

Gradu Amaierako Lana
Fisikako Gradua

Materia iluna eta bere beharraren eztabaida: NGC1052-DF2 eta NGC1052-DF4 galaxiak

Egilea:
Mikel Pérez Arrieta
Zuzendaria:
Jon Urrestilla Urizabal

Gaien Aurkibidea

1. Sarrera	5
2. Ebidentziak	6
2.1. Mikrouhin hondo kosmikoak	6
2.2. Big Bang Nukleosintesia	7
2.3. Ebidentzia astrofisikoa	9
3. Materia iluna: Hautagaiak	13
3.1. Neutrinoak	14
3.2. Masa handiko objektu astrofisiko konpaktuak (MACHO)	14
3.3. Interakzio ahula duten masa handiko partikulak (WIMP)	15
3.4. Axioiak	16
4. Kontzeptu astrofisikoak	18
4.1. Distantziak neurtzeko unitate bat: Parsec	18
4.2. Distira eta itxurazko magnitudea	19
4.3. Argitasuna eta magnitude absolutua	20
4.4. Masa dinamikoa	21
4.5. Masa-Argitasun proportzioa	22
4.6. Galaxietako argitasunaren fluktuazioak eta SBF metodoa	22
4.7. Galaxia ultra barreiatuak edo UDG	23
5. Materia ilun gabeko galaxiak	24
5.1. NGC1052-DF2	24
5.1.1. Izarren masa	25
5.1.2. Masa totala	25
5.2. NGC1052-DF4	29
6. Beste ikuspuntu bat	30
7. Ondorioa	33
Erreferentziak	35

Irudien Zerrenda

2.1.	Mikrouhin hondo kosmikoaren irudia.	6
2.2.	Grafiko honetan aurreko taulako elementuen ratioak daude irudikatuta hidrogeno kontzentrazioarekiko. Bertikalki urdinez dagoen esparruak adierazten du BBN-tik lortzen diren balio teorikoak. Ikusten dugu BBN teoriak 10^{10} orden ezberdineko balioak emateko gai dela eta balioa hauek zuzenak direla.	8
2.3.	Ezkerreko grafikoan orainarte deskribatutako masaren portaera adierazten da, eta eskuinekoan, aldiz, masa horrentzako espero beharko genukeen abiaduraren portaera.	10
2.4.	Hemen ikusten dugu NGC3198 galaxiaren abiaduraren espektroa. Galaxiaren abiadura (gorria), materia ilunaren diskoa (berdea), izarren diskoa (morea) dira eta abiaduraren errorea (urdina). Grafiko honi dagokion datu taula 2.2. da.[4]	12
2.5.	Ezkerreko irudian abiaduraren arazoa konpontzeko behar den masaren portaera deskribatzen da, eta eskuinekoan, aldiz, itxura horretako masa duen galaxia baten abiadurarena.	12
4.1.	Izar-paralaxia efektua ikusten dugu. Lurrak duen posizioaren arabera izarrek duen posizio hipotetikoa ikusi dezakegu, urrunago dauden izarrekiko.	19
4.2.	Triangelu angeluzuzen bat bezela planteatu dezakegu, irudi honetan ikusten den bezala.	19
5.1.	NGC1052–DF2 galaxia. Markatuta dauden objektuak dira galaxia honen barruan daudenak.	26
5.2.	Irudi honek masa totala, izarren masa ($M_{izar} = 2 \cdot 10^8 M_{\odot}$ izanik) eta materia ilunaren (haloen) masaren portaerak erakusten dizkigu. Gezien bidez adierazten da NGC1052-DF2 galaxiaren masaren goi-limitea.	28

Taulen Zerrenda

2.1.	<i>He</i> ⁴ , <i>D</i> eta <i>Li</i> -ren kontzentrazioak hidrogenoaren kontzentrazioarekiko adierazita.	8
2.2.	NGC3198 galaxiaren abiadura zentrutik urrunduz adierazita. V_d izarren diskoari dagokion abiaduraren ekarpena adierazten du, eta V -k aldiz, galaxiaren errotazio abiadura totala adierazten du. dV gaiak abiaduraren errorea ematen digu, eta ρ materia ilunaren dentsitatea da esparru horretan. Taula hau irudikatuta dago 2.4. irudian.[4]	11
3.1.	Quarken masak.[9]	16
5.1.	Hemen ikusten ditugu [15] artikuluan lortutako balioak, TME metodoa erabiliz lortuak. α , β edo γ -ren baliak aldatzen baditugu ez du asko eragiten masen balioetan (gehienez %30 aldatzen da). Honelako kalkuluetan magnitude ordena izaten da esanguratsuena, eta hau ez da aldatzen.	27

1. Kapituluia

Sarrera

Materia ilunak unibertsoko %23 inguru osatzen du, eta aldiz, materia arrunta, hau da, materia barionikoa¹, %5 inguru bakarrik da. Faltza den osagaia, %72 ingurua, energia ilunari dagokio. Lan honetan materia ilunari buruz hitz egingo dugu, baina materia barionikoa ere aipatuko dugu. Unibertsoan materia arrunta baino askoz materia ilun gehiago dago, eta ez dakigu ezer asko berari buruz. Materia mota honen existentziaren beharra ikusi zenetik hainbat galdera sortu dira honi buruz: Zer da materia iluna?, zertaz osatuta dago?, zergatik dago materia ilunaren beharra?, etab.

Galdera horientzat erantzun asko egon dira zientziaren historian zehar, baina oraindik ez da aurkitu zuzena zein den. Hori dela eta, lan honetan erantzun esanguratsuenak landuko ditugu. Lehenik eta behin, materia ilunaren existentziaren behararen zergatiak ikusiko ditugu, eta bigarrenik, materia iluna osatzeko dauden, eta egon diren, hautagai garrantzitsuenek buruz hitz egingo dugu.

Lan honen ikuspuntutik, ebidentzia astrofisikoaren garrantzia galaxiak beste mota bateko materiarekin inguratuta daudela da. 2018 urtean, ordea, NGC1052-DF2² galaxiak materia ilunaren existentziarik behar ez duela aurkitu zuten. Ordura arte beharrezkoa ikusten genuen materia ilunaren existentzia galaxia guztietan. Urte bat beranduago, beste bat ere aurkitu zuten, NGC1052-DF4 izenekoa. Biak galaxia talde berdineko parte dira, eta beraien ezaugarrietatik, kumulu globularrak direla ere esan ohi da. Bi galaxia hauen berezitasuna oso arraroa da, eta aztertu egin behar dira. Lan honetan bi galaxia bitxi horien berezitasunak ulertuko ditugu.

Azterketa horiek egiteko masak kalkulatu ditugu, bai izar diskoarena, bai materia ilunaren haloena eta galaxia osoarena. Lehen, galaxia baten barruan dauden izarrek osatzen duten masa kantitatea izango da, hau da, galaxia baten barruan dauden objektu distiratsuen masa totala. Bigarrena, aldiz, galaxia inguratzen duen materia ilunaren masa izango da. Azkena, aurreko bi masen batura da, hau da, galaxiaren masa osoa.

Amaitzeko, galaxia hauen berezitasunaren aurkikuntzarekin batera zenbait soluzio eman dira. Esanguratsuen galaxia horien eta gure artean dagoen distantziaren kalkuluan egingadako akats bati dagokio. Horregatik, lanaren amaieran distantziaren balioaren inguruan dagoen desadostasunaren arrazoiak eta ondorioak ere azalduko ditugu.

¹Ohiko materia bezala ere ezagutzen da.

²Galaxia hau [KKS2000]04 izenarekin ere ezagutzen da.

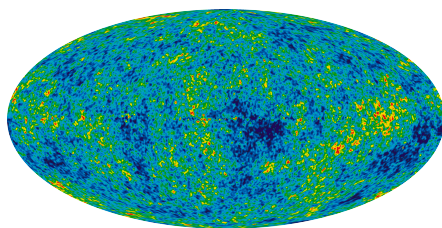
2. Kapituluia

Ebidentziak

Kapitulu honetan materia ilunaren existentziarako dauden ebidentziak ikusiko ditugu. Ebidentzia hauetatik ondorioztatzen da materia barionikoaz gain beste materia mota baten beharra. Lan honetan hiru ebidentzia azalduko ditugu, mikrouhin hondo kosmikoari dagokiona, Big Bang Nukleosintesiari dagokiona, eta azkenik, ebidentzia astrofisikoa. Azken hau da sakonen landuko duguna, lan honen funtsarekin lotura handiena duena delako.

2.1. Mikrouhin hondo kosmikoa

Big Bang-a gertatu ondoren, unibertso osoa plasma egoeran zegoen, elkarrekintzan zeuden fotoiz eta kargadun partikulez osatuta. Plasma hau hedatzen hasi zen tenperatura hozten joan ahala. Momentu batean, 380.000 urte ondoren, atomo neutroak sortzen hasi ziren. Hauek neutroak izateagatik, ez zuten interakziorik eragiten erradiazio elektromagnetikoarekiko, eta fotoiak interakzio gabe bidaiatu ahal izan zuten unibertso osoan zehar. Fotoi hauek dira CMB-a eta hauek osatzen dute [2.1.](#) irudia. Hondoko mikrouhin erradiazio kosmikoak¹ unibertsoaren irudi berri bat ematen digu eta gorputz beltz baten ezaugarriak ditu, 2.73K-tako tenperaturaren.



2.1. Irudia: Mikrouhin hondo kosmikoaren irudia.

[2.1.](#) irudian fluktuazioak ikusten dira. Hauek, unibertsoaren eremu ezberdinetako dentsitatearen diferentziaren eraginez sortzen dira. Fluktuazioak oso txikiak izan arren, 10^{-5} K ordenekoak, 2.73K-eko tenperaturarekin konparatuz, diferentzia horiekin dago lotuta eskala handiko lehen egituren sorrera, bai eta, gaur egun ezagutzen ditugun galaxien banaketak.

Unibertsoaren bilakaera baten simulazio bat egingo bagenu, fluktuazio horiek eta materia barionikoa bakarrik erabiliz, ikusten dena da materia barionikoa ez dela nahikoa gaur

¹CMB bere ingeleseko siglengatik, Cosmic Microwave Background.

egun ditugun egiturak sortzeko. Beraz, materia barionikoaz gain beste materia mota baten beharra dugu, hauek putzu grabitatoriotan pilatzeko eta unibertsoa egiturak sortzeko. Materia mota berri hau materia iluna izango litzateke.

Beste modu batean azaltzeko, demagun CMB t_1 momentuan gertatzen dela eta gaur egun t_2 momentuan gaudela, beraz $\Delta T \equiv t_2 - t_1$ CMB-tik gaur egun arteko denbora tartea da. CMB-ren ezaugarrietatik badakigu atomo neutroak sortu zirela t_1 momentuan. Δt denbora tartea oso txikia da unibertsoa gaur egun ezagutzen dugun bezalakoa izateko, materia barionikoa bakarrik erabiliz. Beraz, egituren eraketarako materia gehiagoren beharra dago. Baina $t < t_1$ tartean ez zegoen materia barioniko neutrorik, eta hori dela eta, beharrezkoa da beste materia mota bat existitzea. Materia mota berri honek ezaugarri garrantzitsu bat bete behar du, neutroa izan behar du egiturak sortu ahal izateko. Materia mota berri hau izango da materia iluna.

Orain esan dugunari zenbakiak ipiniko dizkiogu. WMPA²-ren arabera, hauek dira materia dentsitatea (totala) eta materia barioniko dentsitatea:[1]

- Materia totala:

$$\Omega_m h^2 = 0.1334 \pm 0.0056 \quad (2.1)$$

- Materia barionikoa:

$$\Omega_B h^2 = 0.02260 \pm 0.00053 \quad (2.2)$$

non h Hubble-en konstante laburtua den. Bi balio hauek ezberdinak direnez, materia barionikoaz gain, materia gehiagok existitu behar du:

- Materia iluna³:

$$\Omega_{DM} h^2 = 0.1108 \pm 0.0056 \quad (2.3)$$

2.2. Big Bang Nukleosintesia

Big Bang Nukleosintesia neutroiak eta protoiak fusionatzen hasi ziren unibertso goiztiarreko garaia da. Horren eraginez, lehenengo elementu arinak sortzen hasi ziren, adibidez hidrogenoa, helioa eta litioa, eta hauen isotopoak. Garai honetan sortu zirenez, hauen kontzentrazioen arteko proportzioak erabiliz, dagoen materia barioniko kantitatea lortu dezakegu.

