

Ա. Ի. ԱԼԻԽԱՆՅԱՆԻ ԱՆՎԱՆ ԱԶԳԱՅԻՆ ԳԻՏԱԿԱՆ ԼԱԲՈՐԱՏՈՐԻԱ
(ԵՐԵՎԱՆԻ ՖԻԶԻԿԱՅԻ ԻՆՍՏԻՏՈՒՏ)

Ամեխյան Արմինե Սուրիկի

ՄՈՒԹ ՆՅՈՒԹԸ և ԳԱԼԱԿՏԻԿԱԿԱՆ ՀԱԼՈՆԵՐԸ

Ա.04.02 - «Տեսական ֆիզիկա» մասնագիտությամբ ֆիզիկամաթեմատիկական
գիտությունների թեկնածուի գիտական աստիճանի հայցման
ատենախոսության

ՍԵՂՄԱԳԻՐ

ԵՐԵՎԱՆ – 2020

A.I..ALIKHANYAN NATIONAL SCIENCE
LABORATORY (YEREVAN PHYSICS INSTITUTE)

Amekhyan Armine

DARK MATTER AND GALACTIC HALOS

SYNOPSIS

of Dissertation in 01.04.02 – Theoretical Physics presented for the degree of
candidate in physical and mathematical sciences

YEREVAN - 2020

Ատենախոսության թեման հաստատվել է Ա. Ի. Ալիխանյանի անվան Ազգային
Գիտական Լաբորատորիայի (ԵրՖի) գիտական խորհուրդում:
Գիտական ղեկավար՝

Ֆիզ.մաթ. գիտ. դոկտոր, պրոֆեսոր Կ. Գուրզադյան (ԱԱԳԼ)

Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝

Ֆիզ.մաթ. գիտ. դոկտոր, պրոֆեսոր Ա. Սեդրակյան (ԱԱԳԼ)

Ֆիզ.մաթ. գիտ. թեկնածու Յ. Խաչատրյան (ԱԱԳԼ)

Առաջատար կազմակերպություն՝ Կելդիշի անվ. կիրառական մաթեմատիկայի
ինստիտուտ, Մոսկվա

Պաշտպանությունը կայանալու է 2020 թ. մայիսի 5-ին ժամը 14-ին, ԱԱԳԼ-ում
գործող ԲՈՅ-ի 024 «Ֆիզիկայի» մասնագիտական խորհրդում (Երևան - 0036,
Ալիխանյան եղբայրների փ. 2):

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ԱԱԳԼ-ի գրադարանում:

Սեղմագիրն առաքված է 2020 թ. մարտի 5-ին:

Մասնագիտական խորհրդի գիտական քարտուղար՝

Ֆիզ.մաթ գիտ. դոկտոր Յ. Սարուբյան

The subject of the dissertation is approved by the scientific council of the
A. Alikhanyan National Science Laboratory (AANL).

Scientific advisor:

Doctor of ph-math sciences, professor V. Gurzadyan (AANL)

Official opponents:

Doctor of ph-math sciences, professor A. Sedrakyan (AANL)

Candidate of ph-math sciences H. Khachatryan (AANL)

Leading organization: Keldysh Institute of Applied Mathematics, Moscow

Defense will take place on 5th of May at 14:00 on meeting of the special council of
the Higher Attestation Commission of RA 024 "Physics" , acting in A.Alikhanyan
National science Laboratory (Yerevan-0036, st. Alikhanyan Brothers 2).

The dissertation is available at the AANL library.

The synopsis is sent out on 05.03.2020.

Scientific secretary of the special council

Doctor of ph-math sciences H.Marukyan

Abstract

The dark matter (DM) problem is one of the unresolved problems of modern cosmology. The existence of DM is indicated particularly through “flat” rotation curves of the galaxies and the galactic halos are considered to be the regions containing dark matter. Even without having any knowledge about DM composition a number of studies of halos are undertaken including via extensive numerical simulations with comparison of the resulting density profiles with the observational data. In this study we use three DM distribution profiles: NFW, Moore and Burkert and the Cosmic Microwave Background (CMB) radiation latest data obtained by *Planck* satellite. CMB, which fills the entire Universe from the last scattering surface, appears as a useful tool to study the galactic halos. We analyze *Planck*'s CMB temperature maps for four nearby edge-on galaxies, M31, M104, M82, M81, to large galactocentric distances, i.e. up to the halos. The frequency independent microwave temperature asymmetry is revealed which is rotation-oriented, therefore, is of Doppler origin. The existence of asymmetry is associated with the presence of interstellar medium (molecular clouds, HII regions, hot gas and dust) at large galactic distances. In this work we have used two interstellar thermal dust models, i.e. DL07 and GNILC, and the large galactocentric distances i.e. in galactic halos, the CMB radiation asymmetry (ΔT), the optical depth (τ) and rotation velocity of the interstellar thermal dust. Dark matter distribution profiles obtained via numerical simulations and describing the flat rotation curves of galaxies we have used to obtain the dust radial velocities and then have revealed the contribution of the emission of interstellar dust in the galactic halos. In order to obtain the optical depth for any galactocentric radii, we have used modified blackbody (MBB) spectrum formula for two dust models and three frequencies (857 GHz, 545 GHz and 353 GHz). The necessary parameters (temperature, flux density, spectral index) we calculated from *Planck* satellite microwave maps, at each frequency separately. As a result, we have obtained the dust radial velocities for two models (DL07 and GNILC) and three high frequencies. At the highest frequency, (857 GHz), where we have highest values of flux density, the radial velocities are extremely low (0.950-3.35 km/s) for all three galaxies. DM radial velocities are approximately 150-200 km/s, varying individually for given DM profile and galaxy. At the 545 GHz and 353 GHz frequencies the dust radial velocities vary within 80-650km/s, however at these frequencies the registered flux density is significantly low. The obtained halo parameters are also analysed within the modified gravity models, including the weak-field General Relativity involving the cosmological constant.

