

**Prve zvezde**

**Prve supernove**

**Prve crne rupe**

## Nezaobilazni kosmološki uvod

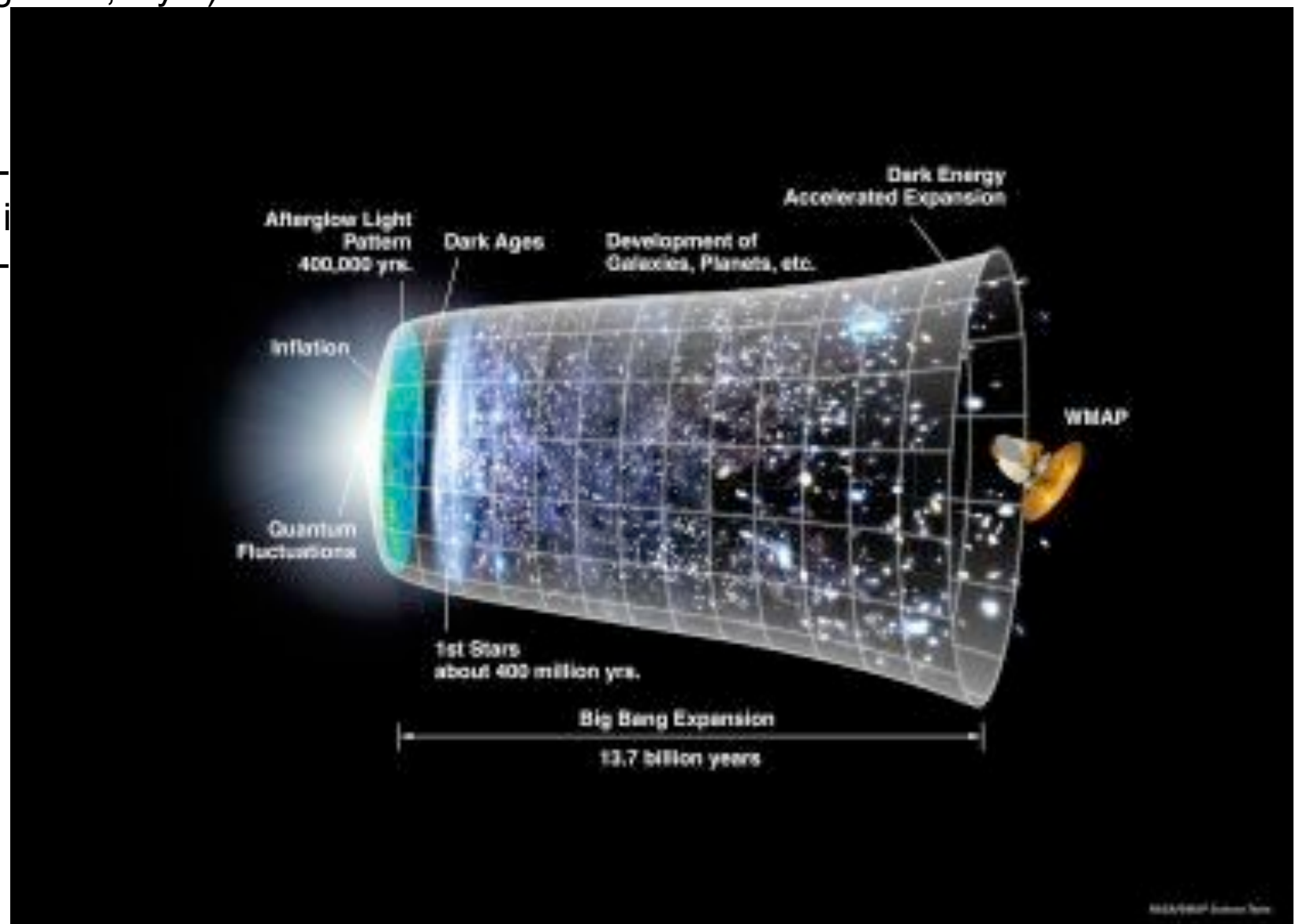
crveni pomak (redshift) Hablovo širenje prostora	~ starost Univerzuma (milijardi godina, Gyrs)
1000	0.0005
100	0.02
30	0.1 -----
10	0.5    interval koji nas interesuje
6	1.0 -----
3	2.2
2	3.3
1	6.0
0	13.6

## Nezaobilazni kosmološki uvod

crveni pomak (redshift) ~ starost Univerzuma  
 Hablovo širenje prostora (milijardi godina, Gyrs)

1000	0.0005
100	0.02
30	0.1
10	0.5
6	1.0
3	2.2
2	3.3
1	6.0
0	13.6

Priča o prvim objektima formiranim u našem Univerzumu je smeštena u posmatračkoj i eksperimentalnoj slepoj tački izmedju redshifta 30 i 6.



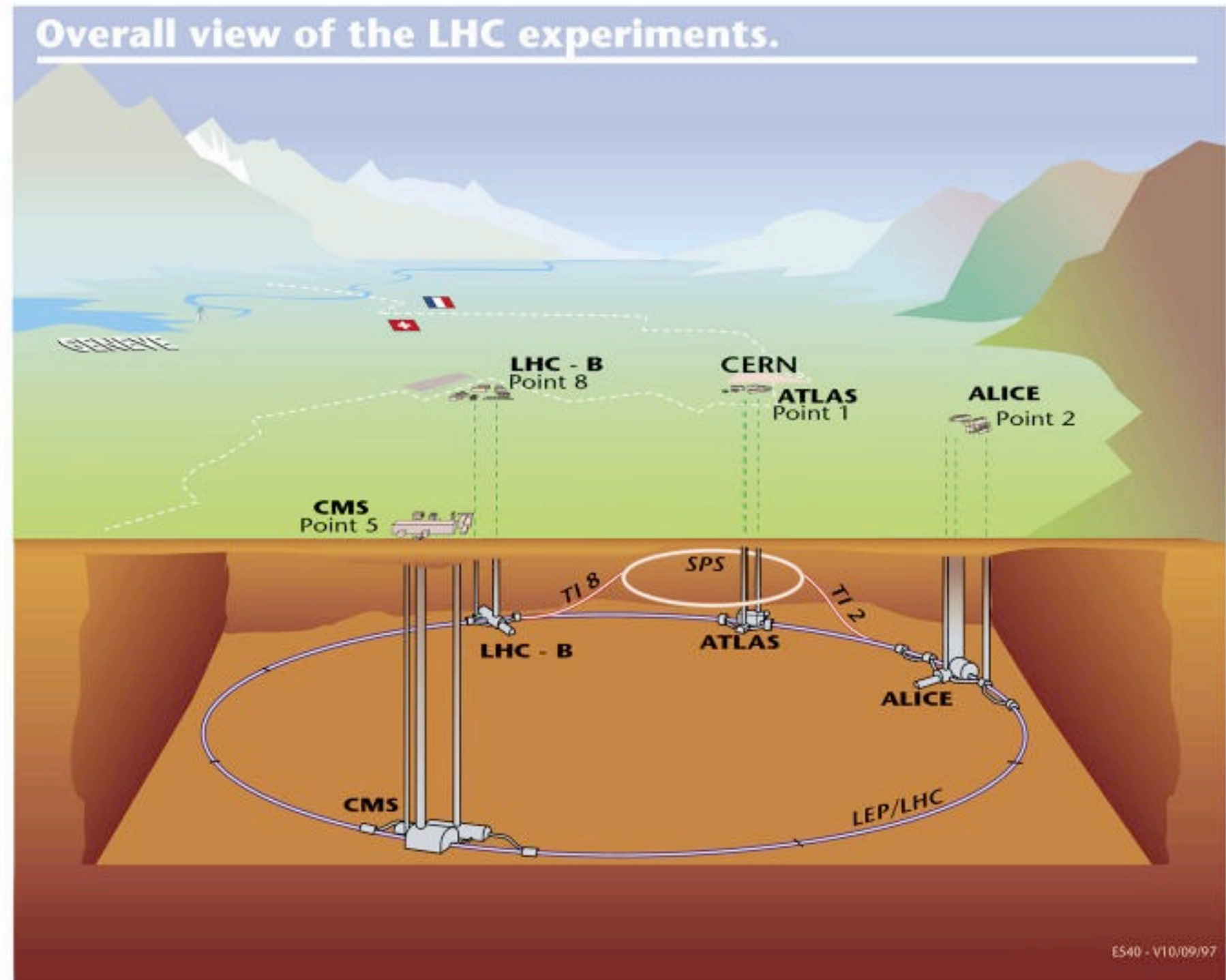
# Eksperimentalna fizika na visokim energijama

O Univerzumu iznad redshifta 1000 (kada je bio star svega 400 hiljada godina) sve što znamo je zasnovano na ekperimentalnoj fizici visokih energija

Standardni Model elementarnih čestica nam govori šta će se dogoditi ako na određenoj energiji sudarimo dve čestice.

Kroz neprestano povećanje energije u eksperimentima u CERNu mi se približavamo uslovima kakvi su vladali odmah nakon Velikog Praska,

Na osnovu standardnog modela mi možemo da pretpostavimo kako je izgledao Univerzum pre redshifta 1000.



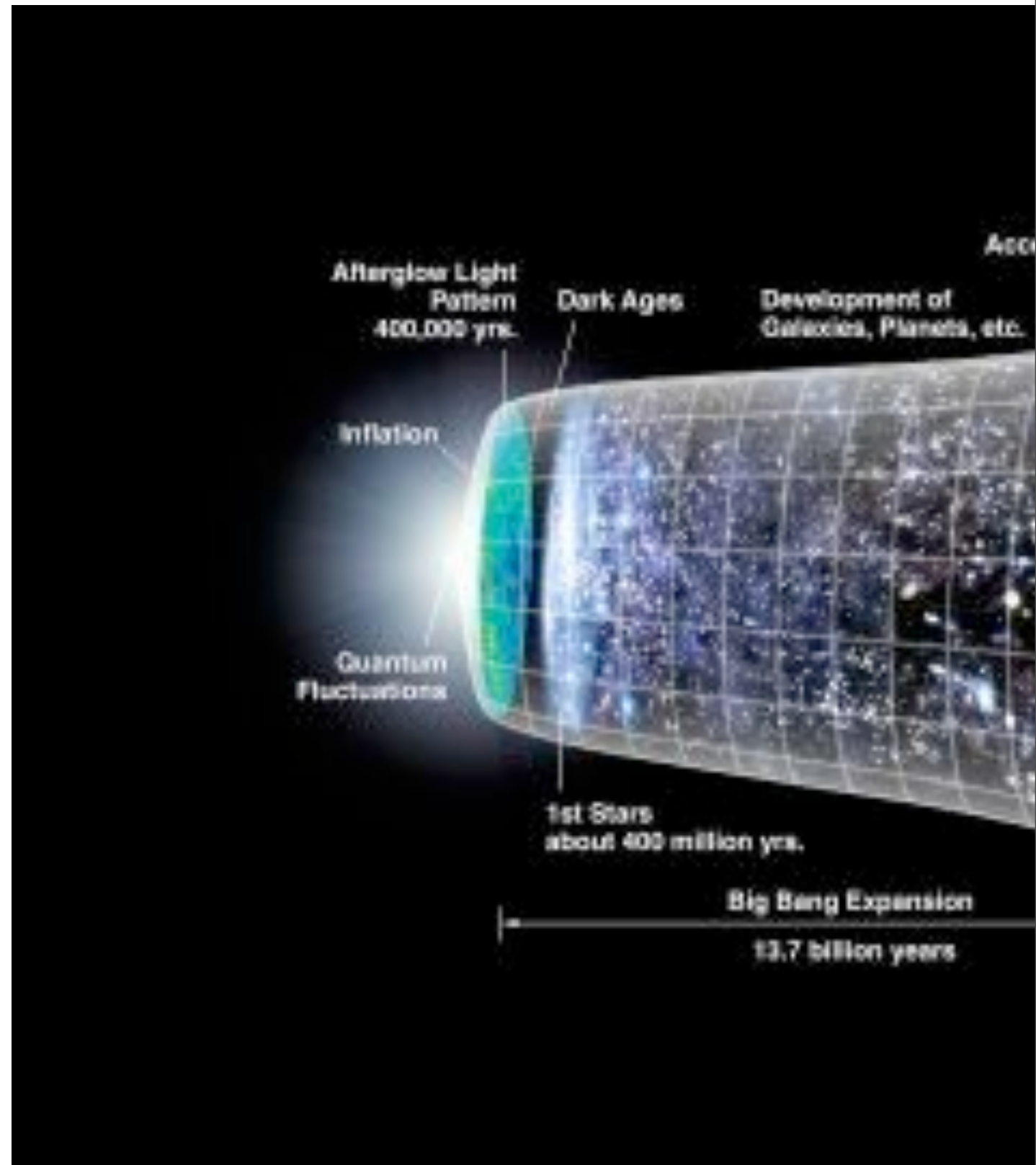
## Pozadinsko Mikrotalasno Zračenje

Od momenta Velikog Praska pa na dalje Univerzum se širi i hladi. Sve do redshifta 1000 (~400 000 godina nakon Velikog Praska) Univerzum je užarena lopta plazma subatomske čestice koje se neprestano sudaraju (rasejavaju).

