

Jednostavan model međugalaktičkih interakcija – određivanje brzine Andromedine galaksije

Numeričkim simulacijama je određena tangencijalna brzina Andromedine galaksije, korišćenjem vrednosti brzine i položaja galaksije M33 dobijenih VLBA (Very Large Baseline Array) merenjem. Model uključuje galaksije M31, M33 i Mlečni put. Zadati su njihovi trenutni položaji i brzine. Zatim je simulirano kretanje ovih galaksija od danas do pre 10 milijardi godina. Kao rezultat su uzimane vrednosti tangencijalnih brzina Andromede dobijenih u simulacijama u kojima su zadovoljeni uslovi da nije došlo do sudara galaksija M31 i M33 i da su galaksije M31 i Mlečni Put bile znatno bliže pre 10 milijardi godina. Eliminisanjem brzina Andromedine galaksije koje ne zadovoljavaju prethodna dva uslova, određen je interval u okviru kojeg je današnja brzina galaksije M31.

Uvod

Jedan od aktuelnih problema u dinamici Lokalne Grupe je procena tangencijalne brzine Andromedine galaksije u odnosu na Mlečni put. Mlečni put i Andromedina galaksija nalaze se na udaljenosti od oko 700 kpc i kreću se relativnom brzinom od 117 km/s jedna ka drugoj (Binney & Tremaine 1987). Novija VLBA (Very Large Baseline Array) posmatranja dva masera vode na suprotnim stranama galaksije M33 su pomogla određivanju njenog rastojanja od 730168 kpc i ukupne brzine 19059 km/s u odnosu na Mlečni Put (Brunthaler 2005). Međutim, uprkos brojnim pokušajima, takvi maseri nisu nađeni u Andromedinoj galaksiji, tako da tangencijalna brzina M31 u odnosu na Mlečni Put još nije određena. Radialna brzina poznata je iz Doplerovog efekta. Na os-

novu ispitivanja starosti zvezda u Andromedinoj galaksiji i Mlečnom putu došlo se do zaključka da su njihovi diskovi nastali pre oko 10 milijardi godina i da nije došlo do bitnijeg međusobnog uticaja od tada, kao ni značajnijeg uticaja Andromedine galaksije na obližnju galaksiju M33 koja je nastala nešto kasnije (Wyse 2000; Gilmore, Wyse & Norris 2002; Peloso, de Silva, Arani-Prado 2005; Toth, Ostriker 1992).

Cilj ovog rada je procena tangencijalne komponente brzine Andromedine galaksije korišćenjem jednostavnog modela koji koristi empirijske potencijale i rapodele zvezda u disku, i ne uključuje uobičajeni zahtev za samousaglašenošću potencijala i raspodele mase. Prednost ovog modela je u njegovoj jednostavnosti i numeričkoj nezahtevnosti, koje omogućavaju obavljanje velikog broja integracija, sa širokim spektrom različitih početnih uslova. Ova prednost čini naš metod korisnom dopunom realističnijih, samousaglašanih modela.

Metod

Početni uslovi i modeliranje galaksija

Kao početni uslovi simulacije su korišćene današnje vrednosti brzina, veličina i međusobnih položaja galaksija. Za rastojanje galaksija M31 i M33 od Mlečnog puta uzete su vrednosti 786 kpc i 794 kpc (McConnachie 2004; 2005). Za M33 poznata je ukupna brzina u odnosu na Mlečni put, ali za M31 je određena samo radialna komponenta. Vektori tangencijalne brzine M31 zadavane su kao ulazni parametar simulacija. Brzine su birane izotropno, u svim pravcima, sa intenzitetima brzine iz intervala (-200, +200) km/s sa korakom 20 km/s, i vrednostima odgovarajućeg ugla od 0 do $40\pi/21$ rad. Ukupno je puštena 441 simulacija.

Sandra Ranković (1988), Beograd, Milića Rakića 4/114, učenica 4. razreda Matematička gimnazije

MENTOR:
Marko Simonović, student Fizičkog fakulteta u Beogradu

Galaksije su modelirane tako da imaju po 500 zvezda u svom disku. Raspodela zvezda u galaktičkom disku je ravnomerna. Zvezde se nalaze u jednoj ravni oko centra galaksije u prstenu unutrašnjeg poluprečnika 5 kpc i spoljašnjeg 20 kpc u slučaju M31 i Mlečnog puta, odnosno 2.5 i 7.5 kpc u slučaju galaksije M33.

