

Скоррелированность Направлений Вращений Спиральных Галактик

Курсовая работа

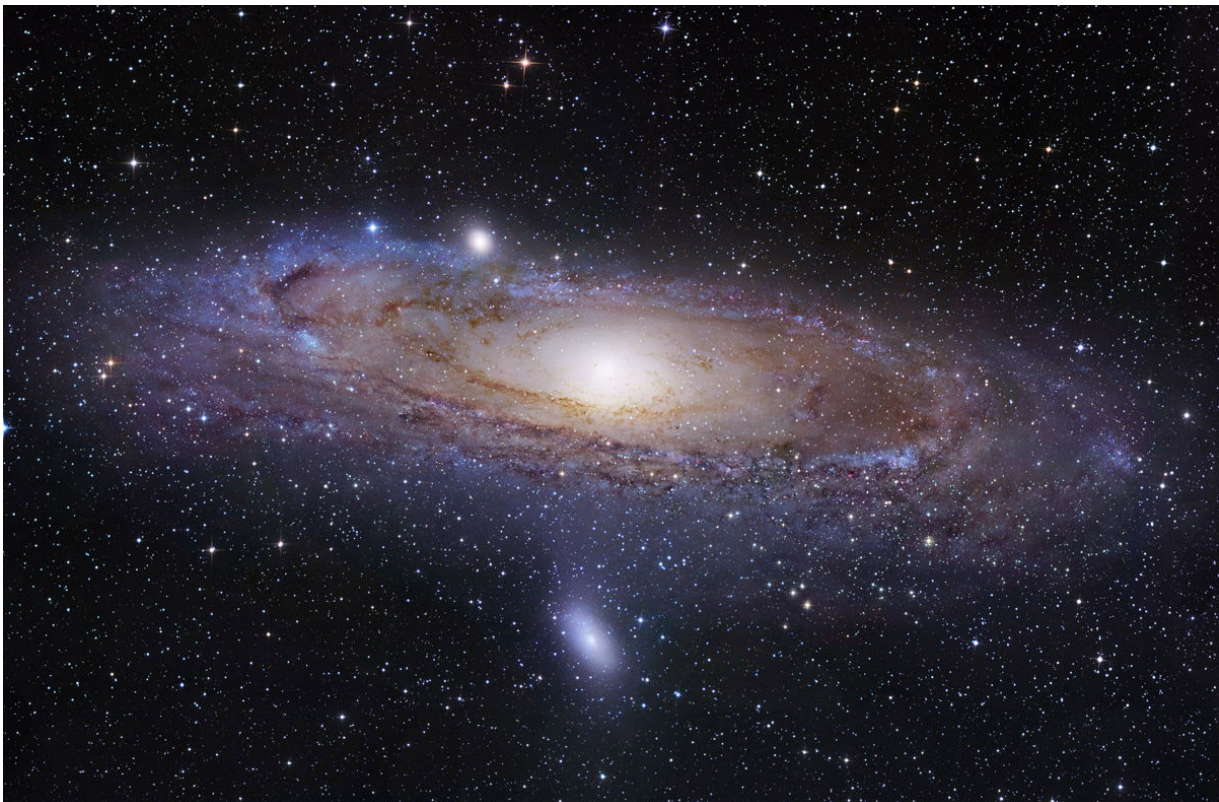
студента 2 курса 208 группы

Ленского Владислава Михайловича

Научный руководитель:

доктор физ.-мат. наук, член-корр. РАН, г.н.с. ОТФ ИЯИ РАН

Дмитрий Сергеевич Горбунов



Содержание

1. Введение
2. Данные
3. Вычисления и анализ
4. Результаты
5. Заключение
6. Библиография

1 Введение

Изучение неоднородного распределения галактик с противоположными направлениями вращения (далее - спинами) в последнее время привлекает значительное внимание. Утверждение о том, что спины спиральных галактик распределены не произвольно, считается значимой проблемой в астрономии последнего десятилетия [1],[2].

