Rotacija Galaksije i Oortove konstante

Pavlovski, Krešimir

Rotacija Galaksije i Oortove konstante

Krešimir Pavlovski[1], *Zagreb*

U povijesti znanosti engleski astronom Edmund Halley nije ostao zapamćen samo po slavnom otkriću staze periodičnog kometa koji otada nosi njegovo ime, a što je bila jedna od prvih praktičnih primjena Newtonove teorije gravitacije. Jednako je značajno bilo Halleyevo otkriće 1718. godine kada je usporedio svoja mjerenja položaja dviju sjajnih zvijezda, Arcturusa i Siriusa, s položajima koje je našao u Ptolemejevom katalogu. Od Ptolemejevog vremena do Halleyevih je opažanja proteklo gotovo 15 stoljeća, a zvijezde su promijenile položaje za gotovo cijeli stupanj (Arcturus) odnosno skoro pola stupnja (Sirius). Halley je otkrio vlastito kretanje zvijezda. Barnardova zvijezda je svojevrsni rekorder u vlastitom kretanju nebeskim svodom. U jednoj godini prevali put jednak luku od 10.3 sekunde. Ili, drugim riječima, u samo 180 godina njezino prividno kretanje među zvijezdama iznosi kao Mjesečev promjer (oko pola stupnja)! Vlastito kretanje zvijezda ako je poznata njihova udaljenost daje poprečnu (tangencijalnu ili transverzalnu) komponentu brzine zvijezde. Uzdužnu ili radijalnu brzinu može se odrediti iz pomaka linija u spektrima zvijezda. Prva, uspješna mjerenja radijalnih brzina izvršena su tek potkraj 19. stoljeća.

Do otkrića rotacije Mliječnog Puta, trebalo je čekati puna dva stoljeća od Halleyevog otkrića. Tek su istraživanja Kapteyna, Schwarzchilda, Shapleya, Lindbalda i Oorta s početka 20. stoljeća rastumačila kako Galaksija rotira. Bez mjerenja radijalnih i tangencijalnih brzina ne bi bilo moguće otkriti rotaciju tisuće zvijezda Galaksije. Rotacija dalekih galaksija (sl. 1) otkriva se drugačijim postupcima, ali gotovo svima je zajedničko korištenje Dopplerove pojave (vidi MFL 2/186).

Sl. 1. Spiralna galaksija NGC 2997 nalik je našoj galaksiji Mliječnom putu. Ističu se spiralni krakovi sa sjajnim mladim modrim zvijezdama i svjetlucava međuzvjezdana tvar. Krakovi se vežu na ispupčenu središnju jezgru. Jezgra naše Galaksije je nalik kikirikiju. (Snimak European Southern Observatory)

---

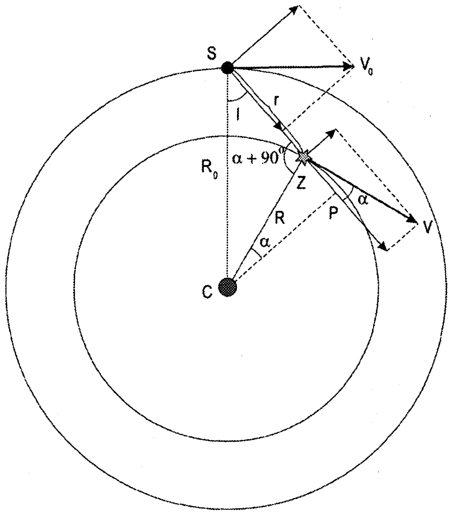
[1] Autor je redoviti profesor astronomije i astrofizike na Prirodoslovno-matematičkom fakultetu u Zagrebu, kresimir@phy.hr, http://www.phy.hr/~kresimir

Nizozemski je astronom Jan H. Oort godine 1927. dao konačan dokaz diferencijalne rotacije Galaksije. Kako se radi o geometrijskom izvodu s nešto fizikalne intuicije u ovom ćemo prilogu prikazati Oortovu analizu.

Pretpostavimo da se zvijezde u galaksiji gibaju kružnim stazama oko središta galaksije (sl. 1). Za zvijezde mlađe populacije i oblake međuzvjezdanog plina to vrijedi dosta dobro. Zvijezda Z se gledajući iz položaja Sunca S nalazi na galaktičkoj duljini l i udaljenosti r. Njezina je kružna brzina v i udaljenost od središta Galaksije R. Slično, za Sunce, galaktički će polumjer i kružna brzina biti R_0 i v_0. Oort je prvo odredio radijalnu brzinu zvijezde v_r u odnosu na Sunce. Radijalna ili uzdužna brzina je komponenta prostorne brzine, odnosno njezina projekcija na doglednicu (pravac SZ). Prema tome je relativna radijalna brzina v_r zvijezde razlika između projekcija kružnih brzina na doglednicu:

$$v_r = v \cos \alpha - v_0 \sin l, \tag{1}$$

gdje je α kut između vektora brzine zvijezde i doglednice.