Probne čestice se na početku nalaze u jednoj ravni (inklinacije su nula) i kreću se po kružnim putanjama (ekscentriciteti su nula). Zvezde u centru i blizu centra galaksije nisu ulazile u model diska, jer su suviše blizu jezgri galaksije koje ima dominantan uticaj na njih.

Kretanje zvezda

Zvezde su predstavljene kao probne čestice koje se kreću u superpoziciji potencijala sve tri galaksije i ne interaguju međusobno. Ovakav pristup je pokazao dobre rezultate pri ranijim istraživanjima (Reid, Brunthaler 2005).

Potencijal svake galaksije računat je kao zbir potencijala centralnog ovala, diska i haloa galaksije. Za Andromedinu galaksiju, Mlečni put i M33 korišćen je analitički model iz rada Geehan i saradnika (Geehan *et al.* 2005).

Prema korišćenom sferno-simetričnom modelu potencijal centralnog ovala Φ_b u zavisnosti od rastojanja od centra galaksije r iznosi:

$$\Phi_b(r) = -\frac{G M_b}{r_b + e} \quad (1)$$

gde je G gravitaciona konstanta, M_b ukupna masa centralnog ovala a r_b jedinični poluprečnik ovala.

Potencijal galaktičkog diska određen je prema formuli:

$$\Phi_d(r) = -2\pi G \Sigma_0 R_d^2 \frac{1 - e^{-\frac{r}{R_d}}}{r} \quad (2)$$

gde je Σ_0 centralna površinska gustina diska a R_d jedinični poluprečnik diska.

Potencijal Φ_h haloa galaksije modeliran je na sledeći način:

$$\Phi_h(r) = -4\pi \delta_c \rho_c r_h^2 \frac{r_h}{r} \ln \left(\frac{r + r_h}{r} \right) \quad (3)$$

gde je δ_c parametar gustine haloa, ρ_c današnja kritična gustina a r_h jedinični poluprečnik haloa.

Na kretanje probnih čestica utiče samo polje, koje je računato kao negativni gradijent ukupnog potencijala:

$$P(r) = -\nabla(\Phi_b(r) + \Phi_d(r) + \Phi_h(r)) \quad (4)$$

Numeričke vrednosti upotrebljenih parametara za M31 i Mlečni Put uzete su iz rada Geehan i saradnika, uz pretpostavku da su Andromedina galaksija i Mlečni put istih veličina. Odgovarajuće vrednosti parametara za M33 dobijene su skaliranjem tih parametara uz korišćenje zakonitosti da je odnos masa-sjaj približno jednak za galaksije M31 i M33 (tabela 1). Važe sledeći odnosi:

$$Y = \frac{M [M_\odot]}{L [L_\odot]} \quad (5)$$

gde je Y odnos masa-sjaj, M masa objekta izražena u masama Sunca, L sjaj objekta izražen u sjaju Sunca.

$$L \propto M^4 \quad (6)$$

$$M_{m33} = M_{m31} \left(\frac{L_{m33}}{L_{m31}} \right)^4 \quad (7)$$

Tabela 1. Vrednosti parametara za modele galaksija

| Parametar | Vrednost u modelu M31 i Mlečnog puta | Vrednost u modelu M33 |
|------------|---|---|
| M_b | $2.8 \cdot 10^{10} M_\odot$ | $0.175 \cdot 10^{10} M_\odot$ |
| Σ_0 | $650.0 \cdot 10^6 M_\odot/\text{kpc}$ | $650.0 \cdot 10^6 M_\odot/\text{kpc}$ |
| R_d | 5.4 kpc | 1.35 kpc |
| δ_c | $7.8 \cdot 10^4$ | $7.8 \cdot 10^4$ |
| R_h | 13.3 kpc | 5.3 kpc |
| ρ_c | $143.07 \cdot 10^{-8} M_\odot/\text{kpc}^3$ | $143.07 \cdot 10^{-8} M_\odot/\text{kpc}^3$ |
| R_b | 0.61 kpc | 0.152 kpc |

Integracija i uslov sudara galaksija

Kretanje galaksija numerički je simulirano Runge-Kutta metodom četvrtog reda. Pri računanju međusobnog uticaja galaksija, radi određivanja njihovih putanja, svaka galaksija je posmatrana kao probna čestica sa položajem u središtu te galaksije. Na kretanje

svake galaksije, kao i na zvezde unutar njih, utiče samo polje ukupnog potencijala sve tri galaksije.

