilnijih i najbržih čestica



Materija

- Različite čestice materije stalno bombarduju Zemlju
 - Stižu iz različitih delova vasiona!

- Tri grupe čestica:
 - Kosmički zraci
 - Čestice materije (meteoriti)
 - Neutrino



Gravitacioni talasi

- Nastaju kada dolazi do promene prostorne raspodele masa nekog sistema u toku vremena, tj. kada neka masa trpi ubrzanje.
- Perturbacija gravitacionog polja širi se u prostoru konačnom brzinom (brzinom svetlosti u vakuumu) u obliku gravitacionih talasa.
- Veza frekvencije, talasne dužine i brzine svetlosti ista kao kod elektromagnetnih talasa, tj. $\nu \cdot \lambda = c$
- Frekvencija talasa zavisi od brzine promene u izvoru, što znači da je veoma mala u odnosu na frekvenciju svetlosti.
 - Npr. frekvenca 1 Hz tada je talasna dužina reda sto miliona metara

Gravitacioni talasi

- Disperzija i apsorpcija gravitacionih talasa u materiji je zanemarljivo mala, pa je za te talase ceo univerzum providan, što ih čini veoma interesantnim nosiocima informacija.
- Zbog niske snage gravitacionih talasa, njihova detekcija je veoma teška
- Prema opštoj teoriji relativiteta kvadrupolno gravitaciono zračenje dvaju tela (npr. dvojne zvezde) koje vrše rotaciju oko zajedničkog baricentra je dato sledećom formulom:

$$L = \frac{2 \cdot 10^{-63} \cdot M_1^2 \cdot M_2^2 \cdot (1 + 30 \cdot e^3)}{(M_1 + M_2)^{\frac{2}{3}} \cdot P^{\frac{10}{3}}}$$

Gde su M_1 i M_2 mase tela, e je ekscentricitet orbite, a P period revolucije.

Gravitacioni talasi

- Primer:
 - Tipične zvezde, $M_1 = M_2 = 1,5 \cdot 10^{30} \text{ kg}$, $e = 0$ i $P = 10^4 \text{ s}$
 - Dobija se $L = 2 \cdot 10^{24} \text{ W}$
 - Na udaljenosti od $r = 250 \text{ pc}$ fluks gravitacionog zračenja ovog sistema je
$$F = 3 \cdot 10^{-15} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$
 - Snaga kojom zrači sistem Sunce – Zemlja iznosi oko 200 W
 - Elektromagnetno zračenje Sunca $\approx 10^{26} \text{ W} !!!$
- Relativna promena dimenzija nekog tela pod uticajem gravitacionih talasa je reda veličine 10^{-20} (predmet dužine 1 m, manje od dimenzija atoma)

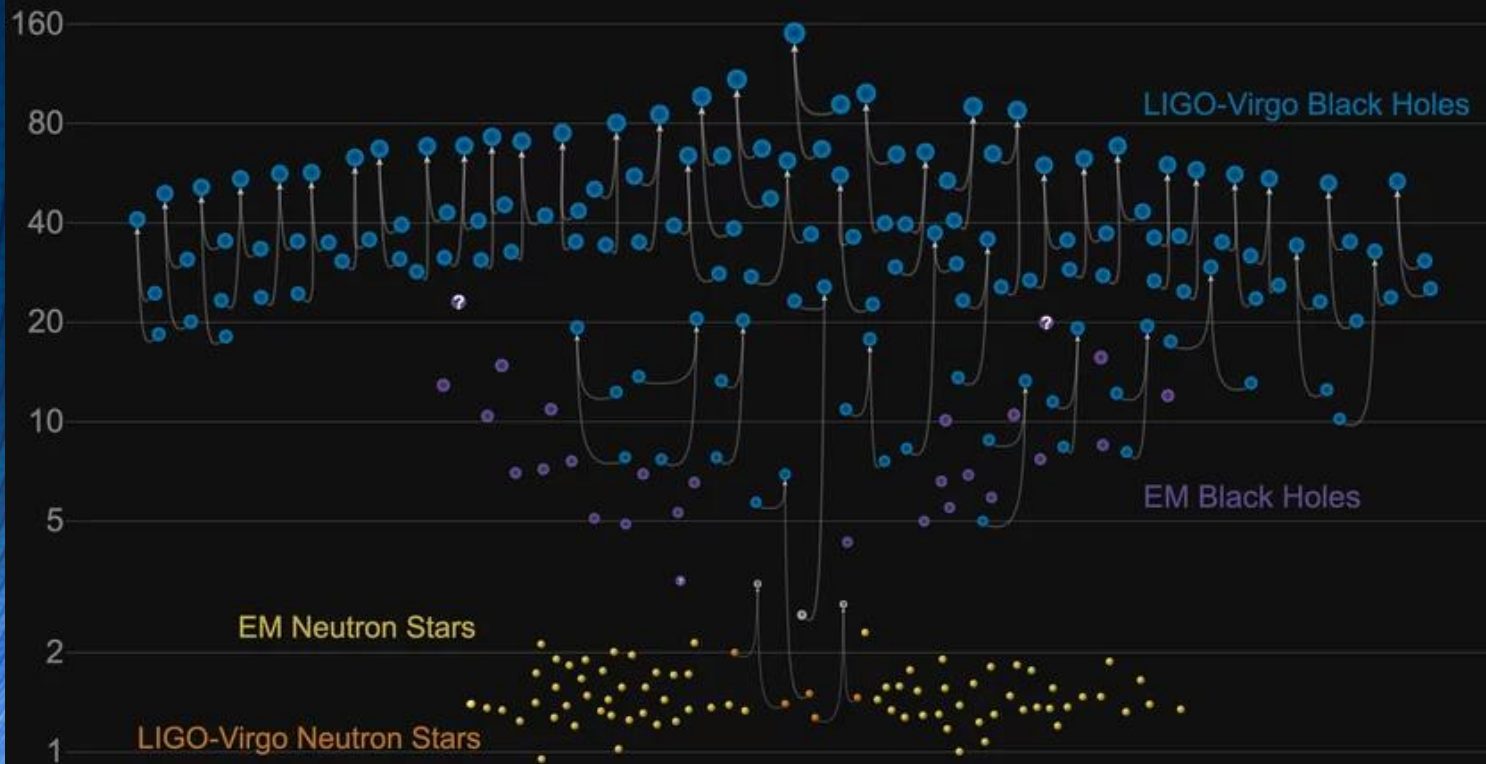
Gravitacioni talasi

- Izvori gravitacionih talasa
 - periodični izvori (dvojne zvezde, pulsari);
 - impulsni procesi niske frekvencije (crna rupa u masivnim objektima)
 - impulsni procesi visoke frekvencije ($10 - 10^4$ Hz, gravitacioni kolaps zvezda, supernove).



Gravitacioni talasi

Masses in the Stellar Graveyard *in Solar Masses*



GWTC-2 plot v1.0

LIGO-Virgo | Frank Elavsky, Aaron Geller | Northwestern

GW170817

Binary neutron star merger

A LIGO / Virgo gravitational wave detection with associated electromagnetic events observed by over 70 observatories.



Distance
130 million light years

Discovered
17 August 2017

Type
Neutron star merger

12:41:04 UTC
A gravitational wave from a binary neutron star merger is detected.

gravitational wave signal
Two neutron stars, each the size of a city but with the mass of the sun, collided into each other.

gamma ray burst
A short gamma ray burst is an intense beam of gamma ray radiation which is produced just after the merger.
+ 2 seconds
A gamma ray burst is detected.

GW170817 allows us to measure the expansion rate and the age of the universe directly using gravitational waves for the first time.

Detecting gravitational waves from a BNS event allows us to find out more about the structure of neutron stars.

This multimessenger event provides confirmation that neutron star mergers can produce short gamma ray bursts.

The observation of a kilonova allowed us to show that BNS mergers could be responsible for the production of all heavy elements, like gold, in the universe.

Observing both electromagnetic and gravitational waves from the event provides confirmation that gravitational waves travel at the same speed as light.

kilonova
Decaying heavy ions produce an optically bright kilonova, producing heavy metals like gold.
+10 hours 52 minutes
A new bright source of optical light is detected in a galaxy called NGC 4993, in the constellation of Hydra.

+11 hours 36 minutes
Infrared emission observed.

+15 hours
Bright ultraviolet emission detected.

+9 days
X-ray emission detected.

radio remnant
As material moves away from the merger it produces a shockwave in the interstellar medium - the tenuous material between stars. This produces an afterglow which can last for years.
+16 days
Radio emission detected.

Uticaj sredine

između posmatrača i posmatranog izvora na nosioce informacija

Uticaj sredine

- Sredina koja se nalazi u prostoru između posmatranog objekta i posmatrača utiče na informacije
 - Sredina unosi „poremećaj“
- Na osnovu mesta nastanka poremećaja:
 - Međugalaktička sredina
 - Međuzvezdana sredina
 - Međuplanetarna sredina
 - Atmosfera (Zemlje)
- Efekti
 - promena broja nosilaca informacije, promena smera, energije...

(iv) • **The circumburst medium**
DM contributions depend on burst progenitor model, and vary widely.

(iii) • **The ISM and halo of the host galaxy**
DM contributions range from $\sim 50 \text{ cm}^{-3} \text{ pc}$ for a MW-type galaxy to possibly $>1,000 \text{ cm}^{-3} \text{ pc}$ for a burst originating in the centre of a gas-rich galaxy.

(ii) • **The intergalactic medium**
Including the sparse $\sim 2 \times 10^{-7} \text{ cm}^{-3}$ gas whose density increases as $(1+z)^3$, and the discrete stochastic contributions of the gaseous baryonic haloes that might intersect the line of sight.

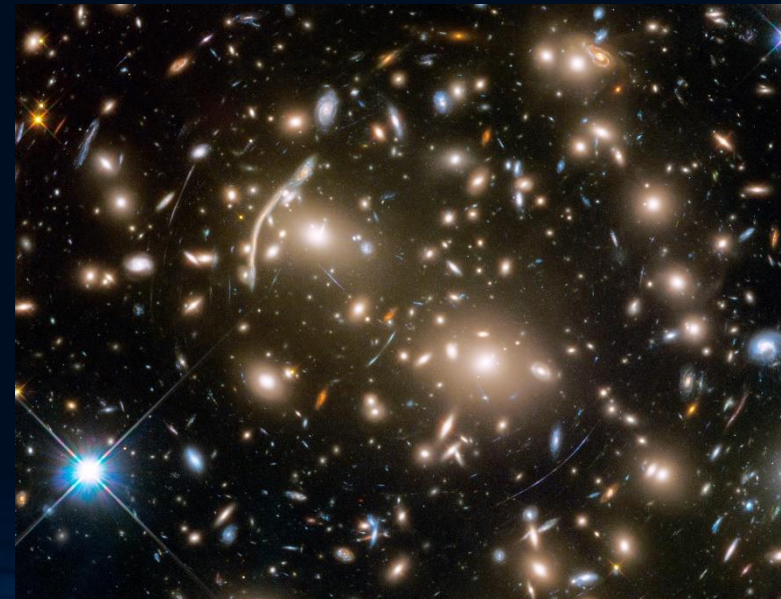
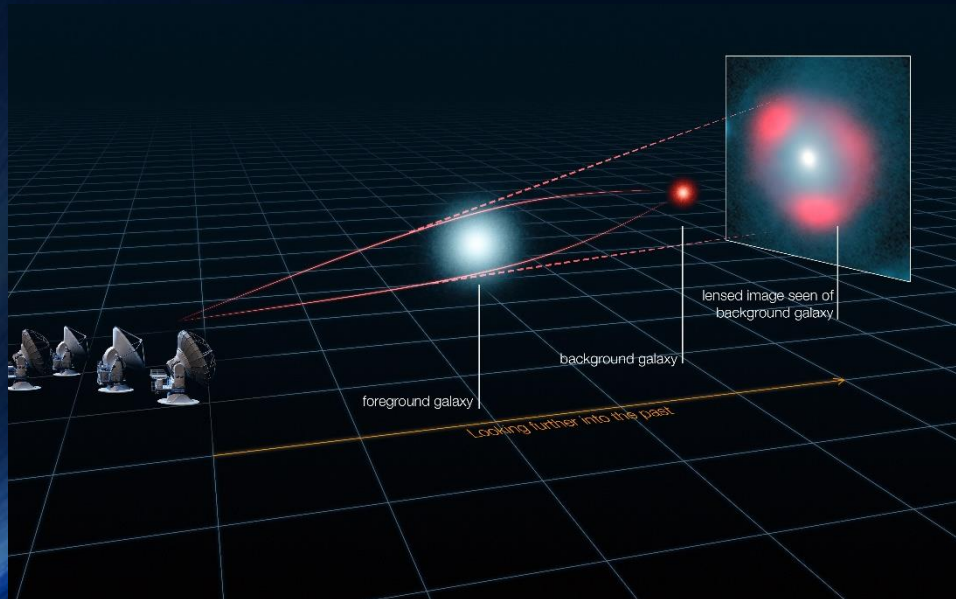
(i) • **The ISM and halo of the Milky Way**
The halo of our Galaxy extends out to 50–200 kpc, and contributes $\sim 15\text{--}50 \text{ cm}^{-3} \text{ pc}$ to the DM. The Milky Way's interstellar medium contributes $\sim 30 \text{ cm}^{-3} \text{ pc}$ at high Galactic latitudes.

Total DM = $114\text{--}2,596 \text{ cm}^{-3} \text{ pc}$



Uticaj sredine

- Primeri sredina koje remete „signal“
 - Magnetno polje (menja pravac prostiranja naelektrisanih čestica)
 - Gravitaciono polje (menja pravac kretanja čestica i fotona)
 - ...



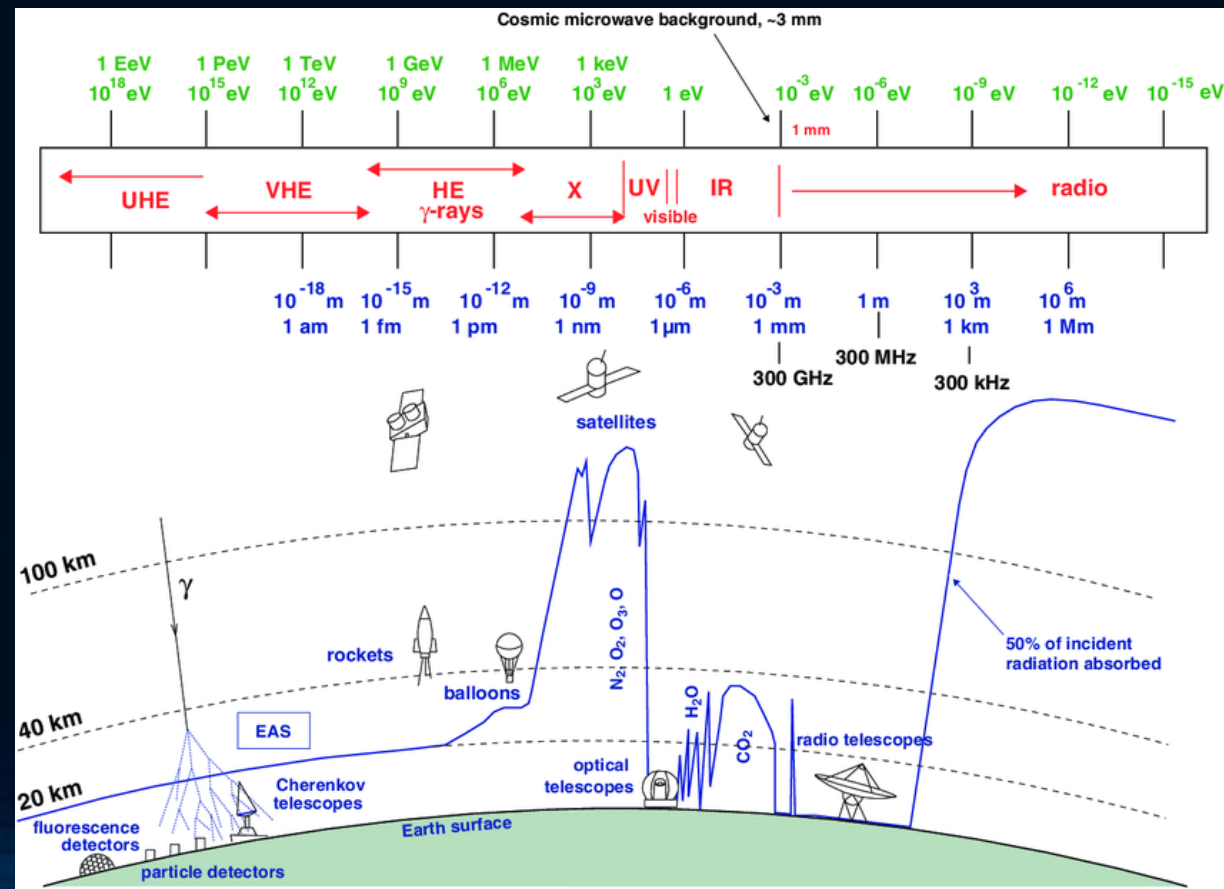
Abell 370
NASA, ESA, and J. Lotz and the HFF Team (STScI)

Atmosferske smetnje

- Dve grupe uticaja Zemljine atmosfere:
 - Globalnog karaktera
 - Lokalne prirode
- **Uticaj globalnog karaktera** - usrednjeno dejstvo atmosfere, u kojoj nema nehomogenosti malih dimenzija, na prolaz nekih nosioca informacija.
- **Uticaja lokalne prirode** - atmosfera Zemlje se razmatra kao nehomogena sredina.

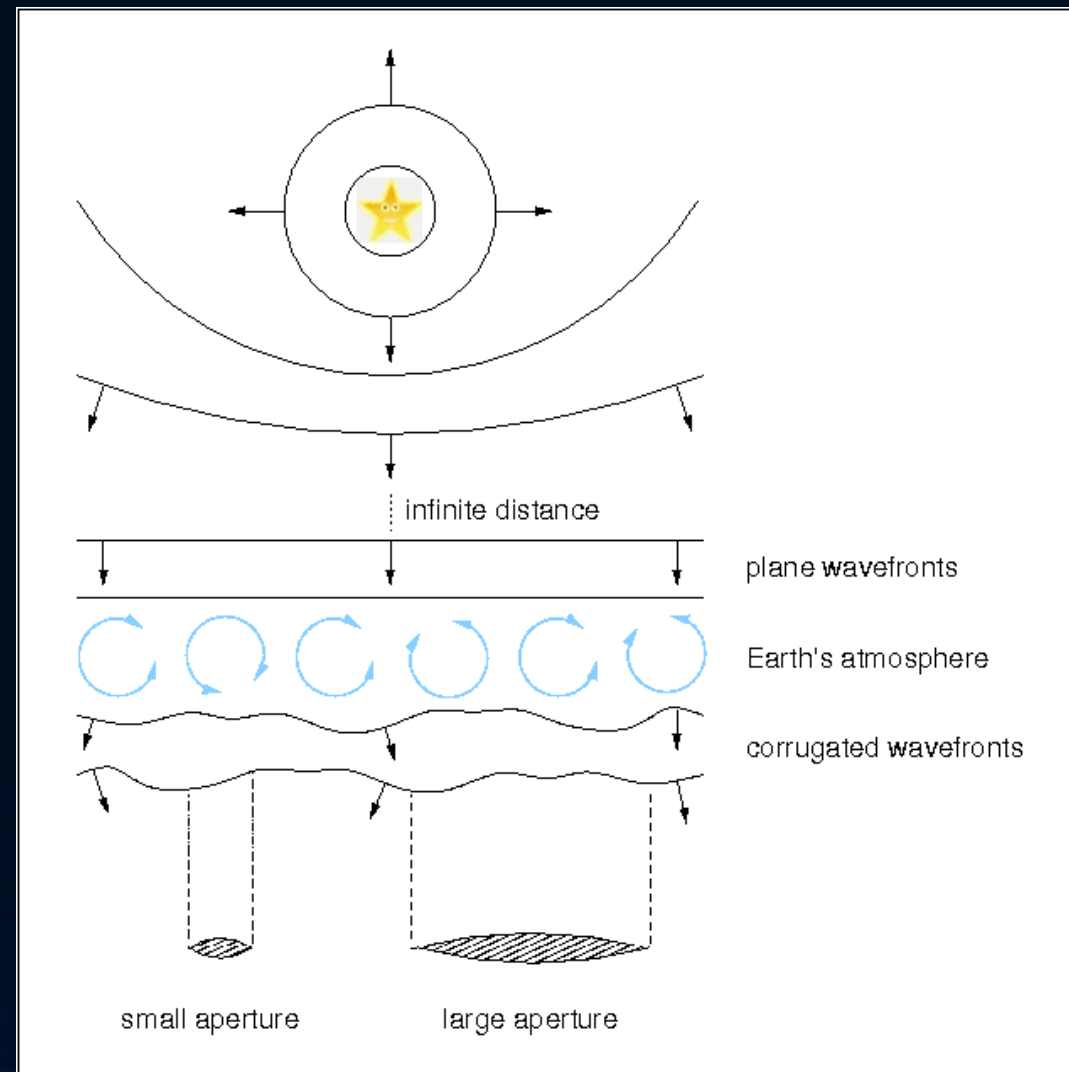
Atmosferske smetnje

- Zemljina atmosfera nije prozirna za različite nosioce informacija
 - Neprovidnost atmosfere zavisi od talasne dužine fotona
- Atmosfera praktično neprovidna od γ do UV zračenja
- Maksimum u UV delu spektra, naglo opada ka vidljivom i postepeno ka X-zračenju
- U VIS u znatnoj meri providna (propušta više od 50% intenziteta upadnog zračenja do nivoa mora)
- U IC prozori providnosti (nekoliko oblasti talasnih dužina gde zračenje stiže do nivoa mora)
- U radio oblasti od milimetra do nekoliko metara ponovo providna



Atmosferske smetnje

- Uticaj Zemljine atmosfere na kvalitet lika nebeskog tela može se kategorisati na razne načine.
- Jedan od često razmatranih načina zasniva se na manifestaciji **uticaja turbulencije** na posmatrani lik, tj. na tome kakve vrste promene se mogu zapaziti prilikom posmatranja na liku nebeskog tela.
- Na osnovu toga mogu da se izdvoje tri vrste uticaja:
 - Scintilacija
 - Skakanje (podrhtavanje) lika
 - Razmazivanje lika



Optički teleskopi

Kolektori

- Sva nebeska tela slabi izvori nosioca informacija (osim Sunca)
- Uloga kolektora:
 - Da prikupe što veću količinu nosioca informacija
 - Da povećaju ugaonu razvojnu moć opreme
- Princip rada i konstrukcija
 - razlikuje u zavisnosti od nosioca informacija koje prikupljaju
- Razlike i između kolektora istih informacija (u zavisnosti od objekata)
 - Drugačija konstrukcija za posmatranje položaja i fotometriju
 - Sunce i druge zvezde, itd.

Optički teleskopi

- Ogromna ekspanzija astronomske posmatračke opreme van VIS, ali...
- Najviše informacija na osnovu posmatranja fotona u VIS
- Optički teleskopi
 - Tradicionalni posmatrački uređaji
 - Dobro ispitane osobine i parametri
 - Služe za upoređivanje sa drugim vrstama teleskopa
- Kolektor zračenja - **objektiv**

Otkriće teleskopa

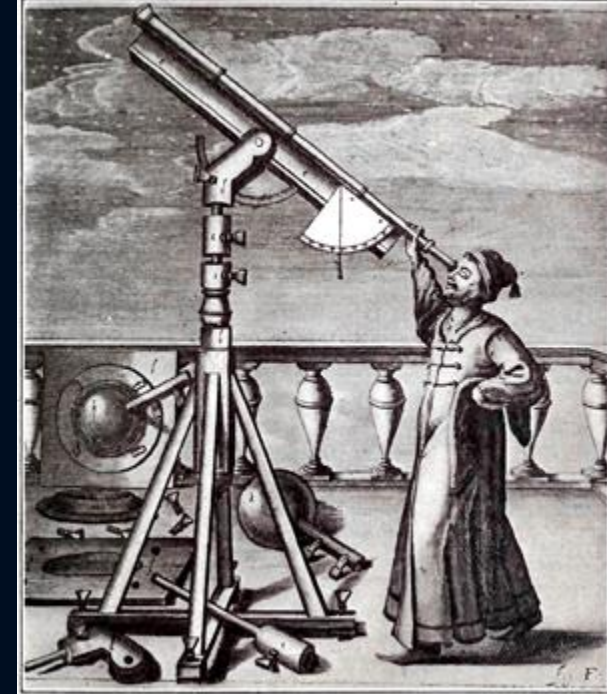
- Pouzdani podaci o upotrebi sočiva za poboljšanje vida nalaze se u XIII veku. Kao pronalazač naočara označava se italijanskom optičaru i fizičaru **Armatiju**.
- Engleski astronom (i astrolog), fizičar i hemičar **Rodžer Bekon** (1212-1294) nagovestio je da se *“korišćenjem cevi sa sočivima ili pomoću ogledala mogu ‘približiti’ udaljeni predmeti i predeli”*.
- On, ipak, nije pronašao teleskop. Postoje i crteži **Leonarda da Vinčija** (1452-1519), na kojima se vide cevi sa sabirnim sočivima.



Holandski „teleskop“, 1624

Otkriće teleskopa

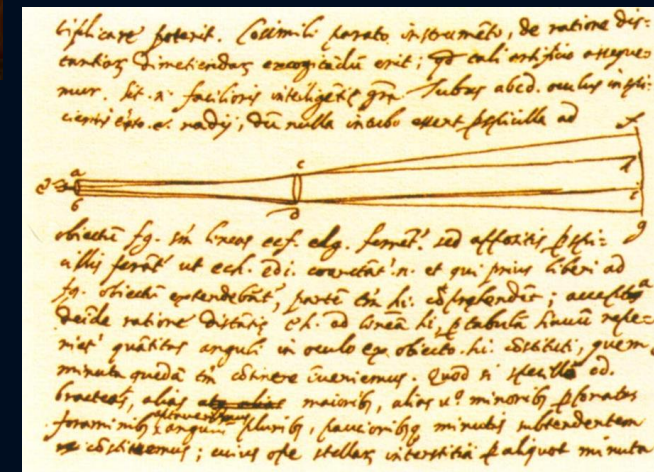
- Sa pronalaskom durbina dovodi se u vezu i **Frankastoro** (1483-1553).
- On navodi (1538. g.) da Mesec izgleda mnogo bliže kada se gleda kroz dva sočiva ili kada se gleda kroz jedno debelo sočivo.
- **Vlada potpuna nedoumica oko pronalazača teleskopa.**
- Pojavljuju se imena **Portija** (tvorac camera obscura), **Portinija** (1590).
- Javnost se sa teleskopima prvi put upoznaje u Holandiji (Milderbah) 1608. g.
- Holandski optičar **Zaharijas Jansen** prodaje durbine, ali ih, po svemu sudeći, nije sam proizvodio. Pravo patentiranja teleskopa tražili su i holandski optičari **Liperšej, Andrianson**.
- Francuski kralj Anri IV traži 1608. g. od holandskih posetilaca durbin, sa namerom da ga koristi u vojne svrhe.
- Tokom sledeće godine, **Heriot** uz pomoć durbina posmatra i crta Mesec.



Hans Lippershey

Otkriće teleskopa

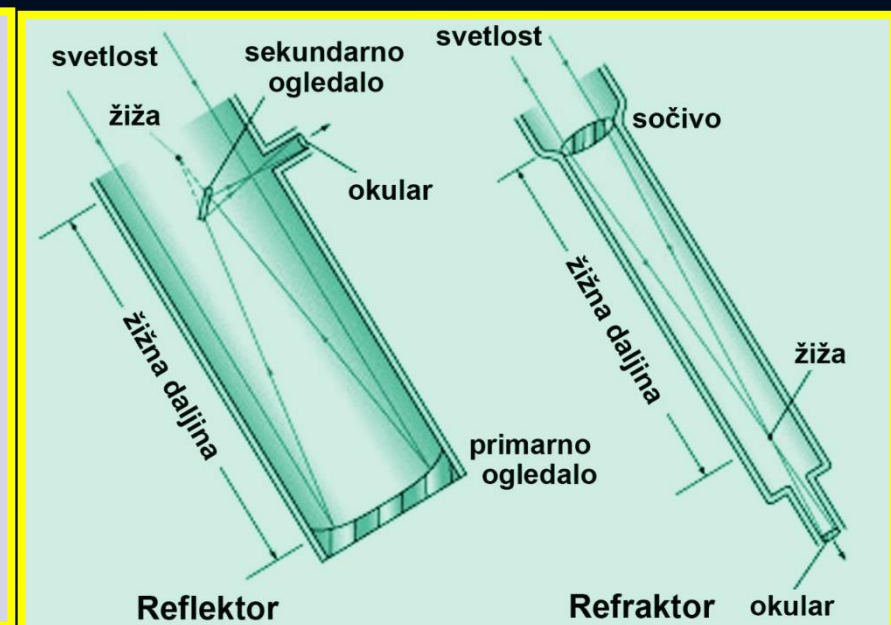
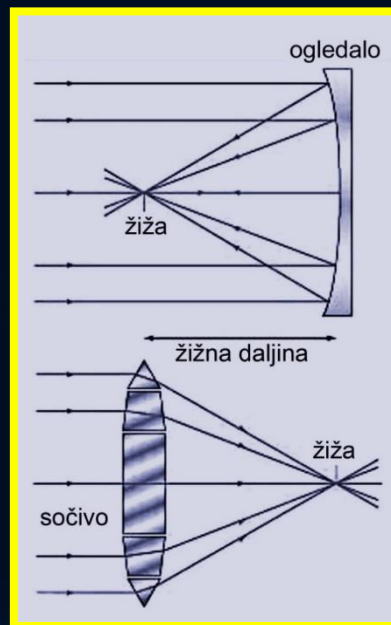
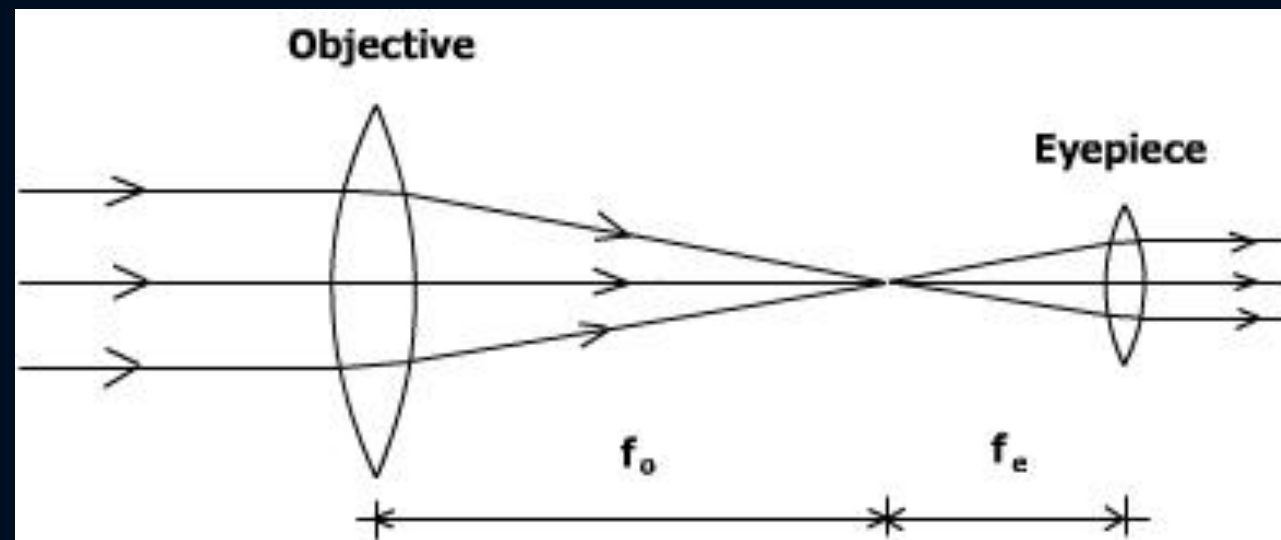
- Galileo Galilej 1609. godine saznaje da se u Parizu prodaju durbini. Na osnovu opisa nije mu bilo teško da napravi nekoliko teleskopa.
- Pomoću njih 1610. otkriva Venerine mene, Jupiterove satelite, planine na Meseću, zvezde u Mlečnom Putu, itd.
- U to vreme durbine u nebo upiru i drugi astronomi, a Majer, Fabricije, Peresk, Heriot osporavaju Galileju prvenstvo nekih otkrića.



