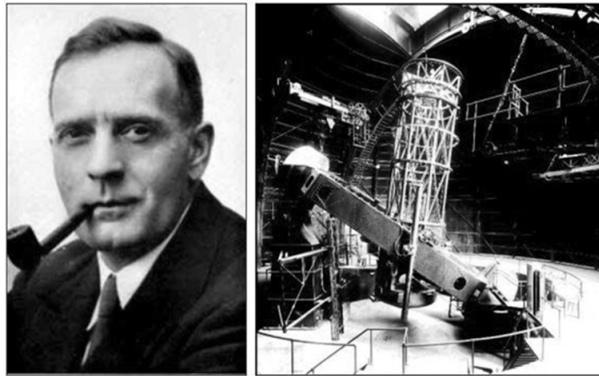




Lice i naličje galaksija

Krešimir Pavlovski¹, Zagreb

Galileo Galilei je svojim teleskopom 1609. godine otvorio pogled u svemir do tada potpuno nepoznat. U povijesti ljudske civilizacije malo je bilo istraživaca koji su imali takvu privilegiju. Jedan je od njih svakako Edwin Hubble, astronom koji će otkriti jednu potpuno novu sliku svemira. Dok je Galileo u svojoj knjizi otkrića *Sidereus Nuncius* ushićeno pisao o milijardama zvijezda koje su izranjale u vidnom polju njegovog teleskopa otkrivajući našu galaksiju Mliječni put u njezinom pravom smislu, tek će se pred Edwinom Hubbleom svemir prikazati u svom pravom smislu kao svemir galaksija. Punih će tri stoljeća proći od Galilejeve čudesne godine otkrića, dok Hubble neće otkriti prirodu spiralnih maglica i svemira kao cjeline.



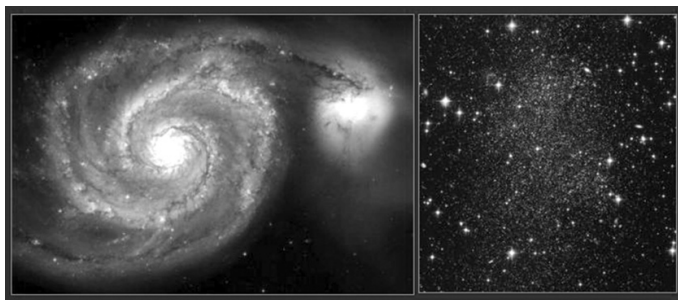
Slika 1. Edwin Hubble (1889–1953), najznačajniji astronom 20. stoljeća, čija su otkrića galaksija te širenja Svemira, iz temelja promijenila poimanje Svemira (lijevo). Teleskop sa zrcalom promjera 2.5 m na Mt Willsonu kojim je Hubble promijenio sliku svijeta (desno).

U sjeni I. svjetskog rata na planinskom vrhu Mt Willsona kraj Los Angelesa u Kaliforniji, gradio se najveći teleskop na svijetu. Promjer zrcala teleskopa bio je 2.5 metara i time je nadmašio sve dotadašnje teleskope. Stati iza tog impresivnog astronomskeg uređaja bila je neka vrsta privilegije. Kada je teleskop u rujnu 1919. godine pušten u redoviti pogon, Edwin Hubble bio je među nekolicinom astronoma koji su dobili upravo tu privilegiju. Nije čudno, Hubble je bio briljantan student kojeg su profesori na sveučilištu u Chicagu odmah uočili, tijekom studija bio je asistent u laboratoriju (budućem) američkom nobelovcu, fizičaru Robertu Millikanu.

Hubbleu nije trebalo dugo, već potkraj 1924. godine razotkriva pravu prirodu spiralnih maglica kao galaksija poput Mliječnog puta. Ključ otkrića ležao je u određivanju njihove udaljenosti. Početkom 20. stoljeća na Harvard College Observatory samozatajna Henrietta

¹ Autor je redoviti profesor na Fizičkom odsjeku PMF-a u Zagrebu

Leavitt mjereći sjaj cefeida uočiti će pravilnost između njihovog sjaja i perioda svjetlosnih promjena. Cefeide su vrsta promjenjivih zvijezda čiji se sjaj periodički mijenja uslijed radijalnih pulsacija. Astronomi to tada još nisu znali. Naziv su dobile po sjajnoj zvijezdi δ Cephei. Leavittino pravilo kaže: što cefeida ima duži period svjetlosnih promjena to je i njezin apsolutni srednji sjaj veći. Da bi se ova jednostavna veza mogla iskoristiti za mjerenje udaljenosti bilo ju je prvo potrebno baždariti. To nije bilo nimalo jednostavno iz razloga što se, tada, poznatim cefeidama nije mogla izmjeriti trigonometrijska paralaksa. Cefeide su sjajne zvijezde, ali ne zato što su nam blizu već zato što su divovske ili superdivovske, tako da ih u bliskoj okolini Sunca niti nema. Tek složenim postupcima, uspjeli su astronomi baždariti ovo jedinstveno svojstvo cefeida. Iz baždarene relacije 'period – sjaj' mogao se je iz poznatog perioda svjetlosnih promjena odrediti modul udaljenosti. Teleskop na Mt Willsonu uspio je razlučiti neke spiralne maglice u zvjezdane nakupine. Na snimcima Hubble otkriva cefeide. Iako im je sjaj bio na samoj granici osjetljivosti foto-ploča, Hubble uspijeva odrediti periode svjetlosnih promjena nekoliko njih, što ga dovodi do otkrića njihove izvangalaktičke prirode. Zvijezde tvore galaksije, galaksije tvore Svemir, novi je poredak Svemira koji se otvara pred Hubbleovim očima.