В то время как эксперименты с данными, полученными вручную (Galaxy Zoo), страдали от нехватки информации, применение автоматических цифровых небесных исследований вкупе с вычислительными методами, способными обрабатывать огромное количество галактик, дало гораздо большие массивы данных, предоставляющие определенные доказательства неслучайного распределения спинов.

Свежие согласующиеся свидетельства подкрепляют необходимость изучения распределения спинов спиральных галактик за рамками нулевой гипотезы о полностью случайном распределении.

2 Данные

Набор данных, использованный в данном исследовании, основан на подборке многоспектральных фотометрических объектов, снятых Слоуновским цифровым небесным обзором (Sloan Digital Sky Survey). Данный набор содержит 77,840 уникальных спиральных галактик, имеющих определенный спин $d=\pm 1$ и координаты (RA, DEC) на небесной сфере (во второй экваториальной системе координат), радиус Петросяна¹ $>5.5''$ и $m^2 < 19$ (крупные и относительно яркие объекты). Из имеющихся галактик 39,187 вращаются по часовой (спин направлен от нас) а 38,653 против часовой стрелки (спин на нас), разница составляет $\sim 1.4\%$, по биномиальному распределению вероятность получить такую разницу составляет 0.0275. Стоит отметить, что большинство рассматриваемых галактик лежит в северном полушарии. Данные доступны по ссылке <http://people.cs.ksu.edu/~>

Отличительной особенностью этого набора является то, что определение направления вращения не основано на методах машинного или глубокого обучения, которые полагаются на неинтуитивно понятные закономерности. Все характеристики галактик определены с помощью программы G analyzer (методика ее работы описана в статье [3]), являющейся простым, логически понятным симметричным инструментом, измеряющим спиральность галактик.

Автоматический алгоритм обнаружения галактик, являющийся частью Слоуновского цифрового небесного обзора (Sloan Digital Sky Survey), может быть источником отклонений, если имеет предпочтения относительно направления вращения галактик. Однако существование такого предпочтения противоречит результатам полученным далее.

Более тщательное описание данных представлено в статье [4].

¹ расстояние от центра галактики, отношение поверхностной яркости на котором и средней поверхностной яркости в его пределах равно специфической величине (например 0,2)

² видимая звездная величина – мера яркости небесного тела с точки зрения земного наблюдателя

3 Вычисления и анализ

Допуская, что распределение направлений вращения спиральных галактик представляет собой дипольную ось космических масштабов, ожидаем, что распределение подчиняется закону косинуса.

Для каждой возможной комбинации (α, δ) косинус углового расстояния ϕ между (α, δ) и каждой галактикой рассчитывается по формуле:

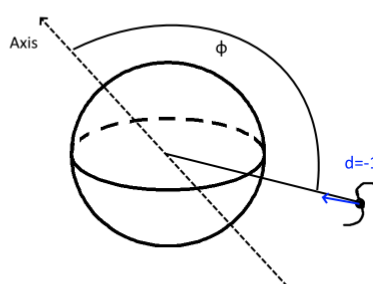
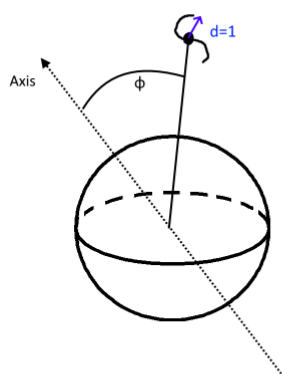
$$\cos(\phi) = \sin(\delta) * \sin(DEC) + \cos(\delta) * \cos(DEC) * \cos(RA - \alpha)$$

Затем для каждой точки (α, δ) с шагом в 5° применяется критерий χ^2 , конструктивность которого описана в [5], для сравнения реального распределения и распределения косинуса:

$$\chi^2 = \frac{(77840 - f_{real})^2}{77840},$$

$$\text{где } f_{real} = \sum_{i=1}^{77840} \Theta_i,$$

$$\Theta_i = \begin{cases} 1, & \cos(\phi) = d \cdot |\cos(\phi)| \\ 0, & \cos(\phi) \neq d \cdot |\cos(\phi)| \end{cases}$$



На рисунке изображены два случая, в которых $\Theta_i = 1$.