Tek nakon ovog redshifta Univerzum postaje dovoljno mlak (ispod 13.6 eV) da dozvoli vezivanje elektrona za atome. Zbog toga se ovaj redshift i zove redshiftom poslednjeg rasejanja jer je to poslednji put da se elektron rasejao na jezgru atoma.

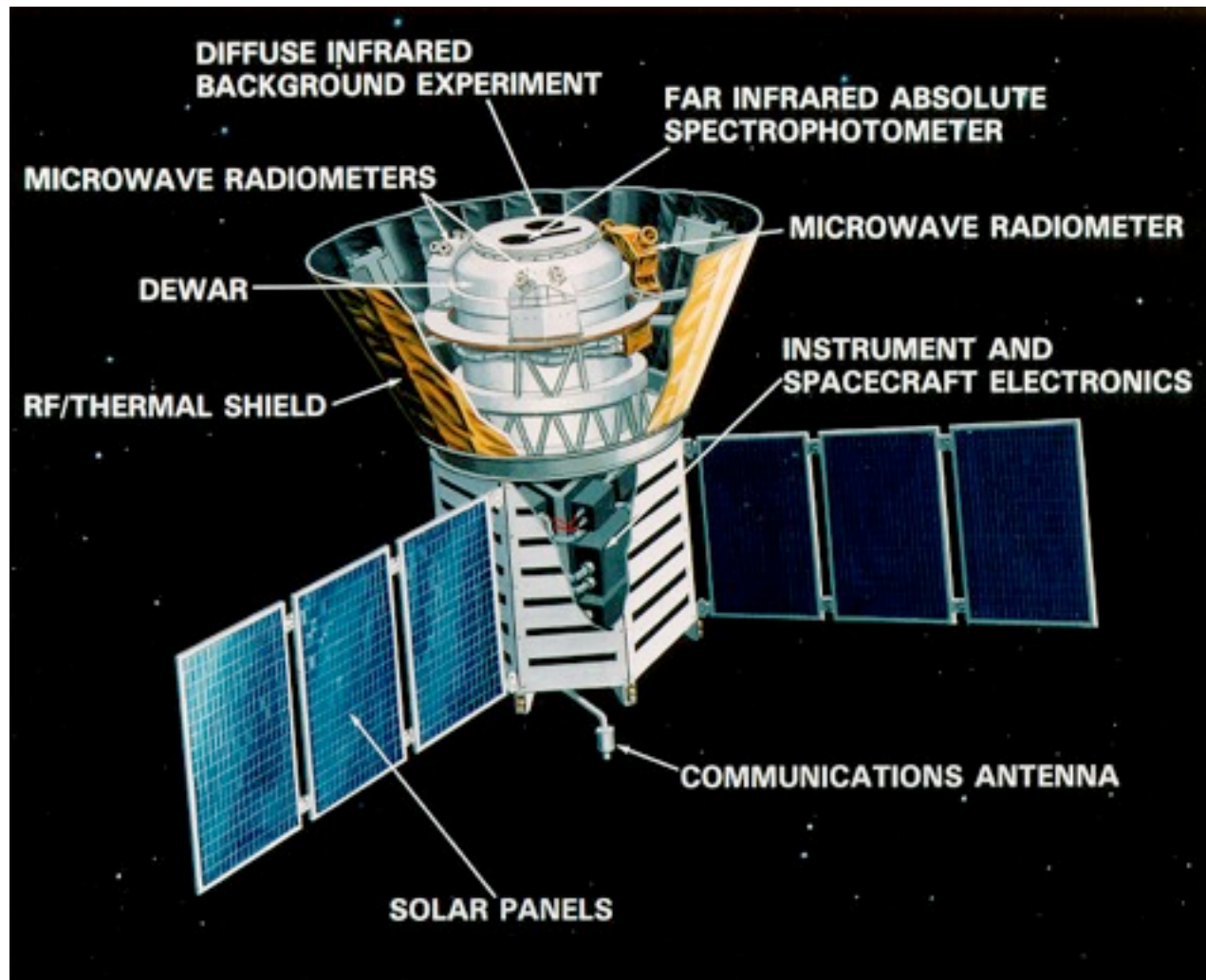
To je ujedno bio i neophodan uslov da fotoni mogu slobodno da putuju između atoma. Prvi fotoni emitovani odmah nakon poslednjeg rasejanja nose informaciju o osobinama na površini poslednjeg rasejanja odnosno na površini užarene lopte plazme neposredno pre nego što će se raspasti.

Ti fotoni predstavljaju Pozadinsko Mikrotalasno Zračenje (CMB). Oni su zatim proveli 13.6 milijardi godina lutajući svemirom hladeći se do 2.7 K pošto se Univerzum nastavio širiti. I to su fotoni koje su detektovali COBE i WMAP.



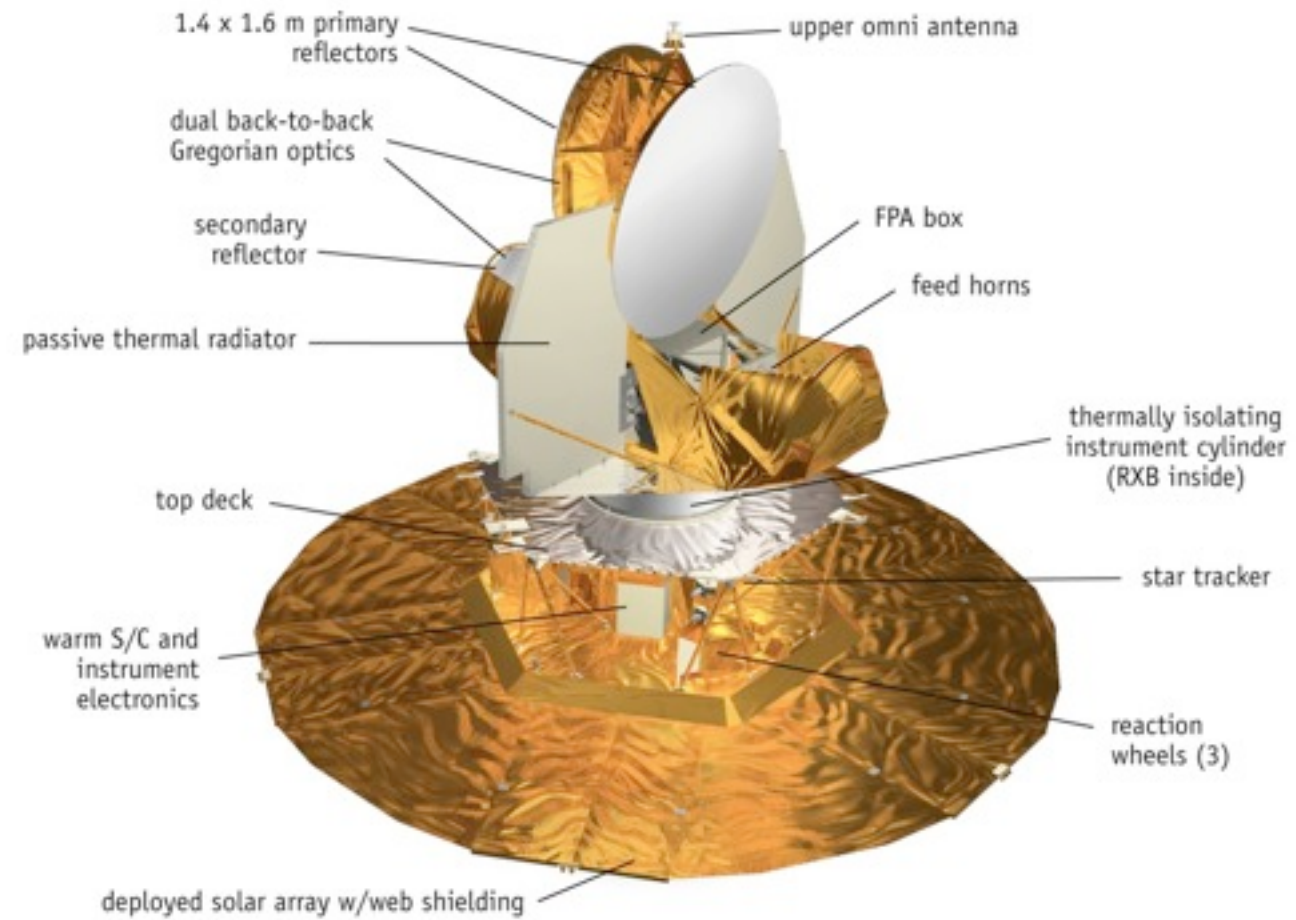


# Pozadinsko Mikrotalasno Zračenje



## COBE

Cosmic Background Explorer

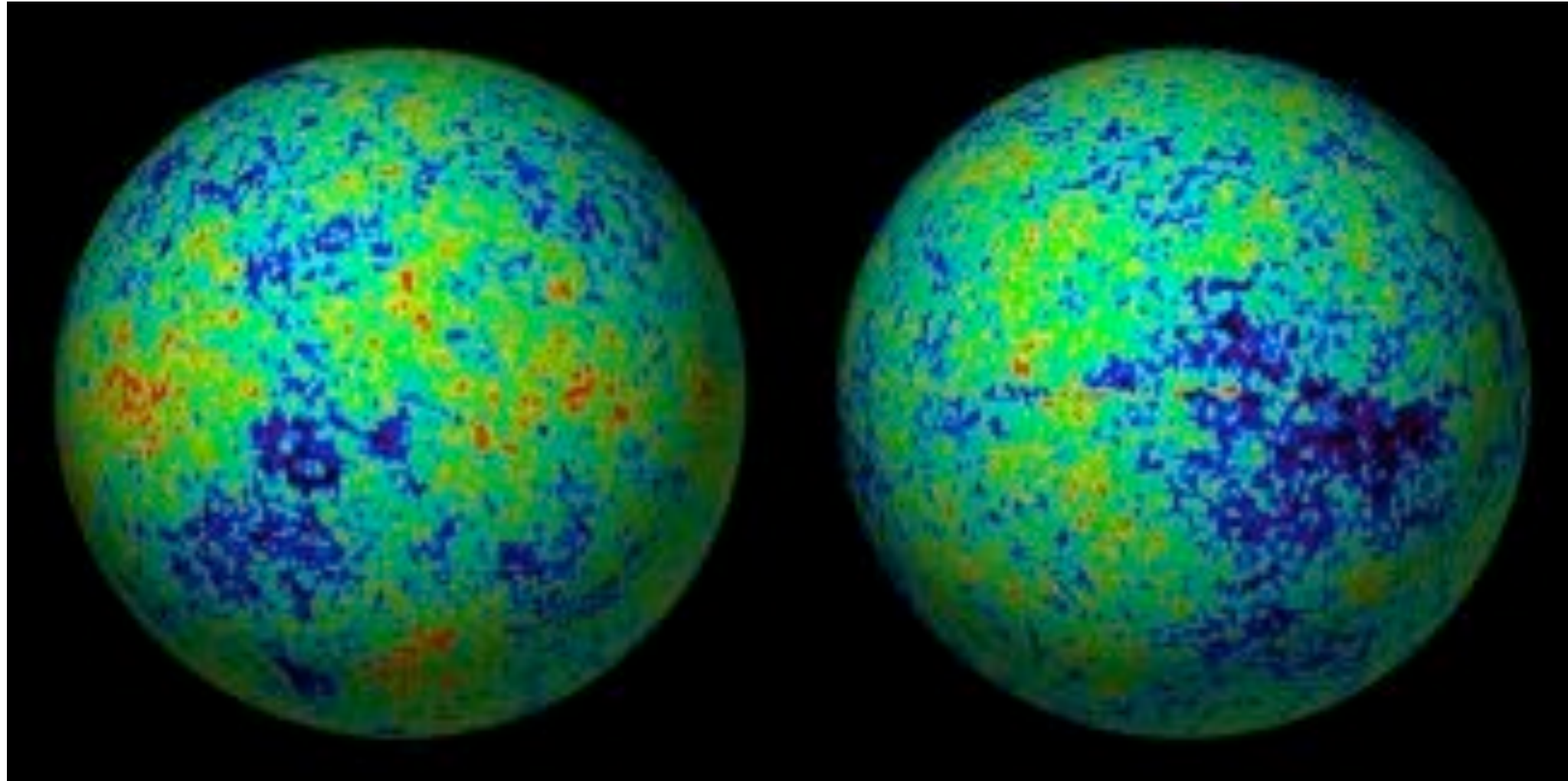


## WMAP

Wilkinson Microwave Anisotropy Probe

## Pozadinsko Mikrotalasno Zračenje

Ova dva teleskopa su pokupili prve fotone, iz svih pravaca, i ustanovili da je temperatura svuda izuzetno ujednačena što je značilo da je površina poslednjeg rasejanja bila izuzetno glatka, a to je opet značilo da Univerzum mora biti homogen na velikim skalama (materija u Univerzumu je organizovana na isti način gde god da uperite teleskop). To je nešto što znamo iz posmatranja.



