
Srđan Keča i Marija Vlajić

Orijentacija galaksija sa osvrtnom na podstrukture u jatu Coma Berenices

Metod za analizu distribucije orijentacija galaksija, predložen od strane Hawley & Peebles (1975), primenjen je na jato galaksija Coma Berenices (Abell 1656), u cilju utvrđivanja eventualne anizotropne raspodele. Primenom statističkih testova – χ^2 testa, testa autokorelacija i Furijeovog testa ispitana je distribucija pozicionih uglova galaksija. Dat je i generalni opis jata i njegove evolucije, sa osvrtnom na postojanje podstrukture. U tom svetlu, analiza je izvršena nad nekoliko različitih struktura pronađenih u polju jata. Rezultati pokazuju prisustvo anizotropije, naročito izražene u većim strukturama. U cilju ispitivanja validnosti dobijenih rezultata, prikazana je raspodela inklinacija galaksija u jatu i data diskusija o nedostacima primenjenog metoda.

Uvod

Najnovija istraživanja na polju vangalaktičke astronomije ukazuju na izvesnu pravilnost kada je u pitanju raspored i orijentacija galaksija u jatima. Rezultati simulacija evolucije kosmičkih struktura, u zavisnosti od kosmoloških scenarija, predviđaju različitu raspodelu uglovnog momenta, tj. orijentacije galaksija. Ovo se manifestuje kroz različite oblike uređenosti galaksija u jatima i superjatima. Većina klasičnih kosmoloških scenarija predviđaju slučajnu raspodelu osa galaksija, dok u novijim teorijama upravo postojanje anizotropne distribucije dobija na značaju. Prema jednoj od teorija, ose galaksija u jatu imaju tendenciju ka normali na ravan jata, odnosno superjata (Ozernoy 1978, Efsthathiou & Silk 1983; prema: Godlowski 1993). Po drugom modelu, pak, ravni galaksija su pretežno normalne na ravan jata (Shandarin 1974, Doroshkevich *et al.* 1978; prema: Godlowski 1993). Još jedan, nedavno predloženi scenario, tzv. “model ježa”, predviđa da su ose rotacija galaksija mahom usmerene ka centru jata (*ibid.*). Rezultati dosadašnjih istraživanja ne isključuju ni jedan od ovih modela. Pokazalo se, naime, da se način orijentisanja osa galaksija menja od jata do jata, dok se pokazatelji izotropne distribucije javljaju uglavnom

Srđan Keča (1982), Pančevo, Cara Lazara 46, učenik 1. razreda Gimnazije “Uroš Predić” u Pančevu

Marija Vlajić (1981), Niš, Bore Price 6/4, učenica 2. razreda Gimnazije “Bora Stanković” u Nišu

u slučaju nedostatka ili visoke kontaminacije podataka. Takođe, još uvek nije razjašnjeno da li je ova anizotropija posledica globalnih ili lokalnih efekata.

Određivanje zakonitosti koje vladaju među galaksijama u jatima i superjatima veoma je značajno, jer predstavlja uvod u poznavanje struktura formiranih na ranom stupnju evolucije galaksija i jata galaksija. Stoga se ovim istraživanjima posvećuje sve veća pažnja. Međutim, nedostaci potrebnih podataka o morfološkim tipovima pojedinačnih galaksija, relativno mali broj izmerenih crvenih pomaka i velike greške pri određivanju pozicionog ugla i inklinacije galaksije dovode u pitanje pouzdanost odgovarajućih statističkih analiza.

Postoje dva osnovna metoda za ispitivanje orijentacije galaksija. Prvi, stariji metod (Hawley & Peebles 1975; prema: Godlowski 1993), pri analizi orijentacije uzima u obzir samo pozicioni ugao galaksije (ugao između pravca ka severnom nebeskom polu i prividne ose galaksije u ekvatorskom koordinatnom sistemu). Na ovaj način se pouzdani podaci dobijaju samo za galaksije koje približno leže u ravni vizure (tzv. *edge-on* galaksije), dok se za ostale galaksije dobijaju nesigurni podaci. Jedan od načina da se ovaj nedostatak prevaziđe bio bi da se takve galaksije ne uzimaju u obzir pri analizi. Međutim, kako njih ima daleko više od *edge-on* galaksija, postavlja se pitanje o validnosti ovako dobijenih rezultata. Drugi, napredniji metod (Jaaniste & Saar 1977, 1978; prema: Godlowski 1993) posmatra jato kao trodimenzionalni objekat i pri analizi orijentacije uzima u obzir, pored pozicionog ugla, i inklinaciju galaksije (nagib ravni galaksije u odnosu na pravac vizure). Primenom ovog metoda, koordinate i orijentacioni uglovi galaksija se transformišu u lokalni koordinatni sistem jata. Na taj način u ispitivanju orijentacije učestvuje daleko veći broj galaksija sa podacima bližim realnom slučaju, što daje veći broj pouzdanih rezultata.