Timeliness and relevance

It is now a known fact, that the DM density of the Universe is significantly higher than the baryonic matter density. Many studies and hypotheses are suggested regarding the nature of the DM, however it still remains unknown. The understanding whether DM consists of exotic particles or baryonic matter, (such as MACHOs or interstellar matter components) or it is consequence of modified gravity is among key issues of the modern cosmology. Galactic halos are, on the one hand, the least studied sub-structures of galaxies, and, on the other hand, are of particular importance for the understanding of the large-scale structure formation. First, the parameters of galactic halos are sensitive to the non-Gaussianity in the primordial cosmological perturbation spectrum, second, halos determine the properties of the disks and the spheroidal structures of galaxies. Since DM is interacting with usual (luminous) matter only via gravity, it is difficult to obtain any indirect observational data about its properties. From this point of view the CMB data can contain information about dark halo rotation or possible baryonic content, as investigated in this work. The new generation of CMB measurements, such as the *Planck* mission having high sensitivity and powerful data processing opportunities, which we use in our study, and which allows us to explore not only CMB temperature asymmetry for given galactic configuration, but also interstellar medium's components, such as the interstellar thermal dust, on the large galactocentric distances, including dark halos. Besides the intensely studied particle models for DM halos, that problem is studied also within the modified gravity models. In our study we have used also a modified gravity model of weak-field General Relativity.

Aim of the dissertation

- To calculate the CMB radiation temperature asymmetry along large axes for 4 edge-on galaxies and at 70-857 GHz frequency bands.
- To estimate interstellar dust radial velocities through CMB asymmetry data for the galaxies.
- To reveal the contribution of the thermal dust in the galactic dark halos.

- To investigate the modified gravity with weak-field cosmological constant in the presence of the thermal dust.

Novelty of the work

In the framework of this study we obtain new results on the CMB temperature asymmetry for nearby four galaxies and interstellar dust optical depth and orbital velocities are derived at the large galactocentric distances. The role of dust is revealed in the galactic halo dynamics.

Practical value

- For M81 galaxy, it has been obtained CMB temperature asymmetry of 50-70 μK and up to 1.5° galactocentric distances, over 70-217 GHz frequencies band.
- For M104 galaxy, it has been calculated CMB temperature asymmetry on four radial distances: 0.2° , 0.4° , 0.6° and 1.0° . The north-south temperature asymmetry increases from 25 μK up to 65 μK .
- For M81, M82 and M31 galaxies, it has been obtained temperature asymmetry data at three high frequencies 353-857 GHz.
- In the all cases the temperature asymmetry is frequency independent and rotation-oriented, which reveal the Doppler nature of the asymmetry.
- It has been calculated optical depth of the interstellar dust on the large radii. In the all cases the optical depth decreases within large radii.
- We calculate radial velocities of the interstellar thermal dust with two dust models and three high frequencies.
- The role of interstellar thermal dust is revealed in the galactic halos.

Main points to defend

We study CMB *Planck* mission temperature maps for two edge-on galaxies: M81 and M104. We show, that the registered temperature asymmetry is due to Doppler shifting and the asymmetry is extended from galactic disks up to halos. The reason of the asymmetry is analysed for different interstellar medium's components, including the thermal dust, evaluating its optical depth and other characteristics. Namely, we use two interstellar dust models, DL07 and GNILC, both described by modified blackbody spectrum and then calculate the optical depth for both dust models at given frequency. For M31, M81, M82 galaxies we obtain the dust rotational velocities, then estimate the masses of dust for both models and three frequencies. Thus, we reveal the role of the dust in galactic halos, also within modified gravity models.

Structure of the dissertation

The dissertation consists of the introduction, three chapters, conclusion. The list of used literature, includes figures.