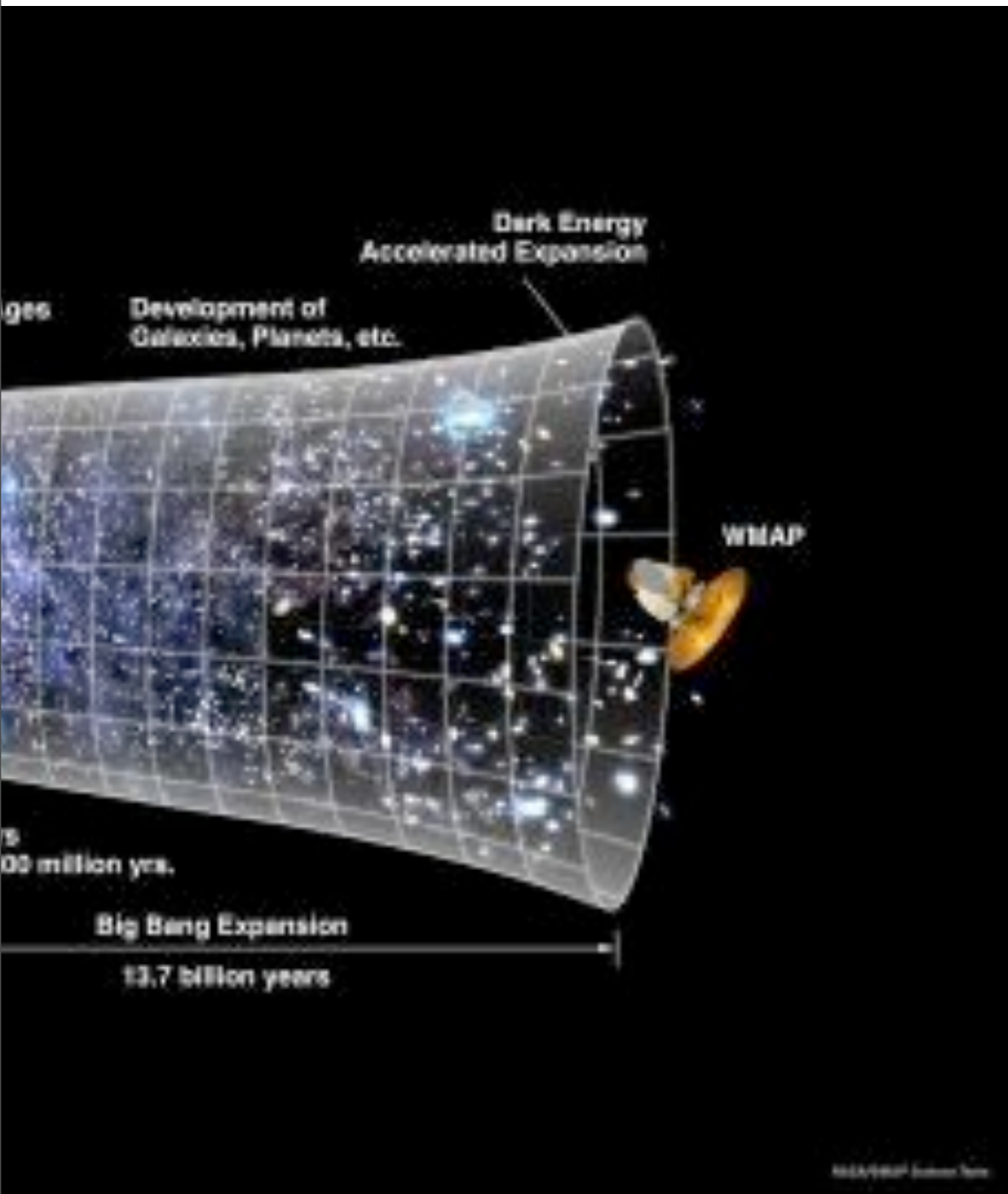
Takođe je otkriveno da ta površina nije savršeno glatka. Nadjene su fluktuacije u temperaturi prvih fotona na petoj decimali. Te fluktuacije u temperaturi se mogu direktno prevesti u gomilanje materije. I ma koliko sitno to gomilanje materije bilo, bilo je dovoljno da tokom daljeg širenja Univerzuma gravitacija privuče ostatak materije ka najgušćim od njih.

Tako su se prve strukture u Univerzumu formirale upravo tamo gde je bilo najgušće da bi vremenom narasle u galaksije i klasterne galaksije. To je u potpunosti odgovaralo činjenici da na malim skalama imamo nehomogene strukture (klasterne galaksije, galaksije...).

Takodje su na ovaj način otvorena vrata da se početni uslovi u ranom Univerzumu programiraju u superkompjutere koji su u stanju da iz njih evoluiraju čitav Univerzum.



# Vidljivi Univerzum



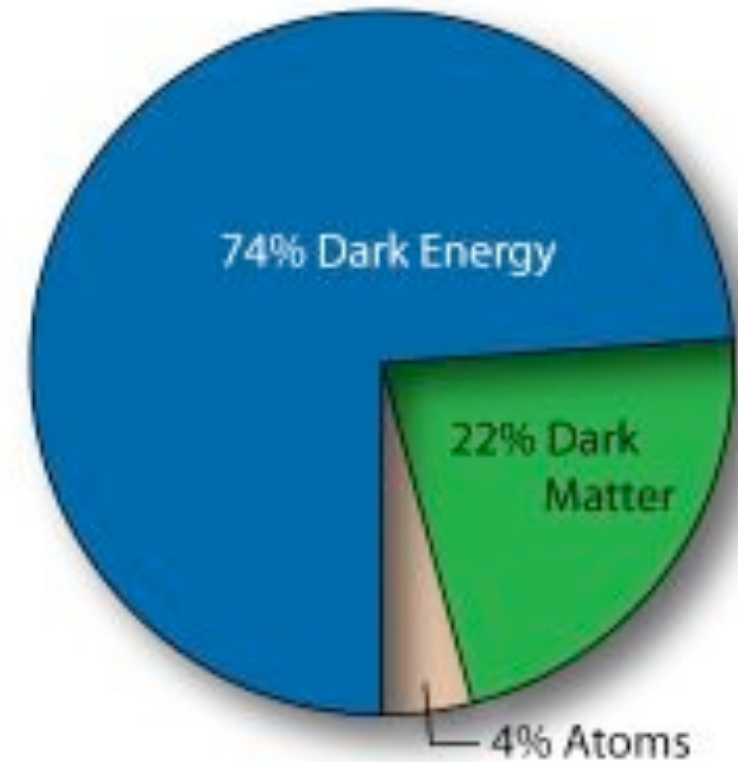
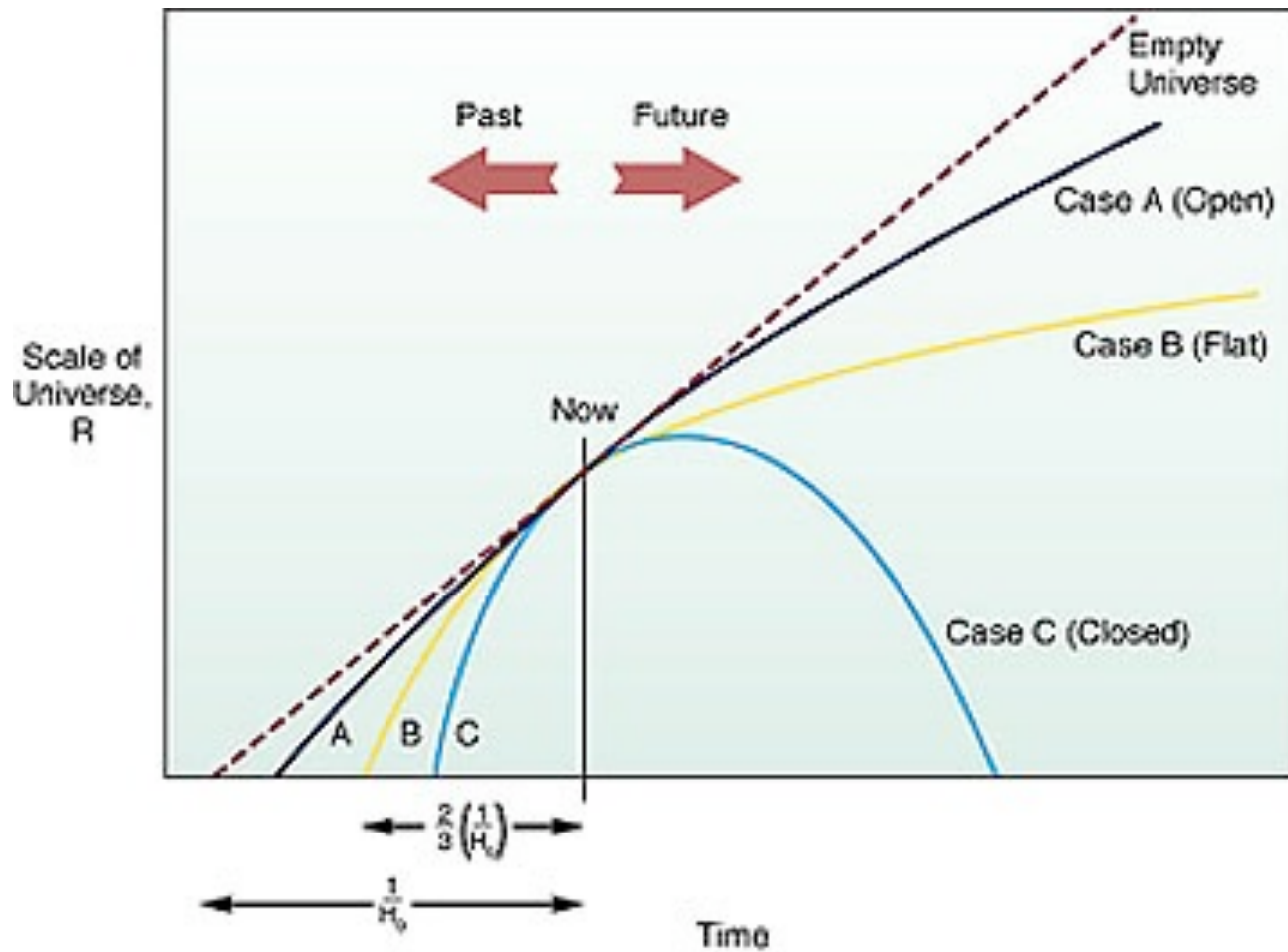
S druge strane, direktno posmatranje struktura u Univerzumu moćnim teleskopima doseže najdalje do redshifta 6. Sve zvezde, galaksije, kvazari i aktivna galaktička jezgra koje vidimo danas, vidimo na redshiftu manjem od 6.

Tako da postoji jedna “rupa” u našem znanju o Univerzumu između redshifta 30 i 6 jer za sada ne postoje direktna posmatranja koja mogu da prodru u taj interval. Sve što nam ostaje su teoretska i numerička astrofizika.



## Još malo kosmologije

No da se vratimo na fluktuacije u spektru pozadinskog zračenja. Ove fluktuacije je precizno izmerio WMAP i ustanovio da nešto obeshrabrujuće za sve astronome koji su mislili da razumeju Univerzum. To je saznanje da je Univerzum “ravan” .....