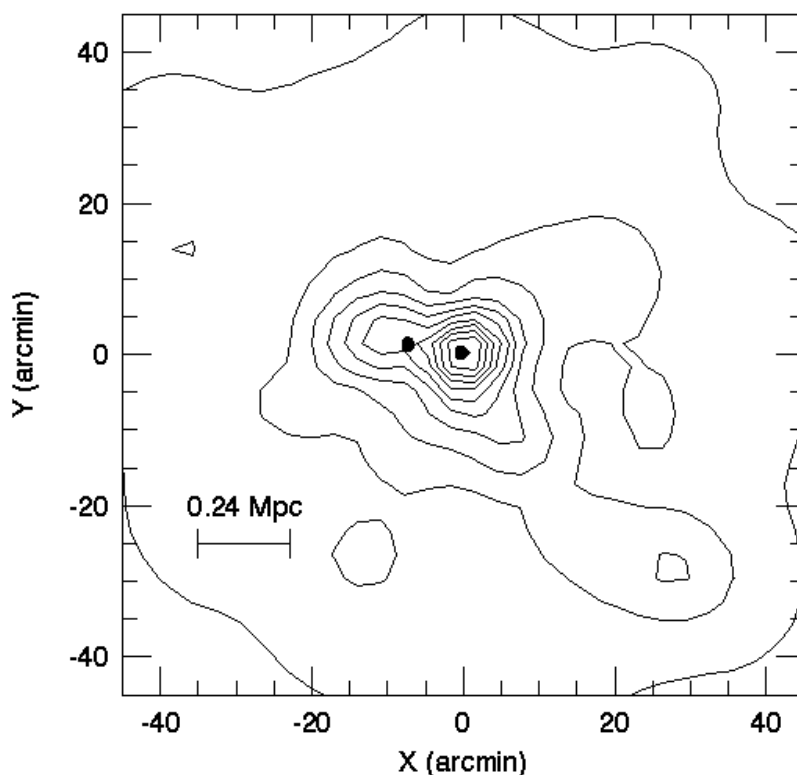
Ovaj rad ima za cilj da primeni stariji metod za analizu distribucije orijentacija galaksija (Hawley & Peebles) na jato Coma Berenices. Dat je i osvrt na evoluciju jata i njegove podstrukture i ukratko opisani statistički testovi koji su primenjeni u analizi raspodele pozicionih uglova galaksija na različite strukture u okviru jata. Radi ispitivanja validnosti rezultata dobijenih ovim metodom, prikazana je i raspodela inklinacija galaksija.

Opis jata Coma Berenices

Ekvatorske koordinate jata galaksija Coma Berenices (Abell 1656) su $\alpha = 12^{\text{h}}59^{\text{m}}42^{\text{s}}.8$ i $\delta = +27^{\circ}58'14''$ (J2000). Ono spada u bogata jata, što ga, u pogledu veličine uzorka, čini izuzetno povoljnim za statističku analizu. Različitim istraživanjima ovog jata (npr. mapiranje raspodele gustine i X-zračenja) pokazano je da je ono složen sistem od nekoliko manjih

struktura. Pod pojmom strukture ovde se podrazumeva skup galaksija koji se izdvaja u okviru jata (npr. podjato), što je najčešće posledica ranijeg samostalnog razvoja.

Na mapi raspodele gustine (slika 1) prikazan je uži region jata, u kome se jasno uočavaju podstrukture. U samom jezgru su označene dve dominantne galaksije, NGC 4874 i NGC 4889. Smatra se da je na ranijem stadijumu evolucije jata Coma Berenices došlo do integracije dva jata sa centralnim dominantnim galaksijama NGC 4874 (osnovna centralna galaksija jata) i NGC 4889. Pri tome je NGC 4889 ejektovana iz jezgra zajedničkog jata, ali se smatra da će u kasnijim stadijumima ragoza jata ove dve galaksije formirati jednu centralnu dominantnu galaksiju (Colless & Dunn 1995). Na slici 1 uočljivo je još jedno podjato sa dominantnom galaksijom NGC 4839, 40' jugozapadno od centra jata (Churazov *et al.* 1999). Veruje se da je ono prošlo kroz centar jata, krećući se duž filameta *Veliki zid*, ka jatu Abell 1367, ali i da će doći do promene smera kretanja i do ponovne integracije ovog podjata sa jezgrom jata Coma Berenices (Colless & Dunn 1995).



