

Glava 14

Elementi kosmologije

14.1 Zvezde i galaksije

Rane civilizacije su verovalе da je Zemlja centar Univerzuma. Tek u 16. veku je primećeno da je Zemlja samo jedna mala planeta koja orbitira oko Sunca. U 20. veku smo pak došli do zaključka da je sunce samo jedna zvezda prosečne veličine, od milijardi zvezda u galaksiji pod nazivom Mlečni put¹ i da u Univerzumu postoje milijarde drugih galaksija. U proteklih nekoliko decenija, astronomi su na osnovu rezultata merenja zaključili da se naš Univerzum širi i da je star između 10 i 20 milijardi godina.

Galaksija je velika grupa zvezda, prašine, gasova i drugih objekata koje čine jednu celinu koju na okupu drži gravitaciona sila. Američki astronom Edvin Hابل² je dvadesetih godina prošlog veka otkrio da izvan Mlečnog puta postoje i druge galaksije. I pre njega su rezultati nekih posmatranja ukazivali da postoje slabi izvori svetlosti i izvan naše galaksije ali je on koristeći novi 2,5 metarski teleskop pod nazivom refraktor, pokazao da oni zaista potiču od drugih galaksija. Hابل je na primer, kada je usmerio svoj teleskop na objekat koji je do tada nazivan zvezdana maglina u sazveždju Andromeda, jasno video da se on sastoji od niza udaljenih zvezda, odnosno da je u pitanju nova galaksija koja je dobila naziv Andromeda. Od Habla do danas, astronomi su otkrili ogroman broj drugih galaksija. Danas se nove galaksije otkrivaju svake godine pomoć teleskopa koji nosi Hابلovo ime (Hubble Space Telescop-HST).

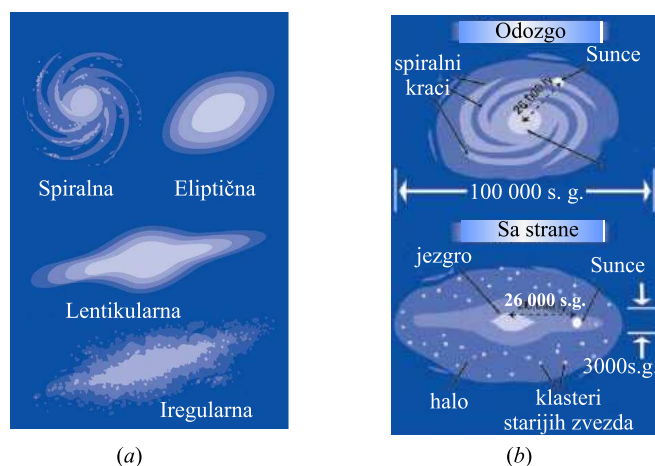
Astronomi klasifikuju galaksije po njihovom obliku. *Spiralne* galaksije, kao što je i Mlečni put, sastoje se od centralnog gustog dela okruženo spiralnim kracima. *Eliptične* galaksije izlgedaju kao centralni deo spiralne galaksije ali bez kraka. *Lentikularne* galaksije su oblika sočiva, sa ravnomerno raspoređenim zvezdama te prema tome nemaju centralnu, gušću oblast. *Iregularne* galaksije ne poseduju ni jednu od navednih pravilnosti.³

Sunce, sa oko 200 milijardi drugih zvezda pripada Mlečnom putu. Mlečni put je tipična spiralna galaksija. Gledano odozgo ona liči na gigantski točak sa spiralnim paocima-kracima koji se od centra galaksije pružaju ka perifernim regionima. Prečnik naše galaksije iznosi

¹Reč galaksija potiče od grčke reči *glaktik* što znači mlečni, odakle je izveden i naziv naše galaksije.

²Edwin Hubble (1889-1953).

³Mlečni put je deo klastera od oko 40 galaksija poznatog pod nazivom Lokalna grupa. Osim naše galaksije, u grupi se nalaze i druge spiralne galaksije, uključujući i već pomenutu Andromedu. Iregularne galaksije u Lokalnoj grupi su Veliki i Mali Magelanovi Oblaci. Postoje i druge grupe galaksija.



