

UNIVERZITET U TUZLI

Prirodno - matematički fakultet

Odsjek: Fizika

Merima Ahmić

ZAVRŠNI RAD

Dinamika galaksija

Tuzla, oktobar 2019. godine

Mentor: dr.sc. Amela Softić, van.prof.

Rad ima:

Redni broj diplomskog rada:

SAŽETAK

Još od prahistorije ljudi su posmatrali galaksije. Činjenica da naša galaksija (Mliječni put) nije jedina galaksija u svemiru, poznata je tek nešto više od 100 godina, a do tada su astronomi smatrali da se sve što vidimo nalazi unutar naše galaksije. Daleko iza Mliječnog puta vidimo milijarde drugih galaksija rasutih širom svemira. Pogled na sve te galaksije dovodi nas do fundamentalnih pitanja o svemiru, kao što je dinamika njihovog formiranja.

Razumijevanje dinamike galaksija je moguće tek posljednjih nekoliko godina. Naime, njeno bolje razumijevanje omogućeno je simulacionim eksperimentima, koji se izvode na sve bržim računarima.

U uvodnom dijelu završnog rada dat je hronološki pregled otkrića i poznavanja strukture i dinamike galaksija. Potom je objašnjenja klasifikacija galaksija sa različitim pristupima, te opisana njihova evolucija, sa objašnjenjem razvoja prečki.

Završni rad sadrži i poglavlja u kojima je objašnjena dinamika priliva gasa i aktivnih galaktičkih jezgara, zatim su opisane interakcije između galaksija, te uticaj tamne materije na dinamiku galaksija.

Posljednji dijelovi rada uključuju opisane načine određivanja udaljenosti galaksija, te objašnjenje značaja mjerenja njihove udaljenosti.

Ključne riječi: galaksija, dinamika galaksija, klasifikacija galaksija, tamna materija, aktivno galaktičko jezgro

ABSTRACT

People have observed galaxies since prehistory. The fact that our galaxy (Milky way) isn't the only galaxy in the universe has been known for just over 100 years, and until then astronomers believed that everything we saw was inside our galaxy. Far beyond the Milky way, we see billions of other galaxies scattered throughout space. The sight of all these galaxies inspires us to ask fundamental questions about our universe, such as the dynamics of their formation.

Only in the last few years has been possible to understand dynamics of galaxy. Namely, by simulation experiments we can understand better dynamics of galaxy, which are performed on faster computers.

The introductory part of this thesis gives us a chronological overview of the discovery, and knowledge of the structure and dynamics of galaxies. The classification of galaxies, with different approaches and their evolution, with an explanation of the evolution of the bars, was also explained.

This thesis consist chapters in which was explained the dynamics of gas inflow and active galactic nucleus, then interactions between galaxies and the influence of dark matter on dynamics of galaxy, were described too.

The last part of this thesis include ways of determining the distance of galaxies, and explanation of the importance of measuring their distances.

Keywords: galaxy, dynamics of galaxy, galaxy classification, dark matter, active galactic nucleus

SADRŽAJ

Uvod	3
1. Klasifikacija galaksija	4
1.1. Hubbleova sekvenca galaksija	4
1.2. Automatizirana klasifikacija galaksija	6
1.3. Statistička podjela galaksija.....	7
2. Evolucija galaksija (razvoj prečki)	9
2.1. Sile i momenti gravitacije	9
2.2. Uništenje prečki.....	9
2.3. Učestalost prečki.....	10
2.4. Formiranje galaktičkih ispučenja.....	10
3. Dinamika priliva gasa (napajanje AGJ)	12
3.1. Sekundarne umetnute prečke.....	12
3.2. Scenariji evolucije	13
4. Interakcije među galaksijama	15
4.1. Formiranje plimskih repova	15
4.2. Ubrzano formiranje zvijezda	16
4.3. Prstenaste galaksije	16
4.4. Polarni prstenovi.....	17
4.5. Formiranje eliptičnih galaksija.....	18
4.6. Plimske patuljaste galaksije.....	18
4.7. Akreacija gasa (hijerarhijsko formiranje)	19
4.7.1. Asimetrije i decentriranja galaksija	20
4.7.2. Iskrivljenje ravni ili "warps"	21

5. Uticaj tamne materije na dinamiku galaksija	22
5.1. Krivulje rotacije	22
5.2. Stabilnost, prečke i tamna materija	23
5.3. Zakoni skala	24
6. Određivanje udaljenosti galaksija	25
6.1. Standardne svijeće.....	26
6.2. Fitovanje glavnog niza	27
6.3. Cefeidne varijable	28
6.4. Udaljene standardne svijeće.....	29
6.4.1. Sažetak lanca udaljenosti	31
6.5. Hubble-ov zakon	31
Zaključak	35
Literatura	36

Uvod

Galaksije su masivni sistemi sastavljeni od zvijezda, gasa i prašine, te tamne materije koje na okupu održava gravitacija. Još od prahistorije ljudi su posmatrali galaksije. Činjenica da naša galaksija (Mliječni put) nije jedina galaksija u svemiru, poznata je tek nešto više od 100 godina, a do tada su astronomi smatrali da se sve što vidimo nalazi unutar naše galaksije. Daleko iza Mliječnog puta vidimo milijarde drugih galaksija rasutih širom svemira. Neke izgledaju slično našoj galaksiji, dok su druge sasvim drugačije. Pogled na sve te galaksije dovodi nas do fundamentalnih pitanja o svemiru, kao što je dinamika njihovog formiranja.

Razumijevanje dinamike galaksija je moguće tek posljednjih nekoliko godina. Polemika između Edwina Hubble-a, Harlova Shapley-a i Hebera Curtis-a, koja se dogodila oko 1925. godine, završila se dokazom o postojanju galaksija izvan naše, kao što je Andromeda, za koju se prije toga mislilo da je maglina koja pripada Mliječnom putu. Već krajem 18. vijeka (1781. godine), Charles Messier sastavio je katalog od 103 magline, za koje se većinom ispostavilo da su galaksije. 1864. godine John Herschel izdaje *Opći katalog maglica i zvjezdanih skupova*, a krajem 19. vijeka (1998. godine) John Dreyer izdao je *Novi opći katalog maglica i zvjezdanih skupova* (nadopuna Herchelovog kataloga) u kojem se nalazi oko 10 000 "maglina i skupova zvijezda".

50 - tih godina 20. vijeka Ewen i Purcell su otkrili radio-zračenje gasa atomskog vodika, što je omogućilo da se bolje shvati struktura naše vlastite galaksije, te da se izmjere rotacione krive drugih galaksija. Zahvaljujući radovima Vere Rubin i njene ekipe na rotacionoj krivi galaksija, 70-tih godina postajalo je sve jasnije da sjajna materija nije dovoljna da bi se objasnile posmatrane brzine i da je velika količina tamne materije morala postojati u vanjskim dijelovima. Tek je 80-tih godina shvaćeno da eliptične galaksije nemaju rotacije.

Da bi se objasnila spiralna struktura galaksija, Lin i Shu su 60-tih godina izradili teoriju o talasima gustoće, koja je i danas korisna, uprkos činjenici da ne predviđa galaktičke prečke. One su bile shvaćene zahvaljujući simulacijama koje su započele 70-tih godina. Prvi Atlas Galaksija bio je atlas Halton Arpa iz 1960. godine, a klasificirao je galaksije prema obliku i stepenu njihovih deformacija.

Od 80-tih godina, hidrodinamika gasa uključena je u simulacije galaksija, a od 90-tih godina, formiranje zvijezda na osnovu gasa. Tek se odnedavno može naći veza između kosmoloških simulacija velikih struktura i formiranja galaksija.

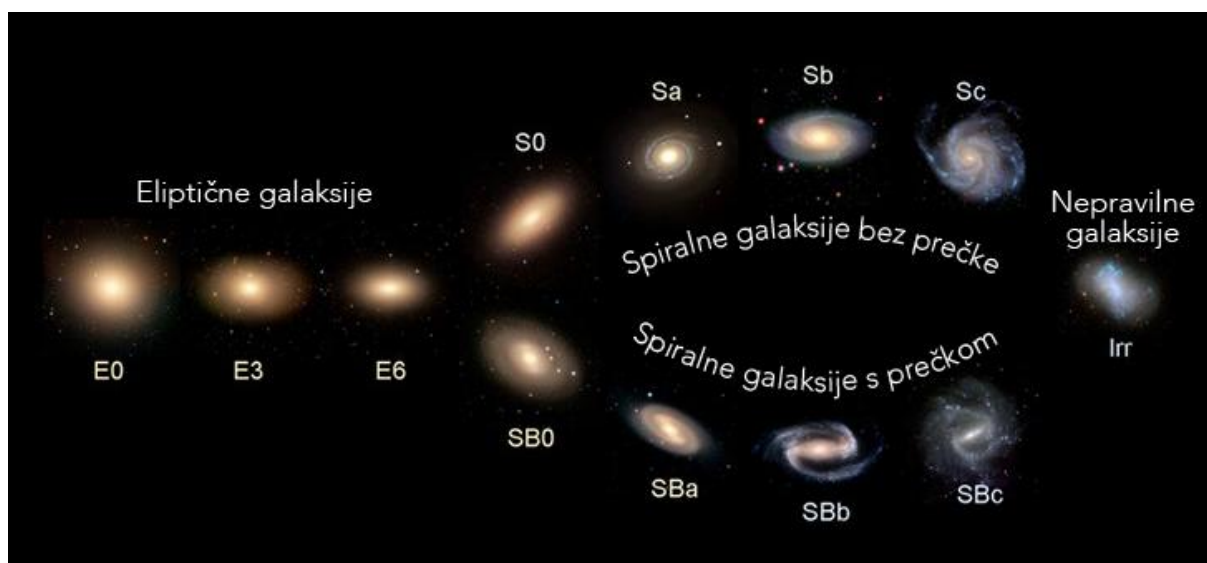
1. Klasifikacija galaksija

Astronomi su se nadali da bi klasifikacija galaksija mogla dovesti do dubokih shvatanja, baš kao što je klasifikacija zvijezda, napravljena početkom 20. vijeka. Nažalost, ispostavilo se da su galaksije dosta složenije od zvijezda.

Galaksije mogu biti raznih veličina, boja i oblika. Neke izgledaju velike, neke male. Neke su crvenkaste, neke bjeličaste. Neke se pojavljuju okrugle, a neke ravne. Ne postoje dvije galaksije koje izgledaju potpuno jednako. Ipak, većina galaksija se može svrstati u prilično jednostavan sistem. Izumljeno je nekoliko klasifikacijskih sistema, ali onaj koji se najčešće koristi za klasificiranje galaksija je postavio Edwin Hubble, i naziva se Hubbleova klasifikacija.

1.1. Hubbleova sekvenca galaksija

Bazirajući se na izgledu galaksija, Edwin Hubble je definisao svoju morfološku klasifikaciju (Hubbleov dijagram), čiji se shematski prikaz često naziva "Hubbleova viljuška (vilica)". Hubbleov dijagram omogućio je bolje razumijevanje činjenice da mogu postojati različite evolucije galaksija od jednog do drugog tipa i njihove uzroke. I danas se još uvijek mnogo koristi. Klasifikacija je naprije vođena kriterijima izgleda u vidljivom području, a složenost je išla rastući od tzv. "ranih tipova" (early-type), prema kasnim tipovima (late-type), kao što pokazuje slika 1. Nedavna istraživanja su pokazala da je evolucija galaksija mnogo složenija nego što je to Hubbleovim radom utvrđeno. Uprkos svemu, eliptične su zadržale i danas naziv rane galaksije, a spiralne kasne galaksije.



Slika 1. Hubbleov dijagram ili tzv. "Hubbleova vilica"⁶

U ovoj, sada klasičnoj klasifikaciji, galaksije prate sekvencu (s desna na lijevo) koja je povezana s njihovim oblikom (spiralne galaksije koje su sve namotanije, potom eliptične galaksije), s njihovom koncentracijom mase (sve masivnije ispučenje u odnosu na disk, do te mjere da ono potpuno dominira u eliptičnim galaksijama), i s udjelom gasa i mladih zvijezda (koji se ne prestaje smanjivati).

Četiri osnovne vrste galaksija prema Hubble-u su:

1. Eliptične galaksije (E)
2. Spiralne galaksije (S)
 - Normalne spiralne galaksije (S)
 - Spiralne galaksije sa prečkom (SB)
3. Sočivaste (lenticularne, lećaste) galaksije (SO)
4. Nepravilne galaksije (Irr)

1. Eliptične galaksije, lijevo na prethodnoj slici, su jako jednostavne, pojavljuju se u obliku elipse na nebu, a odnos njihovih osa jedini je parametar koji je omogućavao klasificiranje. Ova vrsta galaksija, koje su označene slovom E i brojem pored, je skoro bez karakteristika i eliptičnog je oblika. Što je broj veći, to je eliptična galaksija spljoštenija. Tako da galaksija označena sa E0 ima sferan oblik, a galaksija označena sa E7 pljosnat. Eliptične galaksije se upravo i klasificiraju prema tome koliko spljoštenije (pljosnatije) izgledaju. Njihova svjetlost opada od središta prema van. U svom sastavu sadrže stare zvijezde, praćene sa malom količinom prašine i gasova, i sa nekoliko novoformiranih mladih zvijezda.

Eliptične galaksije obuhvataju cijeli niz klasa galaksija, koje se razlikuju prema veličini i luminozitetu. Najmanje od njih, koje se nazivaju *patuljaste sferoidne galaksije*, imaju prečnike od nekoliko kpc (kiloparseka) ili manje. Neke od njih su samo nekoliko stotina hiljada puta svjetlije od Sunca. Na drugoj krajnosti su "*CD*" galaksije, koje su džinovske eliptične pronađene u centrima nekih klastera ili galaksija.