После χ_r^2 , рассчитанный по реальным значениям d , сравнивается со средним значением χ_c^2 , рассчитанным по случайно заданным для

тех же галактик $d = \pm 1$. После расчета 1000 значений χ_c^2 вычисляются абсолютное Δ и среднеквадратичное σ отклонения набора. Разность χ_r^2 и среднего χ_c^2 деленная на σ дает вероятность существования дипольной оси в точке (α, δ) .

Исследования [7],[8],[9],[10],[11],[12], связанные с анизотропией реликтового излучения, указывают на большую вероятность квадрупольного распределения анизотропии. Квадруполь – мультиполь³ 2-го порядка, представляет собой пару одинаковых противоположно направленных диполей. Поле, ориентирующее спины не содержит отрицательные заряды, значит мультипольное разложение содержит только четные порядки, а отрицательные заряды рассматриваются только формально. В случае диполя поле совпадает с самим собой после поворота на 180° , для квадруполя достаточно поворота на 90 . Поэтому, используя $\cos(2\phi)$, были проведены аналогичные исследования для квадрупольной оси.

Все вычисления проведены в программе, код которой написан на языке C++ и доступен по ссылке: <https://github.com/hackdady3000/Large-scale-spin-direction-assymetry> .

³ определённая симметричная конфигурация неподвижных или движущихся источников поля в ограниченной области пространства.

4 Результаты

График [4.1] показывает вероятность существования дипольной оси для всех возможных комбинаций (α, δ) . Наиболее вероятная дипольная ось найдена в точке $(155, 5)$ с вероятностью 2.86σ .

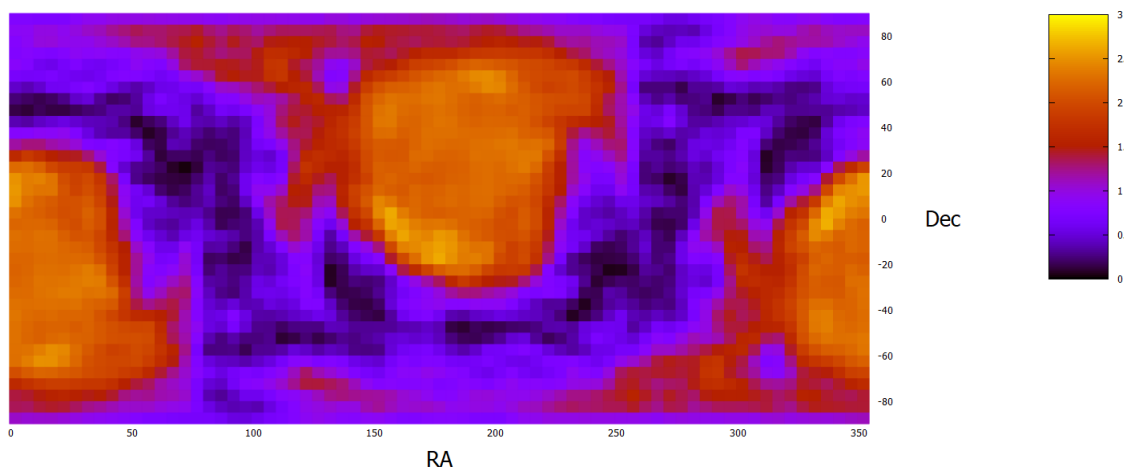


Fig. 4.1: Вероятность существования дипольной оси для всех возможных (α, δ) в единицах σ .

График [4.2] демонстрирует вероятность наличия квадрупольной оси для всех возможных комбинаций (α, δ) . Наиболее вероятная квадрупольная ось найдена в точке $(340, 50)$ с вероятностью 3.03σ .