Slika 14.1: (a) Oblici galaksija. (b) Mlečni put.

oko 100 000 svetlostnih godina. Ukoliko bi mogli da je pogledamo sa strane videli bi da je spljoštena i da je njena debljina oko 3 000 svetlosnih godina. U centru diska se nalazi oblast gusto ispunjena zvezdama koja se naziva jezgro galaksije. Spoljašnje oblasti galaksije se nazivaju *halo* i u njemu se nalaze klasteri starijih zvezda.

Disk Mlečnog puta je spljošteni rotirajući sistem koji sadrži mlade zvezde, gasove i prašinu. Sunce se nalazi na oko 26 000 svetlosnih godina od centra diska i okrene se jednom oko njega za oko 250 miliona godina. Kada pogledamo noćno nebo mi u stvari gledamo kroz disk naše galaksije. Ukoliko je nebo izuzetno vedro na njemu možemo da uočimo svetlu traku koja ga prekriva. Ona potiče od svetlosti milijardi zvezda u disku naše galaksije.

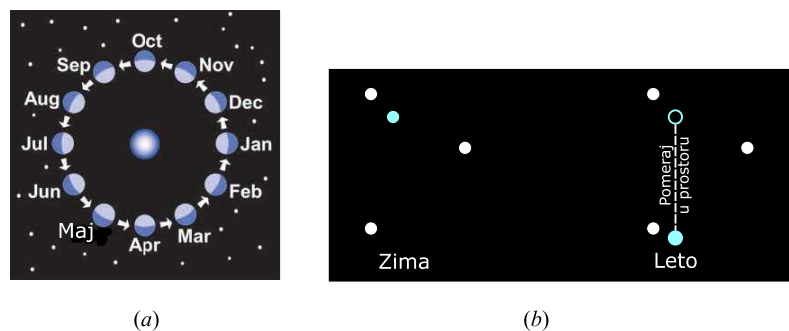
Pošto se mi nalazimo u spoljnjem delu naše galaksije, *medjuzvezdana* prašina blokira veći deo vidljive svetlosti koja dolazi od objekata koje se nalaze u unutrašnjem delu galaktičkog diska. Iz tog razloga astronomi koriste infracrvene i radio teleskope za posmatranje i analizu takvih objekata. Kao rezultat takvih posmatranja došlo se do zaključka da se u centru naše galaksije nalazi gomila starih zvezda i vruće prašine. Današnja pak istraživanja ukazuju na to da bi u centru galaksije mogla da se nalazi crna rupa mase veće od milion masa Sunca. Takva crna rupa bi, usled ogromne mase, mogla da dovoljno jakom gravitacionom silom zadrži na odgovarajućim orbitama sve zvezde, gas i prašinu koje se nalaze u našoj galaksiji.

Dokazi za postojanje velike crne rupe baziraju se na merenju orbitalne brzine zvezda i gasa u kruženju oko centra galaksije. Jedno od merenja se zasnivalo na praćenju orbitalnih brzina 20 zvezda u toku tri godine. Izmereno je da brzina orbitiranja dostiže 1 000 km/s (3 600 000 km/h), što može da se dostigne jedino ako se u centru galaksije nalazi telo čija je masa preko 2 miliona mase Sunca.⁴

⁴Brzina zvezde mase m koja orbitira na rastojanju R od centra galaksije u kome se nalazi telo mase M se može dobiti na osnovu jednakosti centrifugalne i gravitacione sile kojom na nju deluje telo mase M , tj. $mv^2/R = \gamma mM/R^2$, odakle se dobija da je $v = \sqrt{\gamma M/R}$. Ukoliko smo izmerili brzinu, za poznato rastojanje od centra galaksije, iz ove formule je lako odrediti masu tela koje se nalazi u njenom centru.

14.1.1 Odredjivanje udaljenosti zvezda i galaksija

Jedan od najvećih izazova sa kojima se sreću astronomi je odredjivanje ogromnih udaljenosti zvezda i galaksija od Zemlje. Taj podatak je od ključne važnosti za pravljenje svojevrstne mape Univerzuma. Za objekte koji se nalaze bliže od 1 000 svetlosnih godina udaljenosti od Zemlje, astronomi koriste metod koji se naziva paralaksa ili trijangulacija. Paralaksa je u stvari prividna promena u poziciji objekta kada na njega gledamo sa različitih mesta.⁵ Kako se Zemlja okreće oko sunca, zvezde prividno menjaju svoje mesto na nebu u toku jedne godine (koliko traje Zemljina revolucija). U stvari, Zemlja je ta koja menja svoj položaj u prostoru dok su zvezde praktično nepomične (slika 14.2).