Slika 1.
 Mapa raspodele
 gustine jata Coma
 Berenices. Preuzeto
 sa:
<http://gumby.spa.umn.edu/kriessler/images/a1656.d.gif>

Figure 1.
 Density map of the
 Coma cluster. Taken
 from:
<http://gumby.spa.umn.edu/kriessler/images/a1656.d.gif>

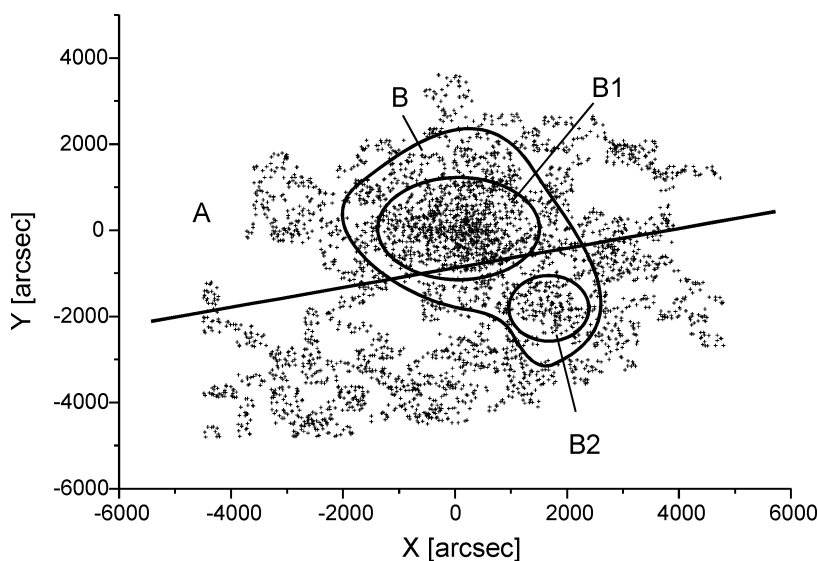
Metod

Pristup rešavanju problema orijentacije galaksija u jatima je statistički, što podrazumeva poređenje rezultata dobijenih posmatranjem sa postojećim teorijskim modelom jata galaksija. Na ovaj način se proverava ispravnost modela, da bi se on, ukoliko se pokaže kao neispravan zamenio nekim koji više odgovara empirijskim rezultatima. U ovom slučaju, teorijski model je jato sa izotropnom raspodelom orijentacija galaksija.

Uzorak galaksija kojim je raspolagano preuzet je iz kataloga galaksija u jatu Coma Berenices (Godwin *et al.* 1983). U njemu su predstavljene 6724 galaksije do granične magnitude $b_{26,5}=21.0$ u polju veličine 2.63 kvadratna stepena, što je omogućilo analizu i šireg i užeg regiona jata.

Pre primene statističkih testova, iz uzorka koji je analiziran uklonjene su galaksije koje ne pripadaju posmatranom jatu. Zapravo, najtačniji rezultati bi se dobili odstranjivanjem galaksija sa radijalnim brzinama iznad određenog nivoa, što bi eliminisalo iz uzorka sve pozadinske objekte. Nažalost, u katalogu kojim je raspolagano date su radijalne brzine za vrlo mali broj galaksija (svega 239). Usled toga, u svrhu dekontaminacije uzorka, korišćen je alternativni metod "površinske gustine" (Godlowski, lična komunikacija). Ovaj metod se zasniva na pretpostavci da sa porastom gustine određene oblasti vidnog polja raste i verovatnoća da galaksije te oblasti pripadaju jatu. Galaksije u uzorku su razvrstane u pravougaone odeljke, u zavisnosti od svojih koordinata, a zatim su odstranjeni oni odeljci koji su sadržali manji broj galaksija od prosečnog. Nakon toga su, na osnovu vizuelne procene, uklonjeni i oni odeljci za koje se, iako su imali odgovarajući broj galaksija, nije moglo tvrditi da pripadaju jatu, jer su bili suviše udaljeni od glavne galaksija. Treba napomenuti da uzorak dobijen primenom ovog metoda ne predstavlja jato, već reprezentativni skup galaksija kojim se aproksimira jato.

Posmatrajući ovako dobijen uzorak (slika 2), vizuelnom procenom i služeći se postojećim mapama gustine i X-zračenja, uočene su različite strukture u okviru jata, na koje su primenjeni statistički testovi, da bi se ispitalo da li postoje pravilnosti po pitanju orijentacije galaksija u okviru njih, tj. na lokalnom nivou. Struktura A predstavlja uzorak šireg regiona jata, dobijen nakon eliminisanja pozadinskih objekata, dok strukturu B čine jezgra sva tri podjata (sa centralnim galaksijama NGC 4874, NGC 4889, NGC 4839) i halo oko njih. U okviru strukture B razlikuju se podjata B1 (područje oko NGC 4874 i NGC 4889) i B2 (region u okolini NGC 4839). Tretirajući svaku od ovih struktura kao posebno jato, na njih su primenjeni statistički testovi.



Slika 2.
 Reprerativni
 uzorak galaksija
 kojim je
 aproksimirano jato,
 sa označenim
 podstrukturama.
 Prava dobijena
 metodom najmanjih
 kvadrata uzeta je za
 osu strukture A.