Eliptične galaksije su građene uglavnom od crvenih i žutih zvijezda, giganata i patuljaka. U njima skoro da nema gasa, pošto su ga usisale zvijezde. Zvijezde su uglavnom stare 10^{10} godina. Ove galaksije, ako uopšte rotiraju, to čine veoma sporo.

2. Spiralne galaksije - oko 80% galaksija, od svih posmatranih, ima spljošten disk. Većina od njih je klasificirana kao *spiralne galaksije* zato što imaju spiralne krakove, koji izlaze iz jezgra galaksije. Jezgra je uvijek žute ili crvenkaste boje, jer se u njoj nalaze starije zvijezde. Krakovi ili vanjski dio spiralnih galaksija je plavkastih tonova, jer se u njemu nalaze većinom mlade vruće zvijezde. Spiralne galaksije, u koje spada i naša galaksija, Mliječni put, čine vrlo sjajne i spljoštene galaksije. Ove galaksije obiluju plavim i bijelim supergigantima. Opšta karakteristika im je da iz centralnog dijela izlaze dva ovalna kraka, koja se nalaze suprotno jedan od drugog. Masa im se kreće od 10^8 pa do

10¹¹ Sunčevih masa. Najbrojnije su od svih galaksija i čine 62% svih galaksija u svemiru. Spiralne galaksije možemo podijeliti na: *normalne spiralne galaksije* i *spiralne galaksije sa prečkom*, polazeći od toga možemo li vidjeti prečkastu strukturu u centru galaksije ili ne. Normalne spiralne galaksije se označavaju slovom S. U zavisnosti od galaktičkog ispuščenja i razvijenosti krakova one se dalje mogu podijeliti na tri podgrupe, koje se označavaju sa: Sa, Sb, Sc. Tip Sa ima najviše istaknute spirale i ispuščenje, dok Sb ima slabije detalje, a Sc ima najmanje istaknute spirale i središte. Tipični primjeri podgrupe Sb su galaksije Andromeda M31, naša galaksija i M81. Spiralne galaksije sa prečkom označavaju se sa SB, i razlikuju se od normalnih po tome što prečka presijeca jezgru galaksije, pa krakovi ne izlaze iz jezgre nego iz prečki. Podtipovi ovih galaksija označavaju se sa SBa, SBb, SBc.

3. Sočivaste (lentikularne, lećaste) galaksije - galaksije sa ravnim (spljoštenim) diskovima, kao spiralne, ali koje nemaju spiralne krakove, su označene sa SO. Ovaj tip galaksija predstavlja prijelaz između eliptičnih i spiralnih galaksija. Karakterišu ga galaksije koje imaju disk, a pritom su ostale bez svoje međuzvezdane materije. Poput eliptičnih, lentikularne galaksije imaju glatku distribuciju svjetlosti, ali nemaju spiralne ruke. Poput spiralnih, imaju tanak disk i izbočinu, ali je izbočina puno dominantnija nego kod spiralnih. Također mogu imati centralnu prečku i u tom slučaju klasificiraju se kao SBO. Po nekim klasifikacijama ovaj tip ima tri podklase, i to na osnovu prisustva ili odsustva centralne strukturne trake (SAO, SBO, SABO)

4. Nepravilne galaksije - mali postotak galaksija, koje nisu ni eliptične ni spiralne, čine skupinu koja je dobila naziv *nepravilne galaksije*. Ove galaksije su označene sa Irr. Nemaju nikakvu simetriju niti uobičajene znakove ostalih galaksija. Njihovi nepravilni oblici nameću zaključak da nemaju rotaciono kretanje i da su uronjene u međuzvezdanu materiju. U njima postoji veliki broj plavih zvijezda. Masa im je mala i slabog su sjaja. Tipičan primjer ove vrste galaksija je Veliki i Mali Magelanov oblak, sateliti naše galaksije udaljeni od nas oko 150 000 gs. Danas se nepravilne galaksije smatraju nastavkom na spiralne galaksije u Hubble-ovom nizu.

1.2. Automatizirana klasifikacija galaksija

Donedavno se klasifikacija galaksija vršila okom, pošto je ono efikasnije u pronalaženju elemenata klasifikacije u optičkim slikama, koje često narušava ekstinkcija (slabljenje svjetlosti zvijezda u međuzvezdanoj tvari ili svjetlosti Sunca u Zemljinoj atmosferi) ili sjajni skupovi mladih zvijezda. Danas se ipak, sve više koriste automatski načini klasifikacija. Naime, epoha velikih kataloga galaksija kao što su SDSS (Sloan Digital Sky Survey) stavila nam je na raspolaganje veoma veliki broj bliskih galaksija, reda 100 000 i više. Iz tog razloga je potrebno napraviti specijalizirane programe da bi ih računar mogao automatski klasificirati.

Za ove klasifikacije izabrano je više parametara, a najkorisniji su koncentracija, asimetrija i male nepravilnosti ili CAS (C za koncentraciju, A za asimetriju, S za granularnost ili prisustvo zgušnjavanja, koji su općenito uzrokovani formiranjem skupova

mladih zvijezda). Implementacija pomoću računara (automatika) je veoma jednostavna: za koncentraciju je dovoljno uspostaviti odnos između dvije oblasti koje sadrže 80% i 20% ukupne luminoznosti; za asimetriju, slika galaksije se okrene za 180° i oduzme od originalne slike, ostatak je nakon toga normaliziran s ukupnom luminoznošću. Što se tiče granularnosti, slika je izglacana i zamućena, potom oduzeta od originalne slike. Ostaju, dakle, samo visoke prostorne frekvencije slike kao ostatak, koji je, također, normaliziran s ukupnim fluksom, da bi se dobio indeks granularnosti.

Ova klasifikacija je još u začetku i ne uzima u obzir, naprimjer, spiralne krake. Ali je objektivna i već je uspjela dovesti do spoznaje da su galaksije bile puno više deformirane u prošlosti. S druge strane, zna se da se u galaksijama formiralo mnogo više zvijezda prije nekoliko milijardi godina i ova je metoda pokazala da to nije u potpunosti uzrokovano galaksijama deformiranim tokom interakcija.

1.3. Statistička podjela galaksija

U statističkom pristupu, zanimljivo je unijeti stotine hiljada galaksija posmatranih na homogen način u dijagram boja-magnituda. Tako se galaksije dijele na dvije relativno dobro razdvojene populacije, koje nazivamo *plava* i *crvena sekvenca*. Naime, ove sekvence praktično odgovaraju ranom (early-type) i kasnom (late-type) tipu, s jedne strane su eliptične galaksije, formirane od starih zvijezda, masivne i sjajne, ali daju veoma malo novih zvijezda, a s druge, manje masivne spiralne galaksije, ali sjajnije u odnosu na broj svojih zvijezda. Upravo se u ovim galaksijama i danas odvija formiranje zvijezda: nove zvijezde se formiraju na osnovu gasa.

Različiti tipovi galaksija su odavno poznati, ali je bimodalnost plava/crvena, ovo toliko izraženo razdvajanje između populacija, iznenađujuća. Postoji jako malo galaksija prelaznog tipa. Nekoliko galaksija koje se nalaze u ovom prelazu formiraju ono što slikovito nazivamo "zelena dolina". Ovo razdvajanje je veoma korisno za izučavanje procesa formiranja galaksija. Masivne galaksije crvene sekvence su se, po svojoj prilici, brzo formirale na početku svemira i bile su naglo lišene gasa koji bi im omogućio da nastave s formiranjem zvijezda. Dok su galaksije plave sekvence, koje su manje evoluirale, laganije i sa slabijom površinskom gustoćom, bogate gasom i još i danas formiraju zvijezde. Ponuđeno je više mehanizama kako bi se objasnila ova razlika u evoluciji. Mehanizmi samoregulacije i samog formiranja zvijezda su nesumnjivo veoma važni: ubrzano formiranje zvijezda i njihove eksplozije kao supernovih zagrijavaju i odbacuju gas daleko od galaksija, naglo prekidajući napajanje hladnim gasom. Odlučujuću ulogu bi mogla igrati i samoregulacija uzrokovana visoko energetskim fenomenima, koji prate crne rupe i aktivna jezgra.

Naime, posmatranja pokazuju da postoji jaka korelacija između mase crnih rupa u centru galaksija i mase njihovog sferoida. Tako da eliptične galaksije, obično one iz crvene sekvence, imaju masivnije crne rupee i više razloga da dožive takve energetske fenomene, koji bi zaustavili napajanje gasom.

S druge strane, znamo da se eliptične galaksije prvenstveno nalaze u skupovima koji su bogati galaksijama, u gustom okruženju. Fenomeni interakcija među galaksijama su tamo češći, pogotovo stapanja spiralnih galaksija, koja mogu stvoriti eliptične galaksije, a interakcije s okolnim toplim gasom skupa mogu potisnuti hladni gas galaksija, čime je formiranje zvijezda potom postepeno ugušeno. Sudbina galaksija nije da ostanu u jednoj kategoriji ili jednom datom morfološkom tipu, nego da galaksije mogu evoluirati iz plave u crvenu sekvencu ili, čak, duž Hubbleove sekvence, prelazeći iz spiralnih galaksija kasnijih tipova u spiralne galaksije ranih tipova.

2. Evolucija galaksija (razvoj prečki)

Nakon Velikog praska, pod uticajem gravitacije, u vasioni su se počeli izdvajati ogromni oblaci gasa. To su bile protogalaksije od kojih će milijardu godina kasnije nastati galaksije. Unutar tih oblaka slobodno su se kretale čestice u svim smjerovima i svim brzinama, sudarale se, odbijale, ali i lijepile jedna za drugu pod uticajem gravitacije. I same protogalaksije su se sažimale ka svom centru pod uticajem svoje sopstvene gravitacije.

2.1. Sile i momenti gravitacije

Spiralne galaksije sve više nagomilavaju svoju masu, koncentriraju se, što dovodi do smanjena njihove gravitacione energije. Međutim, ovu koncentraciju zaustavlja stepen rotacije. Gas i zvijezde obrću se oko centra, dok se centrifugalna sila suprostavlja koncentraciji mase. Također, neophodno je i prisustvo tangencijalnih sila (proizvode moment torzije), da bi se kondenzovala i formirala ispupčenja. Ukoliko disk ostane osnosimetričan, a sile samo radijalne, bit će nemoguće skoncentrirati masu na vremenskim skalama od nekoliko milijardi godina.

Nasreću, gravitacione nestabilnosti stvaraju asimetrije, koje su u obliku spirale, pa čak i prečki. One su čvrste, manje prelazne od spirala i mogu djelovati na duži rok kako bi izmijenile kinetički momenat, između jednih zvijezda i gasa, koji će pasti prema središtu, i drugih, koji će se, naprotiv, raširiti prema vanjskim rubovima. Na taj način je moguća koncentracija materije.

Kako se prečke formiraju pokazuju nam numeričke simulacije. Prvobitni disk spiralne galaksije (sačinjen od zvijezda i gasa) je simetričan na osu, te brzo dolazi do razvoja nestabilnosti u obliku spirale. Naime, radi se o talasu gustoće, koji se pomjera gotovo konstantnom ugaonom brzinom u zavisnosti od poluprečnika u disku, nasuprot zvijezdama, čiji su periodi rotacije puno sporiji na rubovima nego u centru. Prelazna spirala se formira u disku, a potom se razvija prečka. Postoji i jaka prečka koja odgovara vremenu od 8 milijardi godina i ubrzano potiskuje gas ka centru. To bi moglo postepeno dovesti do uništenja prečke, koja više ne postoji u vremenu od 11 milijardi godina. Uz pomoć kosmičkih vlakana, galaksija se napaja međugalaktičkim gasom. Taj gas će preoblikovati disk, koji ponovo postaje nestabilan da bi formirao novu prečku. Pomenute simulacije pokazuju da se prečka uvijek završava malo prije oblasti korotacije, poluprečnika gdje se zvijezde i prečka obrću istom brzinom.

2.2. Uništenje prečki

Preko svojih momenata torzije prečka raspodjeljuje materiju u galaktičkom disku. Na sile prečke je posebno osjetljiv gas, koji je središnji i sa slabom disperzijom brzine. Taj gas je preusmjeren prema prstenovima, dok velika količina pada ka središtu, prema prstenu jezgra. Naime, to je način napajanja aktivnih galaktičkih jezgara. Također, prema trećem Newton-ovom zakonu, gas djeluje silom torzije na prečku, što dovodi do njenog slabljenja i na kraju do samog uništenja. Možemo reći da je na neki način prečka žrtva

fenomena samoregulacije. Ona svojim djelovanjem usmjerava gas prema centru galaksije, ali sam pad gasa prema centru uništava prečku.

Svi diskovi galaksija, koji posjeduju međuzvjezdani gas, ne bi trebali imati jake prečke. Oko tri četvrtine spiralnih galaksija su prečkaste galaksije. Zahvaljujući napretku bliskog infracrvenog područja, odnedavno je moguće i utvrđivanje broja prečki. Naime, u vidljivom spektru, slike galaksija su poremećene usljed novih zvijezda (jako sjajne, ali imaju malu masu) ili su zatamnjene međuzvjezdanom prašinom, dok su u infracrvenom području ovi uticaji znatno smanjeni. U njemu se dobro registriraju stare zvijezde, ukupna masa.

