

Jata galaksija, virijalni teorem i nevidljiva tvar

Krešimir Pavlovski¹, Zagreb

Galaksije se u svemiru nalaze u skupinama ili jatima. To mogu biti male skupine kao što je Lokalna grupa galaksija koju čini naša galaksija Mliječni put i Andromedina galaksija (M31) kao dominantne, te još tridesetak, uglavnom manjih, nepravilnih ili patuljastih eliptičnih galaksija. Lokalna grupa galaksija, koja obuhvaća promjer oko 1 Mpc (1 pc = 3.26 svjet. god. = $3.086 \cdot 10^{16}$ m), dio je pak lokalnog superjata koje obuhvaća i vrlo bogato Virgo jato galaksija što se nalazi na udaljenosti od oko 15 Mpc od naše Galaksije. Virgo jato galaksija na nebu se rasprostire na gotovo 7° , što znači da ima promjer od nekih 2 Mpc.

Jata galaksija uočio je još William Herschel u 18. stoljeću kao velike nakupine maglica. Pravi smisao dao im je Edwin Hubble dvadesetih i tridesetih godina 20. stoljeća svojim istraživanjima dalekog svemira. Pregledom fotografskih ploča snimljenih za "palomarski pregled neba" američki je astronom George Abell otkrio 2712 jata. Njegov se katalog najčešće koristi u istraživanju dalekog svemira.

Za stabilni sustav, tj. sustav koji se niti skuplja niti širi, vrijedi Clausiusov virijalni teorem koji povezuje kinetičku energiju (E_k) sustava s gravitacijskom potencijalnom energijom (E_p). U stabilnom sustavu, gravitacijska potencijalna energija numerički je jednaka dvostrukoj kinetičkoj energiji. (Ne smijemo zaboraviti da je po definiciji gravitacijska potencijalna energija negativna veličina.) Zapisan simbolički virijalni teorem glasi:

$$2E_k + E_p = 0. \quad (1)$$

Virijalni teorem ne smijemo poistovjetiti sa zakonom očuvanja energije ($E_{tot} = E_k + E_p$). Kinetička energija dolazi od kretanja individualnih komponenata u sustavu koje na okupu drži gravitacijska sila. Ako je kinetička energija prevelika, gravitacijska sila neće moći održati komponente na okupu i one će početi bježati iz sustava. Ili, u suprotnom slučaju, komponente će padati prema središtu sustava te će se sustav sažimati.

Primijenit ćemo virijalni teorem na jato galaksija. Pretpostavit ćemo da jato sadrži N galaksija i da je prosječna masa galaksije m . Kinetička energija galaksije koja se u jatu kreće brzinom v iznosi $\frac{1}{2}mv^2$. Pojedine galaksije imaju različite brzine dok ćemo mi u razmatranju uzeti srednju kinetičku energiju. Prema tome će ukupna kinetička energija N galaksija u jatu biti:

$$E_k = \frac{mNv^2}{2}. \quad (2)$$

Iz pomaka spektralnih linija u spektru galaksije možemo pomoću Dopplerovog efekta (MFL 2/186, 1996. – 97.) odrediti komponentu brzine galaksije u smjeru poglednice, tzv. radialnu brzinu. Ostale komponente prostorne brzine galaksije zbog velike udaljenosti galaksija ne možemo odrediti. Neka su U , V i W komponente brzine v . Tada je $v = \sqrt{U^2 + V^2 + W^2}$. Za skup galaksija koje se kreću potpuno nasumično (znači nema nekog posebnog preferiranog smjera kretanja u skupu) srednje vrijednosti U^2 , V^2 i W^2

¹ Autor je redoviti profesor astronomije i astrofizike na Prirodoslovno-matematičkom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu, kresimir@phy.hr, <http://www.phy.hr/~kresimir>

su iste i jednake $\frac{1}{3}v^2$. Prema tome ukupnu kinetičku energiju (2) napisat ćemo uvrstivši radijalnu brzinu \dot{V} :

$$E_k = \frac{3NmV^2}{2}. \quad (3)$$

Sada još moramo izračunati ukupnu gravitacijsku potencijalnu energiju. Potencijalna energija dviju galaksija mase m koje su međusobno udaljene za r je Gm^2/r gdje je G konstanta gravitacije. Međutim, u jatu imamo N galaksija tako da moramo pribrojiti potencijalnu energiju svakog mogućeg para galaksija u jatu. Ukupno može biti $N(N-1)$ parova tako da je ukupna gravitacijska potencijalna energija jata galaksija:

$$E_p = -\frac{GN(N-1)m^2}{2R}. \quad (4)$$

U (3) smo za prosječnu udaljenost među galaksijama r uzeli 'efektivni polumjer' R jata. Sada možemo u izraz za virijalni teorem (1) uvrstiti ukupnu kinetičku (3) i ukupnu potencijalnu energiju (4):

$$3NmV^2 = \frac{GN(N-1)m^2}{R}. \quad (5)$$

Preuredit ćemo (5) tako da, prvo, pojednostavnimo izraz jer za veliki broj galaksija $N \simeq N-1$, te da ga ispišemo izrazivši ukupnu masu jata galaksija $M = Nm$:

$$M = \frac{3V^2R}{G}. \quad (6)$$



Slika 1. Jato galaksija A1060 koje se nalazi na udaljenosti od 220 milijuna svjetlosnih godina od Mliječnog puta. U vidnom polju su i dvije sjajnije zvijezde koje su na fotoploči ostavile karakteristični refleksi. Galaksije se vide kao mutne eliptične i spiralne mrlje. (Snimak Anglo–Australian Observatory).

Jato galaksija A1060 (Hydra I) koje prikazuje sl. 1, na nebu obuhvaća područje s polumjerom 100 lučnih minuta. Udaljenost jata određena Tully–Fisherovom metodom

iz širine vodikove linije na 21 cm iznosi 68 Mpc. Iz podataka o radijalnim brzinama pojedinih galaksija u jatu (tablica 1) izračunat ćemo najprije srednju brzinu galaksija koja ustvari predstavlja 'crveni pomak' cijelog jata. Srednja vrijednost kvadrata razlika brzina predstavlja srednju brzinu kojom se galaksije gibaju unutar jata.

galaksija	RV [10 ⁴ m/s]
NGC 3305	369
NGC 3307	362
NGC 3308	335
IC 629	246
NGC 3309	380
NGC 3311	357
NGC 3312	251
NGC 3314	264
NGC 3315	456
IC 2597	369
NGC 3336	369

Tablica 1. Radijalne brzine RV pojedinih galaksija u jatu galaksija A1060 prema mjerenjima crvenog pomaka spektralnih linija.

Srednja je brzina 11 galaksija iz tablice 1, $RV = 3416$ km/s, dok je srednja vrijednost standardna devijacija, $V = 61$ km/s. Iz udaljenosti i prividne veličine jata na nebu slijedi da je polumjer jata $R = 6.110^{22}$ m. Uvrstimo poznate veličine u izraz (6) za ukupnu masu jata galaksija ($G = 6.67 \cdot 10^{-11}$ Nm²/kg²). Dobili smo:

$$M = 3.2 \cdot 10^{46} \text{ kg} = 1.610^{16} M_{\odot}.$$

Smatra se da u jatu galaksija A1060 ima oko 200 galaksija. To bi značilo da je prosječna masa galaksije u jatu oko $8 \cdot 10^{13} M_{\odot}$. Međutim, masa Andromedine galaksije, koja ima veću masu od Mliječnog puta, iznosi oko $3 \cdot 10^{11} M_{\odot}$ što bi značilo da je u prosjeku masa galaksija iz jata A1060 oko 250 puta veća od mase Andromedine galaksije! Zbog činjenice da je virijalna masa galaksija u pravilu veća od masa koje slijede iz sjaja galaksija još tridesetih godina 20. stoljeća američki astrofizičar Fritz Zwicky pretpostavio je postojanje nevidljive tvari u svemiru. Njegovu su pretpostavku potvrdila mjerenja rotacijskih brzina galaksija koja također potvrđuju da u svemiru vidimo samo 1% tvari dok je ostala skrivena kao tamna tvar. Potraga za tamnom tvari jedan je od velikih izazova današnje astrofizike.

Zadatak. Udaljenost do jata galaksija A1060 možemo izračunati iz Hubbleovog zakona $v = Hd$ gdje je v crveni pomak odnosno radijalna brzina jata, a d udaljenost jata. H je Hubbleova konstanta. Uzmi da je $H = 74$ km/s \times Mpc. Radijalnu brzinu jata izračunali smo prema podacima iz tablice 1. Usporedi rezultat s udaljenošću koja je određena Tully–Fisherovom metodom.