Jedan od prvih Galilejevih teleskopa

Elementi teleskopa

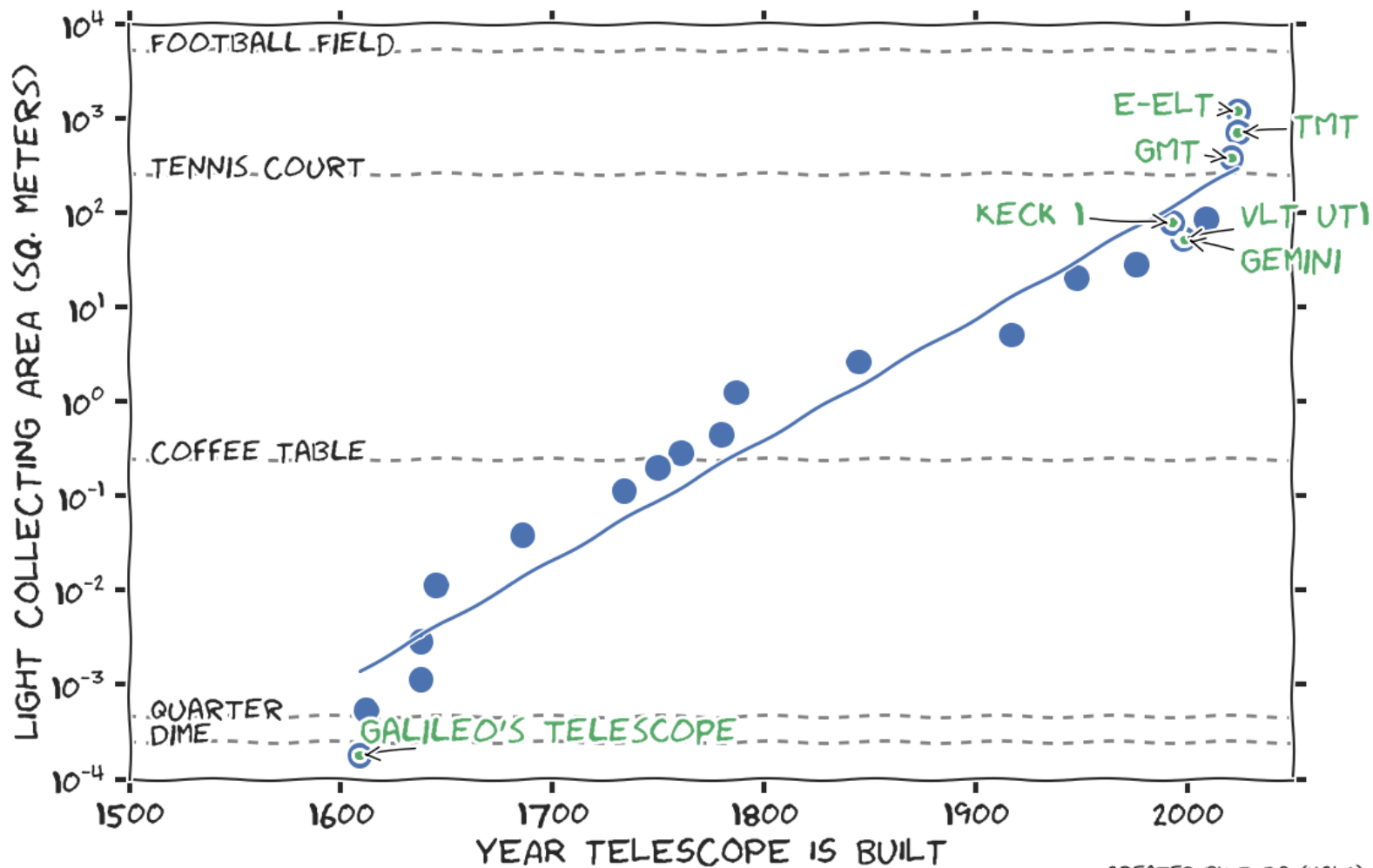
- Osnovni optički deo svakog teleskopa je **objektiv**.
- Treba da sakupi što više svetlosti i da omogući posmatranje objekta pod većim uglom.
- Zavisno od toga da li je objektiv sočivo (sistem sočiva) ili ogledalo (kombinacija ogledala) optički teleskopi dele se na:
 - Refraktore,
 - Reflektore,
 - Katadioptričke.



Objektivi

- **Osnovna namena** objektiva je da
 - prikupi što veći broj fotona
 - omogući posmatranja sa što većom uglovnom rezolucijom
- Oba cilja – **povećanje prečnika objektiva** teleskopa
 - Broj prikupljenih fotona proporcionalan površini, $N_f \sim D^2$
 - Ugaona rezolucija proporcionalna prečniku, $R_\sigma \sim D$
- Razvoj astronomskih teleskopa – rast prečnika objektiva

Objektivi



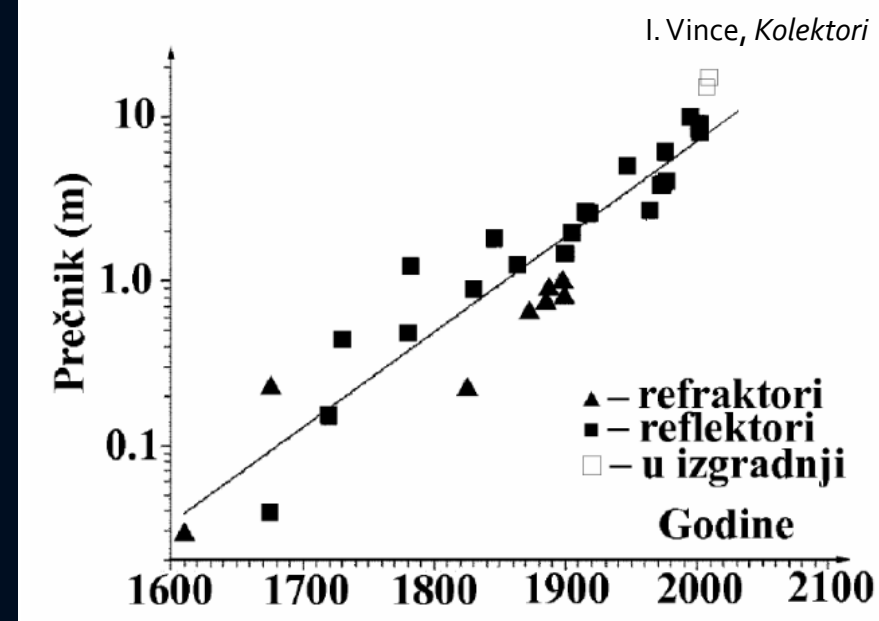
CREATED BY T. DO (UCLA)

- 1,5 – 3,8 cm – Galileo (1609 – 1620)
- 3,3 cm – Njutnov refraktor (1668)
- 50 cm – najveći na svetu (1750)
- 1,83 cm – najveći (1845)
- 2,54 m – Hukerov teleskop (1917), najveći na svetu (E. Habl, F. Cviki)
- 5,08 m – Hejlov teleskop (1948)
- 2,4 m – HST (1990)
- 10 m - Keck 1 (1993)

Objektivi

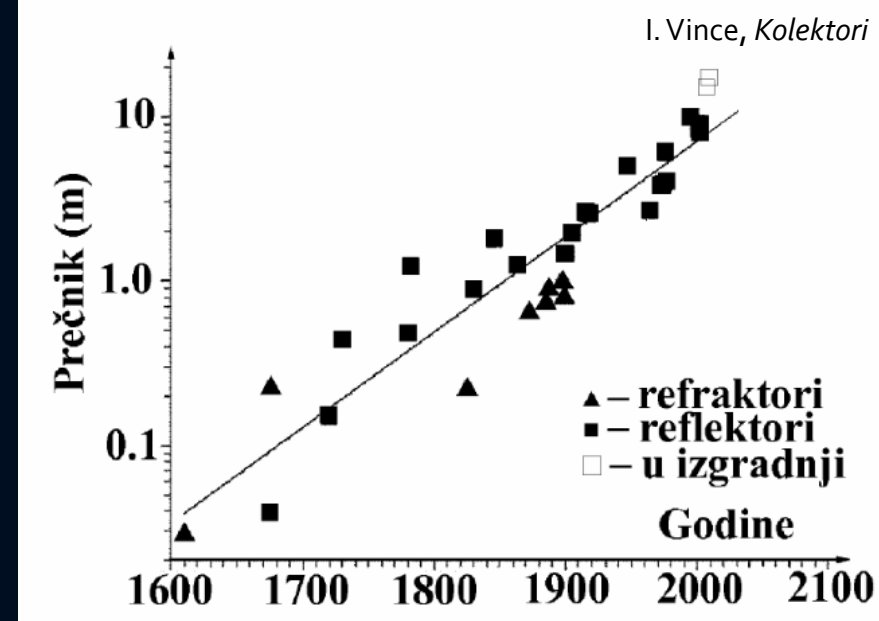
- Veliki broj velikih teleskopa, prečnika objektiva iznad 1 m, u periodu od druge polovine 19. veka do druge decenije 20. veka.

- Kraj perioda: 2,5 m Hukerov teleskop (izrgrađen 1917. godine, Mount Wilson)
- Sledeći veliki skok – posle 30 godina
 - 1948 – Mount Palomar, 5,08 m (značajan doprinos razvoju astronomije)
- 1975 – prečnik 6 m, mesto Zelentchukskaya u Rusiji
 - Slabiji rezultati od očekivanih, optički nije bio dovoljno dobar
 - 1978 – zamenjen objektiv

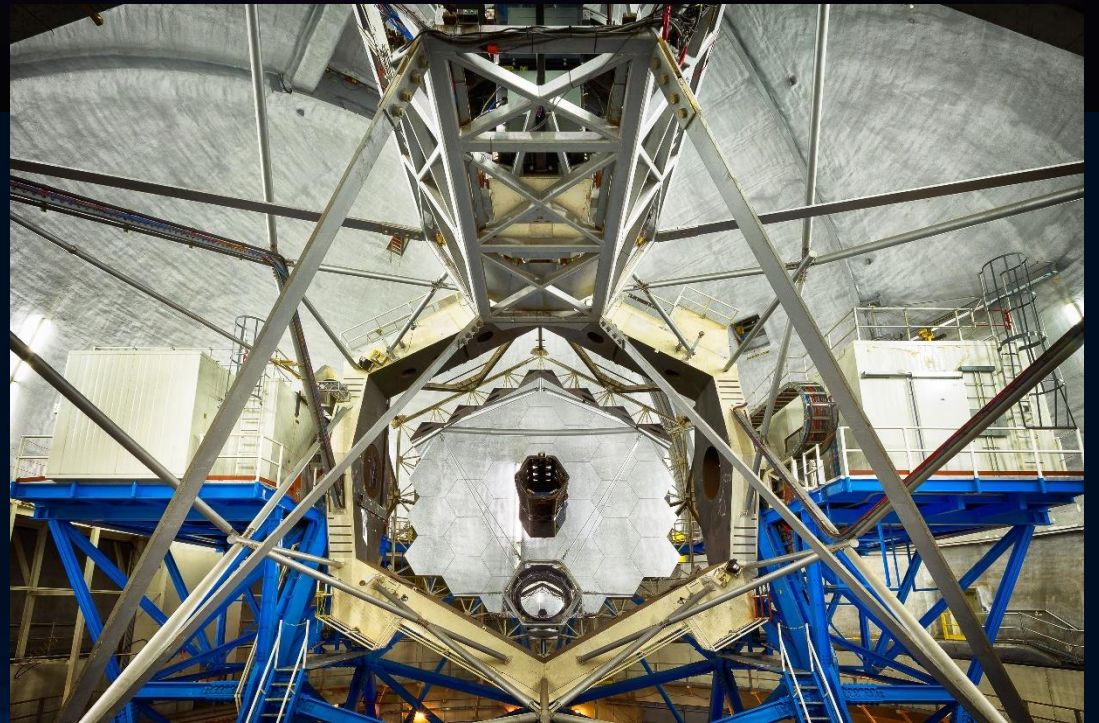
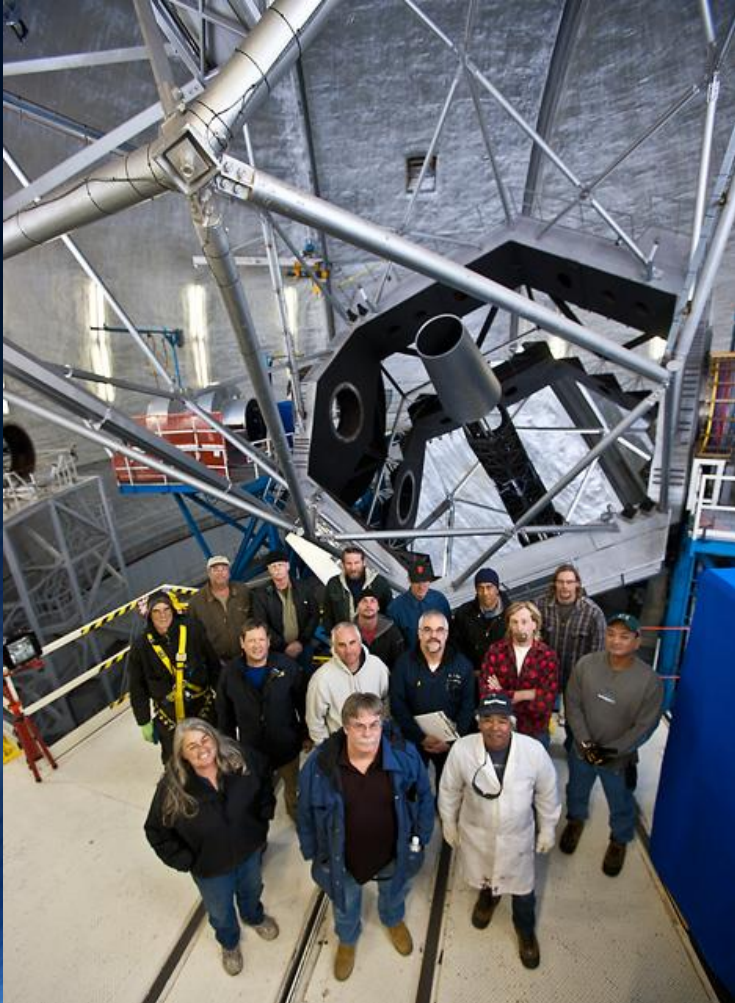


Objektivi

- Krajem 20. veka obeležen je izgradnjom teleskopa prečnika objektiva prečnika oko 10 m.
- Objektivi pravljani na tri načina:
 - Jednodelni - sastoje iz jednog komada ogledala
 - višesegmentni - ogledalo se sastoji iz većeg broja manjih ogledala
 - npr. Keck I, Keck II (vrh Mauna Kea, Havaji); objektiv od 36 komada ogledala veličine 1,8 m
 - zajedno jedno veliko ogledalo, 9,82 m
 - Njihovim spajanjem – „efektivno“ ogledalo prečnika 9,82 m (interferometar)
 - Višekomponentni
 - drugi primer VLT (Very Large Telescope), 4 teleskopa (8,2 m)
 - „efektivno“ ogledalo 14,6 m

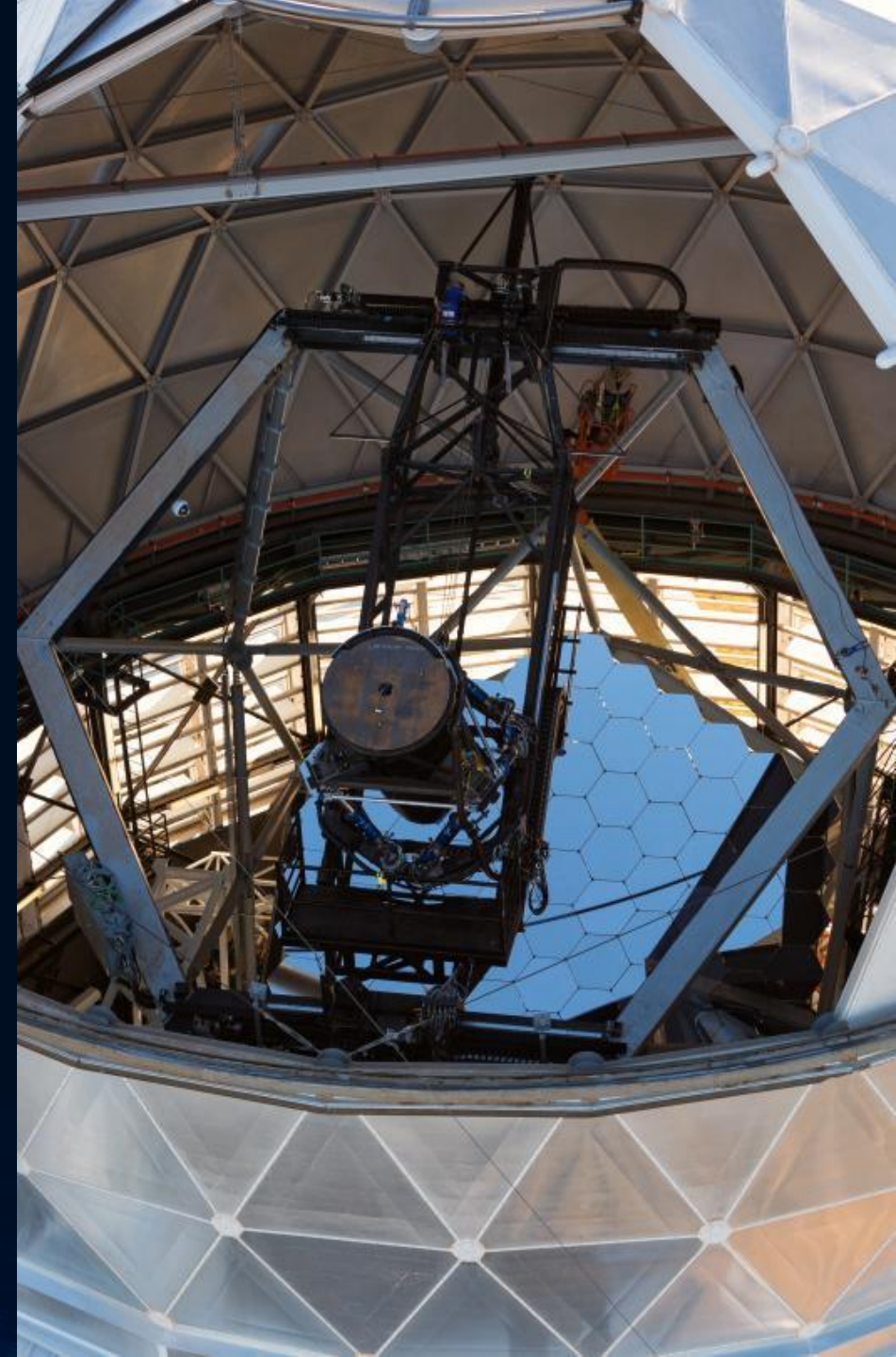


KECK



HET (Hobby-Eberly Telescope)

- McDonald opservatorija, višesegmentni
- Sferno ogledalo, 91 heksagonalni segment;
- kontrola položaja segmenta – senzor u centru krivine (toranj teleskopa); povremeno usmeri ka senzoru
- Dimenzije 11,1 x 9,8 m (koristi deo)
- Efektivni prečnik 9 m, fokusno rastojanje 13 m
- Cilj:
 - Što više svetlosti za spektroskopiju po što nižoj ceni



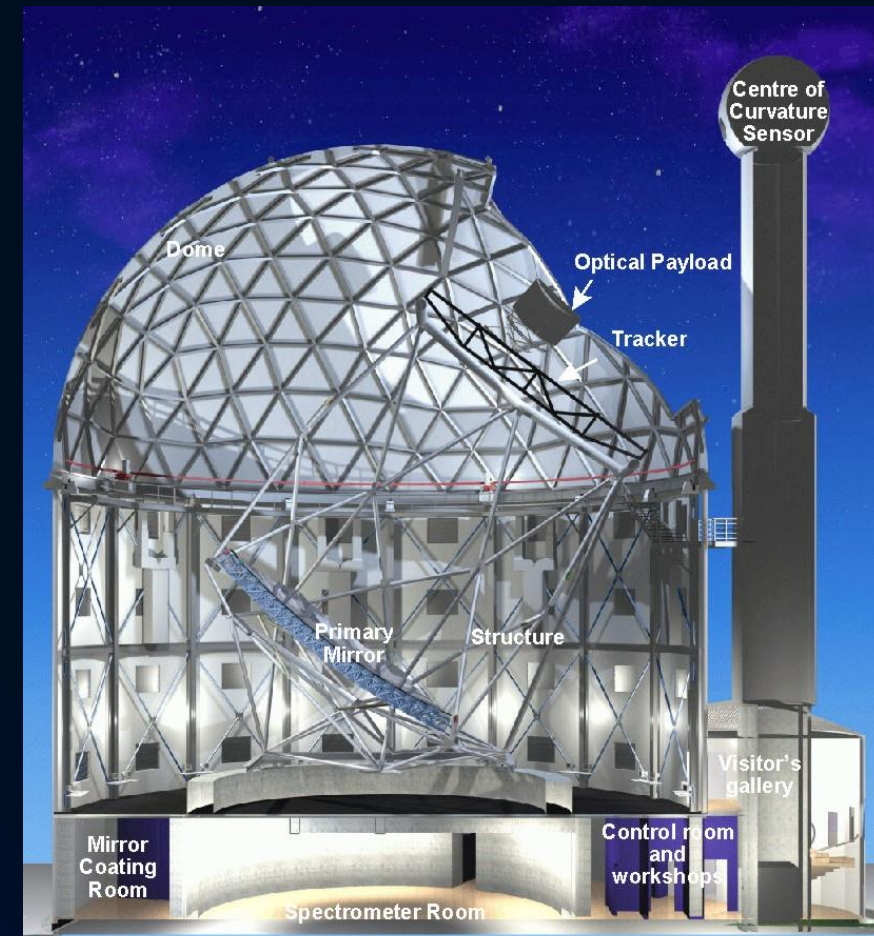
HET (Hobby-Eberly Telescope)

- Teleskop se može okretati po azimutu ali zenitska daljina optičke ose teleskopa je konstantna (35°)
- Posle izbora odgovarajućeg azimuta teleskop se ne pomera, pa praćenje izabranog nebeskog tela i fokusiranje njenog lika obezbeđuje sistem za praćenje koji pomera prijemnik (detektor) zračenja po sfernoj površi primarnog fokusa teleskopa
- Zahvaljujući takvoj konstrukciji cena teleskopa je znatno manja (za oko 80%) od cene teleskopa sa klasičnom konstrukcijom.





















SALT (Southern African Large Telescope)

- Prečnik 11 m, konstrukcija kao HET (poboljšanja)
- U Africi, na posmatračkoj stanici Sutherland SAAO (South African Astronomical Observatory)
- Optička osa – ugao 37° sa vertikalom
 - Mehanizam za praćenje – oko 2 sata, bez pomeranja teleskopa po azimutu
 - Širina pojasa za posmatranje 12°

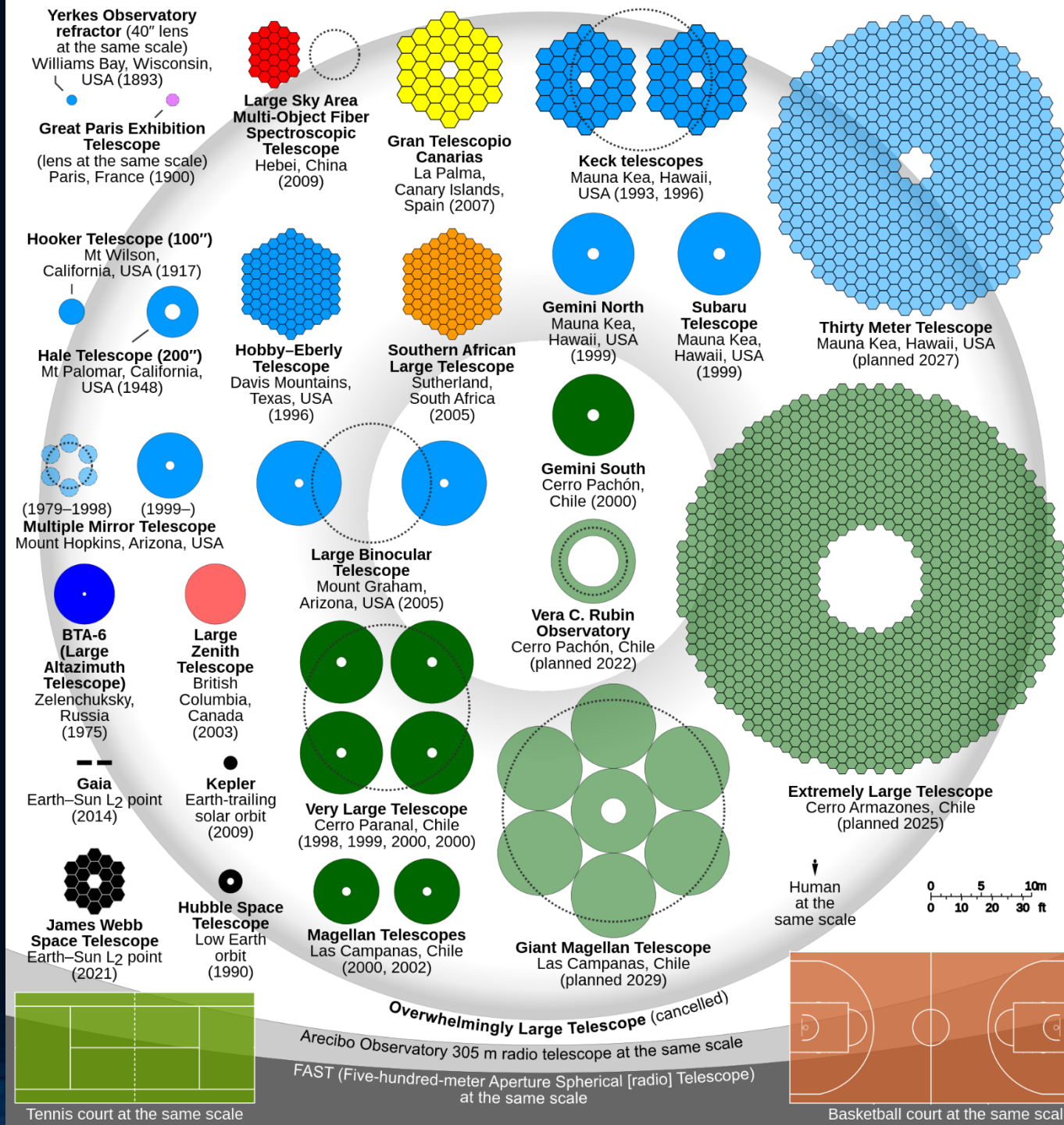


Reflecting telescopes

Name	Image	Effective aperture	Mirror type	Nationality / Sponsors	Site	First light
Large Binocular Telescope (LBT)		11.9 m (469 in) (combined) ^[2]	Multiple Two 8.4 m (331 in) mirrors	USA, Italy, Germany	Mount Graham International Observatory, Arizona, USA	2004
Gran Telescopio Canarias (GTC)		10.4 m (409 in)	Segmented 36 hexagonal segments	Spain, Mexico, USA	Roque de los Muchachos Obs., Canary Islands, Spain	2006
Hobby-Eberly Telescope (HET)		10 m (394 in) (effective) ^[3]	Segmented 91 × 1 m (39 in) hexagonal segments forming a 11 m × 9.8 m mirror	USA, Germany	McDonald Observatory, Texas, USA	1997 Aperture increased 2015
Keck 1		10 m (394 in)	Segmented 36 hexagonal segments	USA	Mauna Kea Observatories, Hawaii, USA	1993
Keck 2		10 m (394 in)	Segmented 36 hexagonal segments	USA	Mauna Kea Observatories, Hawaii, USA	1996
Southern African Large Telescope (SALT)		9.2 m (362 in) (effective) ^[4]	Segmented 91 × 1 m (39 in) hexagonal segments forming a 11 m × 9.8 m mirror	South Africa, USA, UK, Germany, Poland, New Zealand	South African Astronomical Obs., Northern Cape, South Africa	2005
Subaru (JNLT)		8.2 m (323 in)	Single	Japan	Mauna Kea Observatories, Hawaii, USA	1999
VLT UT1 – Antu		8.2 m (323 in)	Single	ESO Countries, Chile	Paranal Observatory, Antofagasta Region, Chile	1998
VLT UT2 – Kueyen		8.2 m (323 in)	Single	ESO Countries, Chile	Paranal Observatory, Antofagasta Region, Chile	1999
VLT UT3 – Melipal		8.2 m (323 in)	Single	ESO Countries, Chile	Paranal Observatory, Antofagasta Region, Chile	2000
VLT UT4 – Yepun		8.2 m (323 in)	Single	ESO Countries, Chile	Paranal Observatory, Antofagasta Region, Chile	2001
Gemini North (Gillet)		8.1 m (319 in)	Single	USA, UK, Canada, Chile, Australia, Argentina, Brazil	Mauna Kea Observatories, Hawaii, USA	1999
Gemini South		8.1 m (319 in)	Single	USA, UK, Canada, Chile, Australia, Argentina, Brazil	Cerro Pachón (CTIO), Coquimbo Region, Chile	2001
MMT (current optics)		6.5 m (256 in)	Single	USA	F. L. Whipple Obs., Arizona, USA	2000
Magellan 1 (Walter Baade)^[5]		6.5 m (256 in)	Single	USA	Las Campanas Obs., Atacama Region, Chile	2000
Magellan 2 (Landon Clay)		6.5 m (256 in)	Single	USA	Las Campanas Obs., Atacama Region, Chile	2002
BTA-6		6 m (236 in)	Single	USSR/Russia	Special Astrophysical Obs., Karachay–Cherkessia, Russia	1975
Large Zenith Telescope (LZT)		6 m (236 in)	Liquid	Canada, France, United States ^[6]	Maple Ridge, British Columbia, Canada	2003 Decommissioned 2016

