

Univerzitet u Beogradu

Matematički fakultet

Duško Džever

FORMIRANJE I EVOLUCIJA GALAKSIJA

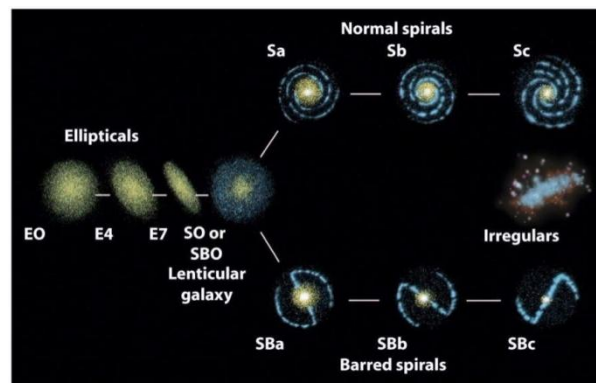
Seminarski rad iz Opšte astrofizike

Beograd, 2015

Uvod

Galaksije su masivni, gravitacijom vezani skupovi zvezda, međuzvezdanog gasa i prašine i (moguće) nevidljive tamne materije. One su mnogo kompleksniji objekti nego zvezde, komplikovanije za posmatranje i teže je interpretirati ta posmatranja. O uslovima u kojima nastaju tokom njihovog formiranja raspolažemo samo delimičnim informacijama. Za razliku od zvezda koje se skoro nikad međusobno ne sudaraju pa evoluiraju usamljene, kao dvojni ili višestruki sistemi, kod galaksija nije takav slučaj. One mogu doživeti i više sudara tokom svog postojanja što može dramatično promeniti njihovu strukturu i praktično onemogućiti rekonstrukciju prošlosti.

Habl je na osnovu posmatranja i uočenih razlika u obliku galaksija, izvršio morfološku klasifikaciju, prema kojoj postoje tri tipa galaksija: eliptične, spiralne i nepravilne. Nabrojaćemo neke njihove osobenosti koje će biti korisne za dalji tekst. Eliptične su homogene, sporotirajuće, velike koncentracije zvezda, naseljene pretežno starijim objektima, masa 10^6 do 10^{12} sunčevih, nemaju disk. S druge strane, spiralne imaju disk sa jezgrom kao i spiralne grane, dosta međuzvezdane materije, sadrže mlađe objekte u disku i starije u halou, masa 10^{10} - 10^{11} . Može se reći da postoje i tzv. diskolike, koje predstavljaju prelaz između eliptičnih i spiralnih (nemaju spiralne grane). Nepravilne galaksije nemaju pravilan oblik ni strukturu, nisu mnogo sjajne, sadrže najviše međuzvezdane materije i naseljene su mladim objektima. Najsajnije su spiralne, najbrojnije male eliptične, a najmasivnije džinovske eliptične. Svi ovi tipovi spadaju u normalne galaksije, koje konstantno zrače termalnim zračenjem svojih zvezda pa se najviše energije izrači u optičkom delu spektra. Međutim, postoje i one galaksije koje se fizički razlikuju od pobrojanih i to su galaksije sa aktivnim jezgrom. Kod njih je izraženo veoma veliko emitovanje energije iz jezgra u svim delovima spektra, koje je netermalnog karaktera (do milion puta više energije izrače u radio domenu nego normalne galaksije) i čije se fluks menja u toku vremena.



Slika 1: Hablova morfološka klasifikacija galaksija

Dve teorije o formiranju i evoluciji zvezda razvijene su šezdesetih godina prošlog veka. Prema jednoj od njih galaksije nastaju i evoluiraju kao prilično izolovane celine sa malim uticajem okolne sredine, a prema drugoj presudan uticaj imaju spajanja manjih celina kako bi se obrazovale veće. U godinama koje su usledile, iz ove dve teorije se razvila jedinstvena, "hibridna", koja u sebi sadrži elemente obe.