Content of the dissertation

In **introduction** we briefly discuss the dark matter (DM) problem, its possible role of the matter structure formation process. The structure formation process, starting from linear scalar perturbations, is continued also in the non-linear regime, which leads to formation of the first gravitationally bound structures. It is possible to obtain DM spatial distribution and velocity profiles via numerical simulations. In this study we use three DM distribution profiles, Navarro-Frenk-White (NFW), Burkert and Moore. In these simulations are considered particles evolution, during which the overdense regions are formed due to gravitational collapse, as expected by the structure formation process. We also discuss the modified gravity models, which are aimed to describe the galactic rotation curves.

In the **first** chapter we describe the main physical mechanisms for the Cosmic Microwave Background (CMB) anisotropies which are important at the analysis of the CMB *Planck* maps in the next chapters. The Sachs–Wolfe effect is responsible for large-scale CMB anisotropy and can be expressed as

$$\left(\frac{\Delta T}{T}\right)_{SW} = v \times e|_o^e - \phi|_o^e + \frac{1}{2} \int_o^e h_{\nu\sigma,0} n^\nu n^\sigma d\xi,$$

where the first term is due to the Doppler shifting, the second term is referred to gravitational redshifting due to potential perturbations and the last term is due to the integrated Sachs-Wolfe (ISW) effect.

There is also a secondary CMB anisotropy, the Sunyaev-Zeldovich (SZ) effect, which is due to the small angular distortions of the CMB spectrum arisen from inverse Compton scattering of CMB photons on high energy electrons and occurs at the inter-cluster medium (ICM) of galaxy clusters. Small scale distortions of the CMB spectrum is expressed as the ratio of CMB temperature fluctuation (ΔT_{tSZ} , thermal SZ-effect) and of undistorted CMB temperature (T_{CMB})

$$\frac{\Delta T_{tSZ}}{T_{CMB}} = f(x) \int n_e \left(\frac{k_B T_e}{m_e c^2}\right) \sigma_T dl.$$

Here, σ_T is the Thomson cross-section, T_e , n_e and $m_e c^2$ are electron's temperature, number density and rest mass energy, respectively. The origin of kinematic Sunyaev-Zeldovich (kSZ) effect is the cluster bulk motion with respect to CMB, which leads to

Doppler shifting of the CMB temperature. In the non-relativistic limit it is written as

$$\frac{\Delta T_{kSZ}}{T_{CMB}} = -\tau_e \left(\frac{v_{pec}}{c} \right),$$

where v_{pec} is the cluster velocity projected along the line of sight. Although kSZ effect is typical for galaxy clusters, it can be observed in the individual galaxies, particularly in circumgalactic medium (CGM), too. In this case the CMB photon interacts with hot electrons there, which leads to small angular scale distortions of the CMB spectrum. Since CGM rotate with galaxy, we have additional effect, due to that rotation. Then, for rotational kSZ effect the CMB temperature asymmetry becomes

$$\frac{\Delta T}{T}(\vec{n}) = \frac{\sigma_T}{c} \int n_e \vec{v} \times \vec{n} dl = \frac{\sigma_T}{c} \int n_e(r) v(R) \cos \phi \sin i,$$

in r is the distance from center of halo and R is the radius within which the hot plasma is rotating, ϕ and i are azimuthal and inclination angles.

Since CMB radiation anisotropy $\Theta(n) = \frac{\Delta T}{T}$ depends on the given point of the sky (i.e. defined on the sphere), it is expressed via spherical harmonics expansion of the $\Theta(n)$

$$\Theta(\mathbf{n}) = \sum_{l=2}^{\infty} \sum_{m=-l}^l a_{lm} Y_{lm}(\mathbf{n}),$$

where the a_{lm} coefficients form orthonormal basis. Then the power spectrum is defined as

$$C_l = \frac{1}{2l+1} \sum_m a_{lm}^* a_{lm}.$$

During CMB data processing we use the HEALPIX sky pixelization algorithm which satisfies given conditions, including the efficient search of the pixel values being the nearest to the given pixel, the iso-latitude distribution of discrete area elements, thus enabling to perform very fast Legendre polynomial calculations.

In the **second** chapter we calculate CMB temperature asymmetry for M81 and M104 galaxies. We show that the very fact that the detected temperature asymmetries are always almost frequency independent is a strong indication of an effect due to the galaxy rotation and remark the importance of the methodology proposed which thus may allow one to consistently estimate the galaxy dynamical mass contained within a the certain galactocentric distance. We have used the *Planck* 2015 data in the bands at 70 GHz of the Low Frequency Instrument (LFI), and in the bands at 100 GHz, 143 GHz and 217 GHz of the High Frequency Instrument (HFI). We have also used the foreground-corrected SMICA band, which should display the lowest contamination by the galactic foregrounds. *Planck* temperature field for one of frequencies (70 GHz) is shown in Fig. 1.

