Razvoj galaksija

Podobnik, Franjo

Undergraduate thesis / Završni rad

2016

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Department of Physics / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Odjel za fiziku**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:160:633593

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**



Repository / Repozitorij:

Repository of Department of Physics in Osijek







SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU

ODJEL ZA FIZIKU



FRANJO PODOBNIK

RAZVOJ GALAKSIJA

Završni rad

Osijek, 29.08.2016.

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU

ODJEL ZA FIZIKU



FRANJO PODOBNIK

RAZVOJ GALAKSIJA

Završni rad

Predložen Odjelu za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku
radi stjecanja zvanja prvostupnika fizike

Osijek, 29.08.2016.

"Ovaj završni rad je izrađen u Osijeku pod vodstvom mentora: izv.prof.dr.sc. Branka Vukovića i komentora: dr.sc. Maje Varga Pajtler, viši asistent, u sklopu Sveučilišnog preddiplomskog studija fizike na Odjelu za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku".

Sadržaj

1. Uvod 1
2. Termalna povijest svemira 2
2.1. Standardni model elementarnih čestica 2
2.2. Anihilacija parova 3
2.3. Prvobitna nukleosinteza 4
2.4. Rekombinacija 4
2.5. Tamna tvar 5
3. Formiranje i razvoj galaksija 5
3.1. Plin u prostoru tamne tvari 6
3.2. Vrijeme hlađenja i slobodnog pada 6
3.3. Prve zvijezde 7
3.4. Formiranje spiralnih galaksija 8
3.5. Crne rupe 9
3.6. Formiranje eliptičnih galaksija 9
4. Galaksije danas 10
4.1. Hubbleova morfološka klasifikacija galaksija 10
4.2. Eliptične galaksije 13
4.3. Spiralne (disk) galaksije 15
4.3.1. Uvijanje diska 16
4.3.2. Spiralna struktura 16
4.4. Nepravilne galaksije 17
4.5. Ostale vrste galaksija 17
5. Zaključak 19
6. Literatura 20

Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku Završni rad
Odjel za fiziku

RAZVOJ GALAKSIJA

FRANJO PODOBNIK

Sažetak

U ovom završnom radu govorit ćemo o razvoju galaksija. Prvi dio rada odnosi se na povijest svemira neposredno nakon velikog praska. Bit će opisani bitni fizikalni procesi koji su vodili do formiranja prvih zvijezda i galaksija. Drugi dio rada obuhvaća razvoj i formiranje pojedinih vrsta galaksije. U završnom dijelu rada bit će opisana morfološka klasifikacija galaksija te pojedine vrste galaksija.

Rad je pohranjen u knjižnici Odjela za fiziku
Ključne riječi: veliki prasak, zvijezde, galaksija, spiralne galaksije, eliptične galaksije, klasifikacija galaksija
Mentor: izv.prof.dr.sc. Branko Vuković, dr.sc. Maja Varga Pajtler
Ocjenjivači:
Rad prihvaćen:

University Josip Juraj Strossmayer Osijek
Department of Physics

Bachelor of Physics Thesis

EVOLUTION OF GALAXIES

FRANJO PODOBNIK

Abstract

This final thesis deals with galaxy evolution. First part of the thesis is about the universe right after the big bang. Major physical processes, which lead to the formation of the first stars and galaxies, will be described. Second part of the thesis includes evolution and formation of certain galaxy species. In the final part, morphological classification of the galaxies and tevery galaxy species will be described.

Thesis deposited in Department of Physics library
Keywords: big bang, stars, galaxy, spiral galaxies, eliptical galaxies, galaxy classification
Supervisior: izv.prof.dr.sc. Branko Vuković, dr.sc. Maja Varga Pajtler
Reviewers:
Thesis accepted:

1. Uvod

Danas znanstvenici smatraju kako je naš svemir nastao u jednom spektakularnom događaju Prije otprilike 13,8 milijardi godina. Taj događaj naziva se veliki prasak. U već prvih nekoliko trenutaka dogodilo se puno značajnih stvari zbog kojih danas postoji cijeli svemir i sve što se u njemu nalazi. Prvobitan svemir, neposredno nakon velikog praska imao je jako veliku temperaturu. Sva materija bila je rastavljena na kvarkove, sve dok se svemir nije počeo hladiti. Hlađenjem svemira formirale su se prve jezgre atoma vodika koje su odigrale važnu ulogu pri formiranju strukture u svemiru. Nakon što se svemir dovoljno ohladio, jezgre su se počele vezati sa slobodnim elektronima te su formirale oblake plina koji su bili pomiješani s tamnom materijom. Iz tih oblaka plina formirale su se prve zvijezde, koje su sastavni dio svake galaksije. Jednom kada se formirao dovoljan broj zvijezda na nekom području, one su se, zahvaljujući gravitacijskoj sili, vezale u prve galaksije. Postoji nekoliko vrsta galaksija s različitim fizikalnim svojstvima.

Još od doba Galilea ljudi su promatrali nebo te su, osim samih zvijezda vidjeli i ostale objekte koje tada nisu mogli objasniti. Činjenica da naša galaksija (Mliječna staza) nije jedina galaksija u svemiru, poznata je tek nešto više od 100 godina, a do tada su astronomi mislili da se sve što vidimo nalazi unutar naše galaksije. Charles Messier izdao je svoj prvobitni katalog sa 103 (katalog je kasnije dopunjen do 110 objekata) različita objekta među kojima je s M31 označena Andromeda, naša susjedna galaksija. Godine 1864. John Herschel izdaje *General Catalogue* u kojem se nalazi 5079 nebeskih objekata. Krajem 19. stoljeća John Dreyer izdao je *New General Catalog of Nebulae and Clusters of Stars (NGC),* koji je nadopuna Herschelovog kataloga i sadrži blizu 8000 različitih objekata od kojih su većina njih galaksije. Spiralne strukture maglica otkrio je William Parsons 1845. godine, a 1912. godine Vesto Slipher je, koristeći spektroskopsku analizu, otkrio da spiralne maglice rotiraju, ali u to vrijeme priroda maglica je još uvijek bila nepoznata. Nije se znalo jesu li one dio Mliječne staze ili ne. Godine 1925., Edwin Hubble otkrio je da su Cefeide u Andromedi (M31). Odredio je udaljenost od 285 kpc[1], što je dalo jasan dokaz da M31 i ostale spiralne maglice moraju biti izvan naše galaksije. Hubbleovo otkriće označilo je početak ekstragalaktičke astronomije.

[1] Parsek (pc) je mjerna jedinica za udaljenost u astronomiji. 1 pc iznosi $3{,}0857 \cdot 10^{13}$ km

2. Termalna povijest svemira

U ovom odjeljku biti će ukratko opisani osnovni procesi koji su se dogodili u ranom svemiru. Kako bi smo shvatili kako su nastale prve zvijezde, galaksije i ostali objekti širom svemira, moramo razumjeti te procese. Da bi smo ih opisali, pretpostavit ćemo da se zakoni fizike od tada nisu promijenili. Smatra se da je svemir nastao prije 13,8 milijardi godina. Događaj koji opisuje nastanak svemira naziva se veliki prasak. Nekoliko je činjenica koje će se koristiti u razradi ovog poglavlja:

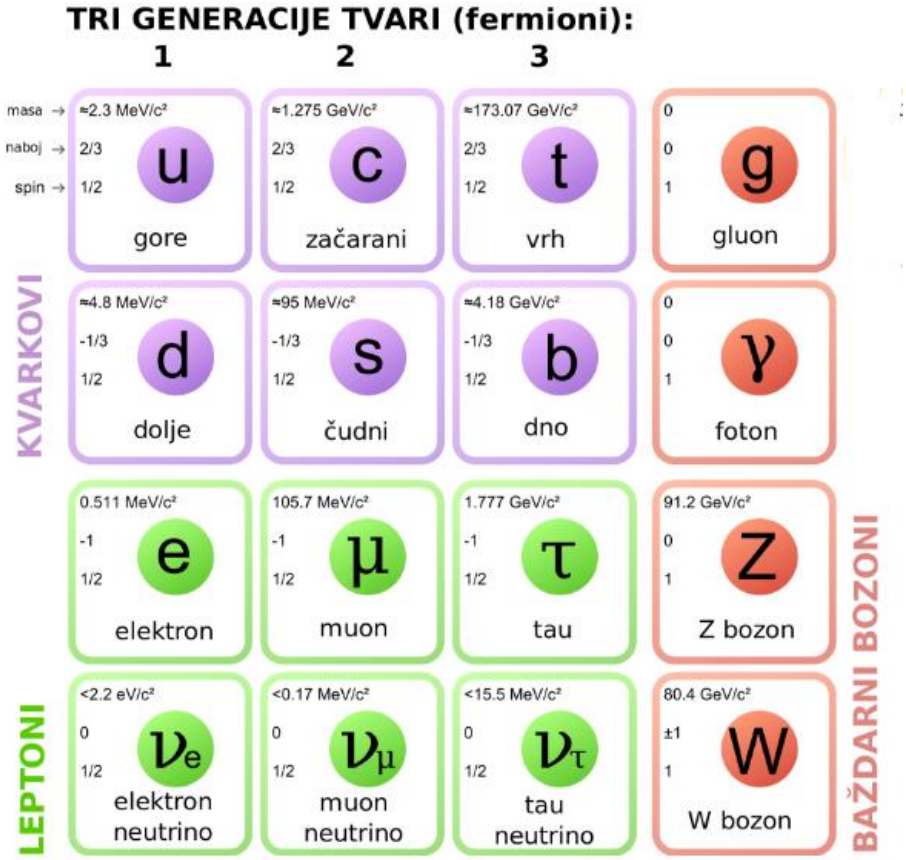
i. Fizika elementarnih čestica razumljiva je za energije ispod 100 GeV. Za sve energije iznad 100 GeV naše razumijevanje fizike postaje jako nesigurno. U ovom poglavlju, termalnu povijest svemira razmatrat će se na puno manjim energijama.
ii. Statistička fizika i termodinamika elementarnih čestica opisane su kvantnom mehanikom. Bitno je razlikovati bozone (čestice koje imaju cjelobrojni spin[2], kao fotoni) i fermione (čestice koje imaju polucjelobrojni spin, kao što su neutrino, protoni, elektroni i njihove antičestice)
iii. Ako su čestice u termodinamičkoj i kemijskoj ravnoteži, njihova gustoća i raspodjela energije određeni su jedino temperaturom. Nužan uvjet za ostvarivanje kemijske ravnoteže je mogućnost da čestica može nastati i biti uništena (nastanak para i anihilacija).
iv. Temperatura i energija mogu se pretvarati jedno u drugo jer umnožak Boltzmannove konstante i temperature (k_BT; $k_B = 1{,}38 \cdot 10^{-23}$ J/K) ima dimenziju energije. Temperatura i energija bit će iskazivane u jedinici elektron volt (eV). Prema konverziji, 1 eV = $1{,}1605 \cdot 10^4\ k_B$K [1,4].

2.1. Standardni model elementarnih čestica

Prema standardnom modelu elementarnih čestica, materija je sastavljena od fermiona, čestica koje imaju polucjelobrojni spin i podliježu Paulijevom principu isključenja[3]. Fermioni se dijele na leptone i kvarkove. Na Slici 1 možemo vidjeti podjelu čestica u standardnom modelu, zajedno s informacijama o njihovoj masi, naboju i spinu. Sve čestice imaju svoje antičestice, npr. pozitron je antičestica elektrona i ima jednaku količinu naboja kao elektron, ali negativnog predznaka. Neke od čestica su same sebi antičestice (npr. foton). Osim elektrona, postoje još dva nabijena leptona, mion i tau. Oba su nestabilna te su puno teža od elektrona. Mion se raspada u elektron i dva

[2] Kvantno mehanička osobina kvantne čestice
[3] Prema Paulijevom principu isključenja, dvije čestice ne mogu istovremeno zauzimati isto kvantno stanje

neutrina, a tau se može raspasti u mion ili elektron i također dva neutrina. Mion i tau imaju odgovarajući neutrino, μ-neutrino i τ-neutrino. Prema standardnom modelu, interakcije između čestica događaju se prilikom razmjene bozona. Fotoni su nosioci elektromagnetske sile. Čestica koja sudjeluje u djelovanju jake sile između kvarkova naziva se gluon. Između svih leptona djeluje slaba sila, stoga standardni model postulira postojanje još dva bozona, nabijeni W-bozon i neutralni Z-bozon. Također, standardni model predviđa da su elektromagnetska i slaba sila ujedinjene u elektroslabu silu, ali pri niskim energijama ove dvije sile se bitno razlikuju. Objašnjenje za to je da su W i Z-bozoni veoma masivne čestice, dok je foton bez mase. Prema tome, na energijama nižim od Z-bozonove mase[4], slabe sile su znatno slabije od elektromagnetskih [1].



Slika 1 Elementarne čestice u standardnom modelu [18].

2.2. Anihilacija parova

U vremenu od 15 sekundi nakon velikog praska pri temperaturama manjim od ~ $5 \cdot 10^9$ K, ili k_BT ~ 500 keV, elektron-pozitron parovi ne mogu se više stvarati zbog toga što količina fotona s energijama iznad praga stvaranja parova, 511 keV, postaje premala. Svejedno, anihilacija $e^+ + e^-$

[4] Prema Einseteinovoj relaciji $E=mc^2$, masa je ekvivalentna energiji

$\rightarrow\gamma+\gamma$ se nastavlja događati i zbog toga se količina parova e^+ - e^- drastično smanjuje. Nakon anihilacije, dva fotona koja nastanu poprime energiju mirovanja ($E=mc^2$) i kinetičku energiju od para elektrona i pozitrona koju su imali prije anihilacije. Nakon anihilacije, skoro svi elektroni su se pretvorili u fotone, ali ne u potpunosti jer je višak elektrona u odnosu na pozitrone bio premalen da bi kompenzirao pozitivnu gustoću naboja protona. Nadalje, količina elektrona koji su preživjeli anihilaciju mora biti jednaka količini protona kako bi svemir ostao električki neutralan [1,3,5].

2.3. Prvobitna nukleosinteza

Protoni i neutroni mogu fuzirati kako bi stvorili atomsku jezgru ako su temperatura i gustoća plazme dovoljno velike. U unutrašnjosti zvijezda, uvjeti za nuklearnu fuziju su zadovoljeni. Visoke temperature u ranoj fazi svemira govore nam da su se tada formirale atomske jezgre. U samo prvih nekoliko minuta nakon velikog praska formirale su se neke neke od najlakših atomskih jezgri. Nadalje, barioni (ili nukleoni) ne sudjeluju u dinamici širenja u ranom svemiru zbog njihove male količine. Najjednostavniji spoj nukleona je deuterij (D), koji se sastoji od protona i neutrona, a formira se u reakciji $p + n \rightarrow D + \gamma$. Nakon formiranja deuterija, sve se odvija veoma brzo. Jednom kad količina deuterija postane dovoljno velika, formira se helij (^{4}He), Količina helija u svemiru kasnije se mijenja nuklearnom fuzijom u zvijezdama, iz koje se tvore teži elementi [1].