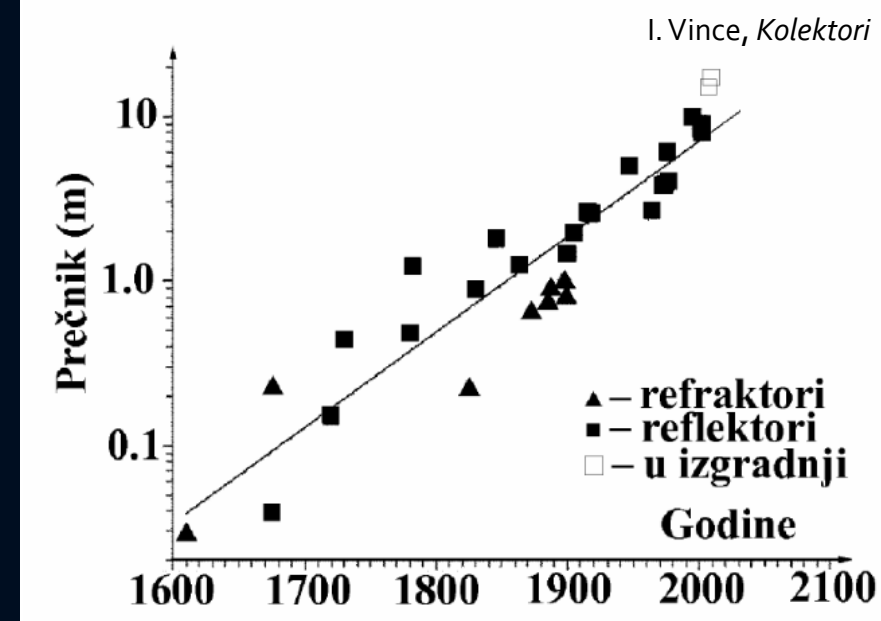
U planu

- ELT (Extremely Large Telescope)
 - Prvo ime E-ELT (European...)
 - Skraćeno 2017. god
 - ESO, 39.3 m (4.2 m sekundarno ogledalo)
 - 798 ogledala (šestougaoih), po 1.4 m (debljina 50 mm)
 - Atmosfera ekstrasolarnih planeta
 - First light: 2027 (plan)
- OWL (OverWhelmingly Large Telescope)
 - ESO (European Southern Observatory)
 - Prečnik 100 m
 - 2000 segmenata, od po 2,2 m
 - Do +38 mag! (1500 puta bolje nego HST)
 - Predložen 1998. godine
 - Tehnologija očekivana za 2010-15. god
 - Cena 1,5 milijardi \$\$\$
 - Napuštena ideja u korist ELT



Refraktori

- Toku istorije uglavnom su bili ispod reflektora
 - **Izuzetak – Hajgensov teleskop**, kraj 17. veka
- Bili su konkurenti do početka 20. veka
- Najveći refraktor, **Yerks opservatorija** (1897), 1,02 m
 - Žižna daljina 19,4 metara
 - Opservatorija zatvorena za javnost 1. oktobra 2018. godine
- Great Paris Exhibition Telescope (1900)
 - Prečnik, 1,25 m; žižna daljina 57 metara (čelična cev dužine 60 m)
 - najpopularniji eksponat na izložbi Paris Expo, 14. april – 1. novembar 1900,
 - Prodaja nije uspela, uništen; čuva se sočivo u opservatoriji u Parizu

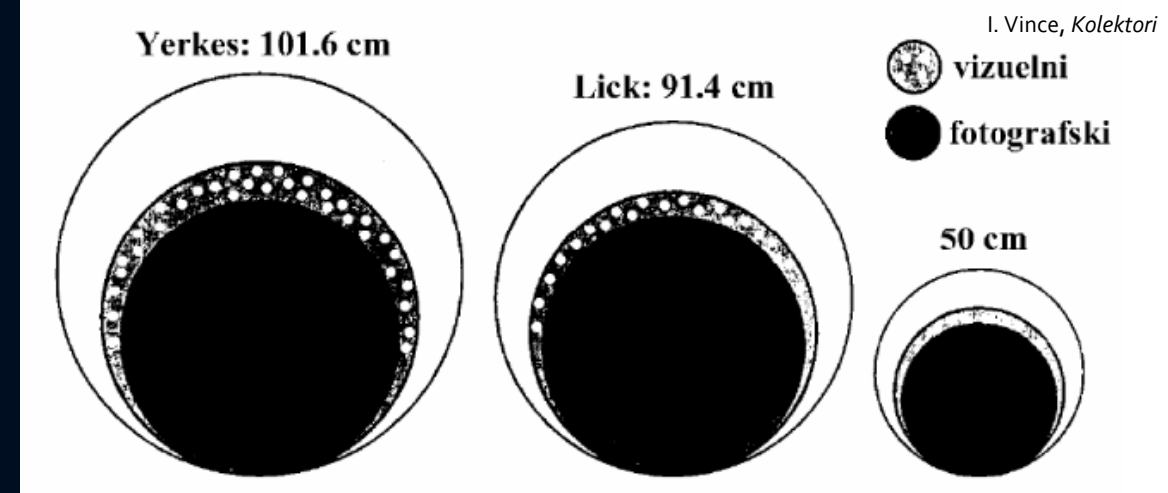


Refraktori

- Objektive većeg prečnika **nema svrhe praviti**, jer usled apsorpcije svetlosti u debelom sočivu (i refleksije na površinama), efikasnost objektiva se praktično ne povećava
- Broj prikupljenih fotona je proporcionalan površini objektiva, odn. kvadratu njegovog prečnika.
- Zbog postojanja **gubitaka** fotona u **interakciji sa materijom** objektiva broj fotona koji padaju na njega uvek će biti veći od broja fotona koji ga napuštaju.
- Odnos ovih veličina – efikasnost objektiva

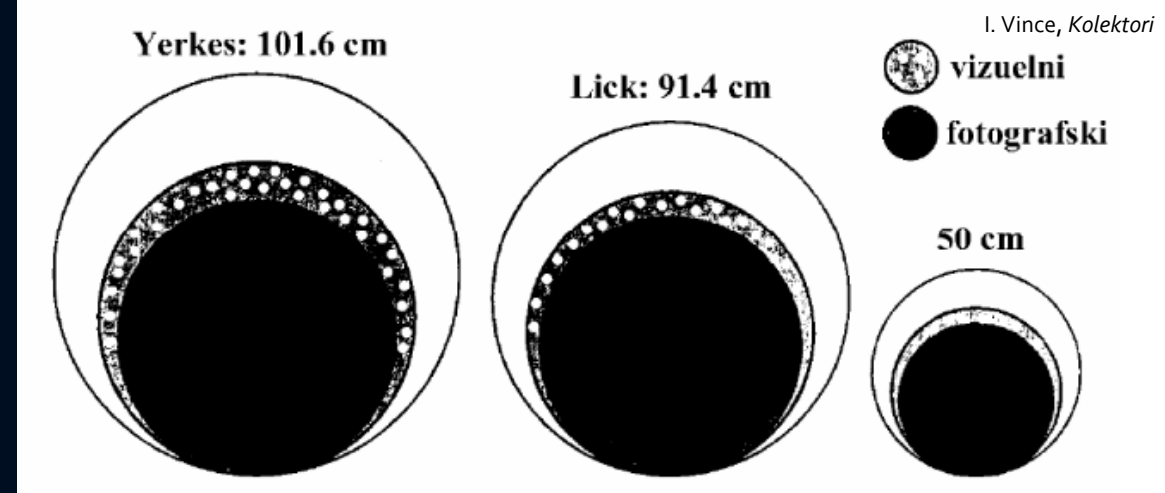
Refraktori

- Efektivna površina – mera efikasnosti
 - Efektivna površina je površina idealnog objektiva koja daje isti broj fotona kao i realan objektiv.
- Idealni objektiv nema gubitke (apsorpcije, refleksije) fotona
 - Broj fotona koji pada na takav objektiv jednak je broju fotona koji objektiv propušta
- Sa porastom prečnika objektiva refraktora sa 91 cm na 102 cm efektivna površina objektiva samo se neznato povećala
 - sa povećanjem prečnika objektiva povećava se i njegova zapremina i težina



Refraktori

- Teško je napraviti sočivo velike zapremine sa homogenim raspodelom materije.
- Obično se u zapremini sočiva javljaju sitne nehomogenosti u obliku mehurića koji kvare optički kvalitet sočiva.
- Pod velikom sopstvenom težinom u sočivu se javljaju deformacije koje dovode do znatnog odstupanja oblika sočiva od idealnog, što dovodi do kvara kvaliteta likova nebeskih tela.
- Sve ove negativnosti su uticale na to da se objektivni prečnika iznad jednog metra isključivo prave od ogledala.



Refraktori

- Prednosti nad reflektorima
 - postojanost objektiva - optičke osobine refraktora se veoma sporo menjaju u toku vremena, dok refleksioni sloj kod ogledala se često mora obnoviti, jer sposobnost refleksije pod uticajem atmosferskih uslova u toku vremena opada.
 - zbog konstrukcionih razlika teleskopa sa ogledalom i sočivom, refraktori u principu imaju bolji kontrast likova od reflektora.

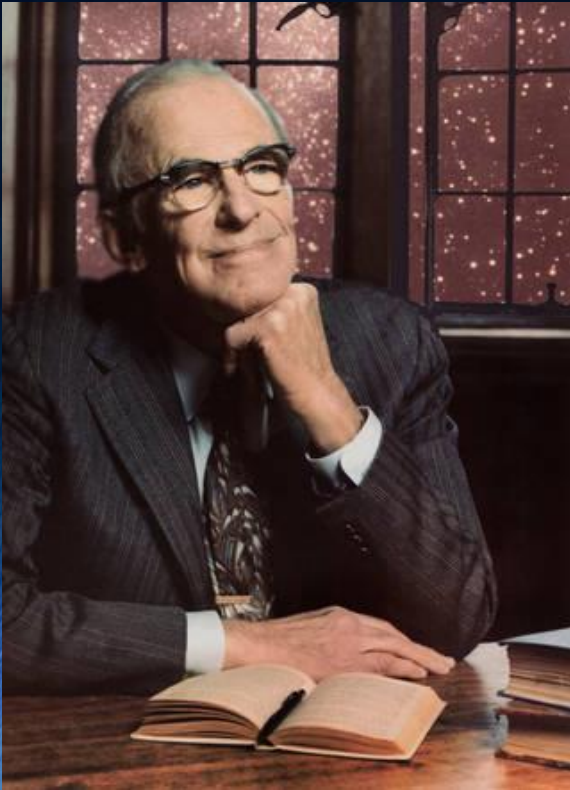


Najpoznatiji od svih – Hubble svemirski teleskop

Nije najveći ali je snimio većinu najljepših i najpoznatijih fotografija svemira...



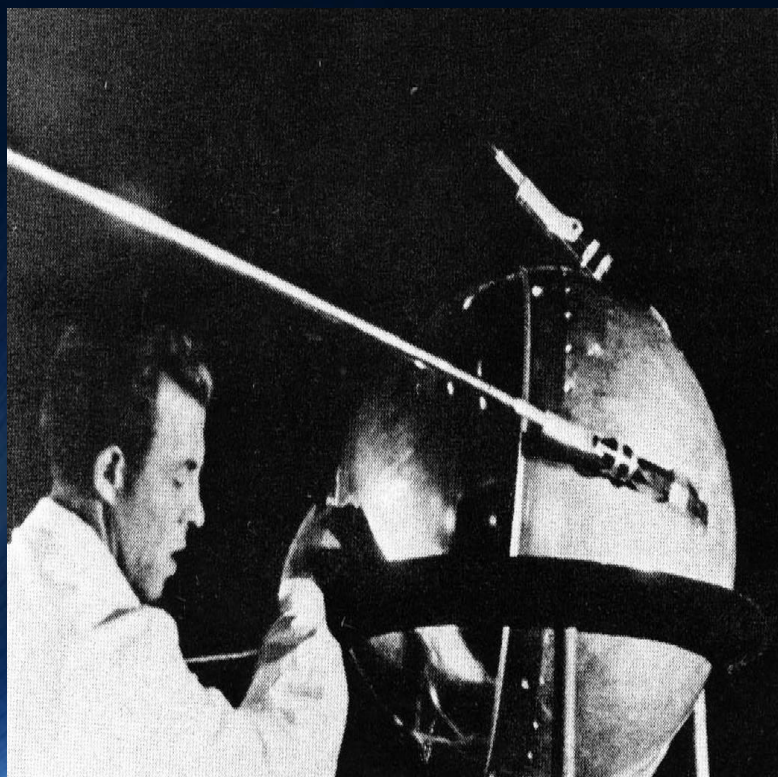
Pre lasniranja Hablovog teleskopa (HST)



- **1946. godina** – prvi rad o teleskopima u svemiru, tj. van atmosfere naše planete
- Jr. Lyman Spitzer, *Report to project rand: Astronomical advantages of an extra-terrestrial observatory*, *Astronomy Quarterly*, Vol. 7, No 3 (1990), 131-142 (reprint rada iz 1946. godine)

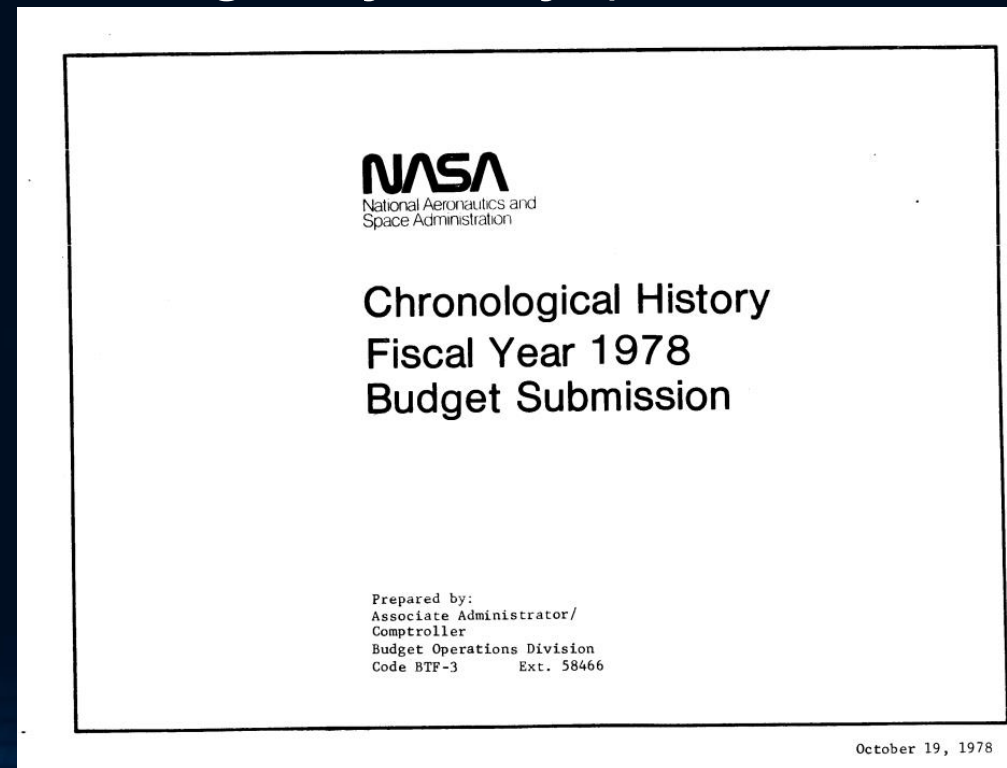
Početak Istraživanja svemira

- 4. oktobar 1957. – lansiran Sputnik
- 1. oktobar 1958. – osnovana NASA



Početak izgradnje HST

- **1974** – sastanak prvih radnih grupa za izgradnju Velikog svemirskog teleskopa (LST), kako je tada nazvan
- **1. oktobar 1977** – Kongres SAD odobrio finansiranje i projekat izgradnje LST je počeo



October 19, 1978

Početak izgradnje HST

- **Decembar 1978** – početak konstrukcije primarnog ogledala od 2,4 metar
- **1979** – počele su pripreme astronauta za servisne misije

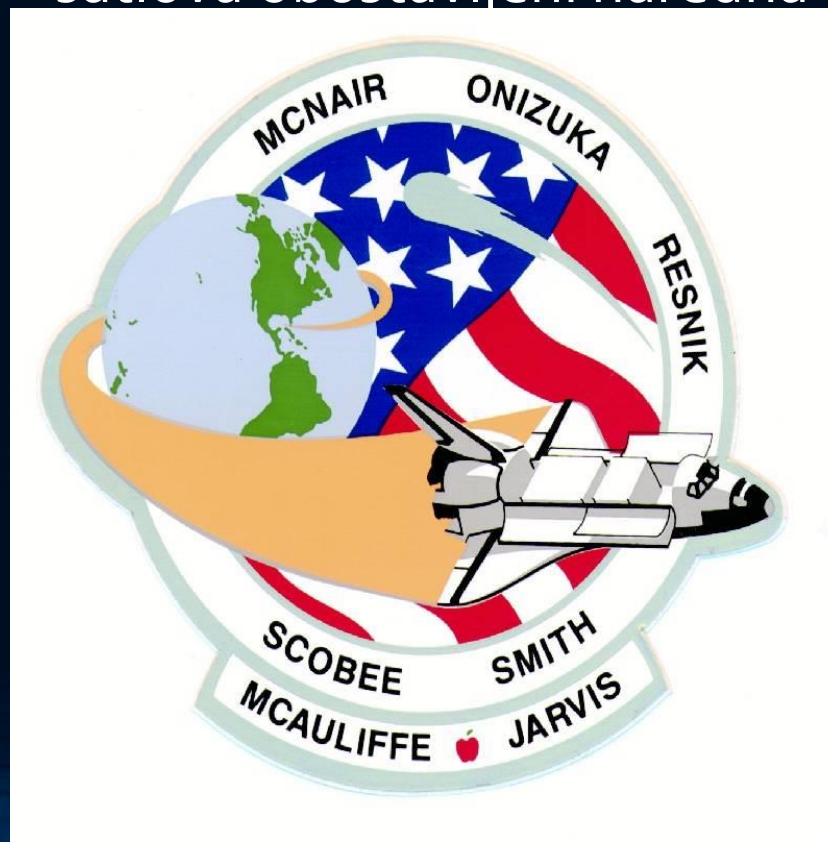


Izgradnja HST

- **1983** – LST je promenio ime u Hablov svemirski teleskop (HST), u čast astronoma Edvina



- **26. januar 1986** – eksplodirao šatl Kolumbija. Svi letovi šatlova obustavljeni naredna 32



Lansiranje – 25. april 1990



- Posada šatla Discovery postavila je Hablov teleskop na orbitu oko Zemlje

Prvo „svetlo“ HST

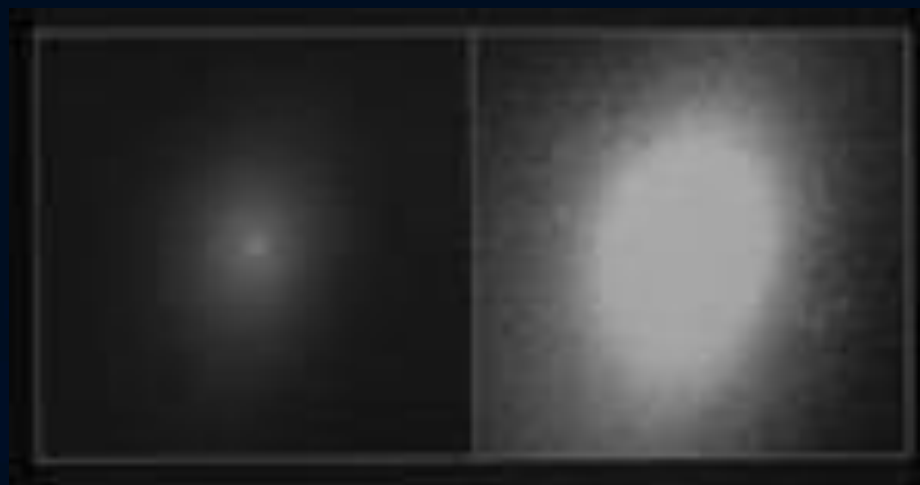
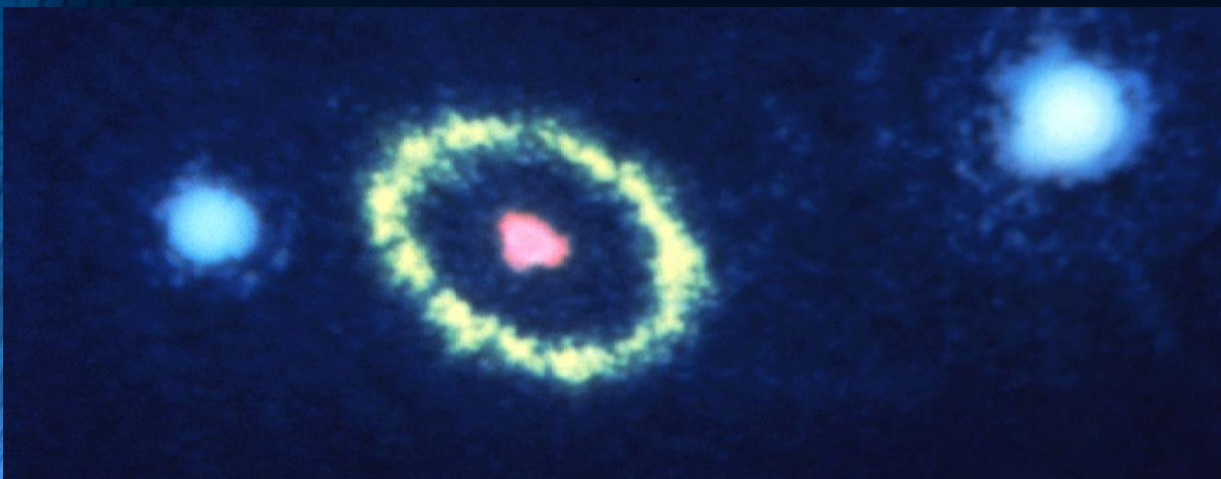


- 20. maj 1990. godine – HST je snimio prvu fotografiju
- Jato NGC 3532, u blizini magline *Carina*



1990. godina

- **29. avgust** – snimljen prsten supernove 1987A
- **1. oktobar** – poslat prvi HST rad (rezultati posmatranja okoline crne rupe u jezgzu galaksije NGC 7457).

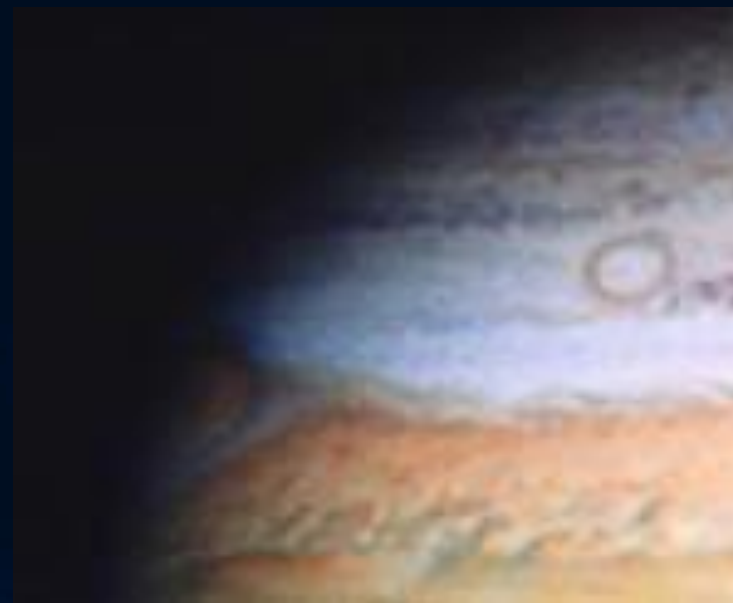


1991. godina

- 16. januar - Tačno merenje rastojanja do Velikog magelanovog oblaka, na osnovu posmatranja ostatka supernove 1987A



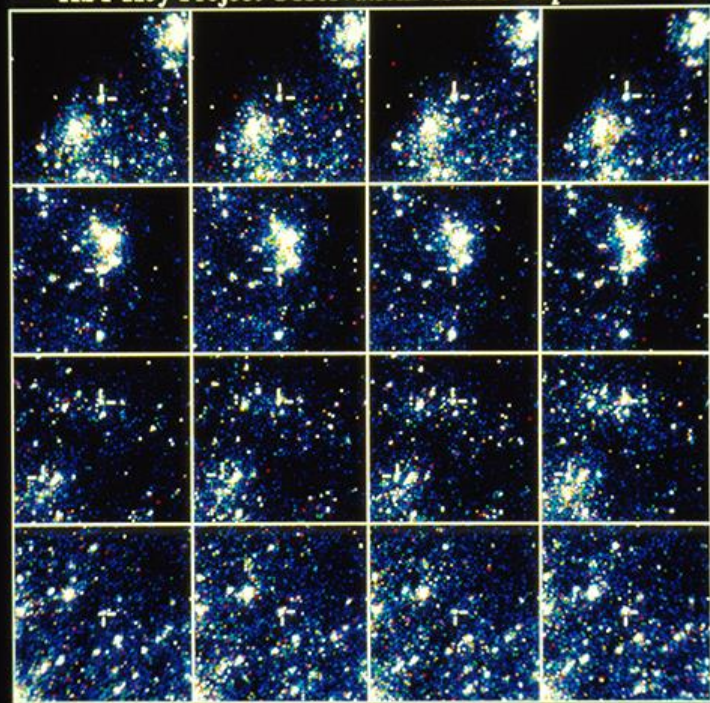
- 17. maj – prva Hablova fotografija Jupitera



1993. godina

- 9. jun – određeno tačno rastojanje do galaksije M81 11 miliona svetlosnih godina (prethodna vrednost između

HST Key Project Observations of M81 Cepheids



- 2 – 13 decembar – prva servisna misija (STS-61)
- Instalirana nova kamera *Wide Field and Planetary Camera* i drugi o

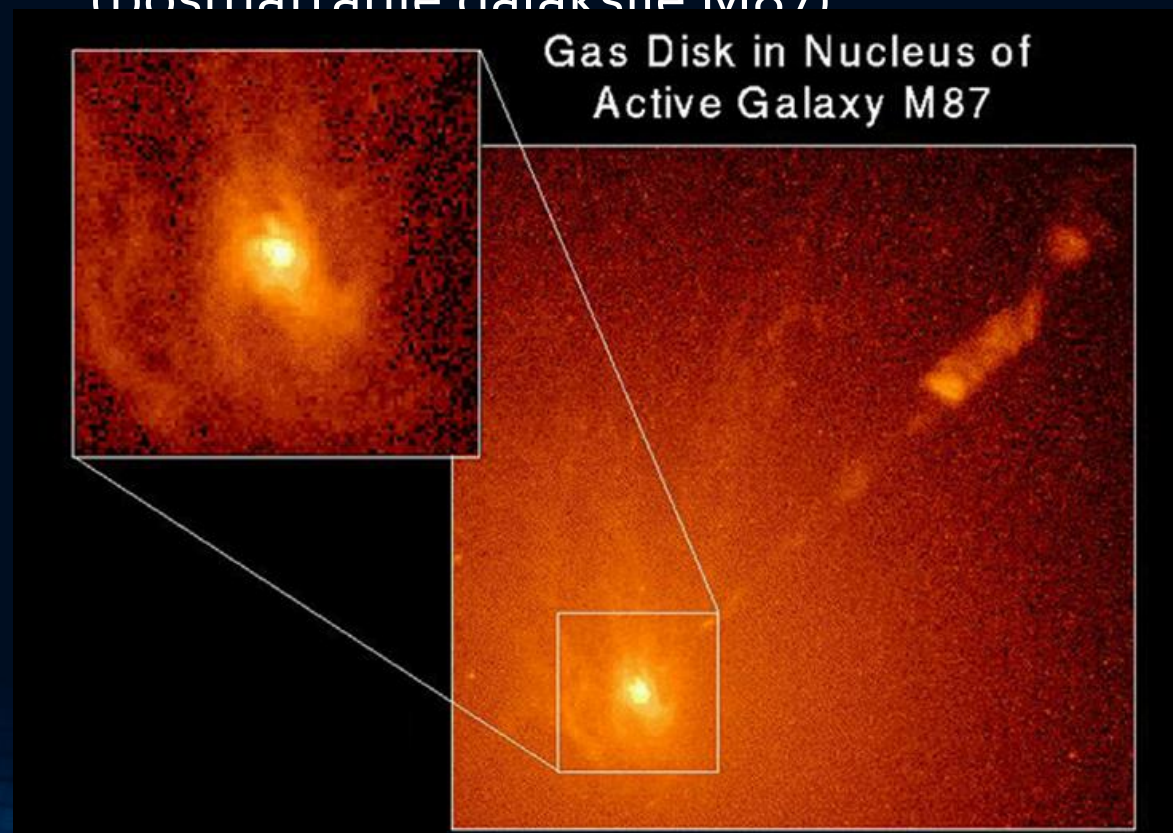


1994. godina

- 13. januar – NASA objavila da je prva servisna misija uspešno rešila probleme koji su nastajali usled sferne aberacije na