Kao kriterijum za odbacivanje onih vrednosti tangencijalne brzine Andromedine galaksije koje ne odgovaraju realnom sistemu, definisan je uslov na osnovu koga se može zaključiti da li je došlo do sudara galaksija M31 i M33. To je učinjeno pomoću određivanja ukupnog odstupanja zvezda od ravni diska galaksije nakon završetka simulacije. Što je veće pomenuto odstupanje, a time i “razvejanost” galaksije, veća je verovatnoća da je došlo do sudara.

Vektor momenta impulsa zvezde koja se kreće u ravni diska galaksije normalan je na ravan diska. Iz vektora momenta impulsa svih zvezda dobijen je vektor srednjeg momenta impulsa. Ravan diska je normalna na njega i sadrži centar galaksije. Ukoliko se zvezda pomerila iz ravni diska, njen moment impulsa razlikuje se po pravcu od srednjeg momenta. Zato je za svaku zvezdu računat ugao između njenog momenta impulsa i srednjeg momenta impulsa galaksije. Iz ovog ugla i rastojanja zvezde od središta galaksije, dobijeno je rastojanje zvezde od diska d :

$$\cos \varphi = \frac{\mathbf{L} \cdot \mathbf{L}_s}{L L_s} \quad (8)$$

$$d = r \sin \varphi \quad (9)$$

gde je \mathbf{L}_s srednji moment impulsa, \mathbf{L} moment impulsa zvezde, a r rastojanje zvezde od središta galaksije.

Zavisnost broja zvezda na rastojanju Δd od centra galaksije od rastojanja d od centra je dobro opisana Gausovom raspodelom. Za meru rasturanja galaksije uzeta je standardna devijacija ove raspodele.

Kada ova devijacija pređe graničnu vrednost, određenu pomoću poređenja izgleda galaksija za razne početne uslove, konstatujemo da je došlo do sudara. Eliminisanjem brzina za koje je odgovarajuće sigma veće od granične vrednosti ostaje nam opseg u okviru kog se nalazi današnja tangencijalna brzina Andromedine galaksije.

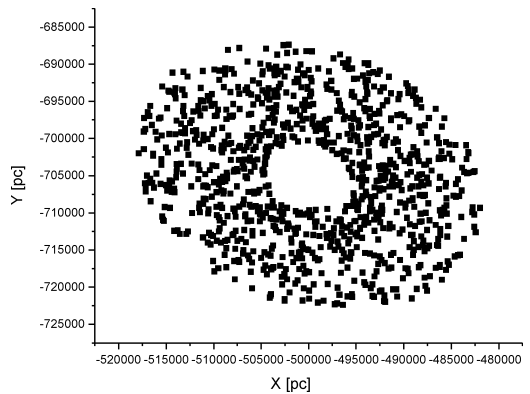
Rezultati

Na slici 1 prikazan je model galaksije M31 na početku simulacije. Zvezde su raspoređene samo u ravni diska galaksije. Na slici 2 prikazano je kretanje tri galaksije za interval od nekoliko miliona godina.

Vrednost standardne devijacije u zavisnosti od početnih brzina Andromedine galaksije prikazana je

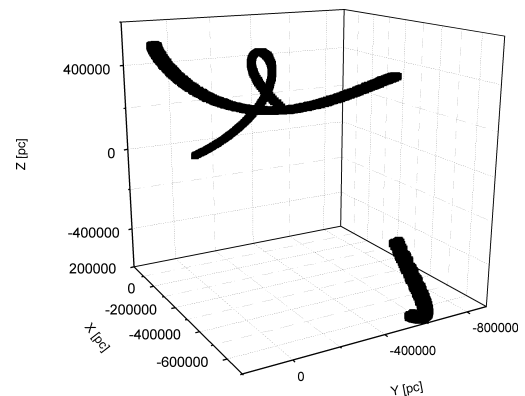
na slici 3, gde se primećuje da pojedine vrednosti prelaze i milion parseka. Za 500 zvezda koliko je korišćeno u simulaciji, ova vrednost predstavlja prosečno odstupanje od 2000 pc od ravni diska po zvezdi, što je za dimenzije diska (5000-20000 pc) izuzetno velika vrednost, koja pokazuje da je došlo do sudara galaksija za odgovarajuću vrednost tangencijalne brzine M31.

