



GALAXIA ESPIRALEN ERROTAZIO MISTERIOTSUA

MIGUEL QUEREJETA

*Madrilgo Unibertsitate Konplutentseko
Astrofisikako ikaslea (UCM). Kanarietako Astrofisika
Institutuko udako ikerketa-bekaduna (IAC).*

JOHN BECKMAN

*CSIC eta Kanarietako Astrofisika Institutuko
ikerketa-irakaslea (CSIC, IAC).*

JOAN FONT

*Kanarietako Astrofisika Institutuko postdoc
ikertzailea (IAC).*

Unibertsoan guztia mugitzen ari dela esan genezake, gorputz oro beste zerbaiten inguruan biraka dabilela: Ilargia Lurraren inguruan; Lurra Eguzkiaren inguruan; baita Esnebidetako izar guztiak, gure Eguzkia barne, zentro galaktikoaren inguruan higitzen direla ere jakin badakigu. Dantza kosmiko horretan, galaxia espiralen errotazioak ezusteko itzela eragin zuen XX. mendeko astrofisikan, eta gaur egun ere fe-

nomeno hori zehazki neurtu eta azaltzen orduak ematen ditugu astrofisikari askok.

Forma espiraleko “nebulak” deigarriak gertatu zitzaizkien Charles Messier eta beste hainbat zeru-kartografiatzailei XVIII. mendean. Duela ehun bat urte arte, alabaina, ezin izan zen frogatu objektu horiek geure Esne-bidetik urrun dauden izar-multzok erraldoiak direla. Hain zuzen, 1925. urtean Edwin Hubble astronomo amerikarrak

argi utzi zuen hodei moduko entitate horiek geure galaxiatik at daudela. Horretarako, NGC 6822 eta M31 galaxiak erabili zituen laborategi modura (garai hartan oraindik “nebula espiral” moduan ezagunak). Modu jakin batean distira aldatzen duen izar-mota berezi baten segimendua eginez (zefeida izarrak), nebula horiekiko distantzia kalkulatu zuen; distantzia hori Esne-bidearen taiminarekin alderatuz, ondorioztatu zuen



Andromeda galaxia, M31. Edwin Hubble astronomoak frogatu zuen M31 motako galaxia espiralak gure Esne-bidetik at dauden izar-multzok direla. Hortaz, galaxia horien errotazioa beharrezkoa den fenomeno dugu, baina fenomeno horren azalpena aurkitzea ez zen erraza izan. ARG.: HUBBLE SPACE TELESCOPE, NASA.

objektu horiek geure galaxiatik kanpo dardela, gauez ikus ditzakegun izarrek baino ehunka aldiz urrutiago.

Beraz, teleskopioen bidez ikus ditzakegun galaxia espiralak gure Esne-bidearekiko independenteak dira, milioika izarrez osatutako multzoak, "unibertso-irla" modukoak. Horren ondorioz, galaxia espiralen errotazioa behar-beharrezkoa den fenomenoa dugu: galaxia horiek errotazio-mugimendurik ez balute, kolapsatu eta desagertu egingo liriateke grabitatearen ondorioz. Ikus dezagun zer gertatzen zaigun kotxez bihurgune bat ematen dugunean. Autoarekin biratzean, geure gorputzak kanporantz egiten du, hasiera batean generaman norabideari jarraituz (sentitzen dugun bultzada horri indar zentrifugo deritzo fisikan). Gauza bera gertatzen da galaxiekin: izarrek mugituko ez balira, erakurpen grabitatorioak galaxia konprimatu eta desagerraraziko luke (Lurra gu erakartzen gaituen bezala);

aldiz, izarrek galaxiaren zentroaren inguruan biraka badabiltza, kanporantz zuzendutako indar zentrifugoak kolapsoa saihestu dezake. Beraz, guztiz naturala da galaxiekin errotazio-mugimendua izatea, eta mugimendu hori nolabait detektatzea espero zuten astronomoek.