Figure 2.
 The sample of
 galaxies representing
 the cluster, with
 marked substructures.
 The straight line
 obtained by the
 least-square method
 is taken as the main
 axe of the structure A.

Uz to, za svaku od navedenih struktura, izračunat je sopstveni pozicioni ugao, radi poređenja sa tendencijama pozicionih uglova galaksija u njima. Pozicioni ugao pojedinačne strukture (θ_s), meren u direktnom smeru od pravca ka severnom nebeskom polu do glavne ose strukture dobijen je metodom najmanjih kvadrata, koristeći koordinate galaksija kao parametre dvodimenzionalne distribucije. Prava dobijena ovim postupkom uzeta je za glavnu osu posmatrane strukture (slika 2).

Da bi se ispitala raspodela pozicionih uglova korišćena su tri statistička testa (Hawley & Pebbles 1975; prema: Godlowski 1993) – χ^2 test, Furijev test i test autokorelacija. Pri analizi, galaksije jata podeljene su u $n = 36$ uglovnih sektora, u zavisnosti od mere pozicionog ugla (u prvom sektoru su galaksije sa uglovima 0° - 5° , u drugom 5° - 10° itd). Ova podela se pokazala zadovoljavajućom s obzirom na uobičajenu veličinu uzoraka koji se razmatraju (Godlowski 1993).

Uzevši u obzir činjenicu da ovi testovi, usled brojnih nedostataka korišćenog metoda, daju vrlo nesigurne rezultate, a u cilju procene validnosti dobijenih rezultata, analizirana je i distribucija inklinacija galaksija. Međutim, inklinacija nije jednoznačno definisana. Generalno, ona predstavlja nagib ravni galaksije u odnosu na pravac vizure, ali njeno računanje još uvek nije jasno precizirano. Trenutno najšire prihvaćeni metod jeste da se inklinacija galaksije (i), posmatrana kao ugao između ravni galaksije i ravni normalne na pravac vizure, računa po Holombergovom obrascu (Godlowski 1993):

$$\cos^2 i = \frac{q^2 - q_0^2}{1 - q_0^2},$$

gde q predstavlja odnos prividnih dužina osa galaksije $q = b/a$ (ovde su a i b prividne dužine velike i male ose galaksije), a q_0 standardnu vrednost ovog odnosa, za koju se najčešće uzima $q_0 = 0.2$. Ova standardna vrednost predstavlja, zapravo, odnos prividnih dužina male i velike ose *edge-on* galaksije, zbog približno eliptičnog oblika tipične galaksije.

Nažalost, u katalogu kojim je raspolagano (Godwin *et al.* 1983) greška pri merenju vrednosti q je velika (iznosi 0.1), što daje izuzetno velike greške za inklinacije i uslovljava suviše grubu podelu na sektore. Stoga se primena statističkih testova na raspodelu inklinacija galaksija pokazala neadekvatnom. Usled toga, ova analiza se svela na jednostavno utvrđivanje tendencija ovih uglova, na osnovu grafika raspodele, dok je potpuna statistička analiza urađena nad raspodelom pozicionih uglova.

Statistički testovi raspodele orijentacija galaksija

Neka N predstavlja ukupan broj galaksija u posmatranoj strukturi, N_k – broj galaksija sa orijentacijom u k -tom uglovnom sektoru, N_0 – prosečan broj galaksija u uglovnom sektoru, kojim se aproksimira očekivani broj galaksija u slučaju izotropne raspodele i q_k – srednju meru ugla sektora. Ove vrednosti figurišu u statističkim testovima, ovde primenjenim za utvrđivanje eventualnih pravilnosti u raspodeli pozicionih uglova galaksija.

χ^2 test se koristi kao pokazatelj globalne mere anizotropije u posmatranom sistemu. Mera odstupanja posmatrane raspodele od teorijske, izotropne raspodele, određena je χ^2 statistikom

$$\chi^2 = \sum_{k=1}^n \frac{(N_k - N_0)^2}{N_0}.$$

Test za 35 stepeni slobode (što odgovara podeli na 36 sektora) za nivo značajnosti od 0.05 daje kritičnu vrednost χ^2 statistika 49.802, dok je za nivo značajnosti od 0.01 ta vrednost iznosi 57.342.

Test autokoleracija određuje meru korelacije između broja galaksija u susednim uglovnim sektorima. Korelacija je određena formulom

$$C = \sum_{k=1}^n \frac{(N_k - N_0)(N_0 - N_{k+1})}{N_0}$$

sa standardnom devijacijom

$$\sigma(C) = \sqrt{n}$$

koja u ovom slučaju ($n = 36$ sektora) iznosi $\sigma(C) = 6$. U slučaju očekivane, izotropne raspodele orijentacionih uglova, korelacija je jednaka nuli,

a ukoliko je C van intervala $(-2\sigma, 2\sigma)$, stepen rizika sa kojim možemo tvrditi da je posmatrana distribucija anizotropna manji je od 0.05. U slučaju da je C van intervala $(-3\sigma, 3\sigma)$ stepen rizika je manji od 0.003.

