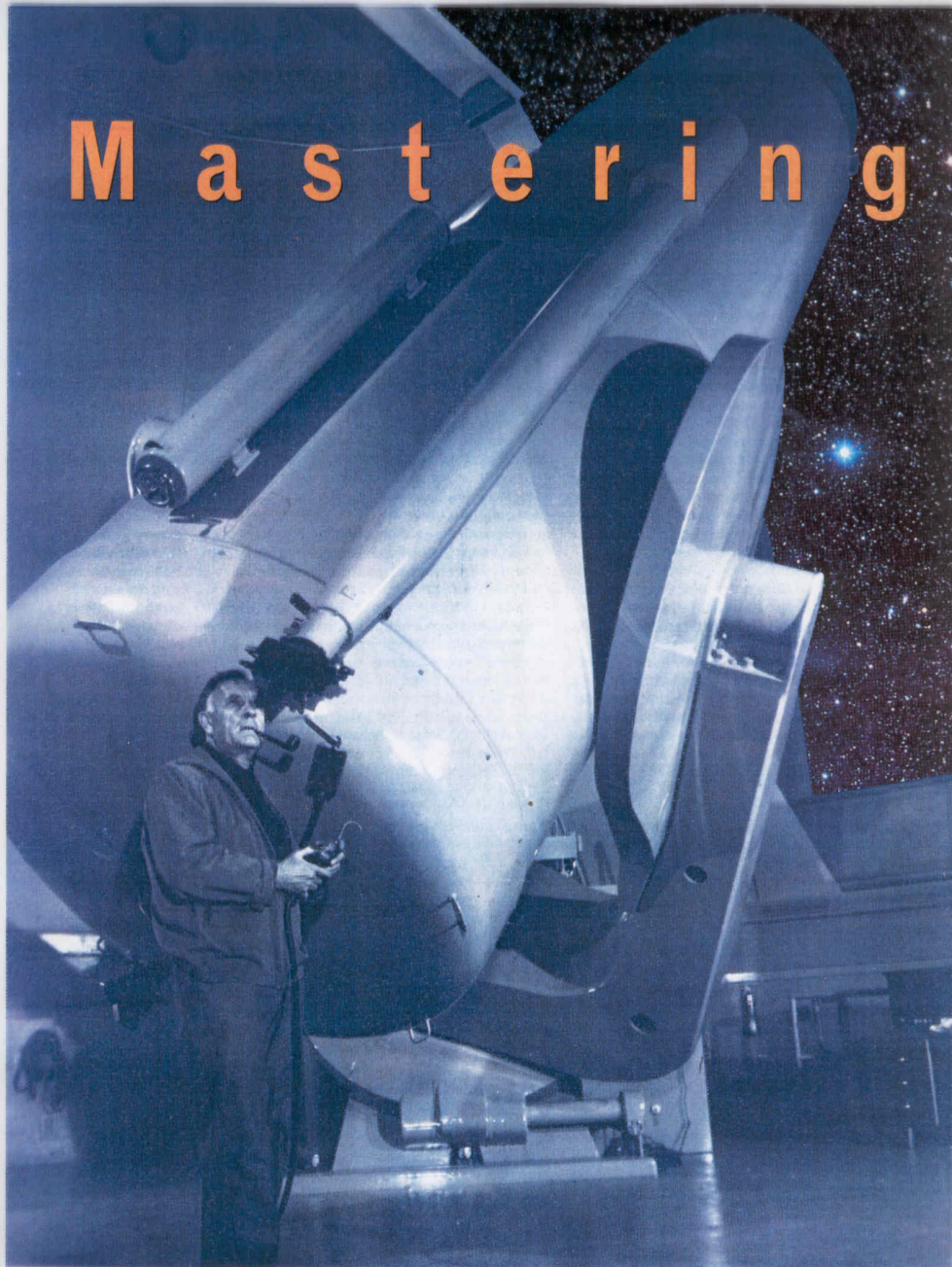


# VANGALAKTIČKA ASTRONOMIJA

M a s t e r i n g

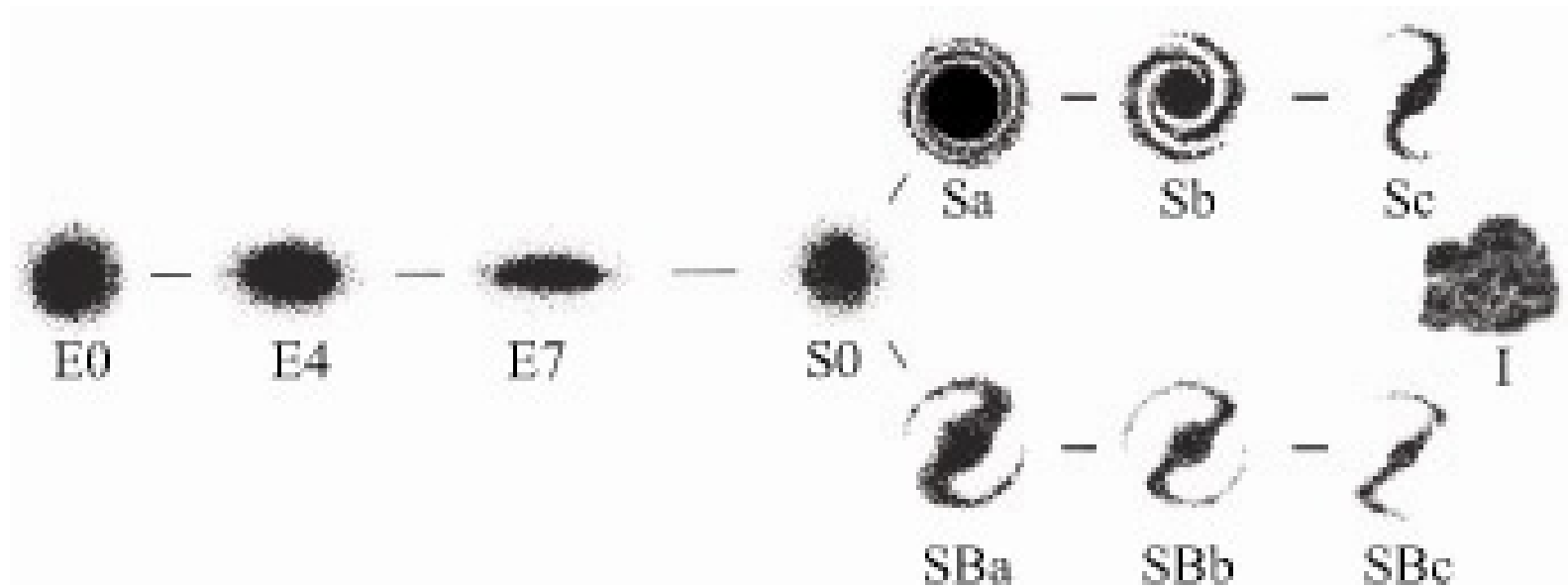


Edwin  
Hubble  
1924

Mt Wilson  
2.5m

Cefeide u M31

# Hablova morfološka klasifikacija galaksija



- **Eliptične galaksije (E)** – homogeni, spororotirajući zvezdani sistemi u obliku troosnog elipsoida,  $E_n$ ;  $n=10*(1-b/a)$ ; nemaju disk, sadrže uglavnom objekte Populacije II; mase - između  $10^6$  (patuljaste) i  $10^{12}$  Sunčevih masa (džinovske)
- **Spiralne galaksije (S)** – imaju podsisteme (disk, jezgro i halo); sadrže i objekte Populacije I i II; mase od  $10^{10}$  do  $10^{11}$  mase Sunca
- **Diskolike galaksije (S0)** – imaju disk sa centralnim ispupčenjem, ali ne i spiralne grane
- **Nepravilne galaksije (I)** – sadrže najviše međuzvezdane materije i objekte Populacije I (najmanje mase i sjaja od svih galaksija)



Spiralna galaksija M31 u  
Andromedi

Eliptična galaksija M87

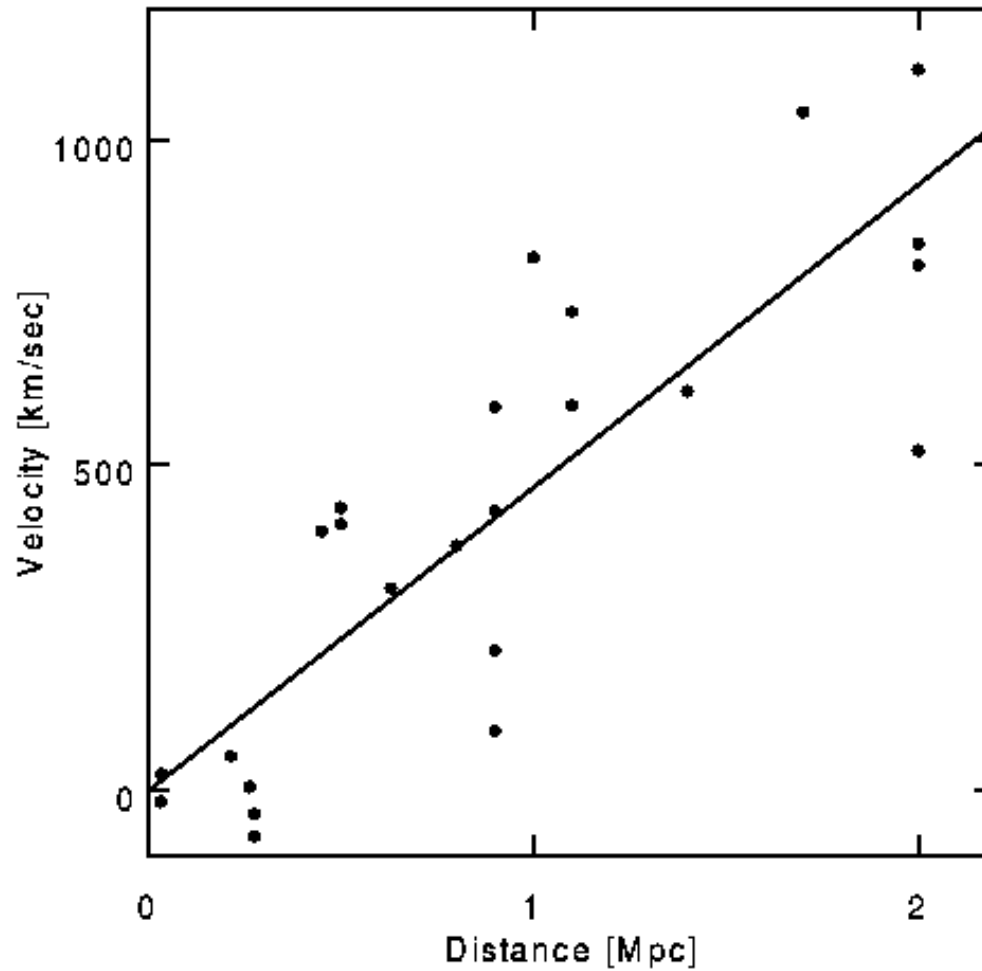


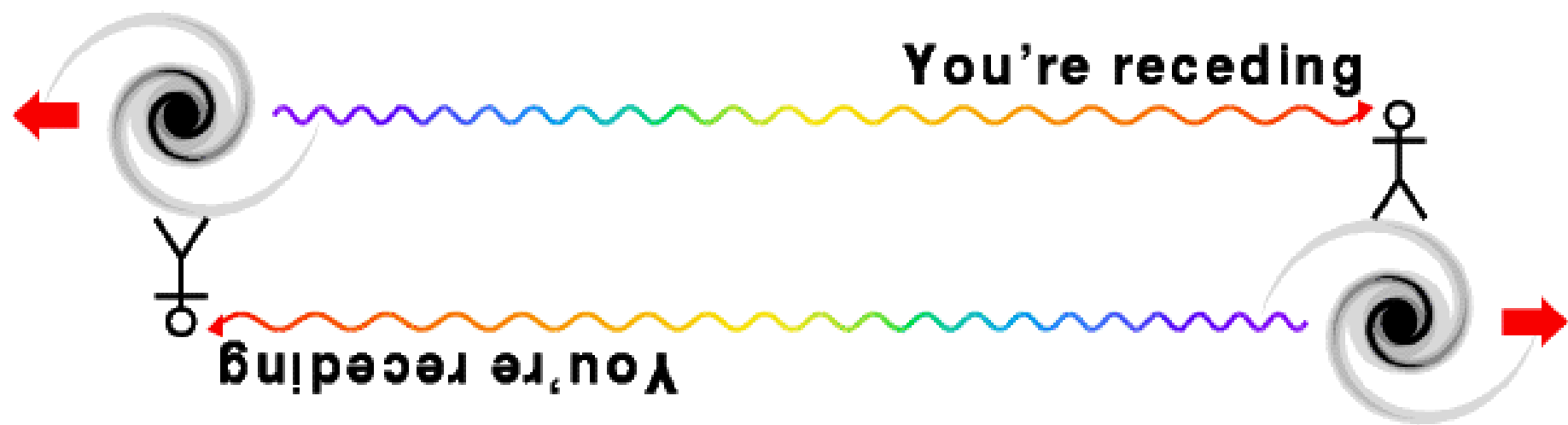
# Magelanovi oblaci – nepravilne galaksije