Sl. 2. Uz Oortov izvod diferencijalne rotacije Galaksije. C je središte Galaksije, S je položaj Sunca, a Z je položaj zvijezde u Sunčevoj blizini.

Iz geometrije na sl. 2 uočavamo da je kut $CZS = \pi/2 + \alpha$. Primjenom poučka o sinusima na trokut CZS dobivamo:

$$\frac{\sin\left(\frac{\pi}{2} + \alpha\right)}{\sin l} = \frac{R_0}{R}$$

ili

$$\cos\alpha = \frac{R_0}{R}\sin l. \qquad (2)$$

Uvest ćemo kutne brzine, za zvijezdu $\Omega = v/R$ te za Sunce $\Omega_0 = v_0/R_0$ što će uvrštavanjem u (1), za relativnu radijalnu brzinu zvijezde dati:

$$v_r = R_0(\Omega - \Omega_0)\sin l. \qquad (3)$$

Tangencijalna ili poprečna komponenta relativne brzine Sunca i zvijezde određuje se na sličan način:

$$v_t = v\sin\alpha - v_0\cos l = R\Omega\sin\alpha - R_0\Omega_0\cos l.$$

Trokut SCP daje

$$R\sin\alpha = R_0\cos l - r,$$

te konačno imamo

$$v_t = R_0(\Omega - \Omega_0)\cos l - r\Omega. \qquad (4)$$

Oort je dalje nastavio s pretpostavkom da će u neposrednom susjedstvu Sunca, dakle $r \ll R_0$, razlika kutnih brzina $\Omega - \Omega_0$ biti vrlo mala. Prema tome kao dobra aproksimacija egzaktnom rješenju može poslužiti prvi član u Taylorovomm razvoju $\Omega - \Omega_0$ u blizini $R = R_0$:

$$\Omega - \Omega_0 = \left(\frac{d\Omega}{dR}\right)_{R=R_0}(R - R_0) + \dots.$$

Koristeći $\Omega = v/R$ i $v(R_0) = v_0$, te pravilo deriviranja,

$$\frac{d\Omega}{dR} = \frac{d}{dR}\left(\frac{v}{R}\right) = \frac{1}{R}\frac{dv}{dR} - \frac{v}{R^2},$$

i dalje nalazimo

$$\Omega - \Omega_0 \approx \frac{1}{R_0^2}\left[R_0\left(\frac{dv}{dR}\right)_{R=R_0} - v_0\right](R - R_0).$$

Primijenit ćemo poučak o kosinusu na trokut CSZ, te iskoristiti činjenicu da je R_0 puno veće od R, radi čega je $R - R_0 \approx -r\cos l$ (provjeri za vježbu!). Uvrstit ćemo to u (3) za radijalnu brzinu da dobijemo aproksimativni izraz (3):

$$v_r \approx \left[\frac{v_0}{R_0} - \left(\frac{dv}{dR}\right)_{R=R_0}\right] r\cos l\sin l,$$

ili

$$v_r \approx A\, r\, \sin 2l, \tag{5}$$

gdje je A *prva Oortova konstanta* i karakteristična je veličina Sunčevog susjedstva u Galaksiji.

$$A = \frac{1}{2}\left[\frac{v_0}{R_0} - \left(\frac{dv}{dR}\right)_{R=R_0}\right]. \tag{6}$$

Za tangencijalnu relativnu brzinu, slično se dobiva, jer je $r\Omega \approx r\Omega_0$:

$$v_t \approx \left[\frac{v_0}{R_0} - \left(\frac{d}{dR}\right)_{R=R_0}\right] r\cos^2 l - r\Omega_0.$$

Jer je $2\cos^2 l = 1 + \cos 2l$, možemo gornji izraz zapisati u obliku:

$$v_t \approx A\, r\, \cos 2l + B\, r, \tag{7}$$

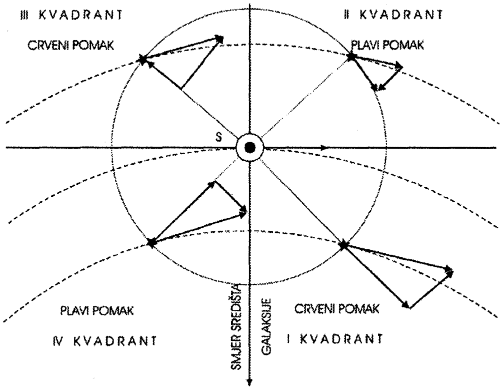
gdje je A isto kao prije u (6), a B je *druga Oortova konstanta*:

$$B = -\frac{1}{2}\left[\frac{v_0}{R_0} + \left(\frac{dv}{dR}\right)_{R=R_0}\right]. \tag{8}$$