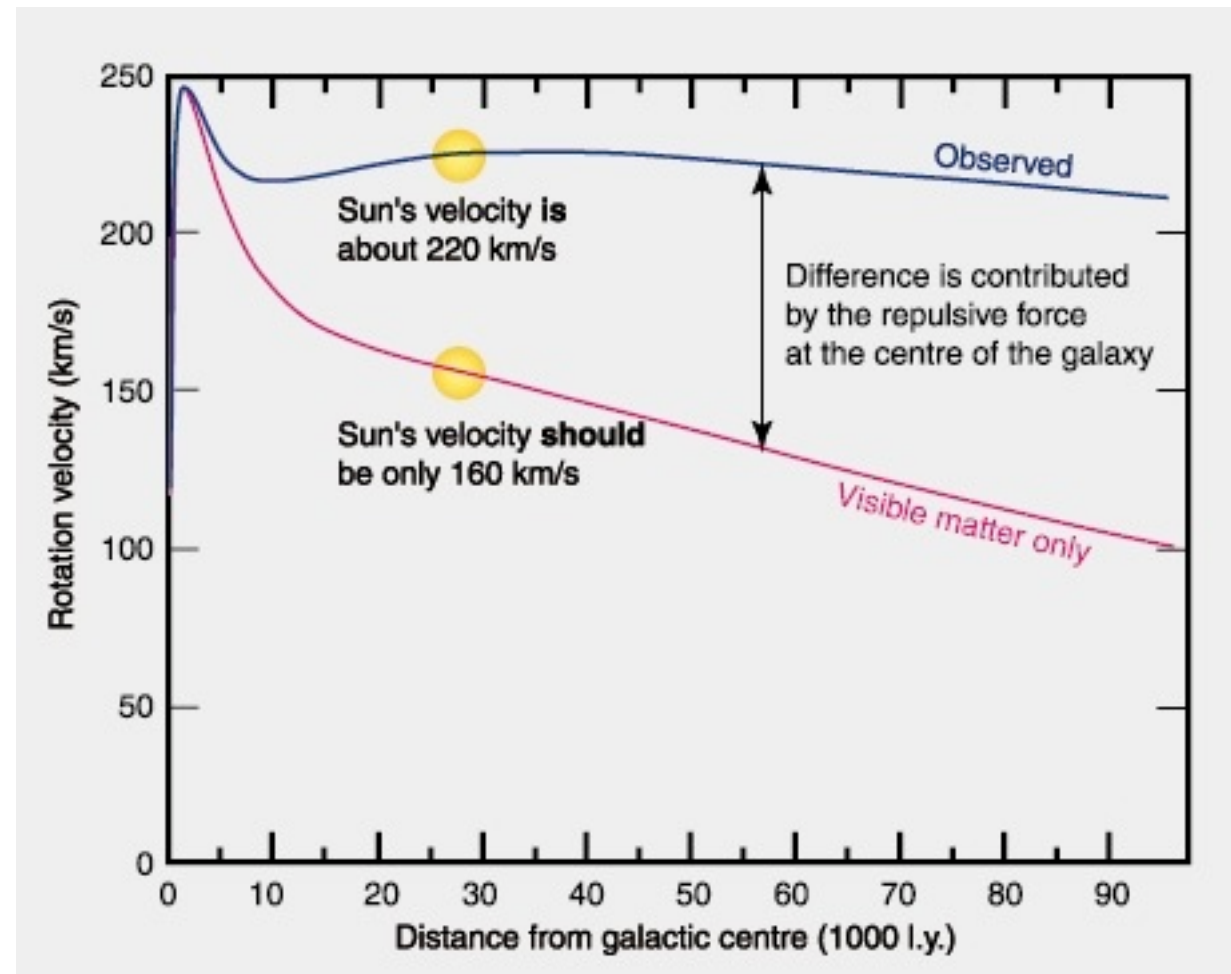
.....odnosno da je gustina Univerzuma u materiji i energiji takva da Univerzum mora biti sačinjen od 27.6 % materije i 72.4 % tamne energije. Što je značilo da imamo 72.4 % nečega što ne znamo šta je. Da stvari budu još gore od 27.6 % materije, 23 % je tamno. Dakle sve što znamo i vidimo je 4.6 %.

# Tamna Materija

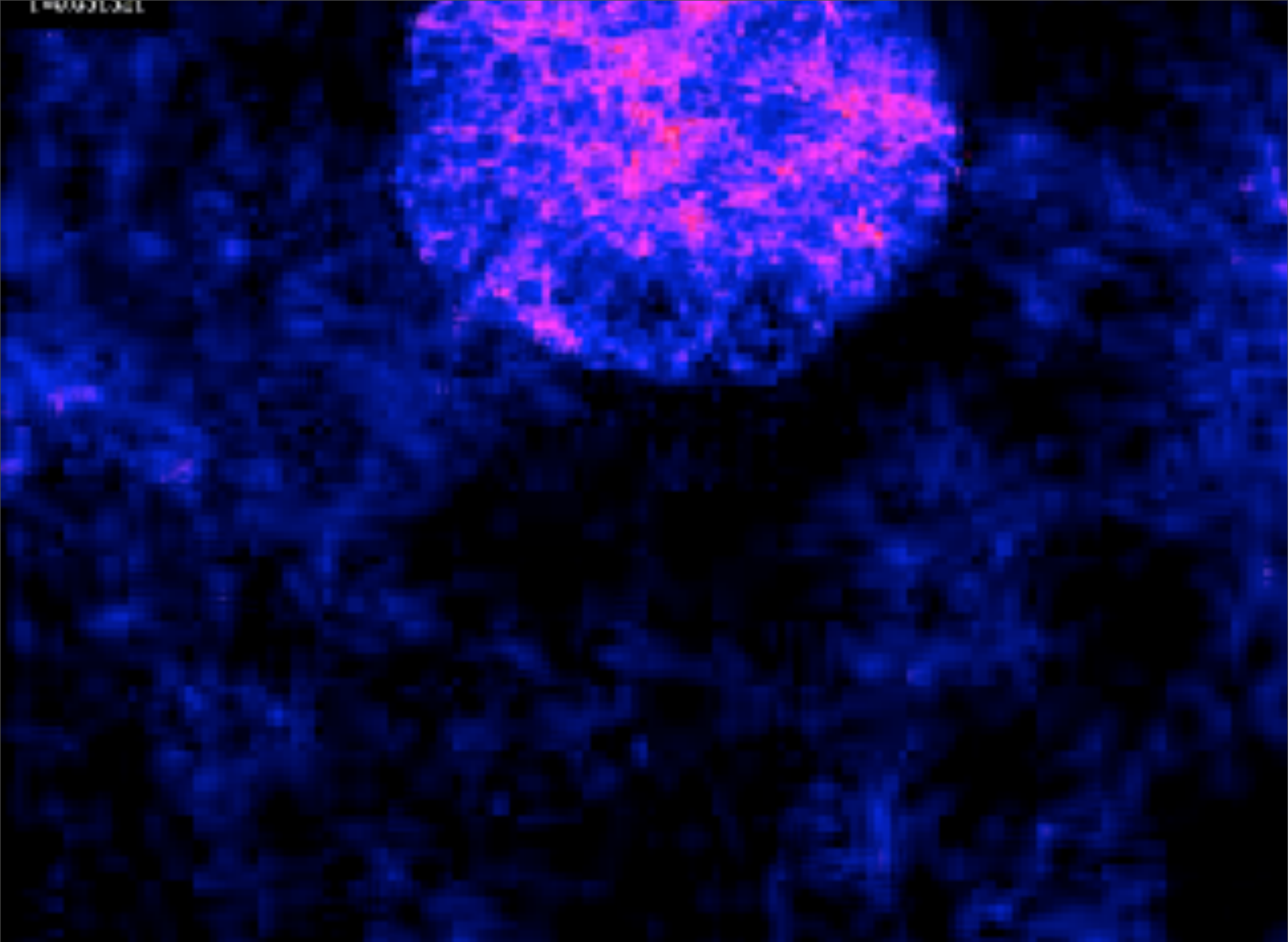
No to ostavljamo kosmolozima da se brinu. Nama je potpuno dovoljno da znamo koliko ima materije i tamne energije da bi evoluirali Univerzum. Za znanje o postojanju tamne materiju nama i nisu potrebni kosmološki rezultati.

Mi sumnjamo u njeno postojanje jos od tridesetih godina prošlog veka kada je nemački astronom Fric Cviki skovao ovaj termin nakon što je primetio da se galaksije u klasterima kreću mnogo brže nego što bi to očekivali na osnovu količine materije koju vidimo.

To je otkriće bilo ignorisano sve do šesdesetih godina kada je Vera Rubin izmerila rotacionu krivu naše galaksije.

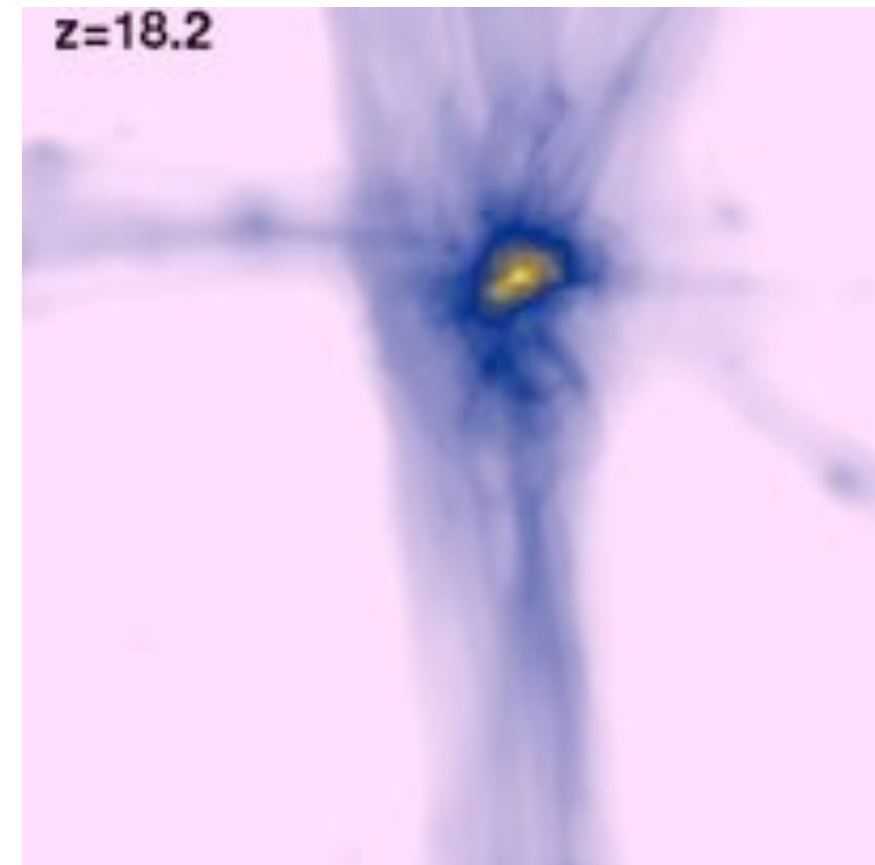
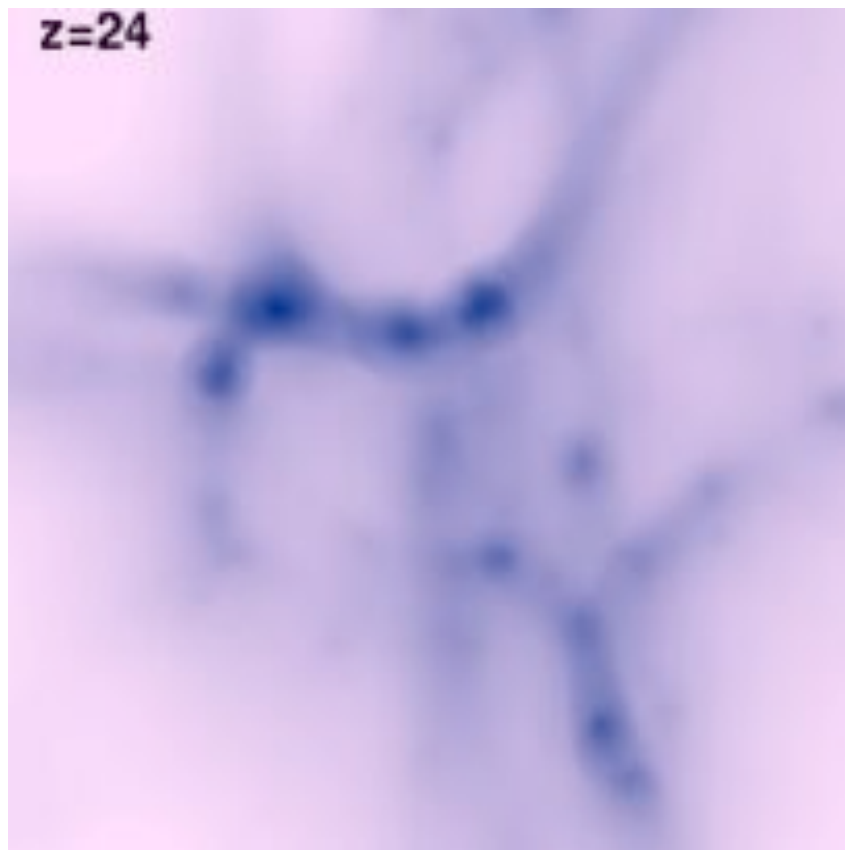


Ona je jednostavno izmerila brzinu zvezda na različitim udaljenostima od centra galaksije i ustanovila da su zvezde u galaktičkom halou daleko brže nego što je to bilo očekivano kad se izračuna gravitacioni potencijal Galaksije na osnovu celokupne materije koju vidimo. Rezultat je govorio o postojanju ogromne količine dodatne materije izvan unutrašnjih deset kiloparseka.