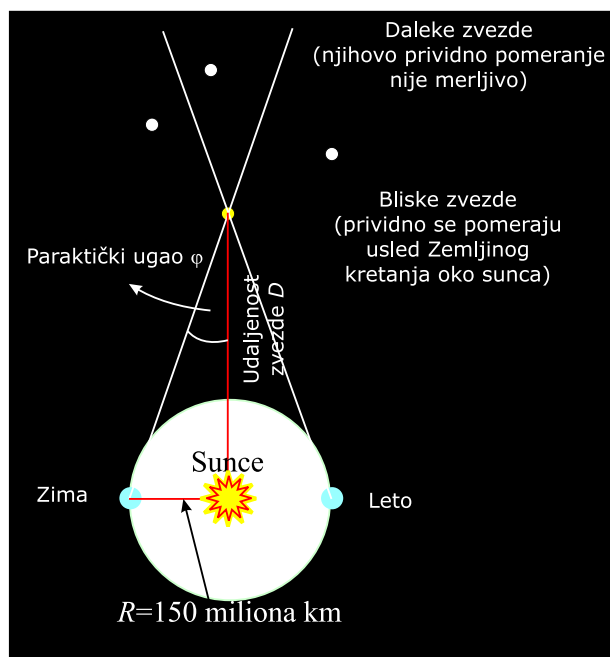
Slika 14.2: (a) Noćna strana Zemlje je uvek okrenuta od sunca. Kako Zemlja rotira oko njega, posmatrač na Zemlji ima utisak da se zvezde kreću iako je u stvari obrnuto. Zemlja se kreće a one su praktično na stalnim mestima. (b) Promena položaja Zemlje u odnosu na zvezde.

Paralaksa može da se primenjuje jedino za zvezde koje su relativno blizu Zemlji, jer sa porastom udaljenosti zvezde od Zemlje, promena u uglu pod kojim se ona vidi postaje manje merljiva.⁶

Odredjivanje udaljenosti zvezda metodom paralakse se sastoji u odredjivanju položaja zvezde na nebu u odnosu na neku drugu zvezdu koja je toliko daleko od Zemlje da je njena prividna promena položaja ne može registrovati. Nakon šest meseci se ponovo odredi prividna položaj zvezde u odnosu na daleku zvezdu i na osnovu geometrijskih ili trigonometrijskih relacija se odredi rastojanje od Zemlje do zvezde.

⁵Ovaj pojam se može učiniti očiglednim ako postavimo prst na 15 do 20 cm udaljenosti od oka zatvorimo levo oko i gledamo ga samo desnim. Ako nakon toga zatvorimo desno oko i pogledamo ga samo levim, učiniće nam se da se on nalazi na drugom mestu što je posledica toga da ga gledamo očima koja su na različitim mestima u prostoru. Isti princip važi i za zvezde na nebu.

⁶Ovaj efekat je primetan i u primeru sa odredjivanjem položaja prsta ispred očiju. Ukoliko ga pomeramo na sve veća i veća rastojanja možemo da primetimo da su promene u njegovom prividnom položaju sve manje i manje.



Slika 14.3: Odredjivanje udaljenosti zvezde od Zemlje primenom paralakse.

Sa slike 14.3 se vidi da se udaljenost zvezde L može dobiti iz relacije $D = R / \tan \varphi$.

Kao što je već napomenuto, ukoliko su zvezde na udaljenosti većoj od 1 000 svetlosnih godina, njihovo prividno pomeranje je toliko malo da se ne može upotrebiti za odredjivanje udaljenosti zvezda. Ova metoda je korišćena od otkrića teleskopa u 1610. godini do 1838. godine i njome je odredjena udaljenost svega nekoliko hiljada zvezda. Neke od njih su veoma sjajne, dok druge to nisu. Pri tome se mora imati u vidu da prividni sjaj zvezde zavisi i od toga koliko se daleko ona nalazi od Zemlje.