Nastanak galaksija

U veoma ranoj vasioni su začete klice budućih galaksija. Oko 300 000 godina posle Velikog praska kada se materija ohladila na približno 3000K, jezgra vodonika uspevaju da zahvate elektrone i rekombinacijom nastaju atomi vodonika. Zajedno sa helijumom koji je već stvoren u prvim termonuklearnim reakcijama to su bili prvi oblici nama poznate materije. Par stotina miliona godina kasnije predominantna tamna materija, usled gravitacione nestabilnosti izazvane fluktuacijama gustine, počinje da kolapsira obrazujući strukture nalik halou. Obična materija, koju čini uglavnom vodonik i manjim delom helijum, biva zarobljena u tim haloima. Kako je univerzum nastavio da evoluira prvobitno obrazovane manje strukture počele su gravitacijski da se privlače, srastaju i postaju sve veće. Numeričkim simulacijama je pokazano da su u oblastima gde je materija bila gušća ova pripajanja imala važnu ulogu, dok je u manje koncentrovanim oblastima postepena akrecija difuzne materije bila dominantnija. Tako su se obrazovali oblaci gasa masa nekoliko miliona sunčevih (što je uporedivo sa današnjim patuljastim galaksijama koje, moguće je, nisu znatno menjale svoju masu).

Unutar haloa čestice gasa su se sudarima zagrevale, termalno zračile i gubile energiju. Nakon postepenog hlađenja, ugaoni momenat im je bivao sve manji i počele su da tonu ka središtu protogalaksije. Tamna materija koja veoma slabo interaguje je ostala u halou. Dakle u to doba je došlo do razdvajanja tamne i obične materije.

Koncentracija u jezgru je bivala sve veća stvarajući uslove za nastanak prvih zvezda i kompaktne spororotirajuće centralne oblasti. Težnja gasa da se sažima pod uticajem sopstvene gravitacije uravnotežena je plimskim silama dominantne tamne materije. Tek kada je gustina svetle materije postala nekoliko desetina puta veća od gustine tamne, stvorili su se uslovi za formiranje zvezda.

Nastankom zvezda i pojavom prvih supernovih došlo je do ponovnog zagrevanja okolnog gasa koji je povratio deo svog ugaonog momenta i nastavio da se kreće oko jezgra u formi manjih ili većih oblaka. U protogalaksijama sa manjom gustinom gasa proces formiranja zvezda tekao je sporije, pa su količine gasa otrgnutog iz središta bile znatno veće. Sudari među formiranim gasnim oblacima inicirali su lokalna zgušnjavanja

gasa gde se rađaju nove zvezde, vremenom obrazujući disk. S druge strane, kod protogalaksija obrazovanih u regijama velike gustine proces formiranja zvezda teče znatno brže, trošeći skoro sav gas. Zbog toga izostaje formiranje diska i njihova brzina rotiranja je manja. Praktično ono što se dešava pri formiranju galaksija je mešavina ova dva modela i u zavisnosti od toga šta je dominantnije dobijamo proto-spiralne ili proto-eliptične galaksije ili ni jedno ni drugo, odnosno nepravilne.

Iako zvezde još nisu bile formirane ili su tek počele da se formiraju, trebalo bi da je moguća detekcija IC zračenja protogalaksija. Međutim, protogalaksije još nisu otkrivene, delom zbog slabog sjaja a delom zbog ogromnih udaljenosti.

Posmatranjem galaksija sa velikim crvenim pomacima, dakle na ogromnim rastojanjima, mi praktično zavirujemo u prošlost. Vidimo ih onako, kako su izgledale u ranim periodima svog "života". Primetno je da su uglavnom nepravilnijeg oblika i manjih dimenzija od nama bližih galaksija. Na osnovu toga se može izvesti zaključak da galaksije vremenom menjaju neke svoje karakteristike, odnosno evoluiraju.