- 25. maj – potvrđeno postojanje supermasivnih crnih rupa (posmatranje galaksije M87)

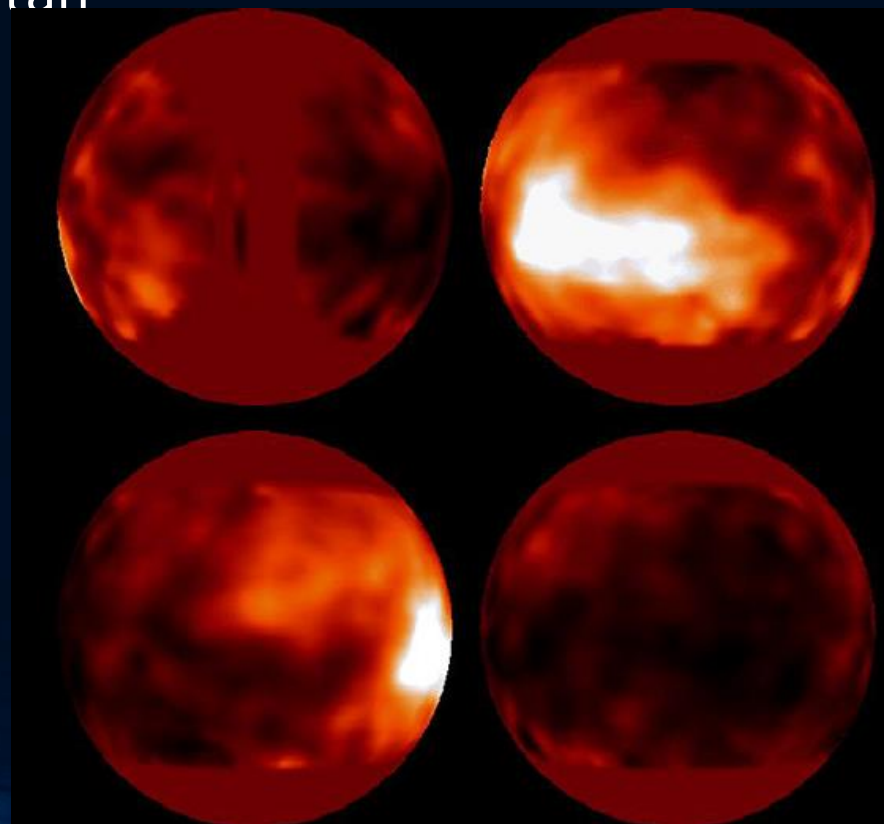


1994. godina

- 16 – 23. jul – snimljen udar komete Shoemaker-Levy 9 u Jupiter



- 8. novembar – snimljena površina Saturnovog satelita Titan



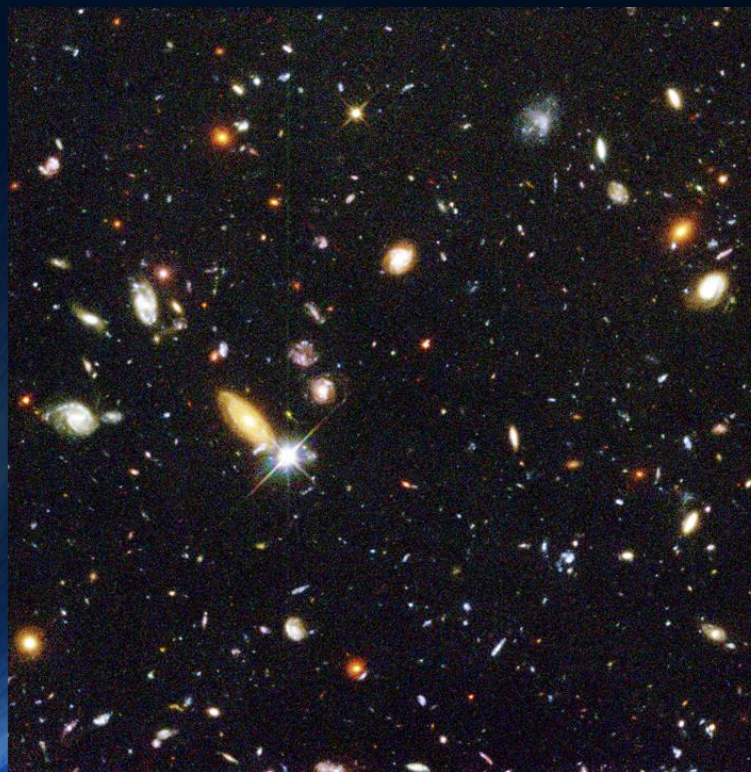
1995. godina

- 23. februar – detektovan kiseonik na Jupiterovom satelitu Evropa
- 2. novembar – snimljena oblast gde nastaju zvezde u maglini Orao

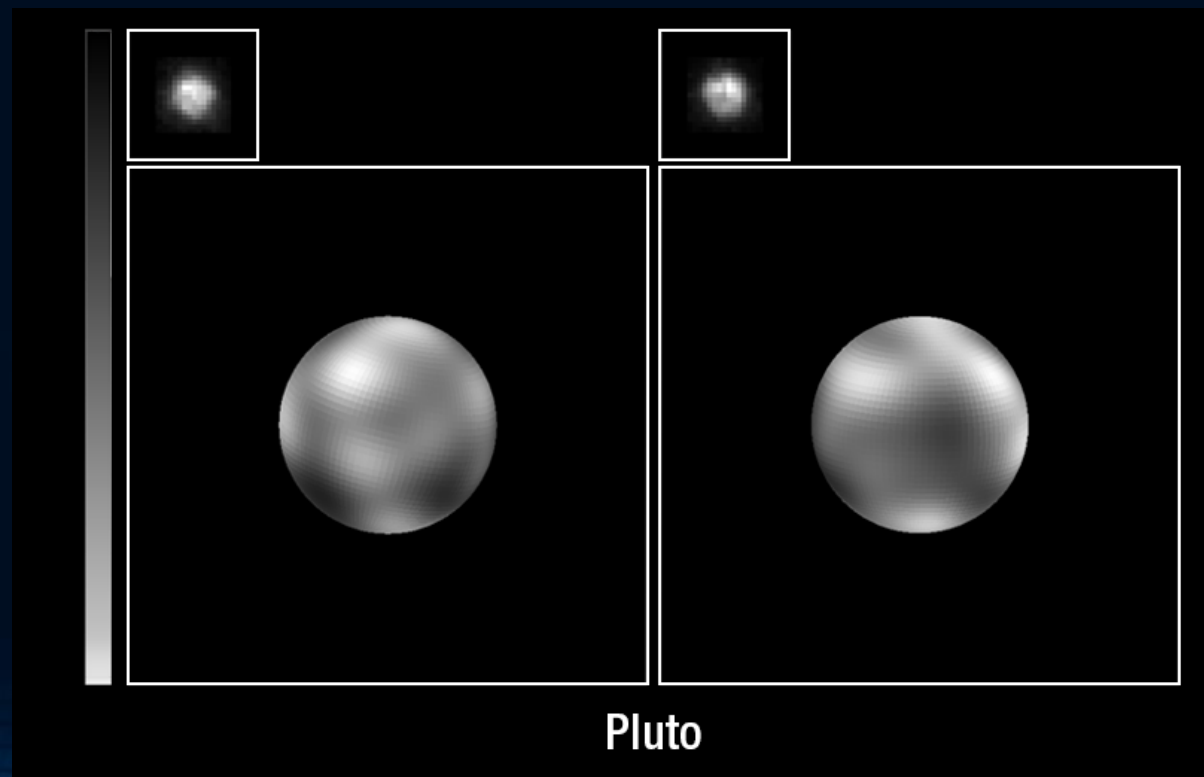


1996. godina

- 15. januar – snimljeno prvo (Hablovo) Duboko polje



- 7. mart – snimljena površina Plutona

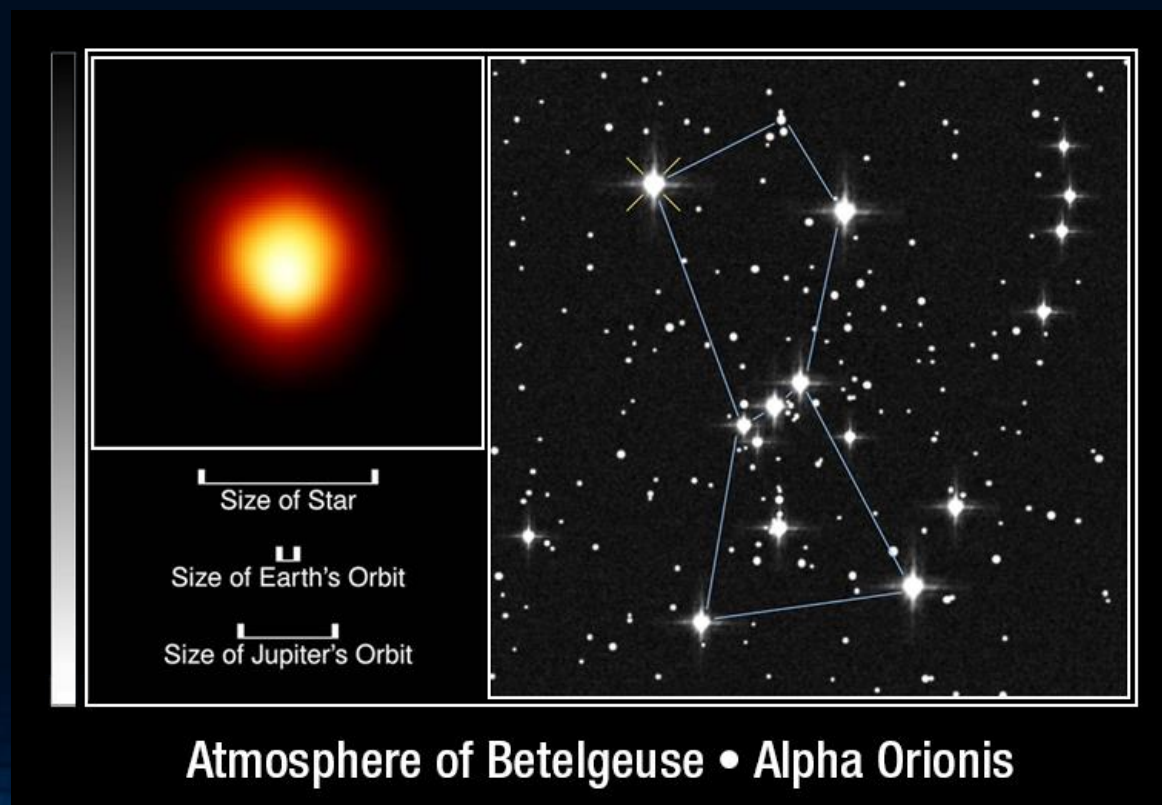


1996. godina

- 22. jun – HST snimio 100.000. fotografiju

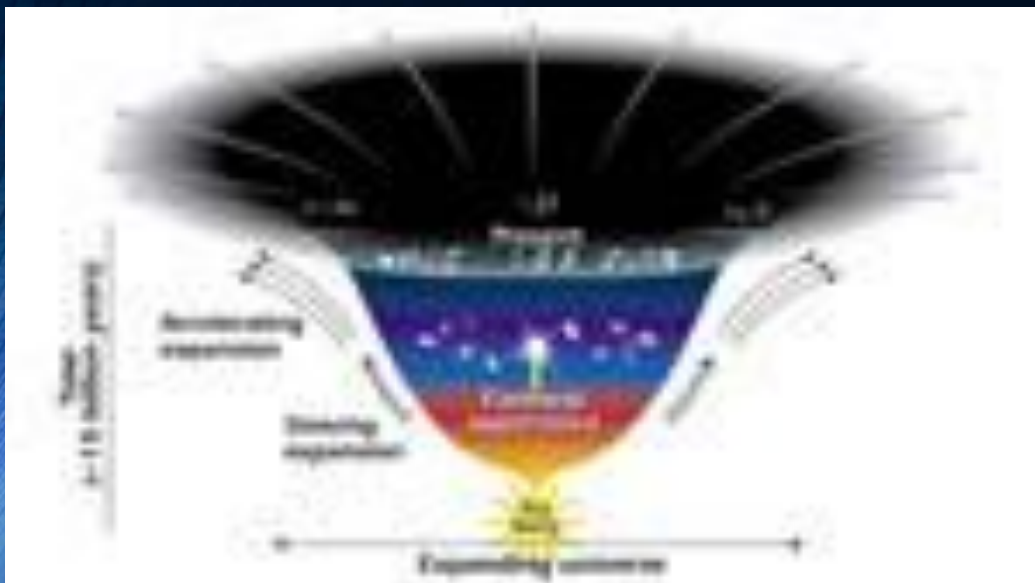


- 10. decembar – prva direktna fotografija neke zvezde

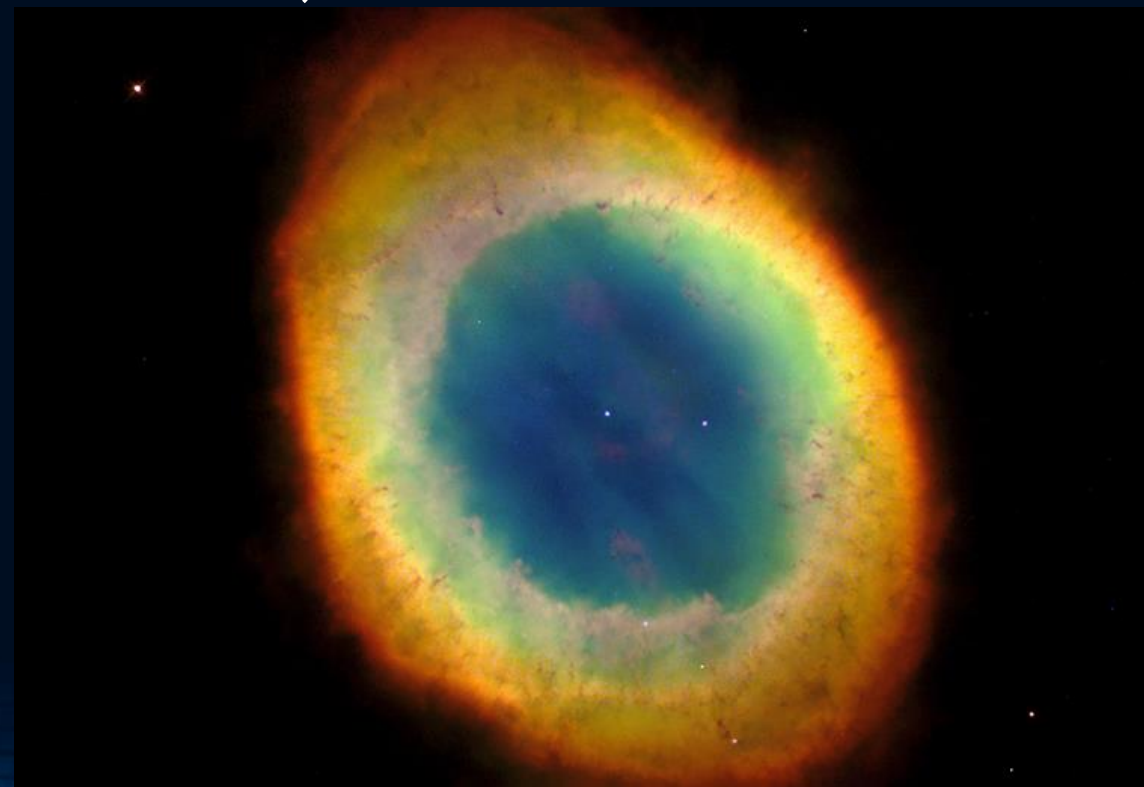


1998. I 1999. godina

- Septembar – prvi preliminarni rezultati za ubrzano širenje svemira – posmatranje supernovih

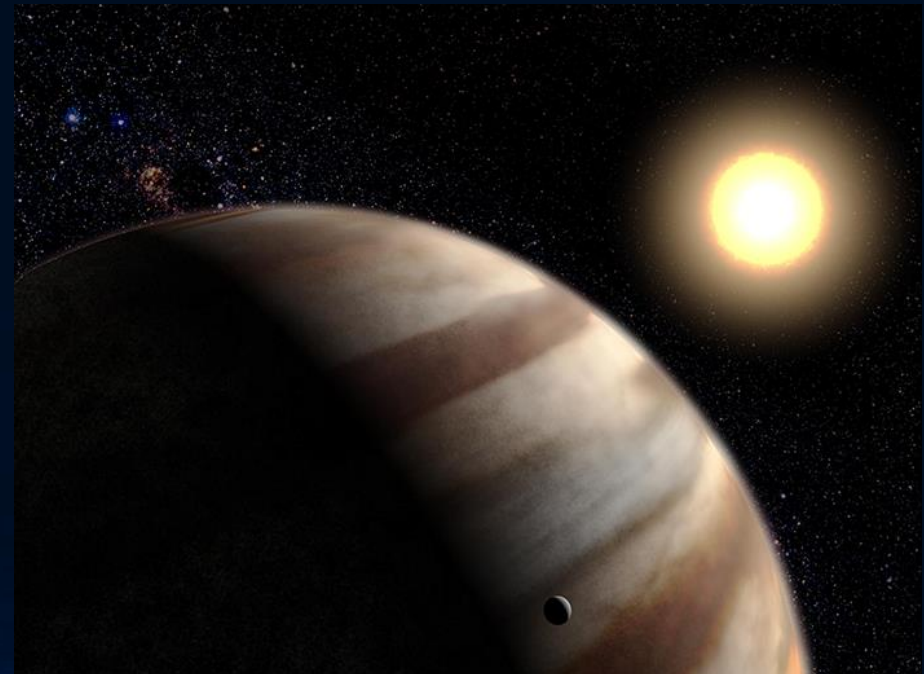
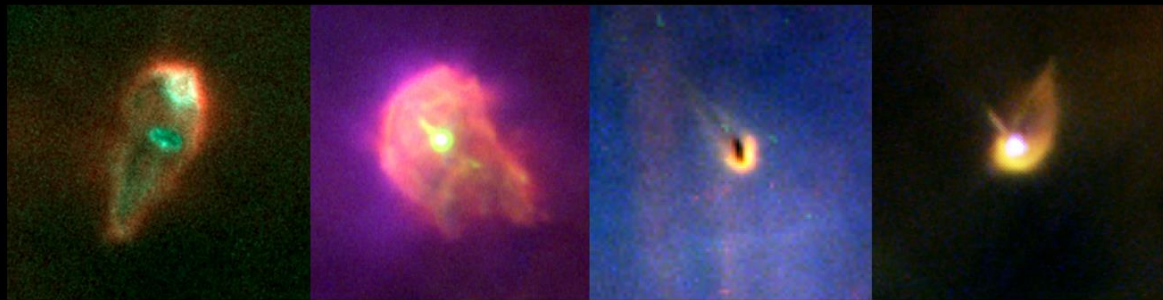


- 6. januar 1999 – najoštrija fotografija magline M57 (*Ring Nebula*)



2001. godina

- 26. april – prva direktna fotografija formiranja planeta
- 27. novembar – prva direktna detekcija atmosfere vansolarne planete



2004. godina

- 9. mart – objavljena Hubble Ultra Deep Field fotografija

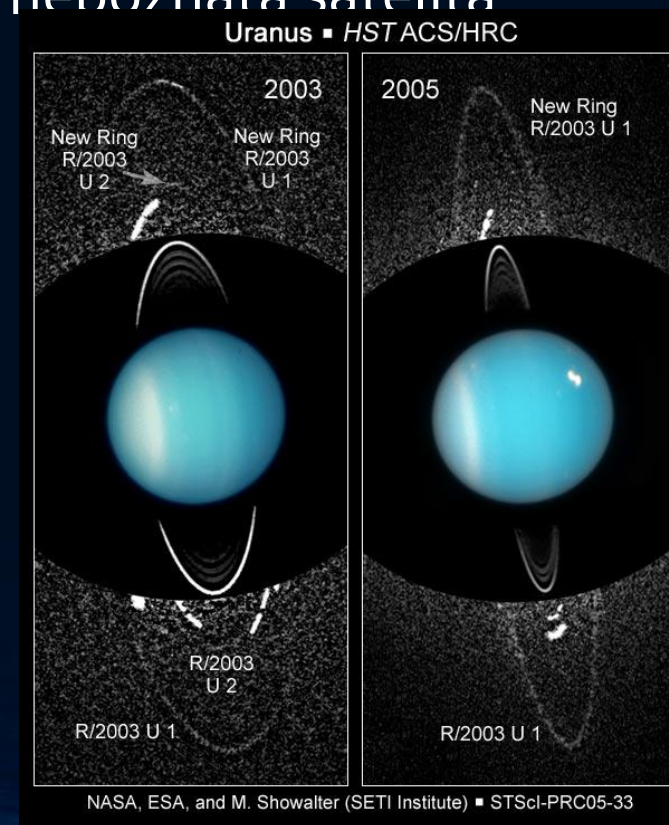
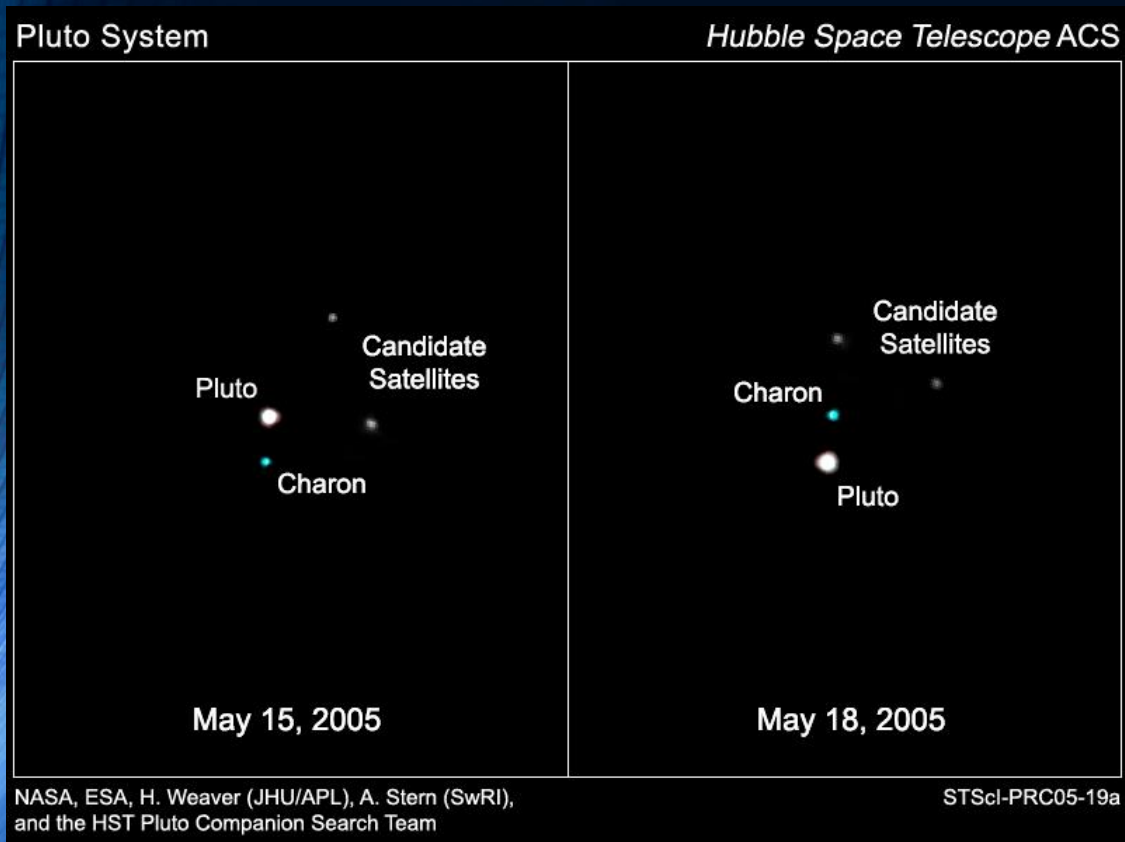


Hubble Ultra Deep Field
Hubble Space Telescope • Advanced Camera for Surveys

2005. godina

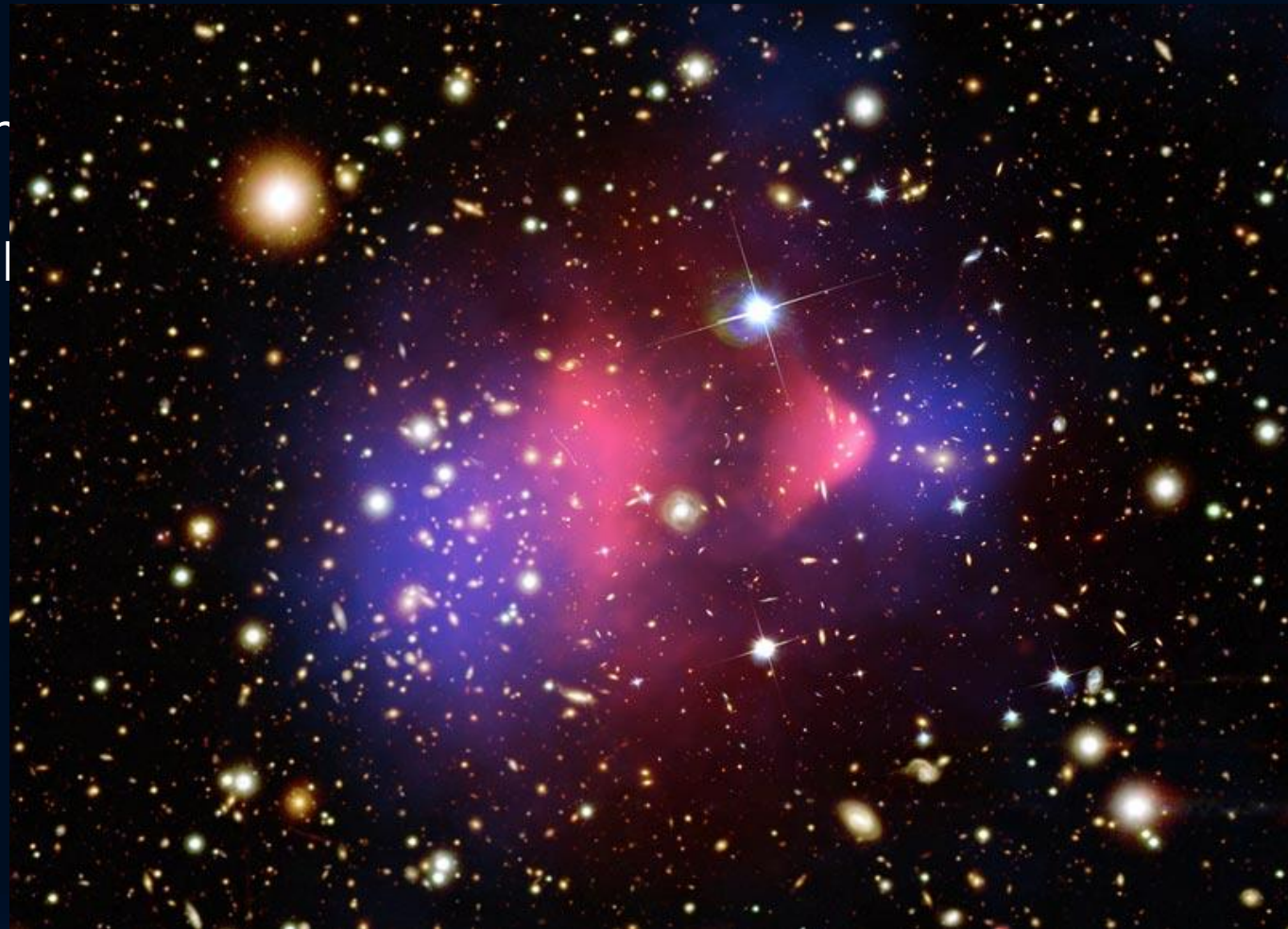
- 31. oktobar – otkrivena dva Plutonova satelita

- 22. decembar – otkrivena dva nova Uranova prstena i dva, do tada, nepoznata satelita