2.3. Učestalost prečki

Naime, u posmatranjima se javlja i ekstenzija prema velikim silama prečke. Međutim, situacija se u potpunosti mijenja ukoliko se disk može ponovo napajati vanjskim gasom. Disk s mladom populacijom zvijezda ponovo postaje nestabilan i formira prečku. Podešavajući histogram sile prečki, u mogućnosti smo odrediti kolika količina gasa mora biti dovedena. U prosjeku za 10 milijardi godina masa galaksije se udvostruči, što znači da se spajanje mase u spiralnim galaksijama ne ostvaruje preko fuzije galaksija nego preko spore akreacije vanjskog gasa. Interakcija sa masivnim pratiocem bi dovela do zagrijavanja i na kraju uništenja diska, te ne bi mogla potaknuti stvaranje novih prečki.

2.4. Formiranje galaktičkih ispupčenja

Postoji više mehanizama formiranja spiralnih galaktičkih ispupčenja. Jedan od tih mehanizama je i interakcija sa malim pratiocem, koja se završava fuzijom između dvije galaksije, te pripajanjem pratioca ispupčenju, ali veće galaksije. Ipak, veliki broj ovakvih interakcija bi trebao dovesti do zagrijavanja diska, puno više iznad granica koje su postavljene posmatranjima.

Postoje i rezonance koje se tiču pojedinačnih kretanja zvijezda, a koja su okomita na ravan galaksije (okomita unutarnja Lindbladova rezonanca, koja je veoma slična unutarnjoj Lindbladovoj rezonanci u ravni). Formiranju pseudo-sferoida ili formiranju ispupčenja u obliku kutije ili kikirikija doprinose zvijezde, koje su u rezonanci sa prečkom. Naime, formiranje ispupčenja je praćeno slabljenjem prečke (rastvara se u smjeru koji je okomit na ravan, dok je sila u ravni više osnosimetrična).

Ipak, ispupčenje će stabilizovati uzastopne prečke, koje će se potom formirati, ali će biti teže uništiti prečku gasovitom komponentom. Ta gasovita komponenta će imati sve manji udio u masi galaksije. Masa će se koncentrirati tokom evolucije, dok će odnos između ispupčenja i diska rasti. To predstavlja tendenciju evolucije.

Posmatrajući udaljene galaksije teleskopima, kojima trenutno raspolažemo, u mogućnosti smo se vratiti u prošlost. Dakle, možemo vidjeti galaksije onakve kakve su bile tokom prve polovine starosti svemira, kada su emitovale fotone kojima je trebalo više od 7 milijardi svjetlosnih godina da bi stigli do nas.

Kako bi dobili informacije o učestalosti prečki u tim udaljenim spiralnim galaksijama napravljene su određene statistike. Međutim, uzimaju se u obzir samo one "velike" zbog nedostatka prostorne rezolucije, te je za rezultat dobijeno da su galaksije ranije bile manje prečkaste. Ovaj rezultat je još uvijek privremen, i postoji više načina njegove interpretacije. Također, u to doba, galaksije su imale narušenu morfologiju. Moguće je i da je interakcija između galaksija bila češća što je vodilo uništenju prečki. Druga mogućnost je povezana s većim udjelom gasa u mladim galaksijama (gas je faktor uništenja prečki).

3. Dinamika priliva gasa (napajanje AGJ)

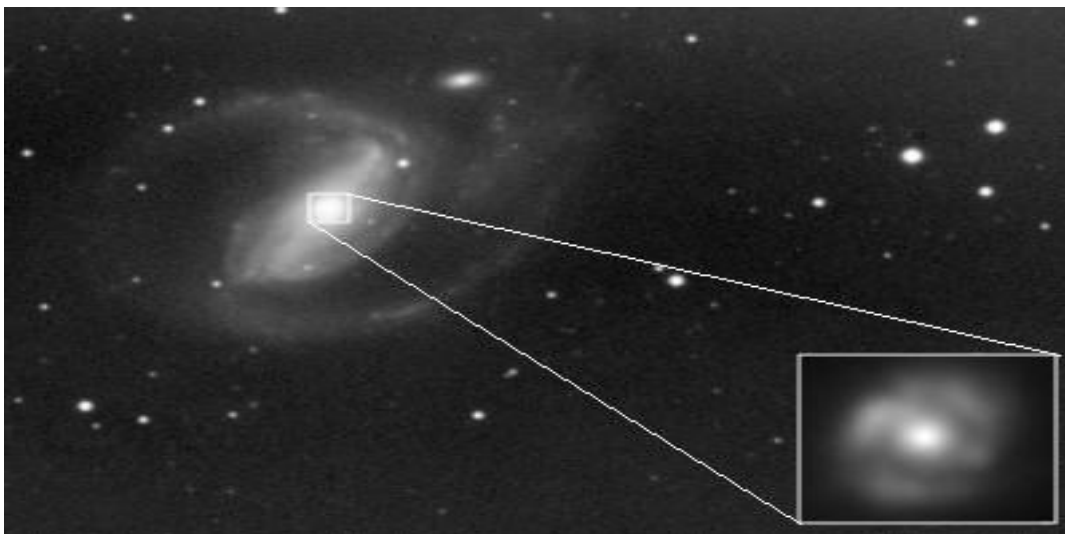
Danas nam je poznato da u svakoj od galaksija postoje supermasivne crne rupe i da je njihova masa proporcionalna masi ispunjenja (tačnije da je jednaka 2/1000 ove mase), a sve to zahvaljujući mjerenju brzina zvijezda. Upravo ta proporcionalnost nas navodi na zaključak da se masa crnih rupa povećava na način koji je paralelan i istovremen sa rastom galaksija. Supermasivne crne rupe kada se jednom formiraju, miruju u jezgrima galaksija i bude se s vremena na vrijeme kako bi kratkotrajno sjajile. Taj kratak period aktivnosti odgovara udjelu vremena koji je proporcionalan udjelu galaksija, koje posjeduju AGJ (nekoliko postotaka).

Naime, u središtu većine galaksija postoji područje (veoma malo, skoro nevidljivo) koje sadrži skup zvijezda, i nazivamo ga jezgro. Poznato nam je da svako jezgro galaksije krije u sebi supermasivnu crnu rupu. Međutim, 2 ili 3% galaksija imaju izrazito sjajna jezgra, ponekad čak i sjajnija od cijele galaksije. Takva jezgra se nazivaju aktivna galaktička jezgra (AGJ). Zračenje ovih jezgara je isuviše jako da bi poticalo od zvijezda. Gustoća jezgra je visoka, te se pretpostavlja da se u njima nalaze crne rupe.

Dinamika galaksija, zapravo, ima odlučujuću ulogu jer dovodi gas blizu centra, dok ulogu raspodjele materije može igrati prečka (glavni dio gasa pada prema centru, dok je mali dio mase izbačen prema vanjskom dijelu). Radijalna raspodjela gasa ima takav smjer da sav gas u unutrašnjosti poluprečnika korotacije s prečkom može padati prema centru. Suprotno tome, gas izvan korotacije je usmjeren prema vanjskom prstenu.

3.1. Sekundarne umetnute prečke

Akumulacija gasa u prstenu jezgra uzrokuje formiranje velikih količina zvijezda. To nam pokazuju brojni snimci s visokom rezolucijom, kao što je snimak na sljedećoj slici.



Slika 2. Galaksija NGC 1097⁸

Slika pokazuje prečku i spiralne krake, a uvećanje središnjeg dijela na slici pokazuje akumulaciju gasa, ali po Lindbladovoj rezonanci, koja formira prsten jezgra. U ovom prstenu se nalaze skupovi mladih zvijezda, a koje su se upravo formirale.

Koncentracija mase preuređuje putanje zvijezda, te povećava ugaonu brzinu rotacije. Pored primarne postoji i jedna druga, mala prečka, koja se odvaja od primarne. Ta mala prečka je u potpunosti umetnuta u prsten jezgra i igra istu ulogu kao i primarna. Ovakav slučaj, prečka u prečki, raspodijelit će materiju u unutrašnjosti prestena i dovest će gas prema crnoj rupi.

Izvan vanjskog prstena se također akumulira gas koji je došao iz izvangalaktičke sredine. Vani ga zadržavaju gravitacione sile prečke. Nakon što prečka bude oslabljena, druge asimetrije, kao što su spiralni talasi manje brzine, razviće se. Ovi spiralni talasi će omogućiti vanjskom gasu da se širi, te će ga ponovo obogatiti mladom populacijom. Dakle, napajanje gasom se odvija s prekidima, zavisno od ciklusa jače ili slabije prečke.

Vremenske skale, koje se tiču vanjskih oblasti i centra, su reda nekoliko desetina miliona godina u centru, do milijarde godina na rubovima. To nas navodi na zaključak da posmatranja, čiji je cilj bio testiranje scenarija napajanja aktivnih galaktičkih jezgara kroz prečke, nikad i nisu bila tako ubjedljiva. Zbog fenomena samoregulacije, kada gas već dospje do jezgra, prečka će slabiti.

3.2. Scenariji evolucije

Formiranje i evolucija galaksija se odvijaju prema tri osnovna scenarija: monolitno urušavanje (brzo urušavanje u sferoid), interakcija između galaksija i fuzija ili hijerarhijski scenario (dugotrajna evolucija sa akreacijom). Asimetrije (predstavljene spiralnim kracima i prečkama) su pokretači ove dugotrajne evolucije. Objašnjenje se, zapravo, nalazi u kombinaciji ove tri pojave.

S obzirom da se ispupčenja i crne rupe formiraju istovremeno, možemo očekivati da su se najmasivnije crne rupe formirale veoma rano. Naime, to se dešava i u slučaju galaksija. U gušćim oblastima svemira, tamo gdje je evolucija brža, najmasivniji sferoidi se formiraju veoma rano.

U hijerarhijskom scenariju prvo se formiraju objekti najmanje mase. A kako je gustoća svemira nekada bila veća zbog ekspanzije (širenje), i ti objekti su bili gušći. Osim toga, i galaksije su bile bogatije gasom. Dakle, dinamičko vrijeme evolucije (varira obrnuto gustoći) je bilo kraće, a napajanje jezgra efikasnije. Upravo to objašnjava sjajnija AGJ.

Pored toga, skupovi galaksija, koji uzrokuju veliki broj interakcija među galaksijama, stvaraju se u prvoj polovini starosti svemira. Pokazalo se da su u tom periodu bile puno učestalije deformirane galaksije, s plimnim repovima.

Interakcije između galaksija uzrokuju formiranje zvijezda u velikom broju, ali i prečke i asimetrije, također. One, zapravo, dovode gas galaksija prema centru, i to na veoma efikasan način, ali i omogućavaju napajanje crnih rupa i povećanje njihove mase. Tokom stapanja dvije galaksije, također, dolazi i do stapanja njihovih crnih rupa. Tako se formira dvojna crna rupa, čiji je životni vijek relativno kratak.

Masivne crne rupe imaju dosta prilika za prikupljanje materije i rast proporcionalno masi ispučenja galaksija. Ono što nam je poznato jeste da izvjestan broj zvijezda, ekspozijom kao supernove, završavaju svoj život kao crne rupe (ako je masa ostatka središta, nakon eksplozije, veća od 2-3 Sunčeve mase). Međutim, ovakve crne rupe malih masa će ostati na svojim putanjama u disku svojih galaksija, ne dospjevajući u centar. Tek od mase reda 10 000 Sunčevih masa ili više, dinamičko trenje počinje zaustavljati masivna tijela. Onda se takva tijela mogu spiralno kretati ka centru. Dakle, potrebno je, da se formiraju crne rupe, blizu jezgra, koje će se međusobno stopiti kako bi se formirale crne rupe prelazne mase. Ovakve crne rupe onda mogu migrirati prema jezgru. One još uvijek nisu pouzdano utvrđene, iako se sumnja na neke veoma sjajne izvore u području x-zraka. Galaktičke crne rupe najmanje mase koje su pronađene su veličine 10^5 - 10^6 Sunčevih masa (kao što je galaktička crna rupa u Mliječnom putu čija masa iznosi $3,6 \cdot 10^6$). Crne rupe su neizbježno zatvorene u jezgrima, počevši tek od te mase.

4. Interakcije među galaksijama

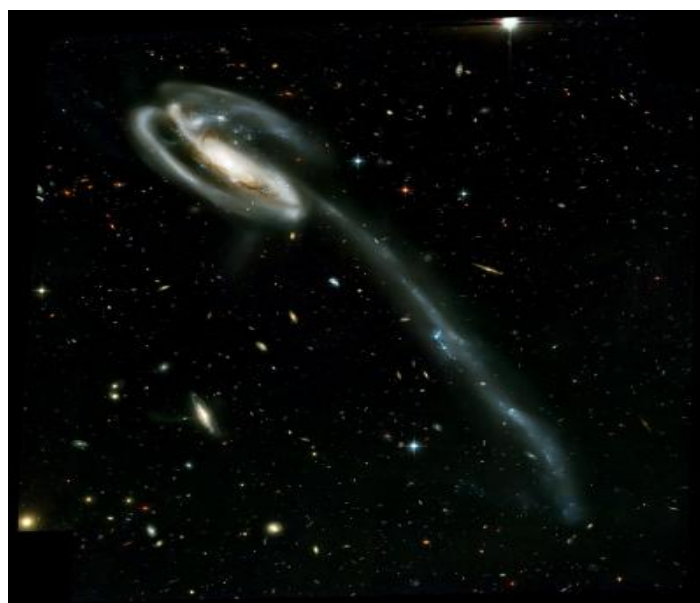
U nizu velikih ugniježđenih struktura, u kojima gravitacione interakcije imaju prednost, formiraju se galaksije. Naime, u hijerarhijskom scenariju, interakcije i stapanja među galaksijama su osnovni element njihovog formiranja. Galaksije koje su u očitj interakciji su danas izuzetak, te imaju poremećenu morfologiju. Zavisno od kriterija deformacije, ima ih možda nekoliko postotaka. Praktično sve danas poznate galaksije su tokom svog života imale nekoliko interakcija.