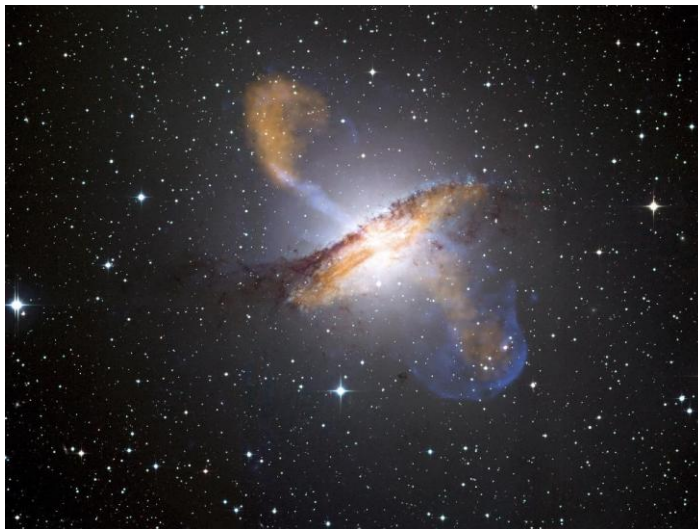
Evolucija galaksija

Ostavljene same galaksije evoluiraju lagano stvarajući generacije zvezda koje nakon napuštanja glavnog niza postaju beli patuljci, neutronske zvezde ili crne rupe i u međuvremenu obogaćuju međuzvezdanu materiju sve većim procentom težih elemenata. One siromašne gasom gube sjaj i postaju sve crvenije kako masivne zvezde polako nestaju a njihove zamene bivaju sve ređe. Galaksije bogate gasom duže ostaju plave zbog svojih masivnih sjajnih zvezda sve dok traju rezerve gasa. Ovu sliku narušava činjenica da velika većina galaksija nije usamljena već obitava u manjim grupama ili jatima i interaguje međusobno.

Galaksije uvećavaju svoju masu i eventualno menjaju oblik na dva načina: akrecijom gasa i međusobnim spajanjima. Gasna akrecija je i jedan od prvobitnih mehanizama za samo stvaranje galaksija i pomalo je teško razdvojiti proces formiranja od procesa evolucije. Pod gasnom akrecijom mogu se smatrati i slučajevi kada mala galaksija bude prosto apsorbovana od strane veće. Numeričkim simulacijama je pokazano da su galaksije, masa manjih od 10^{10} sunčevih, nastale uglavnom gasnom akrecijom.

Halo tamne materije koji okružuju većinu (ako ne sve) galaksija imaju presudan značaj za međugalaktička dejstva. Sama činjenica da se oni prostiru mnogo dalje od luminozne granice povećava verovatnoću za interakcije. Kako se dve galaksije približavaju jedna drugoj njihovi tamni halo prvi počinju da interaguju. Plimskim silama, oni usporavaju kretanje galaksija i čupaju materiju jedna sa druge. Dolazi do

preraspodele materije među njima usled čega se preuređuje unutrašnja struktura galaksija. Samim tim će na nekim mestima doći do kompresije međuzvezdanog gasa što može inicirati intenzivno rađanje zvezda. Galaksije u kojima zvezde nastaju izrazito brzim tempom, do 1000 puta brže nego u normalnim galaksijama, nazivaju se starburst-galaksije. Na slici 2 je prikazana galaksija Kentaur A koja upravo prolazi kroz starburst fazu. Ona je nama najbliža aktivna galaksija i peta najsjajnija na noćnom nebu. Takođe, usled gravitacionog dejstva približavajućih galaksija, jedan deo materije može biti usmeren ka crnoj rupi u galaktičkom jezgru utičući na pojačanu aktivnost, naročito kod aktivnih galaksija.