Nakon obrade i upoređivanja dobijenih vrednosti standardne devijacije za sve tri galaksije, kao uslov



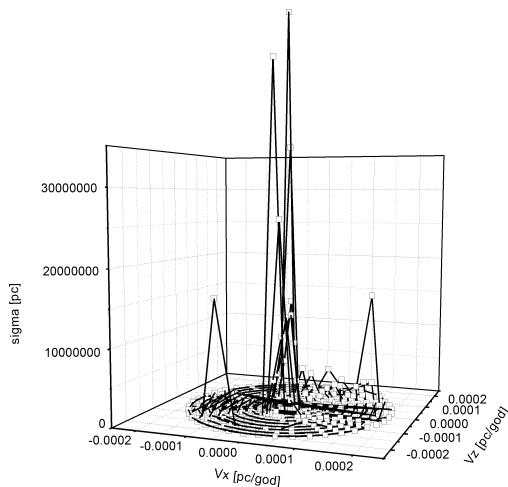
Slika 1. Model Andromedine galaksije

Figure 1. Model of Andromeda galaxy



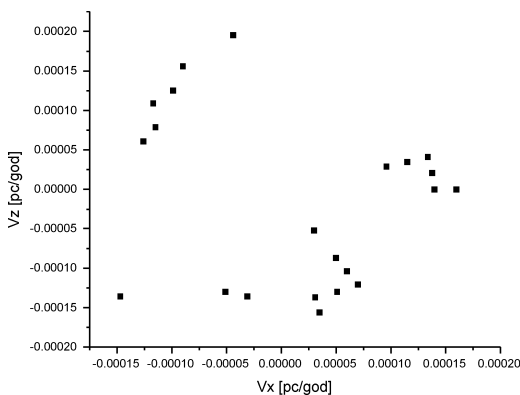
Slika 2. Primer kretanja tri galaksije u simulaciji

Figure 2. An example of the movement of three galaxies in the simulation



Slika 3. Zavisnost standardne devijacije rastojanja od centra galaksije od početnih brzina, za galaksiju M31

Figure 3. Dependence of the standard deviation of the galactocentric distances on the initial velocity, for the M31 galaxy



Slika 4. Vrednosti komponenta brzine M31 koje ne dovode do sudara sa Mlečnim putem (za minimalnu devijaciju)

Figure 4. Values of velocity components of the M31 galaxy consistent with the no-collision condition (for minimal standard deviation)

pri kom zaključujemo da je došlo do sudara uzeto je da vrednost standardne devijacije prelazi 6500 pc za Andromedinu galaksiju, 3000 pc za M31 i 9000 pc za Mlečni Put. Za Andromedu i Mlečni put su uzete različite granične vrednosti sigma pošto je u simu-

lacijama prilikom sudara došlo do većeg rasipanja zvezda Mlečnog puta, pa je uzeta i veća granična vrednost ukupnog odstojanja zvezda od diska. Vrednosti brzine Andromedine galaksije koje su ulazile u razmatranje za današnju vrednost tangencijalne brzine su one za koje je srednje odstupanje po zvezdi od ravni diska manje od 13 pc.

Vrednosti brzina za već pomenute odgovarajuće vrednosti standardne devijacije pri kojima nije došlo do sudara, prikazane su na grafiku 4, i sa njega su određene najverovatnije brzine galaksije M31. Sa grafika možemo videti da su dve vrednosti ugla između x-komponente brzine i ukupne brzine, najzastupljenije (odgovaraju im po četiri, odnosno tri brzine Andromedine galaksije), dok je jedna vrednost ukupne brzine M31 dominantna.

Najverovatnije odgovarajuće današnje brzine Andromedine galaksije su:

$$v = (14 \pm 2) \cdot 10^{-5} \text{ pc/god}$$

dok je ugao od pravca ka Mlečnom putu:

$$\phi = (0.3 \pm 0.1) \text{ rad ili } \phi = (-1.2 \pm 0.1) \text{ rad.}$$

Određivanje preciznijeg od ova dva dobijena rezultata za vrednost ugla, ostaje kao predmet za buduća istraživanja.