Orokorrean helioaren kontzentrazioaren eta hidrogenoaren kontzentrazioaren arteko proportzioa erabiltzen da materia barionikoaren dentsitatea lortzeko. Baina lan honetan hiru proportzio aipatuko ditugu: D/H, He/H eta Li/H proportzioak (Taula 2.1.). Hauen balio esperimentalak kalkulatzeko ikusten da Big Bang teoriak ematen duen balioarekin bat

²Wilkinson Microwave Anisotropy Probe.

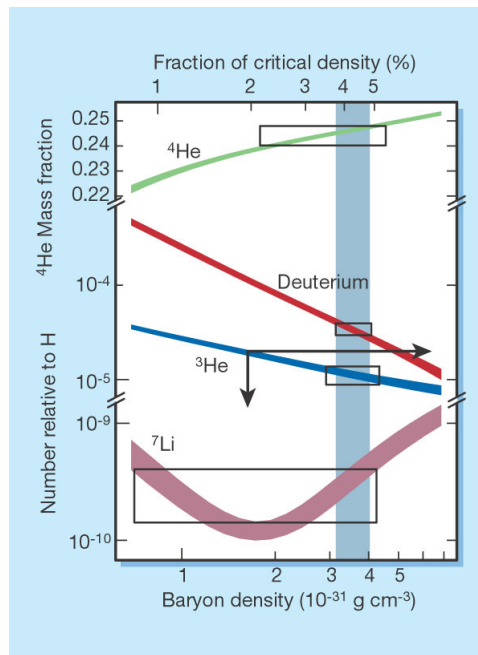
³Lanean zehar indizeetan materia iluna idatzi beharrean DM idatziko dugu (Dark Matter).

egiten dutela. Hau izan da Big Bang teoriaren garaipenik garrantzitsuenetariko bat.

Ratioak	
He^4	0.245 ± 0.007
D	$(2.55 \pm 0.03)10^{-5}$
Li	$(1.6 \pm 0.3)10^{-10}$

2.1. Taula: He^4 , D eta Li-ren kontzentrazioak hidrogenoaren kontzentrazioarekiko adierazita.

CMB-tik badakigu fotoi dentsitateak $n_\gamma = 411 \pm 8 \text{ cm}^{-3}$ balioa duela. Orain barroi-fotoi proportzioa $\eta \equiv n_b/n_\gamma$ moduan definituko dugu, non n_b barroi dentsitatea den. BBN-ek ematen diguna hau da: barroi-fotoi dentsitatearen balioa $\eta = (1,6 \pm 0,1) \cdot 10^{-10}$ denean, BBN-ko balio teorikoak eta espermentalak bat egiten dute, 2.2. irudian ikusten den bezela.



2.2. Irudia: Grafiko honetan aurreko taulako elementuen ratioak daude irudikatuta hidrogeno kontzentrazioarekiko. Bertikalki urdinez dagoen esparruak adierazten du BBN-tik lortzen diren balio teorikoak. Ikusten dugu BBN teoriak 10^{10} orden ezberdineko balioak emateko gai dela eta balioa hauek zuzenak direla.

Orain badaukagu barroi-fotoi proportzioaren balioa, eta bertatik barroi dentsitatea lortu dezakegu:

$$\Omega_B h^2 = (0,6 \pm 0,1) \cdot 10^{-2} \quad (2.4)$$

[2] artikulutik unibertso masa dentsitatea $\Omega \approx 0,15$ inguru dela ikusten dugu. Balio hori (2.4) balioarekin konparatuz, ikusten da azken hau askoz txikiagoa dela, eta beraz,

unibertsoko materia gehiena materia ilun ez-barionikoa izan beharko duela.

2.3. Ebidentzia astrofisikoa

Materia ilunaren ebidentzia hau lantzeko galaxietako errotazio abiaduretan zentratuko gara. Galaxiak beraien ardatzaren inguruan birak ematen dituzte. Galaxia barruko objektuen errotazio abiadurak behar ditugu, eta hau aldatu egingo da objektu astrofisiko horren eta galaxiaren zentruko tarteko espazioan dagoen masaren arabera.

Teorikoki gorputz baten abiadura lortzea erraza da, indar zentral bat dugula kontutan hartuz. Beste edozein bi gorputzekin gertatzen den bezala, errotazio abiadura lortzeko gorputzek jasandako indarrak identifikatu behar ditugu. Hauek dira honelako sistema baten jasaten dituen indarrak: Alde batetik erakarpen grabitatorioa dugu (F_g), eta bestetik, indar zentripetua (F_c).

$$F_g = G \frac{Mm}{r_0^2} \quad (2.5)$$

eta

$$F_c = m \frac{v^2}{r_0} \quad (2.6)$$

Ekuazio hauetan, G grabitazio konstante unibertsala da, r_0 bi masen arteko distantzia da eta v gorputz txikiaren errotazio abiadura da. m -k gorputz txikiaren masa adierazten du eta M masa definitu egin behar dugu, errotazio abiadura egoki bat lortu ahal izateko. Horretarako, Gauss-en teorema erabiliko dugu eta $M=M(r)$ funtzio bat bezala idatziko dugu. Nahiz eta galaxiako masa guztia ez egon zentruan puntualki kokatuta, Gauss-en teorematik, badakigu r erradioko gainazal Gaussiar baten barruan gelditzen den masa guztia puntualtzat hartu dezakegula. Hori dela eta, masa $M(r_0)$ izango da, non r_0 errotatzen ari den objektuaren kokapena izango den. Beraz, hau izango litzateke $M(r)$ -ren adierazpena:

$$M(r) = \begin{cases} M(r_0), & r_0 < R \\ M_T, & r_0 > R \end{cases} \quad (2.7)$$

non M_T galaxia osoaren masa den eta R galaxiaren erradioa den.

Hau guztiarekin eta aurreko bi ekuazioak berdinduz, abiaduraren adierazpena lortuko dugu:

$$v(r) = \sqrt{G \frac{M(r)}{r}} \quad (2.8)$$

Galaxien errotazio abiadurak ere lortu daitezke Einstein-en erlatibitate orokorraren teoria erabiliz. [3] artikuluan abiadura tangenzialaren adierazpen honetara irixten dira:

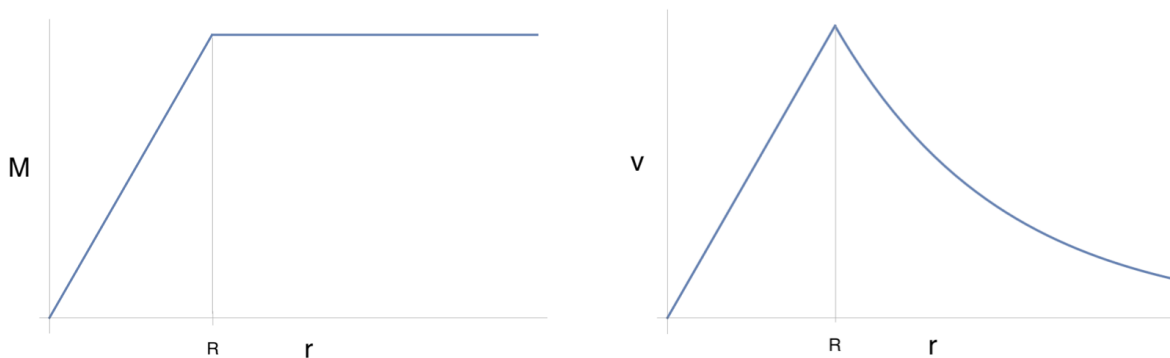
$$v = c \frac{\partial \Phi}{\partial r} \quad (2.9)$$

non $\Phi \nabla^2 \Phi = 0$ betetzen duen potentzial sortzailea izango den. c argiaren abiadura da. Galaxia bakoitzarentzat Φ egoki bat aurkitu behar da.

Masa eta abiadura txikietan emaitza Newtondarraren eta erlatibitate orokorrak emandako emaitza baliokideak dira. Ebidentzia hau azaltzeko errazagoa da abiadura Newtondarra erabiltzea, honetan ondo ikusten delako $M(r)$ eta r -ren ekarpenak. Beraz, (2.8) adierazpen horretan interesatzen zaigun $M(r)/r$ -ren portaera aztertuko dugu, galaxiako eremu batzuetan r -ren eragina handiagoa izango baita $M(r)$ funtzioan eta besteetan berriz r -ak irabaziko dio $M(r)$ funtzioari. Erro karratuak funtzioa leuntzen du, baina muturretako portaerengan ez du eraginik izango (r eta $M(r)$ beti positiboak izango dira). Frakzio horren portaera ikusteko limiteak lortu behar ditugu.

Galaxietako masa kontzentrazio handiena zentrutik gertu dago, zentru bezala masa-zentruaren posizioa kontsideratuz. Modu honetan, onargarria da pentsatzea r zentrutik gertu apurka-apurka handitzean $M(r)$ funtzioa bortitzki handiagotzen dela, eta beraz zentrutik gertu errotazio abiadura asko handiagotzen dela. Zentrutik urrundu ahala, galaxiako masa kontzentrazioa txikiago bihurtzen da, eta horren ondorioz, $M(r)/r$ erlazioan zentruarekiko distantzaren ekarpenak garrantzia irabazten du. Hori dela eta, errotazio abiadura igotzen jarraitu arren, malda txikiagotzen joan beharko luke zentrutik urrundu ahala. Azkenik, galaxiatik irteten garenean, hau da, $r > R$ denean R galaxiaren erradioa izanik, $M(r)$ funtzioa konstante bilakatzen da $M_T = M(R)$ moduan.

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \frac{M}{r} \rightarrow 0$$



2.3. Irudia: Ezkerreko grafikoan orainarte deskribatutako masaren portaera adierazten da, eta eskuinekoan, aldiz, masa horrentzako espero beharko genukeen abiaduraren portaera.

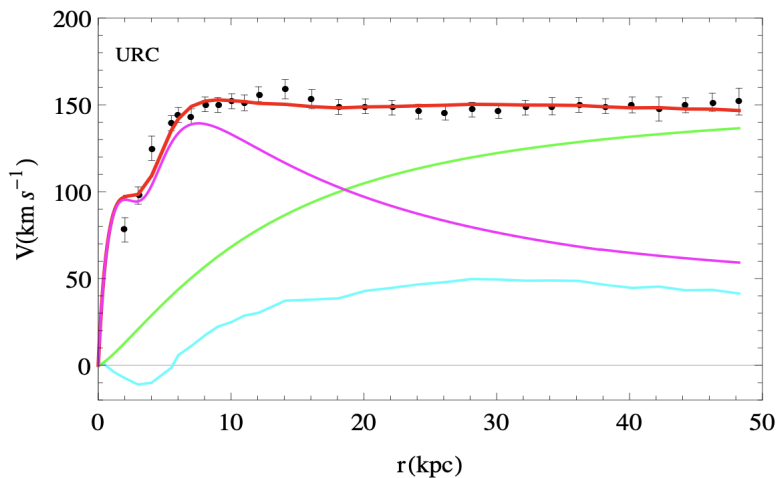
Limite horrek adierazten digu errotazio abiadura zentrutik oso urrun zerorantz joan behar duela. 2.3. irudian ikusten dugu hasiera batean espero behar genuen masaren konposizioarako abiaduraren portaera, eta limiteak adierazitako portaera jarraitzen du. Orain

galaxia baten (NGC3198 galaxia) behaketak emandako datuak aztertuko ditugu hurrengo 2.2. taula eta 2.4. grafikoan.