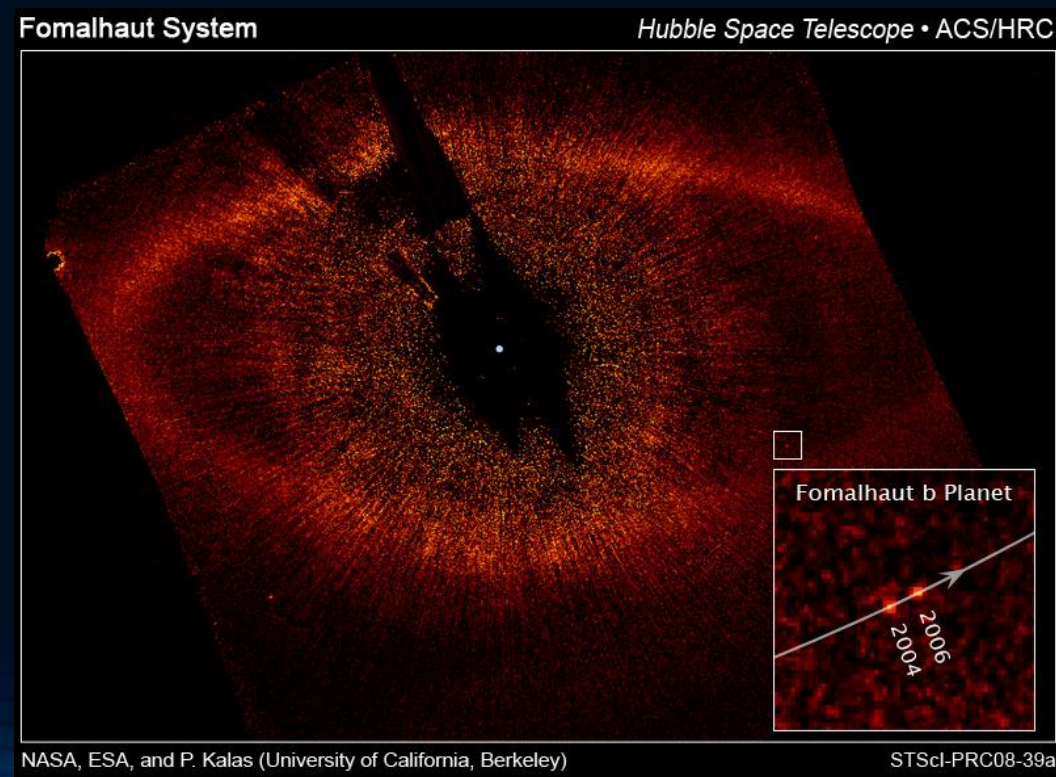
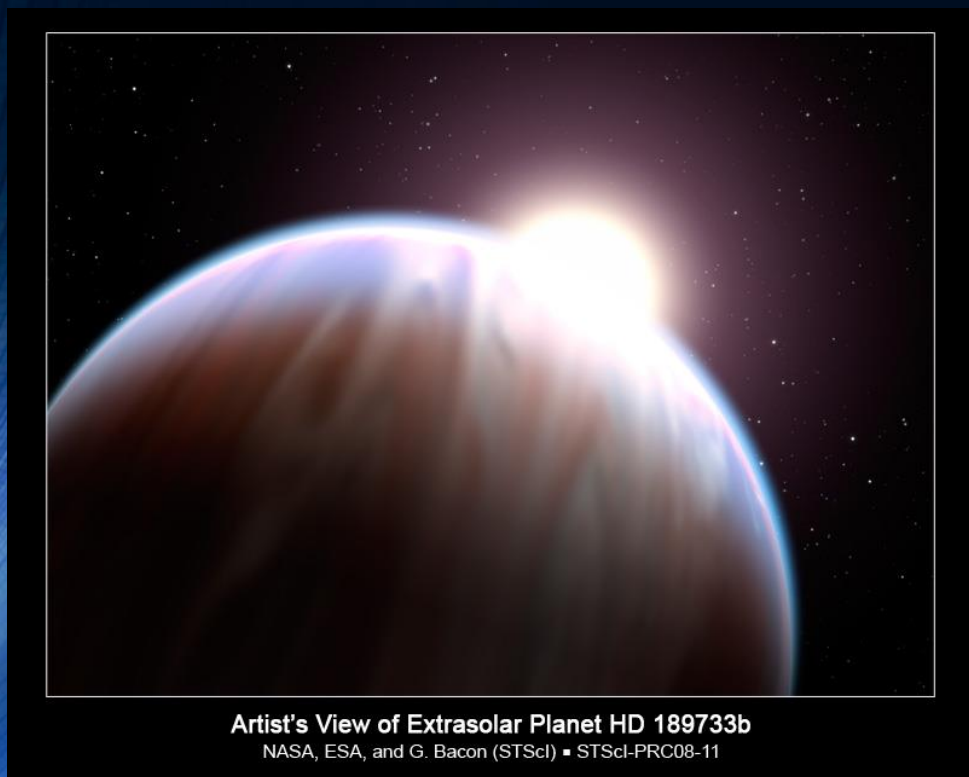
2006. godina

- 21. avgust – snimljen direktan dokaz postojanja tamne materije u galaktičkom jatu 1E0657-56 (poznat kao *Bullet Cluster*, tj. jato Metak)



2008. godina

- 19. mart – snimljen prvi spektar organskih molekula u atmosferi planete van Sunčevog sistema
- 13. novembar – snimljena prva fotorgafija ekstrasolarne planete u vidljivom delu spektra



2012. godina

- 25. septembar – objavljena fotografija eXtreme Deep Field

Hubble eXtreme Deep Field (XDF)

HST • ACS/WFC • WFC3/IR



NASA and ESA

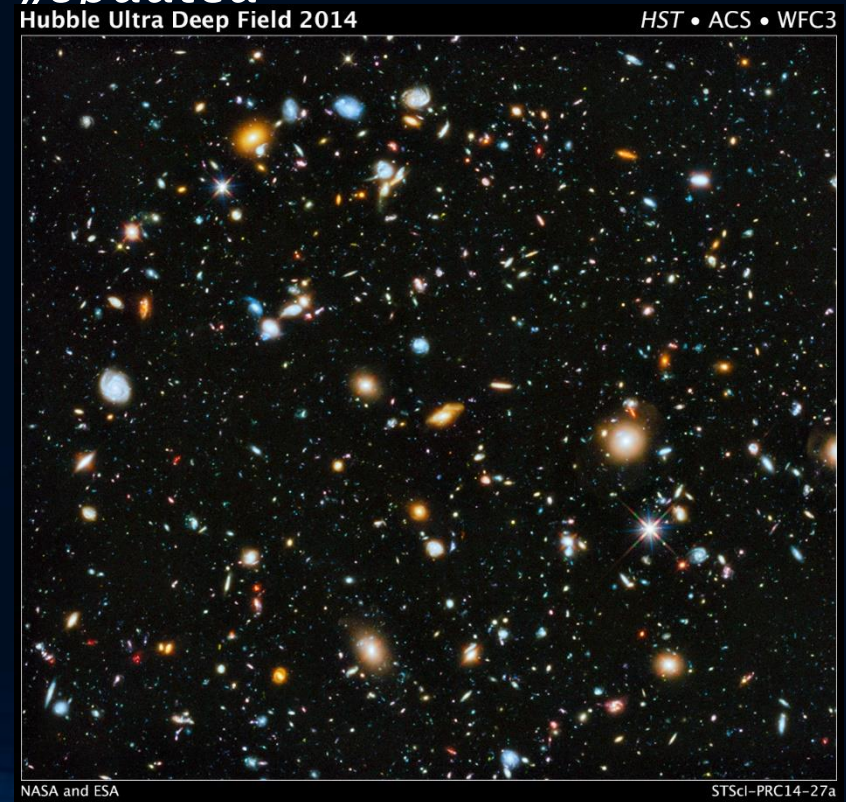
STScI-PRC12-37

2014. godina

- 7. januar – snimljena prva *Frontier Field* fotografija (galaktičko jato Abell 2744)



- 3. jun – snimljena fotografija *Hubble Ultra Deep Field* „updated“



2016. godina

- 3. mart – objavljen snimak do tada najudaljenije snimljene galaksije, GN-z11 (13,4 milijarde svetlosnih godina, tj. 400 milijardi godina nakon Velikog



- 26. april – otkriven satelit patuljaste planete *Makemake*



2017. godina

- 16. oktobar – HST snimio izvor gravitacionih talasa (sudar dve neutronske zvezde u galaksiji NGC 4993, na oko 130 miliona kilometara od nas). Ovo je bio prvi zabeleženi svetlosni signal iz izvora gravitacionih talasa.



2019. godina

- 2. maj – objavljena najveća deep-field fotografija

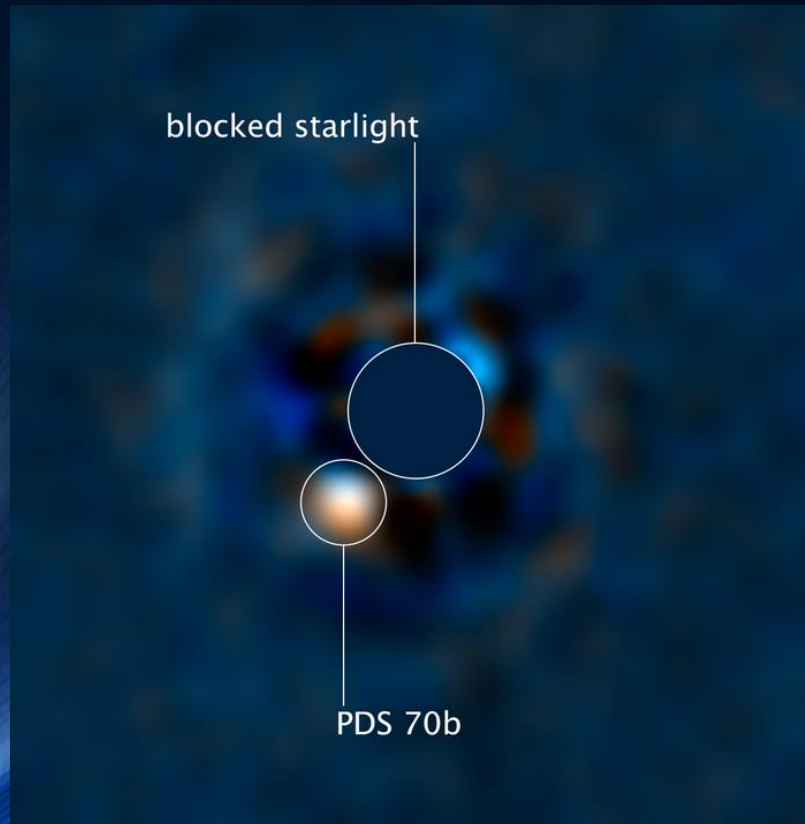


- 13. septembar – detektovana vodena para u atmosferi planete koja se nalazi u nastanjivoj zoni



2021. godina

- 29. april – snimljena ekstrasolarna planeta u fazi formiranja (rasta). U pitanju je

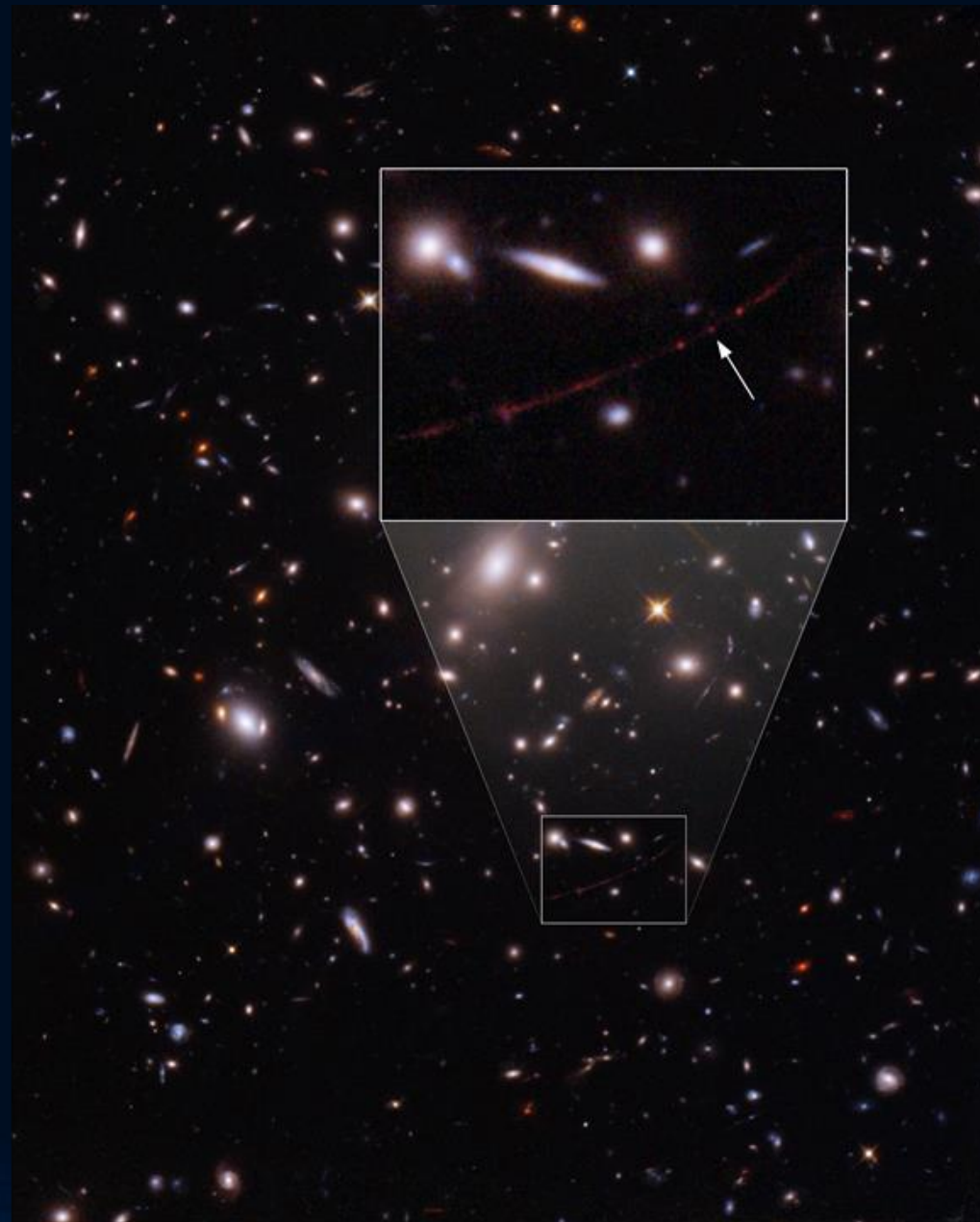


- 28. jun – prvi ubedljivi dokaz za postojanje novog tipa supernovih, tzv. Supernove sa zahvatom elektrona. Ovaj tip supernova kandidat je da objasni veliki sjaj



2022. godina

- 30. april – HST oborio sopstveni rekord i snimio najudaljeniju zvezdu na rastojanju od 12,9 milijardi svetlosnih godina (4 milijarde svetlostnih godina dalje od prethodnog rekorda)





I još milioni fotografija, i
desetine hiljada naučnih radova

A budućnost je počela sa Džejms Veb Teleskopom...

Carina Nebula



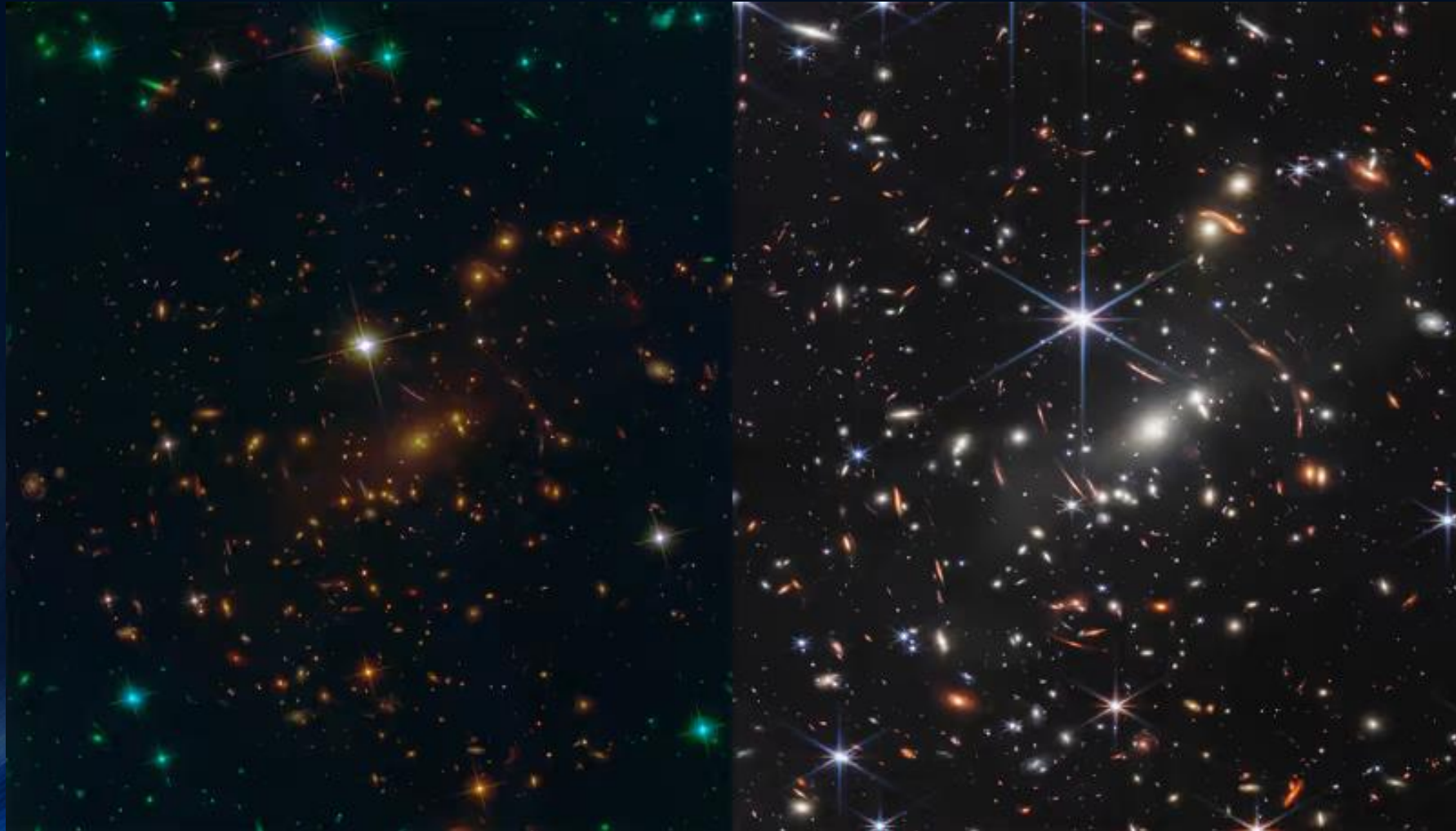
Southern Ring Nebula



Stephan's Quintet



SMACS 0723 – „deep field“



Karakteristike teleskopa

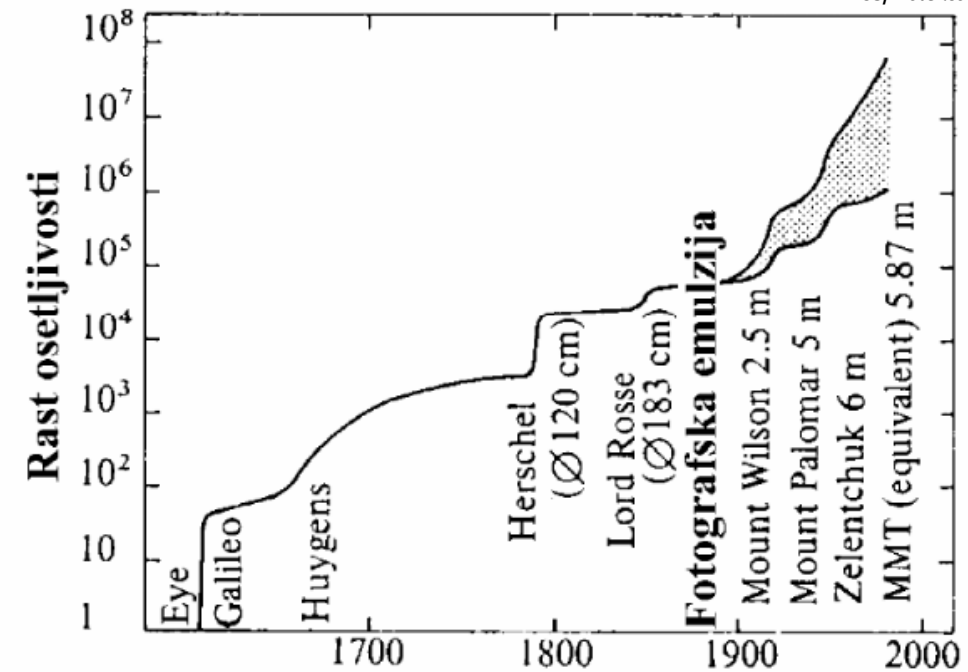
Efikasnost objektiva

- Efikasnost teleskopskog objektiva (ili teleskopskog sistema) može se izraziti i preko broja prikupljenih i detektovanih fotona.

- Jedan od načina - odnos broja fotona koju prikupi teleskop prema broju fotona koju prikupi oko → **osetljivost teleskopa**

- **Osetljivost teleskopa**

- najveći skok u osetljivosti zabeležen upotrebom prvih teleskopa (npr. Galilejevog teleskopa) na početku 17. veka
- Kriva rasta osetljivosti teleskopa se grana početkom upotrebe fotografske emulzije kao detektora na fotografsku i vizuelnu (detektor je oko) granu
- Fotografska grana je iznad vizuelne, tj. osetljivost fotografije (kasnije fotoelektričnih detektora) veća je od oka zahvaljujući sposobnosti vremenske integracije fotomaterijala.



Osetljivost teleskopa

- Ne samo od broja prikupljenih fotona i osobine prijemnika, nego i
 - kvalitet Zemljine atmosfere iznad teleskopa (tzv. kvaliteta neba)
 - optički sistem
- Broj prikupljenih fotona je proporcionalan površini objektiva, tj. kvadratu njegovog prečnika
 - efikasnost teleskopa, tj. sposobnost teleskopa da na nekom prijemniku registruje zračenje sa unapred zadatom tačnošću, takođe **proporcionalna kvadratu prečnika** objektiva (?)
 - U slučaju posmatranja nebeskih tela slabog sjaja, taj na intuiciji zasnovan zaključak **nije tačan**.

Ugaona razdvojna moć

- Ugaona razdvojna moć (rezolucija) – sledeća važna osobina objektiva
- Teorijska – određena difrakcijom svetlosti na objektivu
 - Najveća moguća ugaona razdvojna moć
- Ostali elementi teleskopa (dodatni optički elementi, npr. sekundarno ogledalo ili okular, detektor zračenja itd.) mogu smanjiti razdvojnu moć
- Rastojanje do posmatranog objekta znatno veće od žižne daljine objektiva
 - Možemo smatrati da se predmet nalazi u beskonačnosti

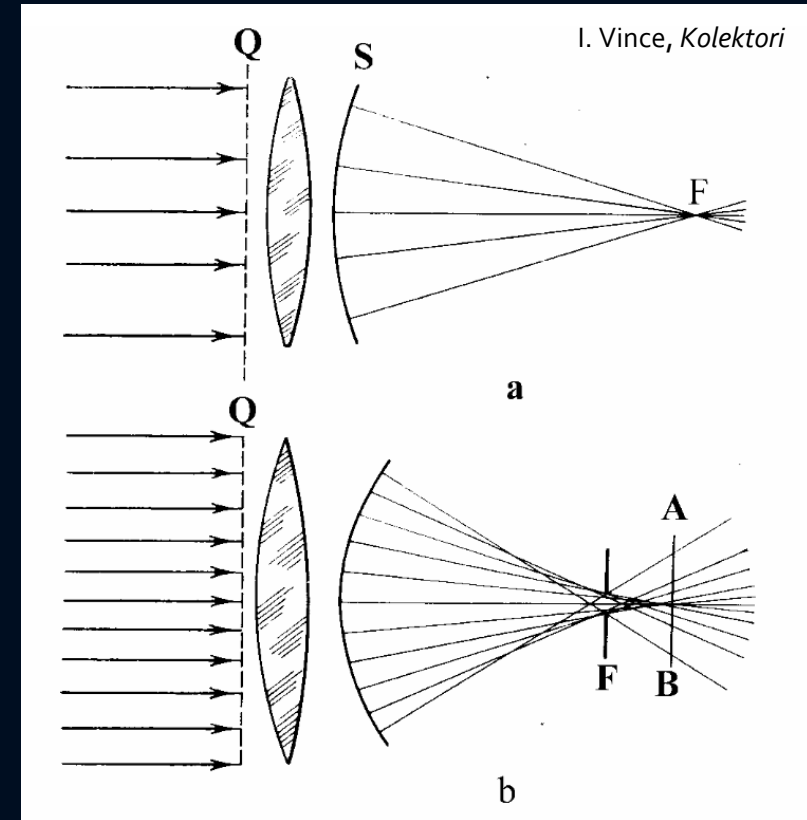


Aberacije

- Osim već pomenutih efekata, smanjenju ugaone razdvojne moći i kontrastnosti optike doprinose i odstupanja talasnog fronta zračenja od idealnog pod uticajem aberacija.
- Idealni optički sistem:
 - Svakoj tački predmeta odgovara jedna tačka lika, tj. lik tačke je tačka
- Ako optički sistem preslikava lik tačke u tačku onda kažemo da je **homocentričan**, a preslikavanje je **stigmatično**.

Aberacije

- U astronomskim teleskopima, s obzirom da se predmet posmatranja praktično nalazi u beskonačnosti, homocentričnost se svodi na uslov da ravan talasni front (Q) posle prolaska kroz objektiv postaje sferni (S).
- Odstupanje fronta talasa od sfernog oblika dovodi do nehomocentričnosti.
- Slika: uticaj homocentričnog (a) i nehomocentričnog (b) objektivna na talasni front.
 - Vidi se da kod nehomocentričnog objektivna lik ima, u izabranoj žižnoj ravni (F), konačnu veličinu (nije tačka).
 - Takve greške optičkog sistema se zovu aberacije.
- Aberacije su veoma nepoželjne pojave, jer utiču na kvalitet lika (npr. smanjuju razdvojnu moć optičkih instrumenata).



Monohromatska aberacija

- Aberacije nastaju zbog izrade optičkih elemenata na osnovu zakona izvedenih pod pretpostavkom da su uglovi skretanja zrakova na optičkim elementima mali.
 - Na primer: prilikom razmatranja odbijanja i prelamanja svetlosti na granici optičkih površina zanemaruju se drugi ili viši članovi u razvoju trigonometrijskih funkcija u redove.
- Aberacije su greške koje se javljaju u optičkim sistemima **zbog uvođenja određenih matematičkih aproksimacija** prilikom proračuna oblika optičkih elemenata, a **ne zbog grešaka izrade ili nesavršenosti optičkih površina**.
 - Aproksimacije se uvode upravo zbog uprošćavanja tehnologije izrade optičkih elemenata
- Ove vrste grešaka se zovu **monohromatske ili geometrijske aberacije**.

Hromatska aberacija

- Aberacija koja nastaje zbog zavisnosti **indeksa prelamanja** svetlosti od **talasne dužine** zračenja.
- Indeks prelamanja svetlosti se nalazi u jednačinama koji opisuju prelamanje zraka kada svetlost prelazi iz jedne u drugu optičku sredinu.
- Zanemarivanje ove zavisnosti u izradi optičkih elemenata takođe će dovesti do određene greške u preslikavanju koja se zove **hromatska aberacija**.

Aberacije

- Za astronomsku posmatračku opremu bitne su one aberacije koje potiču od zanemarivanja drugog člana razvoja u red, tj. zbog upotrebe teorije prvog reda.
- U teoriji prvog reda se uzima da je $\sin \alpha \approx \alpha$.
- Iz razvoja sinusne funkcije u red (Maklorenova teorema)

$$\sin \alpha = \alpha - \frac{\alpha^3}{3!} + \frac{\alpha^5}{5!} - \frac{\alpha^7}{7!} + \dots$$

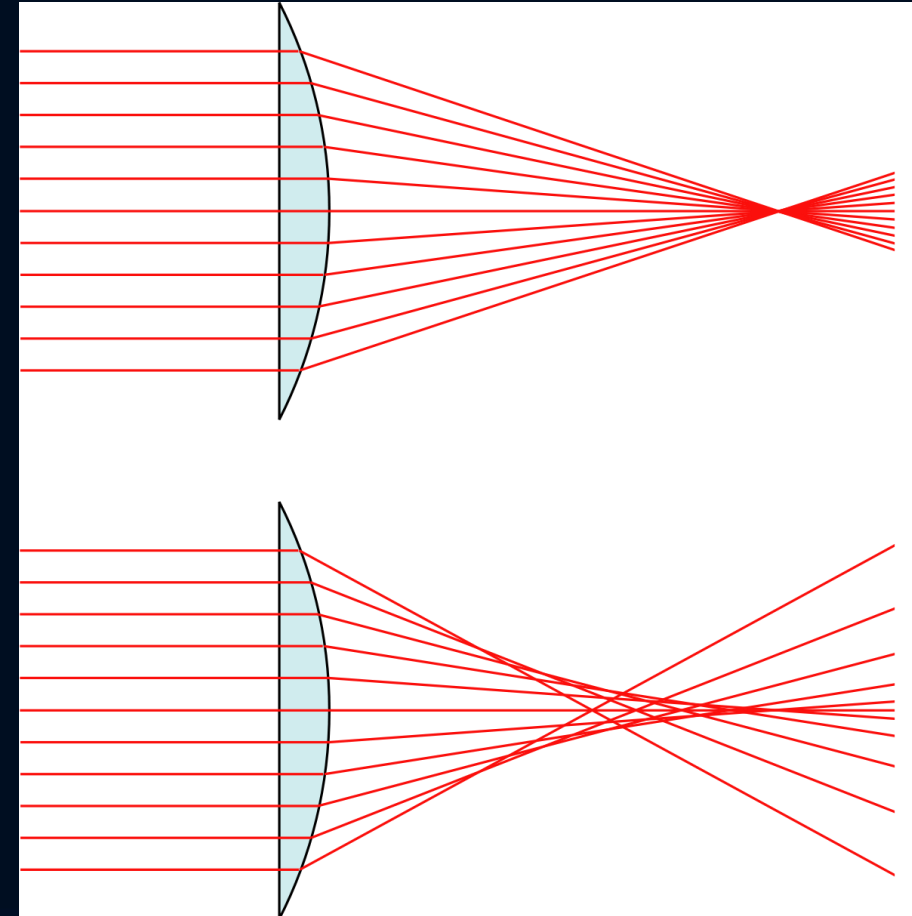
- Vidimo da je drugi član u razvoju trećeg stepena
- Greške koje potiču od zanemarivanja drugog člana reda, $\left(\frac{\alpha^3}{3!}\right)$, predstavljaju monohromatske aberacije.