Za vlastito kretanje zvijezda $\mu = v_t/r$ prema (7) slijedi

$$\mu \approx A\, \cos 2l + B. \tag{9}$$

Jednadžba (6) pokazuje da će opažene radijalne brzine zvijezda u funkciji galaktičke duljine pokazivati dvostruku sinusoidu. Mjerenja su to i potvrdila. Ako je poznata udaljenost do pojedinih zvijezda, tada amplituda sinusoide određuje Oortovu konstantu A. Neovisno o udaljenosti zvijezda, vlastita kretanja zvijezda u ovisnosti o galaktičkoj duljini također imaju dvostruku sinusoidu. Amplituda je te krivulje A, a njezina srednja vrijednost B.



Sl. 3. Orbite Sunca i zvijezda u Sunčevoj blizini oko središta Galaksije. Prema Oortovim formulama Dopplerov se pomak linija u spektrima zvijezda mijenja od plavog do crvenog kako idemo iz jednog kvadranta u drugi. Brzinu zvijezda prema Suncu rastavljamo u komponente: radijalnu ili uzdužnu u smjeru doglednice i tangencijalnu ili poprečnu koja je okomita na doglednicu prema zvijezdi. Mjerenjem radijalnih brzina i vlastitog kretanja velikog broja zvijezda astronomi su otkrili diferencijalnu rotaciju Galaksije.

Da bismo bolje razumjeli funkcijsku ovisnost radijalne i tangencijalne brzine zvijezda o galaktičkoj duljini, pogledajmo sl. 3 gdje su prikazane staze Suncu bliskih zvijezda. Za zvijezde u smjeru $l = 0°$ i $l = 180°$, doglednice su okomite na njihovo kretanje u odnosu na Sunce i njegov lokalni sustav mirovanja. Kao posljedica, radijalne će brzine biti jednake nuli. Za $l = 90°$ i $l = 270°$ zvijezde će se nalaziti u istoj kružnoj orbiti kao Sunce te će imati istu kružnu brzinu kao Sunce, te ćemo ponovo imati $v_r = 0$ km s^{-1}. U galaktičkim duljinama između ovih imat ćemo nešto složeniju situaciju. Na primjer, pretpostavimo li da u blizini Sunca $\Omega(R)$ monotono opada prema van, tada će u $l = 45°$, zvijezda koja je u stazi bliže galaktičkom središtu "pretjecati" Sunce, te ćemo imati pozitivnu radijalnu brzinu ("crveni pomak"). Na $l = 135°$ Sunce će pak "pretjecati" zvijezdu te će rezultat biti negativna radijalna brzina ("plavi pomak"). Na $l = 225°$ Sunce se udaljuje od zvijezde, te je ponovno crveni pomak (pozitivna radijalna brzina), i konačno na $l = 315°$, zvijezda sustiže Sunce, te je radijalna brzina negativna ("plavi pomak"). Sličnu analizu mogli bismo napraviti za tangencijalnu (poprečnu) brzinu (vidi sl. 3).

Radijalne se brzine mogu izmjeriti i za vrlo udaljene zvijezde što nije slučaj s podacima o vlastitom kretanju zvijezda (što je zvijezda dalje to će općenito i vlastito kretanje biti manje!). Zbog toga je Oortova konstanta A određena točnije od konstante B. Danas su poznate vrijednosti $A = 15$ km s^{-1} kpc^{-1} i $B = -10$ km s^{-1}kpc^{-1}. Iz (6) i (8) slijedi: $\Omega_0 = v_0/R_0 = A - B = 25$ km s^{-1}kpc^{-1}. Očito, da bismo odredili R_0 ili v_0 potrebno je na nezavisan način odrediti jednu od tih veličina. Radioastronomska mjerenja oblaka neutralnih atoma vodika i ugljičnog dioksida daju kombinaciju AR_0. Koristeći vrijednost A određene su veličine $R_0 = 8.5$ kpc i $v_0 = 220$ km s^{-1} koje je IAU (Međunarodna astronomska unija) 1985. godine svojom rezolucijom preporučila za korištenje. Istraživanja posljednjih godina pokazuju da je udaljenost središta Galaksije $R_0 = 8.0 \pm 0.5$ kpc. Time bi veličina naše Galaksije bila još manja, a od Shapleyevih procjena s početka 20. stoljeća "skratila" se skoro dva puta!