R (kpc)	V_d (km/s)	V (km/s)	dV (km/s)	$\rho \cdot 10^{-25}$ (g/cm ⁻³)
2,0	86,2	79,0	7,0	—
3,0	85,4	97,8	5,0	—
4,0	93,6	118,0	5,6	—
5,5	115,7	139,4	4,3	2,34
6,0	120,8	144,2	4,3	2,33
7,0	125,4	143,3	4,5	2,20
8,0	125,5	150,3	4,3	2,01
9,0	123,5	149,9	4,3	1,83
10,1	120,1	152,1	4,3	1,64
11,0	116,6	151,1	4,5	1,48
12,1	112,6	156,2	4,3	1,32
14,1	105,2	161,0	4,3	1,06
16,1	98,6	155,3	4,3	0,86
18,1	92,7	148,7	4,3	0,70
20,1	87,5	149,1	4,3	0,58
22,1	82,8	148,4	4,3	0,48
24,1	78,7	146,2	4,3	0,42
26,1	75,1	145,5	4,3	0,70
28,1	71,9	147,3	4,3	0,33
30,2	68,9	146,5	4,3	0,30
32,2	66,3	148,4	4,3	0,27
34,2	63,9	149,3	5,0	0,25
36,2	61,8	149,9	4,3	0,23
38,2	59,8	149,3	4,3	0,21
40,2	58,0	150,0	4,6	0,20
42,1	56,4	147,6	7,0	0,18
44,2	54,9	149,8	4,3	0,16
46,2	53,5	151,5	4,3	0,13
48,2	52,2	151,9	7,7	0,11

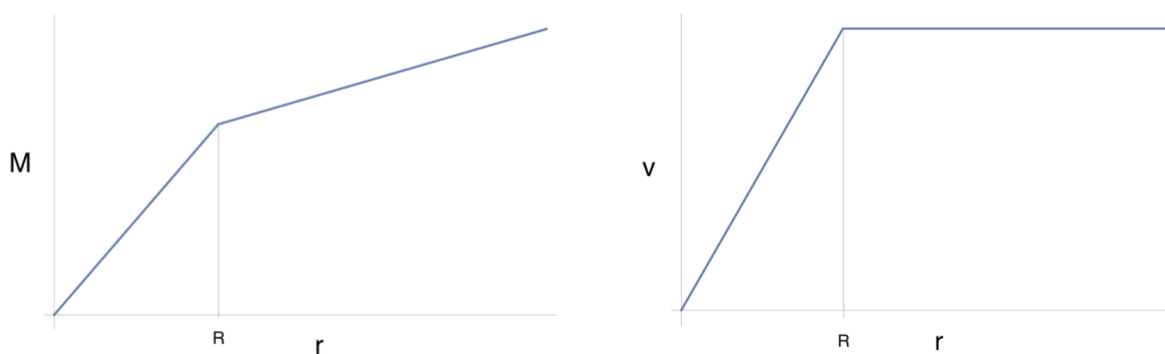
2.2. Taula: NGC3198 galaxiaren abiadura zentritik urrunduz adierazita. V_d izarren diskoari dagokion abiaduraren ekarpena adierazten du, eta V -k aldiz, galaxiaren errotazio abiadura totala adierazten du. dV gaiak abiaduraren errorea ematen digu, eta ρ materia ilunaren dentsitatea da esparru horretan. Taula hau irudikatuta dago 2.4. irudian.[4]

2.2. taulan ikusten den bezala, behatzen diren galaxien errotazio abiadurak ez dute aurrean dugun portaera jarraitzen. Izatez hasierako tartean (galaxia barrualdean) abaidura handiagotzen joaten da, aurrean dugun bezala, baina galaxiatik irtetean abiadurak ez du txikiagotzeko joera hartzen, bertan dagoen masa kantitatea dela eta aurrean dugun erduan hartu beharko lukeen bezala. Horren ordez, nahiko konstante mantentzen da (2.2. taulan V zutabea eta grafikoan behatu daitekeen bezala). Aldiz, V_d zutabea behatzen badugu (izarren diskoari dagokiona), ikusten dugu honek auresandako portaera jarraitzen duela. Hau ere ikus dezakegu ondorengo 2.4. irudian.



2.4. Irudia: Hemen ikusten dugu NGC3198 galaxiaren abiaduraren espektroa. Galaxiaren abiadura (gorria), materia ilunaren diskoa (berdea), izarren diskoa (morea) dira eta abiaduraren errorea (urdina). Grafiko honi dagokion datu taula 2.2. da.[4]

Galaxia batean, bertako izarrek duten posizioaren arabera eta galaxian ikusten dugun masa guztiaren arabera, orainarte esandakoaren arabera izan behar luketeen abiadura eta benetan duten abiadura ez dira berdinak. Efektu hau azaltzeko modu bat, masa gehiagoren existentzia da. Hau da, galaxiaren zentrutik kanpo abiadura ez txikiagotzeko behatzen dena baino masa gehiagok egon behar du, $M(r)$ funtzioan ordezkatzuz $\frac{1}{r}$ -ren eragina konpentsatzen duena.



2.5. Irudia: Ezkerreko irudian abiaduraren arazoa konpontzeko behar den masaren portaera deskribatzen da, eta eskuinekoan, aldiz, itxura horretako masa duen galaxia baten abiadurarena.

Esan bezala, ikusi dezakeguna baino masa gehiago egon behar du galaxia hauetan, abiadura balio teorikotik zuzenduz, behatzen den baliara eramaten duen masa nahikoa. 2.5. irudian ikusten dugu, galaxiatik irten eta masa igotzen jarraitzen badu, errotazio abiadura konstante mantendu daitekeela. Baina masa berri hori ezin daiteke elektromagnetikoki behatua izan, bestela detektatua izango baitzen galaxiako beste materia guztiarekin batera. Ikusten ez dugun masa honi da materia iluna deitzen zaiona.

3. Kapituluia

Materia iluna: Hautagaiak

Materia ilunaren konposizioa zientziaren historian erantzun gabeko galdera handienetarikoa bat da, eta oso aurrera pauso handia izango litzateke hau ezagutzea, galaxiak inguratzen dituen materia guztiaren informazio osoa izateko, adibidez. Materia iluna osatzeko hautagaien lista oso luzea da, baina hautagai esanguratsuenak aipatuko ditugu lan honetan. Hauek dira baldintza aipagarrienak:

- Ez dute elkarrekintza elektromagnetikorik jasan behar, hots, elektromagnetikoki neutroak izan behar dira. Baldintza hau betetzen ez duten hautagaiak ezin dira izan materia iluna, detektatu ahal izango genituelako, materia arrunta izango liratekelako.
- Beste materiarekin interakzio grabitatorioa izan behar du. Ikusten da unibertsoan bidaitzen duen argiaren norabidea aldatzen duela. Efektu hau interakzio grabitatorioaren ondorioa da.
- Partikula egonkorak izan behar dira.
- Beste partikulekin duten interakzioak ahula izan behar du.
- LHC-ek oraindik aurkitu ez dituenek, masa handiko partikulak izan behar dira (1 PeV), edo interakzio ahulegia jasaten dute.

Baldintza hauek betetzen dituzten partikulak hautagai idealak izango lirateke, baina existitzen diren hautagaiek ez dituzte baldintza guztiak betetzen, ondoren ikusiko dugun bezala. Hauek dira landuko ditugun hautagaiak: Neutrinoak, WIMP-ak (Weakly Interacting Massive Particle), MACHO-ak (Massive Astrophysical Compact Halo Object) eta axioiak¹.

¹Axioiak partikula hipotetikoak dira. Masa baxua izan behar dutela espero da eta A^0 da bere sinboloa

3.1. Neutrinoak

Neutrinoak eredu estandarreko hautagai bakarrak dira. Interakzio ahula duten partikulak dira, eta kantitate handian sortuak izan ziren Big Bang-ean. Neutrino hauek aske ibiltzen dira unibertsoan zehar eta ezinezkoa da partikula hauek elektromagnetikoki detektatzea. Hau gertatzen da ez dutelako interakzio elektromagnetikorik jasaten. Baina neutrinoekin hainbat arazo sortzen dira.

Lehena, neutrinoak partikula erlatibistak direla da, eta materia ilunak ez-erlatibista izan behar du. Neutrinoa oso azkar mugitzearen eraginez, oso beroak dira, hori dela eta, materia iluna osatuko balute materia ilun beroa izango litzateke. Unibertsoaren bilakaeraren simulazio bat egingo bagenu materia ilun beroarekin, hau behatuko genuke:

Materia iluna beroa izango balitz, lehenik eskala handiko egiturak sortuko liratekeen, eta ondoren eskala txikiagokoak. Aldiz, behaketen arabera, lehenik gasen multzoak sortzen dira, eta ondoren, gas horretatik izarrak sortzen dira, hauek elkartuz, galaxien eraketa gertatzen da, eta ondoren galaxia kumuloak, etab. Honi "top-down" formazioak deritze. Hori honela izanda, materia ilun beroa erabiliz unibertsoak homogeenagoa izan beharko lukeen. Azken portaera hau (top-down), aldiz, materia ilun hotza erabilitako simulazioek betetzen dutela ikusten da, eta beraz bertan behera gelditzen da materia ilun beroaren ideia.

Bigarren arazoa neutrinoen masa da. Neutrinoen masa handiagoa izango balitz posiblea izango litzateke esatea unibertsoan materia ilun guztia osatzeko gai dela, baina gaur egun partikula azeleragailuetan eta kosmologian aurkitu diren neutrinoen ezaugarriekin ezingo litzateke materia ilun guztia osatu.[5]

Arrazoi hauek direla eta, ikusi da neutrinoak ez direla hautagia egokienak materia iluna osatu ahal izateko.

3.2. Masa handiko objektu astrofisiko konpaktuak (MACHO)

Hasieran, materia ilunaren hautagai modura materia barionikoz osatutako gorputz ezagunak erabiltzean pentsatzen hasi ziren. Materia iluna elektromagnetikoki detektatu ezin dela dakigunez, MACHO-ak erradiazio elektromagnetikorik jaurtitzeko ez duten galaxia barruko edozein gorputz astronomiko dira. Adibide bezala zulo beltz barionikoak, nano marroiak, neutroi izarrak ditugu.

MACHO hauen presentzia detektatzeko bi esperimentu garrantzitsu jarri zituzten martxan (MACHO Collaboration [6] eta EROS-2 Survey [7]). Esperimentuen funtsa, gravitational microlensing² neurtzea zen esne-bidean, MACHO motako gorputzak zeudela ziurtatzeko. Hauek dira esperimentu horietan lortutako emaitzak:

²Urrun dauden gorputzen arteko distira aldaketari deritzo, gertuko objektuen interferentziaren eraginez.

- MACHO Collaboration: 5,7 urte luzatu zen esperimentu hau eta 11,9 milioi gorputz astronomiko aztertu ziren, baina neurtu nahi zuten efektua 13-17 gorputzetan bakarrik neurtu zuten.[1]

- EROS-2 Survey: 7 milioi gorputz astronomiko aztertu zituzten, eta horietako bakarrean neurtu zuten gravitational microlensing efektua.[1]

Lortutako emaitza hauek oso garrantzitsuak dira, gertaera gutxi behatu zirenez, esnebidetan MACHO-ek materia ilunaren ehuneko txiki bat bakarrik osatu ahalko luketeelako. Beraz, hemendik lortzen den ondorioa hau da: materia iluna osatzeko behar beste MACHO ez dagoela, eta beraz materia iluna ez dagoela modu horretako materia barionikoz osatuta.

3.3. Interakzio ahula duten masa handiko partikulak (WIMP)

Orain arteko bi hautagaietan, arazo handienetarikoa bat kantitate nahikoa ez egotea izan da materia ilun guztia osatzeko. Hala ere, posible da oraindik aurkitu ez diren beste partikula mota bat sortu izana Big Bang-ean, eta gaur egun materia iluna gutiz osatzeko kantitate nahikoa existitzea. Materia iluna izan daitezkeen partikula hipotetiko hauek WIMP-ak dira. Orokorrean, 1Gev eta 1TeV tarteko masak dituzte [5]. WIMP-ak bezala kontsideratu daitezke, adibidez, oraingoz aurkitu ez diren partikula supersimetrikoak³, neutralinoak, fotinoak, higgsinoak edo sneutrinoak adibidez, bai eta masa handiko edozein neutrino berri.