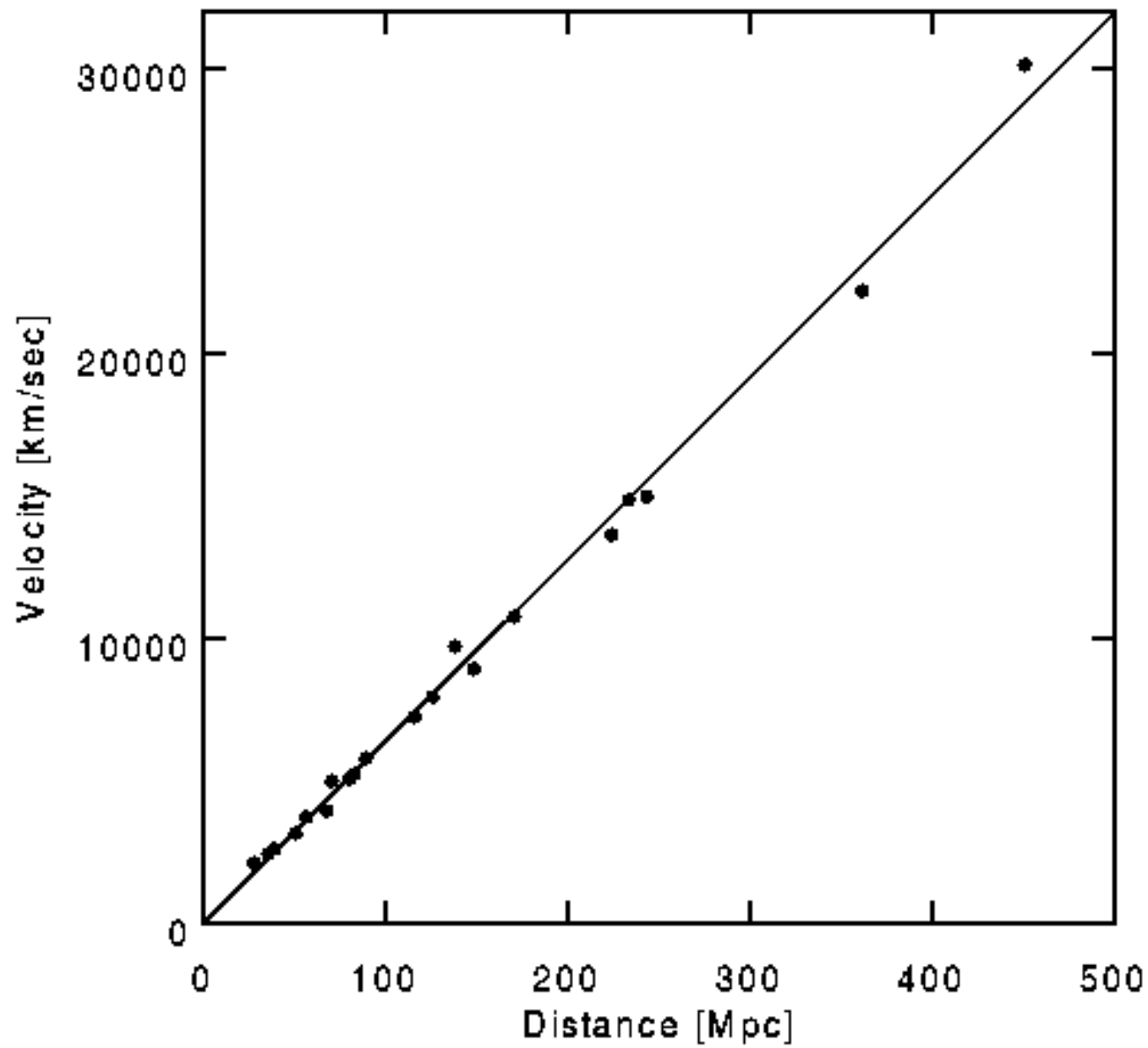


# Hablov zakon (1929)

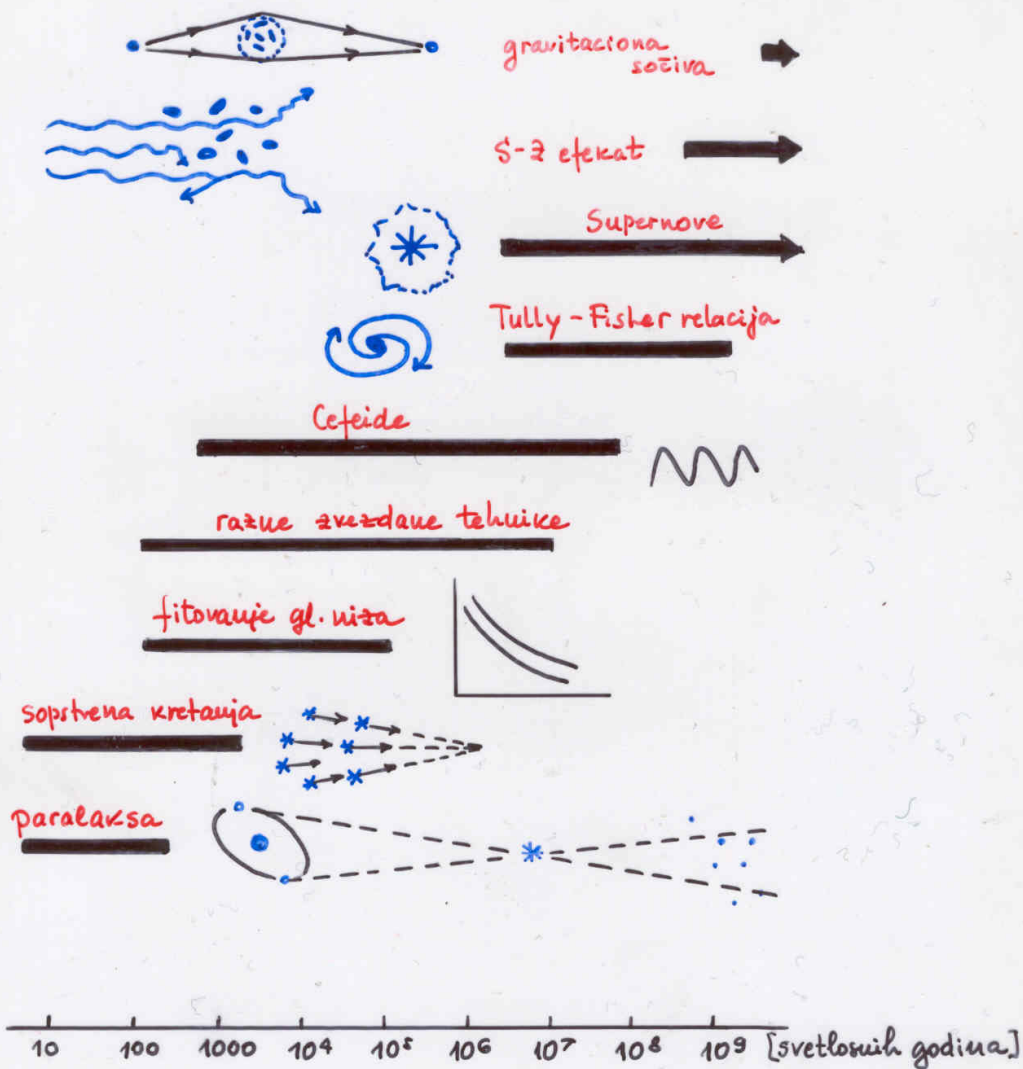
$$V_{\text{rad}} = H_0 \cdot D$$







# LESTVICA RASTOJANJA



$\alpha$  Centauri

trijade

Magelanski oblaci

M31

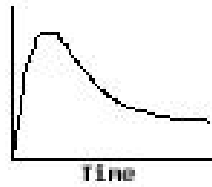
M101

Virgo jato

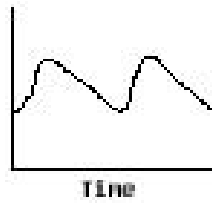
Coma jato



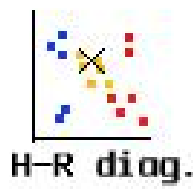
Hubble Law  
> 100 million pc



Supernova  
Standard Candle  
200 million pc



Cepheid Period-  
Luminosity  
Relationship  
15 million pc



Spectroscopic  
Parallax  
10,000 pc

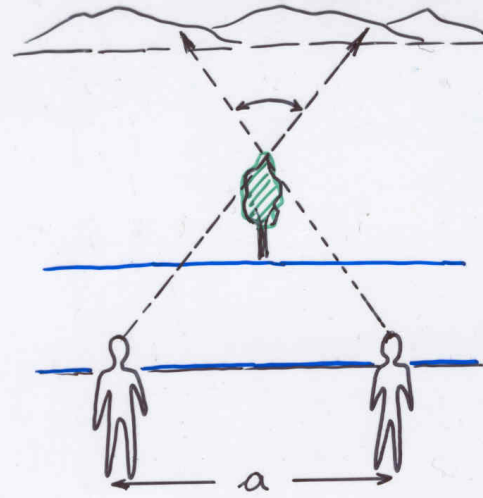


Parallax: 100 pc

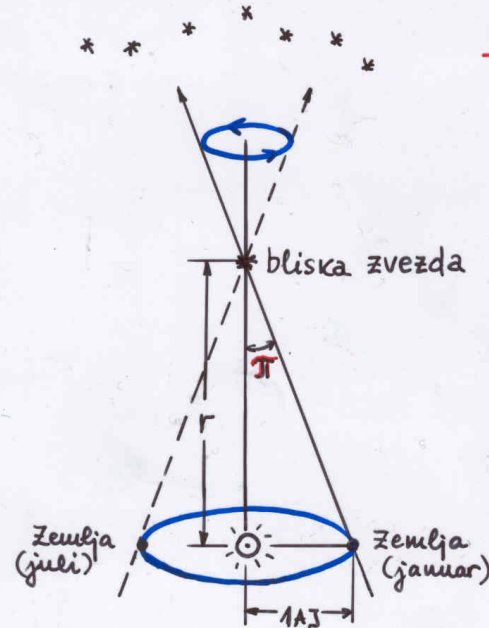


Radar: 1 light-hour

# Metod trigonometrijske paralakse



PARALAKSA = PRIVIDNO  
POMERANJE POSMATRANOG  
OBJEKTA USLED  
PROMENE U POLOŽAJU  
POSMATRAČA

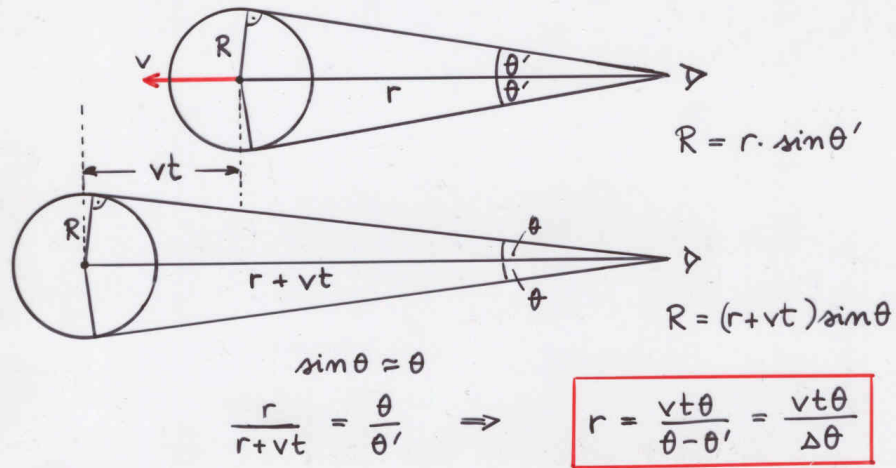


GODIŠNJA PARALAKSA  
ZVEZDE ( $\pi$ )

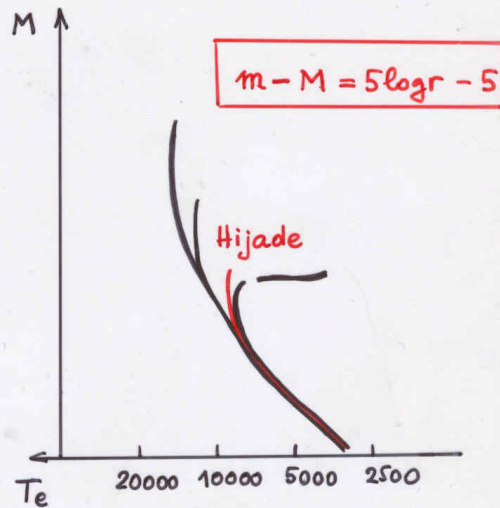
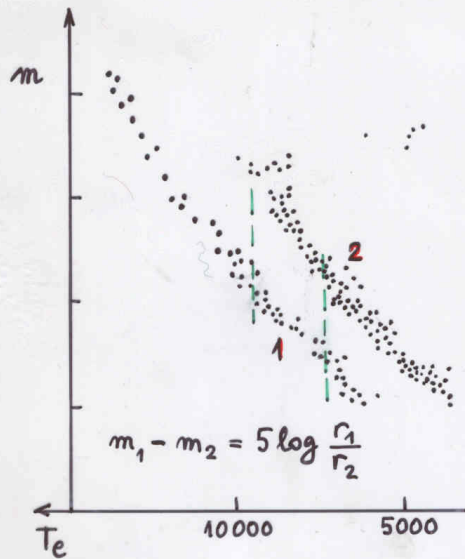
$$r [\text{pc}] = \frac{1}{\pi ["]}$$

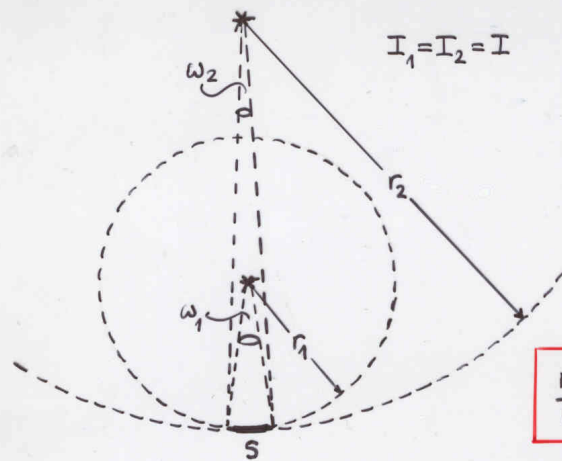
$$1 \text{ pc} = 3.26 \text{ sv. god.}$$

METOD POKRETNIH JATA /Hijade/



METOD FITOVANJA GLAVNOG NIZA





$$I_1 = I_2 = I$$

### STANDARDNE SVEČE

$$F_1 = I\omega_1 = I \frac{s}{r_1^2}$$

$$F_2 = I\omega_2 = I \frac{s}{r_2^2}$$

$$F \propto \frac{1}{r^2}$$

$$\frac{r_2}{r_1} = \sqrt{\frac{F_1}{F_2}}$$

Pogsonov zakon :

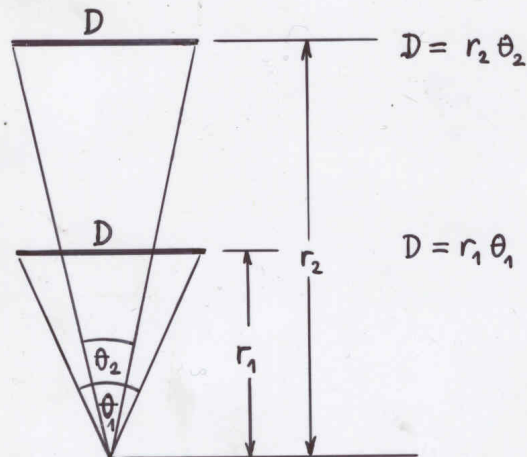
$$m_1 - m_2 = 2.5 \log \frac{F_2}{F_1} = 5 \log \frac{r_1}{r_2}$$

$$r_1 = 10 \text{ pc}, m_1 = M$$

$$r_2 = r, m_2 = m$$

$$M = m + 5 - 5 \log r$$

### STANDARDNI LENJIRI



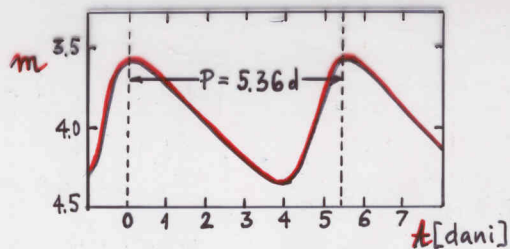
$$D = r_2 \theta_2$$

$$\frac{r_2}{r_1} = \frac{\theta_1}{\theta_2}$$

$$D = r_1 \theta_1$$

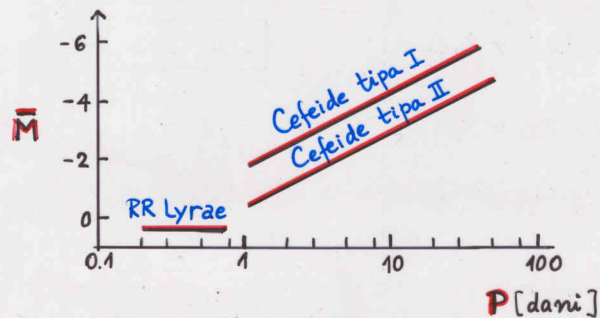
$$r = \frac{D}{\theta}$$

## METOD CEFEIDA



Kriva sjaja zvezde  $\delta$  Cephei

H. Leavitt (1912) :  $\bar{m} - \log P \rightarrow \bar{M} - \log P$  ( $\bar{M} = \underline{a} + b \cdot \log P$ )



Relacija 'period - sjaj'

za RR Lyrae :  $\bar{M} \approx +0.5$

za Cefeide tipa I :  $\bar{M} = -1.5 - 1.74 \log P$

za Cefeide tipa II :  $\bar{M} = -0.2 - 1.5 \log P$

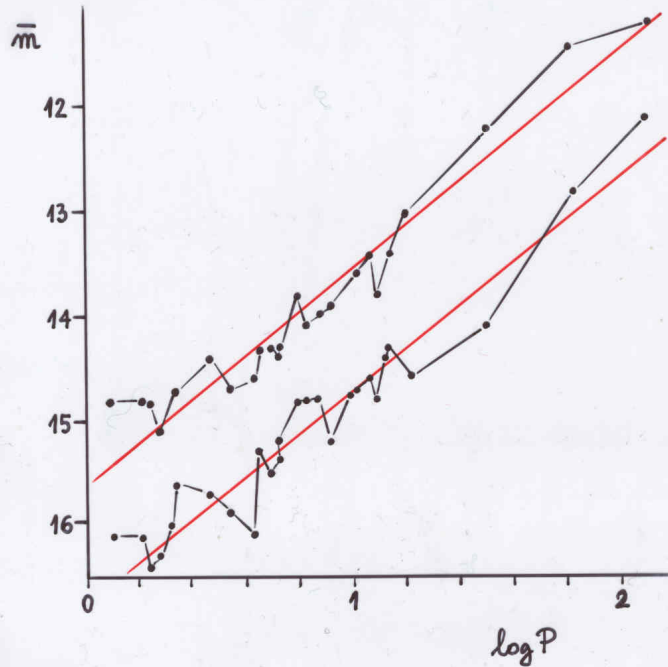


$$\bar{M} = \bar{m} + 5 - 5 \log D$$



D

Henrietta Leavitt (1908-1912)  
 Cefeide u Malom Magelanovom oblaku



$$\bar{m} = f(\log P)$$

$$\begin{matrix} + \\ \text{r} \\ \downarrow \\ \bar{M} = f(\log P) \end{matrix}$$

$$\bar{M} = a + b \log P$$

$$\bar{M} = \bar{m} + 5 - 5 \log r$$

## Standardne svjećice ( $M = m^{\text{cor}} + 5 - 5 \log D$ )

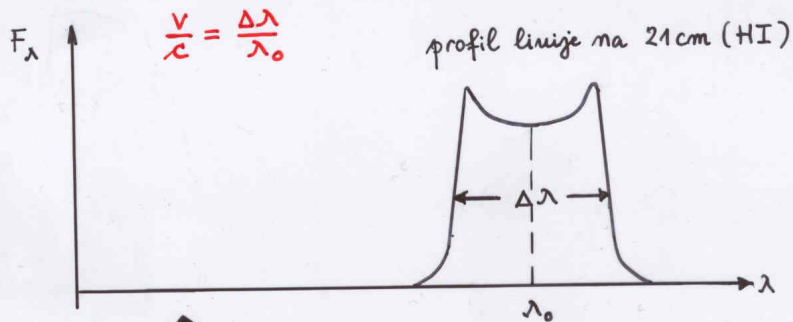
- 1) Cefeide (do 5 Mpc, izuzetno HST-om do 15 Mpc)
- 2) sjajni crveni superdžinovski  $M_V = -8^m$  (do 15 Mpc)
- 3) sjajni plavi superdžinovski  $M_V = -9^m$  (do 25 Mpc)
- 4) najsjajnija globularna jata  $M_V = -10^m$  (do 40 Mpc)
- 5) najsjajniji HII regioni  $M_V = -12^m$  (do 50 Mpc)
- 6) SN tipa Ia  $M_V = -18.6^m$  (do 250 Mpc)
- 7) najsjajnije spiralne gal.  $M_V = -21^m$
- 8) relacija Tully-Fischer  $L \propto v_{\text{rot}}^4$
- 9) relacija Faber-Jackson  $L \propto v_{\text{dis}}^4$

