

Prioriteti astrofizike u SAD za slijedeće desetljeće,
ili “Zašto i kako potrošiti milijardu dolara na teleskop?”

Željko Ivezić

University of Washington, Sveučilište u Zagrebu

IRB Zagreb, 9. XII 2010

Teme Predavanja

- **NAS/NRC Decadal Surveys - ideja:** pregled znanstvenog područja i prioriteti za idućih deset godina
- **Kratki uvod u kozmologiju:** mjerenje širenja Svemira
- **Moderne kozmološke zagonetke:** tamna tvar i tamna energija
- **Large Synoptic Survey Telescope (LSST):** film Svemira za fiziku Svemira

NAS/NRC Decadal Surveys

- NAS/NRC Decadal Surveys: pregled znanstvenog područja i prioriteta za idućih deset godina
- Svaki je budžet konačne veličine: znanstvenici, a ne političari, trebaju odlučiti kako prioritizirati raspodjelu
- Bitne karakteristike procesa:
 - 1) pravila se znaju unaprijed
 - 2) transparentnost
 - 3) participacija “sviju zainteresiranih”
 - 4) rezultati vezajući (NASA, NSF, DOE)

Decadal Surveys: Astronomija & Astrofizika

- Šesti izvještaj za astronomiju/astrofiziku: **New Worlds, New Horizons in Astronomy and Astrophysics (2012–2021)**

<http://www.nap.edu/catalog/12951.html>

- Nature News Feature 443, 386–389 (28. XI 2006) by Geoff Brumfiel: “Some of us are impulse buyers, some chaotic shoppers, and some of us head out with a carefully thought through **list of what we want. Collectively, US astronomers fit in that last category.**”

Decadal Surveys: Astronomija & Astrofizika

- **Pet područja u astronomiji i astrofizici:**
 - 1) Cosmology and Fundamental Physics
 - 2) the Galactic Neighborhood
 - 3) Galaxies Across Cosmic Time
 - 4) Planetary Systems and Star Formation
 - 5) Stars and Stellar Evolution
- **Devet panela sa 123 člana** (Roger Blandford et al.)
- **324 “white papers”** “svi zainteresirani!”
- **17 “town hall meetings”** “svi zainteresirani!”
- “... independent appraisals of the technical readiness, schedule and cost risks of each project.” (“ko se jednom opeče...)

Decadal Surveys: Astronomija & Astrofizika

- **Prioritetni znanstveni programi:**
 - 1) deepening understanding of how the first stars, galaxies, and black holes formed,
 - 2) locating the closest habitable Earth-like planets beyond the solar system for detailed study, and
 - 3) using astronomical measurements to unravel the mysteries of gravity and probe fundamental physics.

”...recommends a balanced and executable program that will support research surrounding the most profound questions about the cosmos.”

Riccardo Giacconi: Kako “progurati” veliki projekt?

Prvo znanost, onda tehnologija, i tek na kraju politika!

Decadal Surveys: Astronomija & Astrofizika

- **Prioritetni znanstveni programi:**
 - **Spaced-based:**
 - 1) *Wide-Field Infrared Survey Telescope* **WFIRST**
Kozmologija, exoplaneti
 - 2) *The Explorer Program: “rapid response”*
Puno manjih programa (e.g. WMAP)
 - 3) *Laser Interferometer Space Antenna* **LISA**
Niskofrekventni gravitacijski valovi
 - 4) *International X-ray Observatory* **IXO**
Formacija zvijezda i galaksija (vrući plin)

Decadal Surveys: Astronomija & Astrofizika

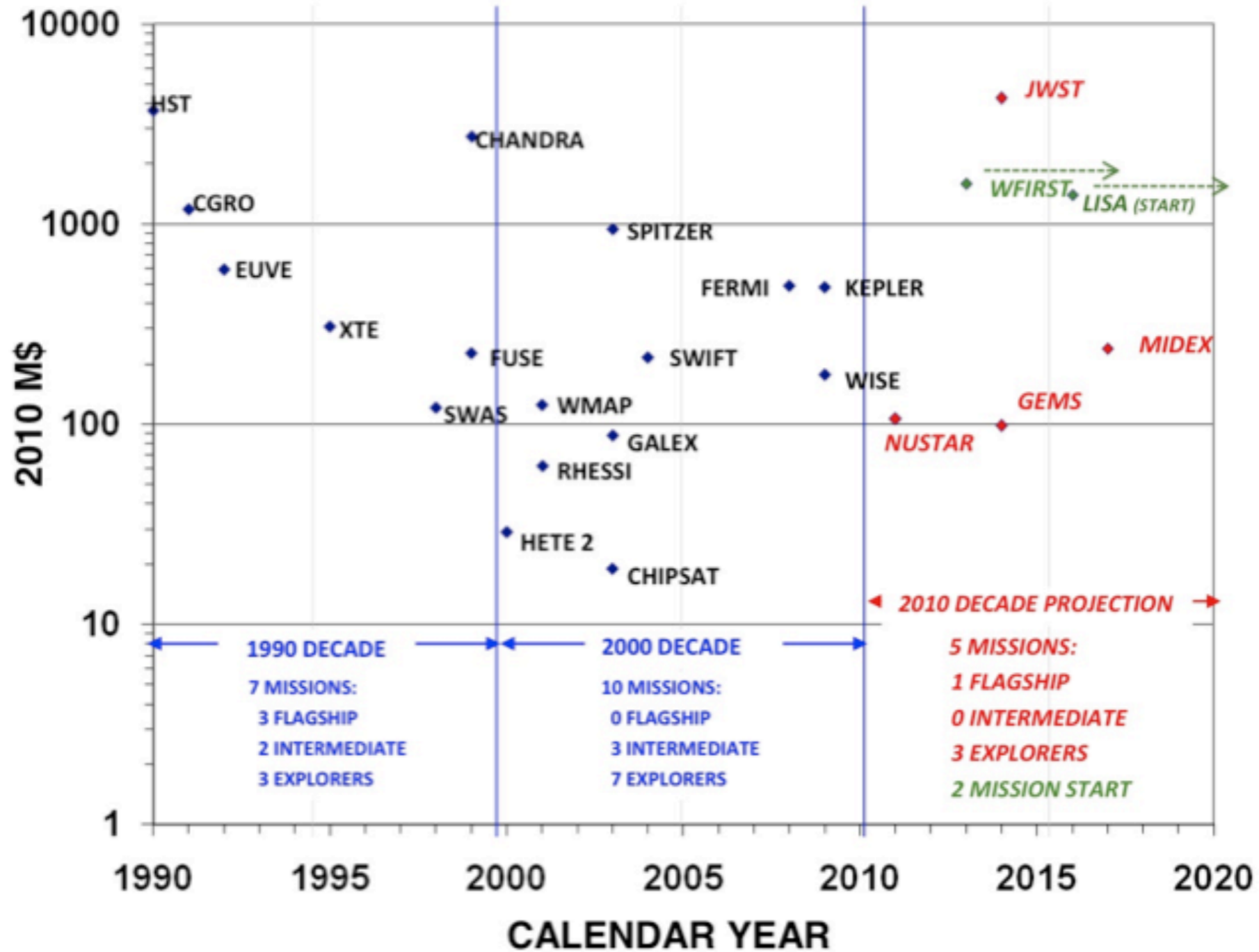


FIGURE 6-3 NASA mission cost over time including future projections. NASA SMD/AD mission cost over time including future projections. Dots correspond to launch dates or expected start dates. Flagship missions are those that are not cost constrained at selection whereas intermediate and Explorer class missions are so designated by cost.

NASA: trošak vs. vrijeme

WFIRST,
LISA,
IXO:
sudbina ovisi o trošku JWSTa!

Decadal Surveys: Astronomija & Astrofizika

- **Prioritetni znanstveni programi:**

- **Spaced-based:**

- 1) *Wide-Field Infrared Survey Telescope* **WFIRST**

- 2) *The Explorer Program* “rapid response”

- 3) *Laser Interferometer Space Antenna* **LISA**

- 4) *International X-ray Observatory* **IXO**

- **Ground-based:**

- 1) *Large Synoptic Survey Telescope* **LSST**

- 2) *Mid-scale Innovations Program* “rapid response”

- 3) *Giant Segmented Mirror Telescope (30m)* **GSMT**

- 4) *Atmospheric Čerenkov Telescope Array (Υ)* **ACTA**

- 5) *Cerro Chajnantor Atacama Telescope (submm)* **CCAT**

Decadal Surveys: Astronomija & Astrofizika

- Zašto je LSST na vrhu liste?

Sveobuhvatni znanstveni program & spremni za nastavak:

The top rank accorded to LSST is a result of

(1) “its compelling science case and capacity to address so many of the science goals of this survey”, [and]

(2) “its readiness for submission to the MREFC process as informed by its technical maturity, the survey’s assessment of risk, and appraised construction and operations costs.”

Također:

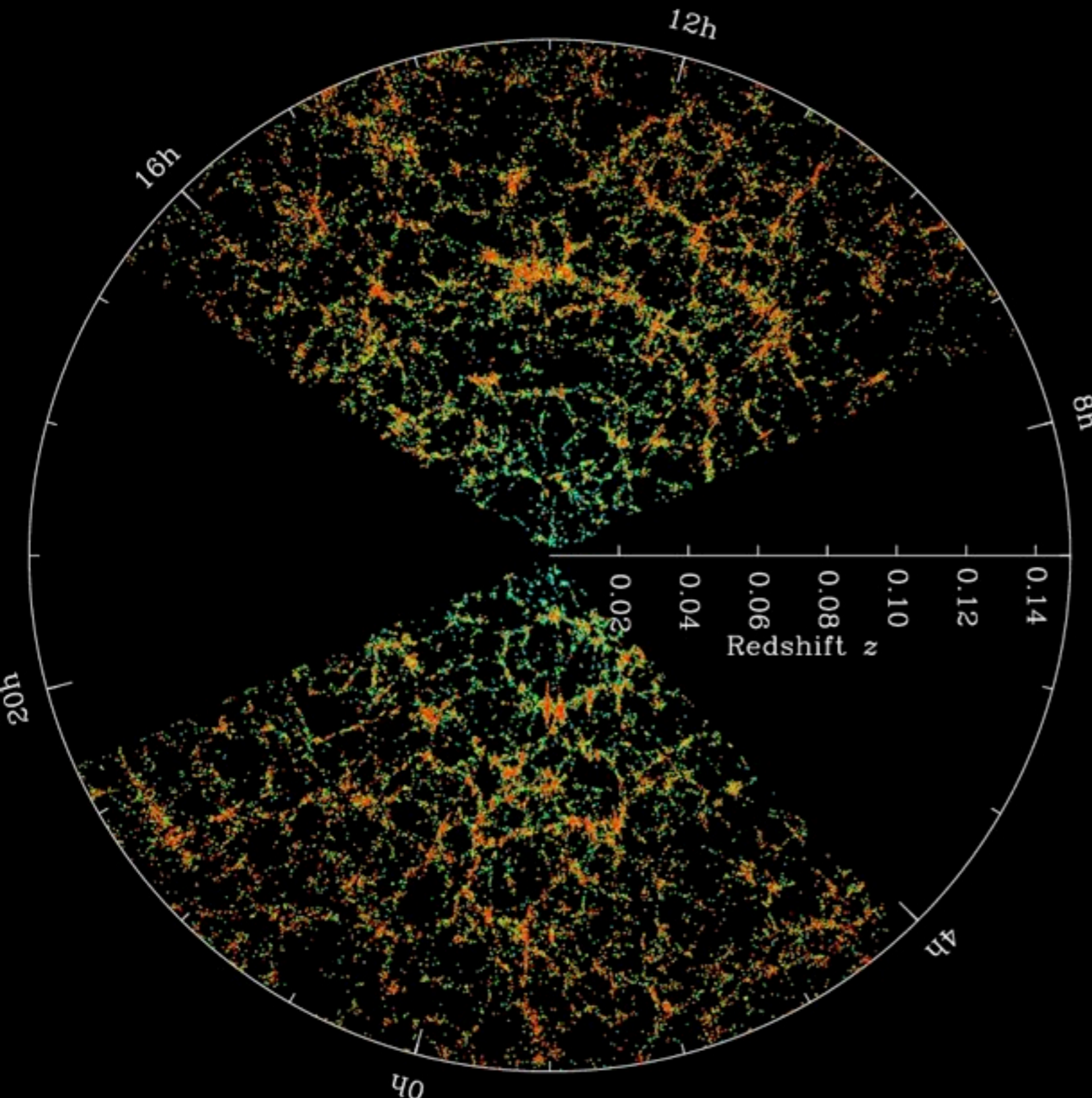
“education and public outreach”

Osnovne znanstvene teme za LSST

- Tamna tvar, tamna energija, kozmologija (prostorna raspodjela galaksija, gravitacijske leće, supernove)
- Vremenski promjenljivi objekti (kozmičke eksplozije, promjenljive zvijezde)
- Struktura sunčevog sistema (asteroidi)
- Struktura Mliječnog Puta (zvijezde)

Sve te teme vode ne samo sličnom sistemu (hw & sw), nego i sličnim zahtjevima na strategiju promatranja

Galaksije: prostorna raspodjela

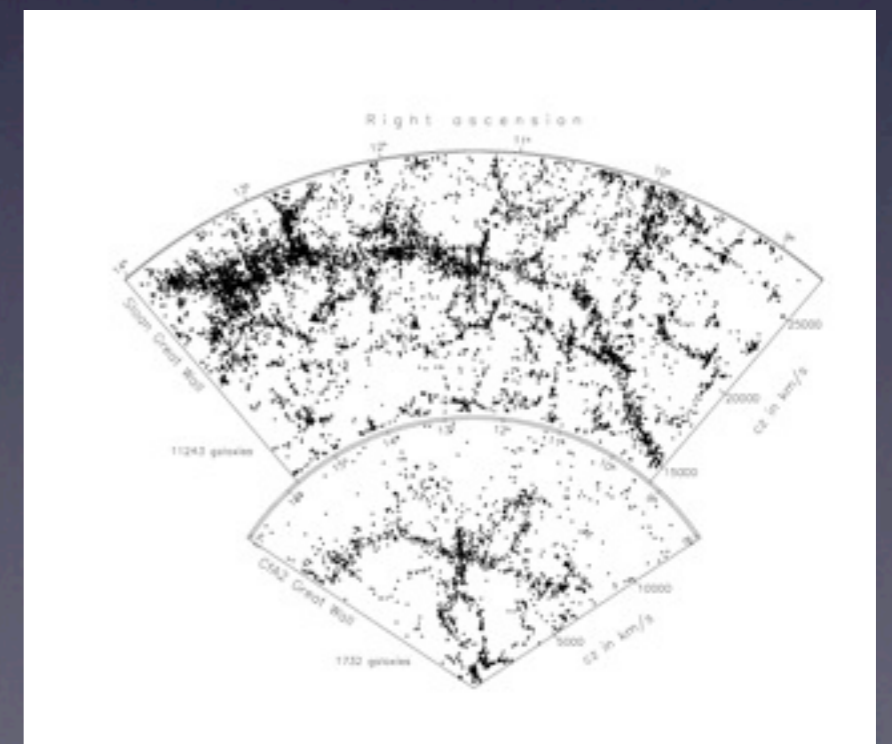


Lijevo: svaka točka je jedna SDSS galaksija

Nehomogena raspodjela:

korisne informacije o utjecaju gravitacije na stvaranje strukture, te o kozmologiji