Slika 2. Spiralna galaksija M51 u zvijezdu Canis Venatici (Lovački psi) u interakciji je s manjom susjednom galaksijom (lijevo). Patuljasta nepravilna galaksija Sagittarius u neposrednoj je blizini naše Galaksije, a naziv je dobila prema zvijezdu strijelca u smjeru kojeg se nalazi. Snimci Hubble Space Telescope.

Edwin Hubble uskoro će učiniti još jedno veliko otkriće. U potrazi za objašnjenjem zagonetnog 'crvenog pomaka' galaksija, godine 1929. otkrit će širenje Svemira. To će Hubbleovo otkriće omogućiti razumijevanje nastanka i razvoja Svemira, što će obilježiti astrofiziku 20. stoljeća. U potrazi za postankom, grade se sve veći i veći astronomski uređaji. Od leće Galilejevog teleskopa, površina optičkih teleskopa povećana je čak za 6 redova veličina. Teleskopi nove generacije koji će svjetlost ugledati u sljedećem desetljeću imat će površinu od 700 m^2 .

Pola stoljeća kasnije uslijedit će otkriće koje će astronomi primiti s velikom nevjericom. Vera Rubin i njezini suradnici, upornošću svojstvenoj Hubbleu, istraživali su rotacijska svojstva spiralnih galaksija. Već prvi spektri pokazivali su vrlo neobična svojstva. Središnjice galaksija rotiraju kao čvrsta ploča, rotacijska brzina raste porastom udaljenosti od središta. Međutim, zbunjujuće su bile velike rotacijske brzine koje uopće nisu opadale s udaljenošću od središta. Na udaljenostima gdje se sjaj galaksija stapa sa sjajem noćnog neba, rotacijske su brzine i dalje vrlo velike. U Sunčevom sustavu, kako se udaljavamo od Sunca kao središnjeg tijela velike mase, brzine planeta sve više opadaju. Očekivali bismo da udaljavanjem od središta galaksije, rotacijske brzine dalekih zvijezda i molekularnih oblaka također opadaju, po istom pravilu. Kako ćemo objasniti 'ravne' rotacijske krivulje galaksija velikih brzina?



Slika 3. Vera Rubin (r. 1928) sa suradnicima priprema spektrograf za noćna opažanja galaksija. Njezino otkriće ravnih rotacijskih krivulja ukazalo je da većina tvari u svemiru ne svjetli.

Vratimo se na zakone gibanja. Tijelo u jednolikom kružnom gibanju brzinom v oko nekog središta na udaljenosti r ima stalno ubrzanje. To je centripetalno ubrzanje koje ima smjer prema središtu gibanja. Centripetalno ubrzanje jednako je

$$a_{cp} = \frac{v^2}{r}. \quad (1)$$

Kada je jednoliko kružno gibanje rezultat gravitacijskog privlačenja između dvaju tijela, centripetalno ubrzanje dolazi od gravitacijskog ubrzanja, te za tijelo manje mase m u gibanju oko tijela velike mase M ($M \gg m$) možemo napisati $a_{cp} = a_{grav}$ što daje uvrštavanjem:

$$\frac{v^2}{r} = G \frac{M}{r^2}, \quad (2)$$

$$v = \sqrt{G \frac{M}{r}}. \quad (3)$$

To je vrlo važan rezultat koji govori da brzina tijela u jednolikom kružnom gibanju oko tijela veće mase, ovisi samo o masi M središnjeg tijela i udaljenosti r tijela u gibanju od središta. Možemo zaključiti i drugačije: orbitalna brzina tijela manje mase ne ovisi o njegovoj masi! Poznavanjem brzine kruženja i udaljenosti od tijela velike mase, možemo izračunati masu središnjeg tijela, bez potrebnog poznavanja mase tijela u gibanju. Iz podataka o udaljenosti Mjeseca i periodu njegovog obilaska oko Zemlje, proizlazi masa Zemlje $M_Z = 6 \cdot 10^{24}$ kg. Podatak o Zemljinoj masi nije nam potreban za izračunavanje mase Sunca oko kojeg Zemlja obilazi. Potrebni su samo brzina Zemljinog gibanja na putanji oko Sunca ($v = 30 \text{ km s}^{-1}$, i udaljenost između Zemlje i Sunca (1 astronomska jedinica = $150 \cdot 10^6$ km; provjerite da masa Sunca iznosi $M_\odot = 2 \cdot 10^{30}$ kg). Iskaz da se Zemlja giba oko Sunca nije potpuno točan, u gravitacijskom međudjelovanju gibaju se i Zemlja i Sunce oko zajedničkog centra mase, međutim ubrzanje koje ima Sunce kao tijelo mnogo veće mase od Zemljine, vrlo je malo i može se za ovakvu raspravu zanemariti. Upravo je to otkrio Johannes Kepler i objavio u knjizi *Astronomia Nova* 1609. godine, godine kada Galileo sklapa svoj teleskop, a objasniti će tek Isaac Newton u monumentalnom djelu *Philosophiae Naturalis Principa Mathematica* koje iz tiska izlazi 1687. godine. Keplerovsko gibanje, ili keplerovska rotacija opada s drugim korijenom udaljenosti od središta. Rotacijske krivulje koje je izmjerila Vera Rubin sa suradnicima

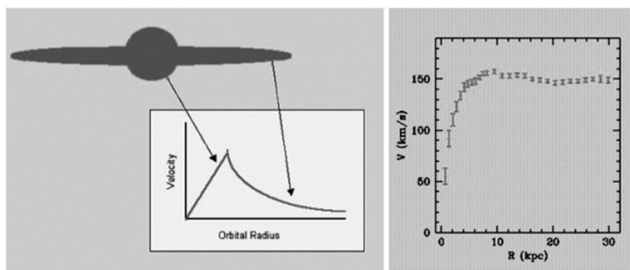
očigledno nemaju svojstva keplerovskog gibanja. Ako je brzina v konstantna, možemo, osim za malo područje blizu središta, prema jednadžbi (3) napisati

$$M = \frac{v^2 r}{G} \implies M \propto r. \quad (4)$$

Podijelimo li jednadžbu (4) s volumenom, dobit ćemo izraz koji pokazuje ponašanje gustoće u ovisnosti o polumjeru

$$\rho(r) \propto \frac{1}{r^2}. \quad (5)$$

Naizgled izgleda da gustoća tvari opada vrlo naglo, s kvadratom udaljenosti od središta. Opažanja zvijezda pokazuju da brojčana gustoća zvijezda u svijetlećem zvjezdanom halou naše galaksije opada još strmije, s $r^{-3.5}$. Upravo je taj nesrazmjer iznenadio astronome. Galaksije sadrže daleko više tvari od tvari sadržane u zvijezdama koje svijetle.



Slika 4. Očekivana rotacijska krivulja galaksije koja je prikazana shematski kao disk sa središnjim ispupčenjem. Ako središnje ispupčenje rotira kao čvrsto tijelo kutna brzina ne ovisi o udaljenosti od središta, odnosno, rotacijska brzina raste s polumjerom. U vanjskim dijelovima diska očekivao bi se pad rotacijske brzine, uz pretpostavku da je masa galaksije koncentrirana prema središtu (lijevo). Spektroskopska opažanja pokazala su da središnji dio doista rotira kao čvrsto tijelo. Međutim, rotacijska krivulja ostala je ravna i na velikim udaljenostima od središta (desno).

Koje su posljedice opadanja gustoće tvari u galaksiji s r^{-2} ? Pretpostavimo da galaksija ima oblik kugle. Zamislimo u kugli tanku sfernu ljusku s polumjerom r . Masa galaksije jednaka je zbroju masa svih tankih ljusaka koje sadrži. Masa jedne tanke ljuske jednaka je umnošku njezinog volumena i gustoće: masa tanke sferne ljuske iznosi

$$\Delta M = \rho \Delta V = 4\pi r^2 \rho \Delta r. \quad (6)$$

Kako gustoća opada s kvadratom polumjera, dolazi do kraćenja faktora r^2 . Drugim riječima, kako se udaljavamo od središta galaksije, masa tankih ljuski ostaje identična. Iako gustoća opada, masa galaksije raste s polumjerom!

Napomena. Jednadžba (4) ne vrijedi za proizvoljno veliki r jer bi to značilo da masa galaksije M može narasti preko svih granica jer je $M \propto r$. Zbroj mase ljusaka mora ostati konačan. Dolazimo do zanimljive posljedice, iako su galaksije odvojene po svijetlećoj tvari, to ne mora vrijediti za njihov halo tamne tvari koji se ustvari u intergalaktičkom prostoru može stopiti. To bi ujedno značilo da ne možemo odrediti ukupnu masu pojedinih galaksija!

Gradeći sve veće i veće teleskope kako bi uhvatili što više fotona dalekih svemirskih objekata, astronomi su se našli u paradoksalnoj situaciji. To što svijetli u svemiru, tek je neznatan dio tvari koji ga ispunjava. Priroda te tamne, nevidljive tvari nije još objašnjena.