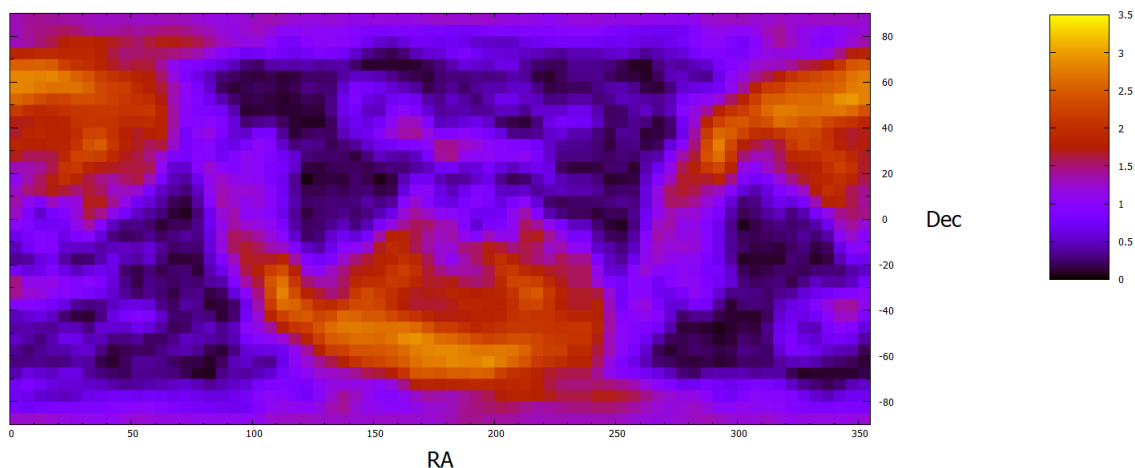


Fig. 4.2: Вероятность существования квадрупольной оси для всех возможных (α, δ) в единицах σ .

5 Заключение

Статистическая значимость не достигает планки в 5σ , но все еще остается значительной. Также результаты согласуются с данными более ранних исследований, показывавших не случайное распределение галактик с противоположными направлениями вращения.

Дипольная ось расположена близко ($\Delta\phi = 36^\circ$) к оси (165,40), найденной в похожем исследовании [4] с теми же исходными данными, и лежит в окрестности ($\Delta\phi = 34^\circ$) оси (132,32), найденной в аналогичном исследовании [2] с отличающимися данными. График [5.1] показывает вероятность наличия дипольной оси для всех возможных комбинаций (α, δ) в исследовании [4].

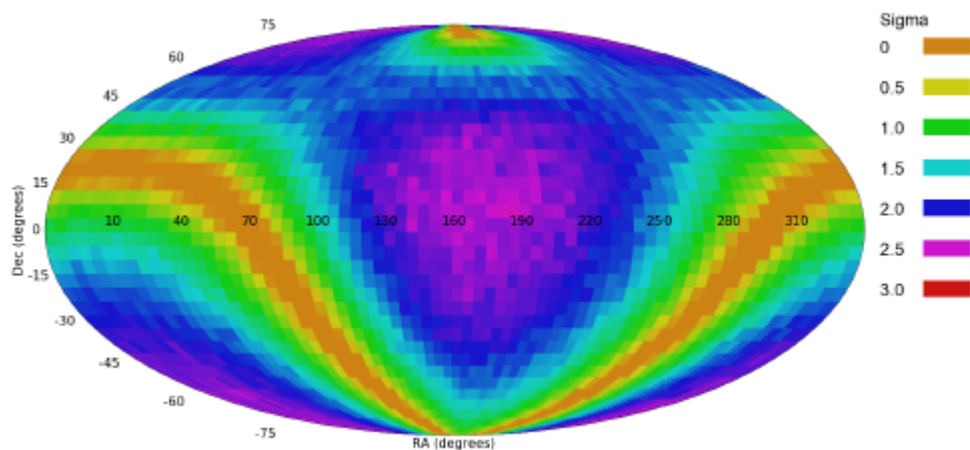


Fig. 5.1: Вероятность наличия дипольной оси для всех возможных комбинаций (α, δ) в исследовании [4].