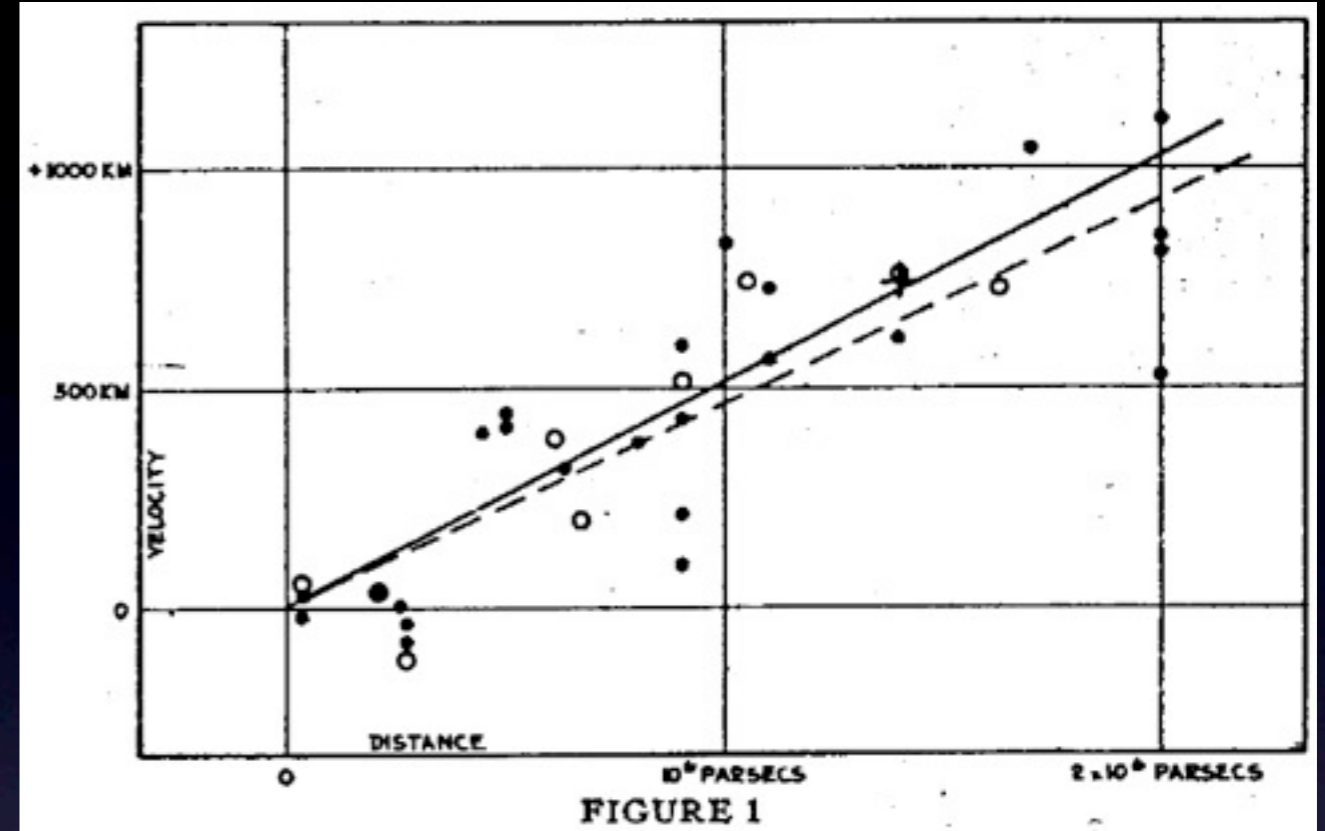
Dolje: SDSS Great Wall



Stare kozmološke zagonetke

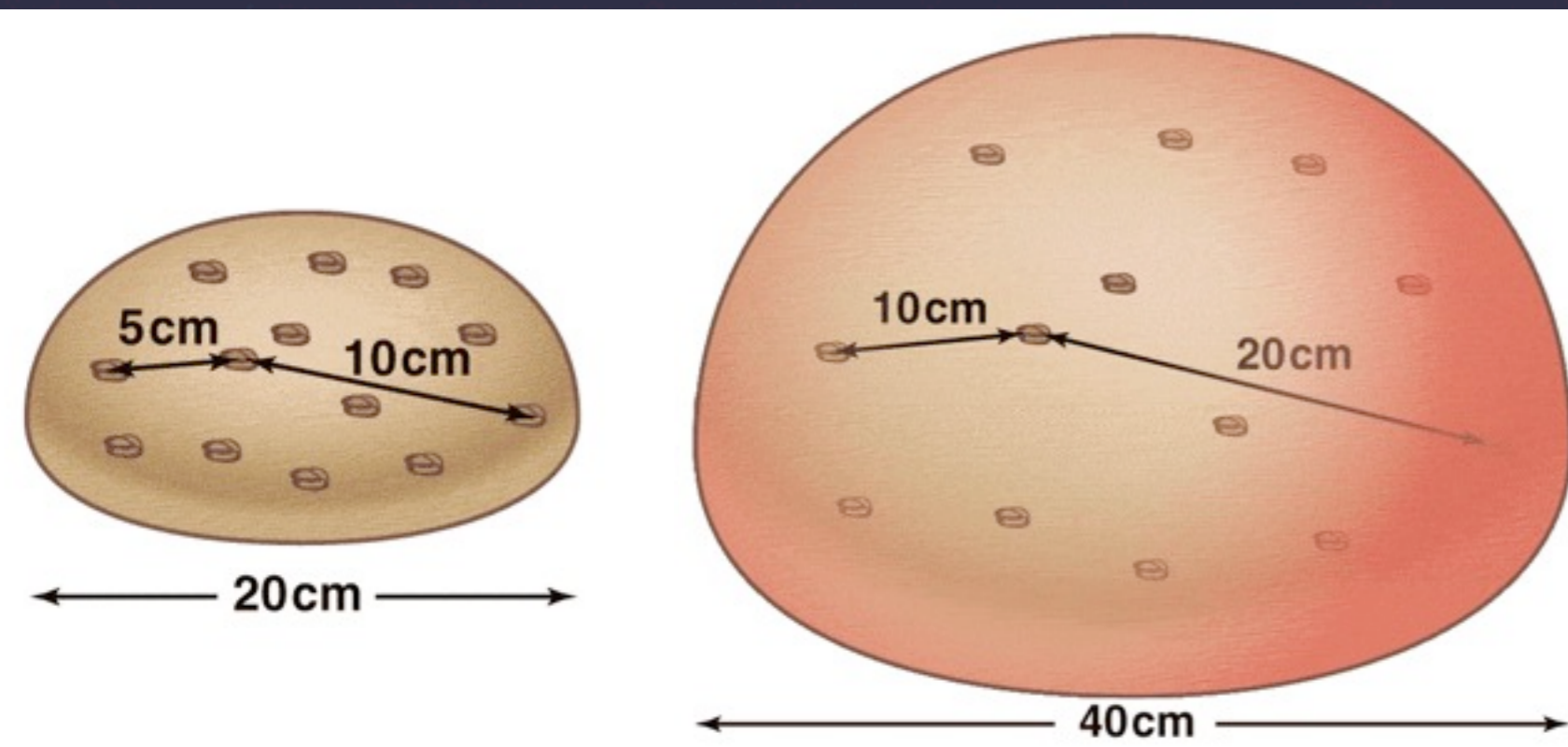


brzina udaljavanja



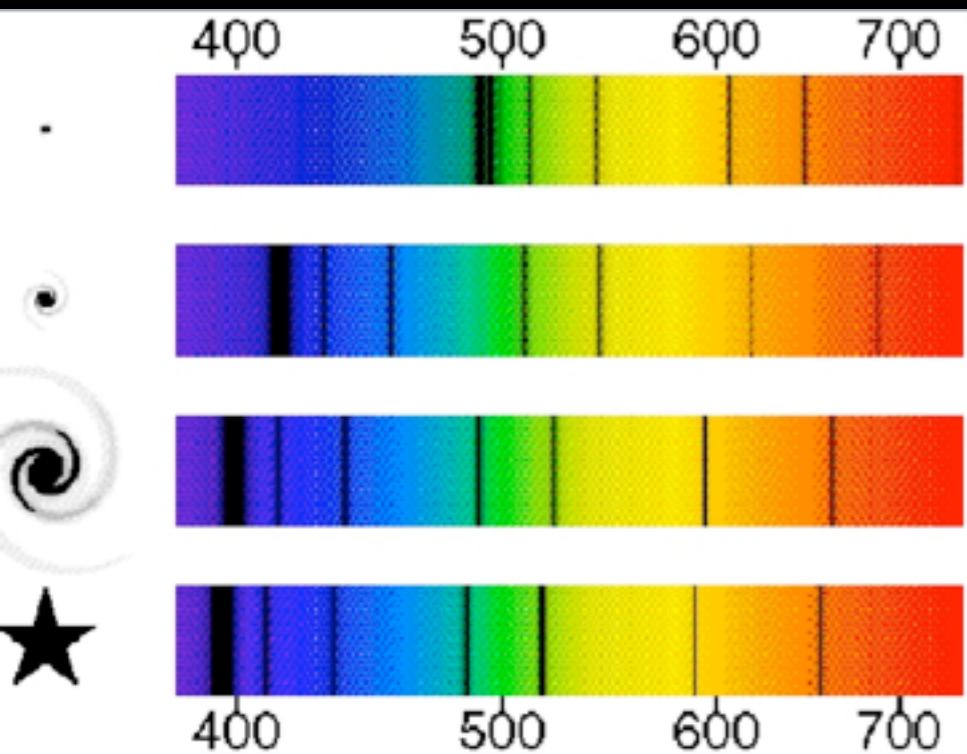
Edwin Hubble (1929): “Svemir se širi!”

udaljenost



**Svemir se širi;
mislilo se kako to
širenje mora
usporavati zbog
djelovanja
gravitacije, ali...**

Kako mjeriti širenje Svemira?

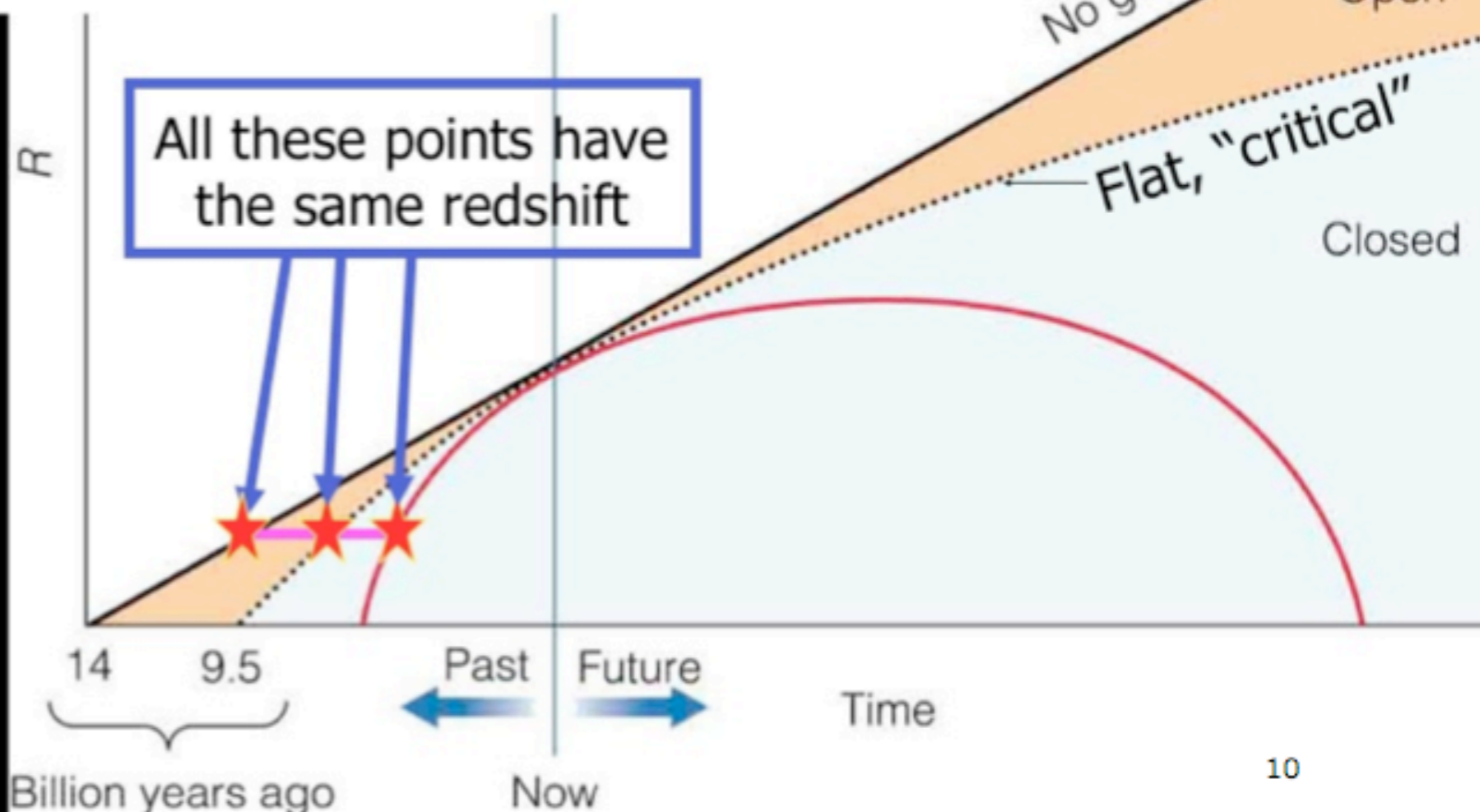


- Svjetlost se ne širi beskonačno brzo: kada se promatraju daleki astronomski objekti, gleda se u (daleku) prošlost (do ~13 milijardi godina!)
- Idealno, htjeli bi mjeriti veličinu Svemira kao funkciju vremena. Pomoću toga mjerenja mogli bi odgonetnuti koliko je tamne tvari i tamne energije u Svemiru, kao i detaljno termodinamičko ponašanje tamne energije

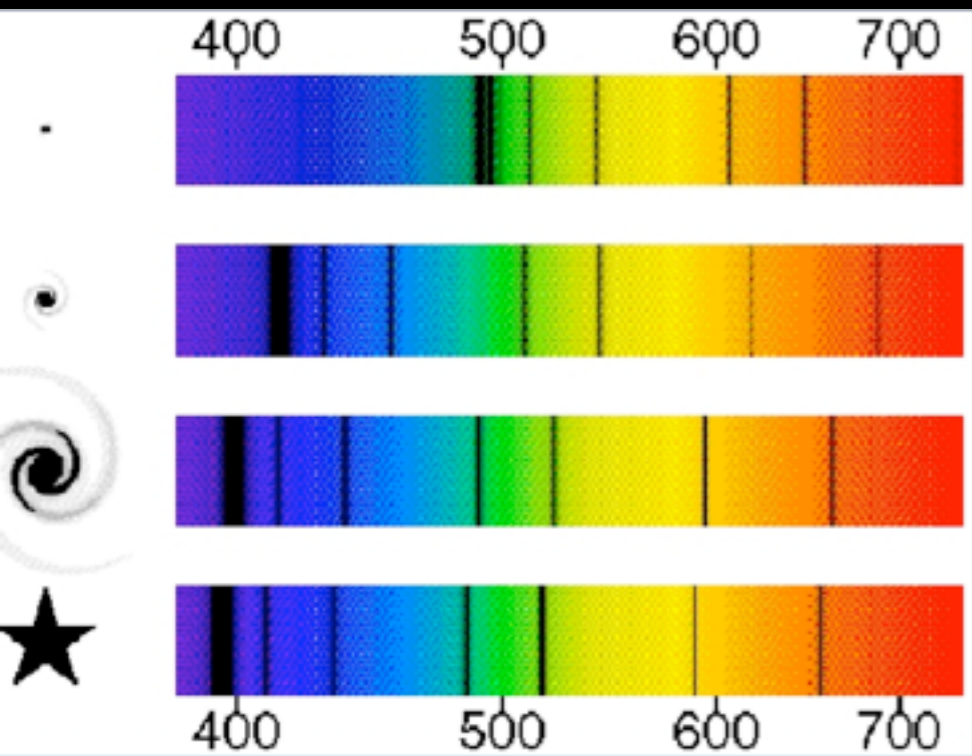
Dopplerov efekt:

što se objekt brže udaljava od nas to je veći pomak spektralnih linija prema nižim frekvencijama

Separation Between Galaxies →



Kako mjeriti širenje Svemira?