Aberacije

- Veličina lika tačkastog izvora opisuje se nekom funkcijom argumenta $A^i \cdot \alpha^j$, gde je A relativni otvor objektiva, α je ugao koji svetlosni zrak zaklapa sa optičkom osom, a i i j su izložiocni čiji je zbir $i + j = 3$ ($i, j = 0, 1, 2, 3$)
- Vrste monohromatskih aberacija:
 - Sferna aberacija, $A^3 \alpha^0$
 - Koma, $A^2 \alpha^1$
 - Astigmatizam, $A^1 \alpha^2$
 - Distorzija, $A^0 \alpha^3$
 - Krivina vidnog polja ili dodatne površine

Sferna aberacija, $A^3 \alpha^0$

- Nedostatak optičkog sistema koji se ispoljava na optičkoj osi ($\alpha = 0$)
- Veličina je proporcionalna trećem stepenu relativnog otvora teleskopa ($A = \frac{D}{F}$)
- Nastaje zbog toga što svetlosni zraci koji su **blizu optičke ose** (tzv. paraksijalni zraci) objektiva formiraju žižu (centar sfernog talasnog fronta) **dalje** od objektiva nego zraci koji se nalaze blizu ivice objektiva (tzv. marginalni zraci).

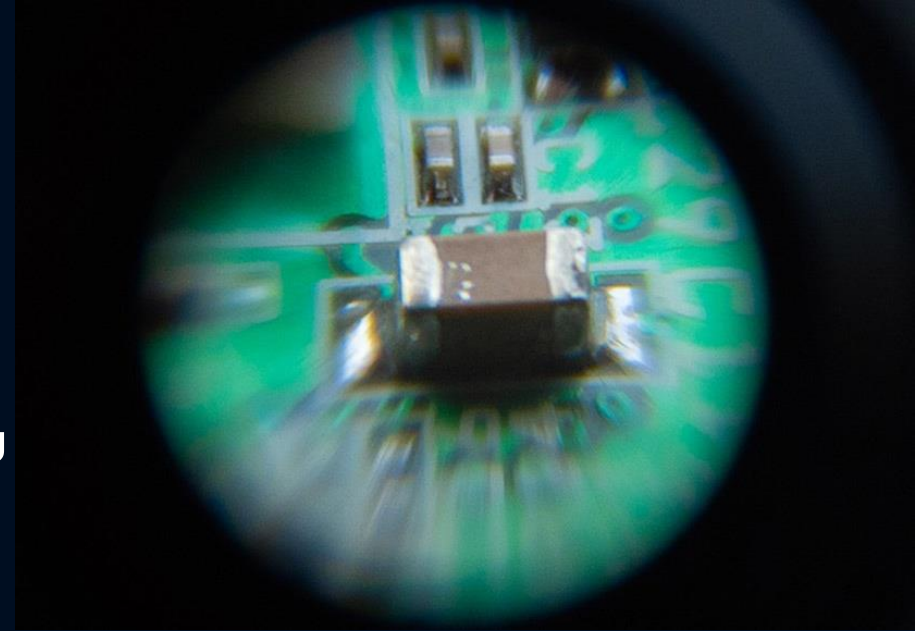


Sferna aberacija, $A^3 \alpha^0$

- Smatra se da sferna aberacija ne kvari razdvojnu moć objektiva ako je

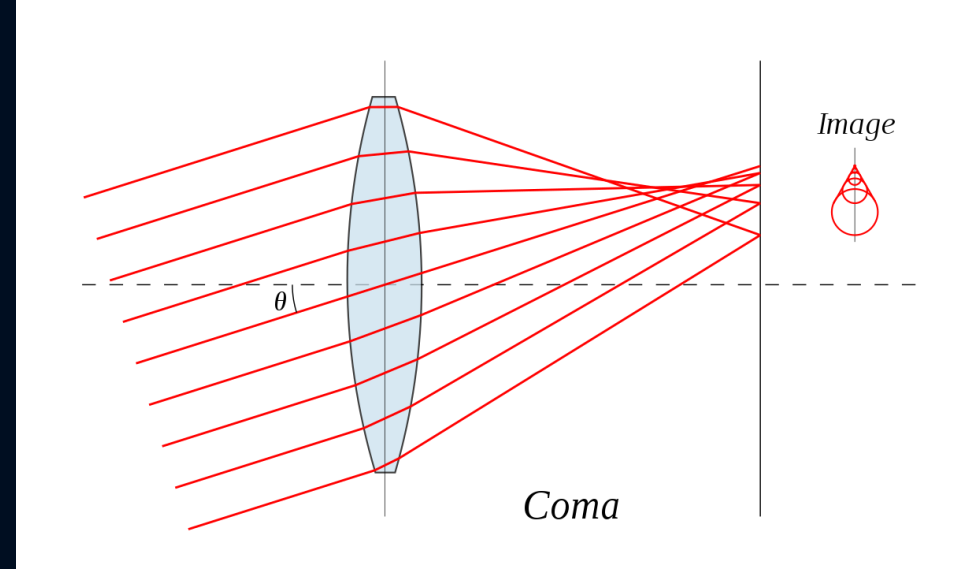
$$\frac{\rho_{sf}}{\rho_{dif}} \leq 1$$

- Gde je ρ_{dif} ugaoni poluprečnik Ejrijevog diska.
- Sferna aberacija se može smanjiti ili eliminisati raznim metodama:
 1. **Eliminisanjem paraksijalnih ili marginalnih zrakova.** Loša strana ove metode je smanjenje svetlosne moći objektiva, što u slučaju posmatranja objekata slabog sjaja nije dobro.
 2. **Orijentacijem sočiva.** U slučaju sočiva, sferna aberacija zavisi od oblika i orijentacije sočiva.



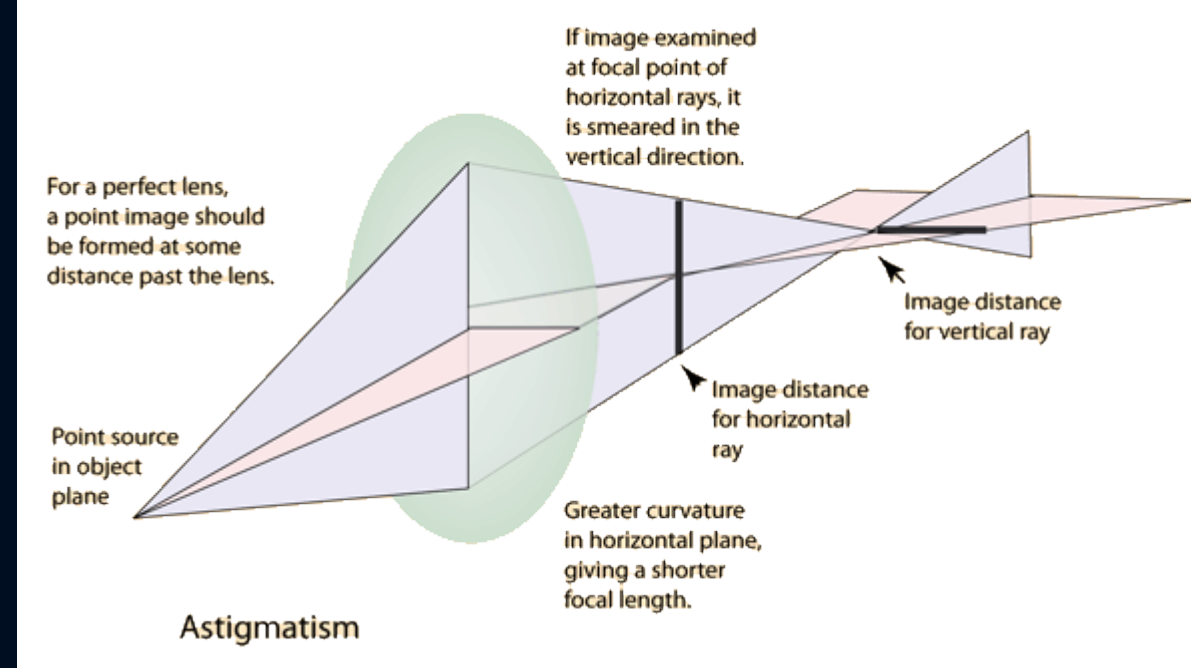
Koma, $A^2 \alpha^1$

- Nastaje kad se lik tačkastog objekta formira van optičke ose
 - Slično kao u slučaju sferne aberacije koma nastaje usled toga što **objektiv nije u stanju da sve zrake tačkastog izvora sakupi u jednoj tački** u fokusnoj ravni.
- Likovi se formiraju u pravcu normalno na optičku osu na različitim rastojanjima od objektiva
- Lik tačkastog izvora posmatran u fokusnoj ravni imaće **oblik komete** (ili kapi vode), zbog čega je ova aberacije i nazvana komom.



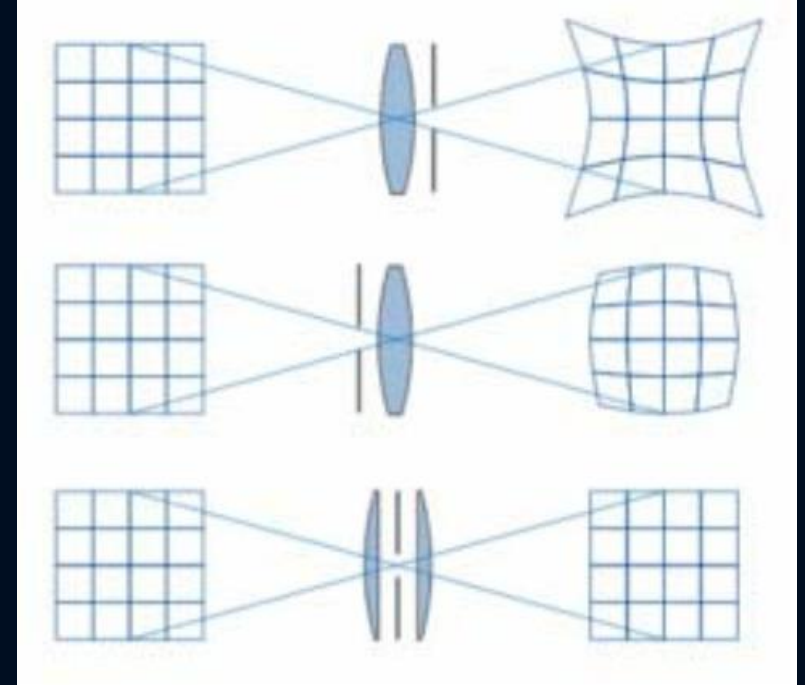
Astigmatizam, $A^1\alpha^2$

- Vanosna aberacija, kao koma
- Manifestuje u tome da snop svetlosnih zrakova koji formiraju lik van optičke ose u dva uzajamno normalna pravca se seku na različitim rastojanjima od objektiva.
 - Zraci koji se prostiru u **tangencinalnoj ravni** koja je definisana smerom upadnih zrakova i optičke ose zovu se tangencijalni ili meridionalni zraci.
 - Zraci koji se prostiru u ravni normalnoj na tangencijalnu ravan se zovu **sagitalni zraci**.
- Tangencijalni zraci mogu da se seku bliže objektivu i formiraju tzv. **primarni lik**.
- Tada se sagitalni zraci seku dalje od objektiva i formiraju tzv. **sekundarni lik**.
- U tom slučaju **astigmatizam je pozitivan**.
 - U obrnutom slučaju astigmatizam je negativan.
- U formiranju ovih likova istovremeno učestvuju obe vrste zrakova.
- Na taj način u primarnom i sekundarnom fokusu **lik tačkastog izvora** se formira u **obliku duži**.

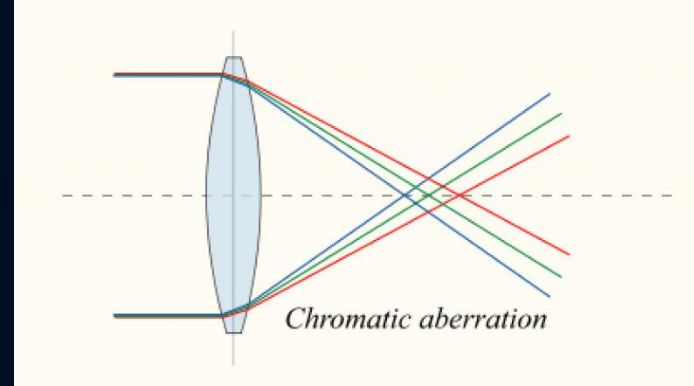


Distorzija , $A^0 \alpha^3$

- Nastaje usled promene uvećanje sočiva u zavisnosti od rastojanja od optičke ose
 - nije rezultat nedostatka oštrog lika
- Distorzija može imati dva oblika: bačvasti i jastučasti.
 - Bačvasti oblik se dobija ako uvećanje opada sa rastojanjem od optičke ose
 - jastučasti u suprotnom slučaju.
- Distorzija može nastati zbog upotrebe dijafragme.
 - Ako se dijafragma stavi iza sočiva nastaje jastučasta distorzija, a ako je dijafragma ispred sočiva, onda se javlja bačvasta distorzija.
 - Distorzija se može eliminisati pomoću dva sočiva sa dijafragmom između njih.


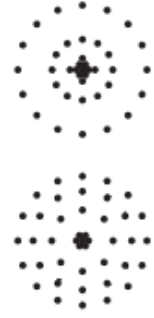

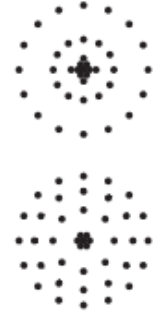














Hromatska aberacija

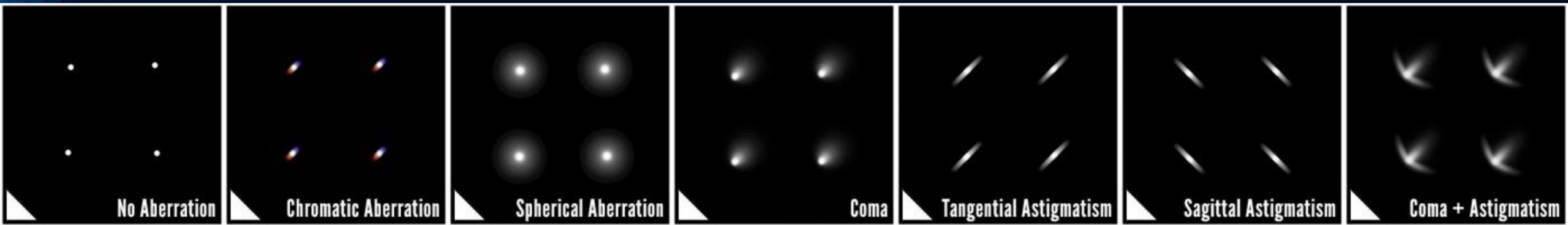


- Indeks prelamanja materijala sočiva zavisi od talasne dužine svetlosti zraci različitih talasnih dužina se prelamaju pod različitim uglovima
 - fokusno rastojanje sočiva je različito za različite talasne dužine.
- Posledice:
 - uvećanje sočiva zavisi od talasne dužine (lateralna hromatska aberacija) i
 - likovi različitih boja (talasnih dužina) se formiraju na različitim rastojanjima (aksijalna ili longitudinalna hromatska aberacija).
- Svetlost manjih talasnih dužina u većoj meri prelama od svetlosti dužih talasnih dužina, fokus svetlosti plave boje će se nalaziti bliže konveksnom sočivu, a biće udaljeniji kod konkavnog sočiva.
 - Razlika rastojanja izmedju plavog i crvenog fokusa je mera longitudinalne aberacije

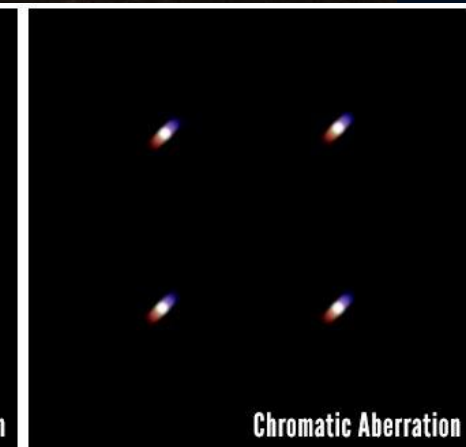
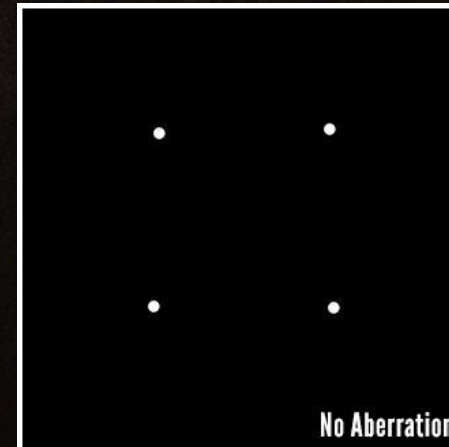
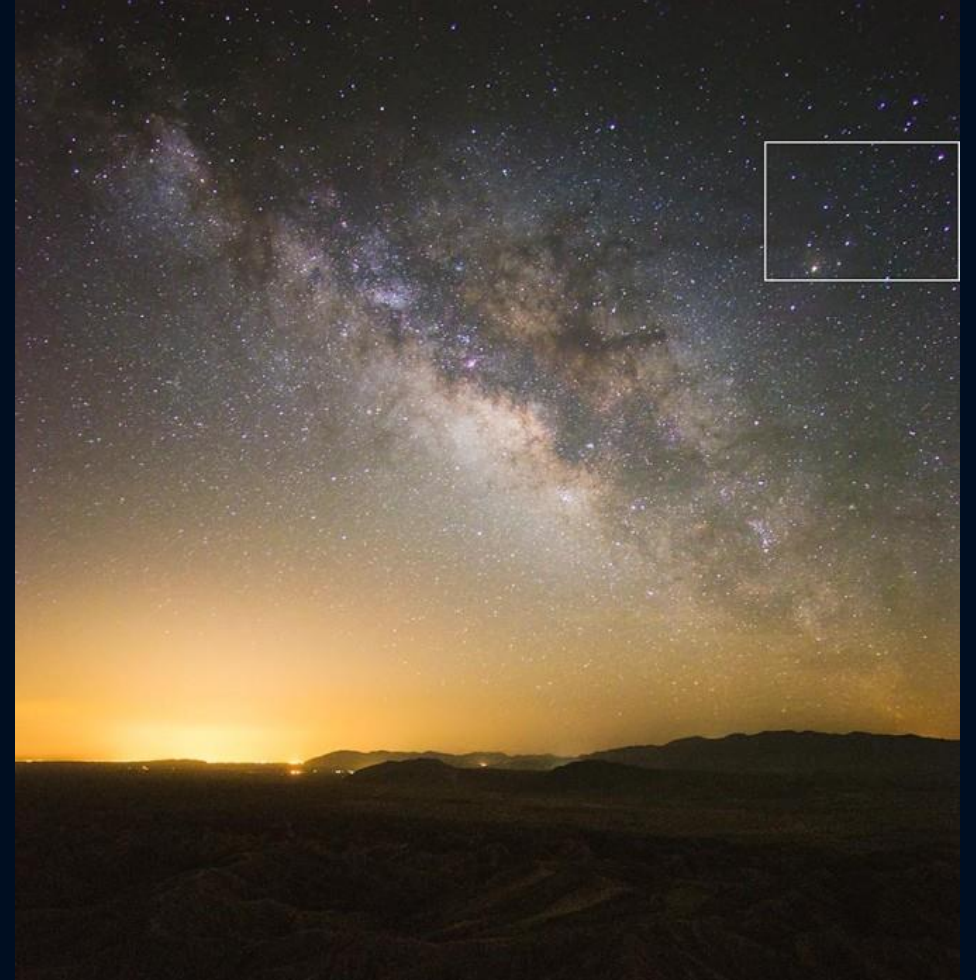
Aberacije

	<i>On-axis focus</i>	<i>On-axis defocus</i>	<i>Off-axis</i>	<i>Off-axis defocus</i>
<i>SA</i>				
<i>Coma</i>				
<i>Astigmatism</i>				
<i>Curvature of field</i>				

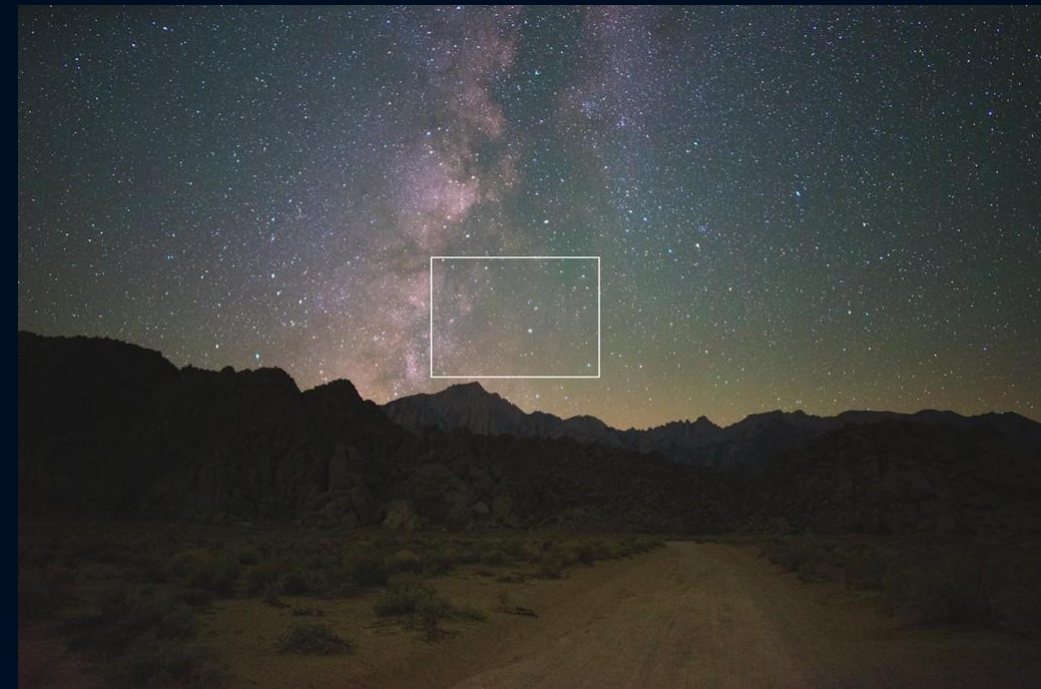
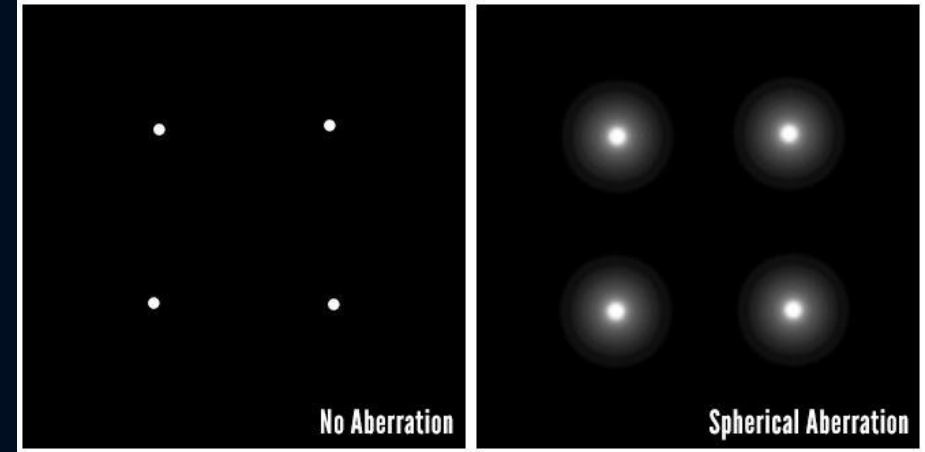
Aberacije



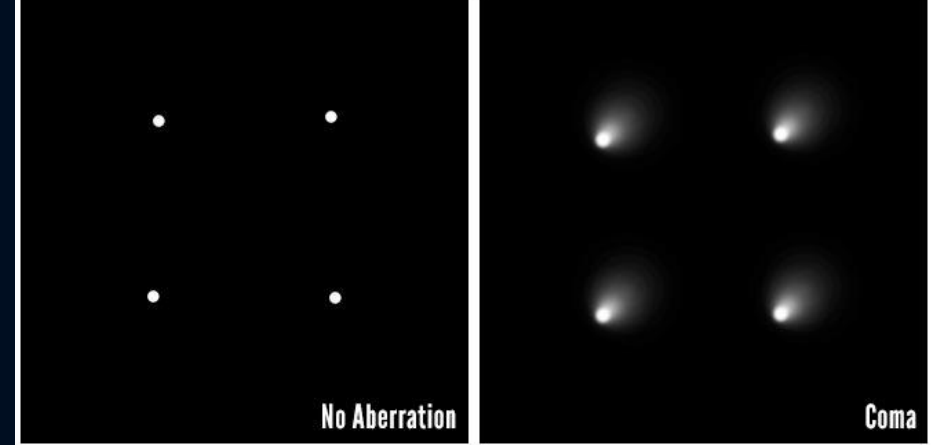
Hromatska aberacija



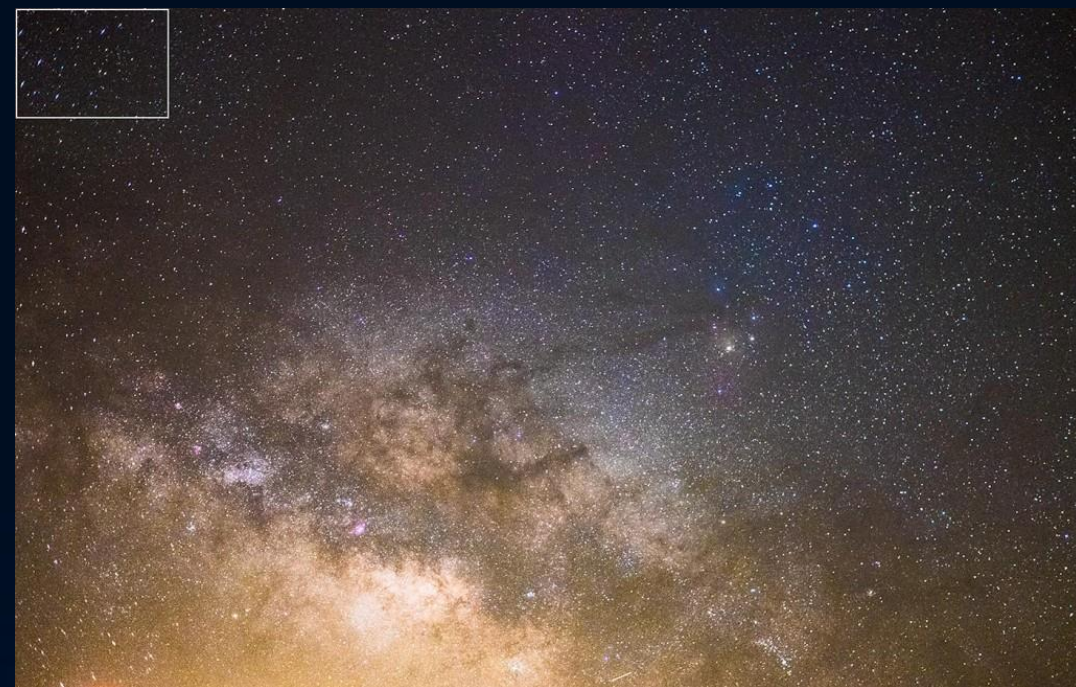
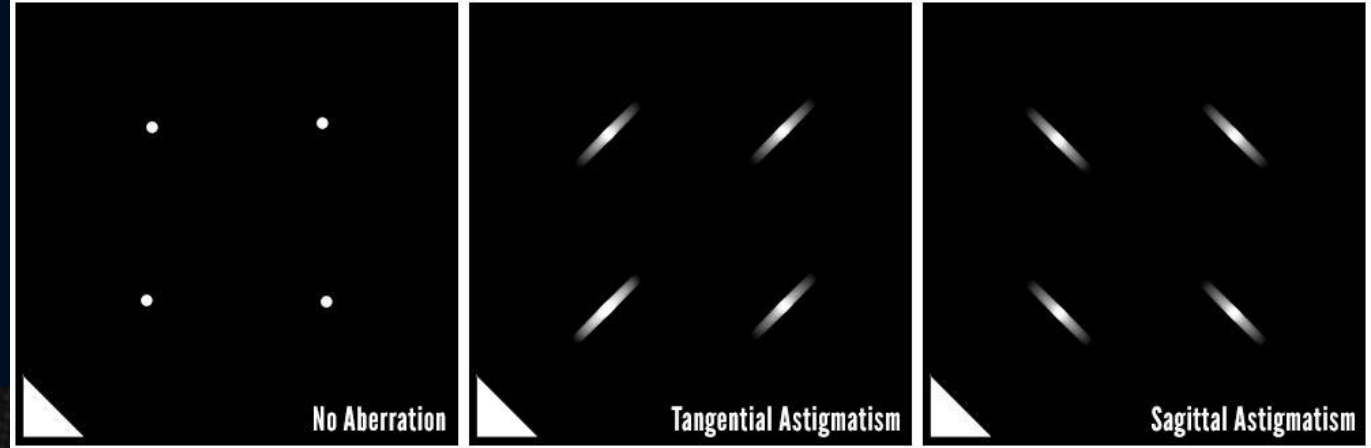
Sferna aberacija



Koma



Astigmatizam



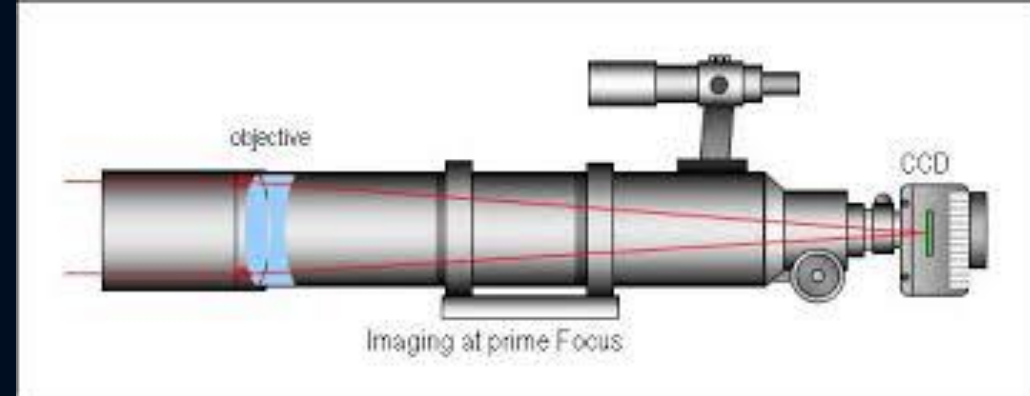
Tipovi teleskopa

Podela teleskopa

- Na osnovu tipa objektivna
 - Refraktori – sočivo
 - Reflektori - ogledalo

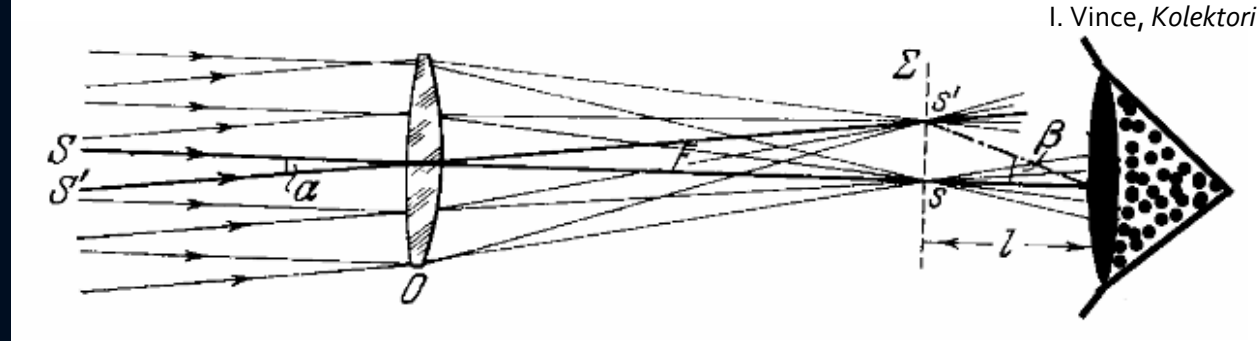


Neki tipovi refraktora



- Za neka astronomska posmatranja (npr. fotografisanje, snimanje TV kamerom ili CCD kamerom itd.) koja se mogu izvršiti u **primarnom fokusu objektiva**, optička šema teleskopa se svodi na sam objektiv.
- Veliki broj raznovrsnih posmatranja upravo se vrši u primarnom fokusu.
- Čak i posmatranja okom (vizuelna posmatranja) mogu obavljati u primarnom fokusu objektiva.
 - U tom slučaju likovi nebeskih tela, koji se formiraju u žiži teleskopa posmatraju sa izvesnog rastojanja, l , od žiže.
 - Najmanje rastojanje sa kojeg oko, bez većeg naprezanja, može da vidi oštro predmete je oko 25 cm.