2.4. Rekombinacija

Tri minute nakon velikog praska, prvobitna nukleosinteza je pri kraju. U tom trenutku svemir se ohladio na temperaturu od otprilike $T \sim 8 \cdot 10^8$ K i sastoji se od fotona, protona, jezgri helija (alfa čestica), tragova ostalih lakših elemenata te elektrona. Prisutni su i neutrini, koji, zajedno s fotonima dominiraju u gustoći energije i brzini širenja. Nakon daljnjeg hlađenja svemira, slobodni elektroni se mogu spajati s atomskom jezgrom i formirati neutralne atome. Taj se proces naziva rekombinacija. Pri temperaturi svemira od oko $T \sim 3000$ K, otprilike 400 000 godina nakon velikog praska, jezgre helija i protoni spojili su se s slobodnim elektronima i svemir je postao u suštini neutralan, odnosno možemo reći da se svemir rekombinirao. Od tada, fotoni mogu putovati bez daljnjih interakcija. Nakon rekombinacije, materija je skoro kompletno neutralna. Iz promatranja izvora pri vrlo velikim crvenim pomacima[5] znamo da je intergalaktički prostor gotovo u potpunosti ioniziran. Prije toga naš svemir je morao doživjeti fazu reionizacije, koja ne može biti objašnjena, nego se mora promatrati u kontekstu formiranja strukture svemira i formiranja prvih zvijezda [1,3].

[5] Crveni pomak (eng. *Red shift*) je pomak spektralnih linija svijetlosti prema crvenom dijelu spektra, nastaje uslijed Dopplerovog učinka na promatrani izvor svijetlosti koji se udaljava od promatrača.

2.5. Tamna tvar

Danas se pretpostavlja da je ukupna gustoća svemira $\Omega = 1$, a vidljivu tvar u svemiru čini tek $\Omega = 0{,}05$, što znači da otprilike 95% svemira čini tamna tvar skupa s tamnom energijom[6]. Tamna tvar ne emitira niti reflektira bilo kakve oblike elektromagnetskog zračenja, zbog čega je ne možemo vidjeti. Postojanje tamne tvari dokazano je promatranjem njenog učinka na druge vidljive objekte. Na primjer, znanstvenici su, promatrajući rotaciju zvijezda oko središta galaksija, uočili da zvijezde koje se udaljavaju od središta galaksija zapravo ne smanjuju svoju brzinu, što se protivi Keplerovim zakonima, nego nastavljaju putanju s brzinama puno većima od očekivanih. Također, pretpostavka je da se tamna tvar tvori od bariona i egzotičnih čestica (kao neutrini). Ako se tamna tvar sastoji od neutrina, te bi čestice mogle putovati vrlo brzo, prelaziti velike udaljenosti te formirati strukture u svemiru na velikoj skali. Takvu tamnu tvar zovemo vruća tamna tvar. Ako se tamna tvar sastoji od nešto težih čestica nego što su neutrini, koje nazivamo *WIMPS* (eng. *Weakly Interacting Massive Particles,* masivne čestice koje imaju slabu interakciju), koje se gibaju relativno sporo, one bi formirale strukture na maloj skali poput galaksija. Takvu tamnu tvar nazivamo hladna tamna tvar [6].

3. Formiranje i razvoj galaksija

Razvoj strukture u svemiru započeo je u epohi rekombinacije zbog velike količine fluktuacija[7] materije. Nakon rekombinacije barioni su se raspali zbog utjecaja zračenja, na njih više nije djelovao tlak te su poprimili određenu prostornu raspodjelu. Barionska materija podliježe fizikalnim procesima rasipanja, trenja, grijanja i hlađenja te formiranju zvijezda. Pošto tamna tvar nije podložna ovim procesima, ponašanje bariona i tamne tvari će se razlikovati u daljnjoj evoluciji. U hladnom svemiru, ispunjenom tamnom tvari, prvo su se formirale strukture male gustoće odnosno male mase, nakon čega su se formirale strukture veće mase. Takve strukture nazivamo halo[8], a plin koji se nalazi u takvoj strukturi je zagrijan i komprimiran. Ako se plin može ohladiti procesom zračenja, odnosno ako se može riješiti nekog djela termalne energije i pritiska, tada se može urušiti u guste strukture i formirati zvijezde [1,3,7].

[6] Tamna tvar je naziv za tvar u svemiru koja ne emitira niti reflektira bilo kakav oblik elektromagnetskog zračenja, a tamna energija naziv je za hipotetski oblik energije koji prodire u cijeli prostor i ima negativan tlak koji rezultira odbojnom gravitacijskom silom

[7] Fluktuacije su prostorne ili vremenske promjene fizikalnog svojstva materije ili čestica, također može označavati i nestabilnost.

[8] Halo označava oblak (polje) od plina i ostale materije koji okružuje gravitacijsko polje.

3.1. Plin u prostoru tamne tvari

Da bismo razumjeli kako se formiraju galaksije, trebamo proučiti ponašanje bariona u prostorima tamne tvari od koje se formiraju zvijezde. Sve dok su prosječne gustoće plina malene, prostorna raspodjela bariona i tamne tvari je jednaka. Za to vrijeme barioni i tamna tvar čine sferu koja se uslijed gravitacije može urušiti sama u sebe. Kada dođe do gravitacijskog kolapsa, ponašanje bariona i tamne tvari se razlikuje. Tamna tvar ne dolazi u interakciju s ostalim česticama te se može slobodno širiti prolazeći kroz orbite ostalih čestica. Barioni mogu doći u interakciju s ostalim česticama u obliku sile trenja. Za vrijeme gravitacijskog kolapsa, potencijalna energija plina se zbog trenja pretvara u toplinu te dolazi do zagrijavanja plina. Da bi se formirale zvijezde, plin se mora sažeti u gusti oblak. Tlak toplog plina onemogućuje daljnje kondenziranje plina, osim ako se plin može ohladiti i povećati svoju gustoću uz stalan tlak. Plin se može ohladiti na način da emitira zračenje, tj. dio energije u obliku fotona. Postoji nekoliko načina na koje se unutarnja energija plina može pretvoriti u zračenje. Jedan od njih je da u ioniziranom plinu raspršenje između elektrona i jezgre uzrokuje zakočno zračenje. Sudari između atoma i elektrona mogu dovesti atome u pobuđeno stanje. Kada se atomi u pobuđenom stanju radioaktivno raspadaju, emitiraju onu količinu energije koja odgovara razlici energija između pobuđenog i osnovnog stanja. Sudari također mogu uzrokovati ionizaciju atoma, a nakon ionizacije slijedi rekombinacija, koja je opet odgovorna za emisiju fotona [1,6].

3.2. Vrijeme hlađenja i slobodnog pada

Da bi smo mogli izračunati vrijeme hlađenja plina i zatim vrijeme slobodnog pada plina treba definirati funkciju hlađenja. Ako se brzina hlađenja *C* definira kao energija izračena po jedinici volumena i vremena, onda vrijedi $C \propto n_H^2$, gdje n_H označava količinu vodikovih jezgri. Tada se konstanta proporcionalnosti naziva funkcija hlađenja i definira se kao:

$$\Lambda(T) = \frac{C}{n_H^2} \tag{1}$$

a ovisi o temperaturi i kemijskoj kompoziciji plina. Kada je poznata brzina pri kojoj plin gubi energiju, može se izračunati vrijeme hlađenja. To je vrijeme potrebno da plin izgubi svu svoju energiju:

$$t_H = \frac{3nk_BT}{2C} = \frac{3nk_BT}{n_H^2\Lambda(T)} \tag{2}$$

gdje *n* označava količinu čestica. Ako je vrijeme hlađenja dulje od starosti svemira, plin ostaje pri istoj temperaturi i tada nije moguć kolaps plina prema centru oblaka. Naprotiv, ako je vrijeme

hlađenja dovoljno kratko, plin će se komprimirati prema centru oblaka. Tada se definira vrijeme slobodnog pada, koje označava ono vrijeme koje je potrebno da čestica prevali put *r*, koji odgovara udaljenosti čestica od centra oblaka. Vrijeme slobodnog pada je dano izrazom:

$$t_{sp} = \sqrt{\frac{3\pi}{32G\rho}} \tag{3}$$

gdje *G* označava gravitacijsku konstantu, a ρ gustoću čestica u oblaku [1].