WIMP-ek materia barionikoarekin elkarrekintza grabitatorioa bakarrik dute, baina oraindik aurkitu gabeko elkarrekintza ahulak izan ditzakete. Ezin dira elektromagnetikoki detektatuak izan, ez dute eta erradiazio elektromagnetikorik jaurtitzen. Ezaugarri hauek guztiekin, WIMP-ak neutrinoaren ezaugarri antzekoak dituztela esan daiteke, baina askoz masa handiagoa dute, eta askoz mantsoagoak direnez ez-erlatibistak dira. Beraz, WIMP-ak materia ilun hotza osatzeko hautagai onak dira.

Aipatu beharra dago MACHO-en eta WIMP-en arteko ezberdintasun handiena dela lehen materia barionikoz osatuta dagoela eta bigarrena materia ez-barionikoz [5]. Aurretik esan dugu materia barionikoak ezin duela materia ilun guztia osatu, zehazki bakarrik galaxien barrukoa osatu dezake MACHO horien bidez. Beraz, orain WIMP-ak dira hautagai egokienak.

³Supersimetriak dioenez, oinarriko partikula bakoitzari partikula supersimetriko bat dagokio. Eredu estandarreko bosoi bakoitzari bikote fermioniko bat dagokio, eta eredu estandarreko fermioi bati bikote bosoniko bat dagokio. Esate baterako, quark (q) fermioiari squark (\tilde{q}) bosoiak dagokio partikula supersimetriko bezala. Partikula supersimetrikoen masa beraien bikoteena baino askoz handiagoa da.

3.4. Axioiak

Axioiak CP arazoaren konponbide modura sortutako eredu batek auresandako partikulak dira, baina ez dira aurkitu oraindik. CP arazoa eredu estandarrak duen arazo handienetariko bat da, eta indar nuklear bortitzeko prozesuetan CP simetriaren⁴ apurketa ez behatzearen arrazoirik eman ahal ez izatean datza. Izatez, indar nuklear bortitzean ez dago arrazoirik CP simetria mantentzeko, baina egin diren behaketa guztietan mantentzen dela ikusi da.

Gertaera honi soluzio bat emateko, kromodinamika kuantikoaren lagrangearrean oinarritu behar gara. [8] liburuko lagrangearreko θ aldagaia bakarrik interesatzen zaigu, CP simetriaren apurketarekin erlazionatuta dagoen parametroa da eta. Hau quark-en masekin lotuta dago, eta aldagai aldaketa bat egiten da:[8]

$$\bar{\theta} = \theta - \arg(m_1, m_2, \dots, m_n) \quad (3.1)$$

$\bar{\theta} \neq 0$ bada, CP simetria apurtzen da. Baina, esan dugun bezala indar bortitzeko prozesuetan ez da CP apurketarik behatzen.

Lehenengo soluzioa quarkaren masarekin lotuta dago. Eredu honetan masa nulua izatea proposatzen da, modu honetan ekuazioetan CP apurketa dakarren terminoa desagertzen da eta. Baina, badakigu quark-en masa ez dela nulua, 3.1. taulan ikusi ditzakegu masak, beraz desagertzea komeni den terminoa ez da desagertzen.

Quarka	Masa
u	$2, 16^{+0,49}_{-0,26} \text{MeV}$
d	$4, 67^{+0,48}_{-0,17} \text{MeV}$
s	93^{+11}_{-5}MeV
c	$1, 27 \pm 0, 02 \text{GeV}$
b	$4, 18^{+0,03}_{-0,02} \text{GeV}$
t	$172, 76 \pm 0, 30 \text{GeV}$

3.1. Taula: Quarken masak.[9]

Eta bigarrena, eredu estandarrak $U_{PQ}(1)$ quasi-simetria globala duela da, eta honi Peccei-Quinn soluzioa deritzo. Eredu honetan, simetria honek kolore anomalia⁵ bat du eta prozesuetan espontaneoki⁶ apurtzen da, eta horren eraginez agertzen da θ parametroaren menpekotasuna lagrangearrean. Apurketa honen eraginez sortzen den partikula izango

⁴CP simetria beste bi simetriren konbinazioa da. Alde batetik, C simetria kargari dagokiona da, eta simetria honen funtsa da unibertsoa berdin deskribatuko zela kargen zeinua aldatuz gero. Eta beste aldetik, P paritate simetria da, hau da, berdina izatea benetako unibertsoa eta ispilu batek proiektatutakoa.

⁵Simetria klasiko bat efektu kuantikoengatik apurtzen denean, anomalia deritzo.

⁶Apurketa bat espontaneo dela esaten da baldintza hauek betetzean: Lehena, oinarritzko egoeraren simetria eta lagrangearrarena bat ez datozenean; eta bigarrena tenperatura jakin bat pasatzean, simetria apurtzen denean eta oreka egoera aldatzen denean. Ondoren, sistemak oinarritzko egoera berritatzat aukera asko izango ditu. Baina horietako bat aukeratu beharko da. Hortik dator apurketa espontaneo, ez baitu kanpoko ezerk eragiten.

litzateke axioia, quasi-Nambu-Goldstone bosoa⁷ izanik.[10]

$$\bar{\theta} = \theta - \arg(m_1, m_2, \dots, m_n) - \frac{a(x)}{f_a} \quad (3.2)$$

non f_a axioi desintegratze konstantea den. Peccei-Quinn soluzioan lagrangearreko CP apurketako θ parametroa eremu dinamiko bat bezala ulertzen da, $a(x)$ axioaren eremua deiturikoa. Beraz, potentzial bat definitu daiteke, minimoa $\bar{\theta} = 0$ duena. Modu honetan CP arazoa zuzentzen da. Azkenik, eremu kuantikoen teoria dela eta, badakigu eremu bakoitzari partikula bat dagokiola, kasu honetan axioia.

Axioiak materia iluna izateko zenbait baldintza betetzen ditu: partikula neutroak, ez-barionikoak, eta ia interakziorik gabekoak dira, aldiz, WIMP-ak ez bezela masa txikikoak izatea espero da (10^{-6} eV ordenekoa), baina beraien kantitatea dela eta ez-erlatibistak dira. Interakzio bakarra grabitatorioa izango litzateke. Arrazoi hauek direla eta, axioiak materia iluna osatzeko WIMP taldetik kanpo dauden hautagai egokiak dira. [10]

⁷Simetria global baten apurketa espontaneotik eratortzen den partikula berriari deritza Nambu-Goldstone bosoa. Orokorrean masagabeak izaten dira, baina kasu honetan $U_{PQ}(1)$ quasi simetria globala dugunez, masaduna izango da.

4. Kapituluua

Kontzeptu astrofisikoak

Hurrengo kapituluetan zenbait kontzeptu astrofisiko agertuko direnez, lehenik eta behin horiek azalduko ditugu kapitulu honetan. Hauek dira azalduko ditugun kontzeptuak:

- Distantziak neurtzeko unitate berri bat.
- Izar baten argitasuna eta distira.
- Objetu astrofisikoen magnitude absolutua eta itxurazko magnitudea.
- Masa dinamikoa.
- Masa-Argitasun proportzioa.
- Argitasun fluktuazioak eta distantzia lortzeko metodoa.
- Galaxia ultra barreiatuak.

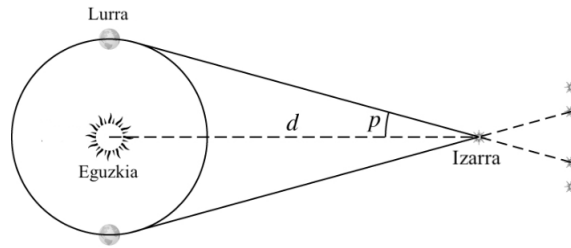
4.1. Distantziak neurtzeko unitate bat: Parsec

Distantzia astrofisikoak oso haundiak dierenez, metroa erabiltzea unitate bezala ez da oso adierazgarria izaten. Distantzia hauek neurtzeko unitate astronomikoa eta argi-urteak erabiltzen diren bezala, "parsec" unitatea ere erabiltzen da. Parsec bat (pc), beraz, distantzia adierazteko unitate bat da. Honela definitzen da bere balioa:

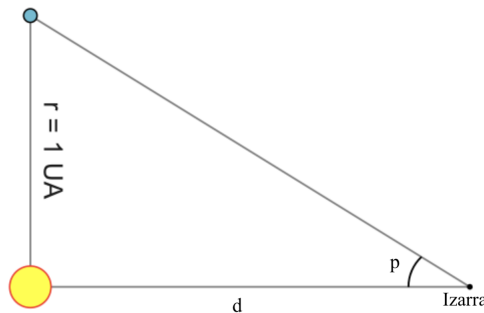
Gertu dagoen izar bat behatzen dugunean, lurreko garaiaren arabera, bere posizioa aldatu egiten da urrun dauden beste izarrekiko. Efektu honi izar-paralaxia deitzen zaio eta [4.1.](#) irudian ikusi dezakegu efektu hori. Izarraren benetako posizioak eta lurretik ikusitako posizio hipotetikoak osatzen duten angeluari paralaxia angelua deitzen zaio. Angelu hau d distantzia lortzeko erabili dezakegu.

[4.1.](#) eta [4.2.](#) irudietan oinarrituz, distantziaren adierazpena idatziko dugu:

$$d = \frac{r}{\tan p} = \frac{1}{\tan p} \text{UA} \quad (4.1)$$



4.1. Irudia: Izar-paralaxia efektua ikusten dugu. Lurrak duen posizioaren arabera izarrak duen posizio hipotetikoa ikusi dezakegu, urrunago dauden izarrekiko.



4.2. Irudia: Triangelu angeluzuzen bat bezela planteatu dezakegu, irudi honetan ikusten den bezala.

Orokorrean p angelua oso txikia izango da, eta beraz $\tan p \approx p$ erabili dezakegu. Horrez gain, definizioz paralaxia arku segundutan neurtzen da, beraz adierazpena segundutara pasatuko dugu $1\text{rad} = 57,295^\circ = 206262,806''$ erabiliz:

$$d \approx \frac{206264,806}{p''} \text{UA} \quad (4.2)$$

Hona iritsi ondoren, parsec-a $p = 1''$ -ko paralaxia-angelua osatzen duen izarraren distantzia bezela definitzen da:

$$1\text{pc} = 2,06264806 \cdot 10^5 \text{UA} = 3,0857 \cdot 10^{16} \text{m}$$

4.2. Distira eta itxurazko magnitudea

Objetu baten distira, objektu horretatik guregana iristen den erradiazio fluxua da, eta F sinboloaren bidez adierazten da. Distira, itxurazko magnitudearekin lotuta dago, non honek lurrean dagoen begirale batek zeruan ikusten duen objektu baten distiraren eskala adierazten duen. Hau m sinboloaren bidez adierazten da. Zenbat eta txikiagoa izan itxurazko magnitude honen balioa, behatutako objektuaren distira zeruan handiagoa izango da. Hau da adierazpen orokorra:

$$m_x = -2,5 \log \frac{F_x}{F_{0,x}} \quad (4.3)$$

non F_x x filtroa erabiliz lortutako distiraren balioa den, eta $F_{0,x}$ berriz, erabilitako filtroaren erreferentziatzko balioa den. (4.3) adierazpena erabiliz, itxurazko magnitudearen eskala egin daiteke. Eskala honetako zeroa Vega izarrari dagokio, eta eguzkia zeruko objektu distiratsuenaren denez balio minimoa dagokio, $m=-26,83$ da. Eskala honetan, orain arteko objektu ilunenei, $m=30$ dagokio.

Demagun bi objektuaren itxurazko magnitudeak eta distiraren balioak (F_1 eta F_2) ditugula:

$$m_1 - m_2 = 2,5 \log \frac{F_1}{F_2}$$

Modu honetan erlazionatu ditzakegu bi objektu ezberdinen distirak eta itxurazko magnitudeak.

4.3. Argitasuna eta magnitude absolutua

Argitasuna objektu batek segunduko norabide guztietan erradiatutako energia da uhin luzera guztietarako. Hau L sinboloaren bidez adierazten da. Ez dira nahastu behar objektu baten distira eta bere argitasuna, nahiz eta erlazionatuta egon. Izar batek irradiatutako energia oztoporik gabe irixten bada r distantziara dagoen behatzaile batengana, honela idatzi dezakegu erlazioa:

$$F = \frac{L}{4\pi r^2} \quad (4.4)$$

Hau ikusi ondoren distira eta argitasunaren ezberdintasuna erraz ikusten dugu. Distira distantziaren araberrako magnitude bat da, eta argitasuna objektu beraren propietate bat da. Adibidez, argitasuna $L_{\odot} = 3,827 \cdot 10^{26} \text{W}$ da eguzkiaren kasuan, baina distira aldatu egingo da espazioan dugun posizioaren arabera.