4.1. Formiranje plimskih repova

Ove gravitacione interakcije mogu potaknuti mala proširenja. To su, ipak, samo efekti plime, dosta slični onima koji su nam poznati u Sunčevom sistemu. Galaktičke plime pogađaju sistem (podređen silama gravitacije i rijedak kao gas) s puno manje kohezije, umjesto da se tiču planeta koje su sačinjene od čvrstih ili tečnih tijela.

Svaka promjena gustoće će voditi namotavanju materije u spiralne krake. Sile plime su uzrokovane pojačanim privlačenjem zvijezda diska, ali i nedostatkom sila privlačenja sa suprotne strane. Ta dva proširenja će se namotati u spiralne krake i formirati dva plimna repa. Međutim, proširenje koje je sa bliže strane hvata saputnik i ono više liči na most između dvije galaksije. Na samom kraju interakcije ostaje jedan plimni rep po galaksiji. On se može protegnuti vrlo daleko od galaksije (5-10 poluprečnika diska).

S obzirom da sile plime predstavljaju funkciju rasta udaljenosti do centra galaksije, mnogo jače utiču na materiju na rubovima. Poseban uticaj imaju na gasovitu komponentu galaksija, čije radijalno proširenje može biti 2-4 puta veće od optičkog proširenja. Na prvi pogled, optička slika ne daje naznake interakcije među galaksijama.



Slika 3. Galaksija Punoglavac (Tadpole Galaxy)⁷

Galaksija na prethodnoj slici je dobila naziv Punoglavac zbog dugačkog repa koji vuče za sobom, te oblikom zaista i podsjeća na punoglavca. Ona predstavlja primjer formiranja plimnih repova prilikom interakcije dvije galaksije. Dakle, njen pomenuti "rep" je zvjezdana staza nastala interakcijom dvije galaksije. U ovom slučaju veća galaksija svojom moćnom gravitacijom usisava manju i na taj način je nastao taj 280 000 svjetlosnih godina dugačak zvjezdani rep. U njemu se vide i pojedina zvjezdana jata. To su svijetle plave grudve, a svaka od njih sadrži više miliona džinovskih zvijezda (svaka desetak puta toplija i milion puta sjajnija od Sunca).

4.2. Ubrzano formiranje zvijezda

Rađanje velikog broja zvijezda uzrokuju siloviti gravitacioni poremećaji, koji se javljaju tokom plimske interakcije. Oni, također, obrušavaju veliku količinu gasa prema centru galaksija. Posljedna faza stapanja dvije spiralne galaksije, koje su bogate gasom, se uglavnom povezuje sa najubrzanim formiranjem zvijezda. Talasi udara i kompresije su toliko intenzivni, da dolazi do formiranja znatnog broja ogromnih skupova zvijezda. Primjer ovakvog formiranja možemo vidjeti na slikama galaksije Vrtlog (Messier 51). Naime, ovakvi skupovi će stareći postati kuglasti. Danas se smatra da se većina kuglastih skupova formira prilikom interakcija galaksija. Ono što skreće pažnju jeste da eliptične galaksije imaju više kuglastih skupova nego spiralne. Ta misterija se objašnjava samim mehanizmom formiranja eliptičnih galaksija. Izgleda da one proizilaze iz interakcije i stapanja između spiralnih galaksija, prilikom čega se dodatno formiraju brojni kuglasti skupovi.

4.3. Prstenaste galaksije

Tokom sudara između dvije galaksije dolazi do smanjenja udarnog parametra. Prilikom toga proizvedeni poremećaji postepeno prelaze iz spiralnih u prstenaste talase. To je slučaj direktnog sudara, koji je načinio prstenastu galaksiju "Kotač". Prsten je, zapravo, talas koji se širi prema vanjskom dijelu. To nas podsjeća na ono što nam je poznato, talas na vodi koji se širi kada bacimo kamenčić u baru. Kada u direktnom sudaru kroz disk galaksije prođe saputnik, materija diska se počinje brzo obrušavati prema centru. Do toga dolazi zbog dodatnog privlačenja saputnika. Kada se udaljava zvijezde se vraćaju unatrag, ali i osciliraju oko svog poluprečnika ravnoteže. Međutim, period osciliranja je diferencijalan (kraći u centru nego na rubovima).

Talas koji se stvara prilikom susreta materije iz središta (koja se vraća) i materije s rubova (još uvijek u svojoj prvoj oscilaciji) se naziva *talas gustoće*. S obzirom da je gas u njemu komprimiran, ovaj talas gustoće je mjesto formiranja zvijezda. Zapravo, on predstavlja, takoreći, pravi laboratorij za proučavanje formiranja zvijezda (pokrenuto u isto vrijeme u trenutku tačno određenom sudarom).

Prstenove koji su se formirali tokom sudara između galaksija je prilično lako za razlikovati od rezonantnih prstenova s prečkom u prečkastoj galaksiji. S obzirom da udarni parametar praktično nikad nije jednak nuli, prsten je decentriran u odnosu na jezgro ili ostatak galaksije.

Pretpostavlja se da je naša susjeda, galaksija Andromeda, također pretrpjela direktan sudar, ali sa saputnikom male mase. Općenito prsten formira međuzvjezdana sredina diska, ali to još uvijek nije objašnjeno. Međutim, emisija prašine u dalekom infracrvenom području (snimio satelit Spitzer), je objelodanila drugi decentrirani prsten u centru.

4.4. Polarni prstenovi

Polarni prstenovi su zvjezdane komponente, koje se obrću oko ose koja je okomita na osu rotacije glavne galaksije. Ove prstenove sadrži izvjestan broj veoma neobičnih galaksija. Naime, ovi sistemi nisu mogli biti izgrađeni odjednom, zato što je gasovita komponenta sklona sudarima, te oba smjera bi se poništila međusobno kroz sudare oblaka gasa. Nakon prvog diska, zasigurno, bi morao biti formiran polarni prsten, koji je mlađi (formiran od plavih zvijezda) i jedini koji još uvijek sadrži gas. Ovi sistemi su veoma dragocjeni. Oni nam, zapravo, omogućavaju da upoznamo dinamiku galaksija u sve tri dimenzije, a ne samo u ravni. Mogućnost da se ustanovi oblik ukupne raspodjele materije u galaksiji nudi nam izmjerena brzina rotacije (ukoliko se može izmjeriti) u dvije okomite ravni. Tom materijom još uvijek dominira slabo poznata tamna materija, ali na velikoj udaljenosti. Možda bismo bolje shvatili prirodu tamne materije saznanjem da li je ona spljošteni, sferični ili ipak duguljasti sferoid.

Da bismo mogli doći do općih informacija o spiralnim galaksijama, neophodno bi bilo saznati kako su se ovi sistemi formirali. Postoji više mogućih scenarija formiranja, a koji su testirani preko numeričkih simulacija. Prvi od njih je stapanje, direktan udar između dvije galaksije, s parametrom udara od skoro nula. Zapravo, sočivasta galaksija bi prošla kroz disk galaksije kasnog tipa, bogatog gasom. Kako bismo dobili očekivani rezultat, scenarij nema veliku vjerovatnoću i područje mogućih geometrija je prilično usko. Pored toga, zvijezde galaksije kasnog tipa su veoma raspršene poslije sudara (u halou zvijezda koje bi trebale okruživati sistem). Ovaj halo, najpoznatiji sistemi, ne pokazuju.

Drugi scenarij formiranja je akreacija gasa (sljepljivanje čestica materije u rubnim zonama). Nju vrši sočivasta galaksija pri interakciji s galaksijom kasnog tipa, ali na putanji hiperbole. Ta putanja se ne završava stapanjem. S obzirom na jače plimne sile u vanjskom dijelu i veće širenje gasa, centralna galaksija će privlačiti samo gas. Takozvane davateljice-zvijezde galaksije su veoma malo poremećene i ne formiraju halo oko sistema. Za ovaj scenarij moguće geometrije su široke.

Treći scenarij je također akreacija, ali međugalaktičke materije. Naime, galaksije se formiraju u kosmičkim vlaknima, koja su sačinjena od bariona i tamne materije. Tokom čitavog svog životnog vijeka vlakna nastavljaju napajanje galaksija. Sakupljena materija ima kinetički moment i smjer rotacije, koji je neprekidan, ali sasvim kompatibilan tokom životnog vijeka galaksije. Međutim, postoji mogućnost da galaksija sretne drugo vlakno i dobije materiju u nekom drugom pravcu.

Taj smjer će skoro uvijek zahvatati neki ugao sa ravni galaksije, dok će gas u nagnutoj putanji vršiti precesiju oko prvobitne ose rotacije. S obzirom da su periodi precesije veoma različiti od centra prema rubovima, sudari između oblaka gasa će veoma brzo

poravnati gas u ekvatorijalnu ravan (svaki nagib nije stabilan). Precesiju ne vrši jedino polarni nagib. On se, također, može stabilizirati u polarni sistem.

4.5. Formiranje eliptičnih galaksija

Interakcije između galaksija su praćene dinamičkim trenjem. Naime, galaksije su usporene na svojim putanjama, dok je njihova relativna orbitalna energija prebačena u potencijalnu energiju deformacije (posebno prema halou tamne materije). Vrijeme stapanja između dvije spiralne galaksije, približno uporedive mase, je reda jedne ili dvije rotacije (numeričke simulacije). Zbog prisustva fenomena rezonance deformacije su veće, a vrijeme fuzije kraće (slučaj direktne putanje).

Ostatak, koji će najvjerojatnije biti eliptična galaksija, proizvodi stapanje dvije spiralne galaksije. To nije slučaj ako su smjerovi rotacije galaksija i kinetički moment orbitalnog kretanja paralelni. Iako je vrijeme dinamičkog trenja kraće za interakciju između dvije galaksije usporedive mase, broj malih galaksija je puno veći od broja divovskih galaksija. Zapravo, vjerojatnoća formiranja eliptične galaksije je veća ako postoji veliki broj malih galaksija, za razliku kada postoje samo dvije masivne spiralne galaksije.

Interakcijom divovske spiralne galaksije sa malom saputnikom može se javiti efekat zagrijavanja zvjezdanog diska, ali i formiranja debelog diska. Galaksija mijenja tip nakon nekoliko satelita. Tip postaje sve više rani prolazeći kroz sočivastu morfologiju, a potom kroz hibridnu između spiralne i eliptične. Jedan od ostataka ovakvog stapanja sa malim satelitima se može posmatrati u obliku tankih zvjezdanih školjki oko eliptičnih galaksija. Zvezdane školjke su sačinjene od zvijezda-saputnika. Takve zvijezde formiraju talase gustoće koji se šire prema vanjskim rubovima, dok one vrše skoro radialne oscilacije. U određenom trenutku vremena se u školjkama nalaze zvijezde, koje dostižu do njihovog apocentra. Imaju skoro nultu brzinu što uzrokuje akumulaciju. Naime, ove školjke (oko eliptičnih galaksija) nam mogu donijeti informacije o trodimenzionalnom obliku eliptičnih galaksija. S obzirom da se ove galaksije jako sporo okreću i da ih nije spljoštala rotacija, taj trodimenzionalni oblik bi bilo teško ustanoviti na neki drugi način.

Zbog prošlosti stapanja i geometrije uzastopnih stapanja, anizotropija je proizvoljna. Postoji mogućnost da se desi da nedavno sakupljena materija ima rotaciju, koja je potpuno suprotna smjeru dominantne rotacije. To bi se moglo desiti jer nasumično dolazi do raznih stapanja, tako da u tom slučaju bi mogli posmatrati sisteme zvijezda u kontra-rotaciji. Ta kontra-rotacija može biti potpuna i odnositi se na sve galaksije ili se ticati samo centralnog dijela, što je opet češći slučaj. U tom slučaju govorimo o središtu koje se kinematski odvojilo. Naime, što je galaksija ranijeg tipa, utoliko je veća mogućnost da će biti primijećena sa takvim središtem.

4.6. Plimske patuljaste galaksije

Pri interakciji i stapanju dvije spiralne galaksije dolazi do formiranja dva plimna repa (posebno na direktnoj putanji). Oni su bogati gasom i protežu se do velikih udaljenosti glavnih galaksija. Naime, gas efikasno zrači, ali i gubi svoju energiju u udarima. Također, pri slaboj disperziji brzina gas formira grumenje duž plimnih ekstenzija, ali i postaje

gravitaciono nestabilan. Čest je slučaj da jedna od ovih kondenzacija raste, postaje samogravitirajuća i formira zvijezde. Upravo na taj način formira novu patuljastu galaksiju, koju nazivamo *plimska patuljasta galaksija*. S obzirom da ovakve galaksije nemaju brzine da pobjegnu, i kako ih dinamičko trenje koči na njihovim orbitama, sudbina većine od njih je da prije ili kasnije opet padaju na srodne galaksije. Ovakve patuljaste galaksije se dosta razlikuju od normalnih patuljastih galaksija. Zapravo, one su formirane na osnovu gasa, koji je obogaćen teškim elementima srodnih galaksija. Kako metalicitet galaksije raste sa njenom masom, normalne patuljaste galaksije imaju veoma malo metala. Za razliku od njih plimske patuljaste galaksije karakteriše jak metalicitet. Također, i tamna materija je proporcionalno veća u patuljastim galaksijama, dok to nije slučaj sa plimskim patuljastim galaksijama. S obzirom da su formirane od diska galaksije ne bi trebale sadržavati tamnu materiju u standardnom modelu.