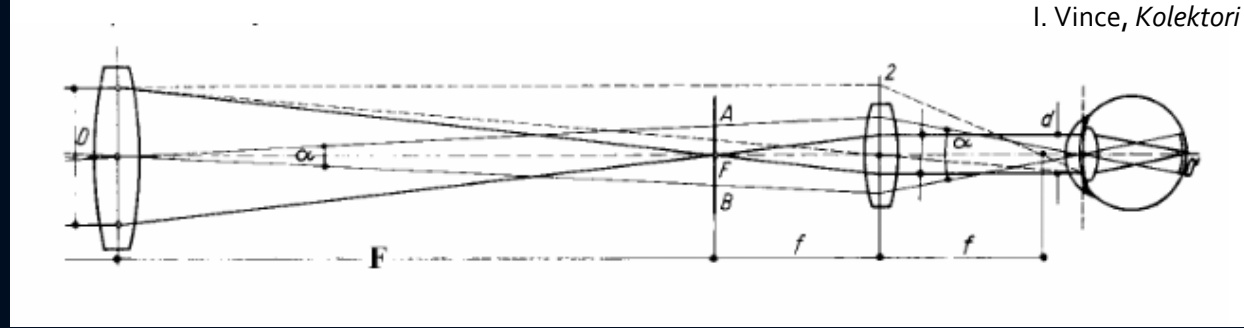
Vizuelno posmatranje



- Kod vizuelnih posmatranja je jedan od bitnih parametara **ugaono uvećanje** (kraće: uvećanje) teleskopa, što se u krajnjoj liniji svodi na veličinu njegove razdvojne moći.
- Oko može razlikovati dva tačkasta predmeta (npr. dve bliske zvezde) ako se oni vide pod uglom većom ili jednakom **60"**.
- Uvećanje teleskopa, G , definiše se kao odnos ugla, β , pod kojim se dva lika **vide u fokusnoj** ravni prema uglu, α , pod kojim se izvori tih likova (ili sami likovi) **vide iz centra objektiva**, tj.

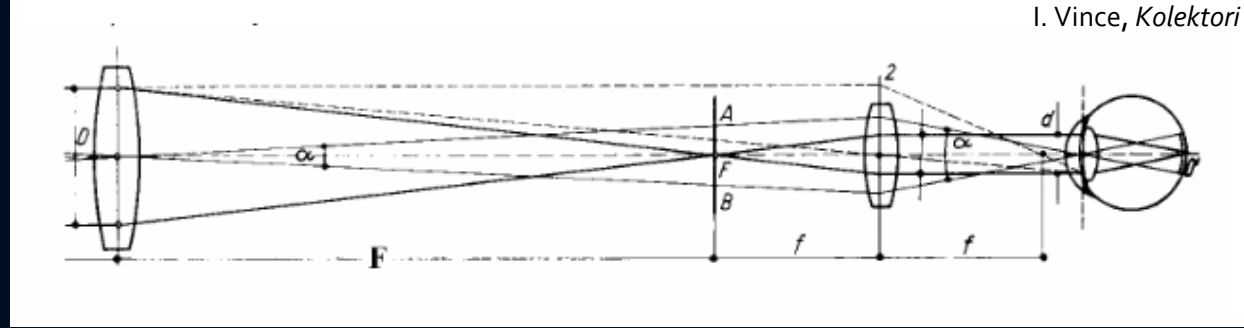
$$G = \frac{\beta}{\alpha}$$

- G može da se poveća povećanjem ugla β , što sa svoje strane može povećati ili približavanjem oka likovima (smanjenjem l) ili povećanjem žižnog rastojanja objektiva.
 - Smanjenje rastojanja oka l do likova je, kao što je već rečeno, ograničeno na oko 25 cm.
 - Preterano povećanje žižnog rastojanja objektiva je nepraktično, jer to zahteva preterani rast konstrukcije teleskopa.
- Ovaj problem je rešavan dodavanjem **novih optičkih elemenata** teleskopu i to u jednom slučaju u cilju **povećanja ugla β** , a u drugom slučaju u cilju **povećanja žižne daljine** bez povećanja veličine teleskopa (dužine cevi).



Okulari

- Iza žižne ravni objektiva stavlja **optički sistem (okular)** na rastojanje njegove žižne daljine
- Gledano kroz okular, lik dva tačkasta izvora se vidi pod većim uglom nego kad se gleda bez okulara, ako je žižno rastojanje okulara manje od l , odnosno od 25 cm.
- Ako se žiže okulara i objektiva poklapaju okular (teleskop) napušta paralelan snop svetlosnih zrakova.
- Ovakav optički sistem nema fokus, zove se **afokalni**.
- Iako takav optički sistem ne daje najveće moguće uvećanje, ipak se za vizuelno posmatranje preporučuje isključivo korišćenje afokalnog sistema.
- Prednost afokalnog optičkog sistema je u tome da u oko posmatrača padaju **paralelni zraci**.
 - U tom slučaju oko je adaptirano na posmatranje predmeta u beskonačnosti, što ga najmanje zamara, jer su mišići koji oblikuju sočivo u oku potpuno opušteni.
 - Na taj način ni duža posmatranja ne zamaraju oko.



Ugaono uvećanje

- Ugaono uvećanje afokalnog teleskopa (G) je prema definiciji odnos ugla pod kojim se iz **centra okulara** vide likovi dva tačkasta izora (β) i ugla među njima na nebeskoj sferi (α), tj.

$$G = \beta / \alpha$$

- Najčešće jednostavnije da se ugaono rastojanje izrazi preko lakše merljivih parametara teleskopa
- Rastojanje u žižnoj ravni između likova AB

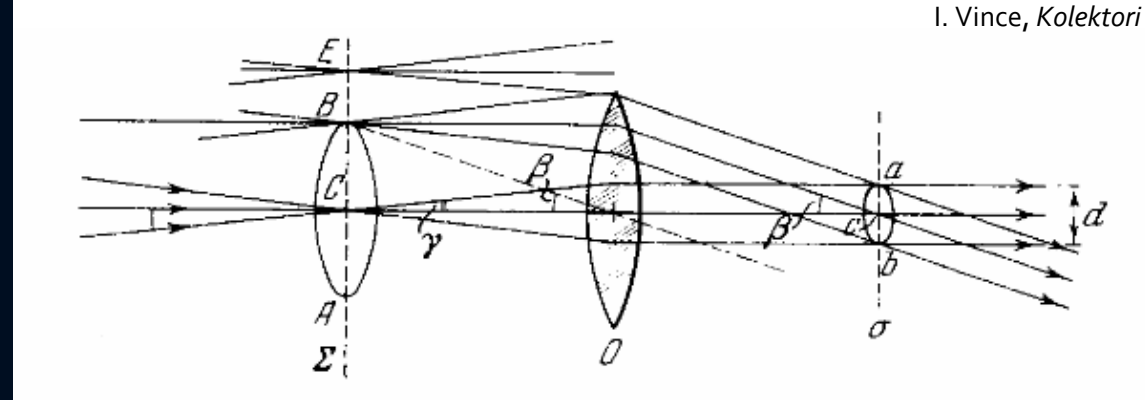
$$AB = F \cdot \tan \alpha$$

$$AB = f \cdot \tan \beta$$

- Za male uglove, tj. korišćenjem $\tan x \approx x$

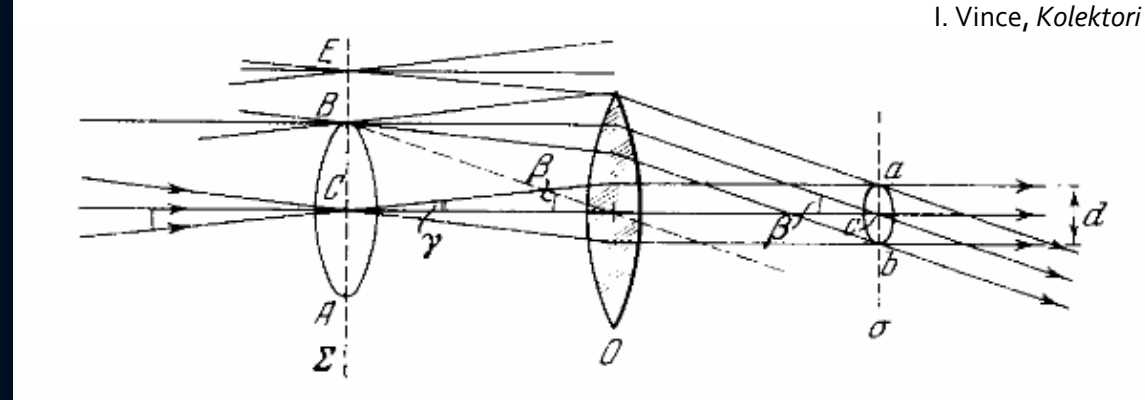
$$G = \frac{F}{f}$$

Izlazna zenica



- Drugi važan parametar - izlazna zenica.
- **Izlazna zenica** teleskopa je najmanji poprečni presek paralelnih snopova zrakova koji padaju na objektiv pod različitim uglovima i koji u potpunosti prolaze kroz okular (snopovi iz kruga AB).
- Prečnik izlazne zenice (ab) je $d = 2f \tan \gamma$, gde je γ ugao pod kojim se vidi poluprečnik objektiva iz njegovog fokusa Σ (tačka C).
- Izlazna zenica je u stvari lik objektiva koji se formira okularom u ravni σ .

Vinjetiranje



- Snopovi zraka koji ne prolaze ili samo jedan njihov deo prolazi kroz okular (snopovi izvan kruga AB) **smetaju posmatranju** i najbolje da se isključe iz posmatranja pomoću odgovarajućih dijafragmi.
 - Jedan deo zraka koji ne prolaze kroz okular reflektuje se sa unutrašnjih zidova teleskopa i deo te reflektovane svetlosti može da prođe kroz okular, smanjujući na taj način kontrast posmatranog lika.
- Ako jedan deo snopa zraka sa nebeskog tela ne prolazi kroz okular (to je tzv. **vinjetiranje**), onda osvetljenost lika takvog posmatranog nebeskog tela biti manja u odnosu na slučaj kad svi zraci prođu kroz okular.
 - Ovo izaziva probleme pri identifikaciji nebeskih tela, prouzrokuje npr. sistematsku grešku u merenju relativnog sjaja nebeskog tela čiji zraci koji su prošli kroz objektiv samo delimično dospevaju u oko posmatrača ili na detektor.

Najmanje korisno uvećanje

- Drugi način - ugaono uvećanje teleskopa

- Odnos prečnika otvora objektiva (D) i izlazne zenice (d)

$$G = \frac{D}{d}$$

- Važi $d = 2f \tan \gamma$ i $D = 2F \tan \gamma$, odakle dobijamo

$$\frac{D}{d} = \frac{F}{f} = G$$

- **Najmanje korisno uvećanje** (G_{nk}) za vizuelna posmatranja

- Najmanje uvećanje bez gubitka objektivom prikupljenih fotona

- Dobija se kad je prečnik izlazne zenice jednak prečniku zenice oka (δ)

$$G_{nk} = \frac{D}{\delta}$$

- Ako je izlazna zenica veća onda je uvećanje manje i jedan deo fotona neće proći kroz nju, tj. doći će do smanjenja osvetljenosti lika u oku.

Relativna osvetljenost

- Relativna osvetljenost likova zvezda (relativni sjaj) koja se dobija korišćenjem teleskopa može se izraziti kao odnos kvadrata prečnika teleskopa i prečnika zenice oka:

$$C_t = \left(\frac{D}{\delta}\right)^2$$

- Odnosno kvadrata najmanjeg korisnog uvećanja

$$C_t = G_{nk}^2$$

- Ova veličina karakteriše svetlosnu jačinu teleskopa u slučaju posmatranja tačkastih izvora svetlosti (npr. zvezda).
- U slučaju netačkastih izvora svetlosti (npr. Mesec, planete, komete, magline itd.) površinski sjaj se dobija deljenjem ove veličine sa kvadratom povećanja:

$$C_t = \left(\frac{G_{nk}^2}{G}\right)^2$$

Najveće korisno uvećanje

- Difrakcija svetlosti određuje gornju granicu uvećanja teleskopa.
 - Ugaona razdvojna moć čovekovog oka u proseku iznosi oko $\beta = 60''$, može se odrediti uvećanje teleskopa pri kome se **tačkasti likovi na rastojanju poluprečnika Ejrievog diska** (σ) još mogu **videti razdvojeno**.
 - To je tzv. **najveće korisno uvećanje** teleskopa (G_{Nk}) ili uvećanje do razdvojne moći (kraće: razdvojno uvećanje):

$$G_{Nk} = \frac{\beta}{\sigma} \rightarrow G_{Nk} = \frac{D \cdot 60''}{1.22 \cdot \lambda \cdot 206265''}$$

- Veća uvećanja ne daju nove detalje na slici.
- Za $\lambda = 550 \text{ nm}$ (talasna dužina maksimalne osetljivosti oka) i za prečnik objektiva D izraženog u centrimetrima, dobija se $G_{Nk} \approx 5 \cdot D[\text{cm}]$

Efektivno uvećanje

- U praksi veličina lika tačkastog izvora se povećava pod raznim uticajima i najveće praktično korisno uvećanje je manje od idealnog korisnog uvećanje.
- Jedan od tih razloga je uticaj Zemljine atmosfere, koja prouzrokuje turbulentni lik tačkastog izvora.
- Ukupan poluprečnik lika tačkastog izvora će biti zbir poluprečnika Ejrijevog (σ) i turbulentnog (τ) lika.
- U tom slučaju najveće korisno uvećanje će biti manje nego bez uticaja turbulentnog lika i može da se izrazi kao **efektivno uvećanja** (G_{eff}):

$$G_{eff} = q \cdot G_{NK}$$

- Gde je $q = \frac{\sigma}{\sigma + \tau}$

Vidno polje teleskopa

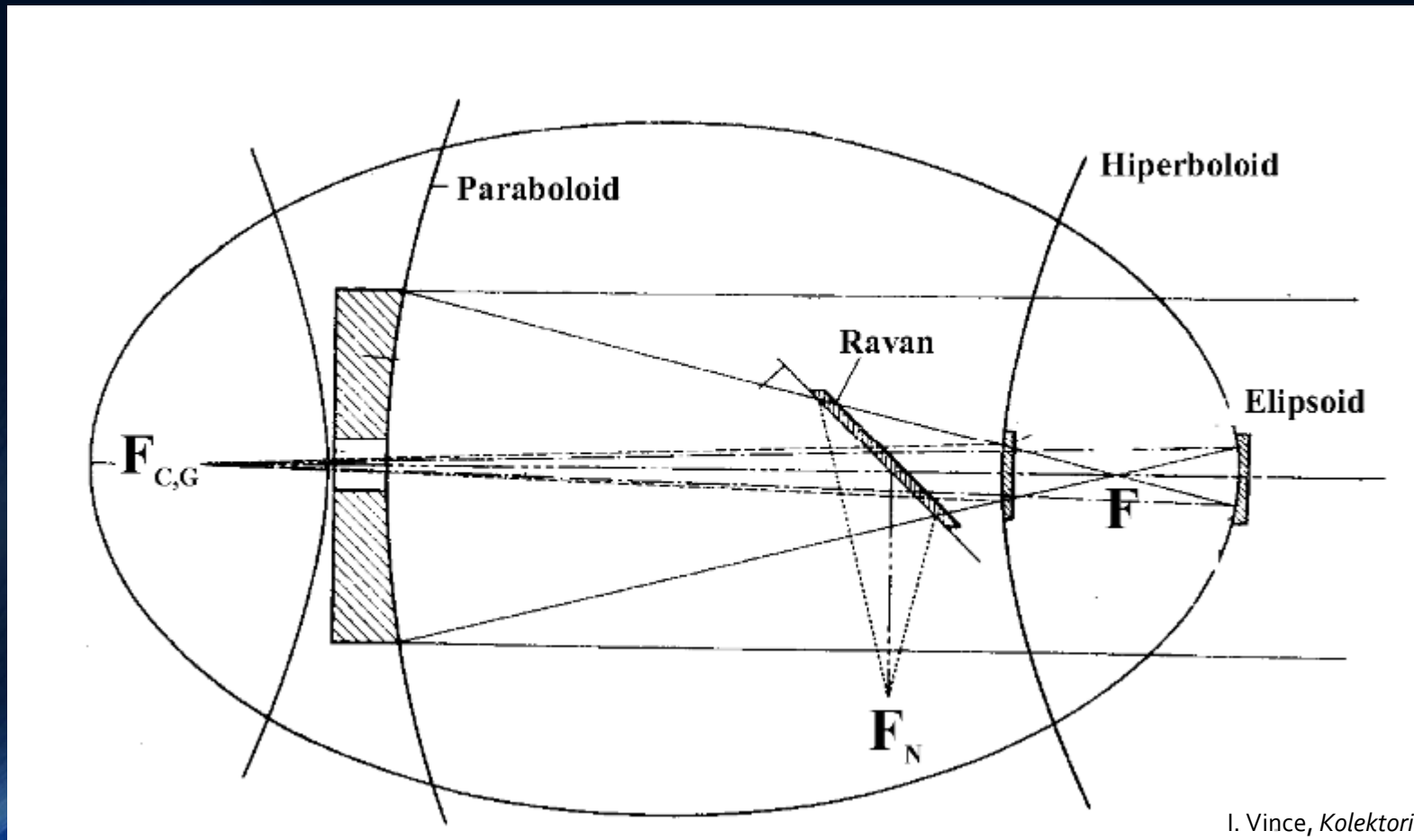
- Nekad (često?) važno koji deo neba može da se posmatra teleskopom, tj. koliko je vidno polje teleskopa
- **Vidno polje teleskopa** čini onaj deo fokalne ravni objektiva teleskopa iz čijih tačaka snop svetlosti u potpunosti prolazi kroz okular, tj. kroz izlaznu zenicu.
 - veličinu vidnog polja teleskopa u krajnjoj liniji određuju parametri okulara
 - Postoje usko i široko ugaoni okulari
- U praksi - vidno polje teleskopa je ugao pod kojim se likovi nebeskih tela kroz okular vide nedeformisani.

Osnovni tipovi reflektora

Osnovni tipovi reflektora

- Objektiv – ogledalo
- Posmatranje – moguće u primarnom fokusu ali retko koristi
 - Najčešće u sekundarnom fokusu
- Uvođenje sekundarnog fokusa ima za cilj povećanje efektivne žižne daljine pri prihvatljivim dimenzijama dužine tubusa teleskopa.
- Obično se uzima da ima tri osnovna tipa optičkog sistema teleskopa reflektora:
 - Njutnov tip,
 - Kasegrenov tip i
 - Gregorijev tip.
- Osnovni optički elementi kod sva tri tipa su **parabolično primarno** (glavno) **ogledalo** i **sekundarno ogledalo** koji se razlikuju međusobno po obliku i mestu postavljanja