UNIBERTSO-IRLAK BIRAKA

Hasiera batean, zientzialariek pentsatu zuten galaxia espiralak disko solido baten antzera bueltaka dabiltzala. Eredu intuitibo horren arabera, materiazko beso espiral zurrunak izar berez osatuta egongo liriateke beti, eta ez lukete beren forma aldatuko denboran zehar: tinko jarraitu eta bueltaka ibiliko liriateke beti. Gaur galaxia espiral baten argazkia atera eta irudi horri zentrotik pasatzen den ardatz baten inguruan bira emango bagenio bezala gauzatuko lukete errotazioa galaxiekin. Hala ere, galaxiekin ehunka milioi urte behar dute errotazio bakar bat

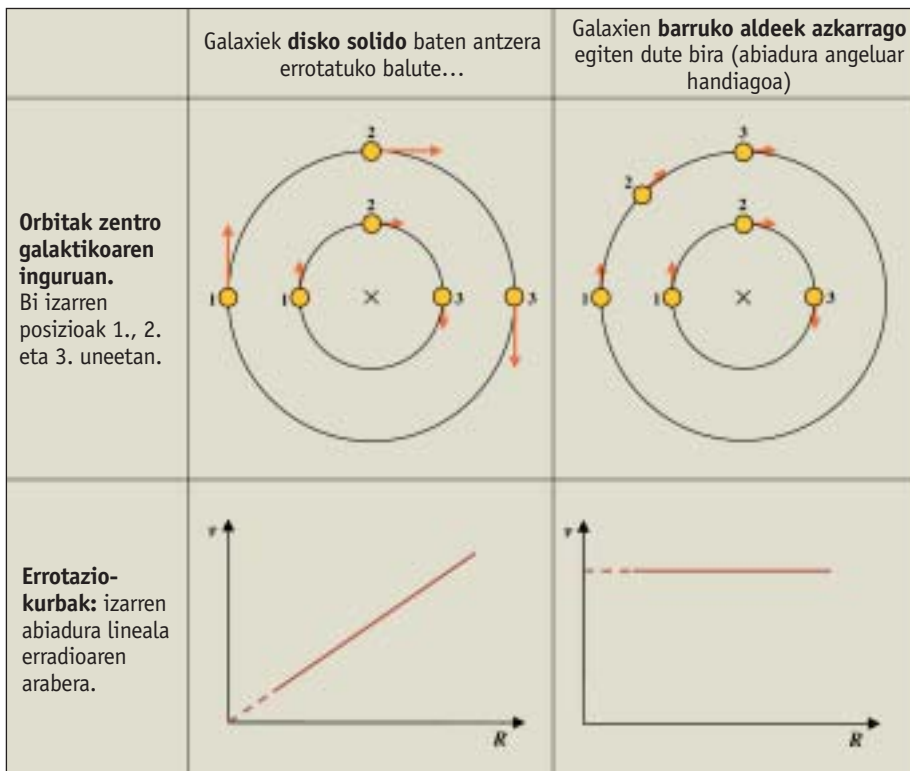
burutzeko, eta, beraz, izarren posizio-aldaketa nabaritzea ezinezkoa da gure bizialdi laburretan.

Galaxien errotazioari buruzko lehen neurketa kuantitatiboak Doppler efektua erabiliz egin zituzten. Efektu horri esker, galaxiaren puntu bakoitzak ikuslearekiko duen abiadura zehaztu daiteke, abiadura horrekiko proportzionala den aldaketa gertatzen baita detektatzen dugun argiaren uhin-luzeran. Suhiltzaileen sirena ez dugu entzuten intentsitate berarekin gerturatzen eta urruntzen ari denean, eta gure ondotik pasatzean tonu-aldaketa berezia nabaritzen dugu. Argia ere uhina denez, soinua den bezalaxe, fenomeno bertsua gertatzen da galaxiekin igortzen duten argiarekin. Hortaz, argiaren uhin-luzera neurtuz, galaxiaren eremu ezberdinetako abiadura erlatiboak lor ditzakegu.