## Standardni lećivri ( $2R = \frac{D \cdot \theta''}{206265}$ )

- 1) HII regioni
- 2) galaksije određene (morfološkog) tipu

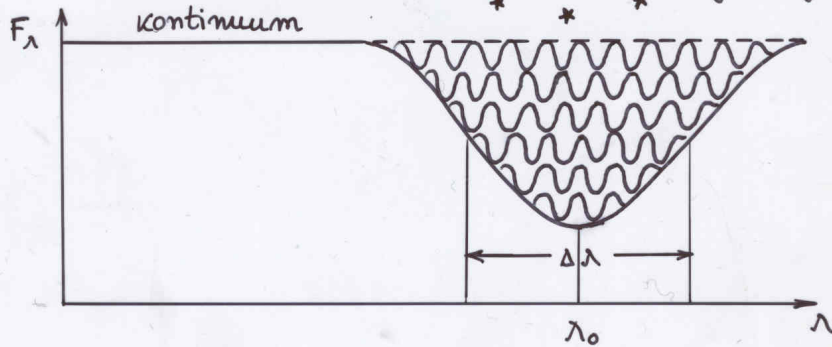
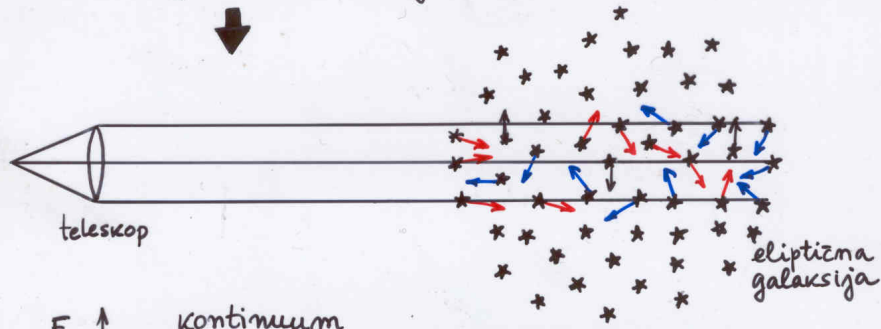
## Druge metode

- 1) Sunyaev-Zel'dovich (S-Z) efekat
- 2) Efekat gravitacionog sočiva
- 3) Hubbleov zakon



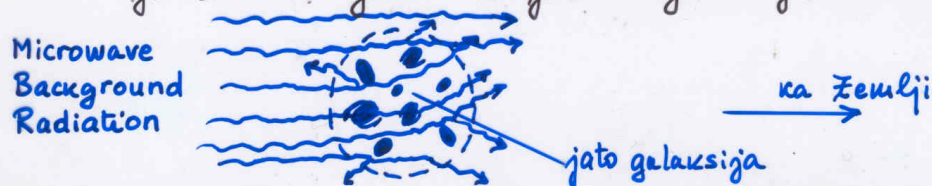
Tully - Fischer relacija  
Faber - Jackson relacija

$$L \propto v^4$$



## SUNYAEV - ŽEL'DOVICH (S-Z) EFEKAT

je inverzno Komptonovo rasejanje  
mikrotalasnog pozadinskog zračenja (MBR)  
jonizovanim gasom u jatima galaksija



- Apsorpcija gasom u jatu (promena intenziteta MBR usled S-Z efekta)

$$A \propto \int n_e dl$$

Elektroni u međugalaktičkom gasu, osim što rasejavaju MBR, i sami zrače u X području (termalno zaključno zračenje).

- Emisija gasa u jatu (površinski sjaj jata u X području)

$$E \propto \int n_e^2 dl$$



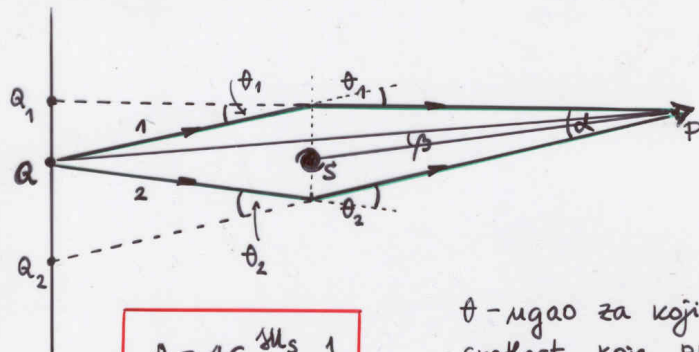
$$\frac{A^2}{E} \text{ je mera dimenzija jata } D.$$

Ako je jato sferno-simetrično,  
rastojanje do jata je:

$$r = \frac{D}{\theta}$$

$\theta$  = ugao dimenzije jata galaksija

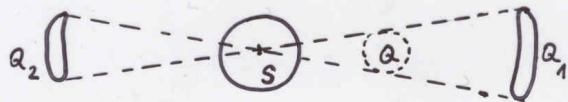
## EFEKAT GRAVITACIONOG SOČIVA



$$\theta = 4G \frac{M_s}{c^2} \frac{1}{r}$$

(Einstein, 1919)

$\theta$  - ugao za koji se savije svetlost koja prođe pored masivnog objekta S na rastojanju  $r$



Hablov parametar

$$H = \frac{Z_Q Z_S \alpha^2}{\Delta t (Z_Q - Z_S)} \frac{\sqrt{L_1/L_2 - 1}}{\sqrt{L_1/L_2 + 1}}$$

Masa galaksije S

$$M_s = \frac{\Delta t c^3}{16G} \frac{\sqrt{L_1/L_2 + 1}}{\sqrt{L_1/L_2 - 1}}$$

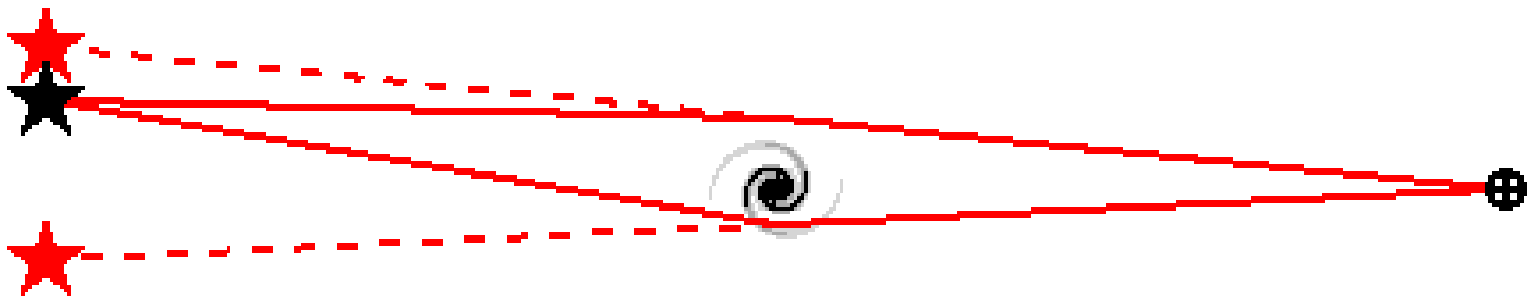
$Z_Q, Z_S$  = crveni pomaci kvazara Q i galaksije S

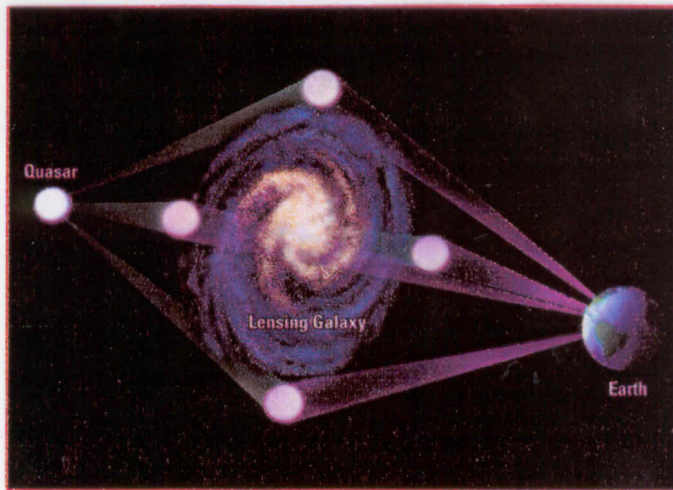
$$\frac{L_1}{L_2} = \frac{L_1(t)}{L_2(t+\Delta t)} ; \Delta t = \text{vremenski razlika u prijemu svetlosti duž dve putanje}$$

QSR 0957+561 u sažvežđu Velikog Medveda

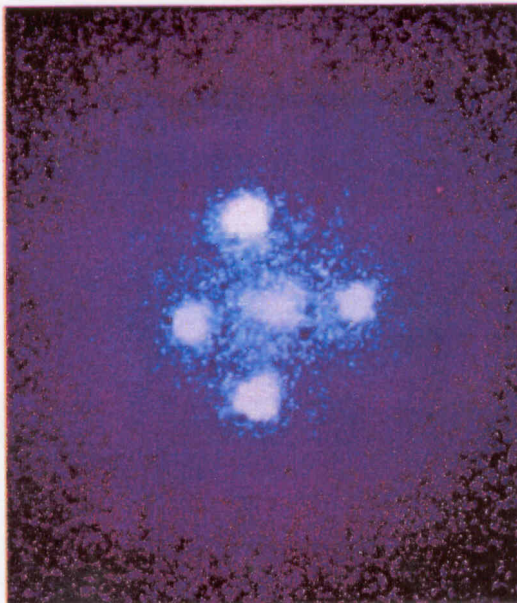
$$\Delta t = 417 \text{ dana} \Rightarrow H = 65 \text{ km/s/Mpc}$$

# Gravitaciono sočivo





Gravitaciono  
sočivo



Ajnštajnov krst

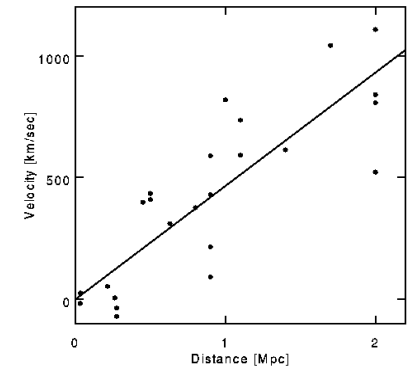
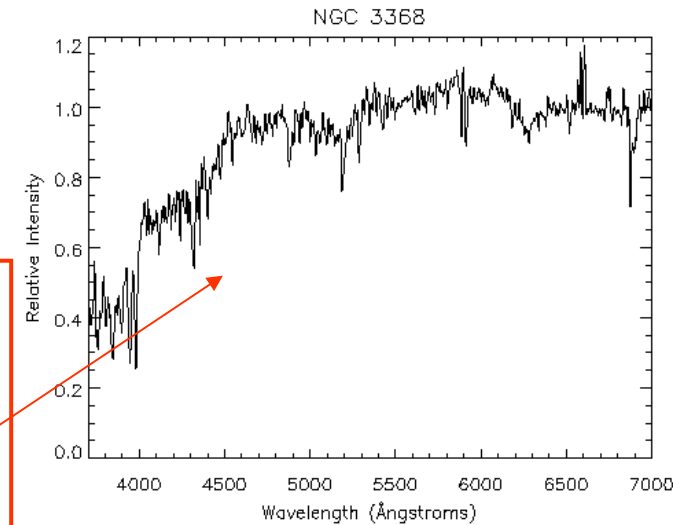
# Fizička klasifikacija galaksija

- Normalne galaksije
  - zračenje galaksije je određeno zračenjem zvezda
  - zračenje je termalno (oko milion puta manje u radio oblasti nego u optičkoj)
  - spektar : termalni kontinuum sa apsorpcionim linijama
  - fluks zračenja je konstantan u toku vremena
- Aktivne galaksije – galaksije sa aktivnim jezgrom (AGN)
  - pojačano zračenje u X, IC i radio oblasti spektra
  - zračenje je netermalno
  - spektar : netermalni kontinuum sa emisionim linijama
  - fluks zračenja se menja u toku vremena

# Spektri normalnih galaksija su slični spektrima zvezda

Kontinuum spektra galaksija (kombinacija kontinuuma spektara malog broja masivnih i vrelih i velikog broja malomasivnih i hladnijih zvezda) je relativno ravan. Na oko 400nm posmatra se smanjeni fluks zračenja kao posledica apsorpcije metalima (Ca, Mg). Spektri spiralnih i eliptičnih galaksija su apsorpcioni, a u spektrima spiralnih galaksija ima i emisionih linija koje potiču iz brojnih HII regiona.

- Spektroskopija galaksija je dovela do niza fundamentalnih otkrića:
  - u spektrima galaksija (van Lokalne grupe) Hubble otkriva da je crveni pomak (udaljavanje galaksija) utoliko veći što je galaksija dalja (**Hubble-ov zakon, 1929**). To je bio prvi dokaz nestacionarnosti vasiona (njegov sveopšteg širenja).
  - izučavanje Doplerovih pomaka u spektrima galaksija koje pripadaju jatima galaksija (**F. Zwicky**) otkriva da se one kreću mnogo brže nego što to dozvoljava poznata masa jata. Gravitacionu stabilnost jata moguće je obezbediti samo postojanjem **tamne materije**.



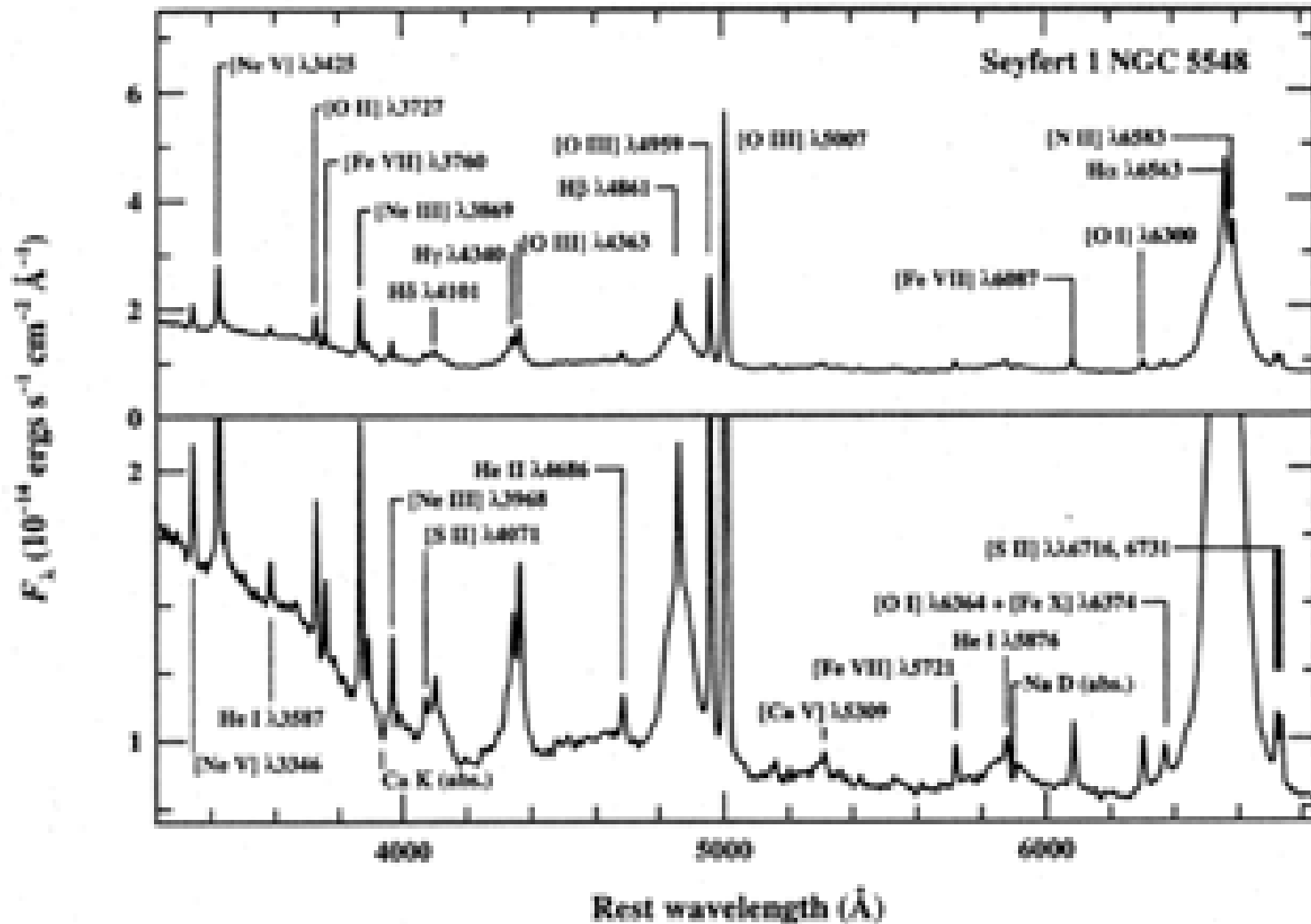
# Aktivne galaksije

- najjači izvori zračenja u vasioni
- oko 10% svih poznatih galaksija
- pojačano zračenje u svim delovima spektra
- netermalno zračenje
- široke i uske emisione linije
- promenljivi fluks zračenja u toku vremena nezvezdanog porekla