# Tamna Materija

Dakle tamna materija dominira nad vidljivom. U ranom Univerzumu, tek nekih desetak miliona godina nakon Velikog Praska, ona je prva koja odgovara na delovanje gravitacije tako što kolapsira u prve strukture, sferične haloe tamne materije.



Vidljiva materija koja je u tom trenutku u ranom Univerzumu sačinjena od gasa (uglavnom vodoničnog), prati gravitacioni potencijal u haolima tamne materije i takođe kolapsira. Celokupna priča o kolapsu gasa i formiranju zvezda se svodi na pojam “Dzinsov kriterijum”.

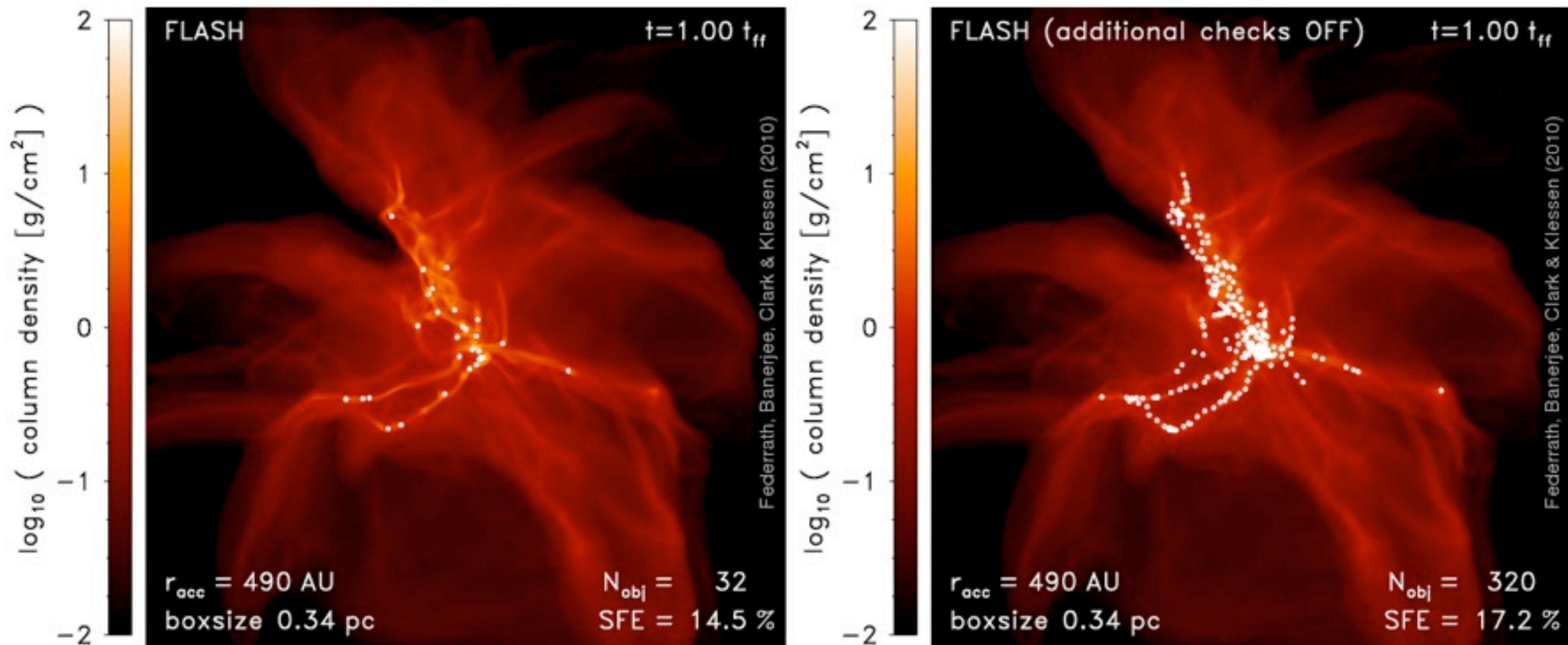


## Formiranje Prvih Zvezda

Dzinsov kriterijum kaže da se oblak gasa održava u ravnoteži tako što je unutrašnji pritisak gasa balansiran sa gravitacijom gasa.

$$\frac{dp}{dr} = -\frac{G\rho(r)M_{enc}(r)}{r^2},$$

Ukoliko dođe do gubljenja unutrašnje energije, pritisak popušta, gravitacija nadvladava, i gas počinje da kolapsira. Ukoliko je kolaps dovoljno brz, gas počinje da se fragmentira u sve manje oblake sve dok se njegova gustina toliko poveća da se upale nuklearne reakcije i zvezda je rođena.



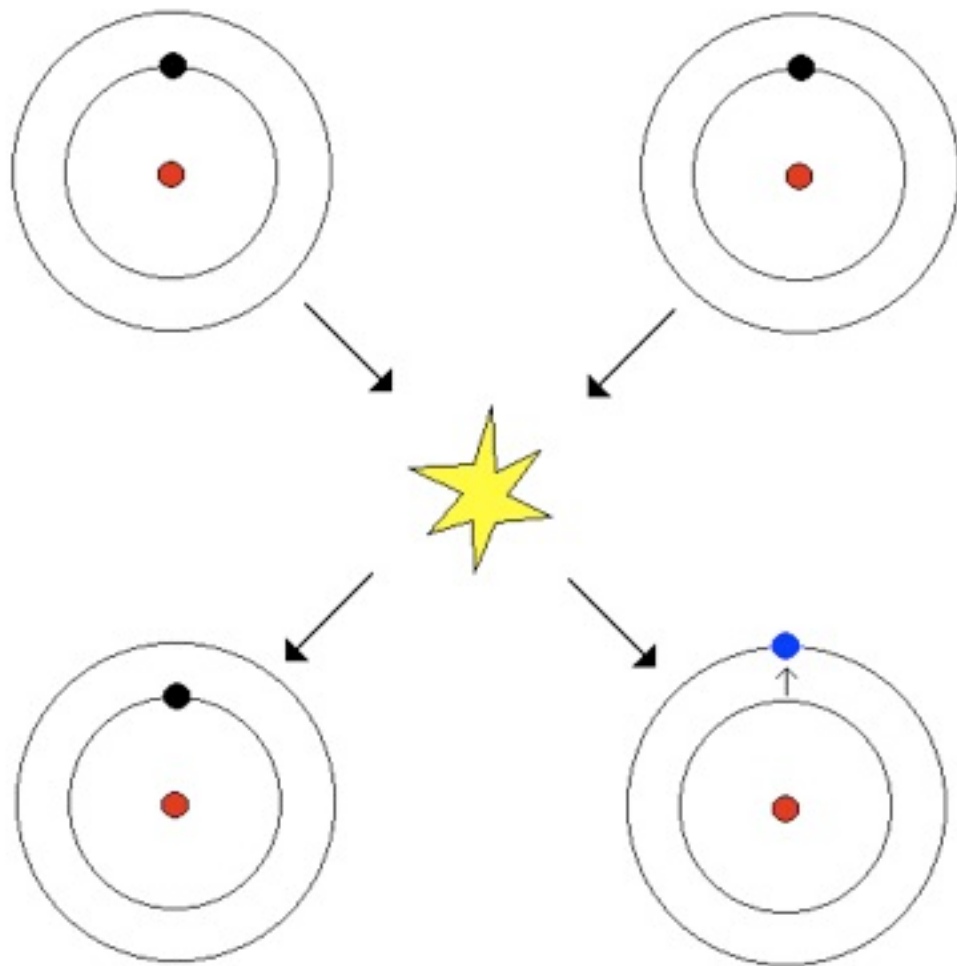
## Formiranje Prvih Zvezda

Dakle od presudnog značaja za formiranje zvezda je kolaps oblaka gasa. A od presudnog značaja za kolaps gasa je gubljenje unutrašnje energije koje je u astronomiji poznato kao “hlađenje gasa”.

Najefikasniji način hlađenja gasa je kroz atomske ekscitacione linije. Prvo mora da se dogodi jedan veoma neefikasan proces koji se zove “sudarna ekscitacija”.

### Collisional Excitation

Excitation of an atom can occur when two atoms collide



some of the energy of the collision is transferred to the electron, bumping it to a higher orbit.

Kada se atom sudari sa elektronom (ili kada se dva atoma sudare), elektron prenese energiju i podigne atom na viši energetski nivo. Pri povratku atoma u osnovo stanje, emituje se foton koji odnosi energiju iz atoma.

Ukoliko je gas dovoljno prozračan, foton će napustiti oblak gasa i tako smanjiti unutrašnju energiju. Da bi ovaj gubitak bio značajan potreban je veliki broj sudara atoma a za to je potrebna dovoljno velika gustina gasa i ogromna količina vremena.

## Formiranje Prvih Zvezda

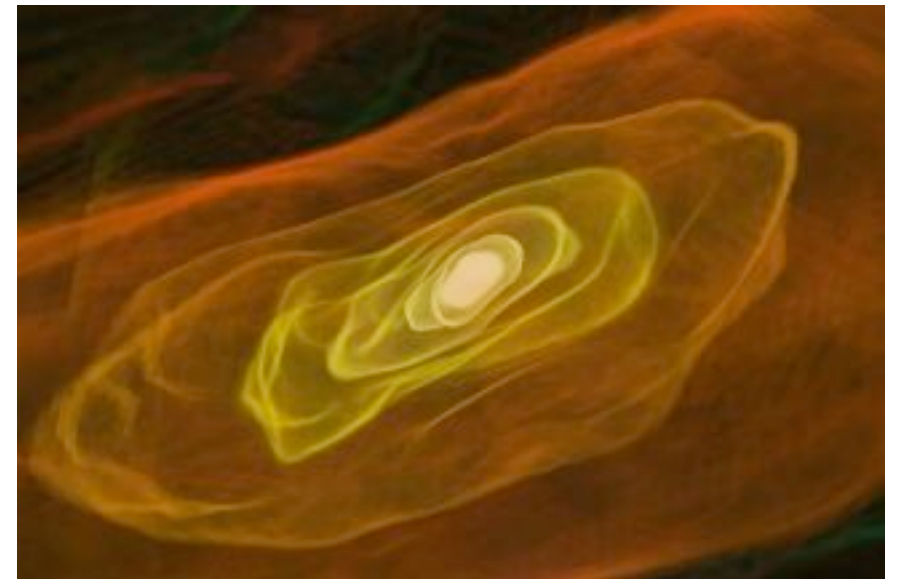
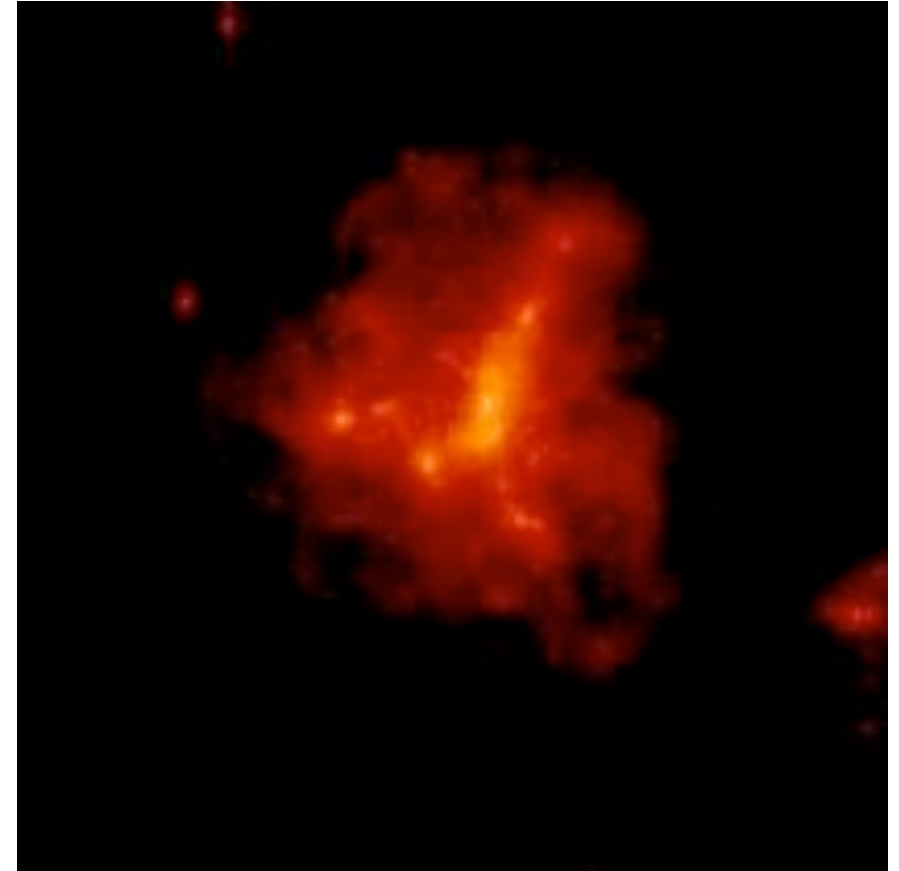
Na ovakav način se zvezde formiraju danas. Međutim u ranom univerzumu su uslovi bili potpuno drugačiji nego danas.