3.3. Prve zvijezde

U današnjem svemiru, formiranje zvijezda događa se u galaksijama, stoga valja pogledati kada su se formirale prve galaksije. Jednostavnim argumentom mogu se odrediti uvjeti pod kojima tlačne sile nisu u mogućnosti zaustaviti plin od gravitacijskog kolapsa. Promotrimo gustu sfernu regiju radijusa *R*, čija je gustoća malo veća od srednje kozmičke gustoće materije ρ. Ako je ta sfera homogeno ispunjena barionima, gravitacijska energija vezanja je:

$$|E_{grav}| \sim \frac{GMM_g}{R} \tag{4}$$

gdje *M* i M_g označavaju ukupnu masu oblaka i masu plina u sferi. Termalna energija plina (E_t) može se izračunati iz umnoška kinetičke energije čestice i broja čestica u plinu:

$$E_t \sim c_s^2 M_g \, , c_s \approx \sqrt{\frac{k_B T_p}{\mu m_p}} \tag{5}$$

gdje je c_s brzina zvuka u plinu, koja je otprilike jednaka prosječnoj brzini čestice plina, a μm_p označava prosječnu masu čestice u plinu. Da bi plin bio vezan u gravitacijsko polje, njegova gravitacijska energija vezanja mora biti veća od termalne energije, $|E_{grav}| > E_t$, što vodi do uvjeta $GM > c_s^2 R$. Budući da razmatramo malo gušću regiju plina, možemo primijeniti i relaciju između mase i radijusa sfere $M \sim \rho R^3$. Iz zadnje dvije relacije slijedi uvjet:

$$M > M_J \equiv \frac{\pi^{5/2}}{6} \left(\frac{c_s^2}{G}\right)^{3/2} \rho^{-1} \tag{6}$$

Iz ovog jednostavnog računa vidi se da masa oblaka plina mora prijeći određenu granicu da bi se plin mogao urušiti u središte oblaka. Izraz (6) definira Jeansovu masu M_J, koja opisuje minimalnu masu oblaka plina potrebnu da bi došlo do gravitacijskog kolapsa. Jeansov kriterij je važan jer određuje kakve zvijezde će biti formirane, što ovisi o prvobitnoj masi oblaka plina. Jednom kada

se skupi dovoljna količina plina (ona koja zadovoljava Jeansov kriterij), uslijed gravitacijske kontrakcije plina prema središtu oblaka, a nakon vremena slobodnog pada čestica, formirat će se zvijezda. Slika 2 prikazuje oblak plina i tamne tvari kod kojega je u tijeku gravitacijska kontrakcija plina prema njegovom središtu [1,8].



Slika 2 Oblak plina i tamne materije [1].

3.4. Formiranje spiralnih galaksija

U ovom odjeljku bit će detaljnije opisana sudbina ohlađenog plina. Bitno je napomenuti da oblaci tamne materije i plin unutar njih imaju kutnu količinu gibanja, što prirodno vodi formiranju galaktičkih diskova. Sile trenja u plinu raspoređuju plin u približno kružne orbite, ovisno o simetriji oblaka. U ravnini okomitoj na vektor kutne količine gibanja plin formira ravni disk. Plin u disku je puno gušće raspoređen nego što bi bio da je ostao u sfernom obliku. Također, plin se lakše hladi u disku te lakše dolazi do formiranja zvijezda.

Jednom kada se disk formirao, plin je dovoljno gust te se stoga formiranje zvijezda može nastaviti. Formirani disk još uvijek sadrži dio preostalih bariona. U takvom tankom disku dolazi do nestabilnosti prilikom gibanja, odnosno rotiranja samog diska. Dok se u osnosimetričnom gravitacijskom potencijalu zvijezde gibaju po kružnim orbitama, djelovanje gravitacijskog polja diska na zvijezde može poremetiti takve orbite, što može povećati odstupanje od osne simetrije.

Posljedice takvih smetnji su formiranje spiralnih ruku unutar diska te formiranje prečke u središtu galaksije. Asimetrija prečke može dovesti do značajnih smetnji gravitacijskom potencijalu, što također dovodi do promjene orbita te do preraspodjele mase i kutne količine gibanja plina i zvijezdi u disku [1,3,9].

3.5. Crne rupe

U središtu formiranog diska, zbog jako velike gustoće plina, obično dolazi do formiranja supermasivnih zvijezda koje u kratkom roku eksplodiraju kao supernove te zbog velike mase nakon eksplozije ostane crna rupa. Crne rupe rastu tako da prikupljaju materijal oko sebe. Drugi način na koji može nastati crna rupa je taj da se tijekom formiranja galaksije u njenom središtu skupi velika količina zvijezda. Tada dolazi do sudara između zvijezda te se one spajaju u jednu masivnu zvijezdu koja nakon supernove postaje crna rupa [1].

3.6. Formiranje eliptičnih galaksija

U usporedbi sa spiralnim galaksijama, formiranje eliptičnih galaksija teže je objasniti. Zvijezde u eliptičnim galaksijama orbitiraju u svim smjerovima, što nam govori da nisu formirane u unutrašnjosti hladnog plinovitog diska. Također, teško je shvatiti kako se formiranje zvijezda moglo nastaviti bez sažimanja plina. Zbog toga se vjeruje kako su se eliptične galaksije formirale kao posljedica transformacije druge galaksije. Eliptične galaksije se općenito pronalaze u gustim okruženjima kao što su grupe ili skupine galaksija i obično se nalaze u njihovim središtima. Drugim riječima, eliptične galaksije se nalaze u područjima gdje je interakcija između više galaksija vrlo moguća.

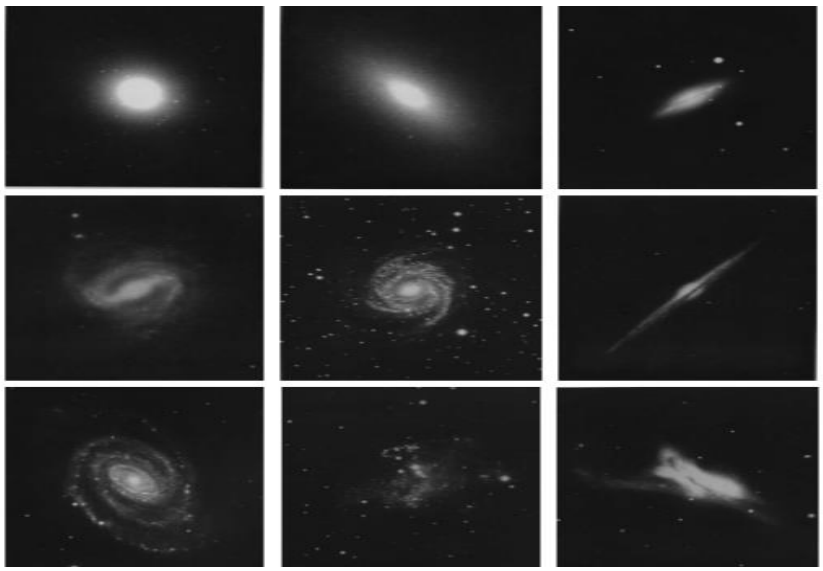
Teoretski gledano, postupna formacija strukture predviđa da su haloi velike mase nastali spajanjem više manjih te da su sudari haloa i njima pridruženih galaksija morali igrati ulogu u raspodjeli svojstava galaksija. Spajanje haloa i povezano sudaranje galaksija vodi morfološkoj transformaciji galaksija. Spajanje haloa možemo podijeliti na malo spajanje, pri kojemu je omjer masa dva haloa velik (otprilike 3:1), i na veliko spajanje, gdje sudjeluju dvije slične mase.