Optičke šeme reflektorskih sistema



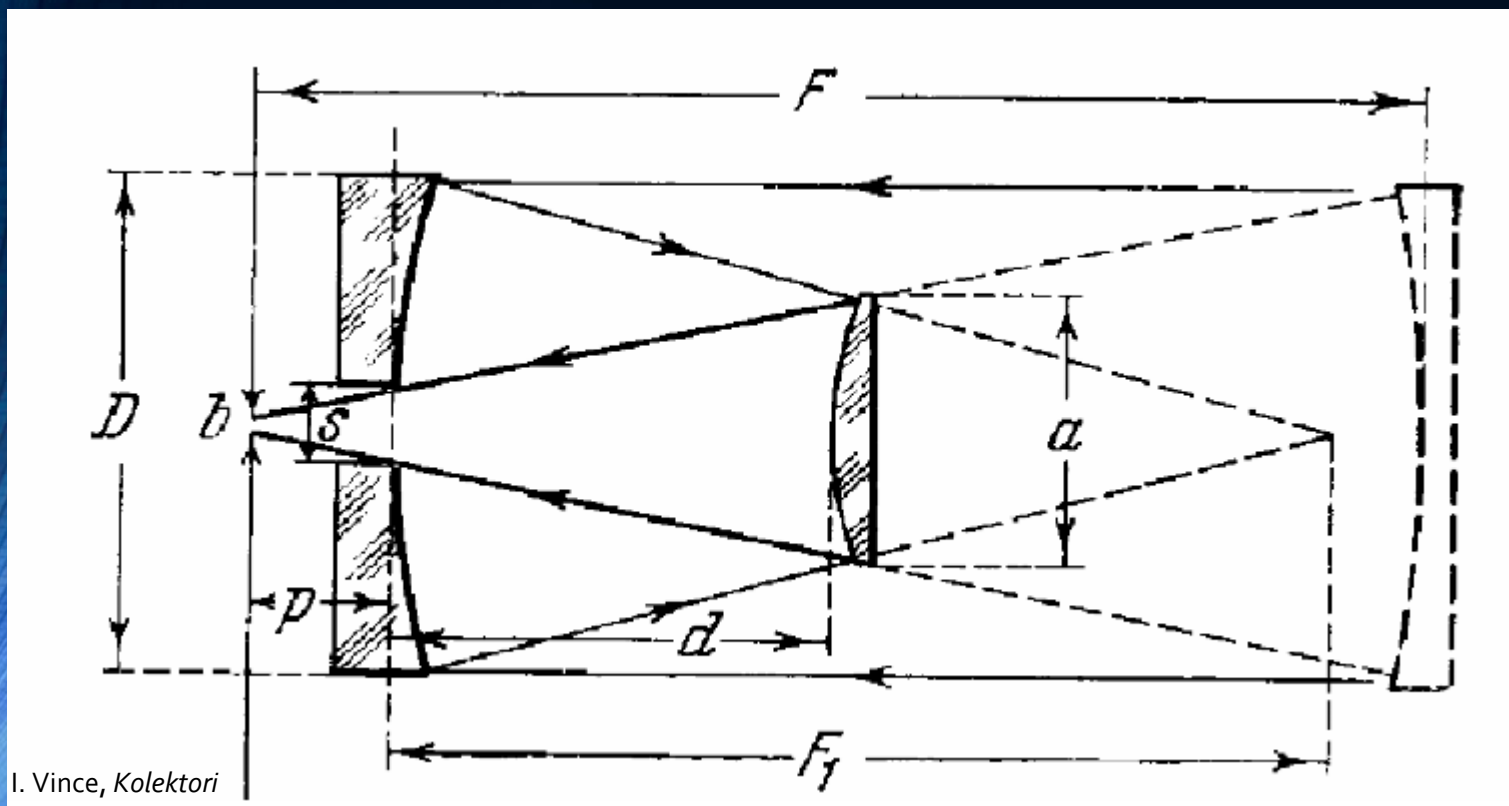
$$a > D \cdot \frac{D}{2 \cdot F}$$

Osnovni tipovi reflektora



Kasegrenov tip teleskopa

- Od razmatranih tipova najpovoljniji, iz više aspekata



I. Vince, Kolektori

- Efektivna žižna daljina

$$F = \frac{F_1 \cdot F_2}{F_1 + F_2 - d}$$

- Rastojanje (d) dato je formulom

$$d = \frac{F_1 \cdot (F - p)}{F_1 + F}$$

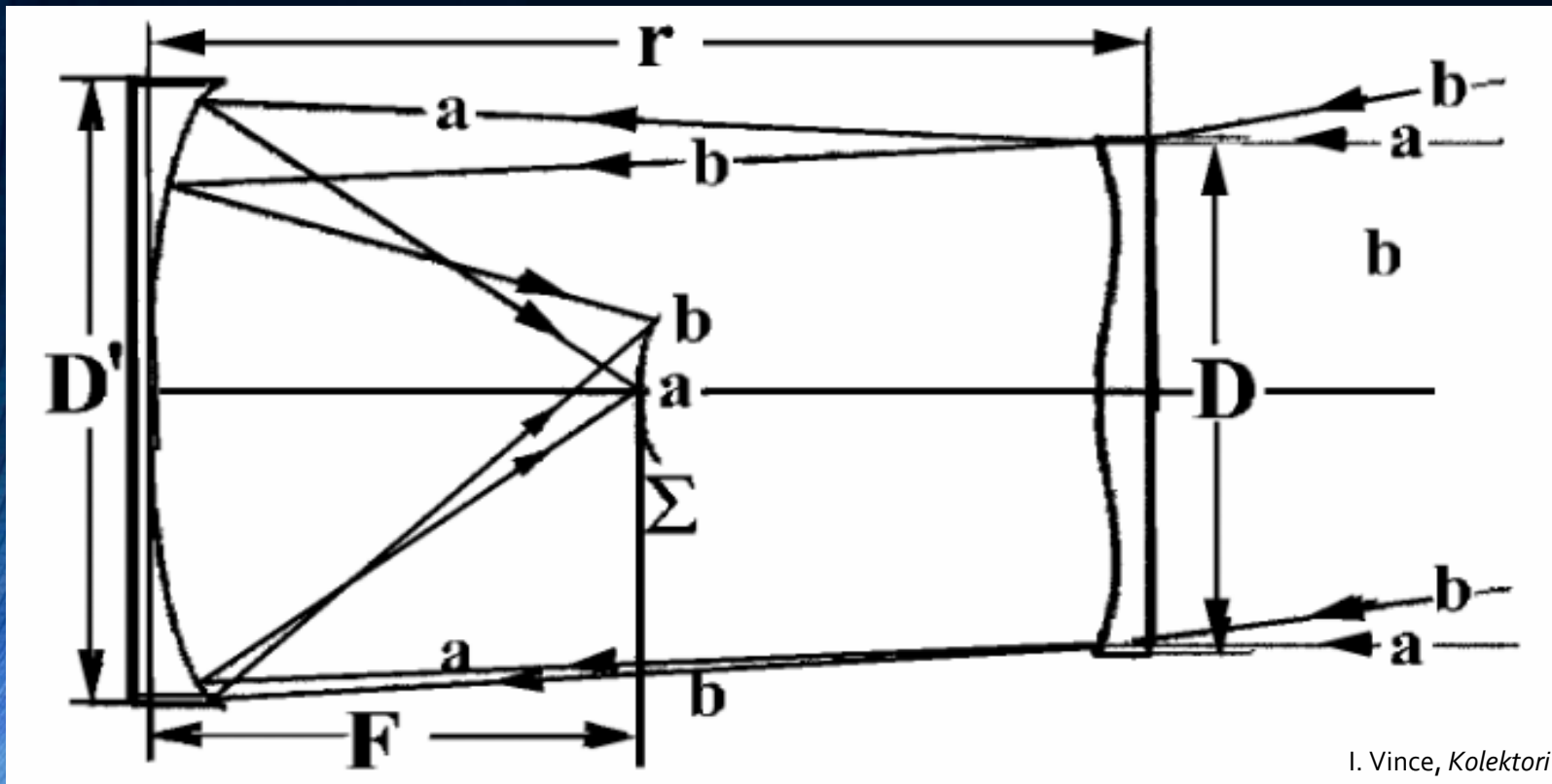
- Prečnik pomoćnog ogledala

$$a = \frac{(D - b)(d + p)}{F} + b$$

- Prečnik rupe u glavnom ogledalu

$$s = \frac{p \cdot (D - b)}{F} + b$$

Šmitov teleskop



I. Vince, Kolektori

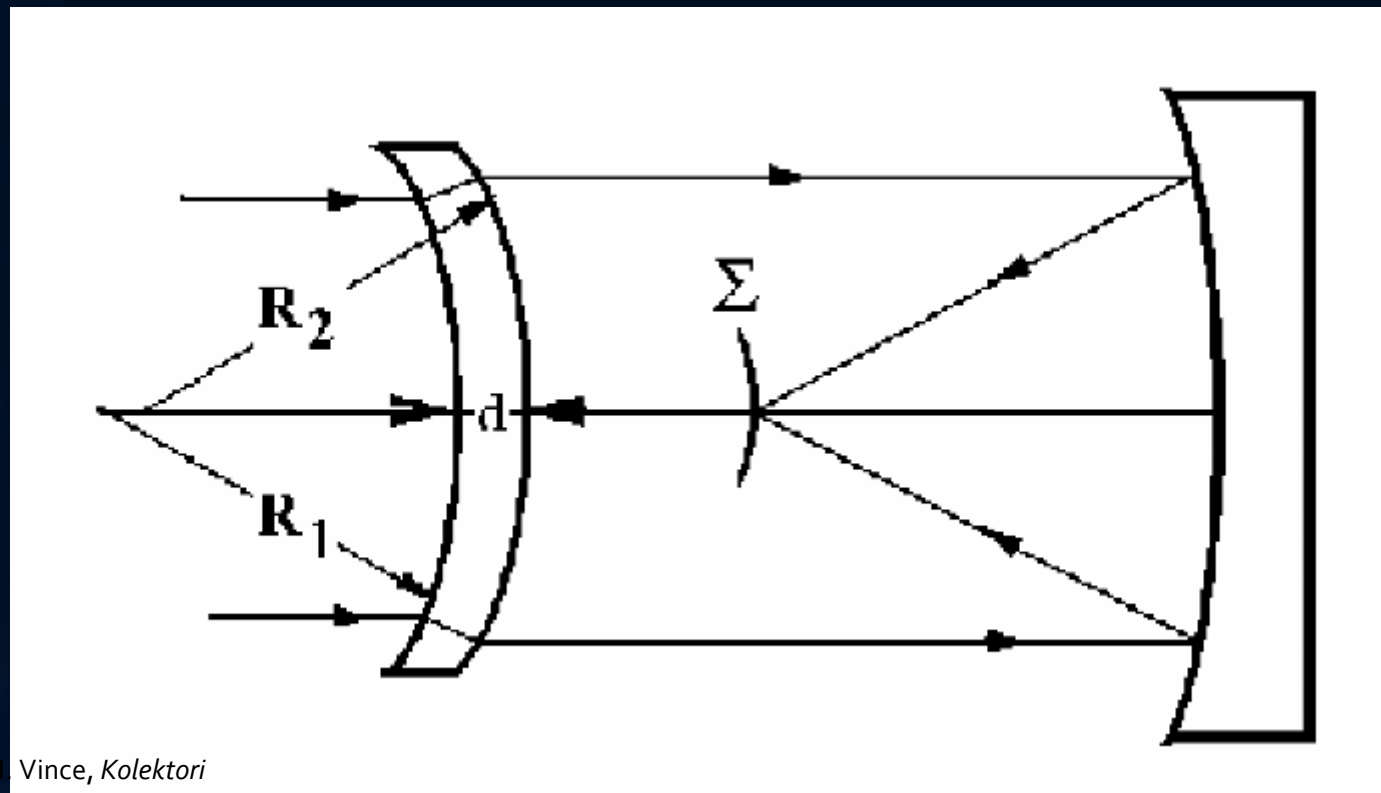
- Prečnik nevinjetiranog vidnog polja

$$\Delta = \frac{D' - D}{2}$$

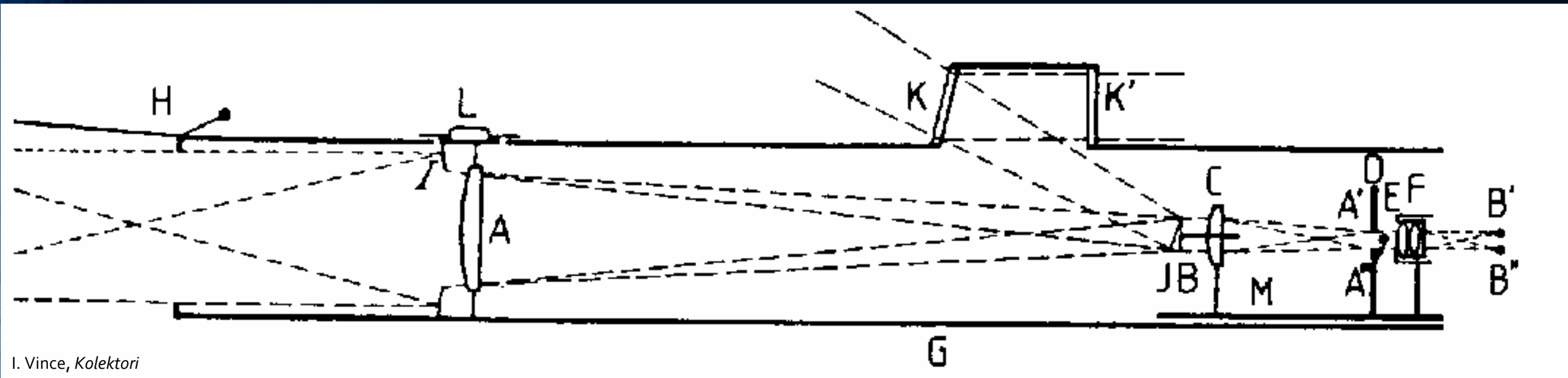
- Jednačina preseka unutrašnje površine ploče

$$x = \frac{1}{32(n-1) \cdot F^3} (h^2 y^2 - y^4)$$

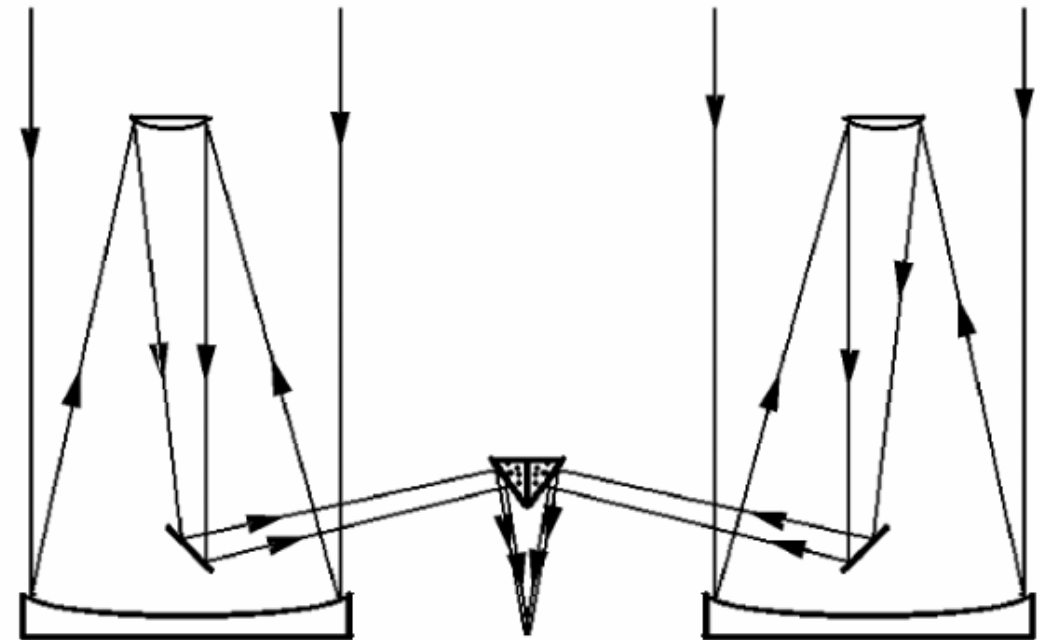
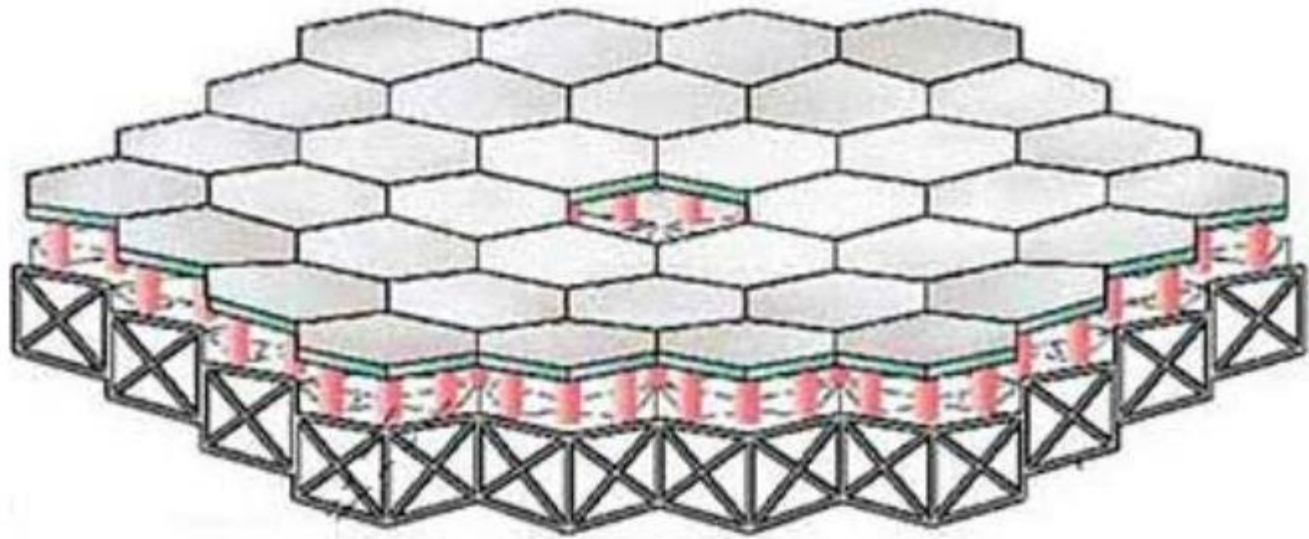
Maksutov teleskop



Koronograf



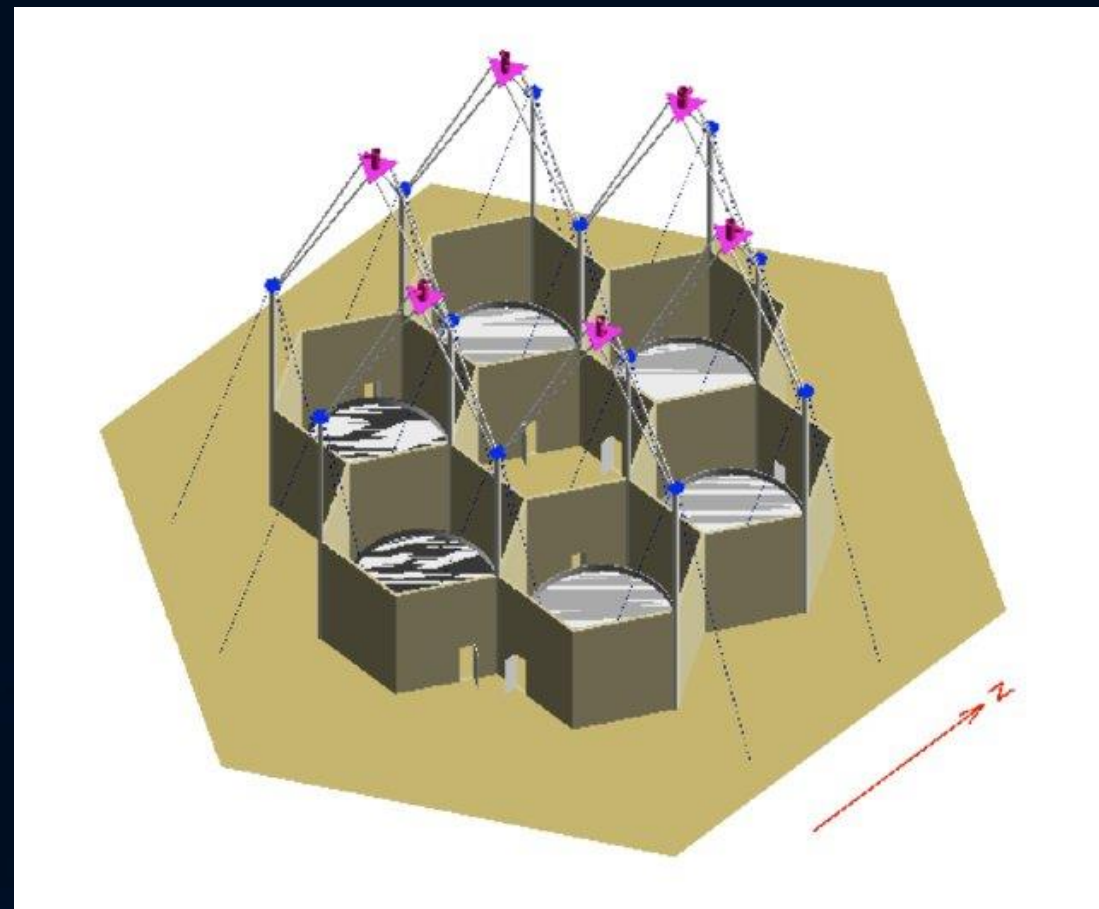
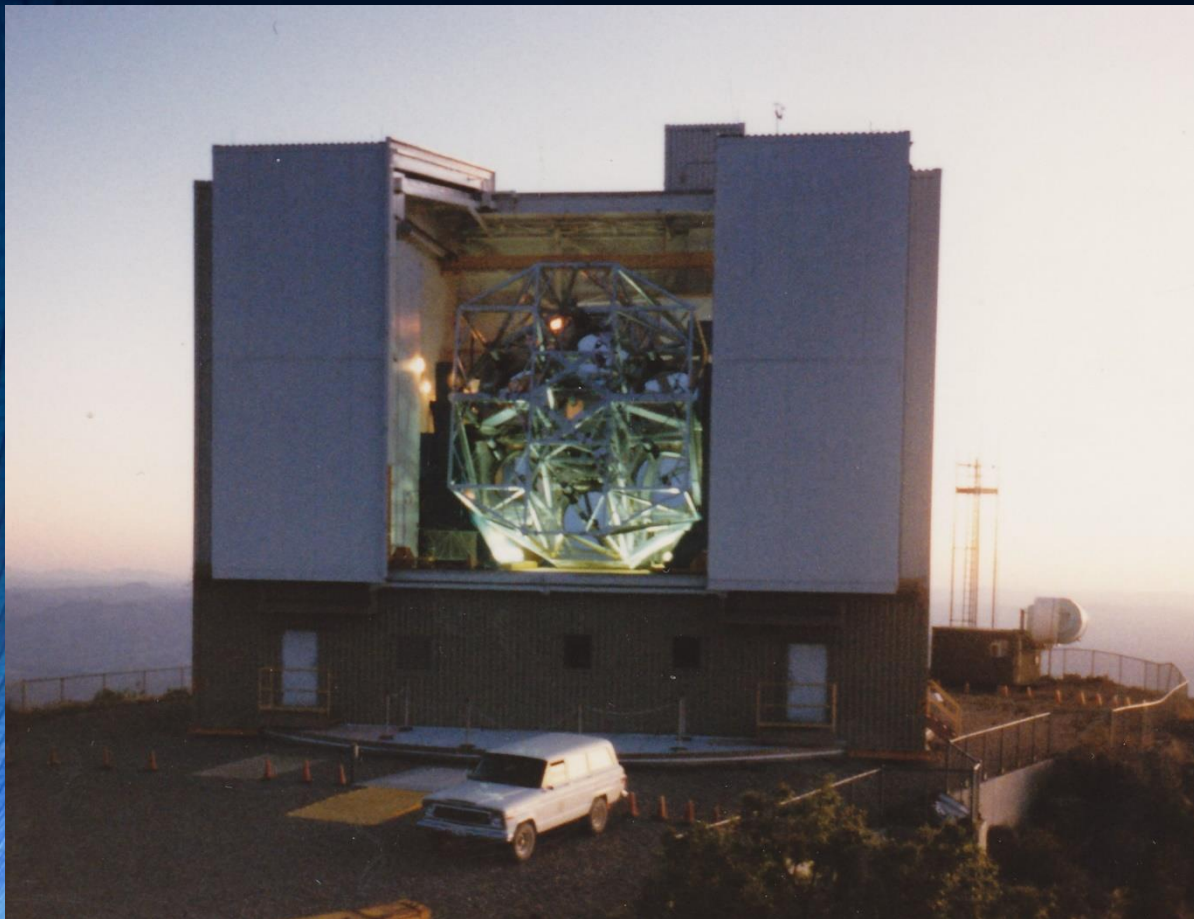
Veliki objektivi



Keck



MMT i LAMA



Neki tipovi teleskopa

(u amaterskoj astronomiji)

Dobson-Newton reflektor

- Najjednostavniji teleskop
- Raspon aperture: 100 mm – 500 mm
 - Na dobson montaži 0,5 metara i više!
- Raspon relativnih apertura: $f/4 - f/10$
- Dužina cevi približno jednaka žižnoj daljini
- Sa dobrom optikom dobar kontrast (aperture 200-250 mm)
 - Mala centralna opstrukcija (0,2 D)
 - Veće aperture – niži kontrast (zbog atmosfere)
- Relativno malo kvalitetno FOV (zakrivljenje, koma...)



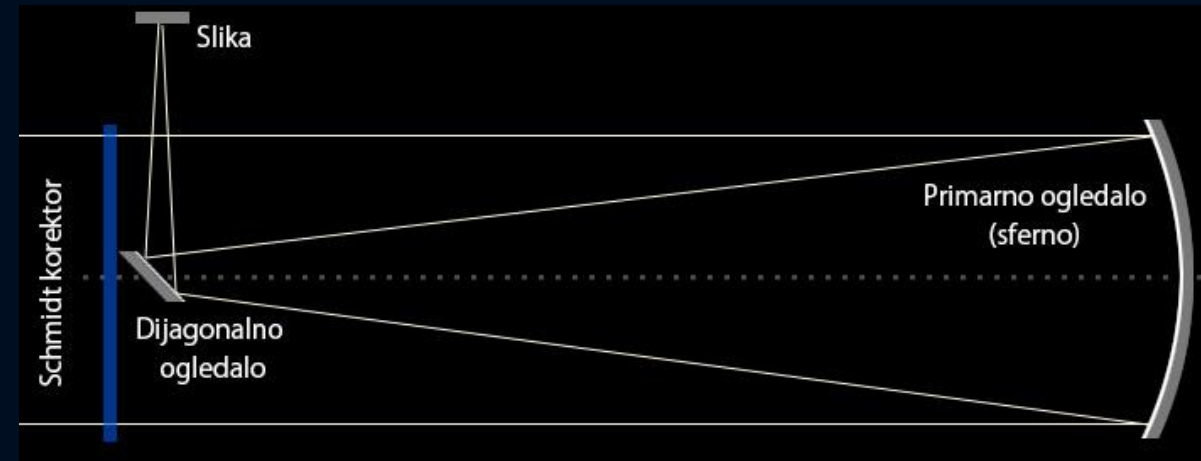
Maksutov-Newton katadioptrički teleskop

- Raspon apertura: 150 mm – 250 mm.
- Raspon relativnih apertura: $f/4 - f/6$.
- Dužina cevi približno jednaka žižnoj daljini
- Sferno primarno ogledalo i **meniskus korektor** na prednjem delu tube, radi korekcije sferne aberacije primarnog ogledala.
- Meniskus, mada sa sfernim površinama, prilično je masivan i težak za izradu u većim aperturama!
- Dobar kontrast (kvalitetne sferne površine, mala opstrukcija – $0,2D$)
- Oko tri puta manju komu od „Njutna“, približno toliko veće kvalitetno vidno polje
- Zatvorena cev – štiti optiku, lako održavanje
- Zatvorena cev, velika masa -> sporija termalna stabilizacija (ventilatori)
- Veća masa -> jača cev, stabilnija montaža



Schmidt-Newton katadioptricki teleskop

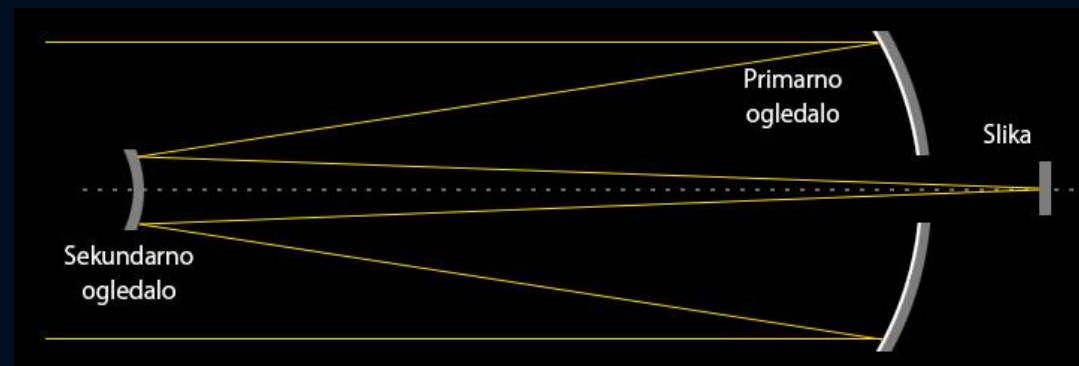
- Raspon apertura 150 mm – 250 mm.
- Raspon relativnih apertura: $f/4 - f/6$.
- Dužina približno jednaka žižnoj daljini.
- Jedina razlika između Schmidt-Newton i Maksutov-Newton teleskopa je u **korektoru**



- Schmidt korektor je znatno tanji, ravan sa jedne i blago asferizovan sa druge strane
- Dva puta veću komu od „Maksutova“, 40% manju od „Njutna“
- Trebalo bi da košta nešto manje, ali... u praksi dva puta manje (najčešće niži kvalitet izrade)

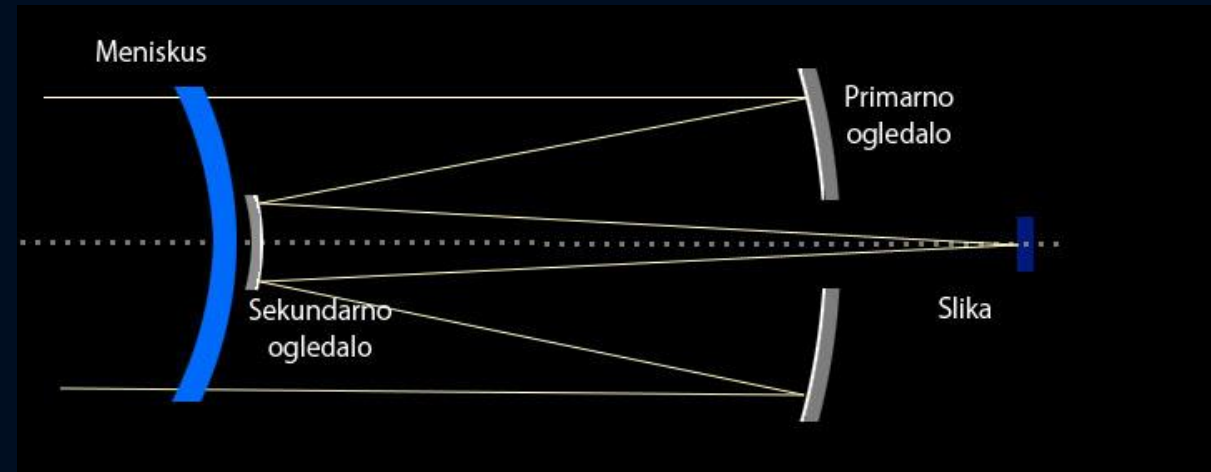
Kasegrenov reflektor

- Raspon apertura 200 mm – 400 mm.
- Raspon relatine aperture: $f/12$ – $f/20$.
- Dužina cevi približno jednaka žižnoj daljini primarnog ogledala
- Parabolično primarno i hiperbolično sekundarno ogledalo
 - Izgubio na popularnosti (lakše i jeftinije napraviti „naredne“ modele)
- Za istu relativnu aperturu ima istu jačinu kome kao Newton reflektor, Cassegrain **po pravilu ima 3-4 puta manju relativnu aperturu**, i desetak i više puta manju komu (koja je srazmerna kvadratu relativne aperture)
- Zakrivljenost njegovog polja slike je veća, što delom smanjuje ovu prednost u veličini kvalitetnog polja
- Manji kontrast (veća centralna opstrukcija, $D/3$)



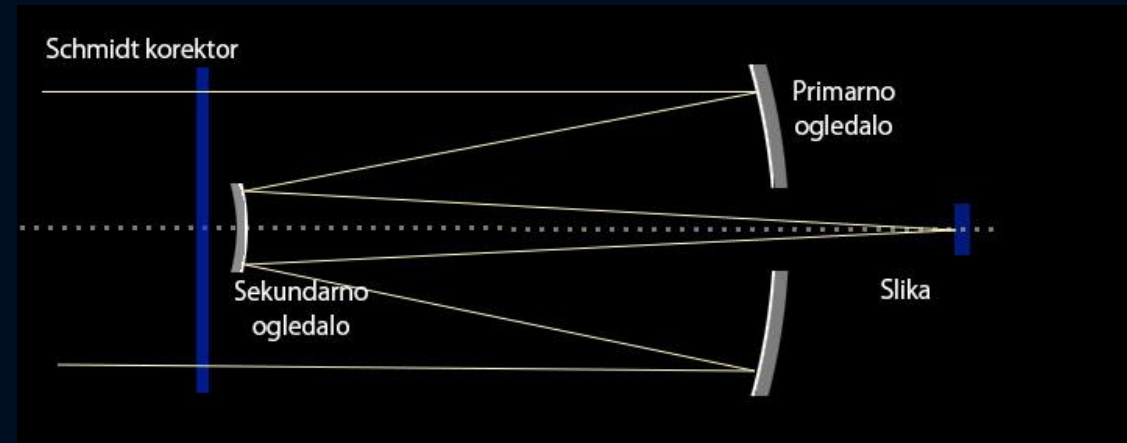
Maksutov-Cassegrain katadioptrički teleskop

- Raspon apertura 100 mm – 250 mm.
- Raspon relativnih apertura: $f/10$ – $f/20$.
- Dužina cevipribližno jednaka žižnoj daljini primarnog ogledala
- Sličan Maksutov-Newtonian teleskopu
 - Koriguje sfernu aberaciju primarnog i sekundarnog ogledala!
- Najčešće malih dimenzija
- Kontrast dobar (opstrukcija $D/3$), vrlo zakrivljeno vidno polje
- Lak za korišćenje, spora termalna stabilizacija
- Zatvorena cev, minimalno održavanje; neophodna kolimacija



Schmidt-Cassegrain katadioptrički teleskop

- Raspon apertura: 100 mm – 300 mm.
- Raspon relativnih apertura: $f/10$ – $f/12$.
- Dužina približno jednaka žižnoj daljini
- Jedina bitna razlika – korektor
- Nešto veća apertura, približno iste karakteristike kao „Maksutov“
- Osetljiv na greške u kolimaciji, pad kvaliteta slike
- Očekivana cena približno ista, niži kvalitet -> oko dva puta niža cena



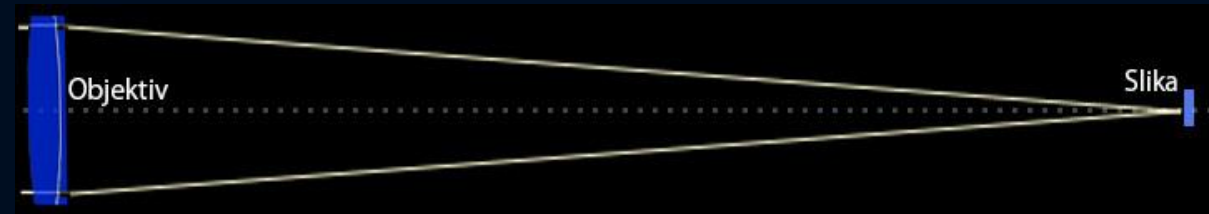


Refraktor ahromat

- Raspon apertura: 80 mm – 150 mm.
- Raspon relativnih apertura: $f/10$ – $f/15$.
- Dužina cevi približno jednaka žižnoj daljini objektiva.
- Refraktor ahromat je ograničen u veličini kvalitetne aperture koju može da dostigne, a time direktno u svetlosnoj i razdvojnoj moći
 - Razlog: hromatska aberacija
- Visok nivo kvaliteta slike (ako se aberacija drži pod kontrolom)
 - Površina sočiva zahteva 4 puta manju tačnost izrade od ogledala
 - 4 optičke površine (2-3 reflektor, 4-5 katadioptrik)
- Visok kontrast – nema centralne opstrukcije
- Niska osetljivost u kolimaciji, visoka termalna stabilnost

Refraktor apohromat

- Raspon apertura: 70 mm – 200 mm.
- Raspon relativnih apertura: $f/5 - f/10$.
- Dužina cevi približno jednaka žižnoj daljini objektiva.
- U proseku 5 puta niži nivo hromatske aberacije od refraktora ahromata (duplo kraći, ima bolju hromatsku korekciju)
- Kontrast na najvišem nivou
 - Visok nivo izrade, nema centralne opstrukcije
- Lakši za korišćenje od ahromata
- Cena – oko 5 puta veća od ahromata 😊



Da uporedimo 😊

- Najbolji „1“ itd.
- Bolji teleskop – manji zbir

- * Svetlosna i razdvojna moc su određeni na osnovu približne cene po jedinici aperture; dakle, koliko aperture kupuje određena suma, toliko se dobija svetlosti i razdvojne moci.
- ** Gregory-Maksutov

	DN=Dobson-Newton	EN=ekvatorijalni Newton	MN=Maksutov-Newton	SN=Schmidt-Newton	C =klasicni Cassegrain	MC=Maksutov-Cassegrain	SC=Schmidt-Cassegrain	A =ahromat	AP=apohromat
	DN	EN	MN	SN	C	MC	SC	A	AP
Svetlosna moć*	1	2	4	4	1	5	3	10	6
Razdvojna moć*	1	2	3	3	1	3	3	4	3
Slika:									
-kontrast	2	2	2	3	3	2	3	2	1
-vizuelno polje, širina	1	1	1	1	3	3	2	2	1
-vizuelno polje, kvalitet	3	3	2	3	2	2(3)**	2	1	1
-fotografsko polje	3	3	2	3	2	2(3)	2	3	1
-fotografska brzina	1	1	1	1	3	2(3)	2	3	2
-osetljivost(kolimacija)	3	3	2	2	4	2(1)	3	1	1
-termalna stabilnost	2	2	3	2	2	3	2	1	1
OPTIČKI ZBIR	17	19	20	22	21	24(26)	22	32	17
Udobnost osmatranja	2	3	3	3	1	1	1	3	2
Prenosivost	1	2	2	2	1	1	1	2	1
Održavanje	2	2	1	1	2	1	1	1	1
Cena po jed. aperture	1	2	4	3	3	4	3	4	20
PRAKTIČNOST (ZBIR)	6	9	10	9	7	7	6	10	24
TOTALNI ZBIR	23	28	30	31	28	31(33)	28	42	41