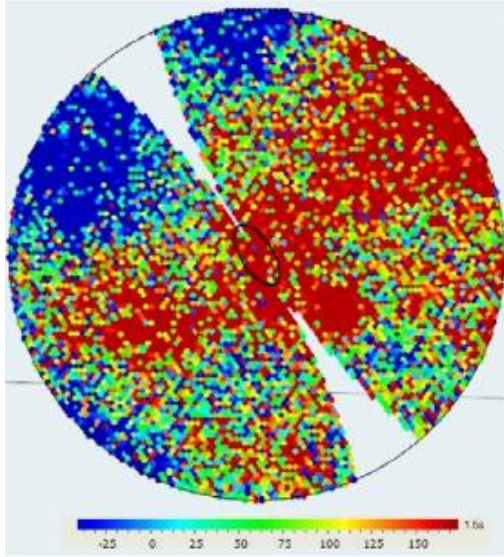


Fig.1 M81 region for 70 GHz, the ellipse denotes the disk of galaxy.

Planck's resolution is 13.2', 9.6', 7.1' and 5' in terms of FWHM at 70, 100, 143 and 217 GHz bands, respectively, and frequency maps are provided in CMB temperature at resolution corresponding to $N_{\text{side}}=2048$ in HEALPIX scheme. The *Planck* field for galactic four quadrants A1, A2, A3 and A4 were defined with respect to the rotation axis. As detailed in the histogram (Fig.2), we have considered the temperature asymmetry in three radial regions of the M81 center within 0.5° , 1° and 1.5° (indicated as R0.50, R1.00 and R1.50, respectively).

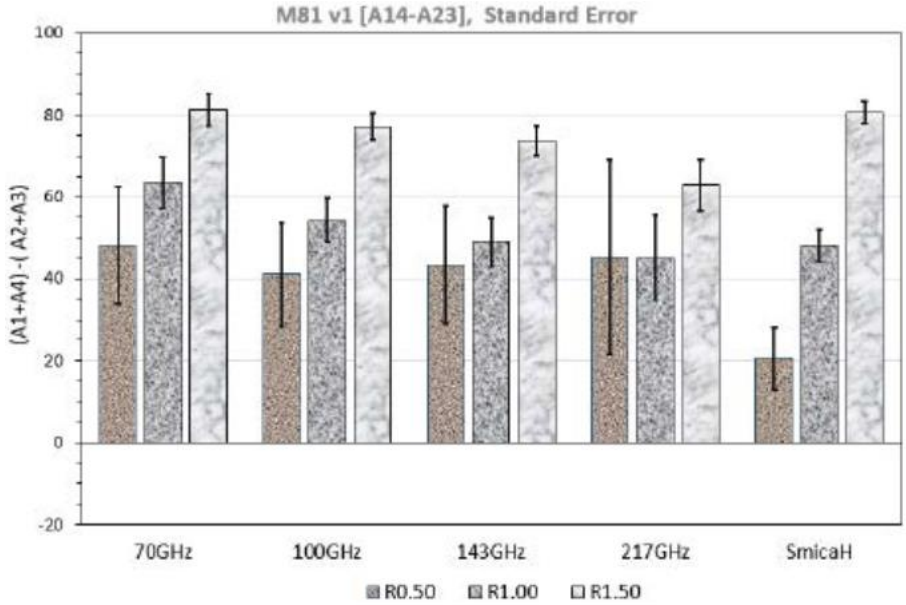


Fig.2 The temperature asymmetry toward M81 in μK (with the standard errors) of the A1+A2 region (indicated as A12) with respect to the A3+A4 region (A34) in the five considered *Planck* bands within three radial distances of $30'$ ($R0.50$), $60'$ ($R1$) and $90'$ ($R1.50$).

As one can see from Fig. 2 and as expected by considering the rotation direction of the M81 disk about its rotation axis, the A12 region always appears hotter than the A34 region by $32\text{-}44 \mu\text{K}$ within 0.5° , by $28\text{-}40 \mu\text{K}$ within 1° and by about $50\text{-}70 \mu\text{K}$ within 1.5° . It reaches values up to about $80 \mu\text{K}$ within 1.5° in all considered *Planck* bands, as an Doppler-induced effect due to the spin of the M81 halo, possibly along an axis tilted (up to about 90°) with respect to the rotation axis of the M81 disk. In order to account for the detected temperature anisotropy, however, the M81 halo should be filled by a relatively large amount of cold gas clouds or interstellar dust. The latter case we examine in the next chapter.

Similarly, we calculate CMB temperature asymmetry for M104 galaxy, again for the *Planck* 2015 data, as shown in the Fig.3.