Nije bilo metala jer nije bilo zvezda koje bi ih napravile niti je bilo supernovih koje bi ih raspršile kroz intergalaktički prostor.

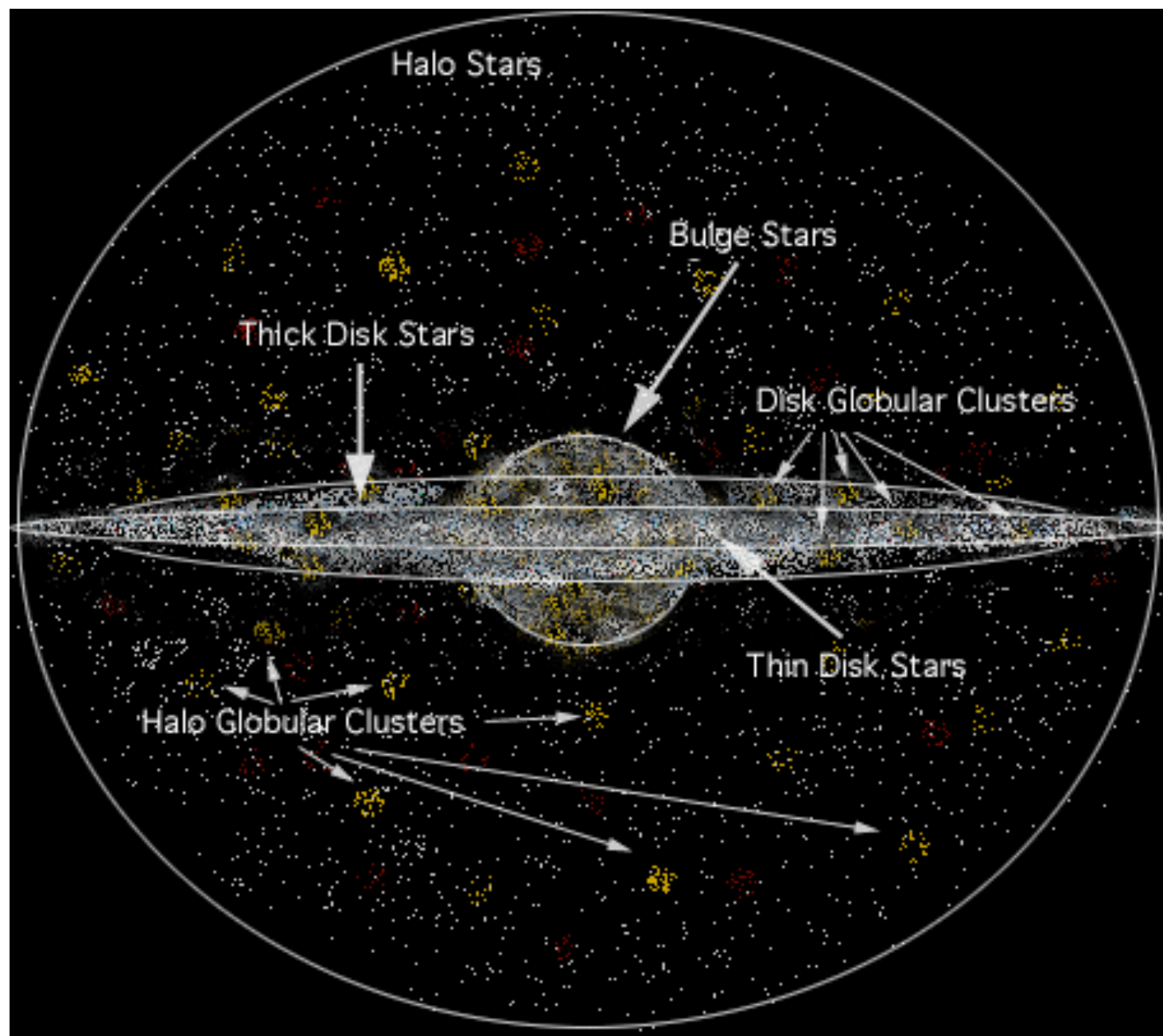
Gas se sastojao gotovo isključivo iz molekula vodonika. Jedini način za hlađenje gasa je bio kroz neefikasne molekularne prelaze.

Tako da je fragmentacija gasa bila veoma slaba pa se nuklearne reakcije pale veoma rano još u fragmentima koji imaju nekoliko stotina pa i hiljadu solarnih masa.

Na taj način se formiraju prve zvezde ili zvezde Populacije III koje su skoro potpuno sačinjene od vodonika.



Mala digresija je da prve zvezde proizvode prve metale odnosno prve teže elemente. Ti metali će kasnije obogatiti intergalaktički gas iz kojeg će se formirati zvezde Populacije II a kroz jos jedno recikliranje gasa formiraju se i najmlađe zvezde Populacije I.



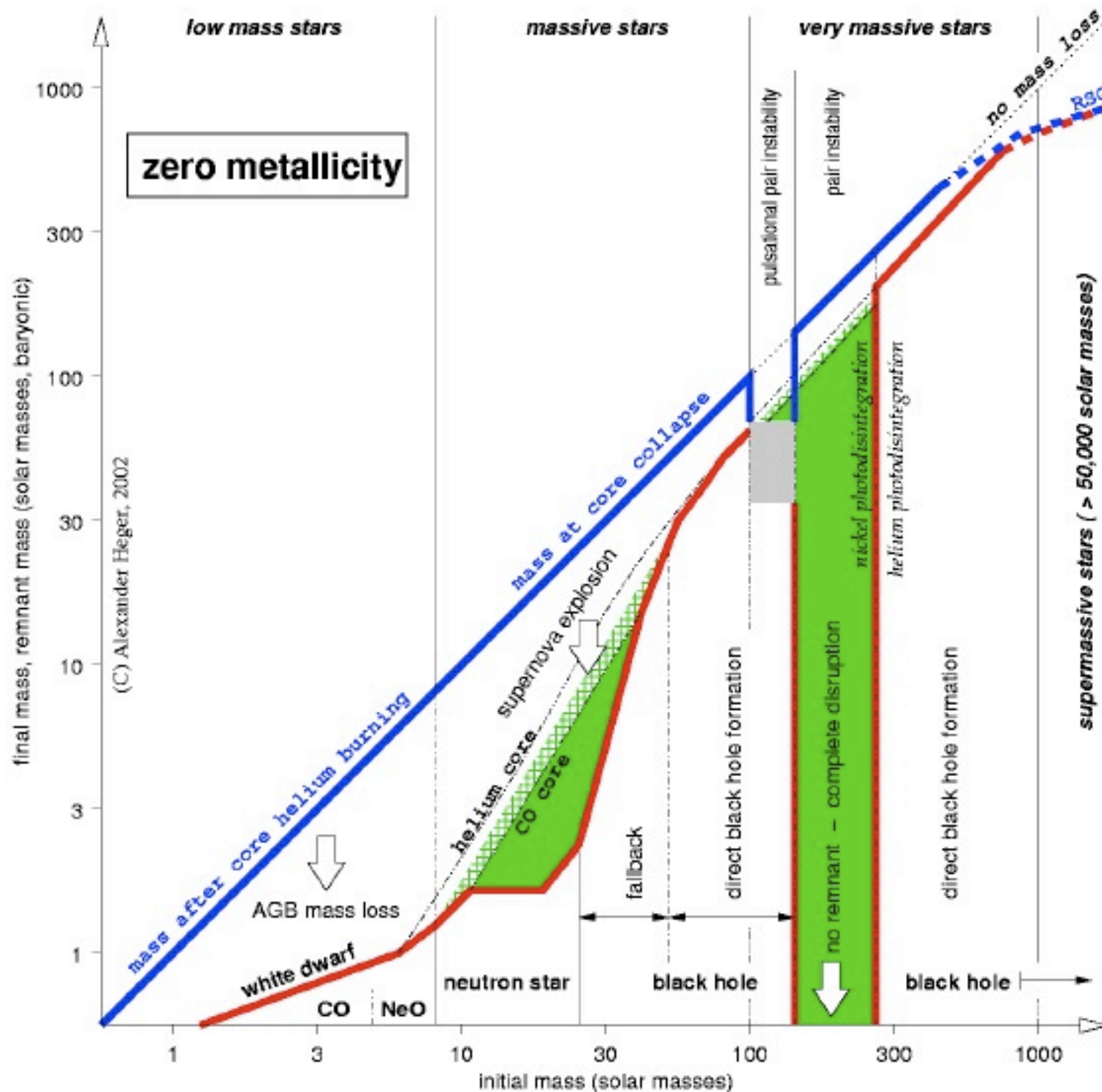
Pošto kroz svako recikliranje se sve više metala pravi, i gas je sve bogatiji metalima, hlađenje je efikasnije, samim tim je fragmentacija efikasnija i zvezde koje se iz takvog gasa formiraju su manje masivne.

Bitan podatak je da se iz svega gore rečenog jasno vidi da je količina metala u gasu ili zvezdama korelisana sa njihovom starošću. Ukoliko vidite manje metala znači da je objekat star.



## Prve Supernove

Još jedna činjenica koju znamo iz proučavanja zvezda II i I populacije je da masivnije zvezde kraće žive. To je zato što brže sagorevaju svoje gorivo u nuklearnim reakcijama. Tako da zvezde Populacije III žive najkraće, svega tri miliona godina. Za poređenje Sunce je staro pet milijardi godina i živeće jos toliko.



Ubrzo nakon formiranja, prve zvezde sagore nuklearno gorivo, kolapsiraju eksplodiraju u supernove i ukoliko je njihova početna masa u pravom intervalu, kao ostatak te eksplozije mogu da se formiraju prve crne rupe.

Zvezde sa početnim masama ispod ~ 30 sunčevih masa formiraju bele patuljke i neutronske zvezde.

Između 30 i 150 se formiraju crne rupe.

Od 150 do 270 zvezda eksplodira potpuno a preko 270 solarnih masa se formira masivna crna rupa.

I te crne rupe su nam posebno zanimljive zato što je njihova očekivana masa u stotinama ako ne i u hiljadama solarnih.