4.7. Akreacija gasa (hijerarhijsko formiranje)

Postoji više scenarija o tome kako galaksije sakupljaju svoju masu, i vjerovatno u svakome od njih postoji dio istine. Međutim, pitanje je koji od tih scenarija preovladava. Najjednostavnija je prva mogućnost: barionska materija, najvećim dijelom vodikov gas. Dolazi do njenog urušavanja u halo tamne materije, i to na monolitan način, odnosno u samo jednom koraku. Gas nema vremena da postigne rotacionu ravnotežu u disku, jer se pretpostavlja da se to urušavanje odvija brzo. Također, zvijezde se veoma brzo formiraju u sferoidnu geometriju. Naime, kako bi se objasnile masivne eliptične galaksije (posmatrane veoma rano u svemiru) pozivamo se na ovaj scenario.

Opet, s druge strane, standardni model koji je baziran na hladnoj tamnoj materiji, zagovara hijerarhijski scenario. U ovom scenariju se prvo formiraju male strukture, a zatim se uzastopnom fuzijom formiraju sve masivnije strukture. Zapravo, u jednoj ovakvoj šemi, svaka divovska galaksija (poput sadašnjeg Mliječnog puta) rezultat je stabla stapanja (krajnja galaksija bi bila njegov korijen, a prve strukture bi bili listovi u početku svemira). To stablo bi se razgranavalo na grane i grančice. Međutim, što se tiče ovog modela, on se susreće da dosta poteškoća pri objašnjenju velikog broja masivnih eliptičnih galaksija, i činjenice da su male galaksije danas jedine aktivne galaksije, koje istovremeno formiraju zvijezde, kao i one s aktivnim jezgrom. Antihijerarhijski aspekt u ovom scenariju je objašnjen efektima okruženja: u prenapućenim oblastima svemira brzina evolucije je veoma velika, gdje će se brzo formirati skupovi galaksija. Naime, u takvim oblastima stapanje među galaksijama je puno brže, dok je fuziono stablo pređeno puno prije nego što su se prve male galaksije pojavile u prazninama.

Posljednji, treći scenario, temelji se na sporij evoluciji galaksija, koje napaja međugalaktički gas. Pokretači unutarnje evolucije galaksija su spiralni i prečkasti talasi. Oni dovode gas do centra, postepeno formiraju ispupčenje i koncentriraju masu. Suprotno od brze i žestoke evolucije interakcije i sudara među galaksijama, ovo je takozvana "dugotrajna" evolucija. Ona se odvija polako, u više dinamičkih vremena galaksije, a asimetrija galaksije kontrolira akreaciju gasa. Ukoliko se u unutrašnjosti razvije jaka prečka, jedino će gas (u unutrašnjosti njene korotacije) biti doveden prema

centru, dok će gas vlakana morati sačekati vani da prečka oslabi. On će biti sakupljan periodično, s prekidima.

Akreacija međugalaktičkog gasa igra manje ili više važnu ulogu u raznim scenarijima. Tako u monolitnom scenariju, akreacija gasa formira spiralnu galaksiju u disku oko ispučenja koje je ranije formirano. U slučaju hijerarhijskog scenarija prevaga spiralnih galaksija danas se može objasniti samo naknadnom akreacijom gasa, a sve u cilju formiranja diska oko sferoida. U ovom scenariju sudari između galaksija imaju tendenciju formiranja sferoida i ispučenja. A u posljednom scenariju, koji se temelji na sporijevoluciji, ispučenje se formira na osnovu diska, iako može biti obogaćeno akreacijom malih saputnika.

Numeričke simulacije, ali i posmatranja potvrđuju da svaki od navedenih scenarija pretpostavlja prisustvo kosmičkih vlakana, koji sadrže glavni dio materije. Naime, kako pokazuju veliki popisi stotina hiljada galaksija (kao što je SDSS) raspodjela galaksija u svemiru prati geometriju vlakana. S druge strane, posmatranja šume Lyman-alpha-linija (linija atoma vodika u njegovom osnovnom nivou) u apsorpciji ispred dalekih kvazara, pokazuje da je svemir ispunjen gasovitim strukturama. Te strukture je teško opaziti, što je kompatibilno s kosmičkim vlaknima, s obzirom da je glavni dio volumena ispunjen ioniziranim i veoma rijetkim gasom. A možda je to čak i vakuum.

Što se tiče formiranja diskova galaksija, dugotrajna evolucija omogućava da se objasni sadašnje prisustvo tankih diskova zvijezda u spiralnim galaksijama, poput naše galaksije. To je i prednost dugotrajne evolucije. Dok isključivo hijerarhijsko formiranje, s interakcijom i stapanjem galaksija, zagrijava diske koji bi danas svi trebali biti veoma debeli. Kolika je važnost akreacije gasa može se vidjeti u raznim posljedicama po morfologiju galaksija. Neke od takvih posljedica su *asimetrija i iskrivljenosti*.

4.7.1. Asimetrije i decentriranja galaksija

Spiralne galaksije nisu simetrične, čak šta više polovina od njih je i deformirana, tako da se centar gravitacije ne podudara sa jezgrom galaksije. Ovakve asimetrije narušavaju optički disk. U gasovitoj komponenti, koja se širi znatno dalje u velikom poluprečniku, one su još spektakularnije. Također, u kasnim spiralnim galaksijama, koje su bogatije gasom, stepen asimetrije je veći.

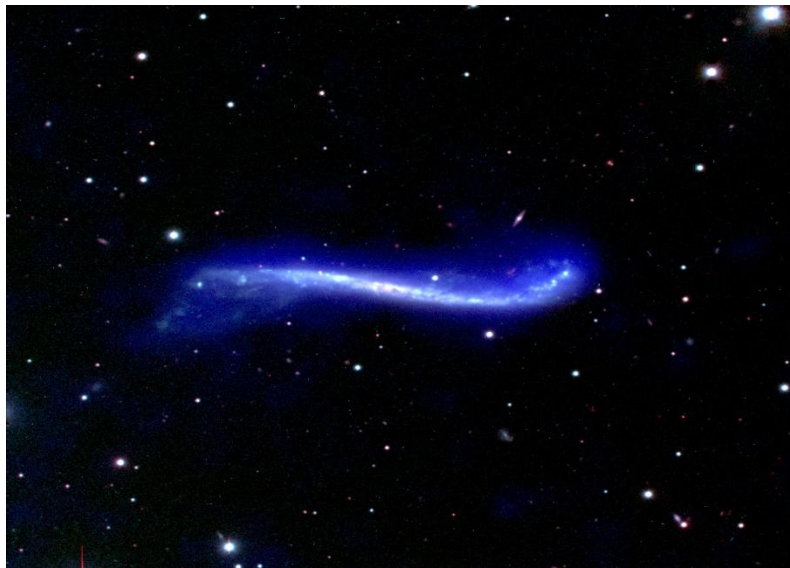
Ako se uzmu u obzir izolirane galaksije, učestalost asimetrija bi predstavljala problem. Malo je okolnosti u kojima bi se neki vlastiti modus (koji odgovara ovom decentriranju) mogao spontano povećati i zatim održati. Ove bi deformacije, u većini slučajeva, trebale oslabiti i nestati, i to u kratkom vremenskom intervalu. Taj interval je mnogo kraći nego što je vrijeme između dvije interakcije galaksija koje ih mogu stvoriti.

Mogli bismo očekivati korelaciju između posmatranja decentriranja i prisustva saputnika u blizini, i to ako su jedino interakcije među galaksijama odgovorne za asimetrije. Međutim, to i nije slučaj. Da bi došlo do velikog broja ovih deformacija, neki drugi mehanizam bi morao biti uzrok tome.

Ove asimetrije je moguće stvoriti ukoliko kosmička vlakna neprestano napajaju galaksije međugalaktičkim gasom. Zapravo, akreacija gasa je simetrična samo dugoročno. Međutim, galaksija hvata gas prvenstveno s jedne strane, i to tokom nekoliko dinamičkih vremena galaksije. Ova asimetrija narušava galaksiju, tjerajući je da oscilira i vrši precesiju, dok deformaciju održava skoro neprekidan talas gasa.

4.7.2. Iskrivljenje ravni ili "warps"

Većina galaktičkih diskova nisu u potpunosti ravni. Naime, česta je pojava da se diskovi podižu s jedne strane, a spuštaju s druge. To je deformacija, koja ima oblik palačinka, a samo to iskrivljenje je poznato pod nazivom "warp".



Slika 4. Galaksija "Integral"⁹

Primjer ravni galaksije, koja je iskrivljena poput palačinka, prikazan je na prethodnoj slici. U pitanju je galaksija pod nazivom "Integral". Ovaj fenomen praktično sve pokazuje, ukoliko gledamo ravni u emisionoj liniji atomskog vodika, na 21 cm talasne dužine. Međutim, ne može se objasniti isključivo interakcijama između galaksija. Naime, interakcije su u stanju da pobude jednu takvu deformaciju, ali kad se interakcija jednom završi, deformacija bi trebala oslabiti i rastvoriti se preferencijalnom precesijom. Precesiju vrši svaka zvijezda ili oblak gasa, u nagnutoj putanji, i to oko rotacione ose galaksije, s veoma različitim periodom.

Suprotno tome, ovu deformaciju može neprestano stvarati akreacija vanjskog gasa. Ona se vrši s kinetičkim momentom koji je različit od momenta galaksije. Zapravo, zbog ovog fenomena disk galaksije neprestano mijenja osu rotacije. Procjenjuje se da galaktički disk može u potpunosti promijeniti smjer nakon 7 milijardi godina.

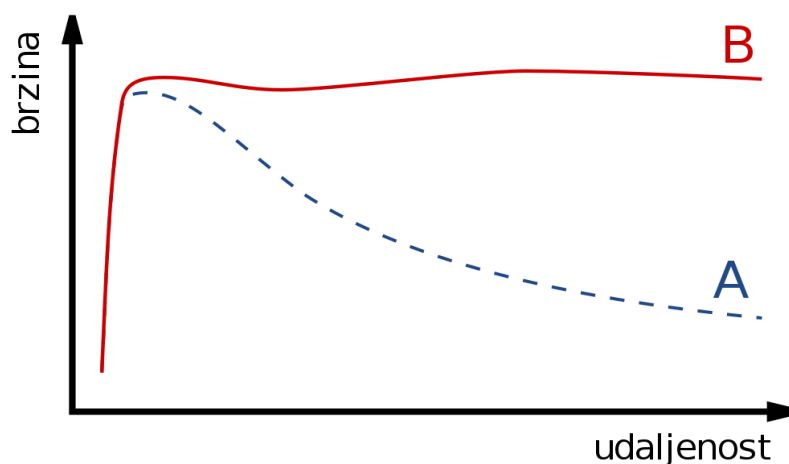
Uvijanje se ponekad posmatra iz raspodjele zvijezda u galaksiji, ali češće se posmatra iz distribucije neutralnog vodikovog gasa mjenenog iz emisijske linije vodika. Porijeklo uvijanja u galaksijama još uvijek nije dobro razumljivo, a jedna od mogućnosti je presretanje s drugim galaksijama koje ozbiljno remete orbite gasa i zvijezda.

5. Uticaj tamne materije na dinamiku galaksija

Promatranja pokazuju kako je svemir velikim dijelom sačinjen od neke vrste nepoznate materije. Naime, tamna materija je naziv za materiju u svemiru koja niti emituje niti reflektuje elektromagnetno zračenje, i upravo zbog toga je ne možemo vidjeti. Postojanje tamne materije je prvi puta predloženo od strane Nizozemskog astronoma Jana Oarta 1930-tih, kada je promatrao kretanja zvijezda u Sunčevoj blizini. Kako se galaksije nisu raspadale, on je zaključio kako mora postojati mnogo materije koja bi zadržala zvijezde od odlaska iz centra galaksija. Pretpostavio je da u Sunčevoj blizini postoji tri puta više tamne materije od one koja nam je poznata.

5.1. Krivulje rotacije

Rotacijske krivulje galaksija su grafovi koji prikazuju odnos brzine obilaženja zvijezda oko središta i udaljenosti od središta. Mjerenjem brzina zvijezde na različitim udaljenostima od središta moguće je izmjeriti masu unutar raznih orbita, te odrediti kako je masa u galaksiji raspoređena. Uzimajući u obzir samo masu koja svijetli (zvijezde) bilo je za očekivati da će brzine zvijezde lagano opadati s udaljenošću. Međutim, rezultati su pokazali suprotno. Izmjerene brzine zvijezde su bile daleko iznad očekivanih, na osnovu čega zaključujemo da je veći dio mase galaksije nevidljiv. Izračunato je postojanje tamne materije izvan granica središnjeg svijetlog diska galaksije, te u halou iznad i ispod diska. Ovakva mjerenja su izvršena na velikom broju galaksija, sva s istim rezultatima. Zapravo, galaksijske rotacijske krivulje su najjači dokaz postojanja velikog udjela tamne materije u masi svemira.



Slika 5. Predviđena (A) i stvarna (B) rotacijska krivulja tipične spiralne galaksije¹⁰

Dakle, jedna od osnovnih komponenti mase (na nivou galaksija) se otkriva pomoću njihovih rotacionih krivulja. Trebalo bi pretpostaviti postojanje haloa nevidljive materije, kako bi se objasnile brzine vidljive mase, koje se ne ponašaju u skladu sa Keplerovim zakonima. Zapravo, masa haloa nevidljive materije je praktično ista kao i vidljiva masa, ali u krajnjem poluprečniku gdje su izmjerene krivulje rotacije (za slučaj divovskih galaksija). U slučaju patuljastih galaksija, tamna materija je čak dominantna. Prema pravilu, što je masa galaksije slabija utoliko je proporcija tamne mase prema ukupnoj masi veća.