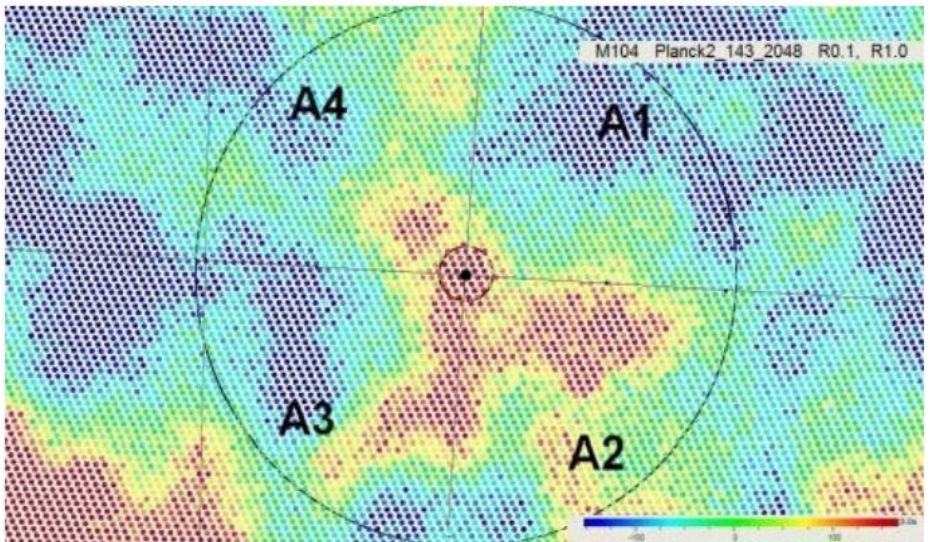


Fig.3 M104 (Sombrero) galaxy in the 143 GHz *Planck* band. The inner and outer circles mark the galactocentric distances of 0.1° and 1° , respectively.

We considered the temperature asymmetry in three radial regions about the M104 center within 0.2° , 0.4° , 0.6° and 1° (indicated as R0.2, R0.4, R0.6 and R1.0, respectively). In the Fig.4 we give the temperature asymmetry toward M104 in μK (with the standard errors) of the A1+A4 region with respect to the A2+A3 region in the four considered *Planck* bands within four radial distances. As one can see from Fig.4 the A1+A4 region always appears hotter than the A2+A3 region, and the temperature asymmetry increases from about $25 \mu\text{K}$ to a maximum value of about $65 \mu\text{K}$.

We also considered available data of the globular clusters (GCs) in the M104 galaxy. If one considers the 43 GCs with galactocentric distance larger than $5'$ one finds a non-negligible rotation with the 95% upper limit on the rotation velocity of 250 km/s and a GC velocity dispersion (σ) of about 155 km/s . These GCs reside in the A3 and A4 regions in Fig.3, and therefore they can be used at most to probe the north–south asymmetry, but not the east–west asymmetry. We obtain that the average line-of-sight velocity of the four GCs in the A3 region ($\langle v_r \rangle \approx 947 \text{ km/s}$) is similar to that of the four GCs in the A4 region ($\langle v_r \rangle \approx 972 \text{ km/s}$).

It is straightforward to show that if the cold-gas cloud model is at the origin of the detected temperature asymmetry, then a lower limit to the M104 galaxy dynamical mass is obtained depending on the measured temperature asymmetry and the effective cloud optical depth (which depends on both the cloud filling factor and the averaged optical

depth within a given *Planck* band). The detected temperature asymmetry is almost frequency-independent and indicates that the M104 galaxy halo is rotating with respect to the major symmetry axis of the galaxy disk.

The systematic study of the microwave mean temperature galactic asymmetries, as done here for the M104 galaxy, can become a conventional tool for studying and mapping the internal motions of not-too-distant galaxies (including their halos) in the microwave band, as an complementary tool with respect to other methods.

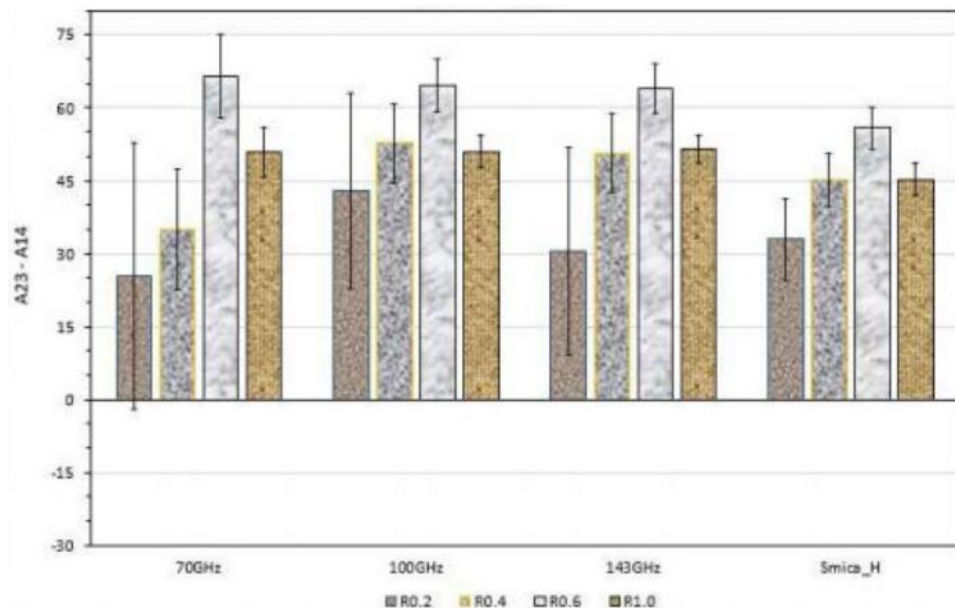


Fig.4 Temperature asymmetry towards the M104 galaxy in μK (with the standard errors) of the (A2A3 - A1A4), in the four considered *Planck* bands.