В случае, когда видимая звездная величина m галактик лежит в диапазоне от 18 до 19, наиболее вероятная дипольная ось (150,25) с вероятностью 5.57σ , найденная в статье [4], располагается крайне близко ($\Delta\phi = 19^\circ$) к найденной выше. График [5.2] демонстрирует вероятность наличия дипольной оси для всех возможных комбинаций (α, δ) при таких условиях. Следовательно статистическая вероятность существования оси растет с увеличением m , которая растет с увеличением красного смещения z , что совпадает с результатами наблюдений [6]: асимметрия растет с ростом красного смещения z .

Квадрупольная ось крайне близка ($\Delta\phi = 11^\circ$) к оси (355,45), найденной в [4]. График [5.3] показывает вероятность наличия квадрупольной оси для всех возможных комбинаций (α, δ) в исследова-

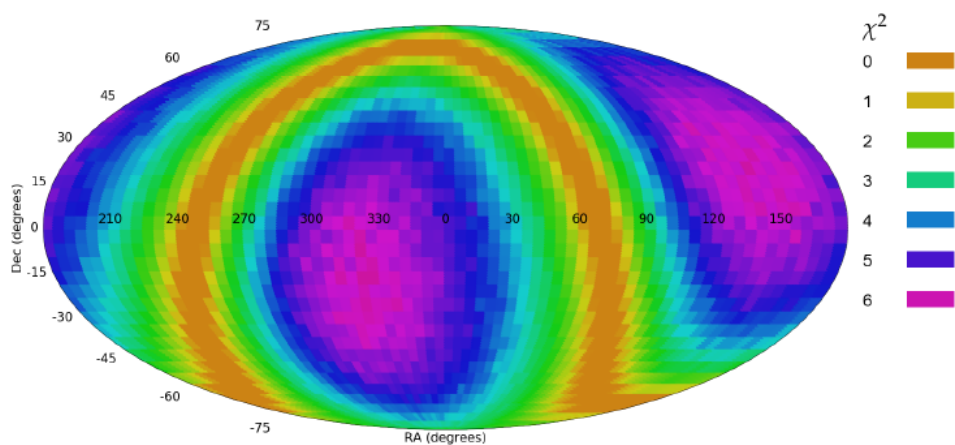


Fig. 5.2: Вероятность наличия дипольной оси для всех возможных комбинаций (α, δ) в исследовании [4] при $m \in [18, 19]$.

нии [4].

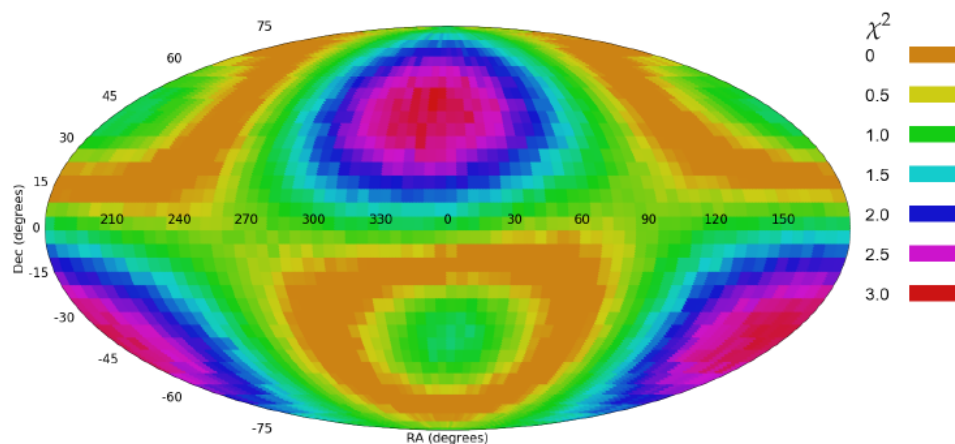


Fig. 5.3: Вероятность наличия квадрупольной оси для всех возможных комбинаций (α, δ) в исследовании [4].