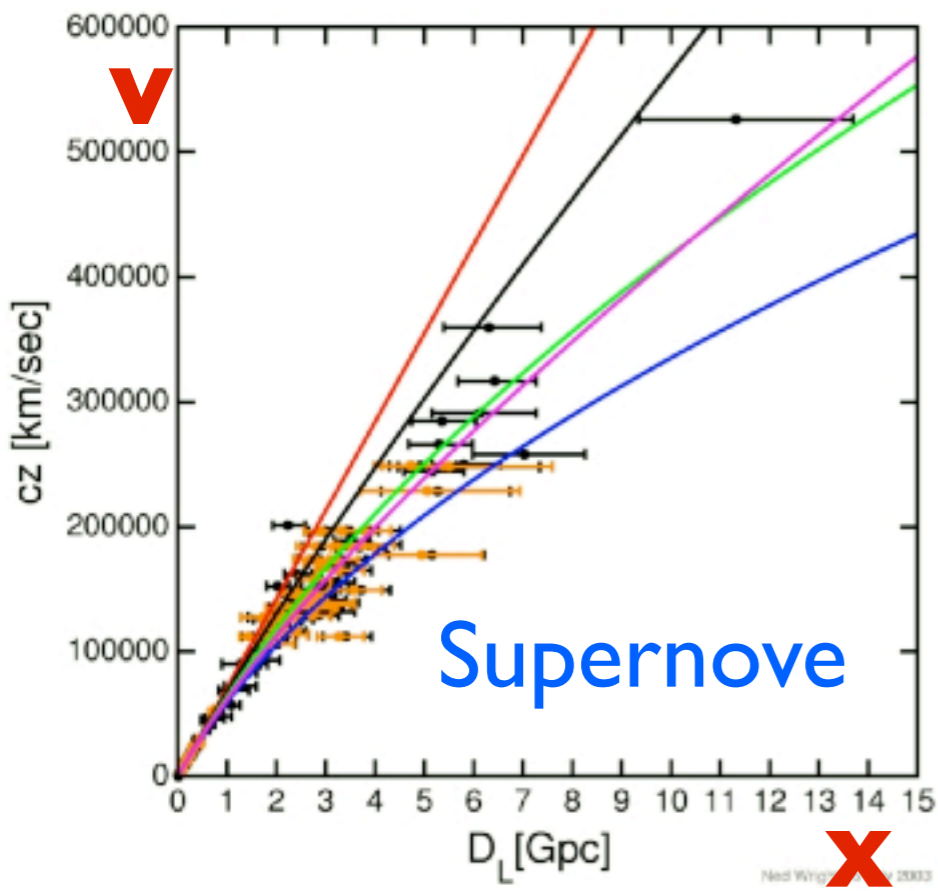
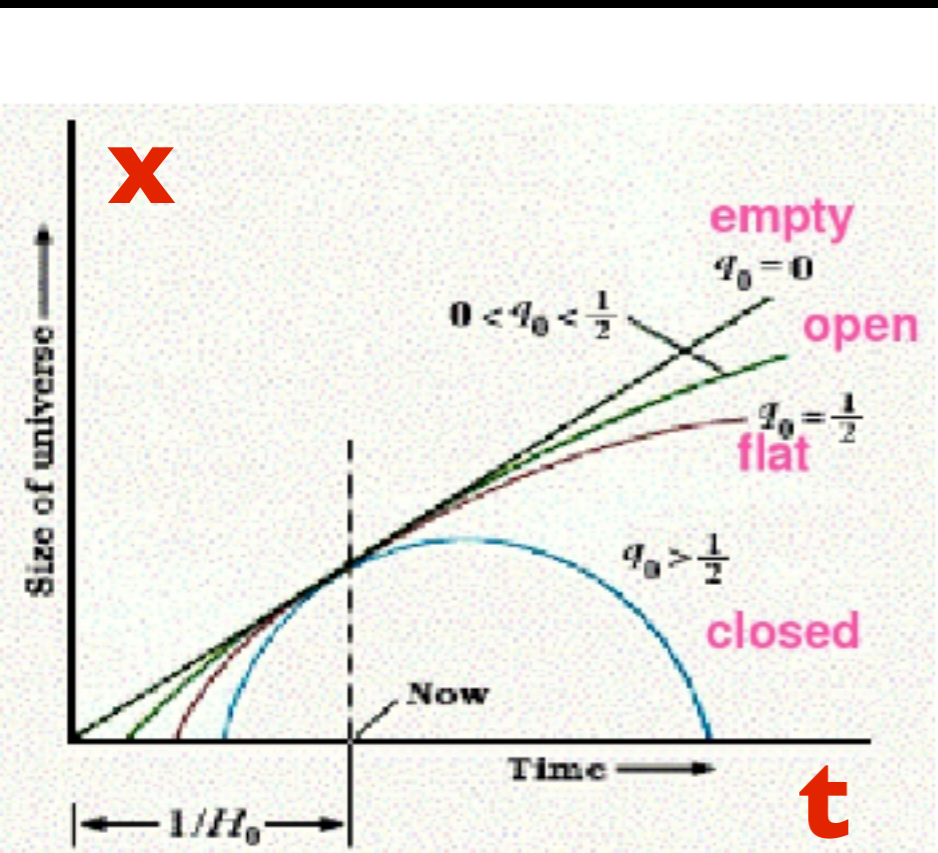


Dopplerov
efekt:

što se objekt
brže udaljava od
nas to je veći
pomak
spektralnih linija
prema nižim
frekvencijama

- Svjetlost se ne širi beskonačno brzo: kada se promatraju daleki astronomski objekti, gleda se u (daleku) prošlost (do ~13 milijardi godina!)
- Idealno, htjeli bi mjeriti veličinu Svemira kao funkciju vremena. Pomoću toga mjerenja mogli bi odgonetnuti koliko je tamne tvari i tamne energije u Svemiru, kao i detaljno termodinamičko ponašanje tamne energije
- Veličinu Svemira u trenutku kada je neki izvor emitirao svjetlost je jednostavno odrediti iz spektralnog crvenog pomaka; problem je kako odrediti starost Svemira u tome trenutku

Kako mjeriti širenje Svemira?



- Svjetlost se ne širi beskonačno brzo: kada se promatraju daleki astronomski objekti, gleda se u (daleku) prošlost (do ~13 milijardi godina!)
- Idealno, htjeli bi mjeriti veličinu Svemira kao funkciju vremena. Pomoću toga mjerenja mogli bi odgonetnuti koliko je tamne tvari i tamne energije u Svemiru, kao i detaljno termodinamičko ponašanje tamne energije
- Veličinu Svemira u trenutku kada je neki izvor emitirao svjetlost je jednostavno odrediti iz spektralnog crvenog pomaka; problem je kako odrediti starost Svemira u tome trenutku
- Umjesto mjerenja vremena, mjeri se udaljenost do izvora (npr. supernove: “standardne svijeće”), a onda se koriste kozmološki modeli za interpretaciju mjerenja

Kozmološki modeli: primjenom fizikalnih zakona, računa se veličina, temperatura, gustoća, raspodjela tvari i slično, kao funkcija kozmičkog vremena

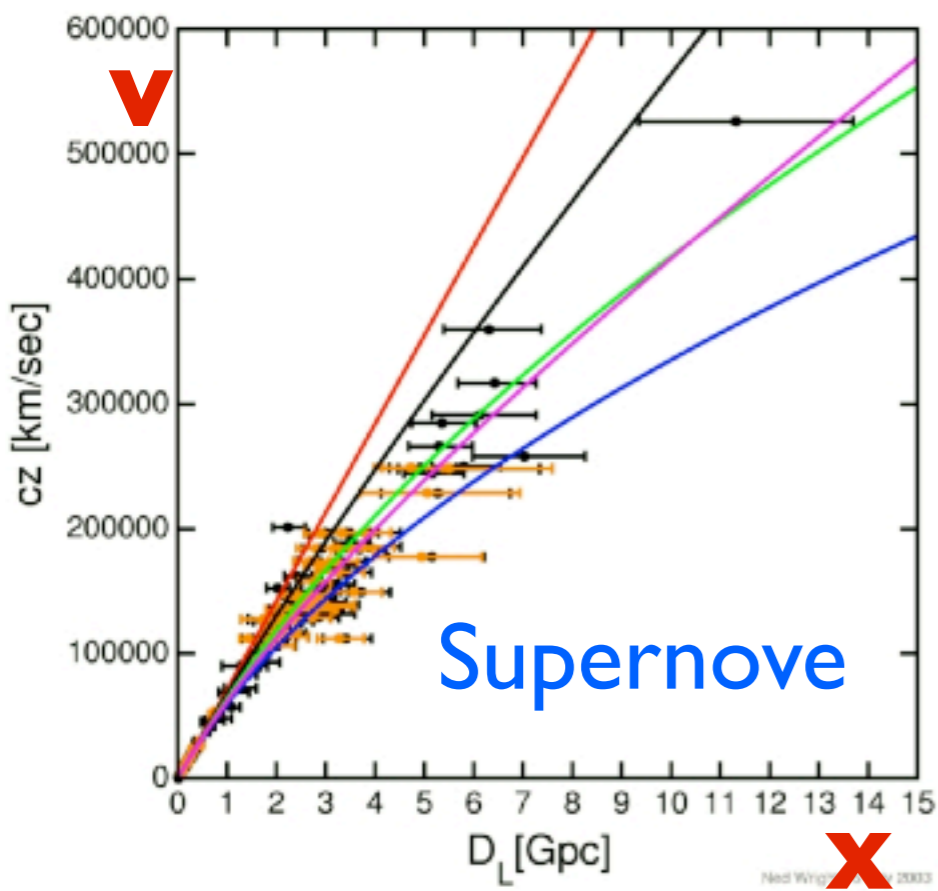
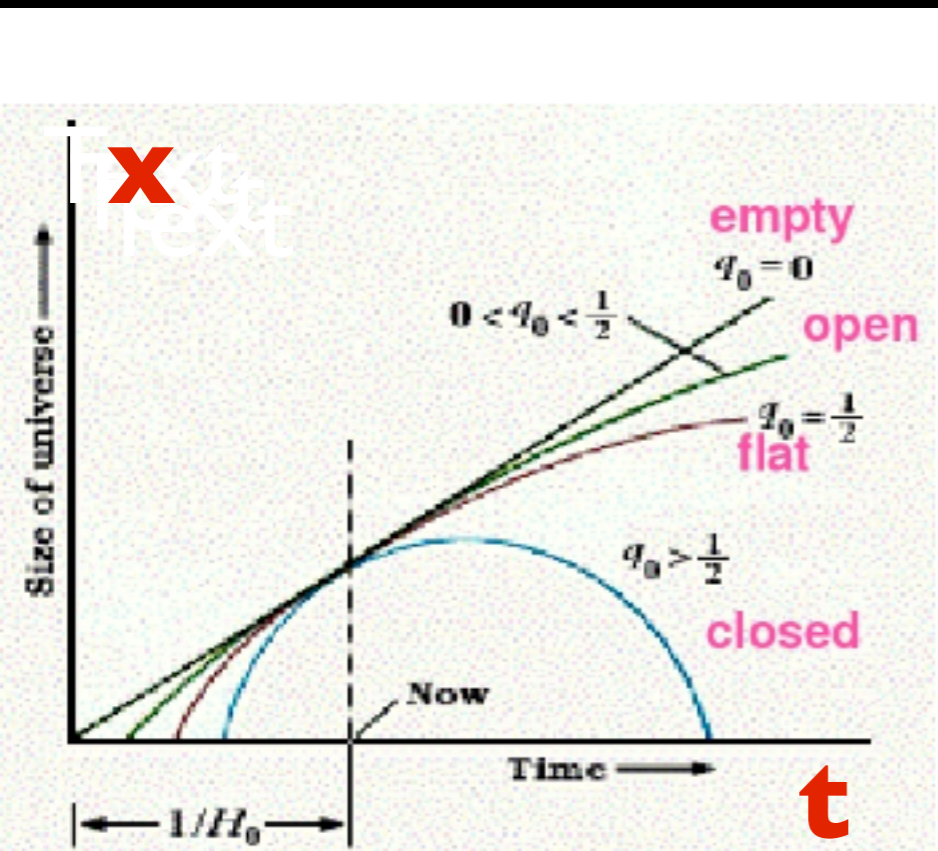
Kako mjeriti širenje Svemira?

- Umjesto mjerenja vremena, mjeri se udaljenost do izvora (npr. supernove: “standardne svijeće”), a onda se koriste kozmološki modeli za interpretaciju mjerenja

Primjer bilo kojeg gibanja:

Položaj $x(t)$; brzina $v(t)$; htjeli bi znati $x(t)$, no vrijeme, t , ne možemo mjeriti nego samo x i v .

Medjutim, ako imamo model kojim povežemo x i v (npr. $v=dx/dt$, tj. brzina je promjena položaja u vremenu), onda se može izvesti $x(t)$.



Kozmološki modeli

Kozmološki model: pretpostavi se homogeni i izotropni Svemir, ispravnost opće teorije relativnosti, osnovni sastojci (barioni, fotoni, tamna tvar, tamna energija), te termodinamičko ponašanje sastojaka, pa se izračuna ponašanje astronomskih mjerenja kao funkcija starosti Svemira (crvenog pomaka)

Rezultati modela uspoređuju se sa astronomskim kozmološkim mjerenjima, te se slobodni parametri modela mijenjaju dok se ne dobije slaganje

Kozmologija: što mjere astronomi?

Počevši sa Einsteinovim jednažbama polja,

$$R_{\nu}^{\mu} - \frac{1}{2}g_{\nu}^{\mu}R - \lambda g_{\nu}^{\mu} = 8\pi GT_{\nu}^{\mu} \quad (1)$$

(n.b. g_{ν}^{μ} "skriva" Robertson-Walker metriku), može se izvesti "astronomska" Friedmannova jednažba

$$E^2(z) = \Omega_r(1+z)^4 + \Omega_m(1+z)^3 + \Omega_k(1+z)^2 + \Omega_{DE}f(z), \quad (2)$$