In the **third** chapter we investigate interstellar thermal dust contribution in three galactic halos. For M31 galaxy it was shown that, the temperature asymmetry both in the disk and halo extends up to 130 kpc. While the essentially frequency independent temperature asymmetry is indicating the Doppler nature of the effect, the Doppler induced anomaly itself can be due to different emission mechanisms of interstellar matter (ISM). One of the main components of ISM is the interstellar thermal dust, which emits especially at high frequencies. The possible contribution of the thermal dust in that effect is studied by us using high frequency data of *Planck* and the dark matter configuration models (NFW, Moore and Burkert).

In our analysis we used DL07 and GNILC models, which are described by single modified blackbody spectrum (MBB)

$$S_{dust}(\nu) = 2h \frac{\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT_d}} - 1} \tau \left(\frac{\nu}{\nu_0}\right)^\beta,$$

where $S_{dust}(\nu)$ is the dust emission flux density, T_d is the dust temperature and β is the spectral index. We note that both flux density and optical depth depends on the given frequency and through the spectral index one can identify the dust model. For DL07 model spectral index and temperature values are constant and the dust is assumed to consist of a mixture of carbonaceous grains and amorphous silicate grains. In GNILC model spectral index and temperature are changed with large radii. On the other hand, the temperature may change even for fixed values of spectral index. Therefore, we calculate the optical depth for two different cases:

1. Both T_d and β are constant at 19.635 K. Keeping fixed β , we vary the temperature. The data on temperature for different galactocentric distances are taken from *Planck* GNILC temperature maps.
2. Using GNILC maps for T_d and β we calculate the radial variation of the optical depth vs temperature and spectral index. We also cover optical depth, when $\beta=2$, $T_d \neq \text{const}$.

In this way we derive the optical depth values both for two models and up to 100 kpc radii from the center of the M31.

Then, using the optical depth and CMB temperature values we calculate the M31 halo rotational velocities using the Doppler shifting formula

$$\frac{|\Delta T|}{T} = \frac{2v \sin i}{c} \tau.$$

Here the galaxy inclination angle is $i = 77^\circ$ and τ is the optical depth.

We obtained dust rotational velocities for DL07 model at the 857 GHz frequency.

At the 545 GHz and 353 GHz frequencies the dust velocities are significantly high, however in these bands registered flux density is small compared with 857 GHz band. The same analysis we also performed for M81 and M82 galaxies. For M82 galaxy the rotational velocities for three high frequencies are presented in the Tables 1 and 2.

<i>DL07, $\beta = const, T = const$</i>			
Distance r (kpc)	$\nu = 857GHz$ V_{rot} (km/s)	$\nu = 545GHz$ V_{rot} (km/s)	$\nu = 353GHz$ V_{rot} (km/s)
15	4.35	15.76	159.69
20	5.86	20.24	163.74
25	5.84	19.63	80.12

Table 1. M82 dust rotational velocities by DL07 model.

<i>GNILC $\beta \neq const, T = const$</i>			
Distance r (kpc)	$\nu = 857GHz$ V_{rot} (km/s)	$\nu = 545GHz$ V_{rot} (km/s)	$\nu = 353GHz$ V_{rot} (km/s)
15	0.405	1.302	14.91
20	0.647	2.10	14.71
25	0.779	2.507	10.61

Table 2. M82 dust rotational velocities by GNILC model.

On the other hand, it is possible to estimate the dust velocity in different ways. One can assume that the dust component has a Keplerian motion and that gravity and centrifugal force are in equilibrium, i.e. the orbital velocity is given by the virial mass. The velocities, obtained in this way are significantly lower, than those determined by microwave temperature asymmetry data.

Then, analyzing the modified gravity models to describe of the dark matter halos, we particularly consider the weak-field modification of General Relativity enabling the common description of the dark matter and dark energy. The metric tensor components in that case have the form:

$$g_{00} = 1 - \frac{2Gm}{rc^2} - \frac{\Lambda r^2}{3}; \quad g_{rr} = \left(1 - \frac{2Gm}{rc^2} - \frac{\Lambda r^2}{3}\right)^{-1}.$$

The virial condition for this modified gravity comes to support the conclusions made above on the role of the dust in the mass content of the considered galactic halo.

In **conclusion**, the main results of the dissertation are listed.

The complete list of the **used literature** is presented in the thesis.