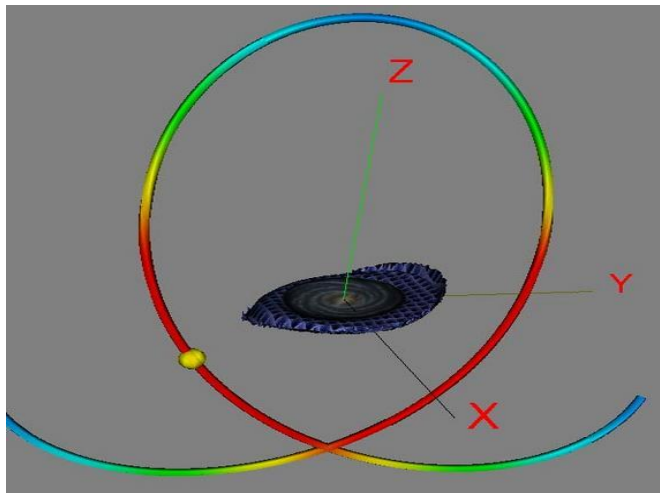
Slika 2: *Starburst galaksija Kentaur A, mase bilion sunčevih masa*

Ove dve poslednje činjenice mogu biti indikatori međudejstva i mogućeg početka spajanja galaksija tzv. merdžera (engl. mergers). Praćenjem tih indikatora izvodi se zaključak da se većina merdžera desila pre mnogo vremena (galaksije sa velikim crvenim pomakom), kada su galaksije bile bliže jedne drugoj i sudari mnogo učestaliji. Međutim, spajanja i sudari među galaksijama se dešavaju sve vreme pa i u naše doba. Prilikom sudara male su šanse da dođe do kolizije među zvezdama zbog ogromne nesrazmere njihovog međusobnog rastojanja i dimenzija.

Zahvaljujući međusobnom gravitacionom privlačenju galaksije počinju da se spiralno približavaju jedna drugoj i u zavisnosti od njihovog tipa i odnosa masa može doći do različitih ishoda. Ako je odnos masa znatan, manja galaksija će prosto biti "usisana" od strane veće i smestiće se blizu njenog središta. Ovi mali merdžeri obično ostavljaju svoj "otisak" u vidu ljsuke, oko ili unutar veće galaksije, kao posledicu disperzije zvezda. Kod više od polovine posmatranih eliptičnih galaksija su primećene ovakve

strukture. Supermasivne galaksije se najčešće nalaze u središtima velikih jata gde je najveća verovatnoća da dođe do kontakta među galaksijama. U našoj okolini, patuljasta eliptična galaksija u Strelcu je na putu da bude apsorbirana od strane Mlečnog puta, a slična sudbina verovatno očekuje i Magelanove oblake.

Kao posledica interakcije između haloa dve ili više galaksija može doći do izvitoperenosti diska. To se primećuje kod velikog broja galaksija pa i kod Mlečnog puta usled gravitacionog međudejstva sa Magelanovim oblacima. Da nema tamne materije, mala masa Magelanovih oblaka ne bi bila dovoljna za tako nešto. Deformacija diska se ogleda u tome da jedna strana, na razdaljini približno jednakoj rastojanju Sunca od centra Galaksije, počinje da se izdiže da bi na rubu diska to izdizanje iznosilo oko 3 kpc. Druga strana se spušta ispod ravni diska. To vidimo na slici 3.



Slika 3: Izvitoperenost Mlečnog puta

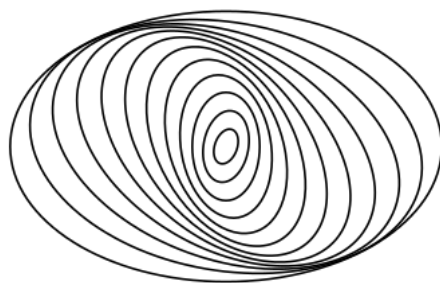
Simulacijama je pokazano, ako su mase dve galaksije uporedive sa masom naše, a jedna od njih ima manju zapreminu, može doći do reorganizacije spiralnih grana što inicira masovno rađanje novih zvezda. Nakon par stotina miliona godina završava se formiranje galaktičkog dvojnog sistema. Krajnji rezultat veoma liči na spiralnu galaksiju M51A ili Vrtlog (engl. Whirlpool), na slici 4. Zajedno sa njom prikazan je i njen pratilac, galaksija M51B. Inače, Whirlpool je prva galaksija klasifikovana kao spiralna.