Magnitude absolutua (M) objektu batek 10pc-eko distantzian, eta hutsean, egonez gero izango zuen itxurazko magnitudea da. Honek, argitasunak bezala, ez dauka distantziarekiko menpekotasunik. Eta itxurazko magnitudeak, aldiz, badauka r -rekiko menpekotasun hori. Beraz, magnitude absolutua argitasuna erabiliz definitu beharko dugu, r -rekiko menpekotasuna kentzeko:

$$M = -2,5 \log \frac{L}{L_0} \quad (4.5)$$

non L_0 konstante bat den, 10pc-ko distantziara gaudenean magnitude absolutua eta itxurazkoa berdina izatea finkatzen duena. $L = L(F)$ moduan ordezkatzuz eta $r = 10\text{pc}$ eginez, magnitude absolutuaren eta itxurazkoaren erlazio batera irixten gara:

$$m - M = 5 \log \frac{d}{10\text{pc}} \quad (4.6)$$

Hemendik eguzkiaren magnitude absolutua lortu dezakegu ($m = -26,83$ erabiliz). Hau da lortzen den balioa: $M_{\odot} = 4,74$. Aurreko atalean bezala bi objeturen magnitudeak baditugu, horietako bat eguzkia izanik:

$$M = M_{\odot} - 2,5 \log \frac{L}{L_{\odot}} \quad (4.7)$$

4.4. Masa dinamikoa

Masa dinamikoa galaxia guztiaren zinematika kontuan hartuz lortzen den masaren balioa da. Planeta baten masa lortzeko bere orbitan duen ibilbidea kontutan hartzen badugu, eta bere mugimendua ausazkoa ez dela suposatuz, $M(r) = V^2 r / G$ adierazpena erabiltzen da (Newton). Aldiz, galaxia oso bateko objetuen ausazko mugimenduak ere kontutan hartzen baditugu, masa dinamikoa da lortzen duguna. Izar masaren eta masa dinamikoaren arteko desberdintasun handiena, bigarrenak materia ilunaren eragina ere sartzen duela da. Masa dinamikoaren balioa idazteko [11] eta [12] artikuluetan oinarrituko gara:

$$\frac{GM_d}{\langle r \rangle} = k_E \frac{\langle v^2 \rangle}{2} \quad (4.8)$$

non G grabitazio konstantea, M_d galaxiaren masa, eta $\langle r \rangle$ sistemaren batazbesteko erradioa diren. Beraz, ekuazioaren ezker aldeak energia potentziala adierazten du. $\langle v^2 \rangle$ sistemaren batazbesteko energia zinetikoren bikoitza masa unitateko da, eta k_E virializazio konstantea da. Azken hau $k_E > 1$ izango da sistema lotuetan, eta $k_E = 2$ sistema virializatueta¹. k_E -ren balioa galaxia bakoitzak bere formazioan galdutako energiaren arabera lortzen da.[11]

Aurreko erradioaren balioa ezin da zuzenean neurtu, eta horregatik ohikoa izaten da k_r koefiziente bat definitzea, orbitaren egituraren informazioa ematen duena, $\langle r \rangle$ zuzenean neurtzen den parametro batekin erlazionatzeko (Θ_r):

$$\langle r \rangle = k_r \Theta_r \quad (4.9)$$

non Θ_r galaxiaren tamainaren eskala ematen digun. Gauza bera gertatzen da $\langle v^2 \rangle$ -rekin, non kasu honetan k_v -k zinematikaren informazioa ematen duen:

$$\langle v^2 \rangle = k_v \Theta_v^2 \quad (4.10)$$

non Θ_v abiaduraren eskalaren informazioa ematen digun. Aurreko (4.9) eta (4.10) ekuazioak erabiliz, M_d -ren adierazpena idatziko dugu:

$$M_d = K \frac{\Theta_v^2 \Theta_r}{G}, \quad K \equiv \frac{k_E}{2} k_v k_r \quad (4.11)$$

¹Grabitate indarraren bidez lotuta dauden eta orekan dauden sistemak, sistema virializatuak direla esaten da, nahiz eta barneko egiturak elkarrekintzan egon. Hau gertatzen da $\langle T \rangle = -\langle V \rangle / 2$ betetzen denean.

Amaitzeko, erabili ditugun parametro neurgarriak errealitateko bi parametroekin erlazionatuko ditugu. Lehen, galaxiak irradiatzen duen fluxu totalaren erdia hartzen duen erradioa da ([13]), honi erradio efektiboa deritzo (R_e). Honek Θ_r -ren papela jokatuko du. Bigarrena, abiadura distribuzioa izango da (σ_e), R_e -ren barnean. Honek Θ_v -ren papela jokatuko du:

$$M_d = K \frac{\sigma_e^2 R_e}{G} \quad (4.12)$$

K -ren balioa konstantea izatera hurbiltzen da, eta [12] artikuluaaren arabera $K = (5, 0 \pm 0, 1)$ da.

4.5. Masa-Argitasun proportzioa

Galaxia bateko izarren masaren eta galaxia honek duen argitasunaren arteko proportzio bat ematen digu. Orokorrean galaxien argitasuna neurtzea errazagoa izaten denez, metodo honen bidez galaxiaren masa lortu dezakegu argitasuna erabiliz. Galaxia bateko izarren masa lortzeko metodoen artean, masa-argitasun proportzioa da lan honetan oinarritu garen artikuluetan erabiltzen dutena, beraz honetan zentratuko gara.

Galaxia bakoitzak bere masa-argitasun proportzioa du, eta idealena galaxia bakoitzean berea erabiltzea izango litzateke. Baina proportzio guztiak oso antzekoak dira, argitasunaren aldaketa eta masarena proportzionalak izaten direlako. Horren eraginez, argitasun baxuko galaxietako masa txikiagoa izango da, eta alderantziz. Horrez gain, ezberdintasunak ez du eraginik galaxiako (edo kumulo globularreko) propietate fisikoetan, eta beraz, masa-argitasun proportzioa kostantetzat hartu dezakegu.[14]

Lan honetan erabiliko dugun masa-argitasun proportzioa [15] eta [16] artikuluetan erabiltzen dena izango da:

$$\left(\frac{M}{L}\right)_{Izar} = (2, 0 \pm 0, 5) \frac{M_\odot}{L_\odot} \quad (4.13)$$

non $M_\odot = 2 \cdot 10^{30}$ kg eguzkiaren masa den eta $L_\odot = 3,827 \cdot 10^{26}$ W aurreko atalean ikusitako eguzkiaren argitasuna. Hurrengo ataletan beraz (4.13) adierazpena erabiliko dugu masaren balioak lortzeko. Aipatu beharra dago [14] artikuluan lantzen dituzten proportzioak kumulo globularren ezaugarriak dituztenentzat direla, eta beraz ezaugarri horiek dituzten galaxiekin erabili ahal dezakegu.

4.6. Galaxietako argitasunaren fluktuazioak eta SBF metodoa

Galaxia baten irudia lortzen dugunean honen argitasunaren balioak neurtzean galaxiaren argitasuna lortu dezakegu. Baina argitasuna ez da konstantea izaten, normalean inguruko beste galaxia edo izar handiek fluktuazioak eragiten dituzte galaxiako argitasunean. Fluktuazio hauek galaxiaren barneko izarren banaketagatik eragindakoak ere izan daitezke.

Argitasun aldaketa hauek galaxiaren talde lokalaren argitasunarekin normalizatzen dira, kanpoko eraginik ez izateko. Galaxiaren iruditik, I_{814} eta g_{475} filtroek² emandako balioak lortzen dira, baina erabiltzen dena bi horien arteko diferentzia izaten da. Bertatik itxurazko magnitudea lortu dezakegu:[17]

$$m_{814} = (30,384 \pm 0,024) + (2,10 \pm 0,33)[(g_{475} - I_{814}) - 1,2] \quad (4.14)$$

non balioak [17] artikuluan egiten den erregresio lineal batetik datozten. Modu honetan jada badugu itxurazko magnitudea, baina distantzia lortzeko (4.6) ekuazioa erabiliz, oraindik magnitude absolutua lortzea falta zaigu. Magnitude absolutua lortu daiteke [17] artikuluko adierazpena erabiliz:

$$M_{814} = (-1,168 \pm 0,013 \pm 0,092) + (1,83 \pm 0,20)[(g_{475} - I_{814}) - 1,2] \quad (4.15)$$

Aurreko adierazpenean balio konstanteak bi errore ditu. Lehena, ohiko kalkulo errorea da, eta bigarrena, artikuluan erabiltzen duten metodoaren errore sistematikoa da. 4.14 eta 4.15 ezagutuz, distantzia lortu dezakegu (4.6) adierazpenaren bidez:

$$d = 10^{\frac{m-M}{5}} \cdot 10\text{pc} \quad (4.16)$$

Modu honetan ikusten dugu argitasunaren fluktuazio hauek galaxia horretara dagoen distantzia lortzeko metodo bezala ere erabili daitezkeela. Metodo honen izena SBF (Surface Brightness Fluctuations) da, eta zehaztasun handienetarikoa ematen duena da. Metodo honek ordea zenbait limite ditu, eta aztertu behar dugun galaxiaren arabera koloreko (irudia lortzeko erabilitako filtroetan) kalibrazio batzuk egin behar dira.

4.7. Galaxia ultra barreiatuak edo UDG

UDG-ak argitasun oso txikia duten galaxiak dira. Argitasun gutxi izatearen arrazoi bat, galaxia hauetan izarrak eratzeko beharrezkoa den gasaren falta da. Galaxia batean izar bat sortu ahal izateko, lehenengo eta behin gasak egon behar du, eta ondoren prozesu astrofisiko baten ondorioz gas hau konprimatzen hasten da, hortik izar bat osatuz. Galaxia hauetan gas falta badago, ez dira izar berriak sortzen, eta beraz galaxia hauetako izar guztiak (edo ia guztiak) izar zaharrak izango dira, argitasun baxukoak.

Datu zehatzak emateko, galaxia bat UDG dela kontsideratzen da bere erradio efektiboa $R_e > 1,5\text{kpc}$ denean (R_e galaxia eliptikoaren ardatz handienean neurtzen da) eta bere gainazaleko argitasuna, g filtroa duen sistema fotometriko³ baterako, $\mu(g, 0) > 24 \text{ mag arcsec}^{-2}$ denean.[13]

²Galaxien irudietan kolorea identifikatzeko filtroak erabiltzen dira. Lan honetan agertzen diren filtroak I_{814} , g_{475} eta V_{606} dira, non indizeek aztertutako uhin-luzera adierazten duten.

³Galaxiaren distira eta argitasuna neurtzeko erabilitako filtroek osatzen duten sistema da.

5. Kapituluua

Materia ilun gabeko galaxiak

Aurretik ikusi ditugu materia ilunaren beharra azaltzen duten zenbait arrazoi. Horiek ikusita, zientzialariek sinesten dute materia ilunaren beharrean. Hala ere, 2018 urtean argitaratutako aurkikuntzaren arabera [15], badirudi materia ilunik ez dela beharrezkoa galaxietako errotazio kurbak azaltzeko orain arte espero genuen bezala. Hau aurkikuntza harrigarria izan zen.

Artikulu horretan, galaxia batean, materia ilunaren beharrik ez dagoelaren aurkikuntza argitaratzen dute. Galaxia berezi horren izena NGC1052-DF2 da, eta NGC1052 galaxia handiago baten parte da, zehazki galaxia handiago horren galaxia satelite bat dela kontsideratzen da. Horren ondoren, urte bete beranduago, bigarren galaxia batean berezitasun bera aurkitu zuten. Bigarren honen izena NGC1052-DF4 da, eta bestea bezala NGC1052 galaxiaren satelite bat da.