Prividni sjaj objekta, osim što zavisi od njegove udaljenosti od nas, zavisi i toga koliko svetlosti ona daje, odnosno od njenog apsolutnog sjaja. Matematička veza između tih promenljivih je poznata kao zakon obrnutih kvadrata i može se takodje upotrebiti za odredjivanje rastojanja do zvezda i galaksija. Ukoliko sa B označimo prividni sjaj, sa L apsolutni a sa D udaljenost zvezde, ovaj zakon ima oblik

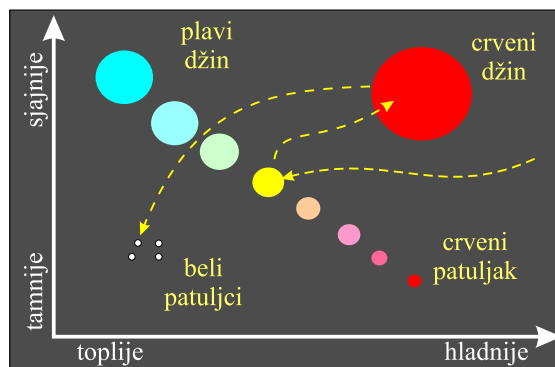
$$B = \frac{L}{4\pi D^2}. \quad (14.1)$$

Ovaj izraz pokazuje da prividni sjaj objekta opada kada se on udaljava od nas. Veliki je značaj ovog izraza za astronomiju jer, ukoliko znamo apsolutni i prividni sjaj onda možemo da odredimo udaljenost objekta preko formule $D = \sqrt{L/(4\pi B)}$. Prividni sjaj B se meri fotometrom, dok je odredjivanje apsolutnog sjaja L bio veliki izazov sa kojim su se susreli astronomi.

Dva astronoma Hercšprung i Rasel⁷ su rešili ovaj problem 1911. odnosno 1913. godine. Oni su otkrili da su sjaj zvezde i njena boja u vezi. Ovo je u skladu sa činjenicom da

⁷H. N. Russel i E. Hertzsprung.

toplija tela emituju više u plavom delu spektra od hladnijih tela. Takođe je za očekivanje da toplija tela budu i sjajnija. Kod nekih zvezda postoje i dodatni faktori koji utiču na sjaj ali za većinu zvezda postoji direktna veza izmedju sjaja i boje. Hercšprung-Raselov (HR) dijagram (slika .) prikazuje upravo vezu izmedju boje i apsolutnog sjaja zvezda.



Slika 14.4: Hersšprung-Raselov dijagram. Najmasivnije zvezde imaju najvišu temperaturu i najveći sjaj. Zvezde najmanje mase imaju najniže temperature. Evolucioni put sunca od protozvezde, sadašnjeg stanja, preko crvenog džina do belog patuljka je skiciran isprekidanom linijom.

Rastojanje do zvezde se sada može odrediti na sledeći način. Najpre je potrebno proanalizirati spektar koji emituje zvezda (njenu boju). Nakon toga se uz pomoć HR dijagrama odredi koliko je sjajna data zvezda, odnosno koliki je njen apsolutni sjaj. Prividni sjaj se određuje zapravo njegovim direktnim merenjem sa Zemlje. Nakon toga se primeni formula (14.1) i odredi udaljenost date zvezde.

Ovo je metod koji se najčešće koristi za određivanje udaljenosti zvezda iz Mlečnog puta od Zemlje. Udaljenost drugih galaksija od Mlečnog puta se određuje, u principu, na sličan način.

Početkom 20. veka otkrivena je i katalogizirana klasa zvezda čiji sjaj pulsira, odnosno menja se periodično sa vremenom. Nazvane su cefeide,⁸ a period pulsiranja im traje od nekoliko dana do nekoliko nedelja.⁹ Ubrzo je otkrivena zakonitost koja povezuje period cefeida i njihov apsolutni sjaj. Drugim rečima, merenjem perioda cefeida astronomi mogu da odrede i njen apsolutni sjaj, a onda, na osnovu izmerenog prividnog sjaja, uz primenu zakona obrnutog kvadrata da odrede i njenu udaljenost. Lociranje cefeida u udaljenim galaksijama omogućuje na taj način da se odrede rastojanja izmedju njih. Interesantno je napomenuti da je astronom Harlow Shapley, ovim metodom uspeo da odredi oblik Mlečnog puta i položaj sunčevog sistema u njemu.¹⁰

Ovaj metod za određivanje udaljenosti takođe ima ograničenja, jer je svetlost cefeida koje se nalaze na udaljenosti većoj od 100 miliona svetlosnih godina toliko slaba da ih ni

⁸Prva zvezda ovog tipa koja je otkrivena se zove Delta Cephei i nalazi se na 300 svetlosnih godina od Zemlje.