Dobijene vrednosti ukupne brzine i ugla odgovaraju komponentama brzina:

$$v_x = (7 \pm 3) \cdot 10^{-5} \text{ pc/god}$$

$$v_z = (-12 \pm 5) \cdot 10^{-5} \text{ pc/god}$$

za ugao $\phi = 0.3$ rad, odnosno vrednostima:

$$v_x = (13 \pm 5) \cdot 10^{-5} \text{ pc/god}$$

$$v_z = (4 \pm 2) \cdot 10^{-5} \text{ pc/god}$$

za ugao $\phi = -1.2$ rad.

Važno je napomenuti da je na grafiku 4, kao rezultat usvojen intenzitet brzine koji odgovara najvećem broju brzina puštanih u simulaciji (nalaze se na istom krugu).

Zaključak

Simulacijom kretanja galaksija M31, M33 i MW od danas do -10 milijardi godina uz postavljene uslove da disk M33 nije bio poremećen uticajem M31 i da su galaksije pre 10^{10} godina bile znatno bliže, određen je opseg vrednosti u okviru koga se nalazi trenutna brzina Andromedine galaksije.

Dobijeni su rezultati:

$$v_x = (7 \pm 3) \cdot 10^{-5} \text{ pc/god}$$

$$v_z = (-12 \pm 5) \cdot 10^{-5} \text{ pc/god}$$

za ugao $\phi = 0.3$ rad, odnosno:

$$v_x = (13 \pm 5) \cdot 10^{-5} \text{ pc/god}$$

$$v_z = (4 \pm 2) \cdot 10^{-5} \text{ pc/god}$$

za ugao $\phi = -1.2$ rad. Pri tome nije računat uticaj okolnih tela na Lokalnu grupu, niti priraštaj mase tih objekata na masu Lokalne grupe, kao ni uticaj i udeo tamne materije u ukupnoj masi.

Istraživanje se može proširiti i povećati preciznost rezultata uvođenjem realističnijeg, cilindrično-simetričnog umesto sferno-simetričnog potencijala, računanjem kosmoloških efekata kao što je reskaliranje parametara itd. Opseg brzina M31 je dobijen sa relativnom disperzijom od oko 40%, što je trenutno dovoljno precizan rezultat za primenu u narednim istraživanjima.

Dobijeni rezultati mogu biti korisni u budućim ispitivanjima Lokalne grupe galaksija, pogotovu njihove evolucije, kao i daljeg položaja i međusobnog uticaja.

Zahvalnost. Zahvaljujem se Marku Simonoviću i Goranu Rakiću za veliku pomoć, odvojeno vreme i smernice tokom izrade programa, Igoru Smoliću na usmeravanju i teorijskoj pomoći i Nikoli Božiću na ukazanim sugestijama i strpljenju. Zahvaljujem se Milanu Ćirkoviću i Ediju Bonu sa Opservatorije na Zvezdari za ukazane sugestije pri izradi rada i veliku pomoć i izdvojeno vreme pri puštanju simulacija. Takođe se zahvaljujem Mihailu Čubroviću na korekcijama završne verzije ovog rada.

Literatura

Loeb A., Reid M. J., Brunthaler A., Falcke H. 2005. Constraints on the proper motion of the Andromeda galaxy based on the survival of its

satellite M33. *The Astrophysical Journal*, **633**: 894.

Geehan J.J., Fardal M.A., Babul A., Guhathakurta P. 2006. Investigating the Andromeda stream: I. Simple Analytic Bulge-Disk-Halo model for M31. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **366**: 996.

Naab T., Ostriker J. P., 2005. A simple model for the evolution of disc galaxies: The Milky Way. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **366**: 899.

Navarro F., Frenk S., White D.M., 1997. A universal Density profile from Hierarchical Clustering. *The Astrophysical Journal*, **490**: 493.

Sandra Ranković

A Simple Model of Interaction Between Galaxies: Estimation of Andromeda Galaxy Speed

By numerical simulations, and using recent VLBA (Very Large Baseline Array) measurements of masers in M33, the interval of Andromeda transverse speed has been found. Galaxies M31, M33 and Milky Way were modelled and their positions and velocities given. Their motion from today, over the past 10 billion years, was simulated. Conditions which were used for distinguishing Andromeda's possible speeds were that there was no collision between any of those three galaxies over the past 10 billion years, and that these three galaxies were closer to each other 10 billion years ago. By eliminating Andromeda's velocities that are not in accordance with these two conditions, we gain the interval of today's Andromeda transverse speed.