gdje je

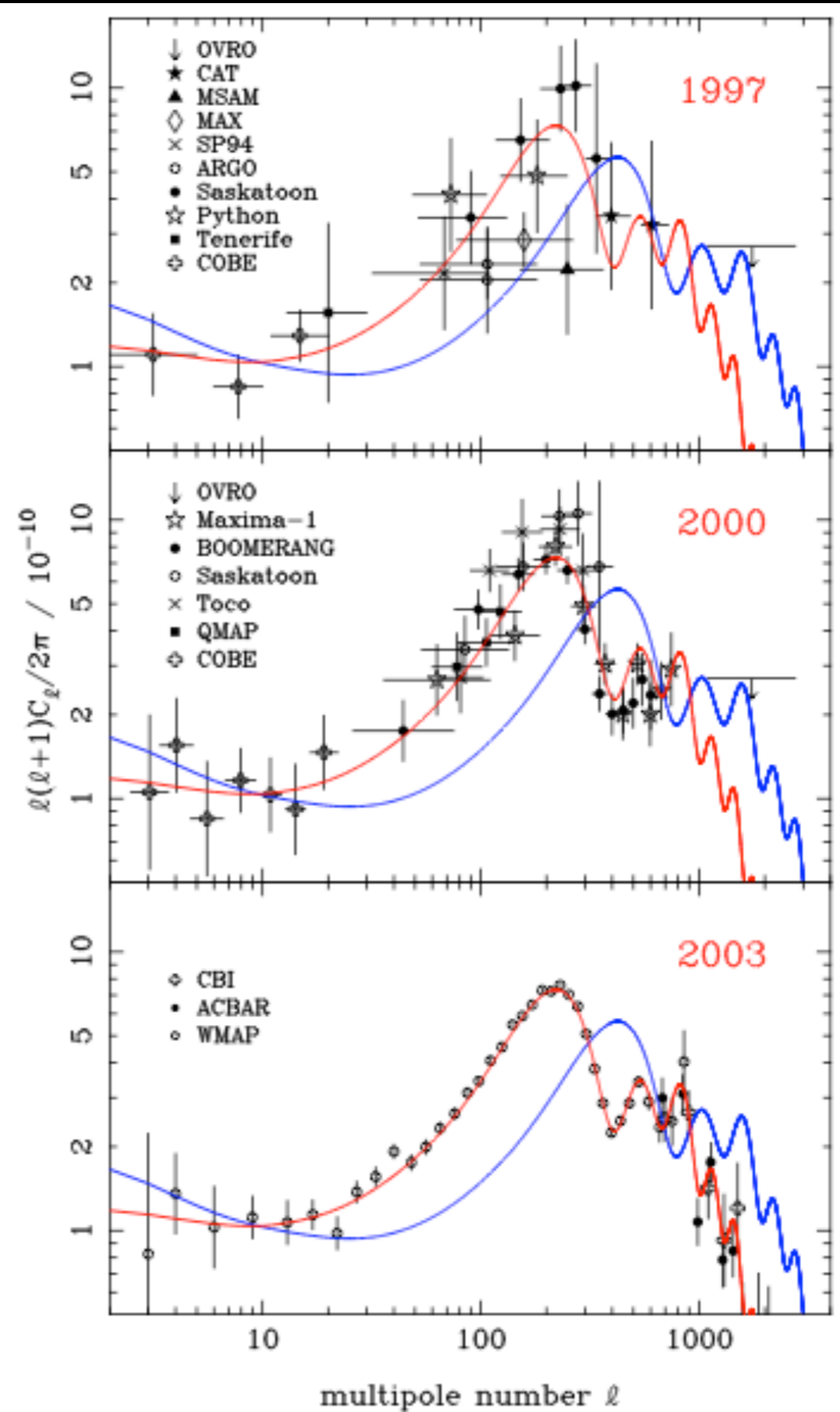
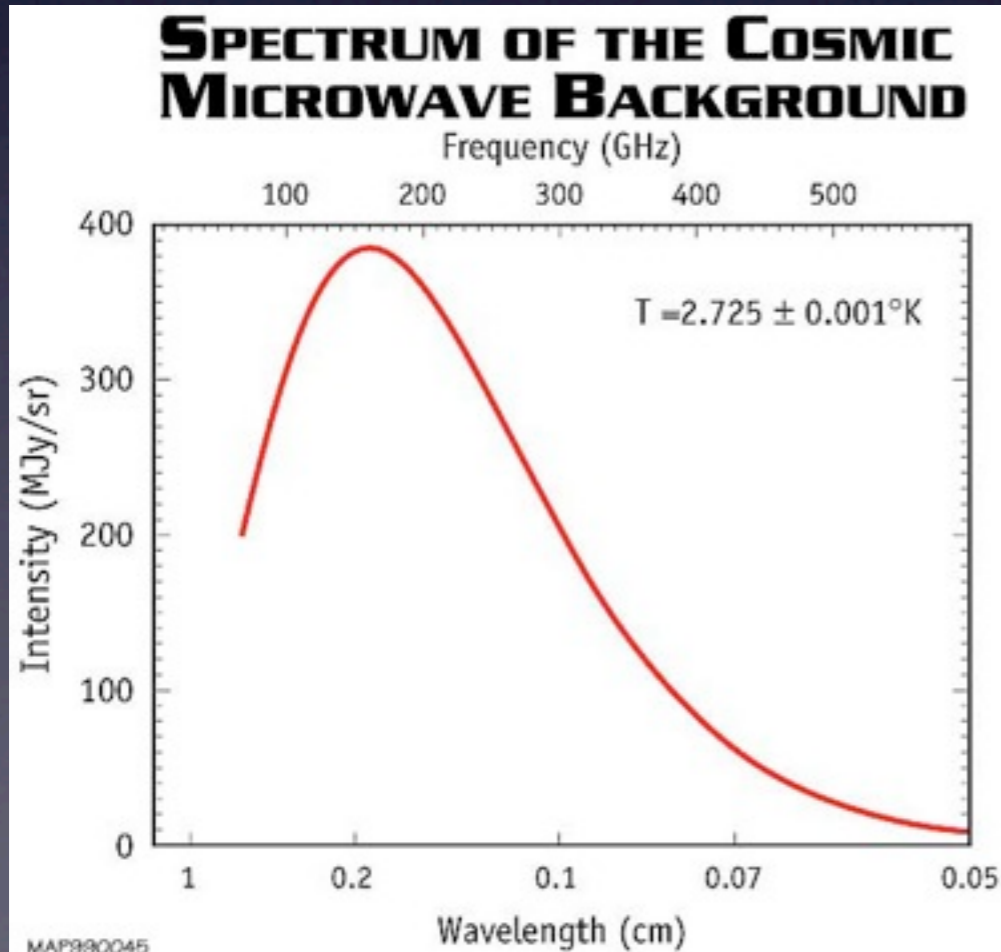
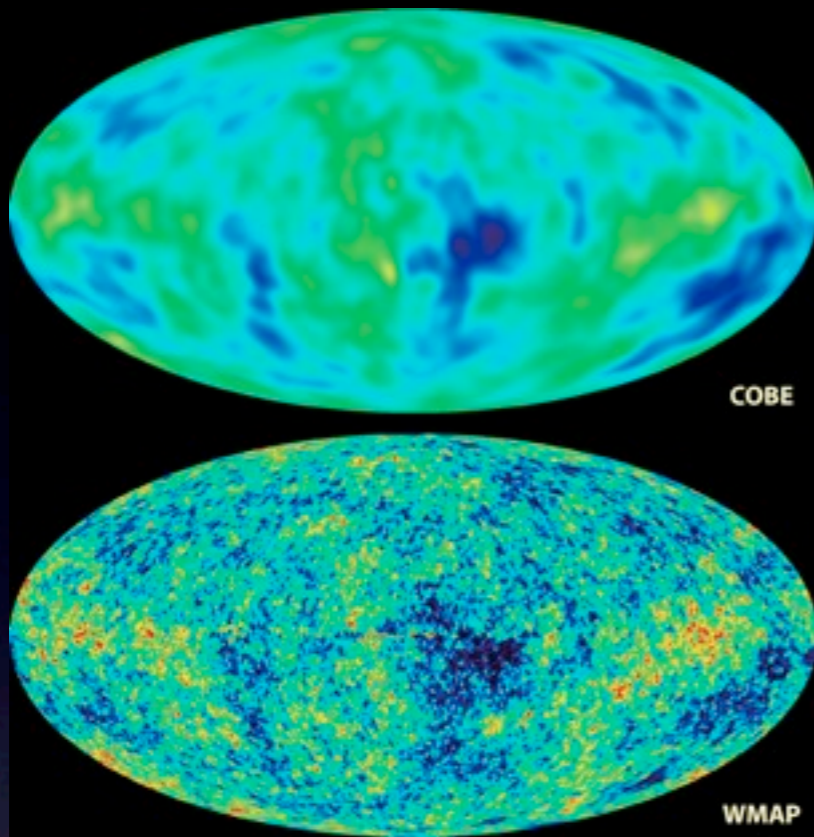
$$E(z) = \frac{H(z)}{H_0} = \frac{1}{R} \frac{dR}{dt}, \quad (3)$$

$R(t)$ je veličina Svemira normalizirana današnjom vrijednošću, $H(z)$ je Hubbleov parametar, i

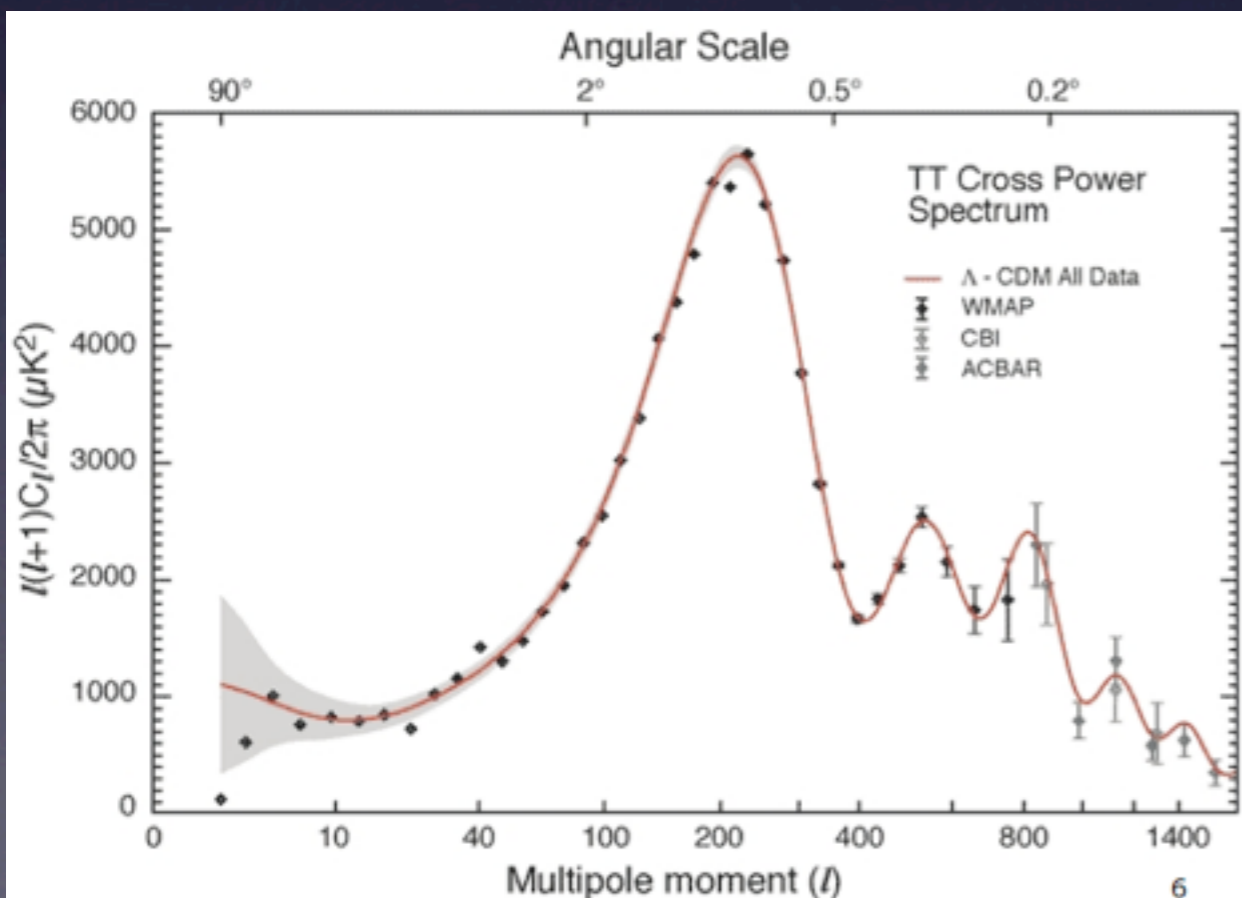
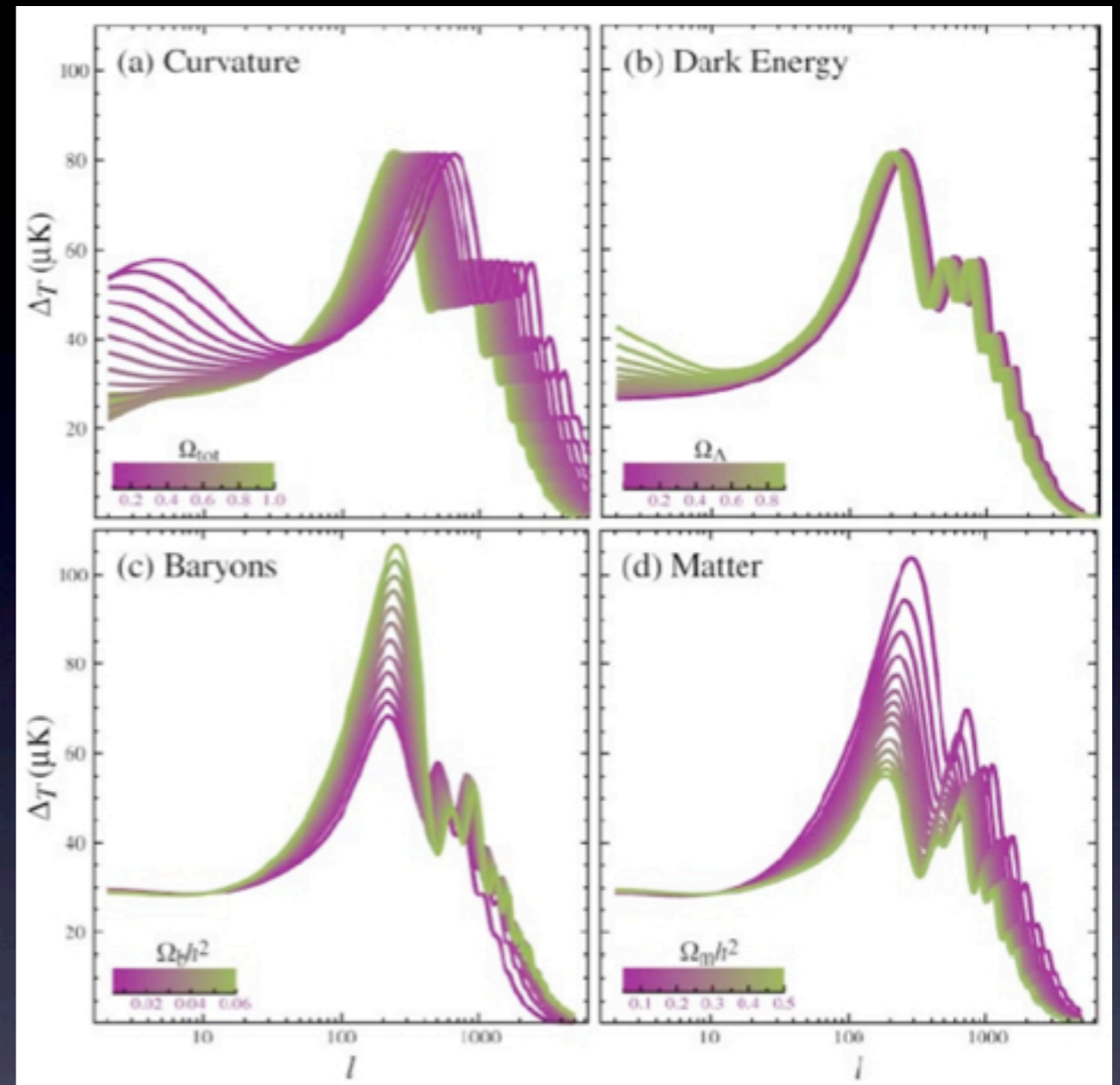
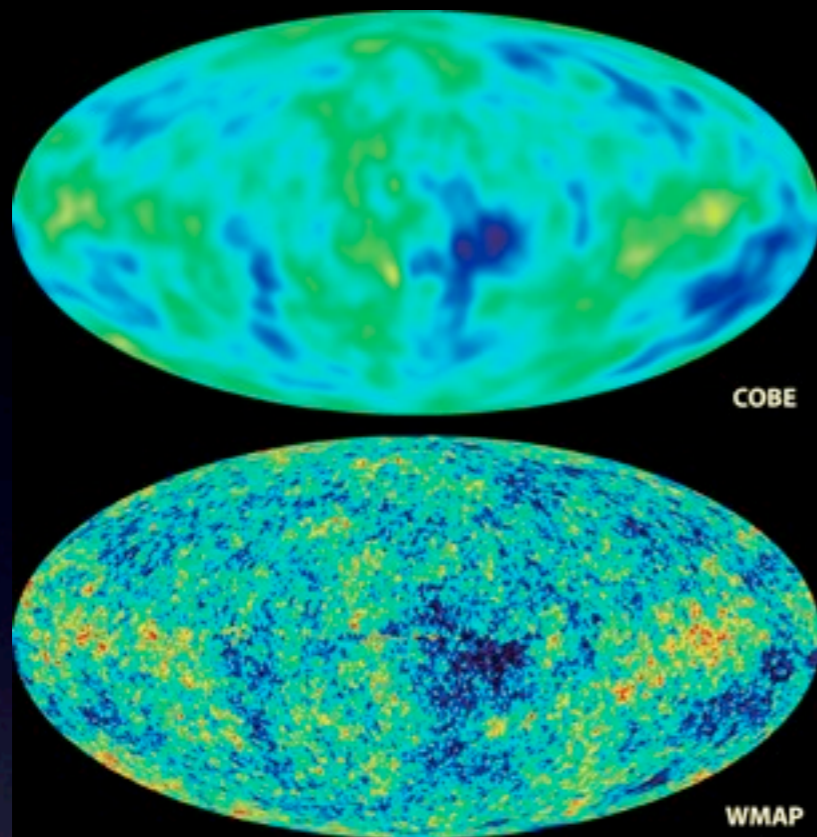
$$f(z) = \exp\left(3 \int_0^z \frac{1+w(z')}{1+z'} dz'\right). \quad (4)$$

Jednažba stanja tamne energije je opisana sa $w(z) = p/(\rho c^2)$ [za $w(z) = -1$, $f(z) = 1$ i $\Omega_{DE} \equiv \Omega_{\Lambda}$].