Publications list

1. Gurzadyan V. G., De Paolis F., Nucita A.A., Kashin A.L., Amekhyan A., Sargsyan S., Yegorian G., Qadir A., Ingrosso G., Jetzer Ph., Vetrugno D., "*Messier 81's Planck view versus its halo mapping*", *Astronomy & Astrophysics*, 609, **A131**, 2018.
2. De Paolis F., Gurzadyan A.V., Nucita A.A., Gurzadyan V.G., Qadir A., Kashin A.L., Amekhyan A., Sargsyan S., Jetzer Ph., Ingrosso G., Tahir N., "*Rotating baryonic dark halos*", *Astronomy & Astrophysics*, 629, **A87**, 2019.
3. Amekhyan A., Sargsyan S., and Stepanian A., "*Role of dust in the microwave emission of galactic halos*", *Modern Physics Letters*, **A34**, 1950308, 2019.
4. Amekhyan A., "*The structure of galactic halos and the microwave temperature maps*", *International Journal of Modern Physics*, **D28**, No. 16, 2040016, 2019.

Մուլթ Ելույթը և գալակտիկական հալոները

Ամփոփում

Առենախոսությունը նվիրված է մուլթ Ելույթի ուսումնասիրությանը գալակտիկական հալոներում մնացորդային ճառագայթման դիտողական տվյալների, միջաստղային փոշու, ինչպես նաև մոդիֆիկացված գրավիտացիայի մոդելների միջոցով: Մուլթ Ելույթը ենթադրվում է, որ հիմնականում կենտրոնացված է գալակտիկաների հալոներում, որը հնարավորություն է տալիս ուսումնասիրել այն տիեզերական մնացորդային ճառագայթման ջերմաստիճանային անիզոտրոպիայի օգնությամբ: Մնացորդային ճառագայթման ջերմաստիճանային անիզոտրոպիան առաջանում է մի քանի երևույթների շտրոհիվ՝ Սաքս-Վոլֆի, Սունյատեվ-Չելոմուխի (ջերմային, կինեմատիկական, պոտական-կինեմատիկական):

Այս աշխատանքում ուսումնասիրությունները կատարվել են *Planck* արբանյակից ստացված տվյալների միջոցով, պիկսելիզացիայի HEALPIX համակարգով: Արդյունքում ուսումնասիրված 4 գալակտիկաների համար ջերմաստիճանային ասիմետրիան գրեթե բոլոր հաճախություններում տարածվում է մեծ շառավիղային հեռավորությունների վրա՝ ընդգրկելով նաև գալակտիկաների հալոները: Այսպիսով, մնացորդային ճառագայթման ասիմետրիայի ուսումնասիրությունը մեծ գալակտիկական հեռավորությունների համար մեզ հնարավորություն է տալիս գնահատել մուլթ Ելույթի, հետևաբար նաև հալոների որոշ առանձնահատկություններ: Ապա հետազոտվել է նշված ջերմաստիճանային ասիմետրիայի առաջացման պատճառներից՝ միջաստղային փոշու առկայությունը մեծ հեռավորությունների վրա: Արտածվել են միջաստղային փոշու օպտիկական հաստությունը, պոտման արագությունը և մնացորդային ճառագայթման ջերմաստիճանային ասիմետրիան՝ Դոպլերի շեղման դեպքում, ապա ունենալով միջաստղային փոշու օպտիկական հաստությունը մեծ գալակտիկական հեռավորությունների վրա (այսինքն՝ հալոյում), ստացվել են վերջինիս շառավիղային արագությունները: Ստացված շառավիղային արագությունները համեմատվել են մուլթ Ելույթի՝ թվային մեթոդներով ստացված արագությունների հետ և գնահատել միջաստղային փոշու ներդրումը հալոներում:

Աշխատանքում ուսումնասիրվել են միջաստղային փոշու երկու մոդելներ՝ DL07 և GNILC, որոնք բնութագրվում են մոդիֆիկացված սև մարմնի ճառագայթման սպեկտրով: DL07 մոդելում միջաստղային փոշու ջերմաստիճանը և սպեկտրալ ինդեքսը մնում են հաստատուն, մինչդեռ GNILC մոդելում նշված մեծությունները փոփոխվում են շառավիղից կախված: Միջաստղային Ելույթը ճառագայթում է հիմնականում բարձր հաճախություններում, այդ իսկ պատճառով օգտագործվել են *Planck* արբանյակի միայն երեք ամենաբարձր հաճախություններում (857 ԳՀց, 545 ԳՀց, 353 ԳՀց) ստացված ջերմաստիճանային քարտեզները: Այսպիսով, միջաստղային փոշու շառավիղային արագությունները ստանալու համար օգտագործվել են *Planck* արբանյակի մի քանի քարտեզներ. ճառագայթման հոսքի խտության, ջերմաստիճանային և սպեկտրալ ինդեքսի: 857 ԳՀց հաճախությունում, որում հիմնականում ճառագայթում է միջաստղային