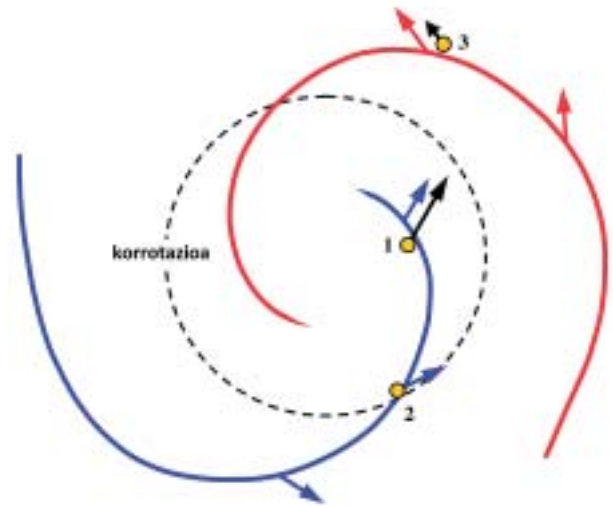
EZUSTE GALAKTIKO APARTA

Eta hona hemen astronomoek topatu zuten ezustea abiadura horiek neurtzean. Azaldu berri dugun eredu intuitiboa egia balitz, hau da, egitura espirala modu tinko eta iraunkorrean biraka ibiliko balitz, abiadura angeluar konstantea erregistratzea espero behar genuke (eta horrek esan nahi du abiadura linealak erradioarekin modu uniformeaz igo beharko lukeela). Doppler efektuari esker neurtutako abiadura linealak, ordea, berdintsuak dira erradio ezberdinetarako ("errotazio-kurba lau" deritzo fenomeno horri), eta horrek esan nahi du abiadura angeluarra ez dela konstantea galaxian zehar. Hau da, barruko aldeko izar batek bira bat ematen duenerako, kanpoko aldeko beste izar batek bira-erdia edo bira-laurdena baino ez du egingo. Barruko aldeak azkarrago egiten duenez bira, bizpahiru errotazio egindakoan galaxiaren egitura espirala hain bihurritua egongo litzateke ezen ezinezkoa izango bailitzateke forma espirala bereiztea: nahaste-borraste handi bat baino ez genuke haitemango galaxiari begiratuz gero.

Egitura espiralaren nahaspilatzeak dakarren arazoaz gain, beste enigma garrantzitsu bat gordetzen zuten astro ikusgarri eta misteriotsu horiek. Galaxia espiral horietako bat arretaz aztertzen badugu, izar erraldoi urdin gehiago hautemango ditugu besoetan beste eremuetan baino; horregatik izaten dira beso espiralak urdinxkak eta erdiguneko aldeak gorrixkak. Hortaz, galaxia espiralaren egitura azaldu nahi duen edozein hipotesik bi arazo hauek hartu beharko ditu kontuan: egitura espirala zergatik ez den nahaspilatzen eta desagertzen, eta zergatik



Goiko lerroan, bi izarren mugimendua ikus dezakegu galaxiaren zentroaren inguruan: disko solido baten modura mugituko balira (lehen zutabea) eta benetan gertatzen den bezala (bigarren zutabea: abiadura angeluarra handiagoa da barruan kanpoan baino). Disko solidoaren kasuan, barruko izarrek bira-erdia eman duenean, kanpoko izarrek ere bira-erdia burutu du; bigarren kasuan, aldiz, barruko izarrek bira-erdia eman duenerako, kanpokoak laurdena baino ez du burutu. Beheko lerroak erradioaren arabera abiadura lineala adierazten du, goiko bi kasuetarako (errotazio-kurbak): disko solidoan, abiadura lineala modu uniformeaz handitzen da erradioarekin (abiadura angeluar konstantea); bigarren kasuan, errotazio-kurba lau da (abiadura angeluarra txikiagoa da kanpoko aldeotan). ARG.: MIGUEL QUEREJETA.



M51 galaxia espirala (galaxia-zurrumbiloa, Canes Venatici konstelazioan. ARG.: HUBBLE SPACE TELESCOPE, NASA.). Diagrama honek galaxia horren beso espiralak adierazten ditu modu eskematikoan, eta korrotazio-zirkuluaren posizioa lerro etenaz. Korrotazioaren barruko aldean, izarrek patroï espirala aurreratzen dute (1. izarra), kanpoaldean (3. izarra) patroï espiralak izarrek aurreratzen dituelarik. Korrotazio-zirkuluan (2. izarra), izarrek egitura espiralarekin batera egiten dute bira, erradio horretan biek abiadura bera baitute. ARG.: MIGUEL QUEREJETA.

dauden izar erraldoi urdin gehiago besoetan barruko aldeotan baino.

1964. urtean, aipatutako bi galdera horiei erantzuna ematen zion teoria dotore bat proposatu zuten Chia-Chiao Lin eta Frank Shu astrofisikariek, aurreko urtean Bertil Lindblad astronomo suediarrek aurkeztu zuten hipotesian oinarriturik. Teoria horrek defendatzen du beso espiralak ilusio optiko baten modukoak baino ez direla: une zehatz batean dentsitate handiagoa duten eremuak izango liriteke. Uhin-motako perturbazio batek dentsitate handiagoko eremu horiek sorraraziko lituzke, eta perturbazio horrek abiadura angeluar uniformearekin errotatuko luke. Teoria horren punturik garrantzitsuetariko bat honako hau da: dentsitate handiagoko beso espiral horiek osatzen dituzten izarrek ez dute beso espiralarekin batera errotatzen normalean; izar gehienak egitura espiralean sartu eta handik atera egiten dira etengabe.