Izlazni produkt spajanja dvaju galaksija ovisi o nekoliko parametara, kao što su brzina kretanja galaksije, kutna količina gibanja, orijentacija njihovih rotacija te naravno omjer masa. Ako se mala galaksija spaja s velikom, svojstva velike galaksije neće se puno promijeniti. Mala galaksija ostat će ugrađena u halou veće galaksije kao satelit galaksija. Ovisno o orbiti takve satelit galaksije, ona neće dugo preživjeti kao takva. Plimne sile otrgnut će materiju sa satelit galaksije, što će rezultirati njenim gubitkom na masi i nakon nekog vremena će se potpuno stopiti s većom galaksijom.

Pri velikim spajanjima situacija je malo drugačija. Kod takvih spajanja galaksije i njihova svojstva će se potpuno promijeniti. Njihovi diskovi će biti uništeni, orbite plina će biti uznemirene, što može dovesti do povećanog formiranja mladih zvijezda. Zbog siline interakcija, dijelovi materije odnosno zvijezda bivaju odbačeni iz svojih galaksija. Takve zvijezde i plin nazivaju se plimni repovi. Također, plin može biti ili izbačen iz galaksije ili dovoljno zagrijan i otežati bilo kakvo daljnje formiranje zvijezda [1,3].

4. Galaksije danas

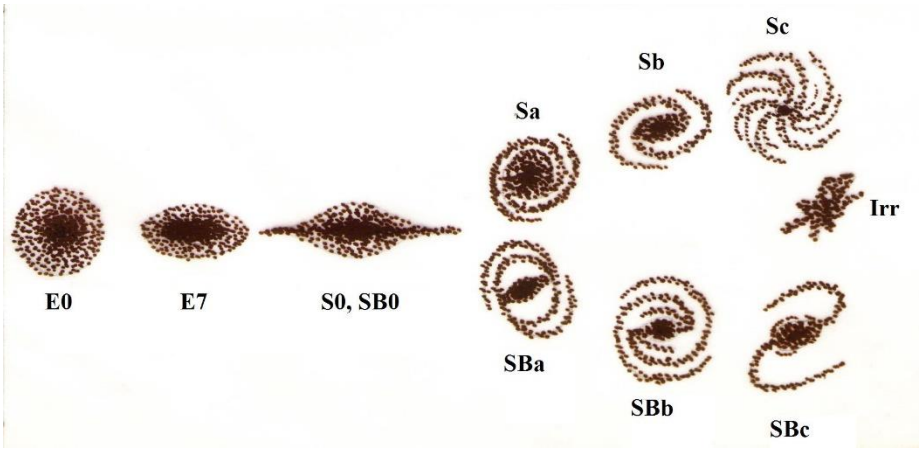
Početkom prošlog stoljeća Edwin Hubble je na tada najjačem svjetskom teleskopu, na zvjezdarnici Mount Wilson, promatrao maglice. Do tada, sa slabijim teleskopima nejasno viđene maglice nisu bile konkretno objašnjene. Promatrajući razne maglice (tada ne znajući da su to galaksije), Hubble je uočio da se one moraju nalaziti izvan naše galaksije. Svoje otkriće je prvi put objavio 30. prosinca 1924. te je već svoj oblik klasificiranja predložio 1925. godine, a sustav se prvi put javlja detaljno opisan u Hubbleovoj knjizi Carstvo maglica („*The Realm of the Nebulae*“). Na Slici 3 dani su primjeri različitih galaksija. Promatrajući ih, može se uočiti kako neke imaju gladak svjetlosni profil, dok se na nekima vide spiralne ruke zajedno s eliptičnom spiralnom prečkom. Ostale koje se vide na Slici 3 su nepravilne i čudne. Bazirajući se na izgledu galaksija, Hubble je napravio svoju morfološku klasifikaciju, čiji se shematski prikaz često naziva „*Hubbleova viljuška*“ (Slika 4) [1,2].



Slika 3 Primjeri različitih vrsta galaksija. S lijeva na desno od vrha prema dolje: NGC4278 (E1), NGC3377 (E6), NGC5866 (SO), NGC175 (SBa), NGC6814 (Sb), NGC4565 (Sb, edge on), NGC5364 (Sc), HoII (IrrI), NGC520 (IrrII) [1].

4.1. Hubbleova morfološka klasifikacija galaksija

Hubble je je svoju klasifikaciju podijelio na četiri osnovne vrste galaksija:



Slika 4 Shematska reprezentacija Hubbleovog slijeda (Hubblova „viljuška“) [1].

i. Eliptične galaksije:

Ove galaksije imaju glatke, skoro savršene eliptične izofote[9] , a dalje se dijele na sedam podtipova E0, E1, E2, E3,…, E7, gdje brojevi n = 1, 2, 3, …, 7 označavaju stupanj ekscentriciteta koji je dan izrazom $n = 10 \cdot \left(1 - \frac{b}{a}\right)$, gdje su a i b velika, odnosno mala poluos elipse.

ii. Spiralne galaksije:

Ove galaksije karakterizira tanki disk u kojem su vidljive spiralne ruke. One se dijele na dvije podvrste, spiralne s prečkom i normalne spiralne, polazeći od toga možemo li vidjeti prečkastu strukturu u centru galaksije ili ne. Svaka podvrsta dalje je podijeljena na tri podtipa, a, b i c, prema sljedeća tri kriterija:

- udio svijetlosti u središnjoj izbočini
- zatvorenost spiralnih ruku
- brzina pretvaranja spiralnih ruku u zvijezde, HII regije[10] i pravilne prašnjave trake.

Ova tri kriterija su međusobno povezana: spiralne galaksije s izraženim izbočinama većinom imaju usko namotane spiralne ruke s relativno blijedim HII regijama i takve se klasificiraju kao 'Sa' tip. S druge strane, one koje nemaju ili imaju slabo naglašenu izbočinu uglavnom imaju otvorene spiralne ruke sa svijetlim HII regijama i takve se klasificiraju kao 'Sc' tip. Kada sva tri kriterija daju konfliktne indikacije, gleda se otvorenost spiralnih ruku.

iii. Lećaste galaksije:

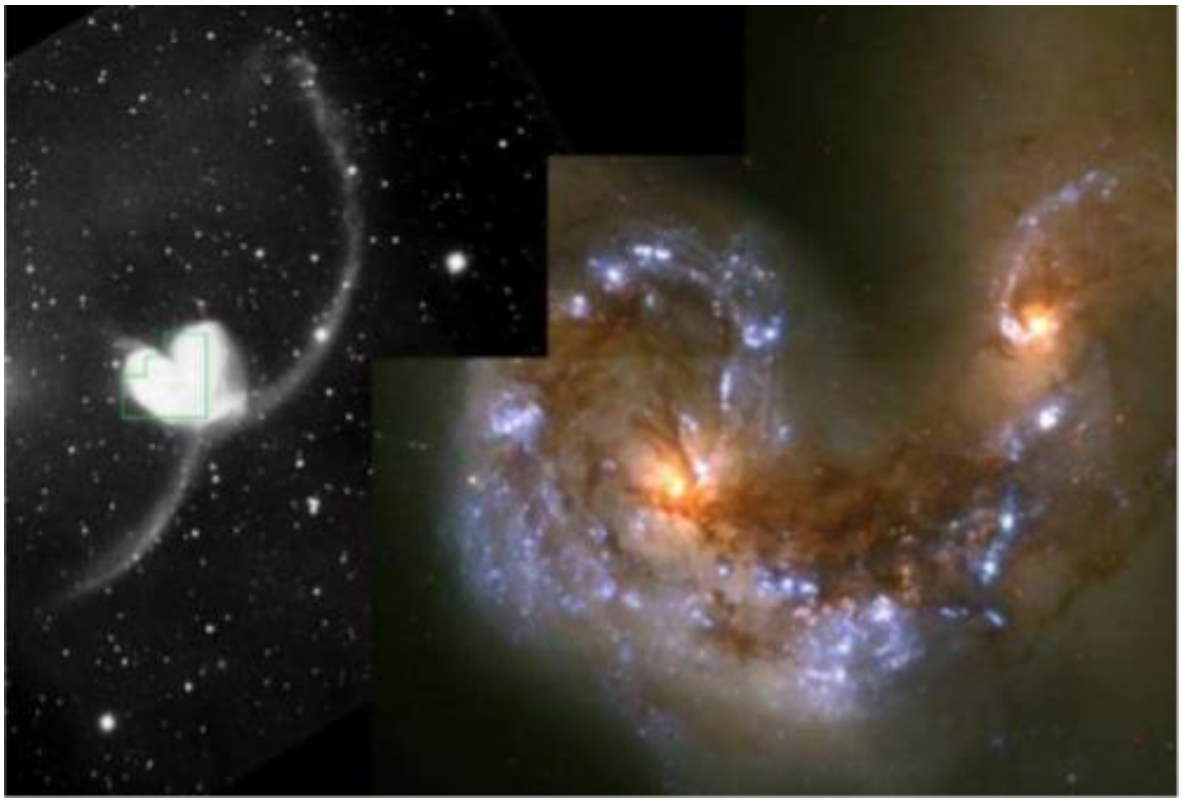
Ove galaksije označavaju se sa 'S0'. Ovo je klasa između spiralnih i eliptičnih galaksija.

[9] Krivulje koje spajaju sve točke jednake rasvjete
[10] HII regije su golemi oblaci plina i prašine iz koji će nastati zvijezde prilikom gravitacijskog kolapsa

Poput eliptičnih, lećaste galaksije imaju glatku distribuciju svijetlosti, ali nemaju spiralne ruke niti HII regije. 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 'SB0'

iv. Nepravilne galaksije:

Ove galaksije nemaju ni dominantu izbočinu niti rotirajući simetrični disk, a niti bilo kakve ostale očite simetrije (Slika 5). Točnije, njihov izgled je generalno nejednak u usporedbi s ostalim vrstama galaksija. Nepravilne galaksije također ne sadrže puno HII regija. Hubble ovaj tip galaksija nije uključio u prvobitni niz jer nije bio siguran treba li ih smatrati nastavkom neke od vrsta. Danas se nepravilne galaksije smatraju nastavkom na spiralne galaksije u Hubbleovom niz.



Slika 5 Nepravilna galaksija poznata kao Antennea, koja je rezultat nedavnog spajanja dvije spiralne galaksije [1].

Eliptične i lećaste galaksije smatraju se ranim tipom, dok se spiralne i nepravilne smatraju kasnim tipom galaksija. Ovi navodi odnose se samo na njihov položaj u Hubbleovom nizu i nisu povezane s vremenskim okvirom njihova nastanka. Očito, morfološka klasifikacija je najmanje zahvaćena drugim kriterijima podjele osim onim vizualnim. Ako je, na primjer, troosni elipsoid specijalni oblik galaksije, onda će vidljivi ekscentricitet ovisiti o orijentaciji u odnosu na liniju

promatranja. Također će biti teško identificirati prečku u spiralnim galaksijama koje su promatrane iz profila [1,2,15,17].

4.2. Eliptične galaksije

Eliptične galaksije obuhvaćaju cijeli niz klasa galaksija koje se razlikuju po luminozitetu i veličini. Neke od njih prikazane su na Slici 6. Njihova gruba podjele je sljedeća:

i. Normalne eliptične:
   Ova klasa uključuje divovske eliptične galaksije (gE), s jačim luminozitetom i kompaktne eliptične (cE) tetako pokriva niz apsolutnih magnituda od $M_B \approx -23$ do $M_B \approx -15$. Također, 'S0' galaksije su obično dodane ovoj klasi ranog tipa galaksija.

ii. Patuljasto Eliptične (dE):
   Ova klasa se razlikuje od 'cE' pod klase u tome što imaju značajno manji sjaj i manju metalnost[11]

iii. 'cD' galaksije:
   Ove galaksije su izuzetno sjajne (čak do $M_B \approx -25$) i jako velike ($R \leq 1$Mpc). Mogu se naći samo blizu centra gustog klastera galaksija, a površinski sjaj im je jako velik u blizini centra.

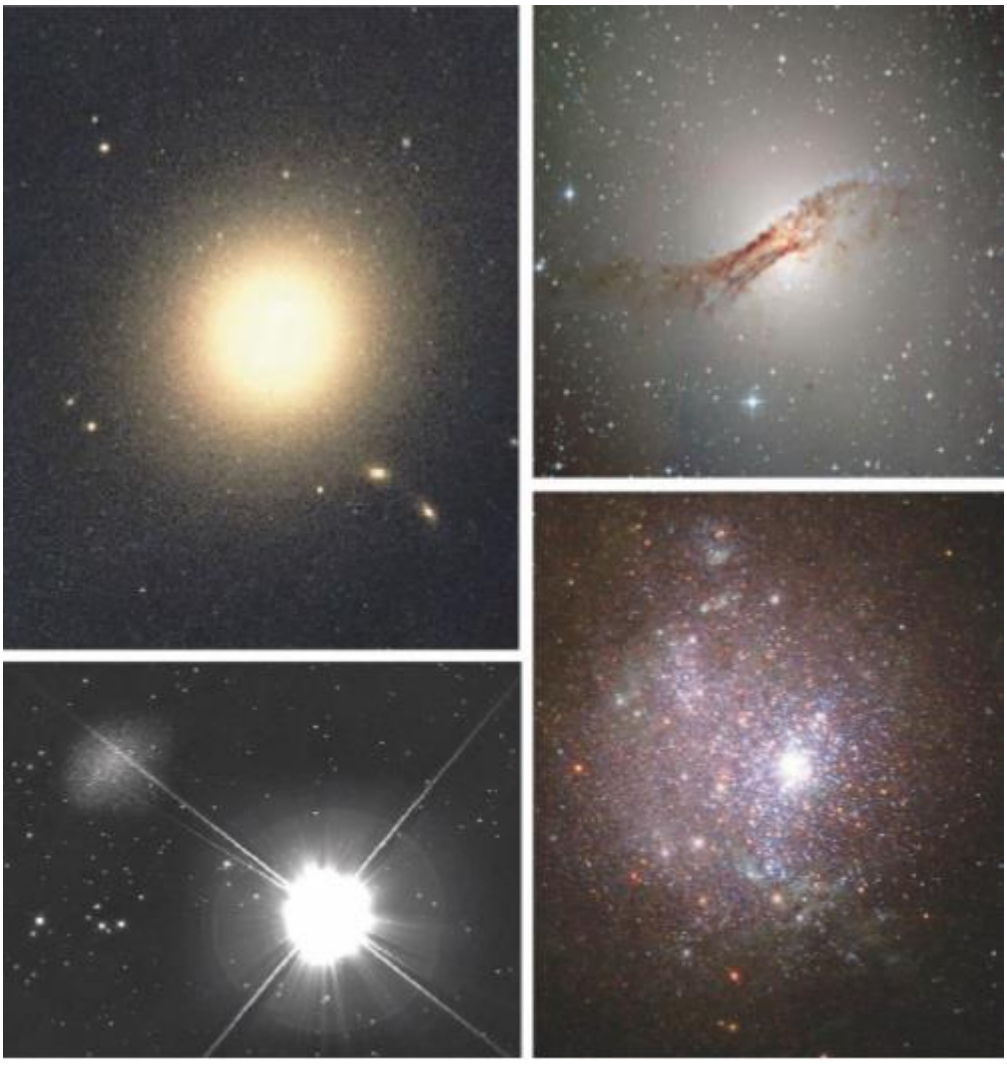
iv. Plave kompaktne patuljaste galaksije (BCD):
   Ove galaksije su naočigled više plave od ostalih eliptičnih te u odnosu na ostale eliptične galaksije sadrže znatno veću količinu plina.