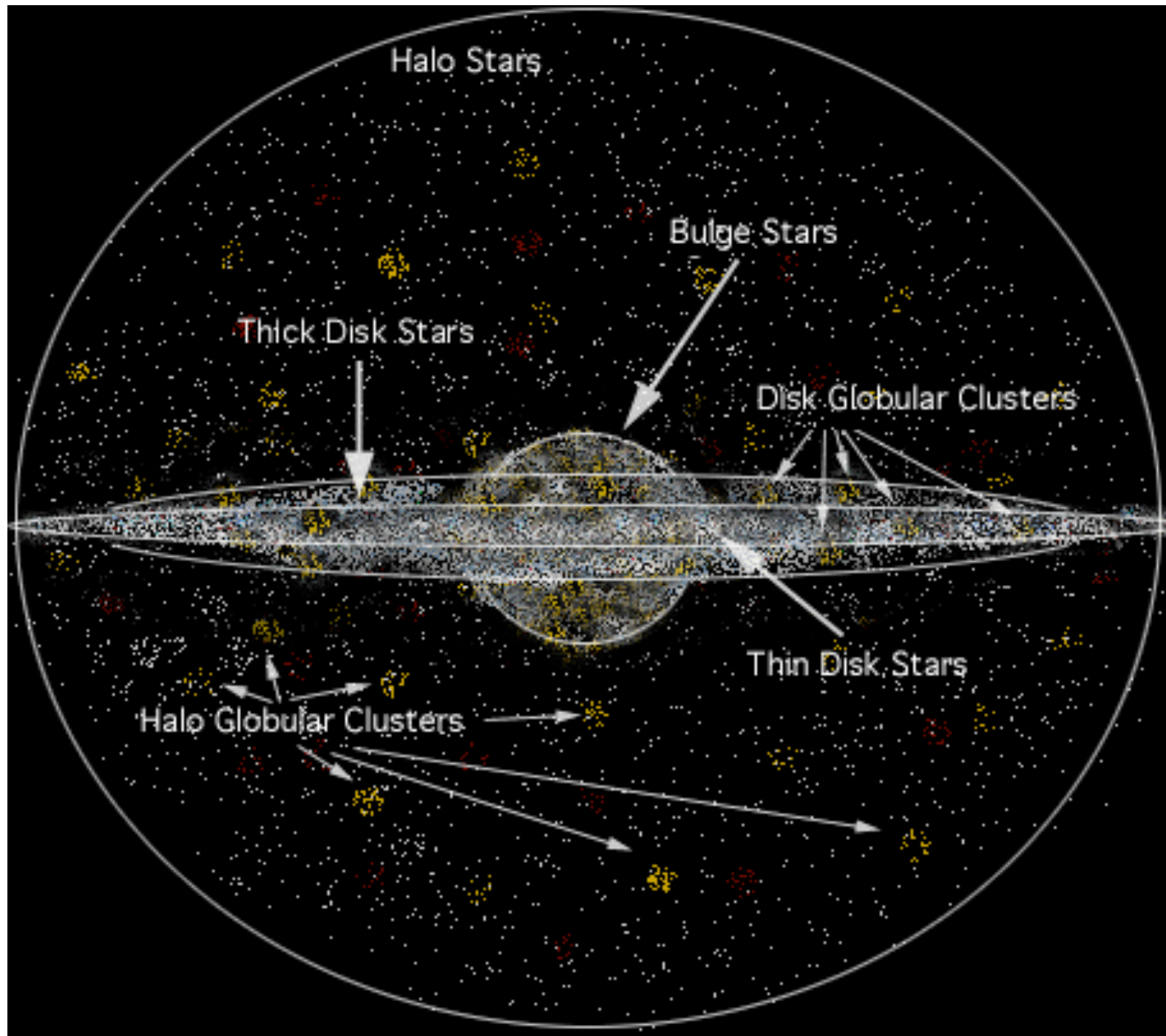
Ono što predstavlja velik problem je što ne znamo koliko prvih zvezda se formira iz jednog oblaka gasa. Tri su razloga za to:

1. Ne znamo tačno kako se i koliko se oblaci gasa fragmentiraju.

2. Tokom svog kratkog života, prve zvezde zrače ogromne količine UV zračenja koje greje gas i ne dozvoljava formiranje novih zvezda Populacije III.

3. Eksplozija supernove raspršuje ogromne količine metala u okolni gas. Taj gas obogaćen metalima počinje da stvara zvezde Populacije II.

U svakom slučaju, nakon što je prve zvezde nastale u jednom oblaku gasa eksplodiraju i obogate gas novim metalima, ulazi se u eru Populacije II objekata.



Taj novi po sastavu oblak gasa ponovo kolapsira, ali ovaj put sa metalima, efikasnije se hladi i fragmentira i stvara zvezde ispod 100 solarnih masa, gde dominiraju zvezde tipa Sunca ili slične.

Pošto svaki halo tamne materije i svaki oblak gasa se formira sa početnim spinom, energija se iz sistema izvlači duž ose rotacije pa se kolaps odigrava u ravni i iz početne sferne raspodele formira se disk.

Vremenom i spiralne grane tako da na kraju ovaj sistem nije ništa drugo do spiralna galaksija.

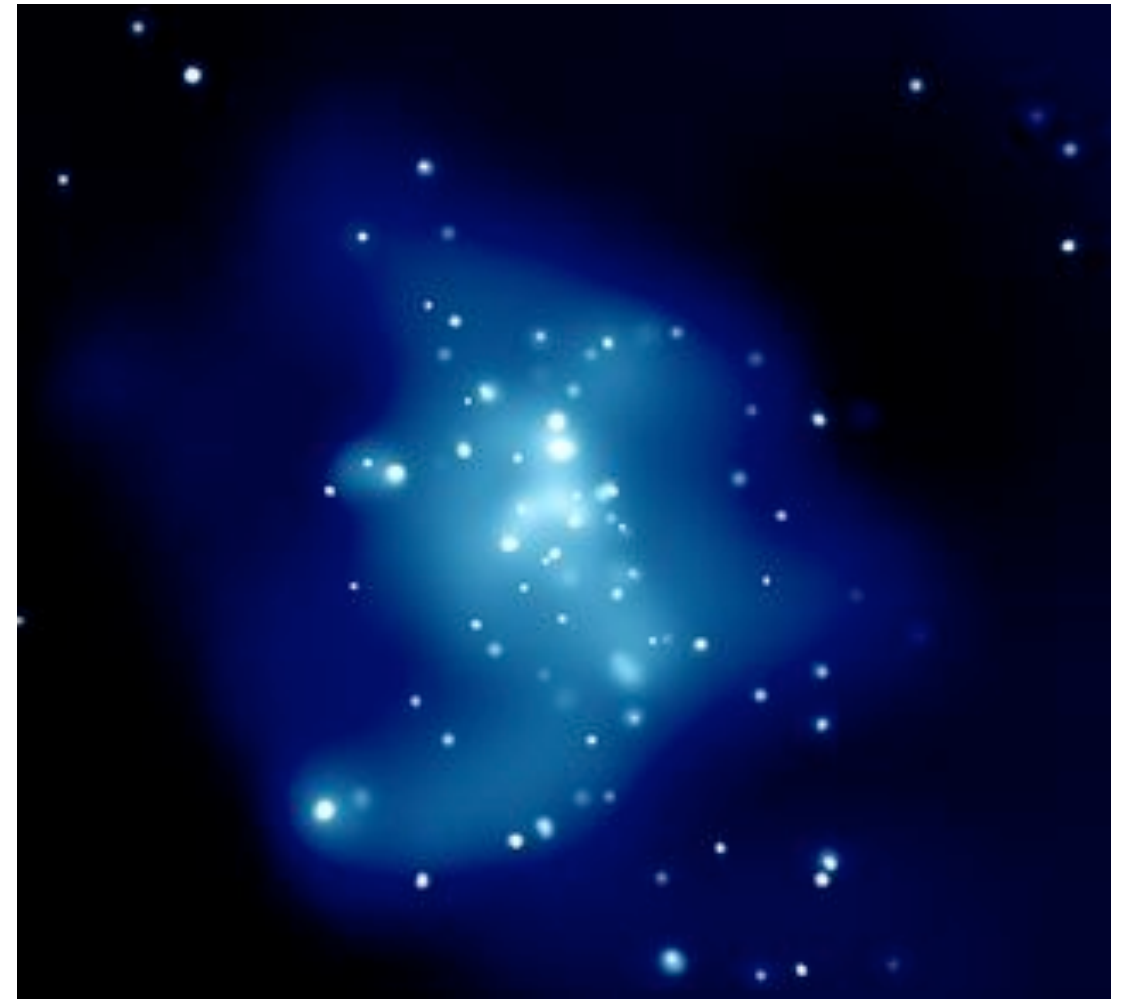
## Formiranje Prvih Crnih Rupa

Ono što smo zaboravili da pomenemo je da se sve to vreme u centru ovog sistema nalazi bar jedna masivna crna rupa.

I ako smo imali samo jednu prvu zvezdu iz oblaka gasa, moguće je da ćemo imati iz te zvezde i jednu masivnu crnu rupu.

Kroz dinamičke procese ta crna rupa će doći do centra novonastale galaksije a usput će konzumirati ogromne količine gasa.

Ukoliko smo imali više zvezda, i neka je svaka od njih proizvela masivnu crnu rupu, onda ćemo imati i više crnih rupa koje nalaze put do centra galaksije.



Tako da je za očekivati da se u jednom trenutku formira klaster masivnih crnih rupa u centru nove galaksije.

Ovo je u početku bila dobra vest jer se očekivalo da to bude vrlo jednostavan mehanizam formiranja supermasivnih crnih rupa veoma rano u prvim galaksijama.



## Formiranje Prvih Crnih Rupa

Po tom mehanizmu sve crne rupe u klasteru akretuju gas i međusobno se sudaraju i spajaju u sve veće crne rupe sve dok se ne formira jedna supermasivna.



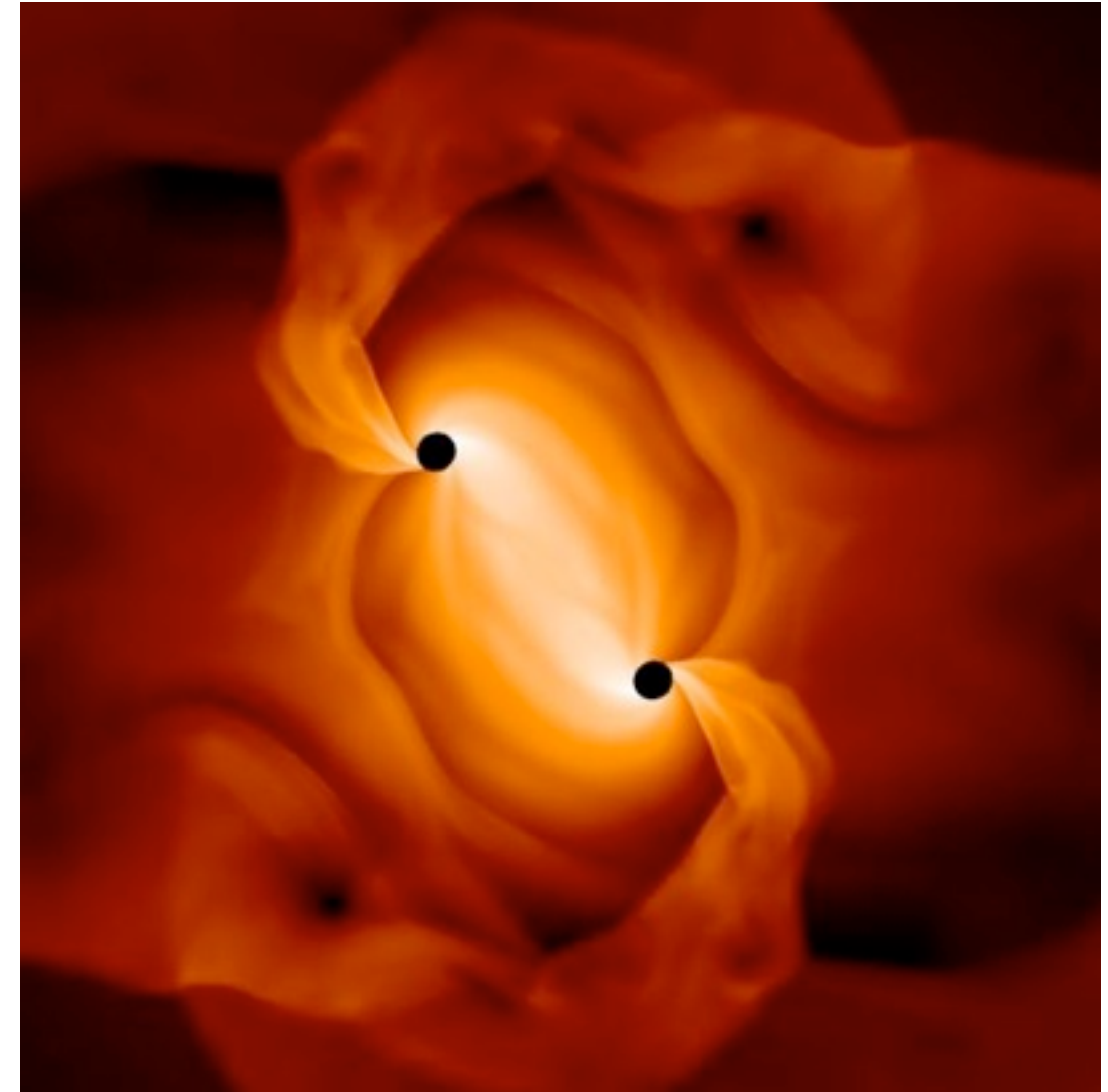
## Formiranje Prvih Crnih Rupa

A onda su se pojavili radovi iz oblasti numeričke relativnosti. Numerička relativnost se bavi kodiranjem ajnštajnovih jednačina koje opisuju prostor i vreme oko crne rupe.