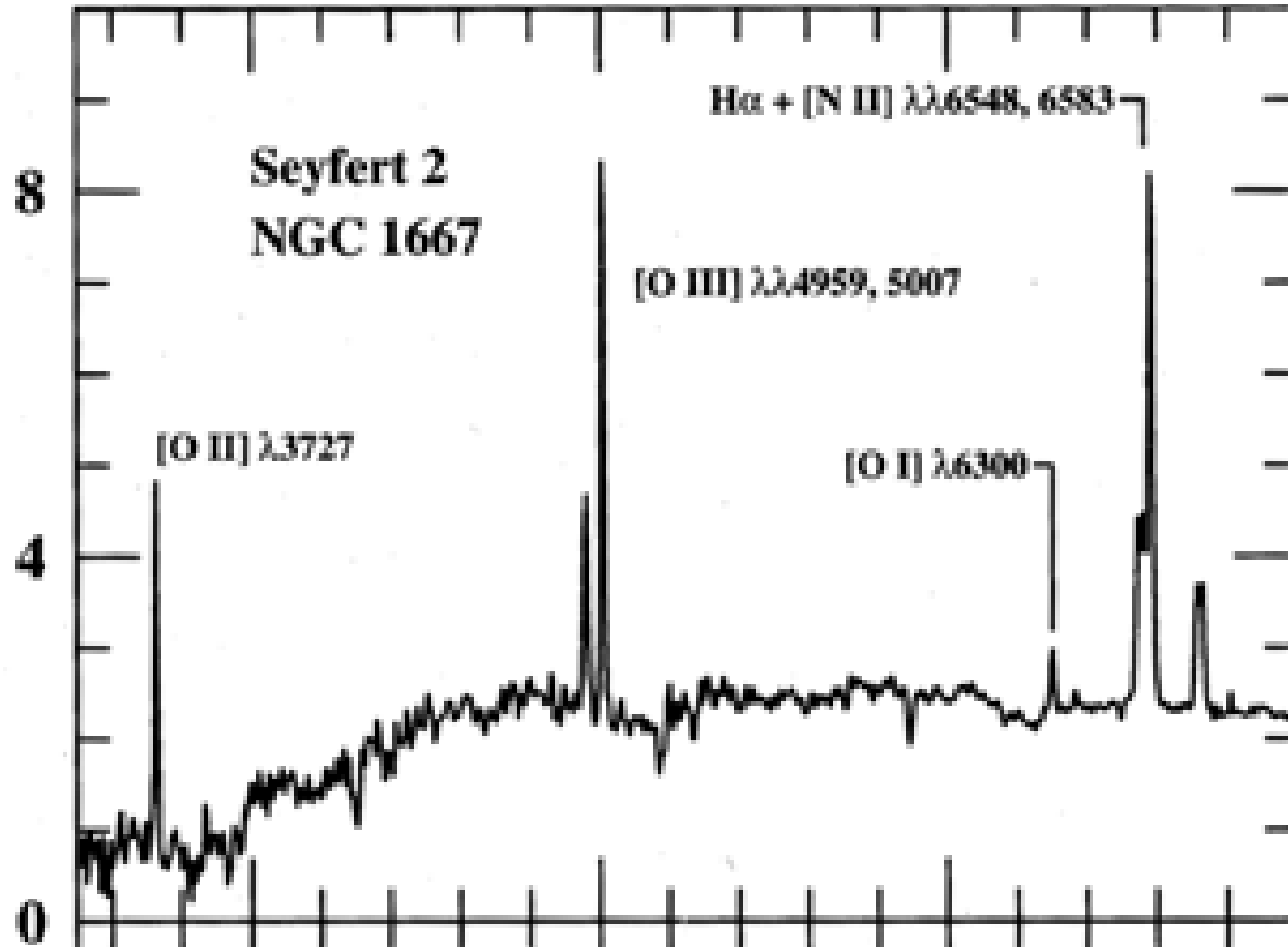
# Sajfertove galaksije – spiralne galaksije sa sjajnim jezgrom



# Spektar Seyfert 1 galaksije



# Spektar Seyfert 2 galaksije

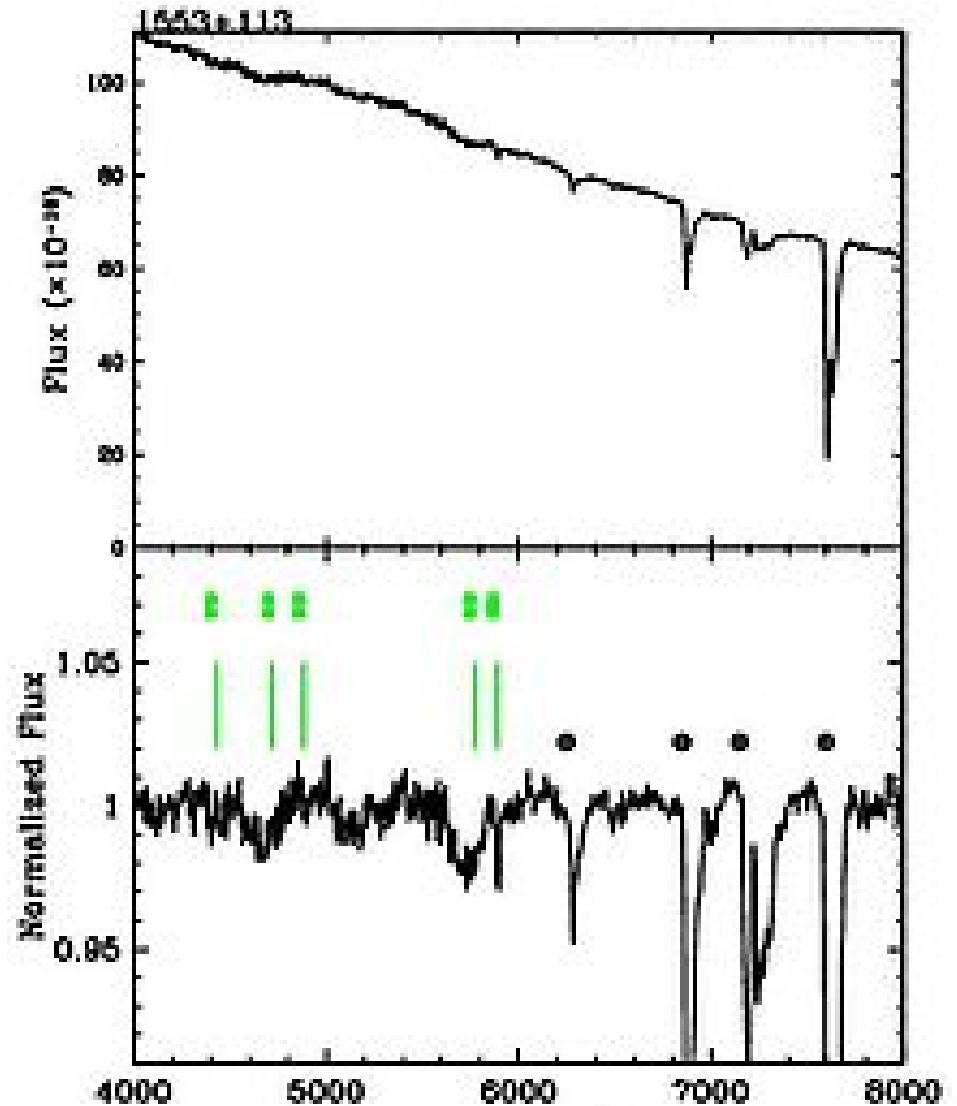


# Radio galaksije – džinovske eliptične galaksije (najbliža - Centaurus A)

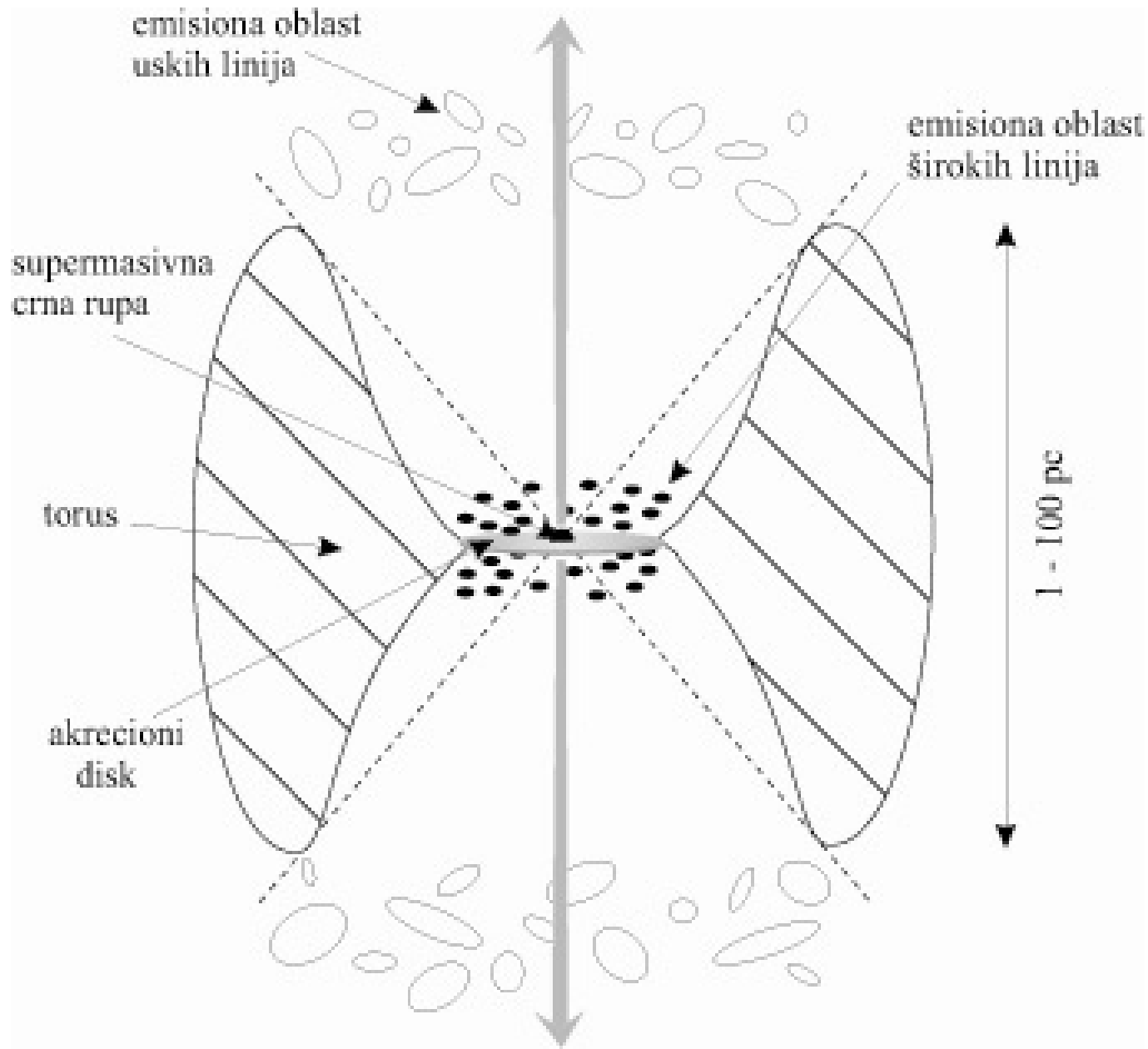


# Blazari – BL Lacertae objekti

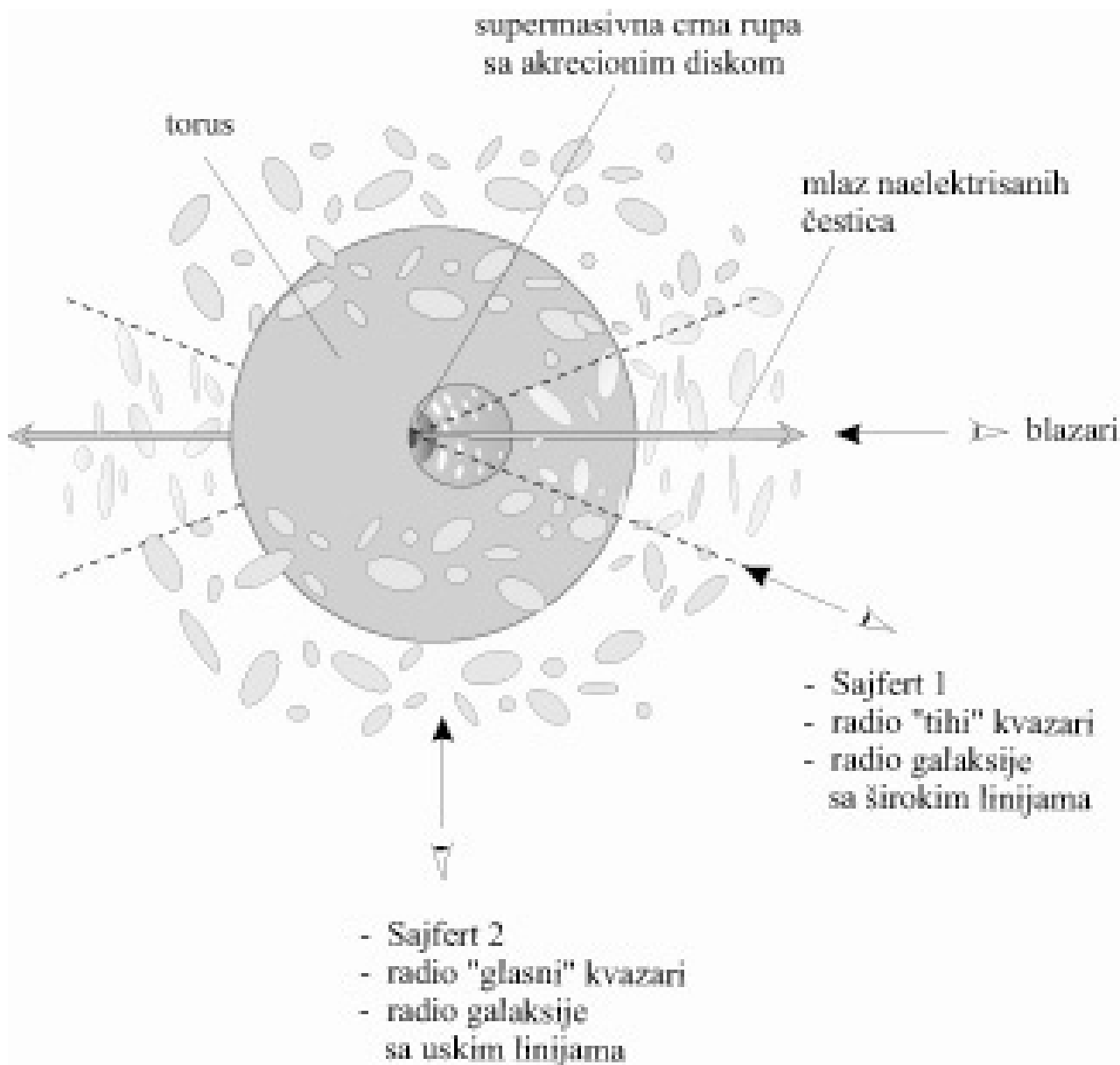
- najintenzivnija AGJ
- brzo promenljivo jako polarizovano zračenje
- u optičkom delu spektra skoro da nema linija
- imaju izraženo gama-zračenje



# Model jezgara aktivnih galaksija

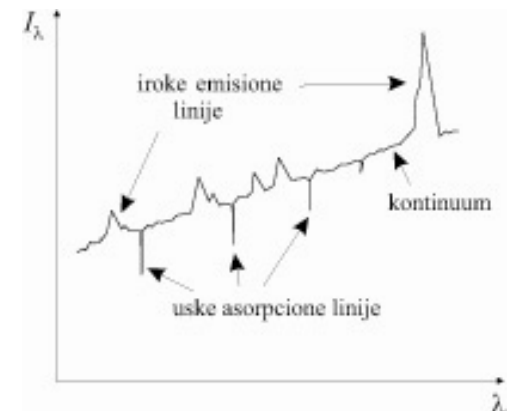
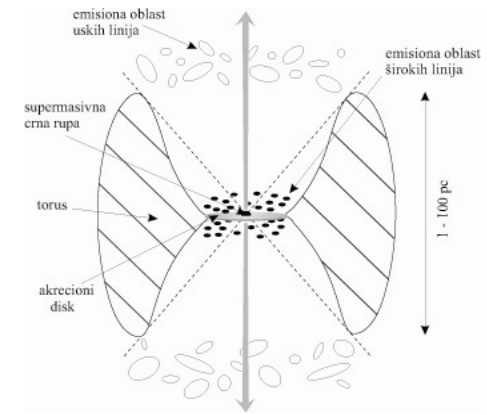