Kozmološki modeli: primjer pozadinskog zračenja



Kozmološki modeli: primjer pozadinskog zračenja

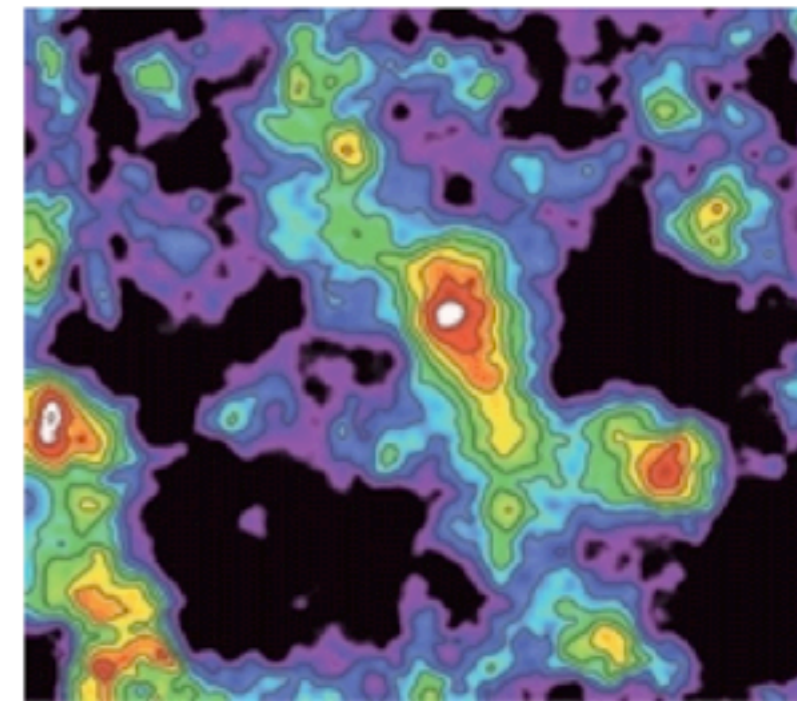
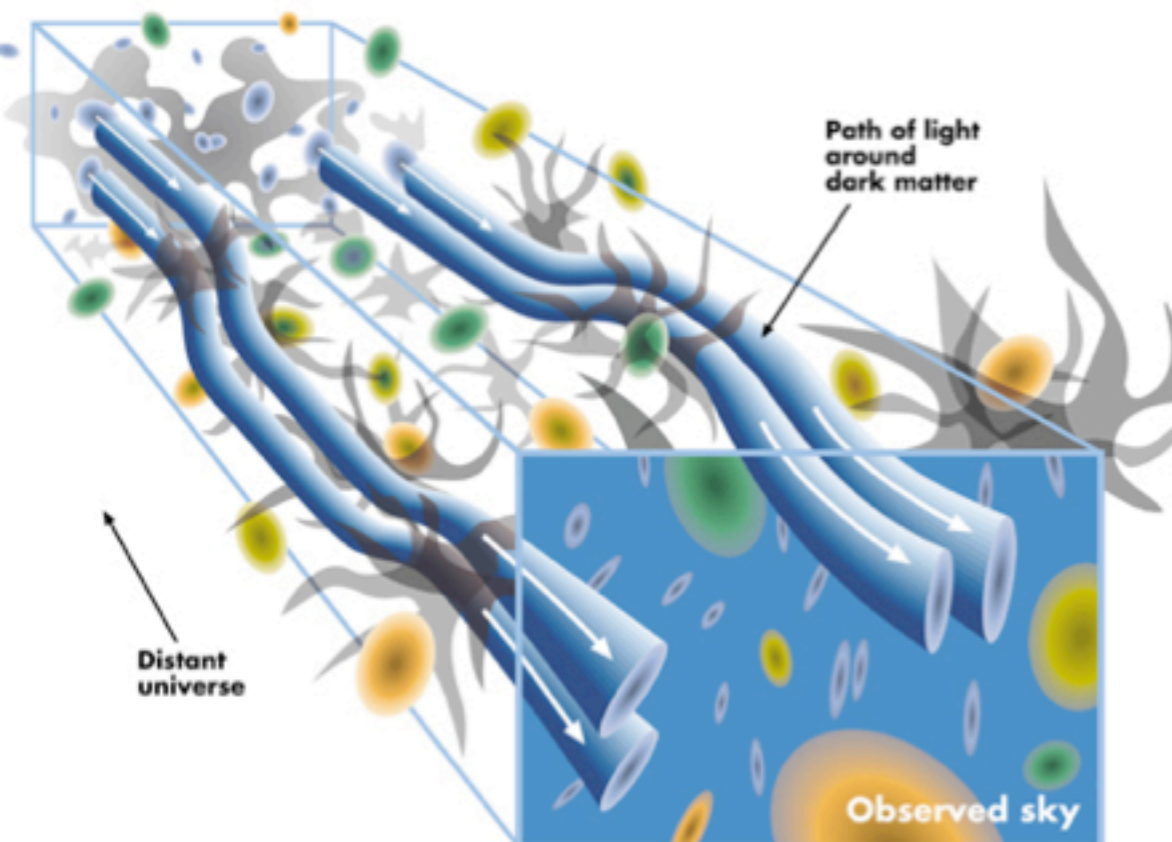
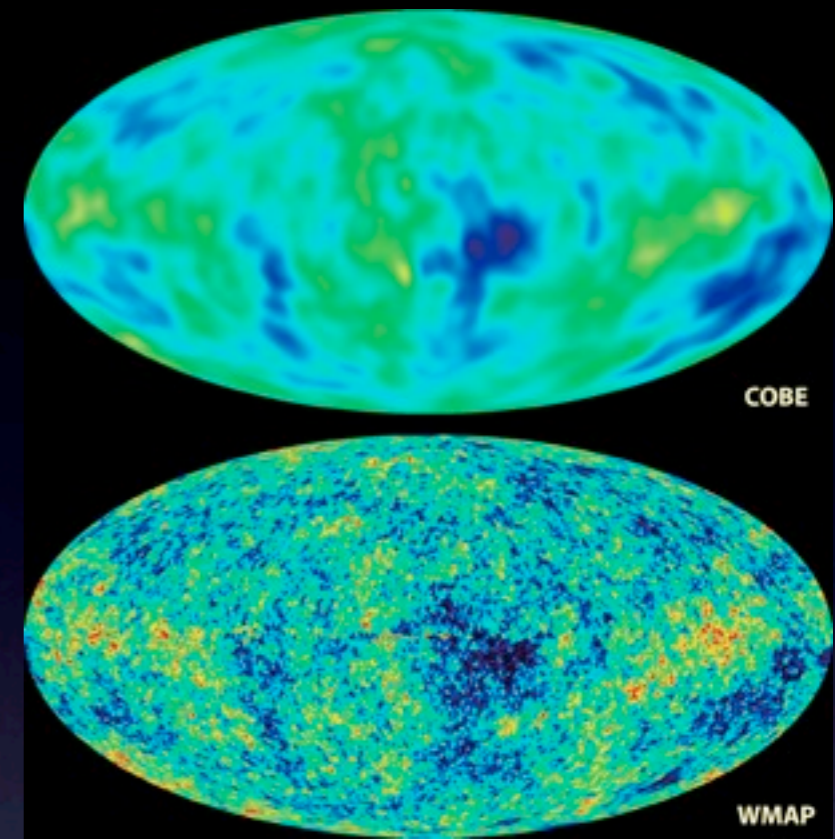


Model savršeno opisuje promatranja, ali je jako čudan: tamna energija!

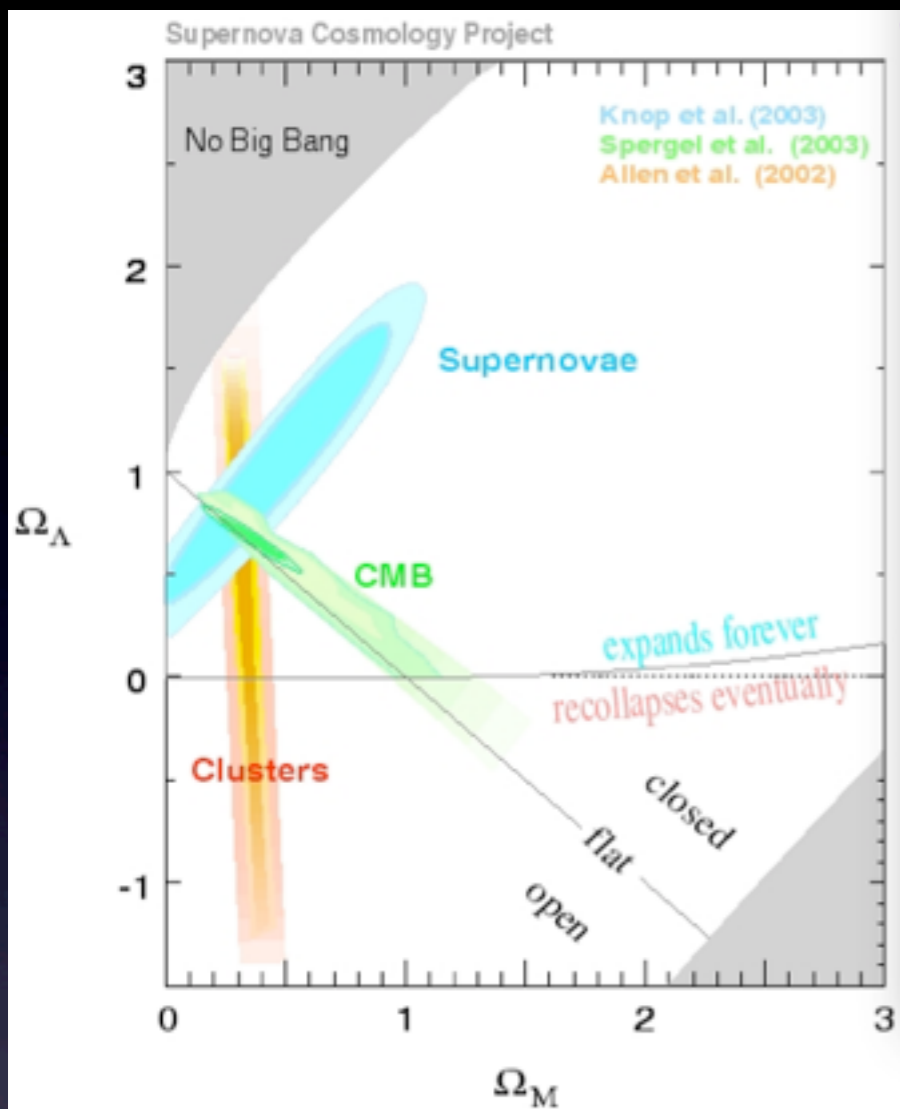
Kako mjeriti širenje Svemira?

Indirektne metode: slabe gravitacijske leće, statistička svojstva raspodjele galaksija, kozmičko mikrovalno pozadinsko zračenje

Komplementarne metode: eksperimentalno zahtjevne, ali potencijalno vrlo točne ($\sim 1\%$)

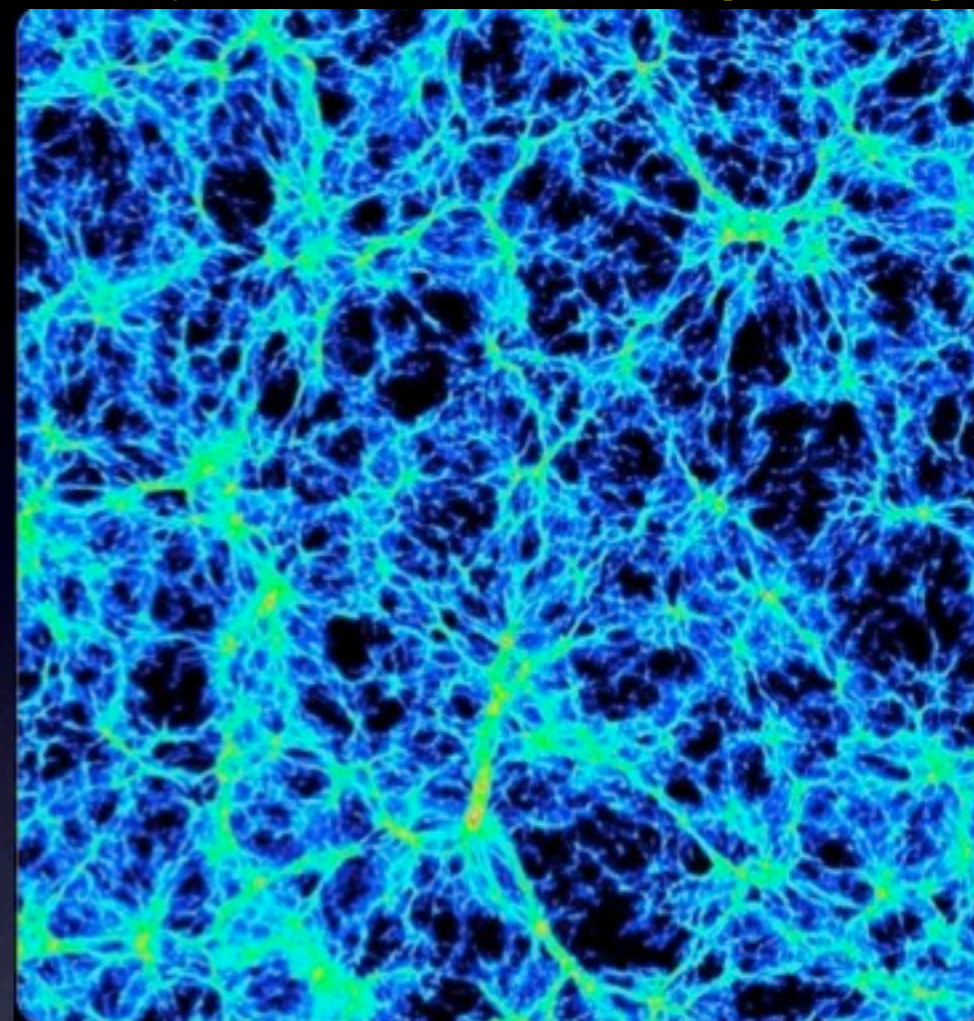


Standardni kozmološki model

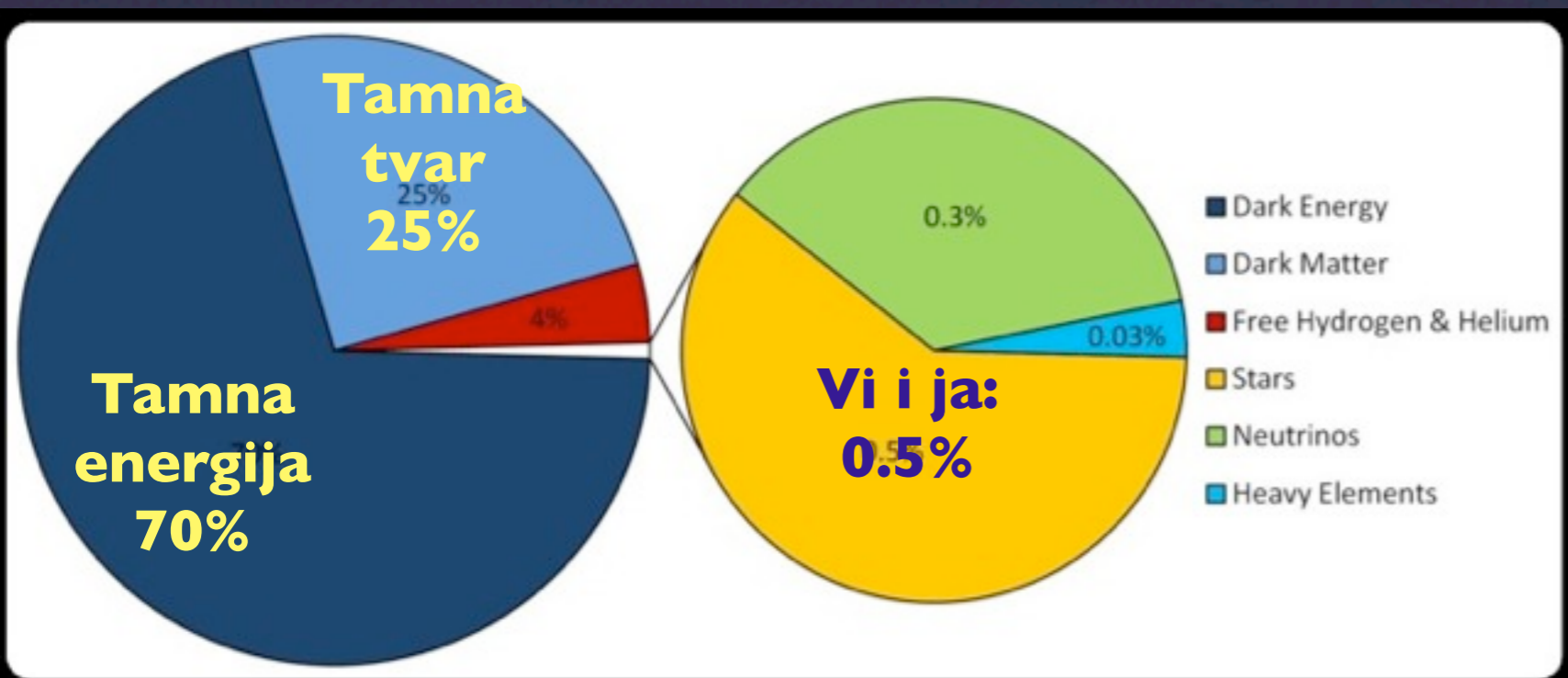


Moderni model širenja Svemira simultano objašnjava sva astronomska promatranja, ali mora postulirati tamnu tvar i tamnu energiju

Raspodjela tamne tvari (model):



Standardni model širenja Svemira objašnjava sva promatranja, ali ne zna se što su tamna tvar i tamna energija - no moguće je da opis gravitacije nije točan!