Различия в координатах наиболее вероятных осей связаны с разницей в методах вычисления (кодах программ, вычисляющих вероятность: существуют разные методы получения случайных чисел), также сами вычисления подвержены погрешности, которая при таком большом объеме данных производит небольшие отклонения даже в результатах двух разных воспроизведений одного и того же кода. Куда значительней то, что общие картины распределения вероятностей (графики) практически идентичны.

Как было отмечено в разделе 2, большинство рассматриваемых галактик лежит в северном полушарии, поэтому стоило бы с осторожностью отнести к дипольной оси, лежащей на небесном по-

люсе. Однако найденная ось лежит на значительном расстоянии ($\Delta\phi = 85^\circ$) от северного небесного полюса.

Методика, приведенная выше, также чувствительна к неслучайным распределениям галактических спинов, не представляющим собой дипольную или квадрупольную ось. Например, единственная точка с очень сильной асимметрией будет идентифицирована, как дипольная ось с значительным статистическим сигналом, даже если спины галактик в остальных точках распределены случайно. В то время как дипольная ось определяет распределение спинов, как распределение косинуса, другие аномалии тоже могут быть найдены в форме статистически значимого распределения косинуса. Поэтому окончательное выявление дипольной или квадрупольной оси асимметрии требует тщательного анализа огромного числа галактик, покрывающих большую часть небесной сферы.

Наличие накапливающихся доказательств асимметрии космологических масштабов (18,19,20,21,22,23) подталкивает к дальнейшему исследованию вопроса, о существовании неслучайного распределения направлений вращений галактик. Неслучайное распределение спиральных галактик, представляющее собой дипольную или квадрупольную ось не может быть объяснено с помощью господствующих космологических теорий [25]. Тем не менее свидетельства анизотропии космологических масштабов были найдены в распределении реликтового излучения: [7],[8],[9], приводящих к теориям выходящим за рамки стандартных моделей: [10],[11],[12],[14].

Обнаружение дипольной оси может быть связано с теориями о эллипсоидальной[17] или вращающейся[15][16] Вселенной, так как наличие выделенного направления вращения огромной структуры (например всей Вселенной) может отразиться на распределении спинов галактик. Более того, вследствие вращения черных дыр [26], найденная ось вращения галактик может соотноситься с осью вращения связанной с ними сверхмассивной черной дыры.

Однозначно требуется больше исследований для проверки неслучайного распределения направлений вращения галактик и опреде-

ления структур, которые оно представляет. При дальнейшем сохранении значения σ ниже \sqrt{N} , где N - число галактик, для преодоления планки в 5σ потребуется как минимум в 4 раза больше галактик. Благо, скоро (август 2021) станут доступны данные исследования Dark Energy Survey⁴ и будет запущена в работу обсерватория имени Веры Рубин⁵ (октябрь 2022), которые предоставят огромные массивы данных, преимущественно о галактиках Южного полушария.

⁴ астрономический обзор в видимой и ближней инфракрасной области спектра, целью которого является изучение динамики расширения Вселенной и роста её крупномасштабной структуры

⁵ строящийся в Чили широкоугольный (диаметр 8,36 м) обзорный телескоп-рефлектор, предназначенный для съёмки доступной области неба