S obzirom da vidljive komponente u jednoj galaksiji imaju jako mali uticaj, onda patuljaste galaksije predstavljaju, takoreći, idealan laboratorij za utvrđivanje radijalne raspodjele tamne materije u toj galaksiji. Istovremeno, neizvjesnost u pitanju odnosa masa/luminozitet zvjezdane komponente u divovskoj galaksiji ne omogućava da se tačno ograniči raspodjela tamne materije u središtu (tek mali udio). Dokaz da gustoća tamne materije ne predstavlja maksimum izražen u centru donose rotacione krivulje patuljastih galaksija. Zapravo, prije bi to bila neka ploha, što opet nije u skladu sa predviđanjima standardnog modela. To nam govori da je ograničeno naše poznavanje prirode tamne materije ili da fizika bariona još uvijek nije dobro shvaćena, te da bi ona mogla djelovati kao fenomen samoregulacije.

Na temelju mjerenja krivulja rotacije bliskih spiralnih galaksija Vera Rubin je ustanovila da je 90% materije prosječne galaksije nevidljivo (početkom 1970-tih). Izmjerene krivulje rotacije upućuju na to da u haloima (vanjskim sferičnim područjima) galaksija mora postojati deset puta više nevidljive materije nego što ima opažene materije. Dio te tamne materije mogu biti smeđi ili bijeli patuljci, koji djeluju kao gravitacijske leće, na temelju čega bi mogli biti detektovani.

Već je poznato da spiralne i eliptične galaksije, takoreći, plivaju u velikim haloima tamne materije, ali još uvijek nije poznat njen tačan raspored.

5.2. Stabilnost, prečke i tamna materija

Što se tiče uticaja tamne materije na dinamiku galaksija ona, s jedne strane, stabilizira galaktičke diskove. Međutim, ne učestvuje u gravitacionim nestabilnostima diska, ukoliko je njihova raspodjela zaista raspodjela sfere ili sferoida. Prve numeričke simulacije su potvrdile da je ovaj disk manje nestabilan kako bi formirao prečke. A opet to je iz razloga što je manje samogravitirajući, jer je dijelom podređen gravitaciji haloa. Ipak, halo tamne materije (dominantan u centru galaksije), također, može pomoći zvijezdama diska da izgube nešto ugaonog momenta rezonantnom interakcijom. Prijenos ugaonog momenta doprinosi formiranju prečke. Povećanje nestabilnosti moglo se primijetiti u novijim numeričkim simulacijama, tamo gdje halo tamne materije nije više krut. On je, zapravo, sačinjen od dovoljno čestica da bi bio osjetljiviji na fenomene rezonance.

Ipak, razvoj prečki omogućava da se postave ograničenja na količinu tamne materije, koja može postojati u centru spiralnih galaksija. Prečkasti talas je zakočen i usporava zbog dinamičkog trenja na tamni halo. Kako bi bio kompatibilan s mjerama rotacionih brzina prečki, također, mora imati zanemarivu masu u unutrašnjosti poluprečnika prečke.

5.3. Zakoni skala

1977. godine Tully i Fisher su otkrili da postoji jaka veza između ukupne luminoznosti (ili ukupne mase) jedne galaksije i njene maksimalne rotacione brzine. Ta relacija je, u početku, bila posebno važna kada je u pitanju određivanje udaljenosti galaksija (bez obzira na njihov pomak ka crvenom). Zapravo, brzina rotacije odgovara širini spektra koji je posmatran, a s druge strane je i mjera koja ne zavisi od udaljenosti. Dakle, ta korelacija izravno daje stvarnu luminoznost galaksije. Da bismo procijenili udaljenost galaksije, dovoljno je uporediti stvarnu sa prividnom luminoznošću.

Kako je brzina maksimalne rotacije u suštini u funkciji prisustva tamne materije galaksija, ovaj odnos služi i za određivanje njenih općih osobina (u odnosu na vidljivu materiju). Ovaj odnos, također, važi i u slučaju nepravilnih patuljastih galaksija, koje su bogate gasom i kojima dominira tamna materija. Naime, sve navedeno važi ali pod uslovom da se uzme u obzir masa gasa, koja inače nije uzeta u obzir u optičkoj luminoznosti galaksije. Dakle zakon Tully-Fishera je zaista odnos između vidljive mase i rotacione brzine.

6. Određivanje udaljenosti galaksija

Da bismo saznali više o galaksijama (ne samo njihov oblik, boju i veličinu) moramo znati koliko su udaljene. Jedan od najvažnijih, iako teških, zadataka koje su astronomi izvršili u prošlom stoljeću bilo je upravo određivanje udaljenosti galaksija. Mjerenje udaljenosti galaksija je jedan i od najizazovnijih zadataka s kojima se susrećemo kada pokušavamo razumjeti galaksije i svemir u cjelini. Ovaj zadatak je od posebnog značaja, s obzirom da galaksije i klasteri (grupe) galaksija čine osnovnu strukturu svemira. Stoga, sposobnost da odgovorimo na temeljna pitanja o porijeklu i sudbini svemira ovise o tome koliko dobro znamo udaljenosti galaksija.

Naša određivanja astronomskih udaljenosti ovise o lancu metoda, u kojem nam svaki naredni korak omogućava mjerenje većih udaljenosti u svemiru. Najpouzdanije astronomske udaljenosti su one do kojih se došlo mjerenjem *paralaksa*. Međutim, samo nebeski objekti, koji su bliži od nekoliko stotina parseka, pokazuju dovoljno velike paralakse da bi se njihova udaljenost mogla naći ovom metodom. Zato što paralaksa predstavlja prividan pomak u položaju zvijezde, mjerenje udaljenosti paralaksom zahtijeva poznavanje precizne udaljenosti Sunce-Zemlja, ili astronomske jedinice (AJ). Astronomska jedinica je, naime, mjerna jedinica za dužinu, i približno je jednaka udaljenosti Zemlje od Sunca.

Astronomi mjere AJ tehnikom koja se zove **radarski domet**, u kojoj se radio talasi šalju sa Zemlje i odbijaju od Venere. S obzirom da radio-talasi putuju brzinom svjetlosti, vrijeme trajanja povratnog putovanja za radarske signale nam govori o udaljenosti Venere od Zemlje. Onda možemo koristiti Keplerove zakone i malo geometrije kako bismo izračunali dužinu AJ. Korištenje radarskog dometa za mjerenje AJ predstavlja prvu vezu u lancu udaljenosti, a mjerenja udaljenosti putem paralakse do obližnjih zvijezda predstavljaju drugu vezu.

Najveće udaljenosti koje se još uvijek mogu određivati direktnim geometrijskim metodama su one do bližih zvijezda. Takve zvijezde se tokom godine, zbog kretanja Zemlje oko Sunca, prividno kreću po nebeskom svodu, tj. relativno obzirom na udaljene zvijezde. Mjereći to kretanje, tj. ugao paralakse, može se odrediti udaljenost do zvijezde. Što su zvijezde udaljenije, to je njihova paralaksa manja i teže je odrediti. Najudaljenije zvijezde čiju je udaljenost bilo moguće izmjeriti ovom metodom su zvijezde u klasteru zvijezda Hijade (udaljenost od 46 parseka). Parsek (pc) je osnovna jedinica za mjerenje udaljenosti u svemiru, koja u posljednje vrijeme potiskuje svjetlosnu godinu (1 pc = 3.26 svjetlosnih godina).

Naime, udaljenosti galaksija obično se mjere na tri načina:

1. standardnim svijećama
2. Tully-Fisher-ovim zakonom
3. Hubble-ovim zakonom

Kao standardne svijeće mogu se koristiti cefeide, superdivovi, kuglasti skupovi, HII regije i supernove tipa Ia. Navedene standardne svijeće su dobre iz 4 razloga. Prvo, vrlo su sjajne, tako da ih možemo vidjeti na velikim udaljenostima. Drugo, astronomi su prilično sigurni u njihove luminozitet, pa mogu biti isto toliko sigurni u tačnost izmjerenih udaljenosti. Treće, lako ih je prepoznati prema boji ili prema krivulji sjaja. I četvrto, prilično su česte pojave, tako da se preko njih može dobiti udaljenost mnogih galaksija. Međutim, postoji i jedan nedostatak. Što je udaljenija galaksija koju promatramo, manje ima standardnih svijeća, pa su mjerenja nesigurnija.

Za najbliže galaksije udaljenosti nalazimo koristeći manje direktne metode, za razliku od ove. Načini za pronalaženje udaljenosti galaksija su bili postupni. U svakom koraku, objekti poput HII regija u galaksijama, za koje su udaljenosti već određene, uspoređuju se sa istim vrstama objekata u udaljenijim galaksijama ili klasterima galaksija.

6.1. Standardne svijeće

Jednom kad izmjerimo udaljenosti do obližnjih zvijezda putem paralakse, onda možemo početi mjeriti udaljenosti do drugih zvijezda na isti način, kako bismo mogli procijeniti udaljenost do ulične lampe noću. Ako ulična lampa ne izgleda veoma svijetlo, onda je ona vjerovatno daleko. A ako izgleda veoma svijetlo, onda je vjerovatno prilično blizu.

Udaljenost lampe možemo preciznije odrediti, ukoliko možemo izmjeriti njenu prividnu svjetlost. Na primjer, pretpostavimo da vidimo udaljenu uličnu lampu i da znamo da sve ulične lampe ovog tipa ispuštaju 1 000 vati svjetlosti. Ako zatim mjerimo prividnu svjetlost ulične lampe, možemo izračunati njenu udaljenost pomoću zakona obrnutog kvadrata za svjetlost. Naime, ovaj zakon nam govori da se prividna svjetlost izvora svjetlosti smanjuje s kvadratom njegove udaljenosti od nas. Matematički zapisano to izgleda ovako:

$$\textit{prividna svjetlost} = \frac{\textit{luminozitet}}{4\pi \times (\textit{udaljenost})^2} \quad (1)$$

Ukoliko je objekat dovoljno blizu da bismo mogli izmjeriti njegovu udaljenost putem paralakse, onda možemo upotrijebiti zakon kojeg smo prethodno naveli da izračunamo njegov luminozitet. Obrnuto, ako je objekat standardna svijeća - u tom slučaju imamo dobru procjenu njegovog luminoziteta - možemo riješiti zakon obrnutog kvadrata da bismo pronašli njegovu udaljenost:

$$\textit{udaljenost} = \sqrt{\frac{\textit{luminozitet}}{4\pi \times (\textit{prividna svjetlost})}} \quad (2)$$

Objekat poput ulične lampe, za koji ćemo vjerovatno znati pravi luminozitet, predstavlja ono što astronomi nazivaju **standardnom svijećom**. Pojam standardna svijeća podrazumijeva izvor svjetlosti poznate, standardne luminoznosti. Zapravo, standardna svijeća je astronomski objekt poznatih svojstava, koji se koristi za određivanje udaljenosti u svemiru. Naziv standardna svijeća potekao je od činjenice da se za određivanje udaljenosti koristi razlika između stvarnog i prividnog sjaja.

Međutim, za razliku od sijalica, astronomski objekti ne dolaze označeni sa snagom. Naime, astronomski objekt može poslužiti kao standardna svijeća samo ako na neki način poznamo njegov stvarni luminozitet, a da prethodno ne izmjerimo njegovu prividnu svjetlost i udaljenost. Srećom, mnogi astronomski objekti ispunjavaju ovaj zahtjev. Na primjer, svaka zvijezda koja je blizanac našeg Sunca - to jest zvijezda glavnog niza spektralnog tipa G2 - trebala bi imati približno isti luminozitet kao i Sunce.

Ako izmjerimo prividnu svjetlost zvijezde poput Sunca, možemo pretpostaviti da ona ima istu svjetlost kao i Sunce ($3,8 \times 10^{26}$ vati), a zatim pomoću zakona obrnutog kvadrata za svjetlost procijeniti njenu udaljenost.

Izvan nekoliko stotina svjetlosnih godina, za koje udaljenost možemo mjeriti paralaksom, koristimo standardne svijeće za većinu mjerenja kosmičkih udaljenosti. Ova mjerenja udaljenosti uvijek posjeduju određenu nesigurnost, jer nijedan astronomski objekt nije savršena standardna svijeća. Određivanje udaljenosti pomoću standardnih svijeća je podložno greškama zbog apsorpcije svjetla od strane međuzvezdane materije, koja se nalazi između nas i promatranog objekta. Uticaj međuzvezdane materije na sjaj objekta se zove ekstinkcija i objekat čini crvenijim.

Kao što smo na početku naveli, mjerenje astronomskih udaljenosti predstavlja jedan od najizazvnijih zadataka, ali se taj zadatak ipak svodi na pronalazak objekata koji prave najbolje standardne svijeće. Što smo sigurniji u stvarni luminozitet objekta, to smo sigurniji u njegovu udaljenost.

6.2. Fitovanje glavnog niza

Iako su zvijezde poput Sunca relativno dobre standardne svijeće, one imaju ograničenu upotrebu, jer se takve zvijezde nalaze na relativno kratkim udaljenostima. Da bismo izmjerili udaljenosti veće od 1000 svjetlosnih godina, potrebne su nam svjetlije standardne svijeće. Svjetlije zvijezde glavnog niza predstavljaju prvi izbor, jer sve zvijezde glavnog niza određenog spektralnog tipa imaju približno isti luminozitet. Međutim, prije nego što možemo upotrijebiti bilo koju zvijezdu glavnog niza kao standardnu svijeću, prvo moramo na neki način poznavati njen stvarni luminozitet.