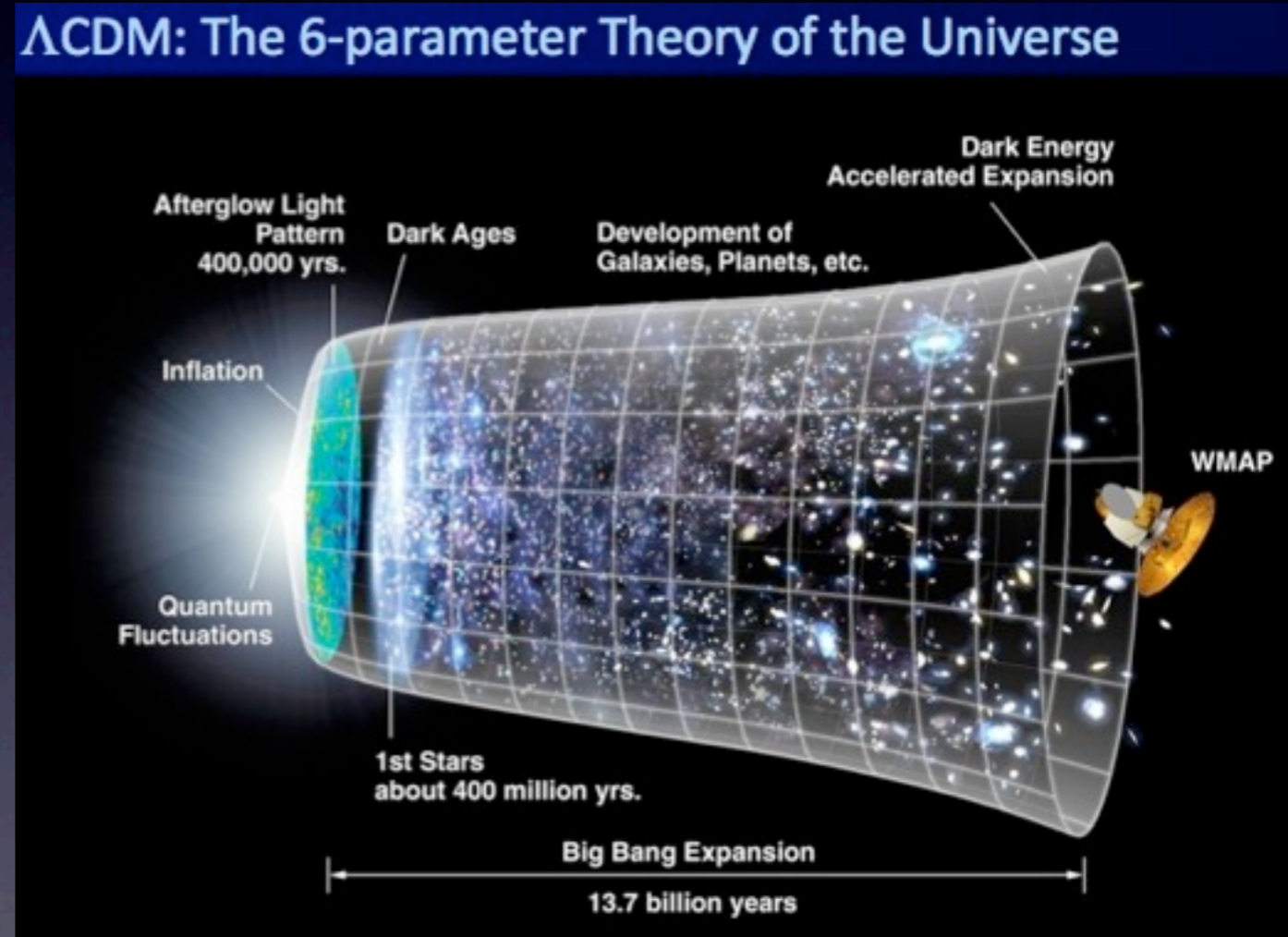
Nove kozmološke zagonetke

- 1) Moderni model širenja Svemira objašnjava sva promatranja, ali mora postulirati tamnu tvar i tamnu energiju; za tamnu energiju nema još teorijskog fizikalnog objašnjenja
- 2) Moguće je da opis gravitacije nije točan: ako je tako, nema potrebe za misterioznim fluidom nazvanim tamna energija

Veliki problem!!!
Kako naprijed???

Postojeća mjerenja nisu dovoljno točna za razlikovati gornje mogućnosti 1) i 2)

Bolja mjerenja: pomoću novih tehnologija, izmjeriti svojstva tamne materije i tamne energije 10-100 puta točnije, tj. dovoljno točno da se razlike u manifestaciji mogućnosti 1) and 2) mogu vidjeti!



Moderna kozmološka mjerenja

- Supernove (SNe): lako im je odrediti udaljenost
- Gravitacijske leće: raspodjela tvari (obične i tamne)
- Prostorna raspodjela galaksija (statistika)
- Kozmičko pozadinsko zračenje (Planck satelit)

Za precizna mjerenja širenja Svemira i stvaranja strukture potrebni su uzorci od nekoliko milijardi galaksija, te stalna promatranja da bi se otkrile SNe.

Slična su promatranja potrebna za otkrivanje opasnih asteroida, te za mnogo drugih grana astrofizike (npr. proučavanje Mlječnog Puta, kvazara, itd):

Motivacija za Large Synoptic Survey Telescope (LSST)

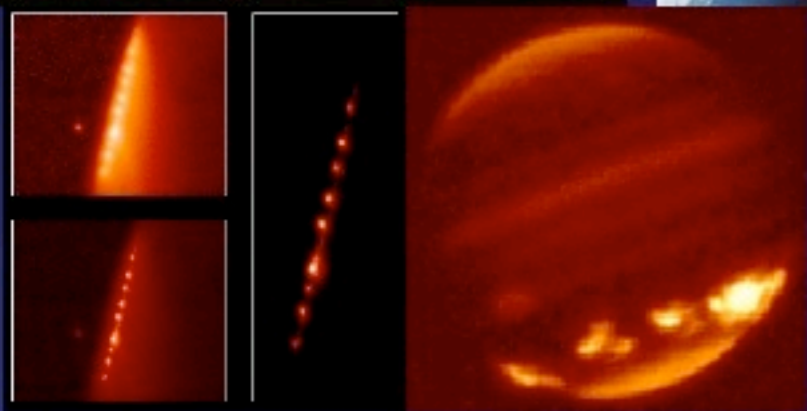
Digresija: potraga za opasnim asteroidima



fotomontaža!

Vjerojatnost udara asteroida u Zemlju nije zanemariva!

NASA ima mandat od Kongresa SAD za pronalaženje 90% asteroida većih od 140m do 2020



Shoemaker-Levy 9 (1994)



Tunguska (1908)



Piramide su fotomontaža!

Krater Barringer u Arizoni: udarac 40m objekta prije 50,000 god.



Osnovne znanstvene teme za LSST

- Tamna tvar, tamna energija, kozmologija (prostorna raspodjela galaksija, gravitacijske leće, supernove)
- Vremenski promjenljivi objekti (kozmičke eksplozije, promjenljive zvijezde)
- Struktura sunčevog sistema (asteroidi)
- Struktura Mlječnog Puta (zvijezde)

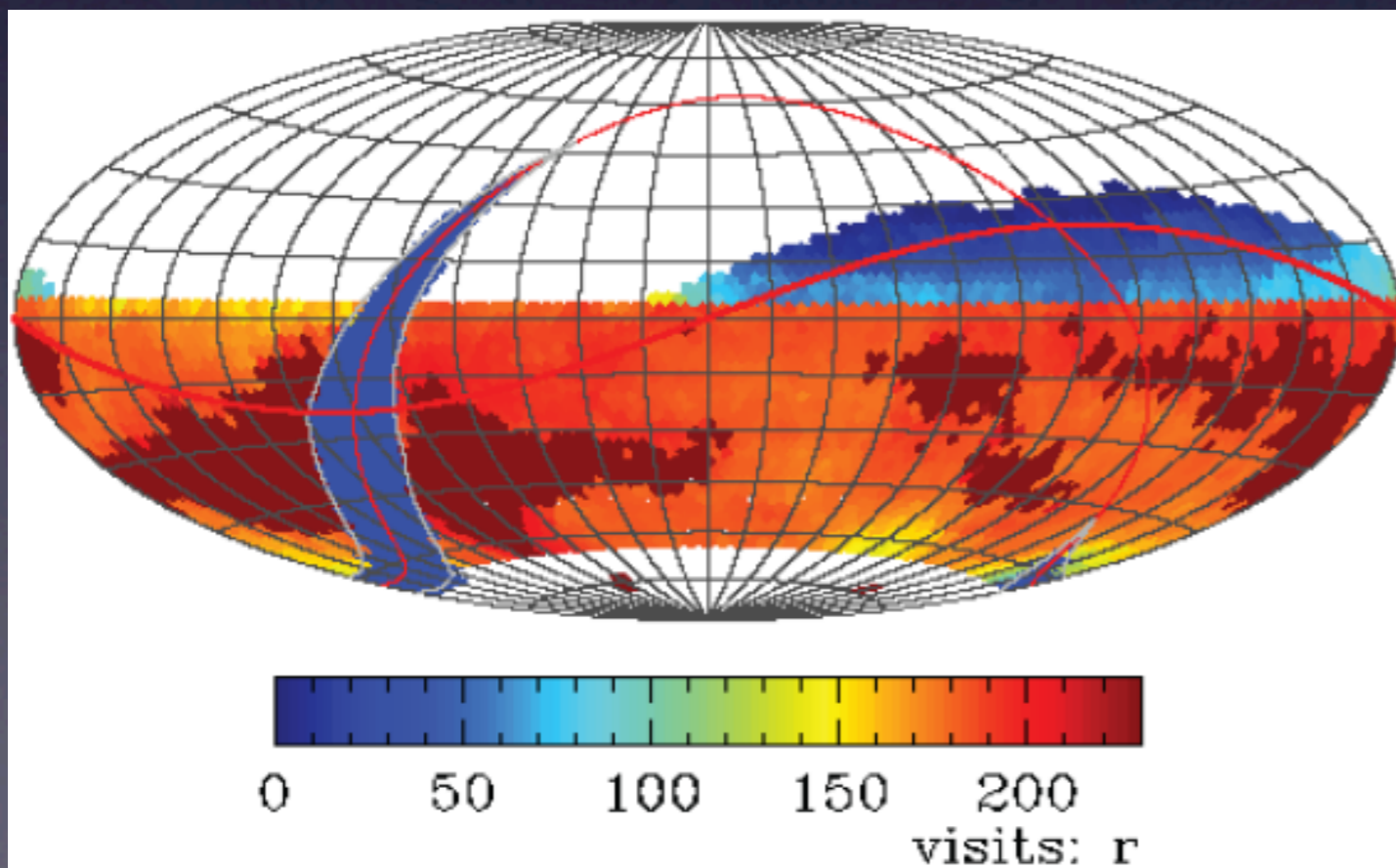
Sve te teme vode ne samo sličnom sistemu (hw & sw), nego i sličnim zahtjevima na strategiju promatranja

Osnovni koncepti za LSST

- Zrcalo velikog promjera (barem 6m) da bi se moglo koristiti kratke ekspozicije (30 s)
- Agilan teleskop (5 sekundi između eksp.)
- Veliko vidno polje da bi se moglo “pokriti” cijelo nebo sa malim brojem slika (~1,000)
- Male optičke deformacije
- Kamera sa 3000 Mpix (zbog rezolucije)
- Sofisticirani software za obradu podataka (20,000 GB/dan, oko 20 milijardi objekata)

Osnovna ideja LSSTa: uniformni pregled neba

- 90% vremena će biti utrošeno na uniformni pregled neba: svake tri noći cijeli dostupni dio neba će biti snimljen dva puta
- nakon 10 godina, pola cijelog neba će biti mjereno oko 1000 puta (u 6 filtera): digitalni kolor film neba
- biti će oko 500 milijuna slika od 16 Mpix, sa mjerenjima za 20 milijardi objekata: preko 100,000,000 GB podataka (>100 PB)

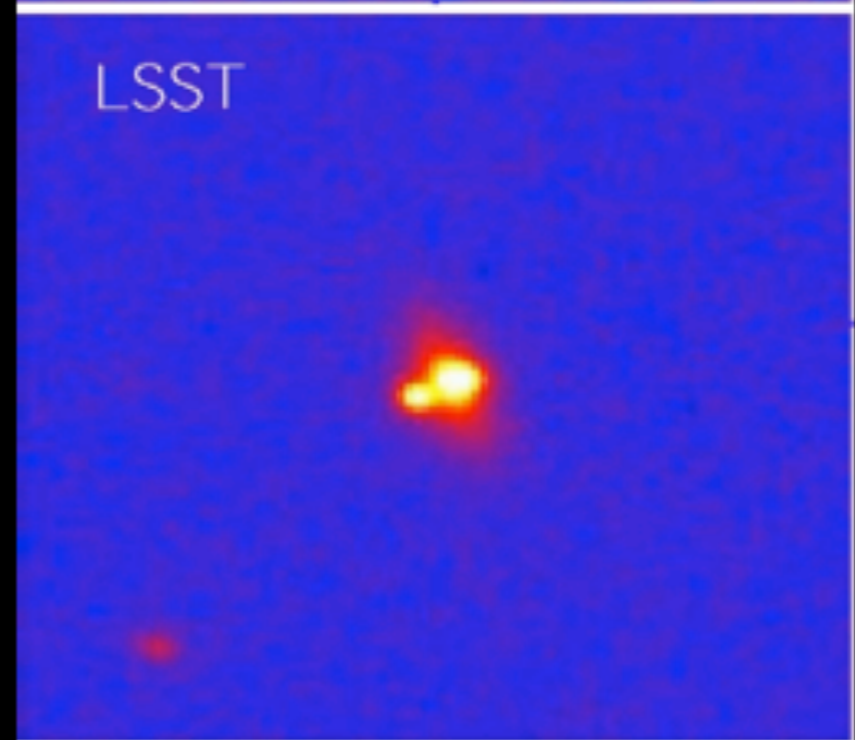
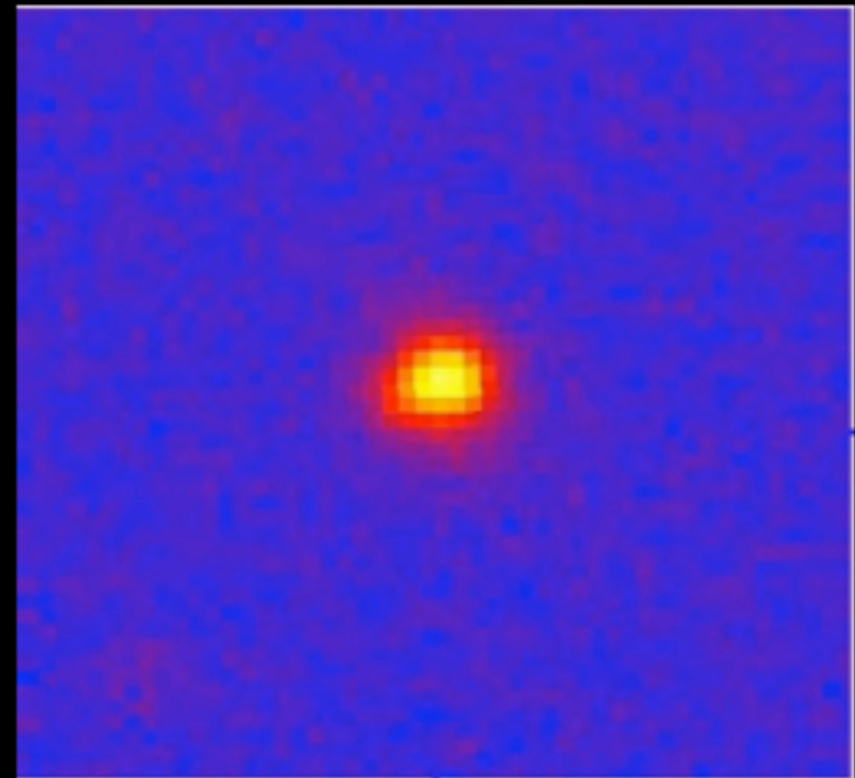