# Model jezgra aktivnih galaksija i kvazara

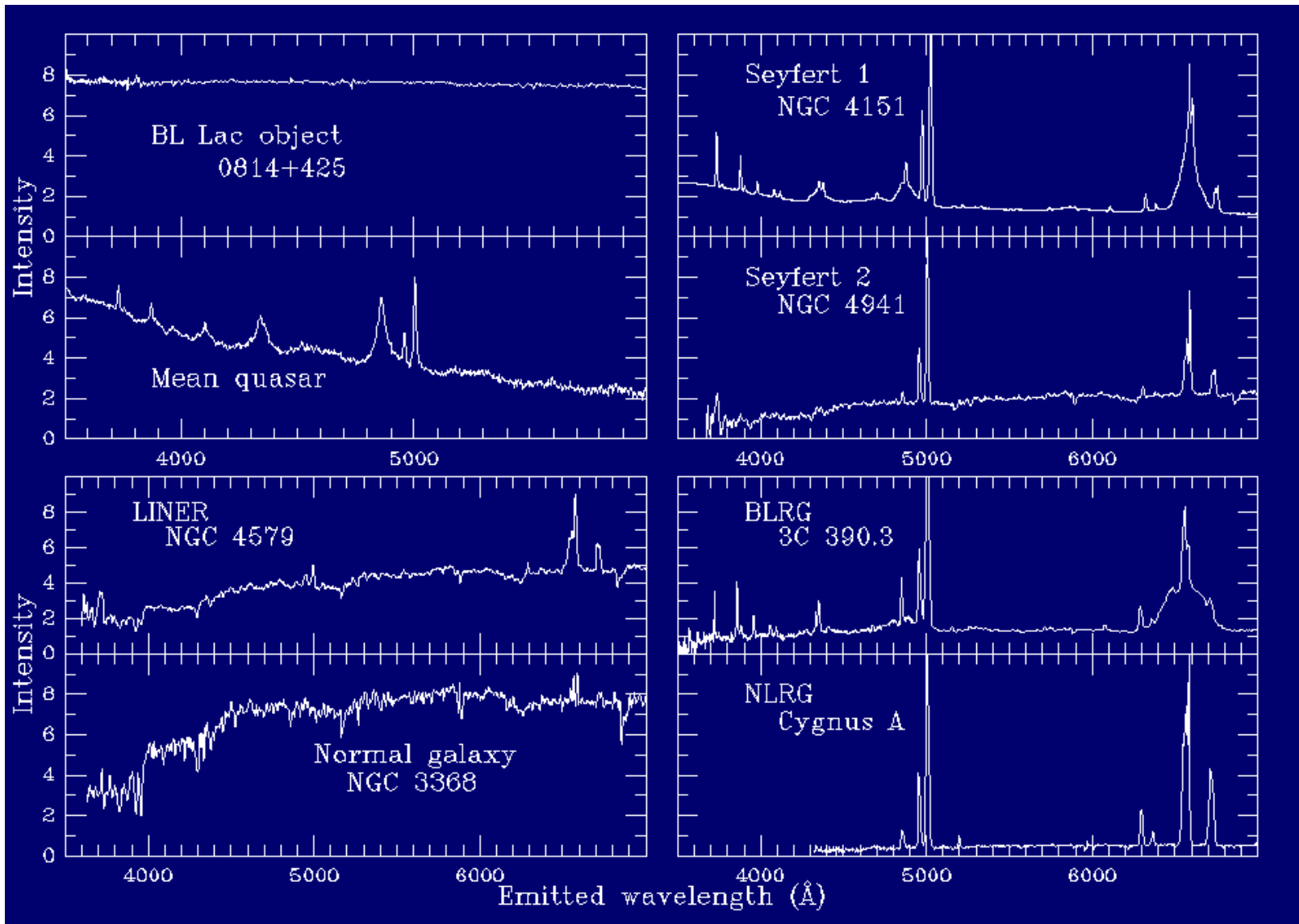


# Spektri kvazara (i drugih aktivnih galaksija) netermalni kontinuum sa apsorpcionim i emisijom linijama

- Izuzetno **veliki crveni pomak** linija u spektru. Prema Hablovom zakonu to znači da su to vrlo daleki objekti, velike luminoznosti.
- Danas se smatra da su **kvazari - aktivne galaksije** čija se ogromna energija generiše akrecijom materije na supermasivnu crnu rupu koja se nalazi u njihovom središtu.
- **Netermalni kontinuum** (intenzitet zračenja raste sa porastom talasne duzine) potiče od zračenja ubrzanih naelektrisanih čestica u magnetnom polju. Uske i široke **emisione linije** svedoče o burnim procesima u ovim aktivnim galaktičkim jezgrima (Active Galactic Nuclei – **AGN**)



# Poredjenje spektara normalne galaksije sa spektrima aktivnih galaksija i kvazara

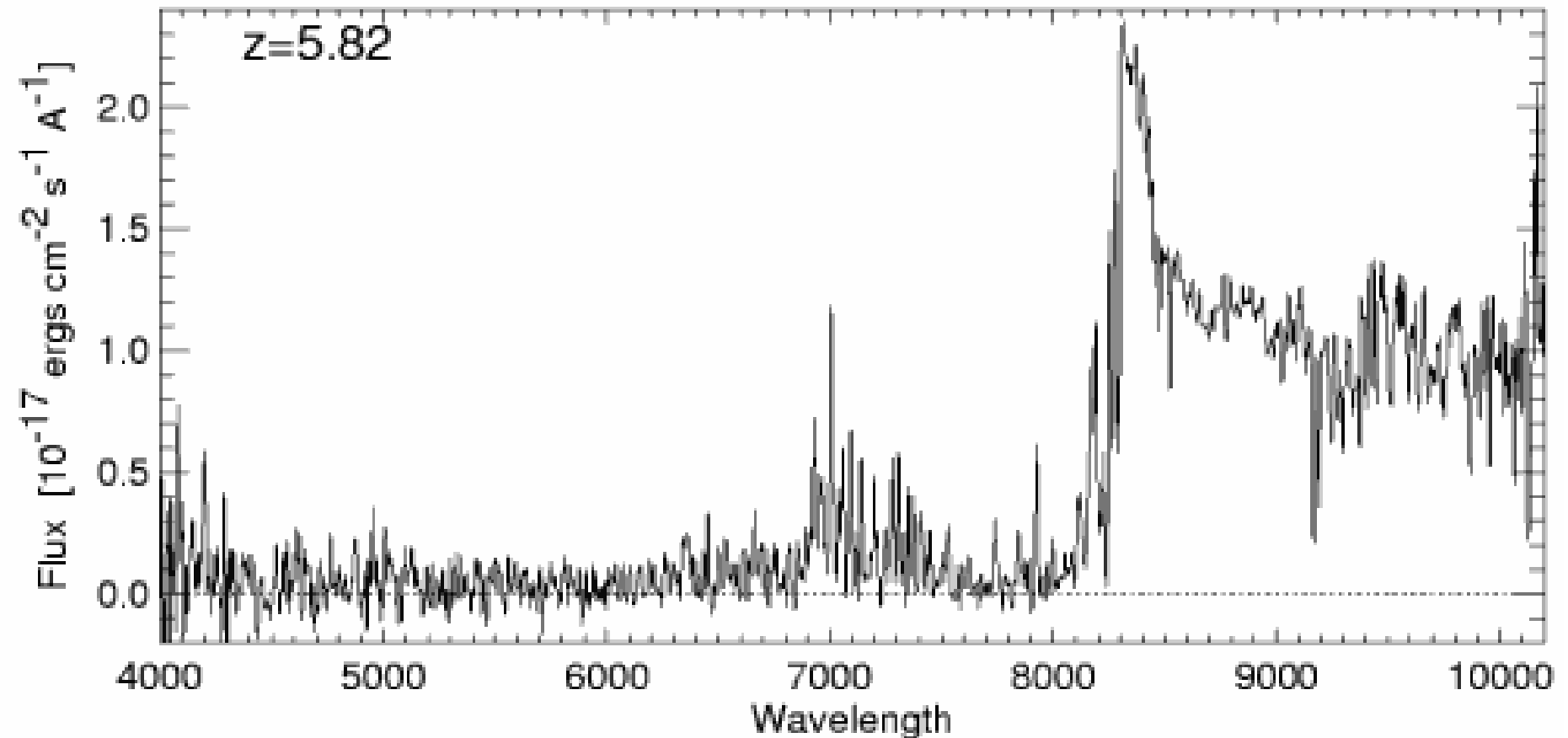


# Kvazari

## (Quasi Stellar Radio Sources)

- 1960. Sandage i Matthews su na mestu jakog radio izvora 3C48 snimili zvezdu slabog sjaja  $16^m$
- 1962 – Hazard je na mestu radio izvora 3C273 otkrio plavičasti objekat  $13^m$
- Njihovi spektri su emisioni i čudni (problem identifikacije linija) !
- 1963. – Maarten Schmidt ih je objasnio velikim crvenim pomakom. Prema Hablovom zakonu to su najdalji kosmički objekti.
- Samo 10% kvazara su jaki radio izvori, pa je od 1988. u upotrebi naziv - Quasi Stellar Object (QSO)

# Spektar kvazara na $z=5.82$ (crveni pomak Lajman emisionog pika iz UV u IC oblast spektra)



- Iz crvenog pomaka linija u spektru kvazara 3C273,  $z=0.16$ , određena je brzina njegovog udaljavanja  $v=48000$  km/s, a iz Hablovog zakona  $v=H_0D$ , rastojanje do njega  $D=480$ Mpc.
- Sa merenim  $m=+13$ , dobija se da je

$$M=-25.5 !$$

**Kvazar je mnogo sjajniji i od najsjajnije galaksije!**

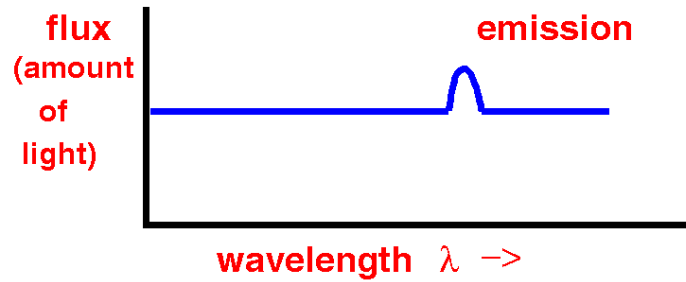
## Posmatračke činjenice:

- spektri kvazara pokazuju veliki crveni pomak,
- menjaju sjaj u kratkim vremenskim intervalima – reda nekoliko meseci
- spektar je netermalni sa širokim emisionim i uskim apsorpcionim linijama
- najveći broj kvazara emituje najviše energije u IC, samo oko 10% su jaki radio-izvori (“radio-loud”)