Materia ilunik ez duten galaxiekin konparatzeko, beste galaxia baten datuak ikusiko ditugu (esne-bidea). Esne-bidea bezalako galaxietan, non izarren masa $5 \cdot 10^{10} M_{\odot}$ -koaren ingurukoa den, $M_{\text{Halo}}/M_{\text{Izar}} > 30$ baldintza betetzen da. Hau da materia iluna dagoen edo ez ondorioztatzeko erabiltzen den erlazioa.

5.1. NGC1052-DF2

Nahiz eta galaxia hau aspalditik ezaguna izan, bere berezitasunaz orain dela gutxi jabetu dira. Galaxia honen irudia lortzeko behaketan erabilitako sistema fotometrikoa V_{606} eta I_{814} lente optikoei osatutakoa da, eta hauekin lortutako azalera argitasunaren balioa $\mu(V_{606}) = 24,4 \text{ mag arcsec}^{-2}$ da. Horrez gain, erradio baliogarria (ardatz handiarena) $R_e = 2,2 \text{ kpc}$ da. Bi datu horiek konbinatuz ikusten da aurreko ataleko UDG-en baldintzak betetzen dituela, eta beraz, UDG motako galaxia bat dela. Objeto astrofisikoak aztertzean beharrezkoa izango zaigu datu hau ere: bere argitasuna $L_V = 1,1 \cdot 10^8 L_{\odot}$ da. [15]

Gure helburua galaxiaren masa totala lortzea da, eta beste bide batetik lortutako izarren masarekin konparatzea. Modu honetan jakingo dugu masa totaleko zein portzentaia den materia ilunaren ekarpena.

5.1.1. Izarren masa

Masa mota hau galaxia bateko objektu astronomikoek osatutako masa da. Masa hau lortzeko modua aurreko atalean landu duguna da, hau da, masa-argitasun proportzioa. Beraz, (4.13) adierazpena erabiliz, eta datu bezala daukagun argitasuna ($L_V = 1,1 \cdot 10^8 L_\odot$) erabiliz, izarren masaren balioa lortuko dugu:

$$M_{Izar} \approx 2,2 \cdot 10^8 M_\odot \quad (5.1)$$

[15] artikuluan beste metodo baten bidez ere kalkulatu dute izarren masaren balioa, eta $M_{Izar} \approx 1,8 \cdot 10^8 M_\odot$ lortzen dute. Bi balio hauek oso antzekoak dira. Erabiliko dugun balioa bien batazbesteko bat izango da:

$$M_{Izar} \approx 2,0 \cdot 10^8 M_\odot \quad (5.2)$$

Behin izarren masaren balio jakinik, masaren balio horretarako egon beharko litzatekeen materia ilunaren masa lortuko dugu. [15] artikulua arabera, $M_{Izar} = 2 \cdot 10^8 M_\odot$ duen bezalako galaxia batentzat hurrengo hau da materia ilunaren masaren balio teorikoa:

$$M_{Halo} \approx 6 \cdot 10^{10} M_\odot$$

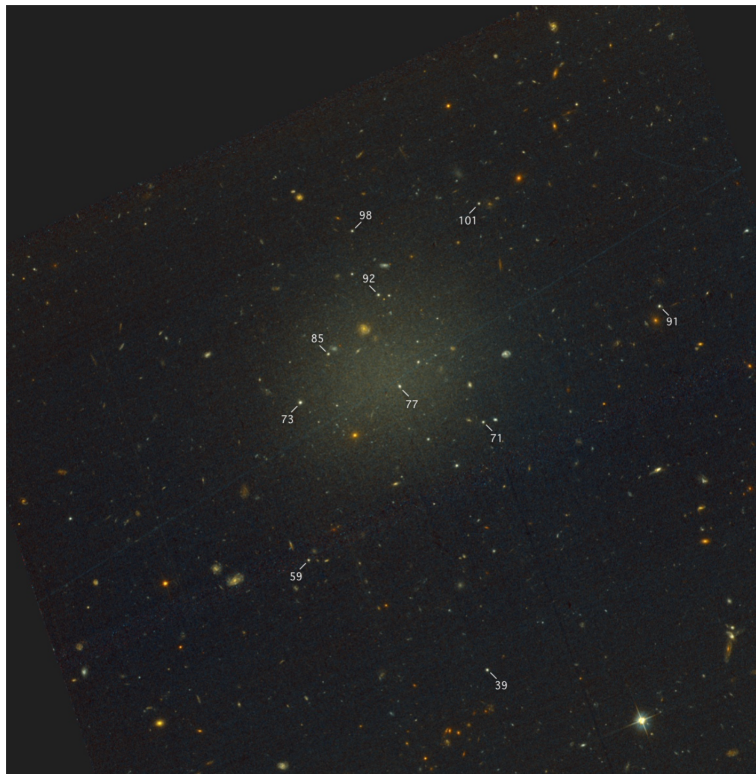
Hau da ohiko kasuetan gertatzen dena. Orain galaxiaren masa totala lortu behar dugu konparaketa egin ahal izateko.

5.1.2. Masa totala

Masa totalaren, hau da, materia ilunaren masa eta izarren masaren batura, balioa lortzeko masa dinamikoa da erabiltzen dena. Hau lortzea aurrekoa baino prozesu konplexuagoa da. Lehenengo eta behin, behaketan ikusten ditugun objektu guztietatik NGC1052-DF2 galaxiaren parte direnak bakarrik identifikatu behar ditugu. Bakarrik 10 objektu betetzen dituzte galaxiaren barruan egoteko argitasunaren, magnitude absolutuaren, eta azkenik abiaduraren baldintzak (5.1. irudian ikusten dira), beste guztiak esne-bideko edo beste gertuko galaxia baten parte izango liratekeen. [15]

Ohartu behar gara behatzen diren objektu hauek ez direla izar bakunak izaten, maiz zenbait izarrek osatutako taldeen argitasunaren nahaste bat izaten dira. Baina masaren kalkuluekin aurrera jarraitu ahal izateko hurbilketa bat egin behar dugu: izarren talde honen ezaugarriak izar batenak bezala erabiliko ditugu, hau da, klusterra izar bat izango balitz bezala erabiliko dugu. Hau ez badugu egiten, lortutako klusterraren argitasuna hau osatzen duten izar guztien artean bereiztu beharko genuke, eta horretarako irudi askoz zehatzagoak beharko genituzke. Hurbilketa hau egiteak emaitzean ez du asko eragiten, erabiltzen dugun argitasuna talde osoarena da eta.

Irudi bertatik (5.1.) lortzen dira beharrezkoak diren beste bi datuak. Galaxiaren kanpo-erradioa (R_{out}) eta erdi-erradioa ($R_{1/2}$). Bata urrunen dagoen objektutik kanpo gelditzen den erradio bat ($R_{out} = 7,6 \text{ kpc}$) eta bestea erdirainoko distantzia ($R_{1/2} = 3,1 \text{ kpc}$). [15] Bi datu hauek ez dute galaxiaren dimentsioa adierazten, masa totala lortzeko erabilitako



5.1. Irudia: NGC1052-DF2 galaxia. Markatuta dauden objektuak dira galaxia honen barruan daudenak.

laginen posizioa baizik. Horregatik ez du zertan $R_{out} = 2 \cdot R_{1/2}$ izan.

Orain erradioen balio bakoitzerako barrutik gelditzen den esparruaren masa totala lortu behar dugu. Honetarako TME metodoa erabiliko dugu (Tracer Mass Estimate), [15] artikuluko pausoak jarraitzeko. Metodo honetan galaxia barruko gorputzen posizioa eta zinatika erabiltzen dira, modu diskretuan. Metodo honek r_i erradioaren barruan dauden masa dinamikoaren goi-limite bat ematen digu. Hau da masaren balioa lortzeko erabiltzen den adierazpena:

$$M_{TME} = \frac{C}{G} \langle v^2 r^\alpha \rangle r_i^{1-\alpha} \quad (5.3)$$

non

$$C = \frac{4\Gamma(\frac{\alpha}{2} + \frac{5}{2})}{\sqrt{\pi}\Gamma(\frac{\alpha}{2} + 1)} \frac{\alpha + \gamma + 1 - 2\beta}{\alpha + 3 - \beta(\alpha + 2)} \quad (5.4)$$

den. (5.3) ekuazioan G grabitazio konstantea eta C orbitaren eszentrikotasunarekin lotutako konstante bat dira, (5.4) adierazpena geroago azalduko dugu. Ikusten dugun bezala metodo hau erabiltzeko beharrezkoak ditugu aztertutako klusterren abiadurak (v) eta beraien posizioa zentrutik neurtuta (r). Batz-bestekotik kanpora ikusten den r_i parametroak galaxiaren tamaina adierazten digu, eta bertan erabiliko ditugu aurretik lortutako $R_{1/2}$ eta R_{out} . α -ren kasua ezberdina da, galaxiaren potentzial grabitatorioarekin lotuta dago eta hiru balio posible ditu eta bakoitzak propietate ezberdinak adierazten ditu:

- $\alpha = 1$ kasuan masa guztia izarretan egongo lizateke, eta orduan, potentziala masa puntual batek sortutakoaren portaera izango luke.

- $\alpha = 0$ kasua errotazio kurba lauak direnei dagokie.

- $\alpha = -1$ kasua erradioaren independentea den eremu grabitatorioari dagokio, eta horren eraginez, indar berdinarekin erakartzen du erradioaren edozein baliotarako.[18]

Masaren balioen kalkuluan α -ren balioa aldatuz masaren balioa aldatzen da. Kasu honetan $\alpha = 0$ erabiliko dugu, baina 1 edo -1 erabiliz masaren balio %10 eta %20 portzentaitan aldatzen da, hurrenez hurren.

Aurretik aipatu dugun C konstantea (5.4), konstante bat izango da prozesu osoan. Γ gamma funtzia da, eta beste bi parametro agertzen dira: γ eta β . Lehen, TMS metodoan erabilitako lagin dentsitatea adierazten du, $\rho(r) \propto r^{-\gamma}$ moduan. Hau indar legea bezala erortzen da, zentrutik urrundu ahala. Bigarrena, Binney-ren parametro anisotropikoa da, orbita mota deskribatzen du, eta $\beta = 1 - \sigma_t^2/\sigma_r^2$ adierazpena du, non σ_t abiadura tangentialaren dispersioa eta σ_r abiadura erradialaren dispersioa diren. Honekin, α -rekin bezala, hiru aukera nagusi ditugu:

- $\beta \rightarrow \infty$ doanean, orbita zirkularra izango da.

- $\beta = 1$ kasuan orbita erradiala izango genuke.

- $\beta = 0$ kasuan abiaduraren dispersio tangentiala eta erradiala berdinak izango dira, eta orbita isotropikoa izango genuke.

Galaxiako orbitak isotropikoak direla suposatuz, $\beta = 0$ erabiliko dugu. Aldiz, $\gamma = 0, 9 \pm 0, 3$ izango dela lortzen da [15] artikuluan.

Behin guztia azalduta hauek dira lortzen diren balioak:

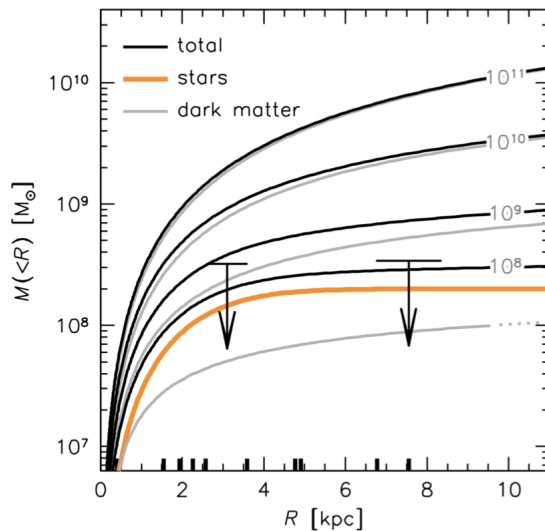
Masa totalak	
$R_{1/2}$	$M_{1/2} < 3, 2 \cdot 10^8 M_{\odot}$
R_{out}	$M_{out} < 3, 4 \cdot 10^8 M_{\odot}$

5.1. Taula: Hemen ikusten ditugu [15] artikuluan lortutako balioak, TME metodoa erabiliz lortuak. α , β edo γ -ren balioak aldatzen baditugu ez du asko eragiten masen balioetan (gehienez %30 aldatzen da). Honelako kalkuluetan magnitude ordena izaten da esanguratsuen, eta hau ez da aldatzen.