Furijev test aproksimira empirijsku, realnu distribuciju najboljom mogućom funkcijom za zadati broj parametara, a potom ispituje tu funkciju. Razvojem u Furijev red dobijamo parametre distribucije Δ_{ii} , gde je $i = 1, 2$, koji opisuju najbolju funkciju kojom se aproksimira raspodela testiranih uglova u jatu. Predloženo je da se samo dva najznačajnija koeficijenta, Δ_{11} i Δ_{21} (prvi Furijev mod) uzimaju u obzir (Godlowski, 1993). Ovo je obrazloženo neznatno malim razlikama dobijenih vrednosti za najznačajniji koeficijent Δ_{11} kada se uzima u obzir prvi mod (dva najznačajnija koeficijenta) i oba moda (sva četiri koeficijenta). Uzimajući u obzir samo prvi Furijev mod, stvarna distribucija N_k je aproksimirana kao

$$N(\vartheta_k) = N_o (1 + \Delta_{11} \cos 2\vartheta_k + \Delta_{21} \sin 2\vartheta_k).$$

Koeficijenti Δ_{11} i Δ_{21} su, odavde, određeni formulama

$$\Delta_{11} = \frac{1}{n} \times \sum_{k=1}^n (N_k - N_o) \cos 2\vartheta_k$$

$$\sum_{k=1}^n \cos^2 2\vartheta_k$$

$$\Delta_{21} = \frac{1}{n} \times \sum_{k=1}^n (N_k - N_o) \sin 2\vartheta_k$$

$$\sum_{k=1}^n \sin^2 2\vartheta_k$$

Pošto su vektori Δ_{11} i Δ_{21} međusobno normalni, amplituda odstupanja od izotropije jednaka je

$$\Delta_1 = (\Delta_{11}^2 + \Delta_{21}^2)^{\frac{1}{2}},$$

dok standardna devijacija ove amplitude iznosi

$$\sigma(\Delta_1) = \sqrt{\frac{2}{n N_o}}.$$

Verovatnoća da je vrednost amplitude u slučaju izotropne raspodele veća od dobijene data je izrazom

$$P(>\Delta_1) = \exp\left(-\frac{n}{4} N_o \Delta_1^2\right).$$

Rezultati i diskusija

Pri analizi raspodele pozicionih uglova χ^2 testom (tabela 1) dobijeni rezultati pokazuju najmanju verovatnoću izotropije ($p < 0.005$) u najvećoj posmatranoj strukturi (struktura A). Takođe, u okviru strukture B konstatovana je značajna anizotropija ($p < 0.025$), dok se to ne može tvrditi za podjata B1 i B2, gde je verovatnoća izotropije veća ($p > 0.25$).

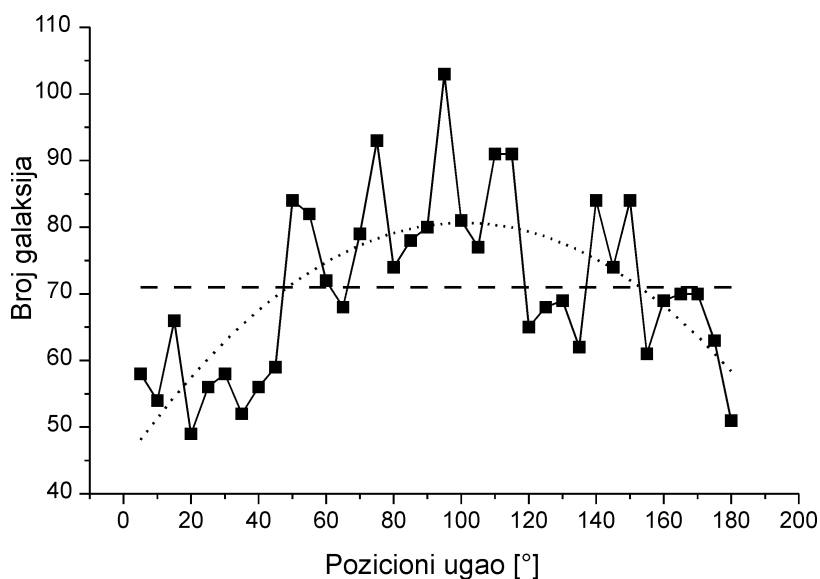
Rezultati dobijeni testom autokorelacija (tabela 1) su u skladu sa rezultatima χ^2 testa. Ponovo je najjača anizotropija utvrđena u strukturi A ($p < 0.003$). Značajno odstupanje od izotropije pronađeno je i u strukturi B, gde je C takođe veće od 3σ . U podjatu B1 konstatovana je nešto veća verovatnoća izotropije ($p < 0.05$), a u podjatu B2 distribucija pozicionih uglova je veoma bliska izotropnoj (C je manje od σ).