⁹Otkrila ih je 1912. godine američki astronom Henrieta Leavitt (1868-1921).

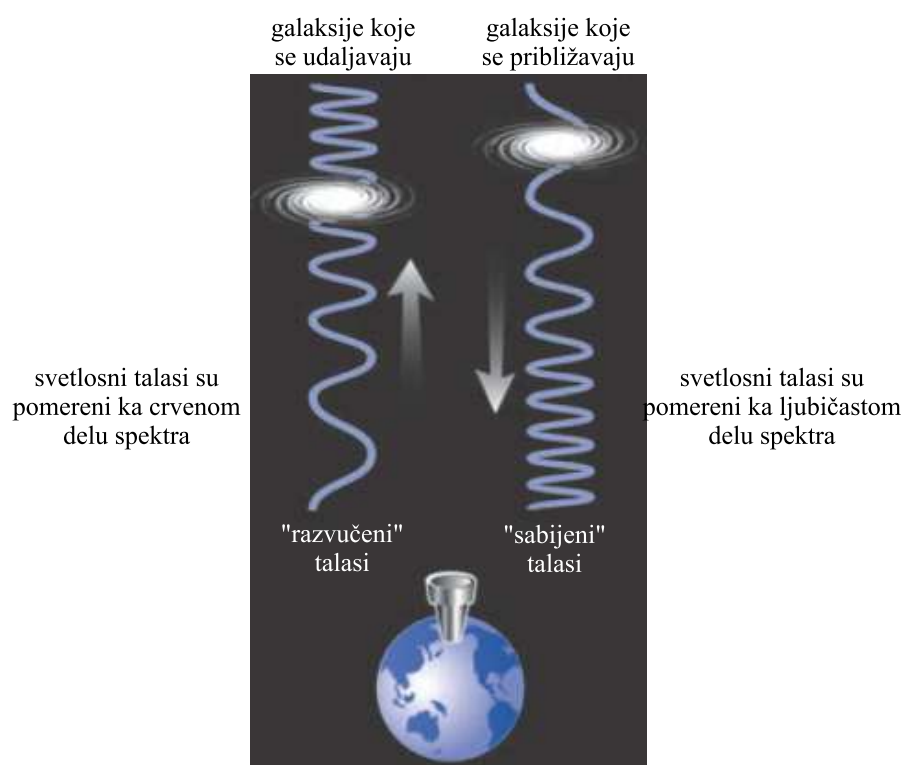
¹⁰Najsjašnija cefeida je zvezda Severnjača (Polaris) a njen sjaj varira za 9% za sa periodom od 4 dana. Kako se nalazi na samo 390 svetlosnih godina od Zemlje, njena udaljenost može da se takođe izmeri i metodom paralakse.

HST ne može registrovati. Za zvezde koje se nalaze na tim udaljenostima, devedesetih godina prošlog veka, uvedena je nova metoda za određivanje udaljenosti koja je vezana za jedan poseban tip eksplodirajućih super novih zvezda koje su dobile naziv tip 1a. Sjaj njihove eksplozije je povezan sa udaljenošću na kojoj se nalaze pa se metodama sličnim već opisanim može odrediti udaljenost na kojoj se nalaze.

14.1.2 Odredjivanja brzina zvezda i galaksija

Tehnika za merenje brzina zvezda i galaksija se zasniva na talasnom fenomenu pod nazivom **Doplerov efekat**, koji je već pominjan kod mehaničkih talasa. Naime, kretanje izvora talasa utiče na talasnu dužinu i frekvenciju talasa koji prima posmatrač.