5.1. taulako datuak aztertuko ditugu lehenengoz. Badakigu materia ilunak galaxiak inguratzen dituela, galaxiatik kanporaino irixten den disko baten bidez. Hau honela dela dakigu, aurreko atalean (2.3.) azaldutako arazo astrofisikoari soluzio bat emateko modu bakarra da eta. Beraz galaxiaren erdi-erradiotik galaxiatik kanpo dagoen beste espazio baterako tartean lortzen dena baino masa aldaketa handiagoa egon beharko lukeen. **5.1.** taulako datuak erabiliz, diferentzia $M \approx 0, 2 \cdot 10^8 M_{\odot}$ da. Ikusten da diferentzia hori txikiegia dela, eta beraz, espero baino materia ilun gutxiago dagoela galaxia inguratzen.

Baina oraindik gehiago egin dezakegu.

Orain datu guztiak ditugu masa guztiak konparatzeko eta materia ilun kantitatea lortzeko.



5.2. Irudia: Irudi honek masa totala, izarren masa ($M_{Izar} = 2 \cdot 10^8 M_{\odot}$ izanik) eta materia ilunaren (haloen) masaren portaerak erakusten dizkigu. Gezien bidez adierazten da NGC1052-DF2 galaxiaren masaren goi-limitea.

5.2. irudian ikusten dugu masa totalaren balio ezberdinetarako, eta izarren masa fin-ko mantenduz, izango dugun materia ilun kantitatea. Erraz ikusten da gure izarren masa eta masa totalaren balioetarako, materia ilunarentzat leku gutxi gelditzen dela. NGC1052-DF2 galaxiaren kasuan, kalkulatu dugu masa totalaren balio maximoa $M_{totala} < 3,4 \cdot 10^8 M_{\odot}$ da, eta aurreko atalean galaxiako izarren masa lortu dugu ($M_{Izar} \approx 2 \cdot 10^8 M_{\odot}$). Orain erraza da M_{Halo} maximoa lortzea.

$$M_{Totala} = M_{Izar} + M_{Halo} \rightarrow M_{Halo} < 1,4 \cdot 10^8 M_{\odot}$$

Modu honetan lortu dugu galaxiak duen materia ilunaren masa kantitate maximoa kalkulatzeko. Orain materia ilunaren masaren bi balioak konparatuko ditugu:

- Teorikoki egon beharko lukeen materia ilun kantitatea:

$$M_{Halo}^1 \approx 6 \cdot 10^{10} M_{\odot}$$

- Kalkuluetan lortutako materia ilun kantitatea:

$$M_{Halo}^2 < 1,4 \cdot 10^8 M_{\odot}$$

Edozein galaxia tipikotan bi balio hauek oso antzekoak dira, baina NGC1052-DF2 galaxiaren kasuan 400 aldiz txikiagoa da kalkulatu dugun balioa, hasieran teorikoki espero genuenetik. Baita, ikus dezakegu $M_{Halo}/M_{Izar} > 30$ ere ez dela betetzen, bi balioak orden

berdinekoak dira eta.

Honekin ondoriozta dezakegu NGC1052-DF2 galaxia oso eskasa dela materia ilunean, eta hautagai on bat da galaxia barioniko bat izateko.

5.2. NGC1052-DF4

Kapitulu honen sarreran esan dugu oraingoz bi galaxia aurkitu dituztela non materia ilun kantitatea galaxia tipikoak baino askoz txikiagoa dutenak. Lehenik aurkitu zutena aztertu dugu aurreko atalean, eta orain modu laburrago batean NGC1052-DF4 galaxiaren ideia orokorrak ikusiko ditugu.

Aurreko galaxiarekin eginiko prozesu bera jarraitu behar dugu, lehenik eta behin izarren masa lortuz, eta ondoren, masa totalarekin konparatuz. Masa totala lortzeko aurrekoan erabilitako eredu erabiliko dugu (TME).

Galaxia honi buruz ezaguna dugu bere magnitude absolutua: $M = -15,0 \pm 0,1$. Beraz, magnitude absolutuaren eta argitasunaren erlazioa (4.7) erabiliz argitasuna lortu dezakegu.

$$M = -15,0 \pm 0,1 \rightarrow L = (7,7 \pm 0,8) \cdot 10^7 L_{\odot}$$

Argitasuna ezagutzen dugularik, erraza da argitasun hori sortu duten objektuen masa lortzea, hau da izarren masa lortzea (4.13) adierazpena erabiliz.

$$M_{Izar} = (1,5 \pm 0,4) \cdot 10^8 M_{\odot}$$

Orain masa totala lortu behar dugu, eta horretarako galaxiaren barruan dauden objektuak identifikatu behar dira, aurreko galaxiarekin bezala. Bereizpen hori eginda, 7 objektu bakarrik daude galaxia horren barruan egoteko baldintzak betetzen dituztenak, eta beraz beraien posizioak eta sakabanaketa abiadurak hartuko ditugu kontutan.[16]

Hau da [16] artikuluan lortzen den masaren balioa, aurreko metodo berdina erabiliz:

$$M_{TME} = 0,4_{-0,3}^{+1,2} \cdot 10^8 M_{\odot}$$

Balio honi begiratuz, eta izarren masa totala $M_{Izar} = (1,5 \pm 0,4) \cdot 10^8 M_{\odot}$ dela jakinez, galaxia honen materia ilun kantitatea ere oso txikia dela ondorioztatzen dugu.

6. Kapituluia

Beste ikuspuntu bat

Aurretik esan dugu NGC1052-DF2 eta NGC1052-DF4 galaxiek materia ilunaren beharrik ez dutela, eta ondorio horretara iristeko beraien errotazio abiaduretan eta masen erlazioan oinarritu gara. Hala eta guztiz ere, beste talde batek galaxia hauek berriro aztertu ditu, eta ondorio honetara iritsi dira: [15] eta [16] artikuluetan ematen den NGC1052-DF2 eta NGC1052-DF4 galaxietarako distantziak ez dituzte ontzat ematen.

Distantzien neurketa oso garrantzitsua da edozein kalkulo astrofisiko egin ahal izateko. Magnitude honen kalkuluan akatsen bat eginez gero, galaxiaren masaren kalkuluan ere akats bat egongo da, esate baterako. Artikulu horietan SBF (Surface Brightness Fluctuation) metodoa erabiltzen da galaxietarako distantziak neurtzeko, [17] artikuluan ematen den kalibrazioa eginez. Hau, ordea, egokia da bakarrik masa handiko galaxia gorrientzako, eta beraz, ez du balio masa baxukoetarako eta kolore urdinekoentzat. Gainera, [19] artikuluan ohartarazten gaituzte metodo hau ez dela fidagarria NGC1052-DF2 moduko galaxietan erabiltzeko (bere kolorea eta izarren masagatik). [20]

Metodo hau erabiltzeko kalibrazio egokiak egin behar dira, aztertzen ari garen objektura egokitzeko. Beraz, bi galaxiak berriro aztertzean, beste metodo bat erabiltzen dute. Baina lehenik eta behin, beste artikuluetan eginiko akatsak aurkezten dituzte:

[21] artikuluaaren arabera, hauek dira distantziaren kalkuluan egin ziren akatsak:

- Lehenik eta behin, galaxiako kolorearen transformazio ezegoki bat erabiltzen da.

$$g_{475} = I_{814} + 1,852(V_{606} - I_{814}) + 0,096 \quad (6.1)$$

Modu honetan neurtutako balioa $V_{606} - I_{814} = 0,37 \pm 0,05$ da, eta bertatik $g_{475} - I_{814} = 0,78 \pm 0,05$ lortzen da. Hemendik lortzen den itxurazko magnitudearen balioa, (4.14) adierazpena erabiliz, $m_{814} = 29,45 \pm 0,10$ da.

- Bigarrenik, esan dugu SBF metodoa erabili aurretik kalibrazio prozesu bat egin behar dela. Hori da [15] artikuluan egiten dena, baina aplikatzen den kalibrazioa, esan dugun bezala, [17] artikulukoa da. Baina modu hau baliogarria da bakarrik $1,06 \leq g_{475} - I_{814} \leq 1,32$ tarteko balioetarako, eta ez da galaxia hauen kasua. Kalibrazio honekin lortzen diren magnitude absolutuak $-1,4 \leq M \leq -0,8$ tartearen barruan egoten dira, baina $M_{814} = -1,94$

balioa da lortzen dena. [15] eta [16] artikuluetan emaitza extrapolatzen dute, lortzen diren balioetatik, eta akats honek lortutako distantziaren balioa $\sim 4,5\text{Mpc}$ handiagotzen du.

Aurreko paragrafoetako m eta M balioak erabiltzen baditugu (4.16) ekuazioan sartzeko, [15] artikuluko $D = 19,0 \pm 1,7\text{Mpc}$ balioa lortzen da.

NGC1052-DF2 galaxiaraino dagoen distantzia aurreko paragrafokoa dela suposatzen badugu, galaxia horren argitasuna, bere moduko besteena baina handiagoa da. Hori argiago ikusten da magnitude absolutuak aztertzean, $M_{V,606} = -9,1$ da lortzen den balioa, baina bere moduko klusterren ohiko balioa $M_V = -7,5$ izaten da. Ezaugarri hauek galaxiaren distantziarekin daude zuzenean lotuta. Beraz, galaxia honen ezaugarriak arraroak dira, alde batetik, materia ilunik ez duelako, eta bestetik, ez duelako bere moduko galaxien ezaugarriarik, argitasunarekin erlazionatuta.

Bigarrengo azterketa honetan, distantzia zehatza kalkulatu aurretik, distantziaren estimazio bat egiten dute. Distantziaren balioa lortzeko baldintza NGC1052-DF2 galaxia bereziaren ezaugarriak beraren modukoak diren besteen berdinak izatea da, hau da, galaxiaren berezitasunak desagertzeko egon beharko lukeen distantzia estimatzen dute. Ikusten dute galaxia hau hasieran espero baino gertuago egongo balitz, hasierako distantzia erdira, adibidez, honen izarren masa txikiagotu egiten dela [21]. Estimazio honekin, NGC1052-DF2 galaxiak, bere moduko beste galaxia taldeetako ezaugarri berdinak izango lituzke.

Ondoren distantziaren neurketa egiten dute, baina TRGB¹ metodoa jarraituz. Honek erraldoi gorrien fase amaiera adierazten du. Metodo hau jarraituz lortzen da, [21] artikuluan, distantziaren balio berria. Honen ondorioz, NGC1052-DF2 galaxia hasieran espero zena baino 6Mpc gertuago dago, hau da, $D \approx 13\text{Mpc}$. Balio honekin, aurretik egindako kalkuluak berriro egiten dituzte (izarren masa, masa totala...) materia ilunaren falta zuzendu den ikusteko. Horretarako, erradio efektiboaren balio berria behar dugu ($R_e = 1,4 \pm 0,1\text{kpc}$). Hauek dira lortzen diren balioak:

$$M_{Izar} = (6,0 \pm 3,6) \times 10^7 M_{\odot}$$

$$M_{Totala} \geq 10^9 M_{\odot}$$

Bi balio hauek konbinatuz, ikusten dugu kasu honetan materia ilunaren ekarpenak garrantzi handiagoa duela, eta ezin dugula esan NGC1052-DF2 galaxia materia ilunik gabeko galaxia bat denik. Azkenik, aurreko kapituluetan aipatutako baldintza garrantzitsu bat ere konpontzen dela ikusten da:

$$\frac{M_{Halo}}{M_{Izar}} > 20$$

Amaitzeko, NGC1052-DF4 galaxiarekin gertatzen dena azalduko dugu. Beste galaxiarekin jarraitutako prozesu bera jarraituz, galaxiaren magnitude absolutua eta itxurazko

¹The Red Giant Branch

magnitudea lortzen dira: [20]

$$(m - M) = 30,76 \pm 0,10$$

Badakigu, (4.6) ekuazioagatik, magnitudeen arteko erlaziotik, galaxiaren distantzia lortu dezakegula:

$$D = 14,2 \pm 0,7 \text{Mpc}$$

Beraz, ikusten dugu, bigarren galaxia ere, hasieran espero genuena baino gertuago dagoela, 6Mpc gertuago. Eta horren eraginez, hasieran sortutako berezitasun guztiak konpon-tzen dira, eta aurrekoak bezala, beste ohiko galaxien ezaugarri berdinak izatera igarotzen da.