I Furijev test je dao veoma slične rezultate (tabela 1). U strukturama A i B nađena verovatnoća izotropije iznosi $p = 0.000$, dok je anizotropija slabija u manjim strukturama, naročito u B1, gde je $p = 0.15$. Ovakvi rezultati se mogu očekivati kada anizotropija nije izražena u manjim strukturama pojedinačno, što govori o nedovoljno samostalnom razvoju podjata u okviru posmatranog jata. Ovo se može protumačiti postojanjem uređene orijentacije galaksija na nivou većih struktura, što ide u prilog teoriji da je anizotropija posledica globalnih efekata. Međutim, ovakve zaključke je vrlo nezahvalno izvoditi, jer su dosadašnja istraživanja pokazala da postoje velike razlike u pogledu uređenosti između različitih jata.

Tabela 1. Rezultati statističkih testova distribucije pozicionih uglova

Struktura	N	ϑ [°]	χ^2	C	Δ_1	$\sigma(\Delta_1)$	$P(>\Delta_1)$
A	2556	103	85.704	47.070	0.187	0.028	0.000
B	1577	83	55.081	26.797	0.164	0.036	0.000
B1	528	89	34.909	8.318	0.120	0.062	0.148
B2	398	95	33.568	-2.636	0.171	0.075	0.076

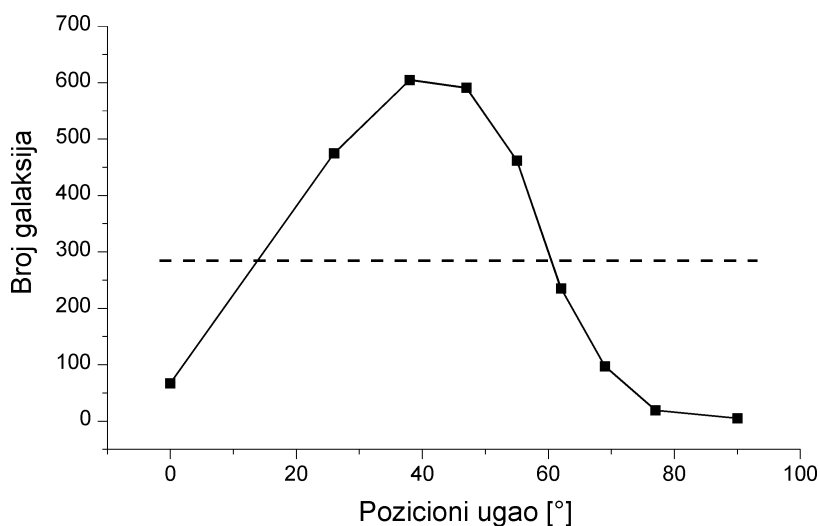
Rezultati dobijeni ovim metodom ne nude informacije o tendencijama orijentacija galaksija u odnosu na ravan i centar jata. Ipak, na grafiku raspodele pozicionih uglova u strukturi A (slika 3), može se jasno uočiti da postoji tendencija ovih uglova ka vrednostima između 90° i 100° , što može biti povezano sa pozicionim uglom cele strukture ($\vartheta_s = 103^\circ$). Takođe, uočljive su i međusobno veoma bliske vrednosti pozicionih uglova samih struktura (tabela 1), što može biti još jedan pokazatelj njihove jake povezanosti.



Slika 3.
Raspodela broja galaksija po sektorima pozicionog ugla u strukturi A. Izotropni slučaj prikazan je isprekidanom pravom linijom, a "glatka aproksimacija" istačkanom linijom.

Figure 3.
Distribution of galaxies in position angle bins in structure A. The case of random alignment is represented by a dashed line and the smooth approximation by a dotted line.

Na primeru ovog jata mogu se jasno videti nedostaci primenjenog metoda. Na grafiku raspodele inklinacija galaksija (slika 4) primetan je mali broj *edge-on* galaksija, kao i tendencija inklinacija ka vrednostima između 40° i 50° . Ovo svakako govori o nepouzdanosti dobijenih rezultata, jer je izgubljen bitan element orijentacije. Takođe, podaci o pozicionim uglovima većine galaksija se ne mogu smatrati pouzdanim, zbog otežanog merenja. S druge strane, jasno je vidljiva i anizotropna distribucija inklinacija, što je još jedan pokazatelj neslučajne raspodele orijentacija galaksija u jatima.