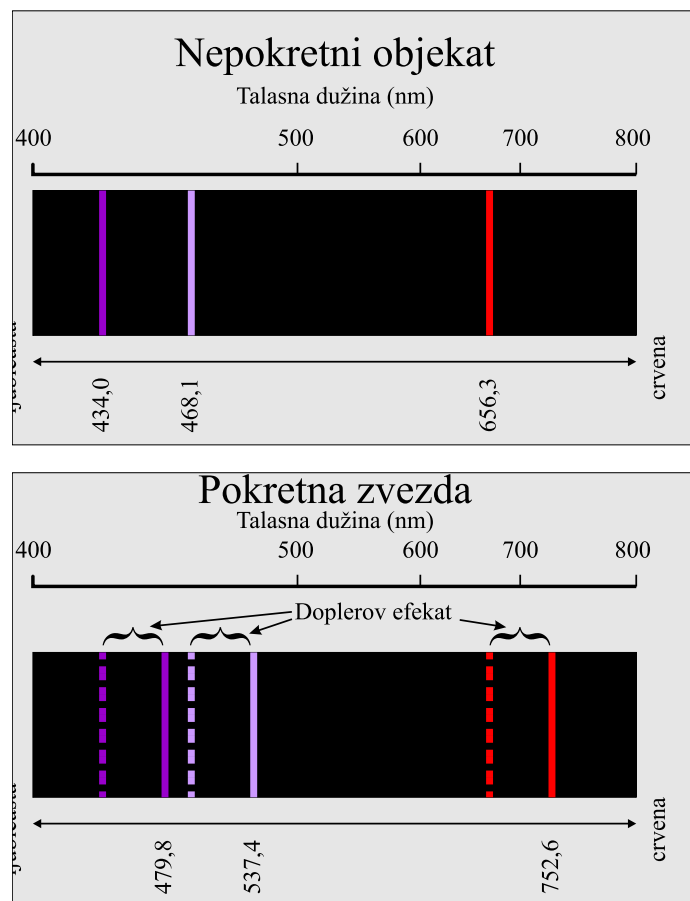
Ovaj efekat je veoma važan alat koji se koristi u astronomiji za analizu kretanja objekata. Ukoliko se posmatrani objekat kreće ka Zemlji, svetlosni talasi su sabijeni i pomereni ka ljubičastom delu vidljivog spektra (kraće talasne dužine, više frekvencije).



Slika 14.5: Doplerov efekat može da se iskoristi za određivanje kretanja objekata u prostoru.

Ukoliko se pak objekat udaljava od Zemlje, svetlosni talasi su razvučeni i pomereni kao crvenom delu vidljivog spektra (veće talasne dužine, manje frekvencije). U cilju određivanja karaktera ovog efekta koriste se karakteristične frekvencije (talasne dužine) povezane sa elektronskim prelazima u atomima pri čemu se najčešće prate prelazi u atomima vodonika kojih ima u velikim količinama na zvezdama. Takvi atomi emituju zračenje na istim frekvencijama kao i da se nalaze na Zemlji, međjutim mi ćemo ih detektovati na nižim

frekvencijama ukoliko se data zvezda udaljava od nas. Obzirom na karakter ovog pomeranja on se naziva **kosmološki crveni pomak**. Veličina ovog pomaka zavisi od brzine kojom se atomi (zvezda na kojoj se oni nalaze) udaljavaju od nas. U slučaju suprotnog kretanja na Zemlji bi bio izmeren plavi pomak.



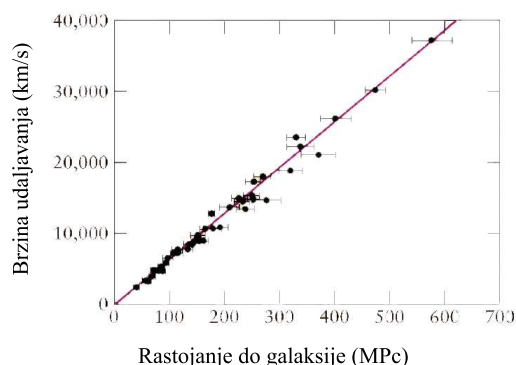
Slika 14.6: Linije vodonika emitovane sa tela koje se ne kreće i sa zvezde u relativnom kretanju u odnosu na Zemlju.

Na slici 14.6 je prikazan raspored linija vodonika koji je isti i kod tela koje miruje u odnosu na Zemlju i u spektru zvezde koja se kreće, ali su ove linije u tom slučaju pomerene ka crvenom delu spektra. Veličina Doplerovog pomaka je u vezi sa brzinom kojom se kreće zvezda.

14.2 Širenje Univerzuma

Merenjem crvenog pomaka emitovane svetlosti iz različitih galaksija je otkriveno da se skoro sve udaljavaju od nas. Neke od njih se kreću veoma velikim brzinama (oko 80% brzine svetlosti). Kada se ta merenja analiziraju paralelno sa rezultatima merenja rastojanja tih istih nebeskih tela od Zemlje, dolazi se do zaključka da su relativne brzine galaksija u

odnosu na Zemlju utoliko veće ukoliko se one nalaze na većoj udaljenosti.