Glavni ciljevi LSST:

- 1) tamna energija ili pogrešna gravitacija?
- 2) opasni asteroidi
- 3) promjenljivi Svemir

Lijevo: simulacija 10 godina rada LSSTa: broj promatranja u jednom od filtera (r)

Usporedba SDSS-LSST



LSST Observatorij

LSST sistem:

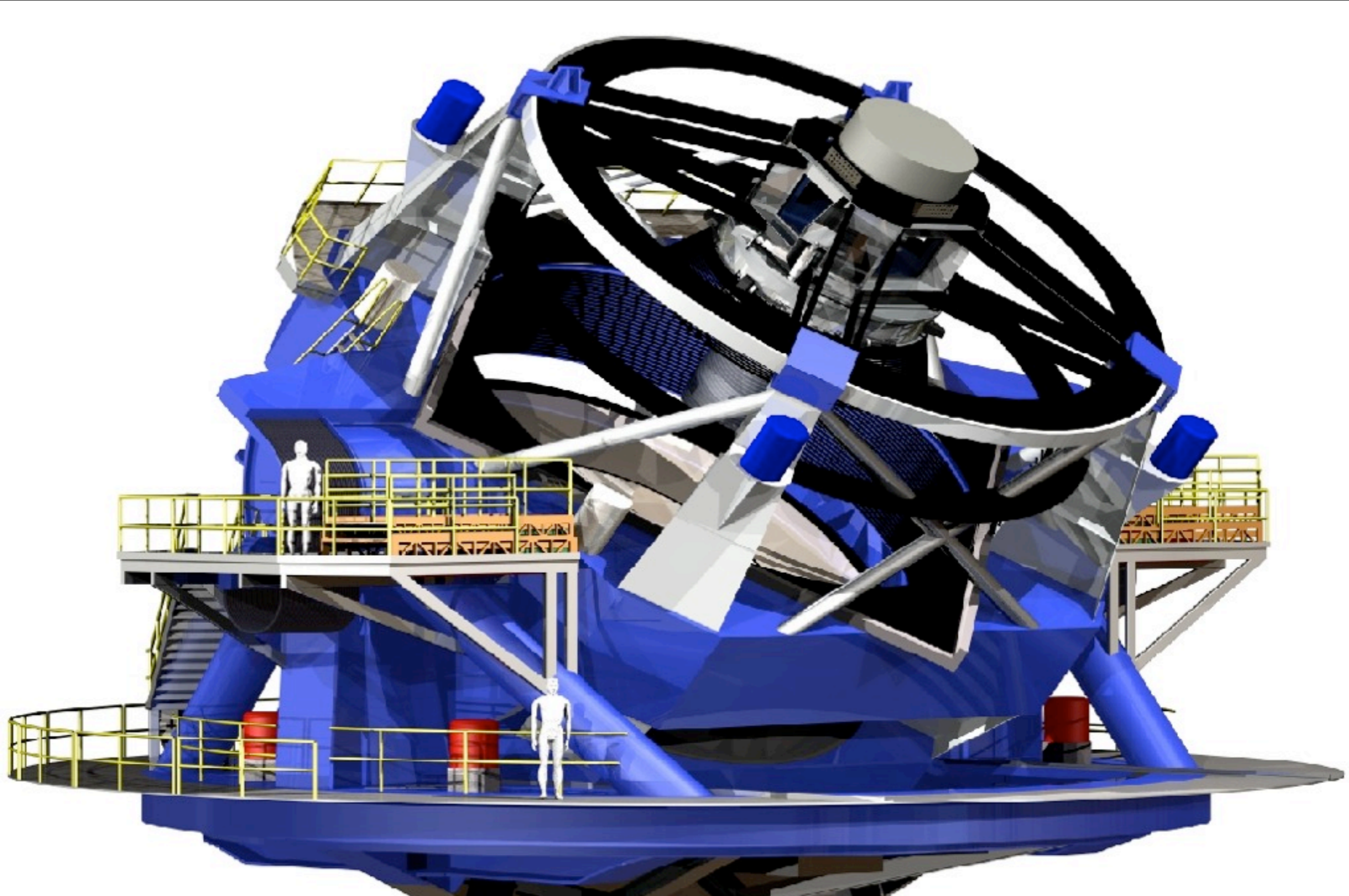
Teleskop

Kamera

Software



LSST Teleskop



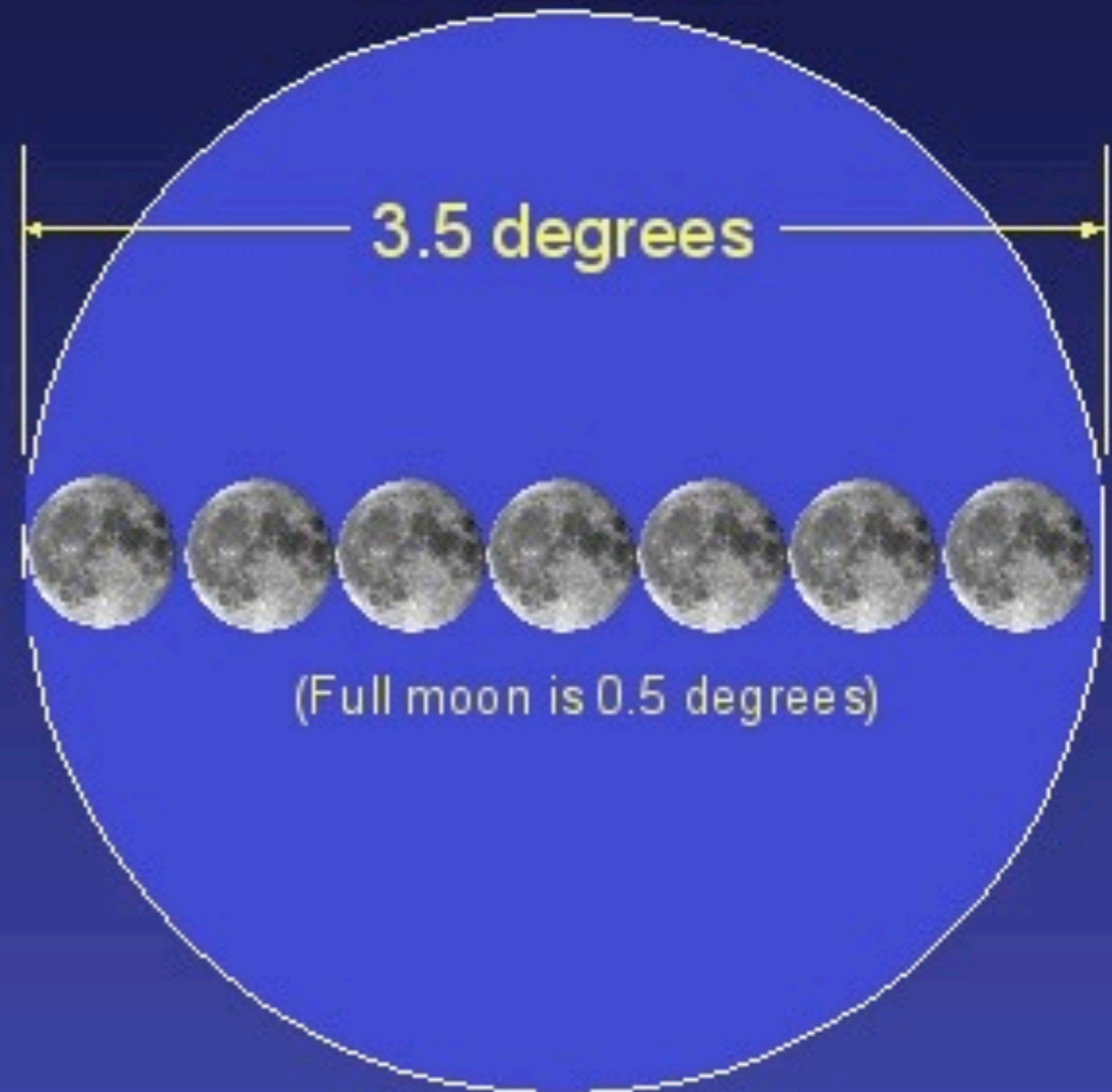
Usporedba vidnog polja Gemini-LSST

Primary Mirror Diameter

Field of View



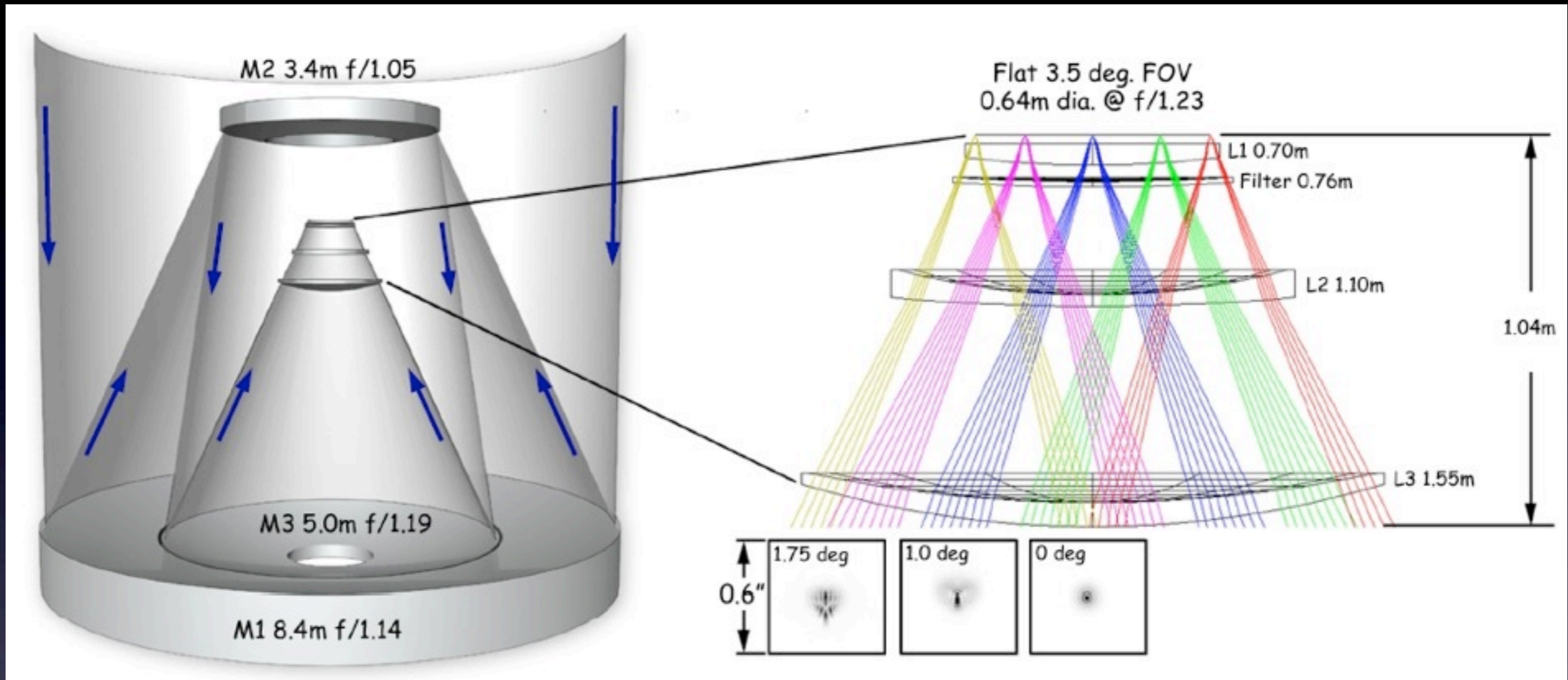
Gemini South Telescope



LSST



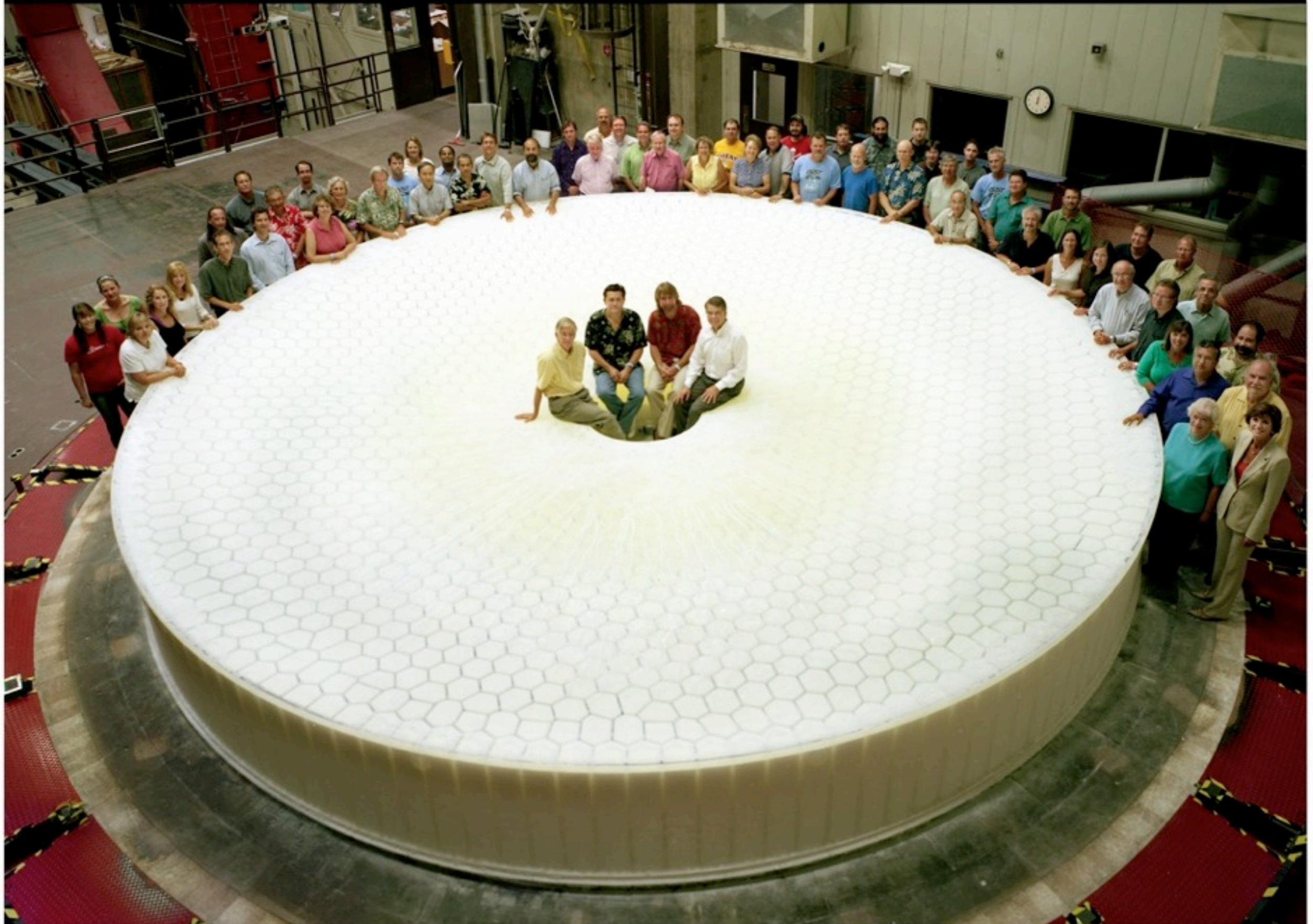
Optički dizajn za LSST teleskop



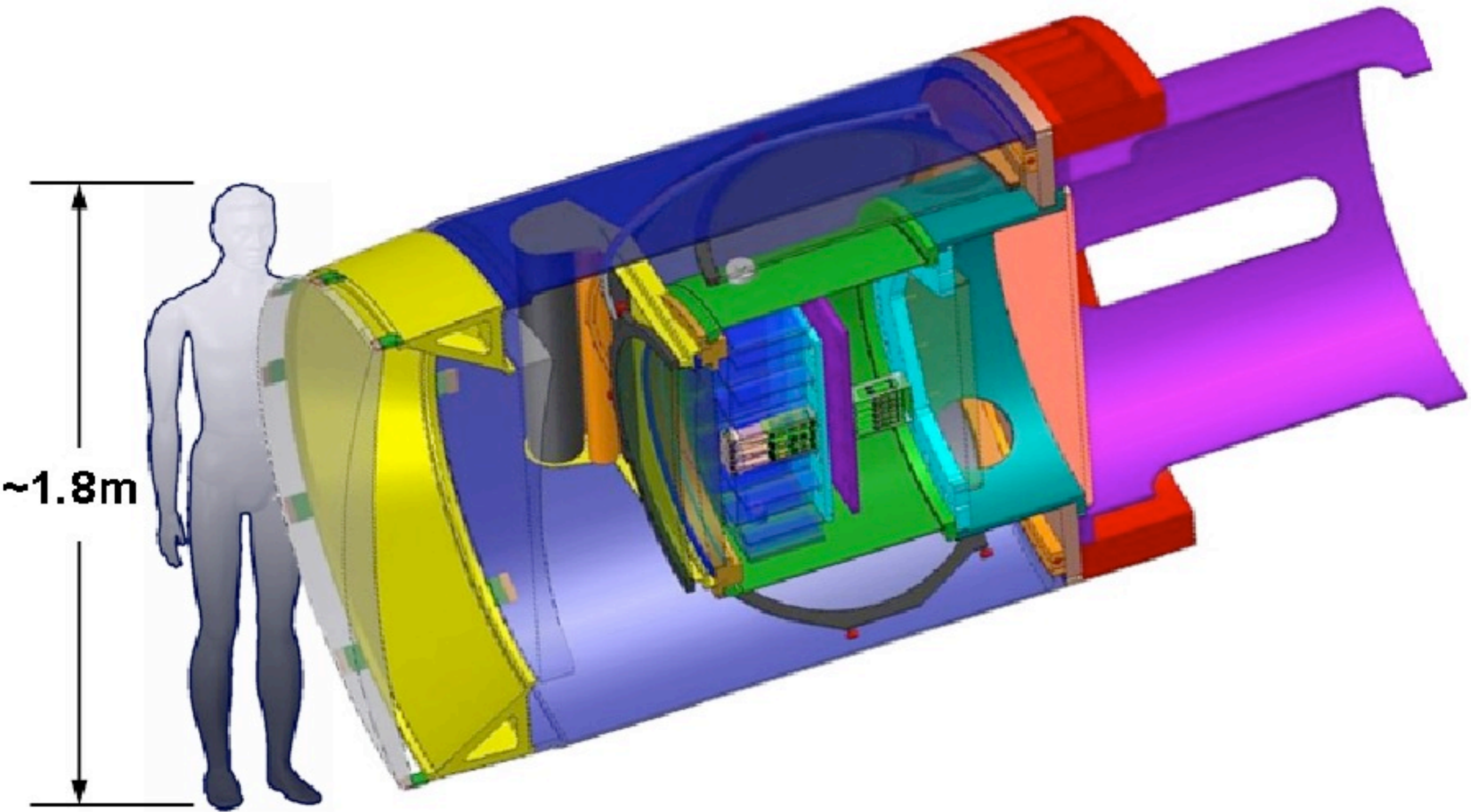
“Klasični” teleskopi: dva zrcala (ograničeno vidno polje)
LSST: tri zrcala koja daju veliko vidno polje sa malim deformacijama slike (Paul-Baker sistem)



Large Synoptic Survey Telescope



LSST kamera



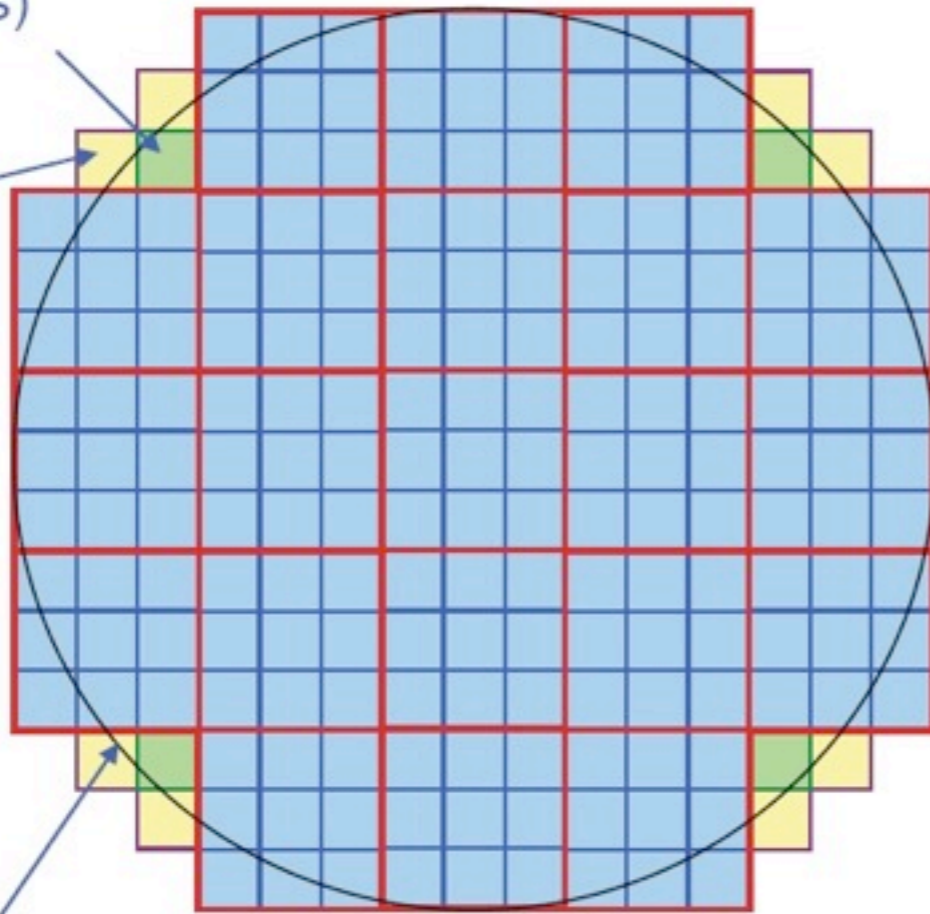
Najveća astronomska kamera: 2800 kg, 3200 Megapixela

LSST kamera

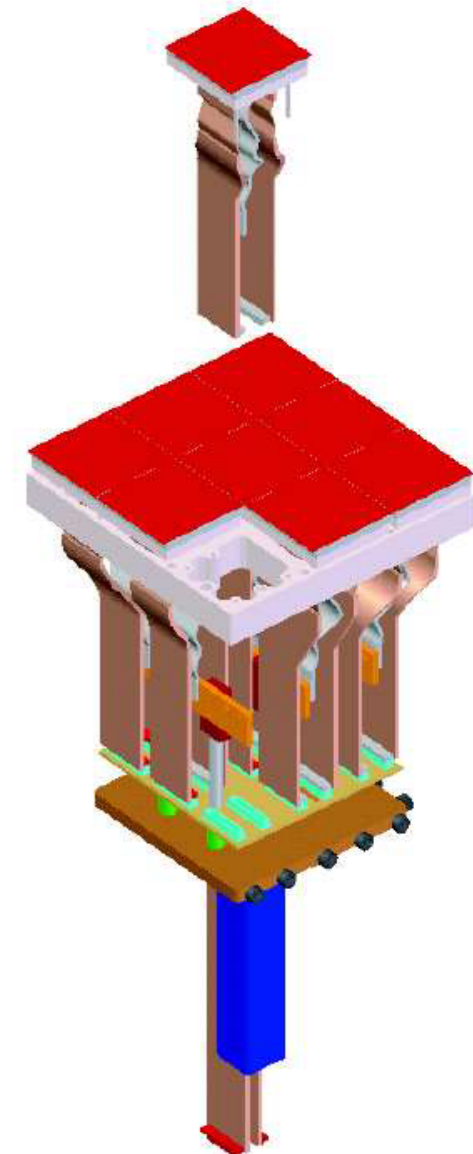
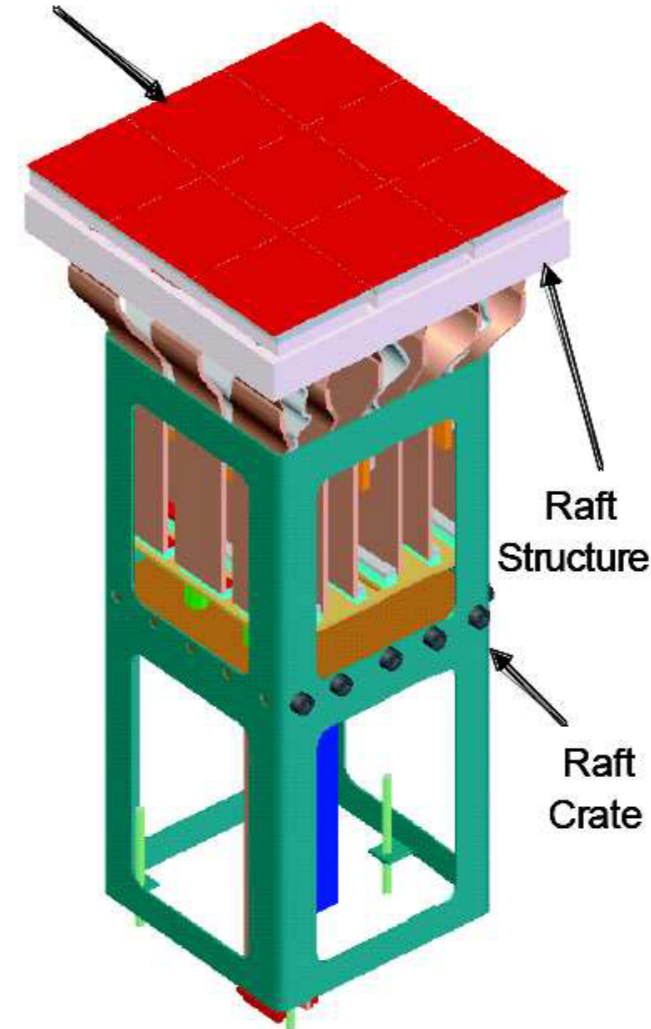
Wavefront Sensors
(4 locations)

Guide Sensors
(8 locations)

3.5 degree Field
of View (634 mm diameter)



Imaging Sensors



Modularni dizajn: 3200 Megapix = 189 x 16 Megapix CCD
9 CCDova imaju zajedničku elektroniku: raft = kamera
Raft sa problemima se može zamijeniti tokom dana

LSST Software

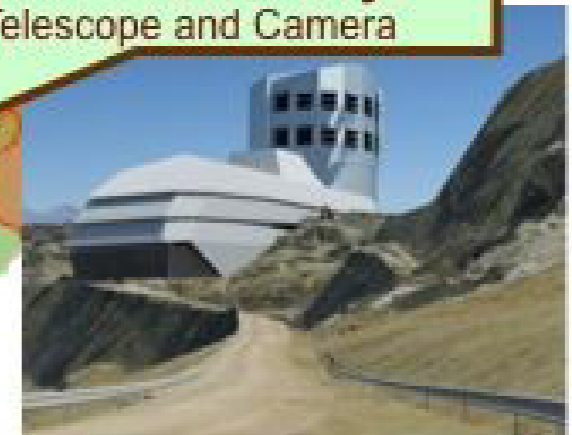
TBD Site
Science Centers
Data Quality Analysis

Archive Site
Archive Center
Nightly Reprocessing
Data Release Production
Long-term Storage (copy 2)
Data Access Center
Data Access and User
Services
120 – 330 TFLOPS
35 – 250 PB

Headquarters Site
Headquarters Facility
Observatory Management
Science Operations
Education and Public Outreach

Base Site
Base Facility