Slika 4.
Raspodela galaksija po inklinacijama u strukturi A. Inklinacija $i=0$ odgovara *face-on* galaksiji, a $i=90$ *edge-on* galaksiji. Teoretska raspodela je predstavljena isprekidanom pravom linijom

Figure 4.
Distribution of galaxy inclinations in structure A. Galaxies seen *face-on* have $i=0$ and those seen *edge-on* have $i=90$. The theoretical distribution is presented by a dashed line

Zaključak

Uzorak galaksija iz polja jata Coma Berenices podeljen je na nekoliko različitih struktura u kojima je ispitana raspodela orijentacija galaksija. Rezultati dobijeni statističkim testovima ukazuju na anizotropnu raspodelu pozicionih uglova u jatu. Ovo svakako podržava scenarije formiranja jata koji predviđaju određene pravilnosti u orijentaciji galaksija. Na osnovu ovih rezultata moguće je zaključiti da je odstupanje od izotropije jače izraženo u većim strukturama, što bi moglo da govori o znatnijem uticaju ostatka sistema na ova podjata. Zapravo, može se reći da ovom analizom nisu pronađeni dokazi za postojanje izraženijih samostalnih podstruktura. Doduše, rezultati dobijeni korišćenjem ovog, uprošćenog metoda, ne mogu se smatrati pouzdanim, jer on razmatra samo projekciju jata na ravan normalnu na pravac vizure. Stoga iz njih ne bi trebalo izvoditi pretencioznije zaključke. Ipak, ukoliko se primenom ovog metoda pokaže postojanje anizotropije u nekoj strukturi, izvesno je da će se ona konstatovati i kada se jato posmatra kao trodimenzionalni objekat, pa se osnovni zaključak o postojanju anizotropije može smatrati validnim.

Raspodela inklinacija ukazuje na nepouzdanost rezultata dobijenih primenjenim metodom. Pozicioni ugao ne može opisati orijentaciju galaksije bez inklinacije. Takođe, podatak o pozicionom uglu galaksije je posebno nesiguran u slučaju kada je inklinacija manja, tj. galaksija više *face-on*.

Za buduća istraživanja bilo bi interesantno primeniti napredniji metod (Jaaniste & Saar 1977, 1978; prema: Godlowski 1993) na jato Coma Berenices i uporediti rezultate dobijene korišćenjem dvaju različitih metoda. Takvo istraživanje bi bilo korisno iz više razloga. Naime, postoji veliki broj radova koji analiziraju raspodelu orijentacija galaksija u različitim strukturama, a pritom koriste stariji, ovde primenjeni metod. Poređenje rezultata dobijenih tim i naprednijim metodom bi moglo razjasniti konstatovanje izotropije u analiziranim strukturama kod nekih autora. Takođe, sama primena naprednije metode na jato Coma Berenices bi dala i izvestan broj novih informacija, koje stariji, ovde primenjeni metod ne nudi, što bi omogućilo detaljniju analizu strukture jata.

Zahvalnost: Nikoli Božinoviću na ideji za celokupni projekat, profesoru Włodzimierz Godlowskiemu sa Jagelonskog univerziteta u Krakovu, Poljska, na svesrdnoj pomoći u toku rada i obezbeđivanju literature i Branislavu Saviću na nesebičnoj pomoći u završnoj fazi rada.

Literatura

- Baier, F. W., Godlowski, W., MacGillivray H. T. 1998. Substructures and galaxy orientations in clusters – I. The Cluster Abell 754. *Astronomy and astrophysics*, **339**: 709-718.
- Churazov, E., Forman, W., Gilfanov, M., Hank Donnelly, R., Jones, C., Markevitch, M. 1999. A hot spot in Coma. *The Astrophysical Journal*, **513**: 690-4.
- Colless, M., Dun, A. M. 1995. Structure and dynamics of the Coma cluster. *The Astrophysical Journal*, **458**: 435-20.
- Černe, J., Peterson, J.B. 1990. Tests for alignment of galaxy position angles within a sheet of galaxies. *The Astronomical Journal*, **100**: 1761-5.
- Doroshkevich A.G., Saar E. M., Shandarin S.F. 1978. In *The Large Scale Structure of the Universe*, (ed. M. S. Longair and J. Einasto). IAU-Symp. No. 79. D. Reidel, Dordrecht, p. 423
- Efstathiou G., Silk J. 1983. The formation of galaxies. *Fundam. Cosmic Phys.*, 9: 1
- Godlowski, W. 1993. Galactic orientation within the Local Supercluster. *MNRAS*, **265**: 874-880.
- Godlowski, W. 1994. Some aspects of the galactic orientation within the Local Supercluster. *MNRAS*, **271**: 19-30.
- Godlowski, W., Ostrowski, M. 1998. Investigation of galactic alignment in LSC galaxy clusters. *MNRAS*, **303**: 50-64.
- Godwin, J. G., Metcalfe, N., Peach, J. V. 1983. The Coma Cluster - I. A catalogue of magnitudes, colours, ellipticities and position angles for 6724 galaxies in the field of Coma cluster. *MNRAS*, **202**: 113-24.
- Hawley D.L., Peebles, P.J.E. 1975. *AJ*, 80: 477
- Jaaniste J., Saar E. 1978. In *The Large Scale Structure of the Universe*, (ed. M. S. Longair and J. Einasto). IAU-Symp. No. 79. D. Reidel, Dordrecht, p. 423.
- Ozernoy L.M. 1978. In *The Large Scale Structure of the Universe*, (ed. M. S. Longair and J. Einasto). IAU – Symp. No. 79. D. Reidel, Dordrecht, p. 472
- Plionis, M. 1994. Position angles and alignment of clusters of galaxies. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, **95**: 401-12.
- Shandarin S. F. 1974. *Astronomicheskij Zhurnal*, 51: 667