Stoga moramo slijediti dva koraka, da bismo mogli koristiti svijetle zvijezde glavnog niza kao standardne svijeće:

1. Identificiramo klaster zvijezda koji je dovoljno blizu, da odredimo njegovu udaljenost paralaksom i crtamo njegov H-R dijagram. Kada znamo udaljenosti do zvijezda klastera, onda možemo upotrijebiti zakon obrnutog kvadrata za svjetlost kako bismo utvrdili njihove prave luminozite iz njihove prividne svjetlosti.
2. Možemo gledati u zvijezde u drugim klasterima, koje su predaleko za mjerenja paralaksom, i mjeriti njihovu prividnu svjetlost. Ako pretpostavimo da zvijezde glavnog niza u ostalim klasterima imaju iste luminozite kao njihove susjede u obližnjem klasteru, onda možemo izračunati njihove udaljenosti iz zakona obrnutog kvadrata.

Astronomi 20. vijeka postavili su temelje za ovu tehniku kalibracijom luminoziteta (svjetlosti) na standardnom H-R dijagramu. Ova kalibracija se u velikoj mjeri oslanjala na jedan, obližnji klaster zvijezda - klaster Hijade u sazviježđu Bika, čija je udaljenost sada poznata iz njegove paralakse. Naime, moguće je pronaći udaljenosti do drugih klastera zvijezda uspoređujući prividnu svjetlost njihovih zvijezda glavnog niza s onima u klasteru Hijade, i pretpostavljajući da sve zvijezde glavnog niza iste boje imaju isti luminozitet. Ova tehnika određivanja udaljenosti, poredeći glavne nizove u različitim klasterima zvijezda, je nazvana **fitovanje glavnog niza**.

Klaster Hijade ne sadrži zvijezde svakog spektralnog tipa. Stoga, izgradnja kompletnog, standardnog H-R dijagrama je zahtijevala da astronomi koriste fitovanje glavnog niza, kako bi pronašli udaljenosti do mnogih obližnjih klastera zvijezda, sve dok nije predstavljen svaki spektralni tip. Danas, uz dobro uspostavljen standardni H-R dijagram, možemo upotrijebiti fitovanje glavnog niza za mjerenje udaljenosti do bilo kojeg klastera zvijezda, dovoljno blizu da identificiramo pojedine zvijezde glavnog niza.

U principu, potrebno je izmjeriti prividnu svjetlost samo jedne zvijezde u klasteru, da bismo odredili udaljenost klastera. Nakon što odredimo spektralni tip zvijezde, možemo upotrijebiti njen očekivani stvarni luminozitet i zakon obrnutog kvadrata da izračunamo njenu udaljenost. Ovaj postupak se često koristi za mjerenje udaljenosti do izoliranih zvijezda, koje nisu članice klastera. Međutim, u praksi fitovanje glavnog niza daje preciznije rezultate. Prednost fitovanja glavnog niza, u odnosu na upotrebu jedne zvijezde u klasteru, je ta što smanjuje nesigurnost u proračunu udaljenosti. Upoređujući čitave glavne nizove, u osnovi uspoređujemo više različitih zvijezda odjednom, i na taj način postizemo mnogo preciznija mjerenja udaljenosti.

6.3. Cefeidne varijable

Fitovanje glavnog niza dobro funkcioniše za mjerenje udaljenosti do klastera zvijezda širom Mliječnog puta, ali ne i za mjerenje udaljenosti do drugih galaksija. Većina zvijezda glavnog niza nisu dovoljno svijetle da bi se vidjele u drugim galaksijama, čak i pomoću naših najvećih teleskopa. Umjesto toga, potrebne su nam veoma svijetle zvijezde, koje će nam služiti kao standardne svijeće za mjerenja udaljenosti izvan Mliječnog puta.

Najkorisnije svijetle zvijezde, koje koristimo za mjerenje udaljenosti do galaksija, nazivaju se **Cefeide**. Ove zvijezde, koje odlikuje periodična promjena sjaja, naizmjenično postaju tamnije i svjetlije s periodima raspona od nekoliko dana do nekoliko mjeseci. Svaka Cefeida ima svoj određeni vremenski period između maximuma luminoziteta.

1912. godine Henrietta Leavitt je otkrila da su periodi Cefeida vrlo usko povezani sa njihovim luminozitetima. Što je duži period, to je zvijezda svjetlija. Možemo reći da se Cefeide pokoravaju odnosu period-luminozitet, koji nam omogućava da jednostavno odredimo (oko 10%) luminozitet Cefeida, mjerenjem vremenskog perioda tokom kojeg njihova svjetlost varira. Stoga, jednom kada izmjerimo period Cefeide, znamo njen luminozitet i onda možemo upotrijebiti zakon obrnutog kvadrata da odredimo njenu udaljenost.

Leavitt je pažljivim promatranjem Cefeida u susjednoj galaksiji (Veliki Magellanov oblak) otkrila odnos period-luminozitet, ali nije znala zašto Cefeide variraju na taj poseban način. Ono što nam je sada poznato jeste da su Cefeide primjeri pulsirajućih promjenljivih zvijezda. Variraju u luminozitetu, zato što one zapravo pulsiraju unutra i van veličine, postajući svjetlije kako postaju veće, a zatim postaju tamnije kako se smanjuju. Odnos period-luminozitet vrijedi, jer veće Cefeide (a time i svjetlije) duže pulsiraju.

Gotovo cijelo stoljeće Cefeide su korištene za mjerenje udaljenosti do susjednih galaksija. One su igrale kritičnu ulogu u otkrićima Edwin-a Hubble-a. Naime, jedna od glavnih misija svemirskog teleskopa Hubble bila je izmjeriti tačne udaljenosti do galaksija udaljenih do 100 miliona svjetlosnih godina, proučavanjem Cefeida unutar njih. Ta udaljenost nam možda zvuči veoma velika, ali je ona zapravo još uvijek prilično mala u suporedbi sa nekim drugim udaljenijim galaksijama.

Zahvaljujući poznavanju veze između perioda promjene i stvarnog sjaja, Cefeide je moguće koristiti kao pouzdane indikatore udaljenosti. Najsjanije Cefeide imaju sjaj oko 100 hiljada puta veći od Sunca, i iz tog razloga ih je moguće primjetiti u susjednim galaksijama. Zahvaljujući teleskopu Hubble danas ih možemo promatrati do udaljenosti od 25 miliona parseka. Edwin Hubble je, upravo zahvaljujući otkriću Cefeida u galaksiji Andromeda, pouzdano odredio njenu udaljenost.

6.4. Udaljene standardne svijeće

Astronomi su otkrili nekoliko tehnika za procjenu udaljenosti, izvan onih za koje možemo posmatrati Cefeide. Posljednjih godina, najznačajnija od ovih tehnika, pokazala se upotreba **supernove bijelog patuljka** kao standardne svijeće.

Podsjetimo se da se pretpostavlja da supernova bijelog patuljka nastaje eksplozijom zvijezde bijelog patuljka, koja je dostigla granicu 1,4-Sunčeve mase. Sve supernove, kao ova, trebale bi imati gotovo isti luminozitet, jer sve dolaze od zvijezda iste mase, koje ekspodiraju na isti način. Iako su supernove bijelog patuljka rijetke u bilo kojoj pojedinoj galaksiji, nekoliko ih je otkriveno tokom prošlog stoljeća, i to u galaksijama udaljenih

oko 50 miliona svjetlosnih godina od Mliječnog puta. Astronomi su pažljivo evidentirali te događaje, tako da danas možemo odrediti stvarne svjetlosti ovih supernova pomoću Cefeida, za mjerenje udaljenosti do galaksija u kojima su se dogodile. Ova mjerenja potvrđuju da su luminoziteti svih supernova bijelog patuljka približno isti.

Sobzirom da su supernove bijelog patuljka tako sjajne, možemo ih uočiti čak i kad se pojave u galaksijama udaljenim milijardama svjetlosnih godina. Upotreba supernova bijelog patuljka, kao standardnih svijeća, omogućava nam mjerenje udaljenosti galaksija u dalekim krajevima posmatranog svemira, upotpunjujući lanac udaljenosti. Međutim, broj galaksija čije udaljenosti možemo mjeriti ovom tehnikom je relativno mali, jer se ovakve supernove javljaju samo jednom svakih nekoliko stotina godina, u tipičnoj galaksiji.

Druge tehnike se mogu koristiti za procjenu udaljenosti galaksija, u kojima nije posmatrana supernova bijelog patuljka. Jedna od tih, korisna metoda, oslanja se na bliski odnos koji je primijećen između ukupnih luminoziteta spiralnih galaksija i rotacionih brzina njihovih diskova: Što je rotaciona brzina veća, to je više svjetlija. Ovaj odnos nazvan Tully-Fisher (nakon njegovih otkrivača) vrijedi, jer oboje, i luminozitet i rotaciona brzina ovise o masi galaksije. Tully-Fisherov zakon otkrili su u sedamdesetima astronomi Brent Tully i Richard Fisher. Oni su primijetili da je debljina spektralne linije atoma vodika, u spektru galaksije ovisna o ukupnom luminozitetu. Što su linije deblje, to je veći luminozitet. Razlog tome je što radijacija koja dolazi sa jedne strane galaksije koja rotira je pomaknuta prema crvenom dijelu spektra, jer se taj dio od nas udaljava, dok je u isto vrijeme drugi dio pomaknut prema plavom, jer nam se približava. Ti pomaci su direktno povezani sa brzinom rotacije galaksije, a ona opet ovisi o masi. Što je galaksija masivnija, sadrži više zvijezda, a više zvijezda znači i veći luminozitet. Dakle, luminozitet galaksije ovisi o broju zvijezda koje ona sadrži, što je povezano sa ukupnom količinom materije u njoj, a ukupna količina materije određuje rotacionu brzinu galaksije. Ova tehnika je upotrebljiva za galaksije na udaljenostima većim od 100 Mpc. Kako danas stvari stoje, ova metoda daje nešto manje vrijednosti nego metoda standardnih svijeća. Međutim, astronomi se nadaju da će kalibracijama na bližim galaksijama moći uskladiti te dvije metode. Na taj način će mjerenja na udaljenijim galaksijama biti mnogo pouzdanija.

Na primjer, možemo izmjeriti rotacionu brzinu spiralne galaksije upoređujući Doppler-ov pomak dijela diska koji se kreće prema nama, i dijela koji se udaljava od nas. Nakon što izmjerimo rotacionu brzinu spiralne galaksije, odnos Tully-Fisher nam govori o njenoj stvarnoj svjetlosti, što samu galaksiju čini standardnom svijećom, koju možemo koristiti da odredimo njenu udaljenost

6.4.1. Sažetak lanca udaljenosti

Sa svakom vezom u lancu udaljenosti neizvjesnosti postaju nešto veće. Stoga, iako nam je poznata izuzetno precizna udaljenost Zemlja-Sunce na početku lanca, udaljenosti do najudaljenijih dosega posmatranog svemira ostaju nesigurne za oko 10%. Slijedeći lanac udaljenosti:

- **Radarski domet:** Mjerimo udaljenost Zemlja-Sunce na osnovu odbijenih radio talasa sa planeta, i koristeći malo geometrije.
- **Paralaksa:** Mjerimo udaljenosti do susjednih zvijezda posmatrajući kako se njihovi položaji mijenjaju u odnosu na udaljenije zvijezde u pozadini, kao što Zemlja kruži oko Sunca. Stoga, te udaljenosti se oslanjaju na naše poznavanje udaljenosti Zemlja-Sunce, određeno sa radarskim dometom do planeta.
- **Fitovanje glavnog niza:** Poznata nam je udaljenost do klastera zvijezda Hijade, koji se nalazi u našoj galaksiji, kroz paralakse. Upoređivanjem prividne svjetlosti njegovih zvijezda glavnog niza sa zvijezdama u drugim klasterima, daje nam udaljenosti do tih ostalih klastera zvijezda u našoj galaksiji.
- **Cefeidne varijable:** Proučavanjem Cefeida u klasterima zvijezda sa udaljenostima izmjerenim fitovanjem glavnog niza, doznajemo tačan odnos period-luminozitet za Cefeide. Nakon što nađemo Cefeidu u nekom udaljenijem klasteru zvijezda ili galaksiji, onda možemo odrediti njen luminozitet mjerenjem perioda između njenih vrhova (pikova) u svjetlosti, a zatim upotrijebiti taj luminozitet da odredimo udaljenost.
- **Udaljeni standardi:** Mjerenjem udaljenosti do relativno obližnjih galaksija sa Cefeidama, doznajemo stvarne luminozite supernova bijelog patuljka, ali i drugih dalekih standardnih svijeća, što nam omogućava mjerenje velikih udaljenosti širom svemira.

Pomoću ovih udaljenih standarda, astronomi su uspjeli da kalibriraju još jedan, takoreći "alat", poznat kao Hubble-ov zakon, koji se može koristiti za mjerenje udaljenosti do galaksija širom svemira.

6.5. Hubble-ov zakon

Hubble-ovo određivanje udaljenosti galaksije Andromeda osiguralo mu je trajno mjesto u historiji astronomije, ali Hubble se nije zaustavio na tome. Nastavio je da procjenjuje udaljenosti mnogo više galaksija. U samo nekoliko godina došao je do jednog od najčudesnijih otkrića u historiji nauke: Svemir se širi.