v. Patuljasto sferoidne (dSph):
   Ovakve galaksije imaju vrlo nizak luminozitet i površinski sjaj ($M_B \approx -8$). Zbog ovih svojstava, do sada su samo promatrane u lokalnim grupama.

Analizirajući morfologiju eliptičnih galaksija, postavlja se pitanje zašto eliptične galaksije nisu okrugle. Pri rotaciji, zbog centrifugalne sile dolazi do ispupčenja u ravnini ekvatora. Ako je ovo objašnjenje točno, brzina rotacije v_{rot} koja se mjeri iz relativnog Dopplerovog pomaka apsorpcijskih linija, morala bi biti otprilike istog iznosa kao brzina disperzije zvijezda[6] σ_v koja se mjeri iz Dopplerovog širenja spektralnih linija. Točnije, za osno simetrično rotacijsko poravnanje,

[11] Metalnost (Z) označava postotak ostalih materijala u nekom objektu koji su različitih od vodika (X) i helija (Y), X+Y+Z=1.00 [4]

za oble[12] sferoidne galaksije, relacija $\left(\frac{v_{rot}}{\sigma_v}\right) \approx \sqrt{\frac{\varepsilon}{1-\varepsilon}}$, gdje ε označava ekscentricitet, mora biti zadovoljena. Za jako sjajne eliptične galaksije vrijedi da je v_{rot} puno veća od σ_v, tako da njihova rotacija ne može biti glavni uzrok eliptičnosti. Mnogo eliptičnih galaksija se smatra troosnim elipsoidima, tako da os rotacije nije jednoznačno definirana. Tako svjetlije eliptične galaksije obično nisu rotacijski poravnate. Za one manje svijetle, rotacijsko poravnanje može igrati važnu ulogu. Divovske eliptične galaksije obično imaju male brzine rotacije [1,10,12,13,14,15].



Slika 6 Različite klase eliptičnih galaksija. Lijevo gore: cD galaksija (M87) koja se nalazi u centru Virgo klastera. Gore desno: Centaurus A, divovska eliptična galaksija sa veoma izraženim diskom od prašine i s aktivnom galaktičkom jezgrom. Dolje lijevo: galaksija Leo I koja pripada u skupinu devet poznatih patuljasto sferoidalnih galaksija u lokalnoj grupi. Dolje lijevo: NGC 1705, patuljasta nepravilna galaksija, pokazuje naznake formiranja novih zvijezda [1].

[12] Ako a>b>c označavaju duljine glavnih osi elipsoida, onda se takav naziva oblatni sferoid, ako su a=b>c, onda se naziva spljošteni rotacijski elipsoid, ako su a=b<c, onda se naziva izduženi rotacijski sferoid, a ako su sve tri osi različite onda se naziva troosni elipsoid [7].

4.3. Spiralne (disk) galaksije

Gledajući slijed spiralnih galaksija u Hubbleovom nizu od ranog prema kasnom tipu, mogu se uočiti razlike koje mogu koristiti u klasifikaciji. Te razlike između spiralnih galaksija vide se na Slici 7.

i. Razlika u opadanju postotka luminoziteta
ii. Povećanje kuta otvorenosti spiralnih ruku
iii. Povećanje sjaja strukture zajedno sa spiralnim rukama

U usporedbi s eliptičnim galaksijama, spiralne pokrivaju manji raspon u apsolutnoj magnitudi i masi. Otprilike 70% spiralnih galaksija sadrži ogromne stelarne prečke. Takve ogromne prečke remete osnu simetriju gravitacijskog potencijala u galaksiji, što može imati mnogo posljedica. Jedna od njih je ta da takvo uznemiravanje može dovesti do preraspodjele kutne količine gibanja zvijezda, plina i crne materije. Povrh svega, djelujući na orbite, plin može biti povučen prema centru galaksije, što može imati bitne posljedice kao što je pokretanje aktivnosti jezgre i ubrzano stvaranje novih zvijezda [1].



Slika 7 Gore lijevo: M94, 'Sab' galaksija. Gore sredina: M51, 'Sbc' galaksija. Gore desno: M101, 'Sc' galaksija. Dolje ljevo: M58, 'SBc' galaksija. Dolje sredina: NGC 1365, 'SBb' galaksija. Dolje desno: M58, 'SBc' galaksija [1].

4.3.1. Uvijanje diska

Diskovi spiralnih galaksija ne leže uvijek u ravnini, nego se mogu uvijati ili iskrivljavati. U tom slučaju, ravnina u kojoj orbite zvijezda i plina rotiraju oko galaktičkog centra na radijusu *R*, mijenja svoju inklinaciju proporcionalno sa *R*. Uvijanje se ponekad promatra iz raspodjele zvijezda u galaksiji (Slika 8), ali češće se promatra iz distribucije neutralnog vodikovog plina mjerenog iz emisijske linije vodika Podrijetlo uvijanja u galaksijama još uvijek nije dobro razumljivo, a jedna od mogućnosti je presretanje s drugim galaksijama koje ozbiljno remete orbite plina i zvijezda [1].



Slika 8 Spiralna galaksija NGC 3190 promatrana s ruba kao primjer uvijenog diska. Ova galaksija je dio grupe galaksija HGC 44 [1].

4.3.2. Spiralna struktura

Spiralne ruke su najplavije regije u spiralnim galaksijama i one sadrže puno mladih zvijezda i HII regija. Iz tog razloga prozirnost spiralnih ruku se povećava kako se valna duljina promatranja smanjuje. Uglavnom su spiralne ruke istaknute u plavom filteru kao što je pokazano na Slici 8. Spiralne ruke su kvazi-stacionarni gusti valovi, regije puno veće gustoće (10-20% veće gustoće nego lokalna okolina diska). Ako plin u svojoj orbiti ulazi u regije veće gustoće, biva sažiman, i to sažimanje molekularnih oblaka rezultira ubrzanom formacijom mladih zvijezda. Zvijezde manje mase, one crvene, žive dulje. Prozirnost spiralnih ruku je manja u crvenoj boji, dok masivne plave zvijezde nastaju u spiralnim rukama i ubrzo završavaju kao supernove. Zbog toga možemo pronaći tek nekoliko plavih zvijezda izvan spiralnih ruku [1,2].