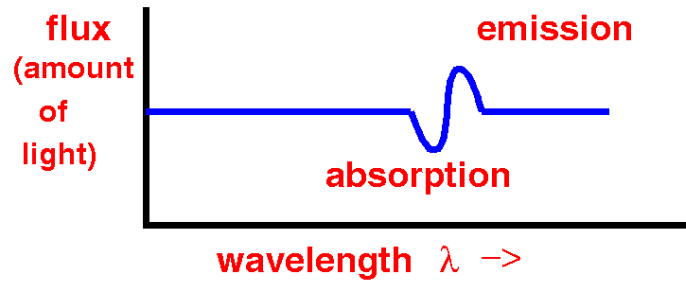
# Apsorpcione linije u spektru kvazara



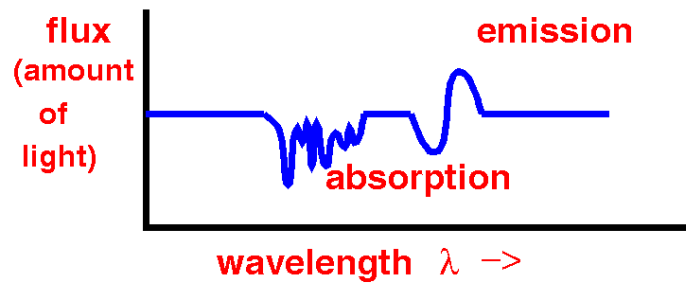
### No absorbing clouds



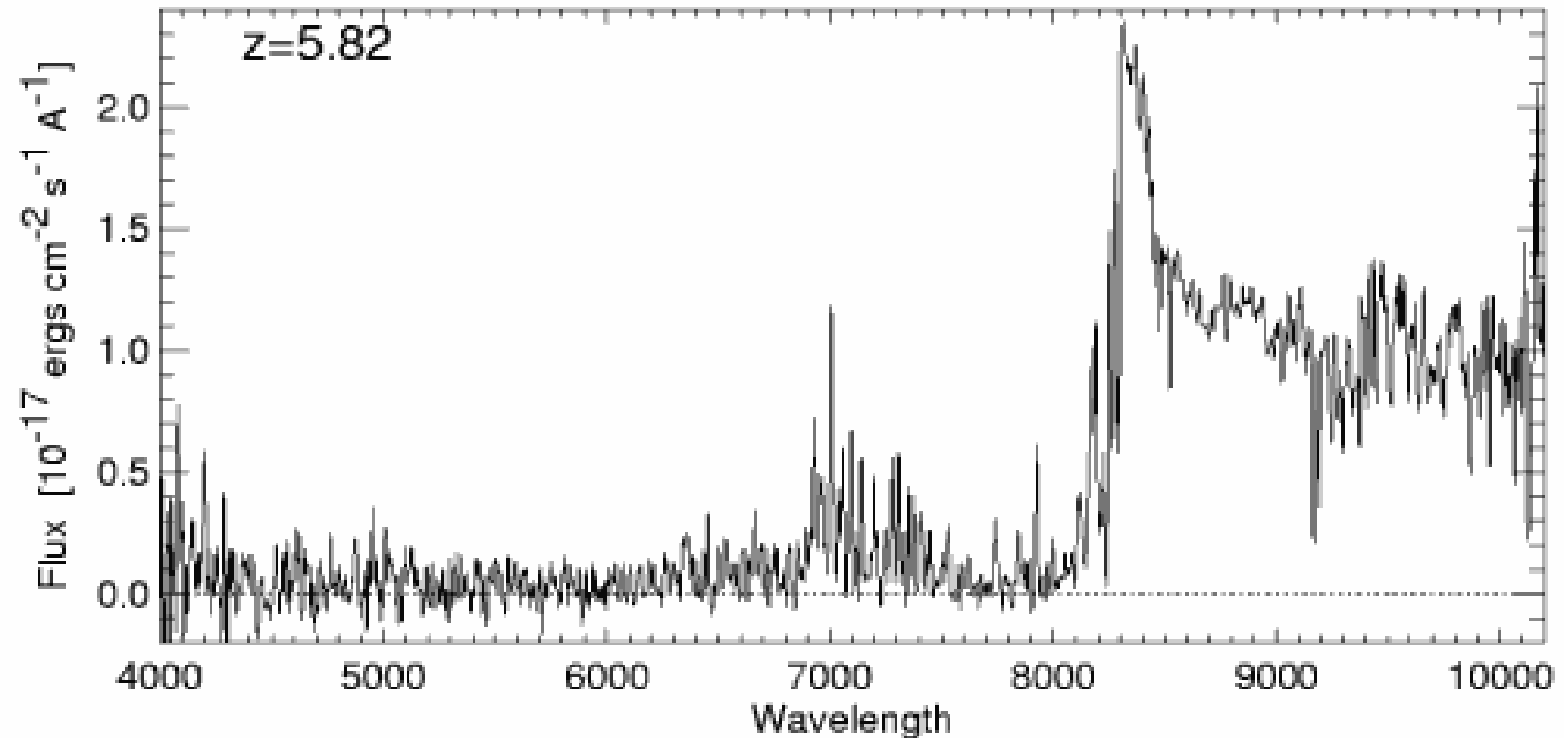
### One absorbing cloud close by



### Several absorbing clouds



# Spektar kvazara na $z=5.82$ (crveni pomak Lajman emisionog pika iz UV u IC oblast spektra)

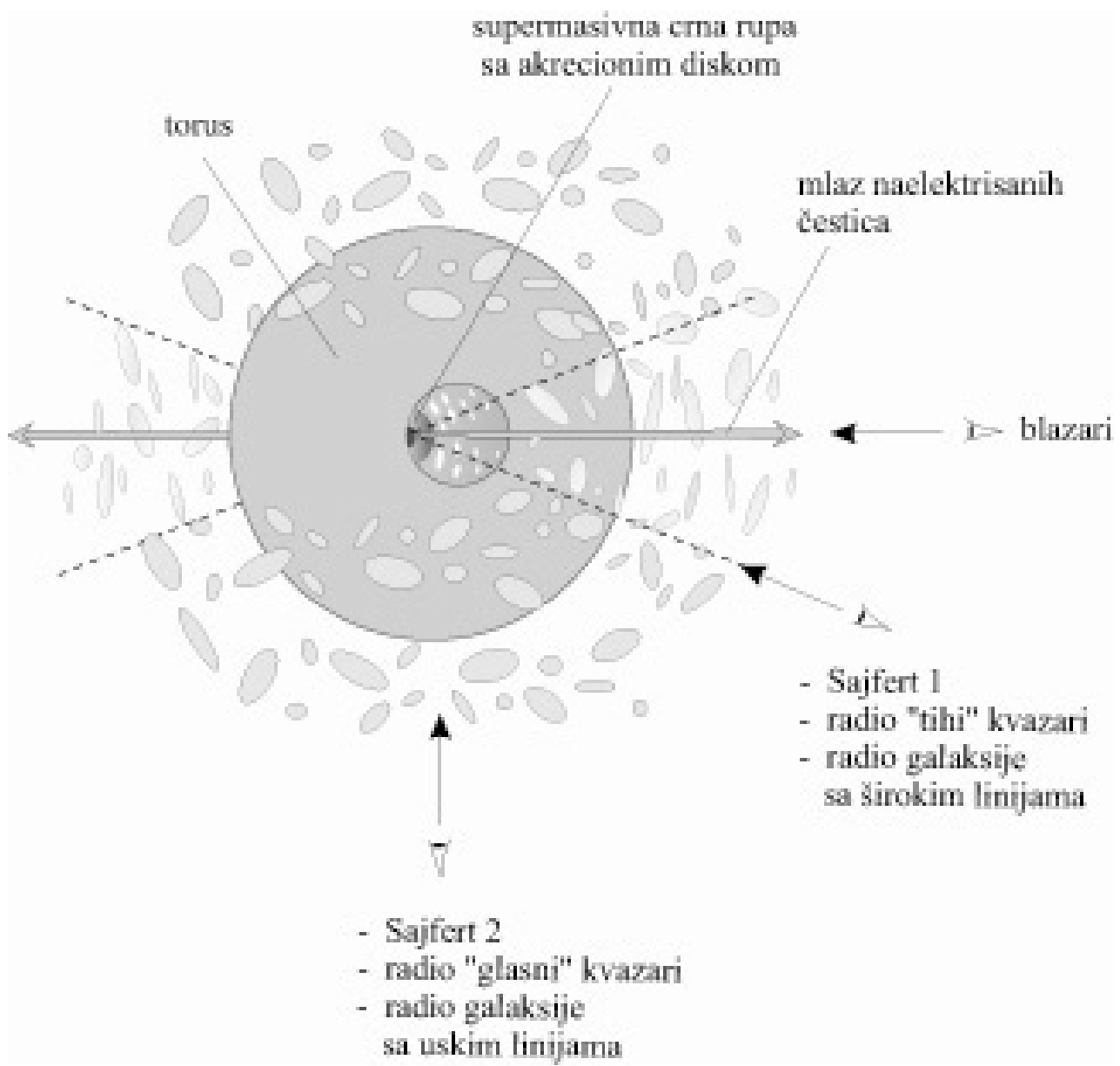


- Velika sličnost kvazara i aktivnih galaksija

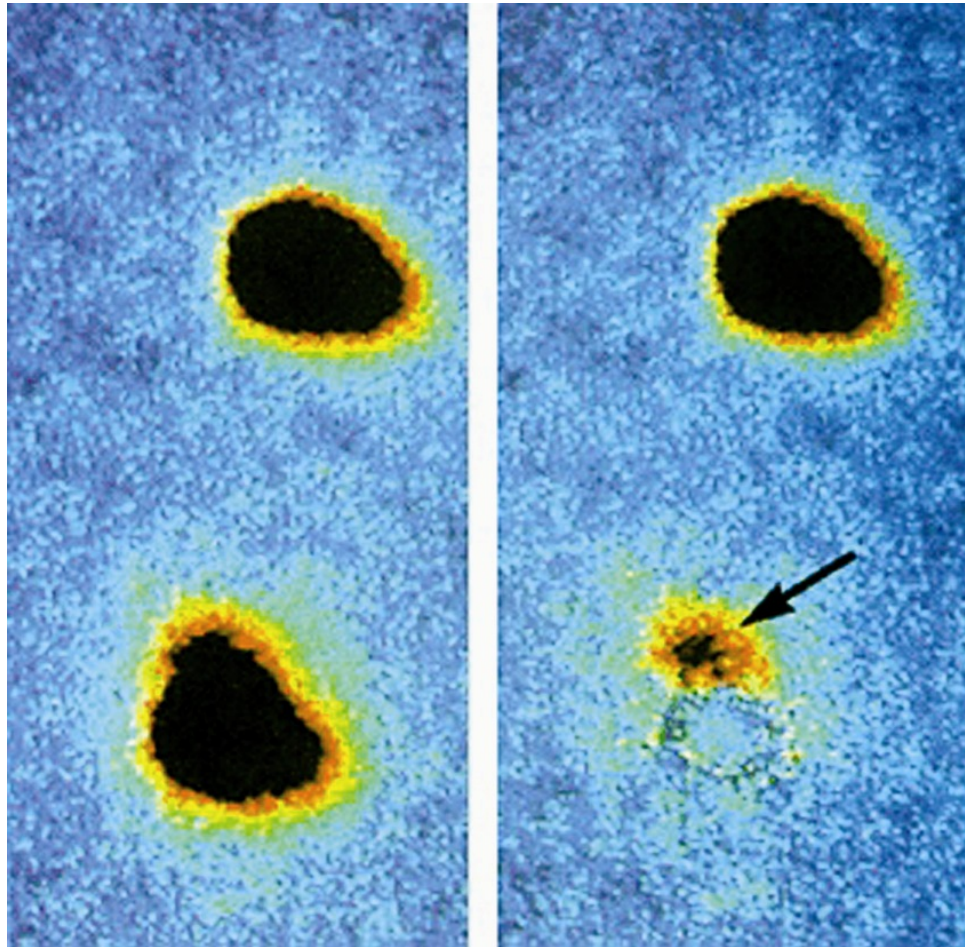


- Kvazari su kompaktna jezgra aktivnih galaksija koja se jedino i vide na tako velikim rastojanjima
- Smatra se da kvazari, aktivne galaksije i normalne galaksije čine evolutivni niz

# Model jezgra aktivnih galaksija i kvazara



# Dvojni kvazar O957 + 561 (prvo otkriveno gravitaciono sočivo, 1979)

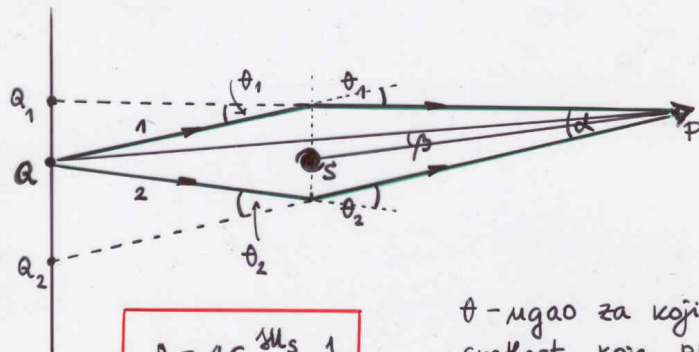


# Dvojni kvazar

(Merenjem vremenskog kašnjenja u promeni sjaja dva lika jednog kvazara određuje se vrednost Hablove konstante)



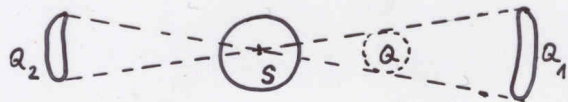
## EFEKAT GRAVITACIONOG SOČIVA



$$\theta = 4G \frac{M_s}{c^2} \frac{1}{r}$$

(Einstein, 1919)

$\theta$  - ugao za koji se savije svetlost koja prođe pored masivnog objekta S na rastojanju  $r$



Hablov parametar  $H = \frac{Z_Q Z_S \alpha^2}{\Delta t (Z_Q - Z_S)} \frac{\sqrt{L_1/L_2 - 1}}{\sqrt{L_1/L_2 + 1}}$

Masa galaksije S  $M_s = \frac{\Delta t c^3}{4G} \frac{\sqrt{L_1/L_2 + 1}}{\sqrt{L_1/L_2 - 1}}$

$Z_Q, Z_S$  = crveni pomaci kvazara Q i galaksije S

$\frac{L_1}{L_2} = \frac{L_1(t)}{L_2(t+\Delta t)}$  ;  $\Delta t$  = vremenska razlika u prijemu svetlosti duž dve putanje

QSR 0957+561 u sažvežđu Velikog Medveda  
 $\Delta t = 417$  dana  $\Rightarrow H = 65 \text{ km/s/Mpc}$

# Metagalaksija (Astronomska vasiona)

**Metagalaksija** sadrži nekoliko milijardi galaksija

**Galaksije** su osnovne strukturne jedinice

**Grupe galaksija** broje nekoliko desetina galaksija (Lokalna grupa)

**Jata galaksija** broje stotine i hiljade galaksija (Virgo jato, na rastojanju oko 17Mpc, broji oko 2500 članova, sadrži spiralne i eliptične galaksije, u središtu se nalazi najmasivnija eliptična galaksija M87).

**Medjugalaktička materija** – merenja X-zračenja ukazuju na postojanje vrelog (oko  $10^7$  K) jonizovanog gasa.

**Bogata jata** su pravilnog oblika, sadrže do 30000 galaksija, uglavnom eliptičnih i diskolikih (Coma, Perseus)

**Superjata** (Lokalno Superjato ima Virgo jato u centru; Perseus-Pisces,

Hydra-Centaurus)

Najveće poznate strukture (dimenzija 200-300 Mpc) su **džinovska vlakna** i zidovi u kojima je materija jako koncentrisana i koji okružuju ogromne prazne prostore (voids). Najveći je tzv. Sloan veliki zid, prošireni 'filament' galaksija otkriven 2003. godine.



Hubble deep field (Hablovo duboko polje)  
snimak galaksija do 30<sup>m</sup>, na više od 1000Mpc,  
dobijen sa 100 sati ekspozicije

# Coma jato galaksija



# Lokalna grupa

Sadrži skoro 50 članova.

## Tri spiralne galaksije:

- **Andromedina galaksija (M31)** prečnika 60kpc, na rastojanju od oko 690 kpc, ima 4 patuljaste eliptične galaksije kao satelite,
- **Mlečni put**, prečnika 30kpc, ima desetak satelitskih galaksija, najpoznatiji sateliti su nepravile galaksije Mali i Veliki Magelanov oblak, na rastojanju od oko 50kpc
- **Galaksija M33**, prečnika 20kpc, na rastojanju od oko 900kpc.

Sve ostale galaksije su ili male eliptične ili nepravilne.

Svi članovi Lokalne grupe se kreću ka jatu Virgo kao celina brzinom od oko 300km/s.

M31



M33



# Kosmološke hipoteze i modeli

- **Kosmologija** – naučna disciplina koja izučava vasionu u celini, njenu prošlost, sadašnjost i budućnost pomoću osnovnih fizičkih teorija i empirijski dobijenih saznanja
- **Cilj**: objašnjenje postanka vasiona i etapa njene evolucije
- **Pitanje**: Da li fizički zakoni koji važe **ovde i sada** važe **svuda i uvek**?

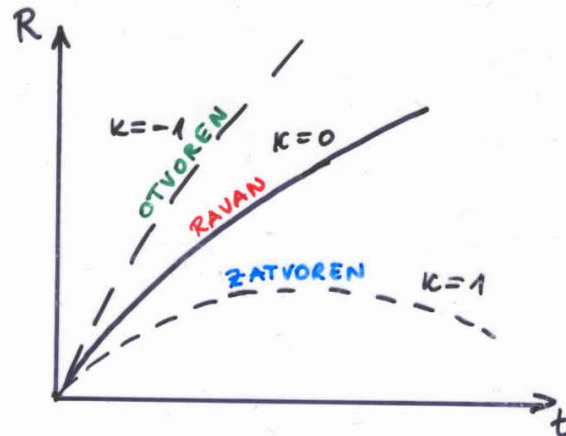
- **Kosmološki princip:** pretpostavka da je vasiona u velikim razmerama (reda nekoliko stotina parseka) homogena i izotropna
- Pretpostavke da je vasiona, osim što je homogena i izotropna još i beskonačna i stacionarna dovode do fotometrijskog (Olbersovog) i gravitacionog paradoksa. Paradoksi su posledica klasičnog, Njutnovskog poimanja prostora, vremena i gravitacije.
- STR (1905): merenje vremena, dužine i mase zavisi od kretanja posmatrača
- OTR (1916): geometrija prostor-vremena je uslovljena materijom (“Mass tells space how to curve, space tells mass how to move”)

- Ajnštajn (1916) je primenio jednačine OTR na vasionu kao celinu, pretpostavio da je vasiona **homogena, izotropna i stacionarna** (tzv. **idealni kosmološki princip**) i modifikovao jednačine uvodeći jedan novi član. Ovaj tzv.  **$\Lambda$  član** ili **kosmološka konstanta** je uvedena kao repulzivna sila nepoznatog porekla koja uravnotežava efekte gravitacije

# Kosmološki modeli sa $\Lambda=0$

A. FRIEDMANN (1922) i G. LEMAITRE (1927) su iz originalnih Ajštajnovih jednačina OTR izveli dve klase nestacionarnih kosmoloških modela. Oba počinju širanjem iz stanja beskonačne gustine, a sudbina dalje zavisi od odnosa srednje gustine materije u Vanou i kritične gustine  $\rho_{kr}$ :

- ako je  $\rho > \rho_{kr}$  zatvoreni model
- ako je  $\rho < \rho_{kr}$  otvoreni model
- Ako je  $\rho = \rho_{kr} \rightarrow$  ravan model (Ajštajn - de Sitterov)
- U standardnim (Fridmanovim) modelima  $\Lambda=0$



$R(t)$  = kosmički  
dimenzioni faktor =  
= radius krivine tro-  
dimenzionog prostora =  
= mera veličine Vanoune  
kao f-je vremena



Galaksija mase  $m$  na rastojanju  $r$  udaljava se  $v = H_0 \cdot r$

Birchoff-ovo pravilo: kreću se galaksije  $m$  na rastojanju  $r$  od posmatrača je. pod uticajem sveukupne materije unutar sfere radijusa  $r$  sa centrom u  $O$ .

Ukupna masa  $M$  galaksija unutar sfere radijusa  $r$  koje privlače  $m$  je:

$$M = \rho_m \cdot \frac{4}{3} \pi r^3$$

$\rho_m$  = srednja gustina materije u Vasioni

Ukupna energija galaksije  $m$  ostaje očuvana u toku širenja:

$$E = \frac{1}{2} m v^2 - G \frac{M m}{r} = \text{const}$$

Ako je  $E < 0$  galaksija će jednom pasti u  $O$

Ako je  $E > 0$  galaksija će se zauvek udaljavati

$E = 0$  deli slučajevima kada je galaksija u stanju (E < 0) i kada nije (E > 0)

$$\frac{1}{2} m (H_0 r)^2 = G \frac{m}{r} \rho_m \cdot \frac{4}{3} \pi r^3$$

$$\rho_m = \frac{3 H_0^2}{8 \pi G} = \rho_{kr}$$

Kritična vrednost gustine

Kritična gustina zavisi od vrednosti  $H_0$

## Parametar $H_0$

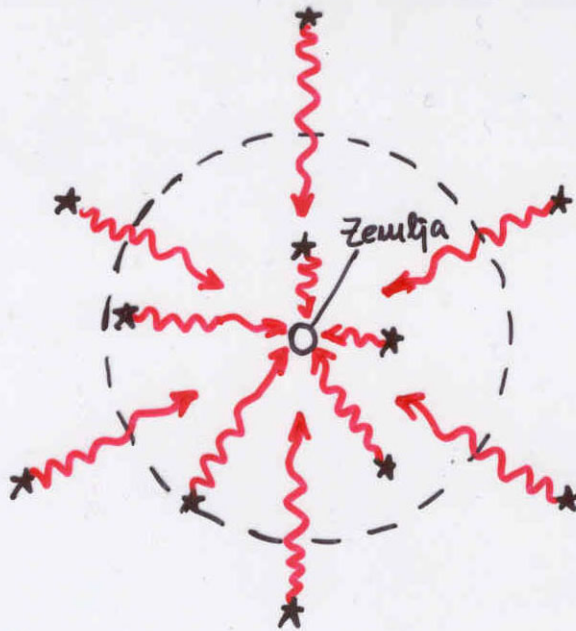
Hablova konstanta predstavlja sadašnju brzinu širenja vasiona  $H_0$  i ukazuje na starost vasiona.

Starost prazne vasiona:

$$t=t_0: r=0, v=0, \quad r=vt \rightarrow v=r/t=H_0 r \rightarrow t=1/H_0 - \text{Hablovo vreme}$$

Što je veća brzina širenja, tj. **što je veća vrednost  $H_0$ , vasiona je mlađja**, jer je vasioni koja se brže širi potrebno kraće vreme da dostigne današnje dimenzije.

# Kosmički horizont



Radijus kosmičkog čestičnog horizonta – rastojanje koje je svetlost prešla od Big bang-a.

Astronomska vasiona je smeštena unutar ove sfere.

Ako se Big bang desio pre 13.7 milijardi godina, kosmički horizont je na rastojanju od 13.7 milijardi godina.