Od 1910-tih astronomi su znali da su spektri većine spiralnih galaksija obično pomjereni prema crvenom dijelu spektra. Podsjetit ćemo se da se crveni pomaci javljaju kada se objekt, koji emituje radijaciju, udaljava od nas. S obzirom da Hubble još uvijek nije bio dokazao da su spiralne galaksije zapravo odvojene od Mliječnog puta, niko nije razumio pravi značaj njihovih kretanja.

Nakon otkrića Cefeida u Andromedi, Hubble i njegovi suradnici proveli su nekoliko narednih godina užurbano mjereći crvene pomake galaksija, i procjenjujući njihove

udaljenosti. Kako su i Cefeide bile pretamne da bi se mogle vidjeti, u većini ovih galaksija, Hubble-u su bile potrebne svjetlije standardne svijeće za njegove procjene udaljenosti. Jedna od njegovih najdražih tehnika bila je upotreba najsjajnijeg objekta, koji se mogao vidjeti u svakoj galaksiji kao standardna svijeća, jer je pretpostavljao da su ti objekti veoma svijetle zvijezde, koje bi uvijek imale približno isti luminozitet.

1929. godine Hubble je objavio svoj zaključak: Što je galaksija više udaljena, njen crveni pomak je veći, te stoga se brže udaljava od nas. Ovo otkriće je nagovijestilo da se cijeli svemir širi.

Hubble-ova originalna tvrdnja temeljila se na nevjerovatno malom uzorku galaksija. Još nevjerovatnije od toga bila je Hubble-ova gruba procjena luminoziteta njegovih standardnih svijeća. Najsajnije zvijezde, koje je koristio kao standardne svijeće, doista su bile cijeli klasteri svijetlih zvijezda. Na sreću, Hubble je bio i hrabar i uspješan. Naknadno proučavanje mnogo većih uzoraka galaksija pokazalo je da se one zaista udaljavaju od nas, ali su one još dalje nego što je Hubble mislio.

Ideju da se udaljenije galaksije brže udaljavaju od nas izražavamo jednostavnom formulom, danas poznatom kao Hubble-ov zakon, koji se zapisuje ovako:

$$v = H_0 \times d \quad (3)$$

v - brzina kojom se galaksija udaljava od nas

d - udaljenost galaksije

H_0 - broj koji je nazvan Hubble-ova konstanta

Hubble-ov zakon obično pišemo u ovom obliku (3), kako bismo izrazili ideju da brzina galaksije ovisi o njenoj udaljenosti. S obzirom da se Hubble-ov zakon, u pricipu, odnosi na sve udaljene galaksije za koje možemo izmjeriti crveni pomak, onda on predstavlja najkorisniju tehniku za određivanje udaljenosti galaksija koje su jako udaljene.

Ipak nailazimo na dvije praktične poteškoće, kada pokušavamo koristiti Hubble-ov zakon za mjerenje galaktičkih udaljenosti:

1. Galaksije se ne povinuju savršeno Hubble-ovom zakonu. Naime, Hubble-ov zakon bi dao tačnu udaljenost samo za galaksiju čija se brzina određuje isključivo širenjem svemira. U stvarnosti gotovo sve galaksije doživljavaju "gravitacional tugs-gravitaciona istežanja" od drugih galaksija, koja mijenjaju njihove brzine od "idealnih" vrijednosti koje predviđa Hubble-ov zakon.
2. Čak i u slučaju kada se galaksije dobro pridržavaju Hubble-ovog zakona, udaljenosti koje njim nalazimo su tačne samo onoliko koliko je i naše najbolje mjerenje Hubble-ove konstante.

Prvi problem je najozbiljniji za obližnje galaksije. Na primjer, unutar lokalne grupe Hubble-ov zakon ne djeluje uopće: Galaksije u lokalnoj grupi su gravitacijski povezane

zajedno sa Mliječnim putem, i stoga se ne udaljavaju od nas u skladu sa Hubble-ovim zakonom. Međutim, ovaj zakon vrijedi prilično dobro za udaljenije galaksije. Brzine kojima se galaksije udaljavaju od nas na velikim udaljenostima su toliko velike, tako da su sva kretanja uzrokovana "gravitacional tugs-gravitaciona istežanja" susjednih galaksija mali u usporedbi.

Drugi problem znači da, čak i za udaljene galaksije, možemo znati samo relativne udaljenosti dok ne utvrdimo pravu vrijednost konstante H_0 . Na primjer, Hubble-ov zakon nam govori da je udaljavanje galaksije koja se kreće brzinom od 20 000 km/s dva puta više od one koja se kreće brzinom od 10 000 km/s, ali stvarne udaljenosti dviju galaksija možemo odrediti samo ako znamo H_0 . Donedavno su procjene vrijednosti ove konstante bile prilično nesigurne.

Jedna od glavnih misija svemirskog teleskopa Hubble bila je dobivanje tačne vrijednosti Hubble-ove konstante. Astronomi su pomoću teleskopa otkrili Cefeide u galaksijama udaljenih do oko 60 miliona svjetlosnih godina, a zatim su koristili te udaljenosti za određivanje luminoziteta dalekih standardnih svijeća, kao što su supernove bijelog patuljka.

Crtajući galaktičke udaljenosti, mjerene sa udaljenim standardnim svijećama, u odnosu na brzine koje su pokazivali njihovi crveni pomaci spuštenu je vrijednost Hubble-ove konstante (H_0) na negdje između 20 i 24 km/s po milionu svjetlosnih godina. Drugim riječima, za svaki milion svjetlosnih godina udaljenosti od nas, brzina galaksije koja se udaljava od nas je između 20 i 24 km/s. Na primjer, sa ovim rasponom vrijednosti za Hubble-ovu konstantu, Hubble-ov zakon predviđa da galaksija udaljena 100 miliona svjetlosnih godina, udaljavala bi se od nas brzinom između 2 000 i 2 400 km/s.

Širom svemira galaksije se udaljavaju jedna od druge, a ta činjenica implicira da su galaksije morale biti bliže u prošlosti. Prateći to usklađivanje unazad, zaključujemo da se sva materija u promatranom svemiru počela zbližavati i da je čitav svemir nastao u jednom trenu.

Možda djeluje primamljivo razmišljati o svemiru koji se širi kao kugla (lopta) galaksija, ali ovakav dojam je pogrešan. Koliko nam je poznato, svemir se ne širi ni po čemu, i ne postoje granice za raspodjelu galaksija u svemiru. Naime, na vrlo velikim skalama raspodjela galaksija čini se relativno blagom (ne dešavaju se velike promjene), što znači da bi cjelokupan svemir oko nas izgledao, manje ili više, isto bez obzira gdje se nalazimo. Ideja da je materija u svemiru ravnomjerno raspoređena, bez središta ili ivica, često se naziva "*Kosmološkim principom*". Iako ne možemo dokazati da je ovakva ideja istinita, ona je u potpunosti u skladu sa svim našim promatranjima svemira.

S obzirom da je teško vizualizirati beskonačnost, iskoristimo površinu balona (nešto što se može širiti, ali nema središta i ivica), kao analogiju sa svemirom koji se širi. Treba imati na umu da ovakva analogija koristi dvodimenzionalnu površinu balona da predstavi sve tri dimenzije prostora. Površina balona predstavlja cijeli svemir, a prostor

unutar i izvan balona nema značenje u ovoj analogiji. Osim smanjenog broja dimenzija, analogija dobro funkcionira jer sferna površina balona nema središta i ivica, baš kao što niti jedan grad nije središte Zemljine površine, i ne postoje rubovi na kojima bismo mogli hodati ili otploviti sa Zemlje.

Ono što je važno da znamo jeste da iako se svemir u cijelosti širi, pojedine galaksije i klasteri galaksija se ne šire, jer ih gravitacija drži zajedno. Stoga, galaksije možemo predstavljati "plastičnim" tačkama pričvršćenim na balonu. Onda, na takav način, možemo postići da se naš model svemira koji se širi, širi napuhavanjem balona.

Širenje svemira dovodi do komplikacija u raspravi o udaljenostima galaksija, koje smo do sada zanemarivali. Kako bismo razumjeli te komplikacije, zamislimo da posmatramo supernovu u dalekoj galaksiji. Pretpostavimo da se supernova dogodila prije 400 miliona godina, ali to tek sada vidimo. Svjetlost supernove mora da je putovala 400 miliona svjetlosnih godina da bi stigla do Zemlje. Problem je u tome što se svemir širi, čineći udaljenost između Zemlje i supernove danas većom, nego što je bila u vrijeme događanja supernove. Ukoliko bismo jednostavno rekli da je galaksija udaljena 400 miliona svjetlosnih godina, time nam ne bi bilo jasno da li mislimo na njenu udaljenost sada, na njenu udaljenost u vrijeme supernove ili na nešto između.

S obzirom da se udaljenosti galaksija uvijek mijenjaju, lakše je govoriti o objektima u smislu koliko vremena je potrebno njihovoj svjetlosti da dođe do nas - 400 miliona godina u slučaju supernove. Ovo nazivamo "vrijeme povratka" supernove. Drugim riječima, ovo vrijeme udaljenog objekta je razlika između trenutne starosti svemira i starosti svemira kada je svjetlost napustila objekt. Ako je "povratno vrijeme" 400 miliona godina, to znači da je svjetlost zaista putovala kroz svemir u periodu od 400 miliona godina da bi stigla do nas.

"Povratno vrijeme" objekta je direktno povezano sa njegovim crvenim pomakom. Podsjetimo se da nam crveni pomaci galaksija govore koliko se one brzo udaljavaju od nas. U kontekstu svemira koji se širi, crveni pomaci imaju dodatnu, detaljniju interpretaciju. Vratimo se ponovo na analogiju svemira sa balonom. Pretpostavimo da na površini balona nacrtamo talasaste linije, koje predstavljaju svjetlosne talase. Kako se balon napuhava, te talasne linije se protežu, a njihove talasne dužine povećavaju. Ovo istezanje dosta podsjeća na ono što se događa s fotonima u svemiru koji se širi. U tom slučaju fotoni se premještaju na duže, crvene talasne dužine. Ovaj efekat nazivamo *kosmološkim crvenim pomakom*. Zapravo, kosmološki crveni pomak odražava opće širenje svemira.

Naša potraga za proučavanjem galaksija i mjerenjem njihovih udaljenosti dovela nas je do samih granica posmatranog svemira.

Zaključak

Sa saznanjem da se do prije oko sto godina nije znalo da postoji drugih galaksija osim naše, a da se danas zna da postoji milijarde galaksija, možemo zaključiti kako se s razvojem tehnologije ekstremno brzo povećava znanje o svemiru i njegovim objektima. Zahvaljujući tehnologiji u stanju smo promatrati udaljene galaksije. Gledajući jako udaljene galaksije praktički gledamo u prošlost, te možemo promatrati sam proces nastanka galaksija, ali i njihov razvoj i evoluciju. Sposobnost gledanja u dalju prošlost postaje važna kada nam dopušta gledanje objekata onakvima kakvi su bili kad su bili samo djelić stari koliko su i danas, kao što su galaksije.

Zapravo, postoje tri osnovna scenarija prema kojima se odvija formiranje, ali i evolucija galaksija. Prvi od njih je takozvano monolitno urušavanje, odnosno veoma brzo urušavanje u sferoid. Zatim interakcija između galaksija i fuzija. Posljednji scenario je hijerarhijski scenario (dugotrajna evolucija), sa sljepljivanjem čestica materije na rubovima (akreacija). U ovom scenariju interakcije i stapanja među galaksijama su osnovni elementi njihovog formiranja. Zapravo, pokretači ove dugotrajne evolucije su asimetrije. Asimetrije su predstavljene prečkama i spiralnim kracima. Iako je uloga svakog od ovih scenarija još uvijek sporna, svakako da se objašnjenje nalazi u kombinaciji sve tri pojave. Numeričke simulacije omogućavaju bolje shvatanje uloge svakog od ovih scenarija. Također, nude nam i mogućnost njihovog upoređivanja sa posmatranjima.

Ako želimo da razumijemo početke kosmosa, prvo moramo znati kako se galaksije formiraju i zašto se razlikuju jedna od druge. Razlike koje se uočavaju u izgledu i dinamici galaksija daju mnoge informacije o tome kako se galaksije razvijaju. Mjerenje udaljenosti galaksija je ključno za određivanje starosti i veličine svemira, dok proučavanje evolucije galaksija pojašnjava kako se kosmos mijenjao i nastavlja da mijenja s vremenom.

Literatura

1. Bennett, J., Donahue, M., Schneider, N., Voit, M., The Cosmic Perspective, 5th Edition, Pearson addison-Wesley, San Francisco, 2008
2. Combes, F., Haywood, M., Collin, S., Durret, F., Guiderdoni B., Galaksije i kosmologija, Svjetlost, Sarajevo 2013.
3. Fix, J., Astronomy Journey to the Cosmic Frontier, 5th Edition, McGraw-Hill, New York, 2008.
4. <http://abyss.uoregon.edu/~js/ast123/lectures/lec11.html>
5. <http://www.znanje.org/i/i26/06iv06/06iv0617/WEB%20PREZENTACIJA.htm>
6. <https://physics.uiowa.edu/research/astronomy-astrophysics>
7. <http://www.astronomija.org.rs/zagonetni-svemir/5915-tadpole-galaxy-galaksija-punoglavac>
8. <http://comet-web.net/mira/wp/blog/2011/975/>
9. <https://public.nrao.edu/gallery/warped-disk-of-galaxy-ugc-3697-2/>
10. http://www.wikiwand.com/hr/Tamna_tvar
11. http://astrosvet.tripod.com/fizika_mehanika/svemirske_udaljenosti.htm