Slika 4: Dvojni galaktički sistem M51A i M51B

Ako su galaksije uporedivih dimenzija i masa može doći do uništavanja diskova spiralnih galaksija i započinjanja starburst epizode. Na taj način, od dve spiralne galaksije nastaje eliptična, uz moguće izbacivanje velikih količina gasa u međugalaktički prostor. Već je rečeno da su centralni delovi jata galaksija oblasti sa najvećom koncentracijom galaksija. U njima se nalazi vrlo mali broj spiralnih galaksija a razlog je velika verovatnoća uništavanja njihove spiralne strukture. S druge strane, spiralne galaksije su mnogo zastupljenije na velikim crvenim pomacima, što znači u prošlosti, jer u međuvremenu njihov broj opada kao rezultat sudara i spajanja ("merdžovanja"). Smatra se da je gasna akrecija i dalje dominantan faktor pri formiranju i evoluciji galaksija veličine 10^{10} - 10^{11} sunčevih masa, a da kod onih većih od 10^{11} primat preuzima njihovo spajanje.

Spiralne grane se obrazuju u tankom sloju u disku. One se mogu objasniti kao posledica frontova talasa gustine zvezda i gasa koje se kreću konstantnim brzinama, sporije od okolnih zvezda. Pretpostavlja se da zvezde orbitiraju po blago eliptičnim putanjama i da kako se menja rastojanje od centra galaksije menjaju se i orijentacije elipsi. U zonama gde su one najbliže jedna drugoj stvara se privid spiralnih kraka. To je ilustrovano na slici 5.



Slika 5: Galaktički spiralni kraci

Kvazari su najekstremniji oblici galaksija sa aktivnim galaktičkim jezgrom. Oni zrače izuzetne količine energije iz akrecionog diska koji se formira oko supermasivne crne rupe. U evolucionoj skali faza kvazara je bila na vrhuncu na crvenim pomacima $2 < z < 3$ što znači pre desetak milijardi godina. Neki naučnici smatraju da se može uspostaviti evolutivni niz: kvazar, aktivna galaksija, normalna galaksija.

Zaključak

Činjenica je da su na najvećim crvenim pomacima najzastupljenije nepravilne galaksije a kako se smanjuje rastojanje do nas tako raste zastupljenost spiralnih i eliptičnih galaksija. Na osnovu toga može se izvesti pogrešan zaključak da imamo samo jednu vrstu galaksije koju vidimo u različitim evolutivnim fazama. Ono što je u najvećoj meri odredilo tip galaksije odigralo se u ranoj fazi njenog formiranja. Kasnije su akrecijom međugalaktičke materije i pripajanjima manjih galaksija, one dobijale na masi i postajale uređenije. Samo spajanjem galaksija približnih masa one su dramatično menjale svoj oblik.

Ostala su mnoga pitanja na koja još ne postoji odgovor. Zašto galaksije rotiraju? Šta je tamna materija i kako utiče na formiranje galaksija? Kako se formira tanak galaktički disk bez centralnog ispupčenja? Numeričke simulacije na sve moćnijim računarima kao i posmatranje galaksije na sve većim crvenim pomacima mogu nas približiti tim odgovorima.

Literatura:

- Larson R.B., *Galaxy formation and evolution*, Yale Astronomy Department
- Conselice C.J., *The evolution of galaxy structure over cosmic time*, 2014, annual review of astronomy and astrophysics
- Vukićević-Karabin M., Atanacković O., *Opšta astrofizika*, 2004-2010, Zavod za udžbenike, Beograd
- Cattaneo A., Warnick K., Mamon G.A., Knebe A., *How do galaxies acquire their mass?*, 2011, Astronomy and astrophysics
- Mo H., Van den Bosch F., White S., *Galaxy formation and evolution*, 2010, Cambridge