Data Access Center
Alert Production
Long-term storage (copy 1)
60 TFLOPS
35 – 250 PB

Summit Site
Summit Facility
Telescope and Camera



LSST Software: Vjerojatno najrizičniji dio sistema

- 20 TB podataka koje kontinuirano treba obrađivati svaki dan
- 20 milijardi objekata sa 1000 mjerenja tokom 10 godina
- Potreba za novim pristupom obradi i analizi podataka: software, software, software!



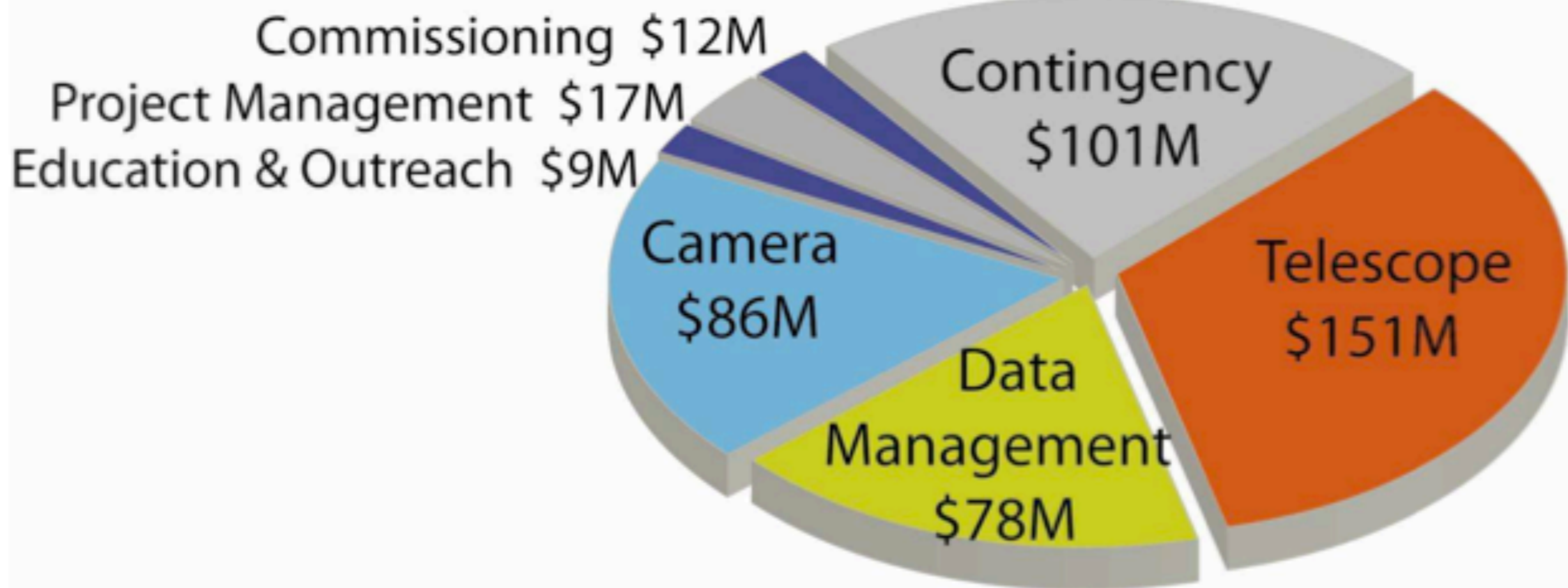
LSST Software

- Vjerojatno najrizičniji dio sistema
- Mora biti brz, točan i robustan (20 TB/dan)
- Oko 5-10 milijuna linija novoga koda
- Uglavnom C++/python
- Oko 100 M\$
- Kolaboracija astronoma, fizičara i profesionalnih programera
- Suradnja sa Hrvatskom (GPU tehnologija)

Kako potrošiti milijardu dolara?

Pola na konstrukciju, pola na 10 godina rada.

Total Project Cost: 455M 2009USD



LSST Construction Component Cost

Početak rada: oko 2018 (zeleno svjetlo: kolovoz 2010)

LSST Ukratko

- SDSS je sakupio količinu podataka (20 TB) jednaku svim knjigama u Kongresnoj Knjižnici SAD - LSST će toliko sakupiti svaku noć. Ukupna količina LSST podataka (60,000 TB) biti će veća nego sve riječi do sada tiskane u cijelom svijetu. Trebalo bi oko 3 milijuna HDTV za prikazati LSSTovu mapu neba.
- SDSS je napravio prvu digitalnu mapu neba - LSST će napraviti prvi digitalni film neba. Trebalo bi 11 mjeseci za to “pogledati”.
- LSST će popisati i izmjeriti oko 20 milijardi zvijezda, galaksija i drugih objekata: prvi put će biti više astronomskih objekata nego živih ljudi na Zemlji. (Želite li svoju zvijezdu, galaksiju?)
- LSST podaci će biti dostupni i Vama!



Glavni ciljevi LSSTa:

- 1) tamna energija ili pogrešna gravitacija?
- 2) opasni asteroidi
- 3) promjenljivi Svemir

Više informacija na www.lsst.org