փոշին (այսինքն տվյալ հաճախությունում ունենք հոսքի խտության ավելի բարձր արժեքներ, համեմատած մյուս երկու և հաճախությունների հետ) շառավիղային արագությունները ստացվում են շատ փոքր: Միևնույն 545 ԳՅ և 353 ԳՅ հաճախություններում ավելի բարձր: Միջաստղային փոշու շառավիղային արագությունները ստացվել են երեք գալակտիկաների համար՝ M81, M31, M82: Օրինակ M31 գալակտիկայի համար վերջինիս արագությունները 40-100 կպս հեռավորությունների համար 9.43-13.02 կմ/վ է DL07 մոդելի համար և 0.34-0.51 կմ/վ է GNILC մոդելի համար: Սակայն հաճախությունից կախված այս արժեքները նշանակալիորեն աճում են: Բոլոր ստացված արագությունները համեմատվել են մութ նյութի պտտման արագությունների երեք պրոֆիլների հետ, (NFW, Burkert, Moore) որոնց արժեքները տատանվում են հիմնականում 150-250 կմ/վ միջակայքում: Այսպիսով 857 ԳՅ հաճախությունում, որտեղ ունենք ամենաբարձր ճառագայթման հոսքի խտության արժեքներ, միջաստղային փոշու արագությունները շատ փոքր են մութ նյութի պտտման արագություններից և, հետևաբար գալակտիկաների հայտնություն չեն տալիս նշանակալի ներդրում: Մյուս երկու հաճախություններում ունենք միջաստղային փոշու ավելի բարձր պտտման արագություններ 350-640 կմ/վ, սակայն գրանցված հոսքի խտությունը տվյալ հաճախություններում ավելի ցածր է: Հալոների դինամիկայի վերաբերյալ ստացված տվյալները համեմատվել են մոդիֆիկացված գրավիտացիայի մոդելների հետ, մասնավորապես, Հարաբերականության ընդհանուր տեսության թույլ դաշտի մոտավորության համար, որը ներառում է կոսմոլոգիական հաստատունը:

Темная материя и галактические гало

Резюме

Диссертация посвящена изучению темной материи в галактических гало с помощью данных реликтового излучения, моделей межзвездной пыли и модифицированной гравитации. Темная материя, как предполагается, в основном сосредоточена в гало галактик, что позволяет изучать ее с помощью неоднородностей реликтового излучения. Механизмы температурных неоднородностей реликтового излучения включают явления Сакс-Вольфа, а также Сюняева-Зельдовича - тепловые, кинематические, вращательно-кинематические, в результате комптоновского рассеяния реликтовых фотонов на горячих электронах. В данной диссертации выявлена асимметрия температуры реликтового излучения на частотах 70–857 ГГц для 4 галактик - M81, M104, M31, M82. Исследования проводились на основе данных полученных со спутника *Планк*, с использованием системы пикселизации HEALPIX. В результате, для четырех исследованных галактик выявлена температурная асимметрия, которая распространяется до области гало галактик. Таким образом, изучение асимметрии реликтового излучения на больших галактических расстояниях позволяет оценить некоторые свойства темной материи и гало, включая роль межзвездной пыли на больших расстояниях. Была определена оптическая толщина межзвездной пыли, затем, имея оптическую толщину межзвездной пыли на больших галактических расстояниях т.е. в гало, были получены лучевые (радиальные) скорости последнего. Полученные лучевые скорости сравнены со скоростями темной материи для определенных моделей, полученными численными методами, и оценить вклад межзвездной пыли в гало. В этой работе были использованы две модели межзвездной пыли, DL07 и GNILC, которые характеризуются модифицированным спектром излучения черного тела. В модели DL07 температура межзвездной пыли и спектральный индекс остаются постоянными, тогда как их значения в модели GNILC варьируются в зависимости от радиуса.

Межзвездная пыль излучает в основном на высоких частотах, поэтому использовались только карты температуры, полученные на трех самых высоких частотах спутника Планк (857 ГГц, 545 ГГц, 353 ГГц). На частоте 857 ГГц, в которой излучается большая часть межзвездной пыли (то есть в данной частоте имеем более высокие значения плотности потока по сравнению с двумя другими частотами), лучевые скорости оказались очень низкими. Однако на частотах выше 545 ГГц и 353 ГГц они высокие. Радиальные скорости межзвездной пыли получены для трех галактик: M81, M31, M82. Например, для галактики M31 скорость последней для 40-100 кпс составляет 9,43-13,02 км/с для моделей DL07 и для GNILC составляет

0,34-0,51 км / с . Однако, в зависимости от частот эти значения значительно возрастают. Все полученные скорости сравнивались с тремя профилями скорости вращения темной материи (NFW, Burkert, Moore), значения которых в основном находятся в диапазоне 150-250 км / с. Таким образом, на частоте 857 ГГц, где мы имеем самые высокие значения плотности излучения, скорости межзвездной пыли намного меньше, чем скорости вращения темной материи. Две другие частоты имеют более высокие скорости вращения межзвездной пыли, 350-640 км / с, но зарегистрированная плотность потока намного ниже на данных частотах. Полученные данные о гало галактик были сравнены с моделями модифицированной гравитации, включая ОТО в приближении модифицированного слабого поля с космологической константой в качестве второго параметра.