Ne možemo videti objekte dalje od ovog horizonta jer njihova svetlost nije imala dovoljno vremena da stigne do nas.

## Parametar $\Omega_0$

Na starost vasione utiče i količina materije u njoj.

Parametar gustine:

$\Omega_0 = \rho/\rho_{kr}$  – odnos gustine mase u vasioni i kritične gustine

$\Omega_0 = 2q_0$  ( $q_0$  – parametar usporavanja)

Pošto masa gravitacijom usporava širenje, **što je veće  $\Omega_0$** , tj. što je masivnija, to se u prošlosti vasiona brže širila → **vasiona je mlađja**.

$$H_0 = 75 \text{ km/s/Mpc}$$

$$\Omega_0 = 2q_0$$

$$(\Lambda = 0)$$

$$q_0 = 0$$

$$q_0 = 1/2$$

$$0 < q_0 < 1/2$$

$$q_0 > 1/2$$

$$T_0 = \frac{1}{H_0} = 13 \cdot 10^9 \text{ god.}$$

$$T_0 = \frac{2}{3} \frac{1}{H_0} = 8.7 \cdot 10^9 \text{ god.}$$

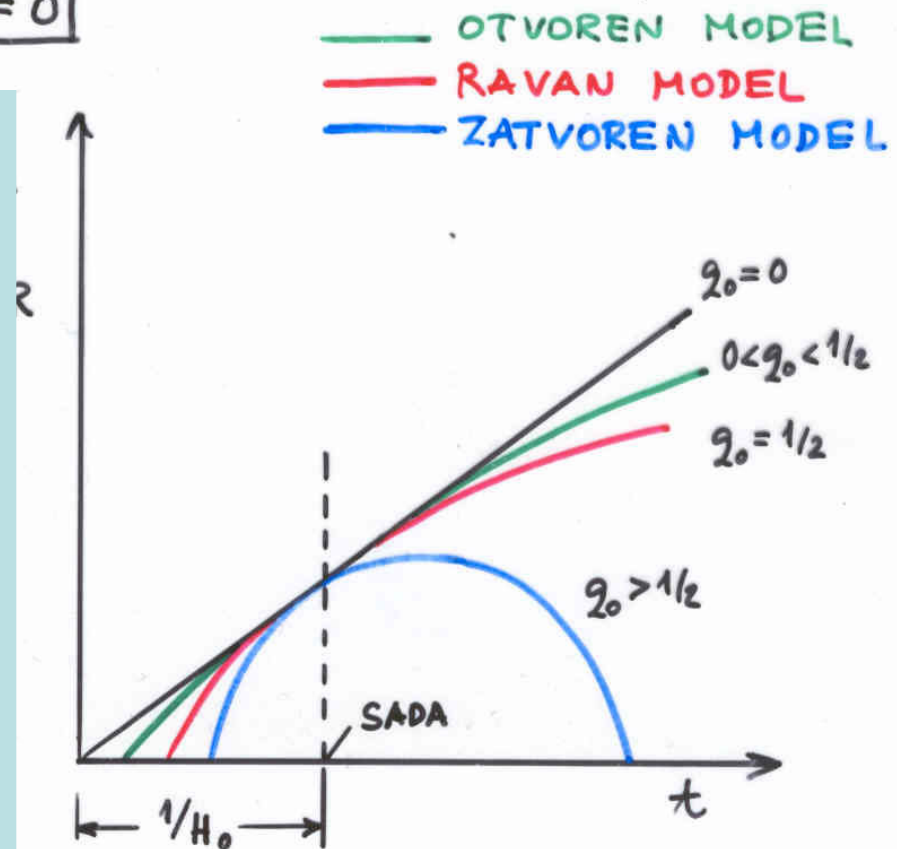
$$8.7 \cdot 10^9 < T_0 < 13 \cdot 10^9 \text{ god.}$$

$$T_0 < 8.7 \cdot 10^9 \text{ god.}$$

TIP	SREDNJA GUSTINA MATERIJE	PROSTORNA ZAKRIVLJENOST	UKUPNA ZAPREMINA
ZATVOREN	$\rho > \rho_c$	POZITIVNA	KONAČNA
RAVAN	$\rho = \rho_c$	NULTA	BESKONAČNA
OTVOREN	$\rho < \rho_c$	NEGATIVNA	BESKONAČNA

$$\Lambda = 0$$

Friedmann – Lemaitre-ovi i Einstein – de Sitterov model vasione **bez kosmološke konstante**.



## Parametar $\Omega_\Lambda$ odnosno $\Lambda$

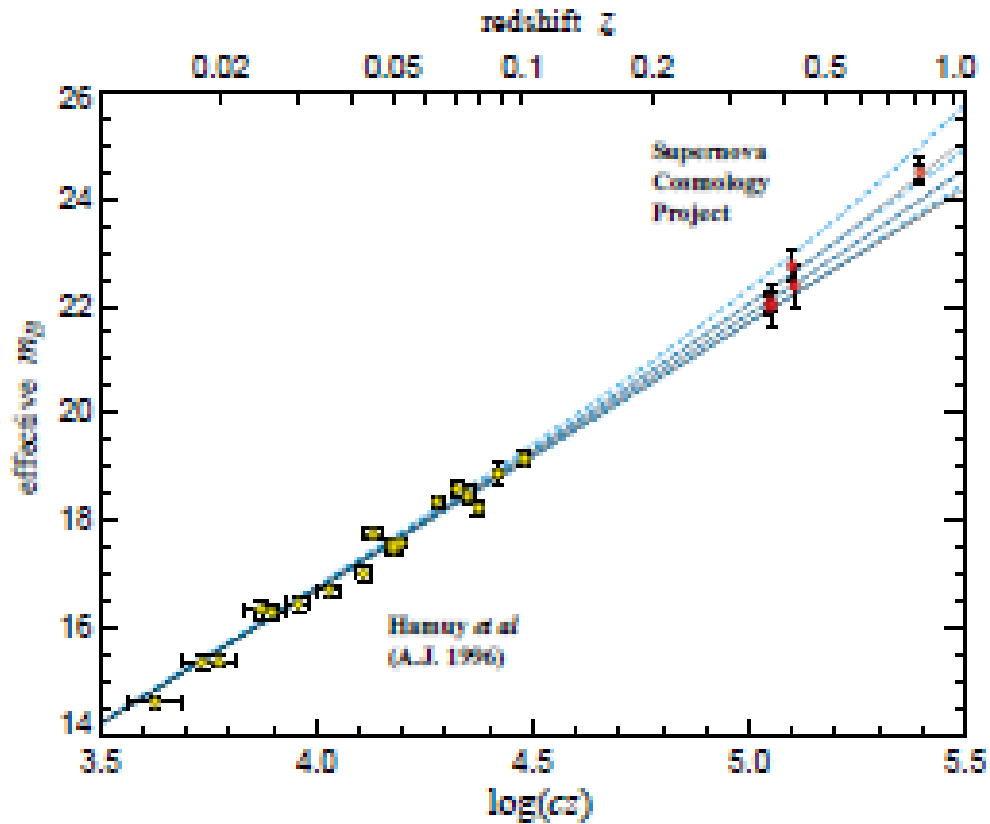
Uniformnost mikrotalasnog pozadinskog zračenja → teorija inflacije → ravan model ( $\Omega=1$ )

Sa  $\Lambda \neq 0$ ,  $\Omega_m + \Omega_\Lambda = 1$ , gde je  $\Omega_m = 0.3$ , a  $\Omega_\Lambda = 0.7$ .

Sa repulzivnom silom ( $\Lambda \neq 0$ ), vasiona se širila sporije u prošlosti → vasiona je starija.

# Ubrzano širenje vasionne

(Perlmutter et al., 1998)



# Velika eksplozija (Big Bang)

Big Bang je kosmološki model prema kome su sva materija i zračenje u vasioni (i sam prostor) nastali u eksploziji u određenom trenutku u prošlosti.

Ova teorija je veoma uspešna u objašnjenju:

- širenja vasiona
- mikrotalasnog pozadinskog zračenja
- zastupljenosti helijuma u vasioni

U pokušaju da objasni posmatranu zastupljenost elemenata kosmološkom nukleosinteziom → vrela velika eksplozija (hot Big bang), **Džordž Gamov** (1948). Predvideo je i postojanje kosmičkog pozadinskog zračenja 'sazdanog od drevnih fotona oslobođenih prilikom velikog praska'.

Vasiona je nastala pre 13.7 milijardi godina u velikoj eksploziji i od tada se širi i hladi od početnog stanja ekstremne gustine i temperature.

$t < 10^{-43}$  s (Plankovo vreme)

$t \sim 10^{-35}$  s teorije elementarnih čestica: vasiona se sastojala od jednake količine materije i antimaterije, elektrona i pozitrona, neutrina i antineutrina, kvarkova i antikvarkova (asimetrični raspad hipotetičkih čestica doveo je do dominacije materije u vasioni).

$10^{-35}$  s  $< t < 10^{-24}$  s iznenadno i brzo (inflatorno) širenje vasiona (Alan Guth, 1981)

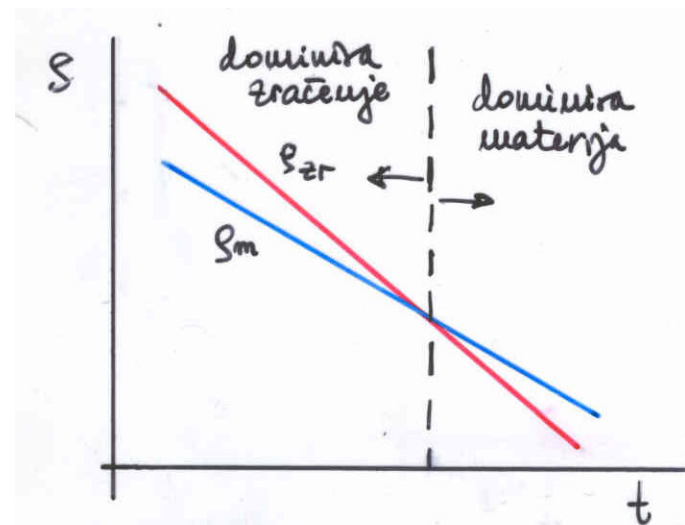
Širenjem se vasiona hladila, a temperatura je određivala vrste reakcija među česticama.

Kvarkovi koji su preživeli anihilaciju formirali su neutrone i protone.

Oko 100s posle Big banga – sinteza deuterona i jezgra helijuma ( $T \sim 10^9$  K) oko 25% He (primordijalni helijum)

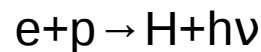
Širenjem vasionne gustina materije je opadala kao  $R^{-3}$ , a gustina zračenja kao  $R^{-4}$ .

Zračenje nastalo u anihilacijama materije i antimaterije je u ranoj vasioni dominiralo: **era zračenja**. Širenjem, zračenje je gubilo energiju (kosmološki crveni pomak). Gustina energije zračenja opada brže nego gustina materije, pa na  $T < 10000\text{K}$ : **era materije** (e, p, He)

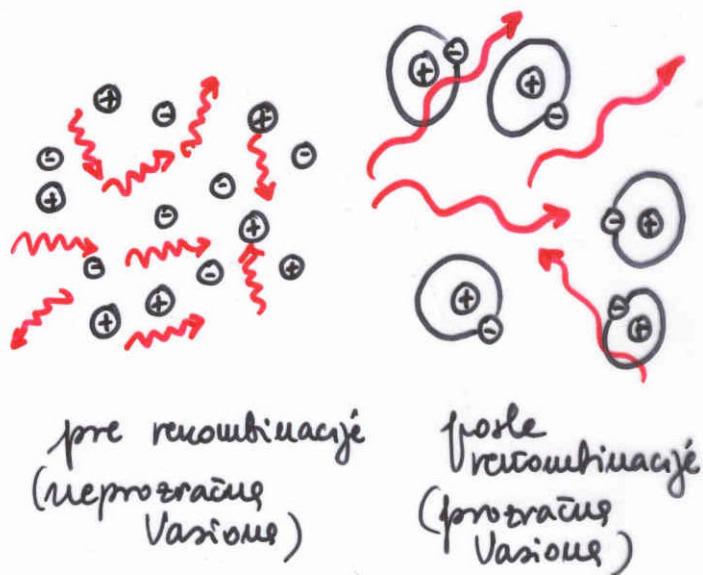


Na  $T > 3000\text{K}$  materija i zračenje su bili u TDR, fotoni su se rasejavali na elektronima.

Na  $T \sim 3000\text{K}$  (300 000 godina posle Velikog praska, tj. na  $z=1089$ ) - **rekombinacija** protona i elektrona (stvaranje vodonikovih atoma)

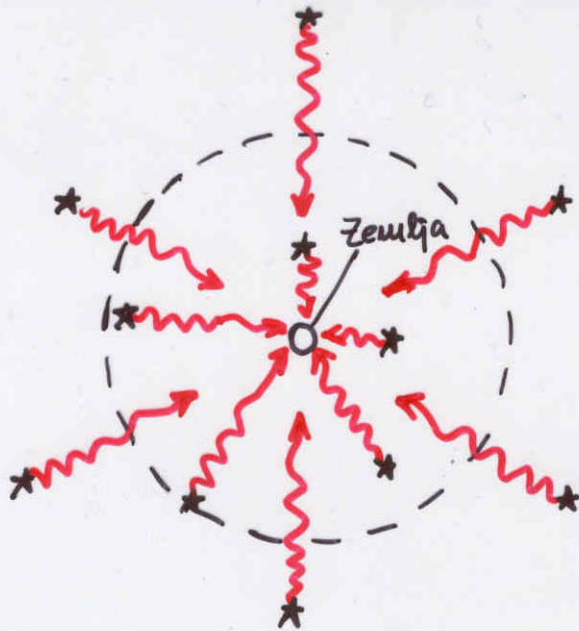


Fotoni su počeli da se kreću slobodno → **vasiona je postala transparentna**



- Zračenje se hladilo od  $T \sim 3000\text{K}$  do današnja  $3\text{K}$  (mikrotalasno pozadinsko zračenje), a materija je u interakcijama formirala zvezde i galaksije.

# Kosmički horizont



Radius kosmičkog čestičnog horizonta – rastojanje koje je svetlost prešla od Big bang-a.

Astronomska vasiona je smeštena unutar ove sfere.

Ako se Big bang desio pre 13.7 milijardi godina, kosmički horizont je na rastojanju od 13.7 milijardi godina.

Ne možemo videti objekte dalje od ovog horizonta jer njihova svetlost nije imala dovoljno vremena da stigne do nas.

# Mikrotalasno pozadinsko zračenje

- potvrda modela velikog praska
- 1965. **Penzias i Wilson** (Bell laboratorije) na  $\lambda = 7.35$  cm otkrili neočekivani radio-sjaj pozadine neba (mikrotalasna antena je bila namenjena satelitskoj komunikaciji). Intenzitet zračenja odgovarao je zračenju apsolutno crnog tela  $T \sim 3K$ .
- merenja intenziteta ovog zračenja i na ostalim talasnim dužinama sa Zemlje i sa satelita (COBE, 1989)
- COBE je potvrdio izotropnost fluksa zračenja i termalni spektar sa maksimumom na oko 1mm – spektar zračenja crnog tela sa

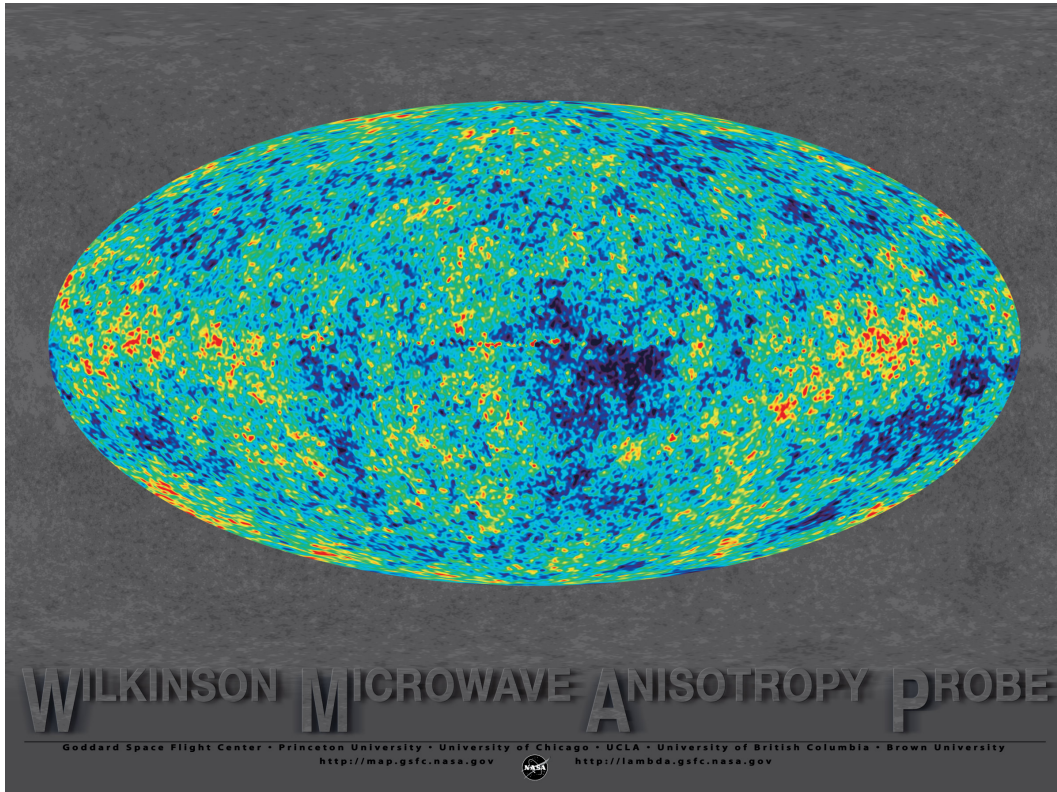
$$T = 2.735 \pm 0.06 \text{ K}$$

Merenja su potvrdila kosmološko poreklo ovog zračenja, tj. da **mikrotalasno reliktno zračenje potiče od zračenja koje se oslobađalo na  $T \sim 3000K$  pri rekombinaciji elektrona i protona u H-atome.**