Cilj je da se efekti opšte teorije relativnosti izprogramiraju u realnim astrofizičkim situacijama kakvi su na primer orbita zvezde oko crne rupe, ili dve crne rupe u binarnom sistemu, ili crna rupa i neutronska zvezda u binarnom sistemu.

Ovo je ubedljivo najkompleksnije programiranje sa kojim se možete susresti u nauci tako da se napredak u ovom polju odigravao veoma sporo.

Najveći problem za recimo kodiranje dve crne rupe u orbiti je bio to što se pokazalo neizvodljivo da se ta orbita učini stabilnom.



I tako sve do pre 5 godina kada je došlo do revolucionarnog programerskog rešenja!

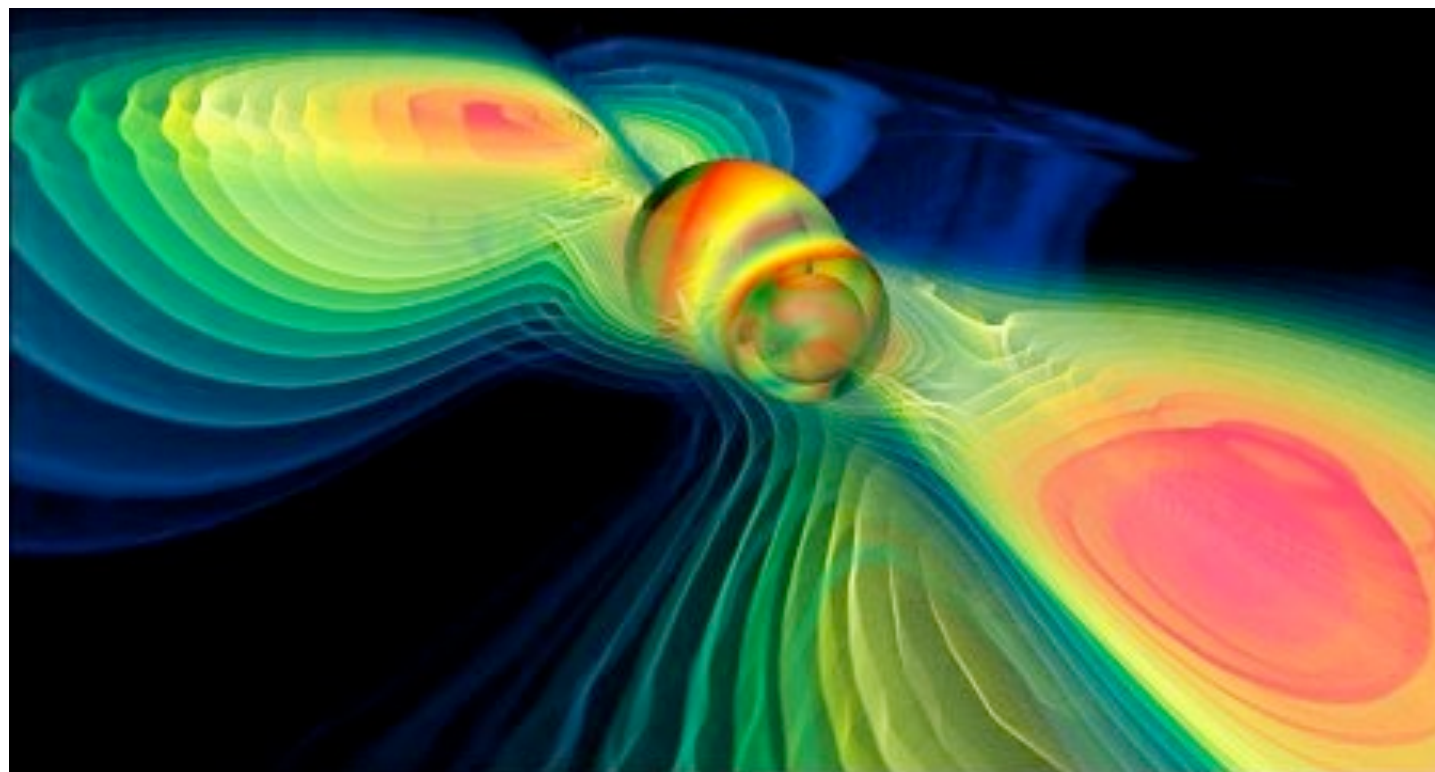


## Formiranje Prvih Crnih Rupa

Ono što nas interesuje su posledice. Nakon što su binarne crne rupe uspešno kodirane uz sve efekte opšte teorije relativnosti, prvo je uočeno nešto što je i bilo predviđeno iz analitičkih radova a to je intenzivno zračenje gravitacionih talasa koje se pojavi nakon što se binarni sistem formira.

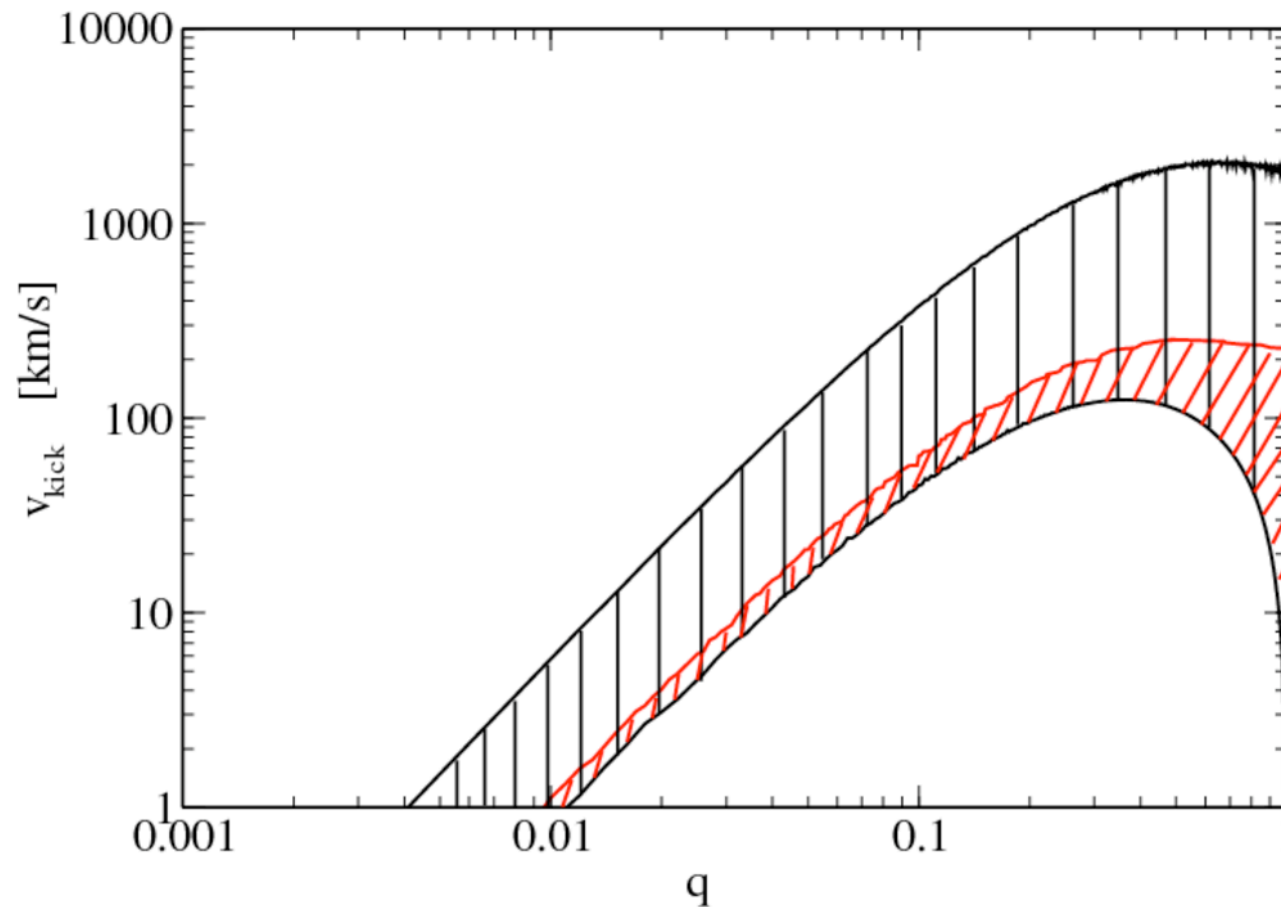
Gravitacioni talasi odvlače ogromnu količinu energije iz orbite tako da se rastojanje između crnih rupa smanjuje sve dok se ne sudare i formiraju novu crnu rupu.

Simulacije su sada pokazale tačno kako se ovaj proces odigrava, koji je gubitak mase pri ovom procesu i kolika je masa novoformirane crne rupe.



Jedan veoma zanimljiv dodatni efekta je otkriven koji je predstavljao lošu vest za astronome a to je da pri sudaru dve crne rupe, novoformirana crna rupa mozde da dobije gravitacioni uzmak od čak nekoliko hiljada km/s. Kolika je tačno vrednost tog uzmaka zavisi od odnosa masa crnih rupa, ekscentričnosti orbite, amplitude i orijentacije njihovog spina.

## Formiranje Prvih Crnih Rupa



Na slici je prikazana amplituda uzmarka u zavisnosti od  $q$  (odnos masa crnih rupa). U ovom slučaju smo izbacili ekscentritet orbite odnosno prepostavili smo kružnu orbitu.

Prvo što vidimo sa grafika je da je najveći uzmak kada su mase crnih rupa približno istih vrednosti. Crne krive pokazuju interval uzmarka za različite vrednosti spina crnih rupa. Tako da je najveći uzmak za jednu vrlo neobičnu orbitalnu konfiguraciju kada se crne rupe kotrljaju po orbiti. Crvena kriva pokazuje jedan specijalan slučaj kada su ose rotacije poravnate jedna sa drugom.

Ispostavlja se da je verovatno najrealniji upravo ovaj slučaj jer se očekuje da kako crne rupe prolaze kroz gas krećući se ka centru galaksije, njihov spin se polako poravnava sa osom rotacije cele galaksije a sam tim i medjusobno. Ovaj efekat dramatično spušta vrednost uzmarka na najviše 200 km/s.

Zašto je ovo važno? Zato što prve galaksije pri svom formiranju imaju izuzetno slabe gravitacione potencijale. Za takve galaksije brzina dovoljna da objekat pobegne iz centra je oko 30 km/s. Znači da čak i u slučaju pretstavljenom crvenom krivom, novoformirana crna rupa će biti izbačena iz galaksije.



## Formiranje Prvih Crnih Rupa

Ovo je veliki problem za formiranje supermasivnih crnih rupa.

Od presudnog značaja za njihovo formiranje je da se u centrima prvih galaksija formira "seme" koje će akretovati gas i narasti u supermasivnu crnu rupu.

Zbog toga je razumevanje fragmentacije oblaka gasa od presudnog značaja, odnosno razumevanje tačno koliko se prvih crnih rupa formira u tipičnoj ranoj galaksiji i koje su njihove mase i spinovi.

Ovaj problem je poznat kao "Black hole seed IMF" odnosno početna funkcija mase za prve crne rupe.

Kao rešenje ovog problema se nameće njegovo potpuno zaobilaženje kroz alternativni pristup u kojem se prve zvezde uopšte i neformiraju, već oblak gasa kolapsira direktno u supermasivnu crnu rupu.

Sve dok se ne lansira JWST nećemo znati koja teorija je tačna.