4.4. Nepravilne galaksije

Kako i samo ime kaže, ove galaksije nemaju specifičan oblik pa se i sama galaksija sastoji od puno različitih objekata. Postoje dvije vrste nepravilnih galaksija, tip I i tip II. Tip I galaksije su obično galaksije čudnog oblika, koje sadrže veliki udio mladih mladih zvijezda. Ove galaksije se smatraju primitivnima jer su jako siromašne težim elementima. Ovaj tip galaksija je usko povezan sa spiralnim galaksijama jer nekad imaju izbočine, ali one su pomaknute od centra galaksije. Tip II galaksije su grupa galaksija kod kojih do čudnog izgleda dolazi uslijed spajanja odnosno sudaranja ili čak gravitacijskog međudjelovanja s drugim galaksijama. Tip II nepravilne galaksije također sadrže velike količine prašine. Naša galaksija ima dvije „satelit" galaksije, Veliki i Mali Magellanov oblak. To su dvije nepravilne galaksije tipa II koje se mogu vidjeti golim okom sa Zemljine južne hemisfere [11].

4.5. Ostale vrste galaksija

Svijetlost s „normalnih" galaksija (eliptične, spiralne, nepravilne) emitirana je u velikoj većini od zvijezda. Spektralna raspodjela zračenja s takvih galaksija je superpozicija spektra njihove stelarne populacije. Spektar zvijezda je opisan Planckovom funkcijom koja ovisi samo o površinskoj temperaturi zvijezde. Tipična stelarna populacija pokriva raspon temperatura od tisuću kelvina do nekoliko desetaka tisuća kelvina. Planckova funkcija ima lokalizirani maksimum i od maksimuma lagano opada na obje strane te je zbog toga većina energije s takvih normalnih galaksija emitirana u relativno uskom frekvencijskom intervalu koji se nalazi u optičkom i NIR[13] dijelu spektra. Prema ovome, postoje ostale galaksije čija spektralna raspodjela ne može biti opisana kao superpozicija stelarnog spektra. Jedan primjer je klasa aktivnih galaksija koje generiraju značajan postotak njihova luminoziteta iz gravitacijske energije koja se oslobađa prilikom pada materije u supermasivnu crnu rupu. Aktivnost takvog objekta može biti kategorizirana na različite načine. Na primjer, neke od njih su vidljive u radio ili u rendgenskom dijelu spektra, ili pokazuju jake emisijske linije sa širinom koja odgovara brzini od nekoliko tisuća kilometara u sekundi (Dopplerovo širenje linija). Najjači sjaj koji galaksije proizvode u maloj centralnoj regiji naziva se aktivna galaktička jezgra (AGN – eng. active galactic nuclei). Upravo takve galaksije se i nazivaju po tim regijama. U kvazarima[14], centralni luminozitet može biti do nekoliko tisuća puta veći od luminoziteta od naše galaksije. Još jedna vrsta galaksija ima spektralna svojstva koja se jako razlikuju od normalnih galaksija, a to su Starburst galaksije. Starburst galaksije su galaksije koje imaju znatno veću brzinu stvaranja mladih zvijezda. Ako u galaksiji

[13] NIR-bliska infracrvena spektroskopija
[14] Kvazari se smatraju jezgrama aktivnih galaksija.

nastaje puno mladih zvijezda, onda očekujemo da će takve galaksije emitirati zračenje u plavom ili UV dijelu spektra, koje odgovara maksimumu Planckove funkcije za masivne i sjajne zvijezde. Snažna radijacija mladih i sjajnih zvijezda grije prašinu u galaksiji, a tada je apsorbirano zračenje emitirano u IR dijelu spektra i takve galaksije mogu biti ekstremno sjajne u crvenom dijelu spektra. Nazivamo ih ultra sjajne infracrvene galaksije (ULIRG) [1] [2] [16].

5. Zaključak

Sa spoznajom da se do prije stotinjak 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. Otkako je nastao svemir iz velikog praska, pa do početka formiranja galaksija, sve je teklo točno određenim prirodnim putem. Iz elementarnih čestica nastali su prvi atomi, oni su se grupirali u oblake plina te kada je oblak postigao dovoljnu masu, nastale su prve zvijezde. Prve zvijezde su se spojile u skupinu kako bi formirale galaksije. Zbog različitih okolnosti i međudjelovanja čestica nije nastao samo jedan oblik galaksije, ali najčešći oblik su bile su spiralne (disk) galaksije. Kako je u početku svemir bio manji nego danas, galaksije su bile blizu jedna drugoj te su se pod utjecajem gravitacije spajale jedna s drugom. Tako su nastale eliptične galaksije.

Od tog vremena pa do danas interakcija među galaksijama i stvaranje novih galaksija ne prestaje. Zahvaljujući tehnologiji u stanju smo promatrati udaljene galaksije. Gledajući jako udaljene galaksije praktički gledamo u prošlost te možemo promatrati sam proces nastanka galaksije te njihov razvoj i evoluciju. Najbitnija metoda promatranja galaksija je spektroskopija. Pomoću raznih spektara emitiranih od strane galaksija može se odrediti jako puno fizikalnih karakteristika o pojedinoj galaksiji. Na osnovu promatranja galaksija u vidljivom dijelu spektra, Hubble ih je podijelio na četiri osnovne vrste; eliptične, spiralne, lećaste i nepravilne. Svaka od ovih vrsta galaksija ima svoje karakteristike po kojima ih možemo razvrstati u podgrupe u odnosu na njihov izgled te po njihovom luminozitetu. Najdominantnija vrsta galaksija u svemiru su spiralne galaksije koje se mogu lako prepoznati po spiralnim rukama omotanim oko galaktičke jezgre. Naša galaksija, u kojoj se nalazi Sunčev sustav, također je spiralna galaksija.

6. Literatura

[1] Extragalactic Astronomy and Cosmology An Introduction Second Edition, Peter Schneider, Springer, New York, 2015.

[2] Galaxy formation and evolution, Houjun Mo, Frank van den Bosch, Simon White, Cambridge University Press, London, 2010.

[3] Cosmology, The origin and evolution of cosmic structure, Peter Coles, Francesco Lucchin, John Wiley & Sons, 2002.

[4] After the beginning, Norman K. Glendenning, Imperial College Press, London, 2004.

[5] URL: https://hr.wikipedia.org/wiki/Anihilacija (19.05.2016.)

[6] URL: https://hr.wikipedia.org/wiki/Tamna_tvar (19.05.2016.)

[7] URL: http://astronomy.swin.edu.au/cosmos/H/Halo (19.05.2016.)

[8] URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Jeans_instability (19.05.2016.)

[9] URL: https://ned.ipac.caltech.edu/level5/Sept02/Silk/frames.html (13.05.2016.)

[10] URL: http://astronomy.swin.edu.au/cosmos/V/Velocity+Dispersion (13.05.2016.)

[11] URL: https://www.le.ac.uk/ph/faulkes/web/galaxies/r_ga_irregular.html (13.05.2016.)

[12] URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Metallicity (13.05.2016.)

[13] URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Color_index (13.05.2016.)

[14] URL: http://www.grad.hr/geomteh3d/Plohe/elipsoidi.html (13.05.2016.)

[15] URL: https://en.wikipedia.org/wiki/H_II_region (13.05.2016.)

[16] URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Differential_rotation (13.05.2016.)

[17] URL: https://hr.wikipedia.org/wiki/Klasificiranje_galaktika (13.06.2016.)

[18] URL: https://hr.wikipedia.org/wiki/Standardni_model (13.06.2016.)

Životopis

Franjo Podobnik rođen je 21.04.1994. u Požegi. Završio je Osnovnu školu Antuna Kanižlića i srednju Tehničku školu u Požegi, smjer elektrotehničar. U drugom razredu srednje škole sudjelovao je na županijskom natjecanju iz fizike i engleskoga jezika. Tijekom četvrtog razreda srednje škole radio je u servisu računala. Nakon srednje škole upisao je sveučilišni studij fizike i informatike na Odjelu za fiziku u Osijeku gdje trenutno studira.