Galactic Orientation and Substructures in the Coma Cluster

Most of the classical galaxy cluster formation scenarios predict a random alignment of galaxy rotational axes. However, there are three main modern theories describing the way galaxies in clusters align. According to the first theory (Ozernoy 1978, Efsthathiou & Silk 1983) the rotational axes of galaxies tend to be perpendicular to the major plane of the large scale structure. In the second model (Shandarin 1974; Doroshkevich *et al.* 1978) galaxy planes and the planes of the clusters are arranged perpendicular to each other. The third possibility, recently proposed “hedgehog” model predicts a tendency for galaxy rotational axes to be directed towards the center of the cluster. There is also a question whether the anisotropy is due to global or local effects. Previous studies found no evidence for excluding any of these theories. However, random alignment of galaxy axes occurs only in cases of absence of data or great contamination by background objects.

There are two main methods for studying galactic orientation. The first approach (Hawley & Peebles 1975; according to: Godlowski 1993) takes into account only the position angle of each galaxy (the angle between the direction toward the north pole and the observed galaxy main axis). This method yields reliable information only for galaxies seen edge-on, but not for those seen face-on or nearly face-on. The second, most recent method (Jaaniste & Saar 1977; according to: Godlowski 1993) takes into account not only the position angle, but also the inclination to describe the real orientation of a particular galaxy. Using this method, the coordinates and orientation angles of galaxies are being transformed into a new coordinate system, based on the main plane of the cluster (or supercluster). This gives much more reliable results in the analysis process.

The older method used for examining galaxy orientations in clusters (Hawley & Peebles 1975; according to: Godlowski 1993) was presented and applied to the Coma cluster. The sample of galaxies was obtained from Godwin *et al.* (1983). The background objects were eliminated using the “surface density” method, suggested by Godlowski (personal communication). Three statistical tests were applied to the decontaminated sample: the χ^2 test, autocorrelation and Fourier test. The aim was to find non-random alignment of galaxy position angles. Concerning the complexity of the Coma cluster structure, the method was applied to four different structures found in the observed field (Figure 2). The structure A represents the wide region of the cluster, and the structure B represents the central part of the observed region. There were also two subclusters

distinguished within the structure B: structure B1, representing the region around the two dominant galaxies of the Coma cluster (NGC 4874 and NGC 4889) and structure B2, representing the subcluster around NGC 4839. Moreover, for each of these structures, the position angle was calculated using the least-square method, taking the coordinates of the galaxies as parameters of the distribution. The straight line obtained by this method was taken as the observed structure main axe (Figure 2). The distribution of galaxy inclinations was also presented in order to test the validity of the obtained results.

The statistical tests show presence of anisotropic distribution, which is the most significant in larger structures. The strongest anisotropy is detected in structures A and B. In structure B1 the possibility of an isotropic distribution is somewhat large, while in structure B2 the results show that the distribution is nearly isotropic. This points to a very low level of independent evolution of these substructures within the cluster as a whole. There is also a significant excess of position angles between 90° and 100° (Figure 3), which could be related to the position angle of the structure A ($\vartheta_s = 103^\circ$). The position angles of the four structures are also very close to each other. Thus, the obtained results show no clear evidence of sub-clustering in the Coma cluster.

The distribution of the galactic inclinations (Figure 4) shows that the applied method gives very uncertain results. There is a very small number of edge-on galaxies, which limits validity of the obtained results. The majority of the observed galaxies have inclinations between 40° and 50° . This shows that not even the position angle data obtained from the catalogue are reliable. Furthermore, the position angle itself can not describe the orientation of a particular galaxy, because the inclination is an equally important element of the orientation. All this leads to a conclusion that the applied method gives very uncertain results. However, if anisotropy is detected using this method (in 2D projection), it will probably be obtained in the 3D situation. Therefore, it is justifiable to claim the existence of anisotropy in the Coma cluster.

The research could be continued by applying the newer method (Jaaniste & Saar 1977; according to: Godlowski 1993) to the Coma cluster. The comparasion of the results obtained by the two methods would be interesting. Also, the application of the most recent method to the Coma cluster would give more reliable information, which would enable a more complete study of the cluster structure.