AUTO-ILARA KOSMIKOAK

Azken puntu hori argitzeko, metafora batez balia gaitzek. Pentsa dezagun errepidean maiz gertatzen diren auto-iletan (presa handiena daukagunean topatzen dugun horietako bat). Begira diezaiogun orain auto-ilarari goitik, gu espatzen ari den satellite batek begiratuko lukeen bezala. Perturbazio batek (lanak errepidean, esaterako) autoak pilotzea eragiten du. Horren ondorioz, auto-dentsitate handiagoa topatzen dugu eremu

batean (auto-ilara), eta honen aurretik eta atzetik, dentsitate txikiagoko gunek. Baina, oro har, autoak igaro egiten dira dentsitate handiagoko puntu horretatik: auto-ilaran ez daude beti kotxe berak, nahiz eta auto-ilararen posizioa ezer ez den aldatzen edo ilara kotxeak baino motelago mugitzen den.

Auto-ilararen fenomenoaren moduko bat gertatzen da galaxia espiralen errotazioan. Dentsitate handiagoko egitura (beso espirala) auto-ilararen analogoa da, bertatik izarrek igaro egiten baitira, oro har ez direlako egitura espiralarekin batera mugitzen. Gainera, eredu horrek esplikatzeko digu zergatik dauden izar erraldoi urdin gehiago besoetan: eremu horretan, gasa konprimatu egiten da, uhinak dentsitate handiagoa eragiten duelako, eta, horren ondorioz, izarrek sortzeko prozesua areagotzen da. Horren gakoa hau da: izar erraldoi urdinek besteek baino askoz bizitza motzagoa dute (azkarrago kontsumitzen dute erregaia, hidrogenoa); horregatik, izar erraldoi urdinak sortzen diren puntutik hurbil aurkitzen ditugu beti, hau da, beso espiraletatik gertu, laster hiltzen baitira.

Laburbilduz, Linek eta Shuk proposatutako dentsitate-uhinaren eredu arrakastatsua da bi arrazoiengatik: batetik, egitura espirala zergatik ez den desegiten azaltzen duela (izarrek eta egitura espiralek ez dute normalean abiadura angeluar bera) eta, bestetik, izar urdinen kokapen bereziaren galderari ere erantzuten diolako. Guk izarren abiadura neurtzen dugu, eta ez egitura espiralarena;

hortaz, ez da kontraesanezkoa esatea patroï espiralak erlojuaren orratzek bezala errotatzen dutela, abiadura uniformeaz, eta izarrek abiadura angeluar aldakorra dutela.

GALAXIEN KILOMETRO-KONTAGAILU BERRIA

Esan duguna kontuan hartuta, normala da honako galdera hau sortzea: izarren abiadura aldakor horiek badira neurtzen ditugunak, zehaztu al daiteke patroï espiralaren abiadura uniformea? Neurketa horrek garrantzia handia dauka kosmologian, patroï-abiadurari esker jakin baitezakegu zein den materia ilunaren kokapena. Gainera, galaxia espiral askok barra bat izaten dute erdian, eta barra horren abiadurak (kanpoko egitura espiralaren abiadura ez bezalakoa) galaxia materia ilunezko halo batez inguratuta dagoen esaten digu. Azkenik, astrofisikari askok uste dute patroï-abiadura ezberdin horiek (barra eta egitura espiralarena, adibidez) erresonantzien arteko akoplamendu-fenomenoak eragin ditzaketela.

Galaxia espiralaren abiadura angeluarrak behera egiten duenez erradioa handitzean, oro har, abiadura angeluar hori ez da izango egitura espiralaren abiadura konstantearen baliokidea. Hala ere, erradio berezi bat egongo da, non izarrek egitura espiralaren abiadura bera izango baitute: zirkulu hori baino barrurago izarrek beso espiralak aurreratuko dituzte aldizka, eta zirkulu horretatik kanpora, alderantziz, beso espiralek izarrek aurreratuko dituzte maiztasun zehatz bate-



NGC 6822 galaxia. Edwin Hubble astronomoak erabili zuen, M31 galaxiarekin batera, izar-multzo haiek Esne-bidetik kanpo daudela baieztatzeko, alegia, galaxiak direla baieztatzeko. ARG.: NASA.