Slika 14.7: Grafik koji ilustruje Hablov zakon.

Navedena veza je danas poznata pod nazivom Hablov zakon i može se zapisati u obliku

$$v = H(t)d,$$

gde je d udaljenost galaksije, a veličina H nosi naziv Hablova konstanta. Smatra se da se njena vrednost menjala sa vremenom a današnja vrednost joj je $H_0 = 74,6 \times 10^{-12} \text{ god}^{-1}$.

Prvi zaključci koji su izvedeni na osnovu Hablovih merenja koja su izvršena tridesetih godina prošlog veka, su ukazivala na udaljavanje galaksija od Zemlje. Međutim kako je već dugo bilo jasno da Zemlja nije centar Univerzuma, došlo se do zaključka da bi ista merenja izvršena na ma kom mestu u vasioni doveli do istih rezultata iz čega je zapravo sledilo da Hablovi rezultati ukazuju na to da se univerzum širi.

Pa ako se ceo Univerzum danas širi, sledio je logičan zaključak da je nekada, kada je započeo taj proces, on morao da bude skoncentrisan praktično u tačku. No da li je to bilo moguće i kakvi su onda uslovi vladali u njemu? Jedna od najprihvaćenijih teorija koja opisuje ovakav nastanak i evoluciju univerzuma je poznata pod nazivom teorija Velikog praska ili Velike eksplozije.

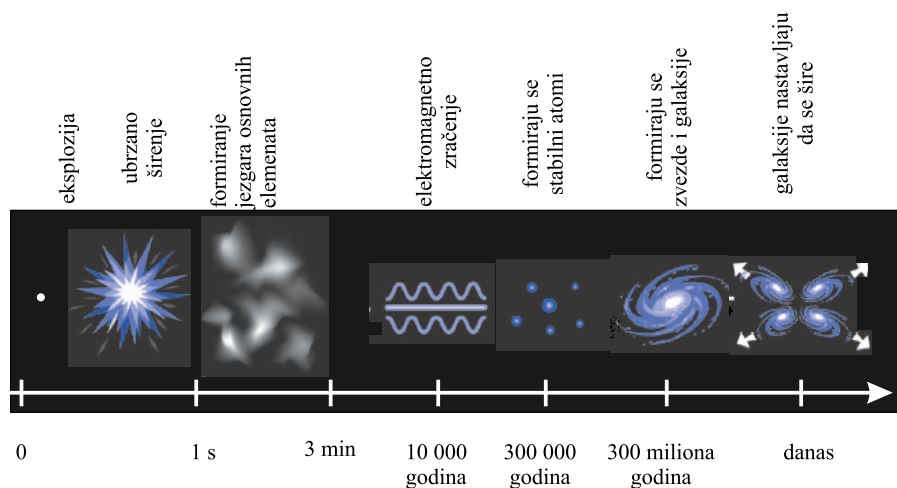
14.3 Teorija Velikog praska

Pojam Univerzum se odnosi na sve što postoji, uključujući sve vrste materije i energije. Iako danas ima mnogo teorija koje se odnose na njegov nastanak i evoluciju, kao što je rečeno najprihvaćenija je teorija Velikog praska. Prema njoj Univerzum je započeo u gigantskoj eksploziji pre između 10 i 20 milijardi godina.

U skladu sa ovom teorijom, sva materija i energija koja se nalazi u Univerzumu, je započela svoju evoluciju iz delića prostora ne većeg od jezgra atoma. Iznenadna eksplozija je rasterala svu materiju i energiju u svim pravcima. U tom trenutku Univerzum je bio užarena lopta koja je počela da se širi veoma brzo. Izuzetno velika temperatura (10 milijardi stepeni) je dovela do kreiranja subatomskih čestica.

Odmah nakon eksplozije Univerzum je počeo da se širi i hladi. Smatra se da se za delić sekunde proširio od dimenzije atomskog jezgra do $6 \times 10^{30} \text{ km}$. Unutar iste sekunde širenje je počelo da se usporava. Univerzum je bio oblak materije i energije koji se brzo hladio i

postajao sve redji i redji. Nakon nekoliko minuta, temperatura mu je opala na 1 milijardu stepeni i počela je kreacija jezgara vodonika. Nakon toga su jezgra vodonika počela da se fuzionisu u jezgra helijuma. Razlog što su čestice uspele da formiraju jezgra tek na ovoj temperaturi je u tome što je njihova energija na višim temperaturama bila toliko velika da nuklearne sile nisu bile dovoljno jake da ih zadrže na okupu.