Izotropnost mikrotalasnog reliktnog zračenja ukazuje na homogenost rane vasionne. WMAP (2001) – merio male fluktuacije (nehomogenosti) CMB

# WMAP

## Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (2001)

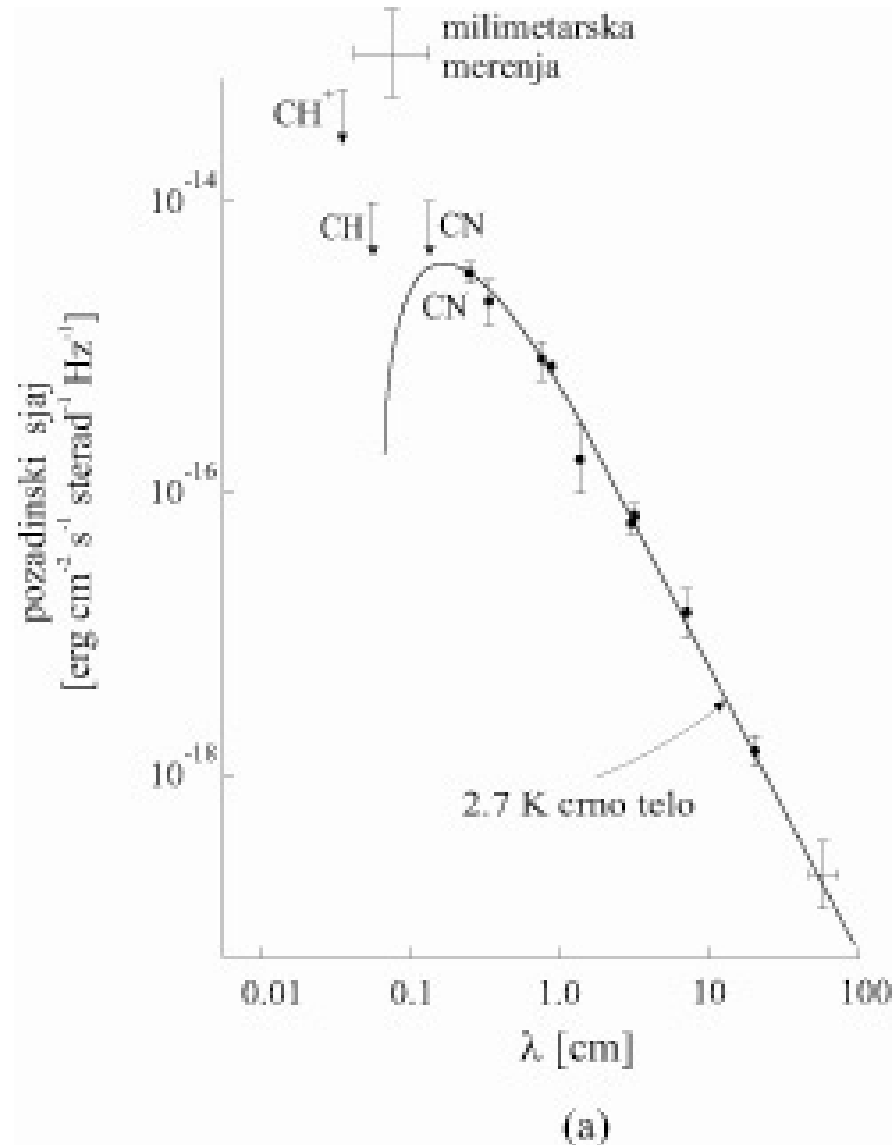


Najdalja i najstarija svetlost koju možemo videti, nastala neposredno posle Big Banga.

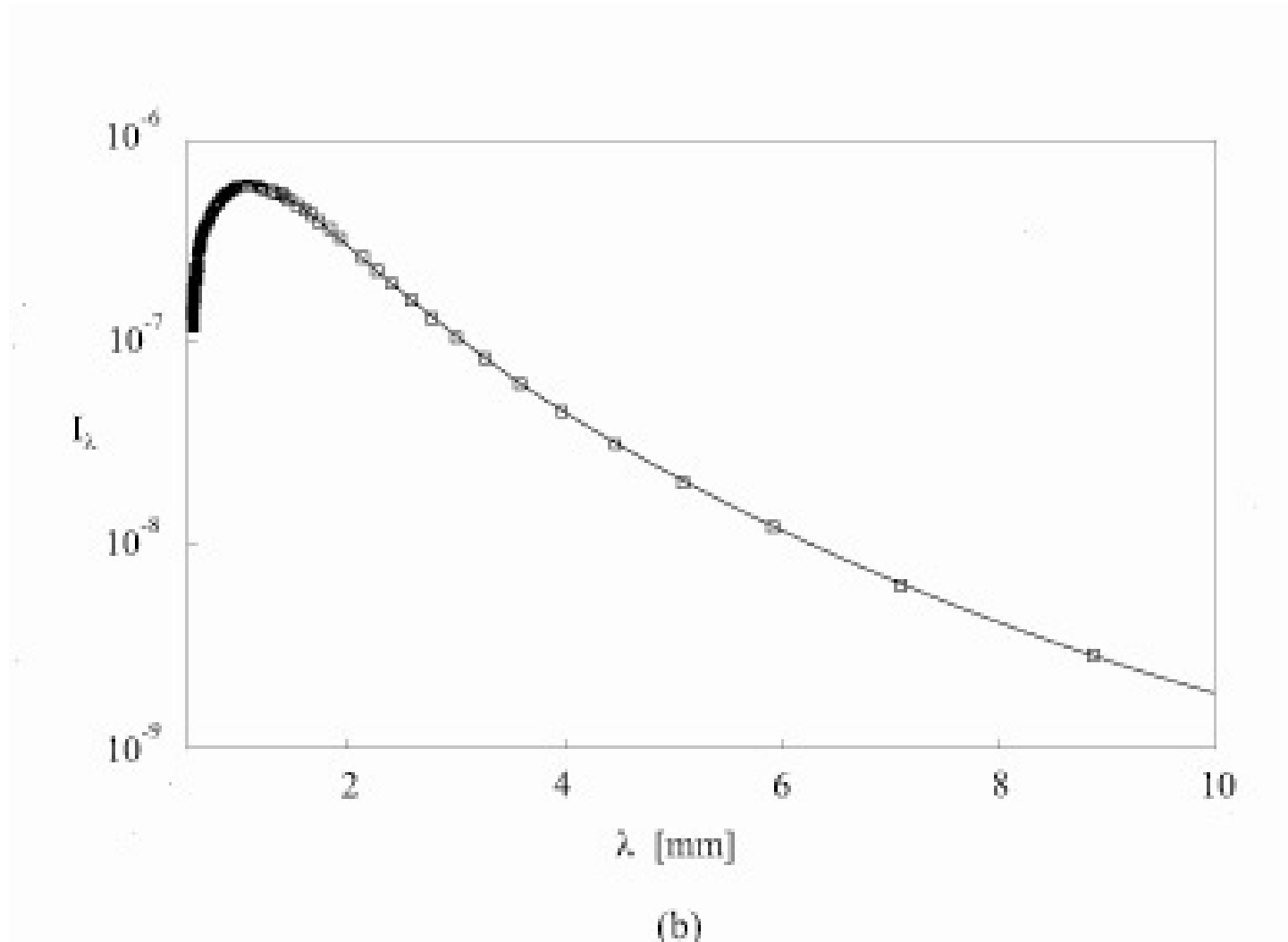
Maksimalne temperaturske razlike između tačaka označenih različitim bojama su reda nekoliko milionitih delova stepeni Kelvina.

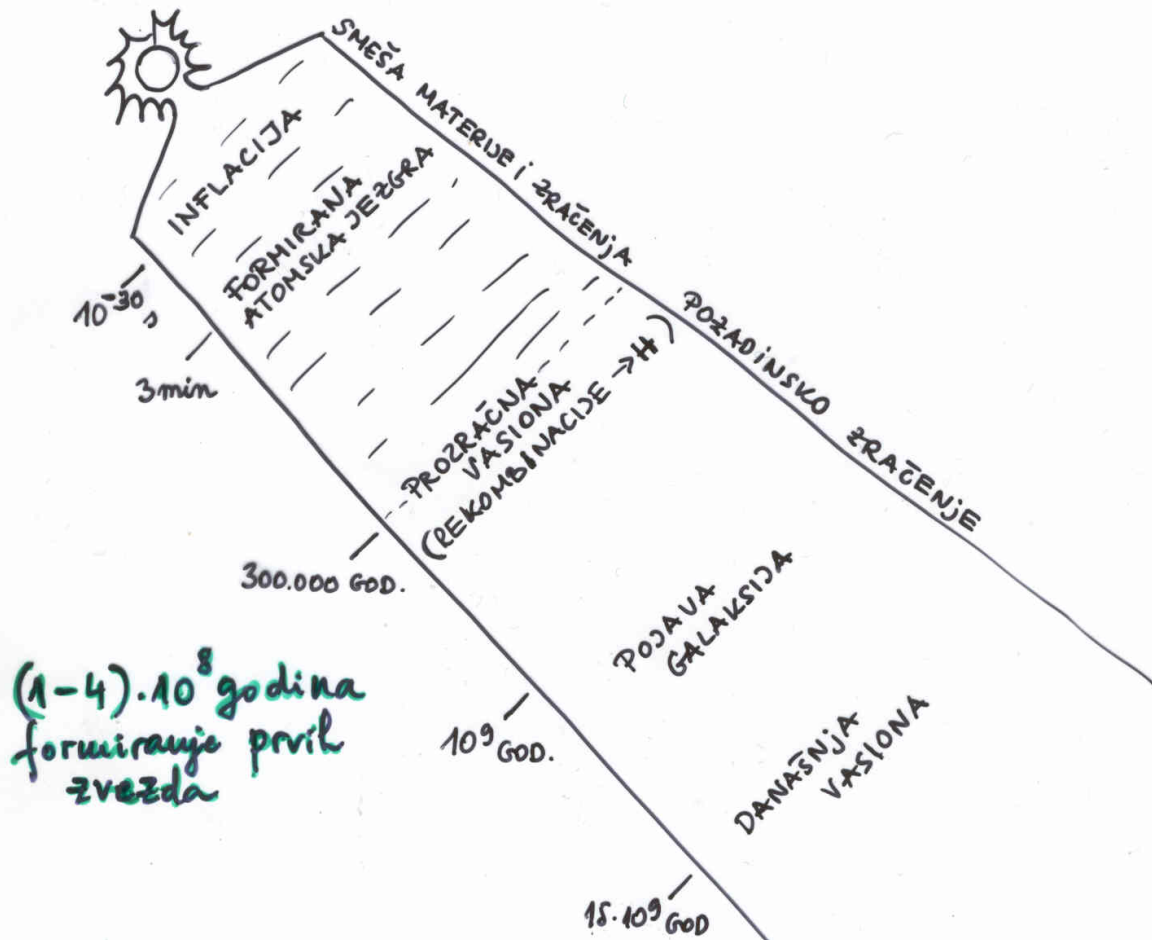
Temperatura CMBR je uniformna, što znači da je gas koji je to zračenje emitovao bio uniformno raspoređen.

# Merenje mikrotalasnog pozadinskog zračenja sa Zemlje



# Merenje mikrotalasnog pozadinskog zračenja satelitom COBE





(1-4) · 10<sup>8</sup> godina  
 formiranje prve  
 zvezda

Starost vasione (Maj 2003)  
 (13.7 ± 0.2) · 10<sup>9</sup> godina

Standardni model širenja vasiona nije dao odgovore na niz pitanja:

Kako je nastala vasiona?

Zašto materija dominira nad antimaterijom?

Kako nastaju galaksije?

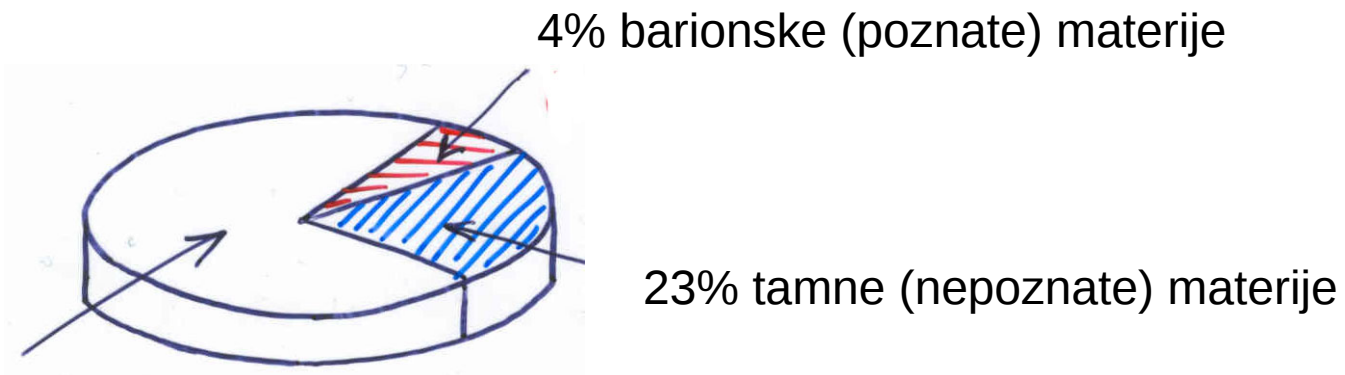
Koliko dimenzija ima vasiona?

Šta je tamna materija?

Šta je tamna energija?

Kakva je sudbina vasiona?

# Sastav vasione



73% tamne energije  
(kosmološka konstanta)

# Elementarne čestice – osnovni gradivni blokovi materije

## LEPTONI

i

## KVARKOVI

Elektroni

up

Mioni

down

Masivni tau leptoni

strange

3 vrste neutrina

charm

bottom

top

**HADRONI** – čestice koje se sastoje od kvarkova

**BARIONI** – čestice koje se sastoje od 3 kvarka (npr. proton = 1down+2up ; neutron = 1up + 2down)

Sva vidljiva materija u vasioni se može opisati pomoću leptona i kvarkova i sila koje deluju medju njima.

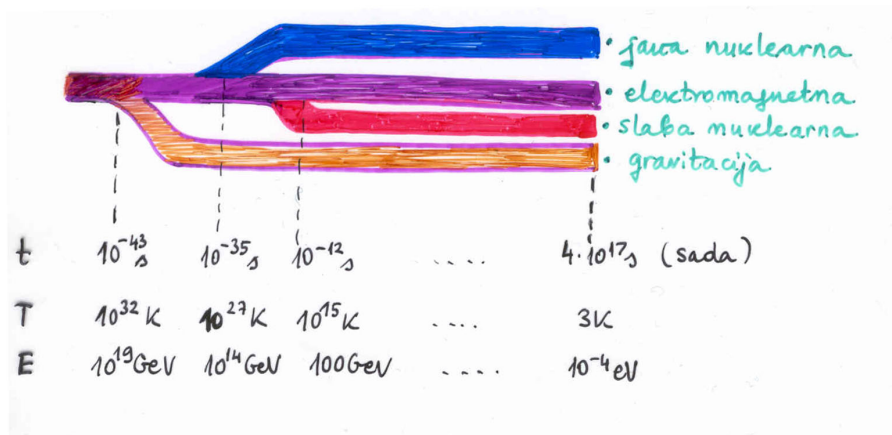
Postoje 4 interakcije medju elementarnim česticama

- 1) Jaka (izmedju kvarkova i hadrona)
- 2) Elektromagnetna (izmedju elektrona i protona)
- 3) Slaba (izmedju leptona i hadrona)
- 4) Gravitacija (izmedju svih čestica)

60-ih godina XX veka - elektroslaba teorija objedinjuje elektromagnetnu i slabu silu

Nekoliko teorija unifikacije objedinjuje jaku, elektromagnetnu i slabu silu

Simetrija koja povezuje jednu silu sa drugom važi samo kada je  $T > 10^{27} \text{K}$  što se može pojaviti samo u ranoj vasioni neposredno posle Big Banga (značaj ovih teorija za kosmologiju)



razdvajanje sila