kin. Zirkulu berezi horri korrotazio deritzo, eta hura neurtzea patroï-abiadura aurkitzearen baliokidea da, bi magnitudeak erlazionatzen dituen ekuazioa baitago. Korrotazioa aurkitzeko, zenbait metodo asmatu izan dira, sinpleenak morfologian oinarrituta. Egitura bereziren bat orbita zehatz batekin lotuz, korrotazioa aurkitu daiteke; adibidez, eratzun moduko egiturak orbita berezi batzuekin identifikatuz, posible da korrotazioa zehaztea. Beste metodo batzuek, neuritutako abiaduraren mapan oinarriturik, posizio hori zehaztea ahalbidetzen dute (Tremaine-Weinberg, adibidez). Azkenik, ahalegin handia egin da galaxien portaera simulazio hidrodinamikoak erabiliz ordenagailuen bidez irudikatzeke, eta, zenbait kasutan, posible da simulazio horiekin patroï-abiaduraren balioa mugatzea.

Kanarietako Astrofisika Institutuan korrotazioaren posizioa neurtzeko metodo berri bat garatu dugu. Galaxien abiadura ez-zirkularren mapa aztertzean oinarritzen da metodo hori, eta gaur egun eskura ditugun teleskopio eta detektagailuen kalitate handiak posible egiten du metodoa aplikatzea (duela hamarkada pare bat ezinezkoa zen hori, ez geneukalako behar adina zehaztasun instrumental). Orain arte erabilitako metodoak baino sinpleagoa da gurea, korro-

tazioa edo beste erresonantzetatik hurbil gertatzen den gas-korronteen norabide-aldaketa bakarrik erabiltzen duelako. Gasaren norabide-aldaketa hori uhin-dentsitatearen teoriak iragartzen du. Hala, zuzenean neuritutako abiaduren mapari errotazio-kurba (abiadura zirkularrak) kenduz, zeinu-aldaketa gehiago topatuko ditugu eraiki dugun abiadura ez-zirkular horien mapan, erresonantzien posizioetan. Teknika berri hori bibliografian ikertutako zortzi galaxiatara aplikatu da, eta etorkizun handiko emaitzak lortu dira: beste metodoekin lortutako balioen antzekoak aurkitu ditugu, eta ia beti ziurgabetasun-bitarte txikiagoekin. Laster, artikulua honen egileek egindako ikerketa sakonago bat argitaratuko da, metodo berria ehun bat galaxiatara arrakasta handiarekin aplikatzen duena.

Laburbilduz, galaxia espiralen errotazioa azaltzea erronka handia izan da astronomoentzat. Hala ere, Linek eta Shuk 1960ko hamarkadan proposatutako hipotesiak dotore azaltzen du egitura espirala: beso espiralak une zehatz batean dentsitate handiagoa duten eremuak dira, handik sartu eta atera egiten diren izarrez osatuak; gainera, dentsitate handiagoko ilusio optiko moduko egitura horrek erloju-orratzen norabidean errotatzen du, tinko, galaxiaren zen-

troaren inguruan. Garrantzi handia dauka jakiteak galaxiek zer patroï-abiadura duten, eragin handia baitu kosmologian, eta beso espiralen patroï-abiadura zehaztea korrotazioaren posizioa aurkitzearen baliokidea da: zirkulu berezi horretan, izarrek egitura espiralarekin batera higitzen dira. Esan dezakegu Kanarietako Astrofisikako Institutuan garatu berri dugun metodoa aurrepauso handia izan dela arlo horretan, oso teknika zuzena baita eta posible egin baitu korrotazioa orain arte ezinezkoa zen zehaztasunarekin neurtzea. ●

BIBLIOGRAFIA

- FONT, J.; BECKMAN, J.E.; EPINAT, B.; FATHI, K.; GUTIÉRREZ, L.; HERNÁNDEZ, O.: *The Astrophysical Journal Letters*, 741 (2011), 14.
- VAN DER KRUIT, P.C.; ALLEN, R.J.: *Annual review of astronomy and astrophysics*, 16 (1978), 103.
- Lin, C.C.; Shu, F.H.: *The Astrophysical Journal*, 140 (1964), 646.
- DEBATTISTA, V.; SELLWOOD, J.A.: *The Astrophysical Journal Letters*, 493 (1998), 5.
- BINNEY, J.; TREMAINE, S.: *Galactic Dynamics*, Princeton University Press: Princeton, 1987.