Slika 14.8: Glavne faze evolucije Univerzuma od Velikog praska do danas.

Oko 10 000 godina nakon eksplozije, većina energije vasiona je oblika elektromagnetnog zračenja u opsegu X-zračenja, radio i UV talasa. Kako se Univerzum dalje hladio, i širio ovi talasi su menjali svoju frekvenciju da bi se danas nalazili u mikrotalasnoj oblasti, odnosno predstavljaju takozvano kosmičko pozadinsko zračenje.

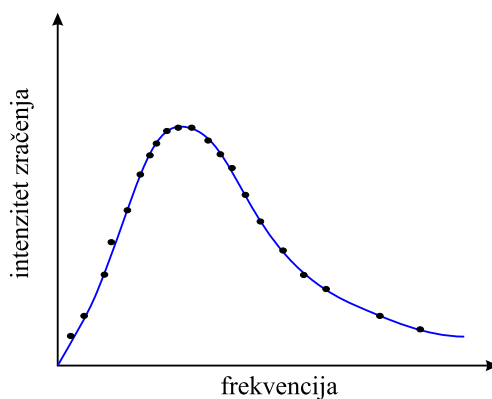
Merenja pokazuju da se današnji Univerzum nalazi u fazi širenja. Ukoliko je to tačno, onda se dolazi do zaključka da se na početku širenja sva materija koja ga čini nalazila skoncentrisana praktično u tački i imala veoma veliku gustinu i temperaturu. Pri ovome treba imati u vidu da nije reč o eksploziji i širenju tačke kroz beskonačni prostor koji je postojao i pre toga već da je iz te tačke nastao prostor i vreme koji se nakon toga širio. Kako se materija hladila pri širenju, tako su nastajala jezgra, atomi, zvezde i galaksije.

Ukoliko se pomenuta Velika eksplozija zaista desila, na osnovu današnjeg položaja galaksija i njihovog kretanja, je moguće proceniti koliko je širenje trajalo. Teleskopi su zapravo svojevrstne "vremenske mašine" jer nam omogućuju da gledamo u prošlost. Naime, kada mi "vidimo" neku galaksiju koja se nalazi na rastojanju od 100 miliona svetlosnih godina, mi je ne vidimo kako ona sada izgleda već onako kako je izgledala pre 100 miliona godina, kada je svetlost koja je stigla u naše oko krenula sa nje. Na osnovu izmerenih brzina kretanja galaksija i njihovog relativnog položaja danas, koristeći dobijene podatke o njihovom crvenom pomaku, može da se proceni da se velika eksplozija dogodila pre oko 13,7 milijardi godina.

Napomenimo da postoje i druge teorije o nastanku i evoluciji vasiona ali jedna veoma važna merljiva činjenica ide u prilog hipotezi o Velikoj eksploziji. Prema osnovnim postavkama ove hipoteze, videli smo da je univerzum u početku bio veoma gusta i vrela supa materije, koja je, kada se dovoljno ohladila, oslobodila velikom količinu elektromagnetnog zračenja.

Proračuni pokazuju da, ako je nastalo, takvo zračenje mora da postoji i danas sa talasnim dužinama koje su u oblasti mikrotalasnog zračenja koje se prostire u svim pravcima i odgovara zračenju crnog tela čija je temperatura oko 2,7 K.

Dva američka astronoma Arno Penzijas i Robert Vilson su šezdesetih godina prošlog veka, prilikom merenja elektromagnetnog zračenja koje emituje Mlečni put, ustanovili da postoji pozadinski signal koji nije mogao biti otklonjen ni na koji način. Merenja su pokazala da ovo zračenje u mernu aparaturu dolazi sa svih strana sa veoma malim varijacijama u frekvenciji. Ubrzo nakon publikovanja njihovog rada u kome je opisano ovo zračenje, došlo se do zaključka da su oni upravo registrovali kosmičko pozadinsko zračenje koje, kao što smo napomenuli, predviđa teorija Velikog praska i koje predstavlja njen svojevrsan "odjek".



Slika 14.9: Uporedjenje teorijskog predviđanja (puna linija) i rezultata merenja (tačke) mikrotalasnog pozadinskog zračenja koje je posledica Velikog praska.