6 Библиография

1. Longo, M.J. Detection of a Dipole in the Handedness of Spiral Galaxies with Redshifts $z < 0.04$. *Physics Letters B* 2011, 699, 224-229.
2. Shamir, L. Handedness asymmetry of spiral galaxies with $z < 0.3$ shows cosmic parity violation and a dipole axis. *Physics Letters B* 2012, 715, 25-29.
3. Shamir, L. Ganalyzer: A tool for automatic galaxy image analysis. *The Astrophysics Source Code Library* 2011, p. ascl:1105.011.
4. Shamir, L. Analysis of the alignment of non-random patterns of spin directions in populations of spiral galaxies. arXiv:2101.04068 [astro-ph.CO]
5. Боровков А. А. Математическая статистика: учебник. Лань, 2010
6. Shamir, L. Patterns of galaxy spin directions in SDSS and Pan-STARRS show parity violation and multipoles, *Astrophysics and Space Science*, 365, 136, 2020.
7. Cline, J.M.; Crotty, P.; Lesgourgues, J. Does the small CMB quadrupole moment suggest new physics? *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* 2003, 2003, 010.
8. Gordon, C.; Hu, W. Low CMB quadrupole from dark energy isocurvature perturbations. *Physical Review D* 2004, 70, 083003.
9. Zhe, C.; Xin, L.; Sai, W. Quadrupole-octopole alignment of CMB related to the primordial power spectrum with dipolar modulation in anisotropic spacetime. *Chinese Physics C* 2015, 39, 055101.
10. Feng, B.; Zhang, X. Double inflation and the low CMB quadrupole. *Physics Letters B* 2003, 570, 145-150.

11. Piao, Y.S.; Feng, B.; Zhang, X. Suppressing the CMB quadrupole with a bounce from the contracting phase to inflation. *Physical Review D* 2004, 69, 103520.
12. Rodrigues, D.C. Anisotropic cosmological constant and the CMB quadrupole anomaly. *Physical Review D* 2008, 77, 023534.
13. Piao, Y.S. Possible explanation to a low CMB quadrupole. *Physical Review D* 2005, 71, 087301.
14. Jimenez, J.B.; Maroto, A.L. Cosmology with moving dark energy and the CMB quadrupole. *Physical Review D* 2007, 76, 023003.
15. Campanelli, L.; Cea, P.; Tedesco, L. Ellipsoidal universe can solve the cosmic microwave background quadrupole problem. *Physical Review Letters* 2006, 97, 131302.
16. Campanelli, L.; Cea, P.; Tedesco, L. Cosmic microwave background quadrupole and ellipsoidal universe. *Physical Review D* 2007, 76, 063007.
17. Gruppuso, A. Complete statistical analysis for the quadrupole amplitude in an ellipsoidal universe. *Physical Review D* 2007, 76, 083010.
18. Eriksen, H.K.; Hansen, F.K.; Banday, A.J.; Gorski, K.M.; Lilje, P.B. Asymmetries in the Cosmic Microwave Background anisotropy field. *Astrophysical Journal* 2004, 605, 14.
19. Javanmardi, B.; Porciani, C.; Kroupa, P.; P am-Altenburg, J. Probing the isotropy of cosmic acceleration traced by type Ia supernovae. *Astrophysical Journal* 2015, 810, 47.
20. Lin, H.N.; Li, X.; Chang, Z. The significance of anisotropic signals hiding in the Type Ia supernovae. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 2016, 460, 617-626.
21. Javanmardi, B.; Kroupa, P. Anisotropy in the all-sky distribution of galaxy morphological types. *Astronomy & Astrophysics* 2017, 597, A120.

22. Meszaros, A. An oppositeness in the cosmology: Distribution of the gamma ray bursts and the cosmological principle. AN 2019, 340, 564-569.
23. Secrest, N.; Hausegger, S.; Rameez, M.; Mohayaee, R.; Sarkar, S.; Colin, J. A Test of the Cosmological Principle with Quasars. arXiv 2020, p. 2009.14826.
24. Решетников, В.П. / Поверхностная фотометрия галактик. Издательство Санкт-Петербургского университета, 2003.
25. Вайнберг С. Космология. URSS. 2018.
26. McClintock, J.E.; Shafee, R.; Narayan, R.; Remillard, R.A.; Davis, S.W.; Li, L.X. The spin of the near-extreme Kerr black hole GRS 1915+ 105. Astrophysical Journal 2006, 652, 518.