7. Kapituluua

Ondorioa

Lanaren lehenengo atalean materia ilunaren existentziaren ebidentziak ematen ditugu, bai eta hau osatzeko historian zehar egon diren hautagaiak ere; eta bigarrengean, materia ilunaren existentziaren beharra, galaxia guztietan, zalantzan jartzen dugu. Honekin guztiarekin hainbat ondorio atera ditzakegu. Alde batetik, materia iluna guztiz beharrezkoa dela ikusten dugu, galaxietako orbiten abiadurak, CMB-ek eta BBN-ek ondorio horretara eramaten gaituztelako. Eta bestetik, zientziaren historian asko landua izan dela materia ilunaren arloa ikusten dugu, zientzialariek materia ilunaren beharra ikusten dutelako, hau osatzeko aurkitu diren hautagai guztiak dira honen adibide. Hala eta guztiz ere, galaxien errotazio abiaduren arazoak badu beste soluzio bat, MOND eredia. Eredu honetan ez dago materia ilunaren eta energia ilunaren beharrik. Hau ordea oso polemikoa da.

Orain arteko guztiarekin, orokorrean, adostasuna dago. Benetako ustekabekoa 2018an etorri zen, [15] artikuluan lehenengo eta [16]-an ondoren, materia ilunaren existentziaren beharrik ez zuten bi galaxia aurkitu ziztuztenean. Hau ikustean zalantzan jartzen da ordura arte materia ilunari buruz aztertutako guztia, eta zenbait galdera etortzen dira: Zergatik gertatzen da hori galaxia horietan?, zer ezberdintasun dute besteekin?, nola sortu ziren galaxia hauek? etb. Aurkikuntza honek MOND eredia ere bertan behera uzten du, galaxia hauetan ez da eta behatzen abiadura konstante mantentzen dela galaxiaren zentrutik urrundu ahala.

Oso arraroa da hasaieran beste edozein kluster globularren ezaugarriak dituen galaxia satelite batean honelako desberdintasun bitxia egotea besteekiko. Ez da tamainan dagoen ezberdintasun txiki bat, edo argitasunean dagoena, ez eta desberdintasun bat kalkuluen errorei dagokiona. Materia ilunaren beharrik ez dutela ondorioztatzea oso drastikoa da, eta oso garrantzitsua da astrofisikarako eta unibertsoaren inguruan dugun ezagutzarako. Materia ilunaren eta energia ilunaren existentzia oso barneratuta dago guztiongan, eta beraz, errazagoa da sinestea akats bat dagoela kalkuluetan eta ez materia ilunaren beharrik ez dutela. Akatsaren teoriak indarra hartzen du [15] artikulua ondoren [21] artikulua argitaratzen denean.

Bi iritzi garrantzitsuenak lan honetan aipatutakoak dira, bata [15] eta [16] artikuluetakoa, hots, berezitasunaren aurkikuntza argitaratu zuten taldearena, eta bestea, [21] eta [20] artikuluetako taldearena. Azken hauek distantziaren kalkuluko akats bat dagoela diotenak dira. Hauek diote, distantziak kalkulatzeko metodoa ez dela egokia modu horretako galaxientzat eta, horrez gain, gaizki kalibratu zutela. Esanda bezala, indarra hartzen

hasten da akats bat izan delaren ideia.

Eztabaida hau irekita dago oraindik, eta horrela jarraituko du denbora batean. Beste talde batzuek ere probak egin beharko dituzte, eta emaitzak konparatu, amaieran ondorio bat ateratzeko. Modu honetan bakarrik lortuko da galaxia horiei buruzko informazio zuzena. Materia iluna oso garrantzitsua da unibertso gertaera asko azaltzeko, horren ondorioz beharrezkoa da eztabaida hau ixtea, eta berezitasun honi buruzko egia jakitea.

Erreferentziak

- [1] K. Garrett and G. Dūda, “Dark Matter: A Primer”, *Advances in Astronomy*, vol. 2011, 968283, p. 968 283, Jan. 2011. DOI: [10.1155/2011/968283](https://doi.org/10.1155/2011/968283). arXiv: [1006.2483](https://arxiv.org/abs/1006.2483) [hep-ph].
- [2] A. Dar, “Baryonic Dark Matter and Big Bang Nucleosynthesis”,, vol. 449, p. 550, Aug. 1995. DOI: [10.1086/176078](https://doi.org/10.1086/176078). arXiv: [astro-ph/9504082](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9504082) [astro-ph].
- [3] F. I. Cooperstock and S. Tieu, “Galactic Dynamics via General Relativity: a Compilation and New Developments”, *International Journal of Modern Physics A*, vol. 22, no. 13, pp. 2293–2325, May 2007. DOI: [10.1142/S0217751X0703666X](https://doi.org/10.1142/S0217751X0703666X). arXiv: [astro-ph/0610370](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0610370) [astro-ph].
- [4] E. V. Karukes, P. Salucci, and G. Gentile, “The dark matter distribution in the spiral NGC 3198 out to 0.22 R_{vir} ”,, vol. 578, A13, A13, Jun. 2015. DOI: [10.1051/0004-6361/201425339](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201425339). arXiv: [1503.04049](https://arxiv.org/abs/1503.04049) [astro-ph.GA].
- [5] K. Griest, “WIMPs and MACHOs”, in *Encyclopedia of Astronomy and Astrophysics*, P. Murdin, Ed. 2002, E2634. DOI: [10.1888/0333750888/2634](https://doi.org/10.1888/0333750888/2634).
- [6] T. M. Project, *THE MACHO COLLABORATION*, Last updated: 2012 Feb 22. [Online]. Available: <http://wwwmacho.anu.edu.au/>.
- [7] EROS, *EROS EXPERIMENT*, Updated : 07th september 2006. [Online]. Available: <http://eros.in2p3.fr/>.
- [8] G. Bertone, *Particle Dark Matter*, ser. Observations, Models and Searches. Cambridge University Press, 2010, ISBN: 978-0521763684.
- [9] P. Z. et al., *Particle Data Group*, Updated : 2020. [Online]. Available: <http://pdg.lbl.gov/2020/tables/rpp2020-sum-quarks.pdf>.
- [10] L. D. Duffy and K. van Bibber, “Axions as dark matter particles”, *New Journal of Physics*, vol. 11, no. 10, 105008, p. 105 008, Oct. 2009. DOI: [10.1088/1367-2630/11/10/105008](https://doi.org/10.1088/1367-2630/11/10/105008). arXiv: [0904.3346](https://arxiv.org/abs/0904.3346) [hep-ph].
- [11] S. Djorgovski, R. de Carvalho, and M. .-.S. Han, “Hubble’s The Universality(?) of Distance-Indicator R” , in *The Extragalactic Distance Scale*, S. van den Bergh and C. J. Pritchett, Eds., ser. Astronomical Society of the Pacific Conference Series, vol. 4, Jan. 1988, p. 329.
- [12] L. Peralta de Arriba, M. Balcells, J. Falcón-Barroso, and I. Trujillo, “The discrepancy between dynamical and stellar masses in massive compact galaxies traces non-homology”,, vol. 440, no. 2, pp. 1634–1648, May 2014. DOI: [10.1093/mnras/stu317](https://doi.org/10.1093/mnras/stu317). arXiv: [1307.4376](https://arxiv.org/abs/1307.4376) [astro-ph.GA].
- [13] N. Chamba, I. Trujillo, and J. H. Knapen, “Are ultra-diffuse galaxies Milky Way-sized?”,, vol. 633, L3, p. L3, Jan. 2020. DOI: [10.1051/0004-6361/201936821](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201936821). arXiv: [2001.02691](https://arxiv.org/abs/2001.02691) [astro-ph.GA].

- [14] D. E. McLaughlin and R. P. van der Marel, “Resolved Massive Star Clusters in the Milky Way and Its Satellites: Brightness Profiles and a Catalog of Fundamental Parameters”, vol. 161, no. 2, pp. 304–360, Dec. 2005. DOI: [10.1086/497429](https://doi.org/10.1086/497429). arXiv: [astro-ph/0605132](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0605132) [[astro-ph](#)].
- [15] P. van Dokkum, S. Danieli, Y. Cohen, A. Merritt, A. J. Romanowsky, R. Abraham, J. Brodie, C. Conroy, D. Lokhorst, L. Mowla, E. O’Sullivan, and J. Zhang, “A galaxy lacking dark matter”, vol. 555, no. 7698, pp. 629–632, Mar. 2018. DOI: [10.1038/nature25767](https://doi.org/10.1038/nature25767). arXiv: [1803.10237](https://arxiv.org/abs/1803.10237) [[astro-ph.GA](#)].
- [16] P. van Dokkum, S. Danieli, R. Abraham, C. Conroy, and A. J. Romanowsky, “A Second Galaxy Missing Dark Matter in the NGC 1052 Group”, vol. 874, no. 1, L5, p. L5, Mar. 2019. DOI: [10.3847/2041-8213/ab0d92](https://doi.org/10.3847/2041-8213/ab0d92). arXiv: [1901.05973](https://arxiv.org/abs/1901.05973) [[astro-ph.GA](#)].
- [17] J. P. Blakeslee, M. Cantiello, S. Mei, P. Côté, R. Barber DeGraaff, L. Ferrarese, A. Jordán, E. W. Peng, J. L. Tonry, and G. Worthey, “Surface Brightness Fluctuations in the Hubble Space Telescope ACS/WFC F814W Bandpass and an Update on Galaxy Distances”, vol. 724, no. 1, pp. 657–668, Nov. 2010. DOI: [10.1088/0004-637X/724/1/657](https://doi.org/10.1088/0004-637X/724/1/657). arXiv: [1009.3270](https://arxiv.org/abs/1009.3270) [[astro-ph.CO](#)].
- [18] L. L. Watkins, N. W. Evans, and J. H. An, “The masses of the Milky Way and Andromeda galaxies”, vol. 406, no. 1, pp. 264–278, Jul. 2010. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2010.16708.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2010.16708.x). arXiv: [1002.4565](https://arxiv.org/abs/1002.4565) [[astro-ph.GA](#)].
- [19] J. P. Blakeslee and M. Cantiello, “Independent Analysis of the Distance to NGC 1052-DF2”, *Research Notes of the American Astronomical Society*, vol. 2, no. 3, 146, p. 146, Aug. 2018. DOI: [10.3847/2515-5172/aad90e](https://doi.org/10.3847/2515-5172/aad90e). arXiv: [1808.02176](https://arxiv.org/abs/1808.02176) [[astro-ph.GA](#)].
- [20] M. Monelli and I. Trujillo, “The TRGB Distance to the Second Galaxy “Missing Dark Matter”: Evidence for Two Groups of Galaxies at 13.5 and 19 Mpc in the Line of Sight of NGC 1052”, vol. 880, no. 1, L11, p. L11, Jul. 2019. DOI: [10.3847/2041-8213/ab2fd2](https://doi.org/10.3847/2041-8213/ab2fd2). arXiv: [1907.03761](https://arxiv.org/abs/1907.03761) [[astro-ph.GA](#)].
- [21] I. Trujillo, M. A. Beasley, A. Borlaff, E. R. Carrasco, A. Di Cintio, M. Filho, M. Monelli, M. Montes, J. Román, T. Ruiz-Lara, J. Sánchez Almeida, D. Valls-Gabaud, and A. Vazdekis, “A distance of 13 Mpc resolves the claimed anomalies of the galaxy lacking dark matter”, vol. 486, no. 1, pp. 1192–1219, Jun. 2019. DOI: [10.1093/mnras/stz771](https://doi.org/10.1093/mnras/stz771). arXiv: [1806.10141](https://arxiv.org/abs/1806.10141) [[astro-ph.GA](#)].