



УДК: 524.3/4

Сардор КУТЛИМУРАТОВ,

Чирчикский государственный педагогический университет, и.о. доцент

Нилуфар ОТОЖАНОВА,

Чирчикский государственный педагогический университет, старший преподаватель

Икрам ТАДЖИБАЕВ,

Чирчикский государственный педагогический университет, доцент Национальный университет Узбекистана

На основании рецензии Ф.Т.Шамшиевой к.ф-м.н Национальный университет Узбекистана

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРА АНИЗОТРОПИИ ДЛЯ СКОПЛЕНИЙ ГАЛАКТИК

Аннотация

В данной работе выполнен анализ данных наблюдений по скоплениям галактик из SDSS DR8. На основе данных наблюдений распределения поверхностной плотности определены значения параметра анизотропии для 31 скопления. Предложена классификация скоплений галактик по параметрам анизотропии скоростей, согласно которой скопления разделены на три группы. Изучена зависимость между параметром анизотропии и основными физическими характеристиками скоплений галактик.

Ключевые слова: галактики, скопления галактик, поверхностная плотность, параметр анизотропии, эволюция

CALCULATION OF THE ANISOTROPY PARAMETER FOR GALAXY CLUSTERS

Annotation

This work has analyzed observational data on galaxy clusters from SDSS DR8. Based on observational data on the distribution of surface density, the values of the anisotropy parameter were determined for 31 clusters. A classification of galaxy clusters based on velocity anisotropy parameters is proposed, according to which the clusters are divided into three groups. The relationship between the anisotropy parameter and the main physical characteristics of galaxy clusters has been studied.

Key words: galaxies, galaxy clusters, surface density, anisotropy parameter, evolution

GAŁAKTIKA TO'DALARI UCHUN ANIZOTROPYA PARAMETRINI HISOBLASH

Annotatsiya

Ushbu maqola SDSS DR8 bazasidan olingan kuzatuv natijalari asosida galaktika to'dalari bo'yicha kuzatuv ma'lumotlari tahlil qilangan. Sirt zichligini taqsimoti bo'yicha kuzatuv ma'lumotlariga asoslanib, 31 ta galaktikalar to'dasi uchun anizotropiya parametrining qiymatlari aniqlangan. Tezlik anizotropiya parametri asosida galaktika to'dalarining sinflashtirilishi taklif qilingan, unga ko'ra to'dalar uchta guruhga bo'lingan. Anizotropiya parametri va galaktika to'dalarining asosiy fizik xususiyatlari o'rtasidagi bog'liqlik o'rganilgan.

Kalit so'zlar: galaktikalar, galaktika to'dalari, sirt zichlik, anizotropiya parametri, evolyutsiya

Введение. Скопления галактик – наиболее массивные гравитационно связанные образования во Вселенной (см., например, [1-4]). Также, в их состав входят горячий ионизованный межгалактический газ и тёмная материя. Массы скоплений галактик составляют 10^{13} – 10^{15} масс Солнца, причём основная доля массы обычно приходится на тёмную материю. На втором месте по массе находится межгалактический газ, и только на третьем – сами галактики. Характерный размер массивных скоплений галактик – около 10 млн. световых лет. Скорости движения галактик внутри скопления обычно составляют 1-2 тысячи км/с. Массы скоплений галактик определяются по измерениям разброса скоростей отдельных галактик относительно среднего значения либо по температуре и распределению горячего газа, заполняющего скопление.

По скоплениям галактик опубликованы много наблюдательных работ. Здесь мы приводим основные работы. В статье [1] составлен каталог 2712 богатых скоплений галактик, обнаруженных в ходе обзора неба Паломарской обсерваторией. Из каталога выбрано 1682 скопления, отвечающих определенным критериям для включения в однородную статистическую выборку. Авторы по исследованиям сделали следующие выводы: (1) функция распределения скоплений по богатству $N(n)$ быстро возрастает с уменьшением n ; (2) данные не позволяют сделать существенного решения о том, что пространственная плотность центров скоплений меняется с расстоянием; (3) галактическое затемнение порядка нескольких десятых звездной величины существует на высоких северных галактических широтах около 300 галактической долготы; (4) существует весьма значимое неслучайное поверхностное распределение скоплений, как когда скопления находятся на всех расстояниях и когда рассматриваются скопления на разных расстояниях.

В работе [5] выполнен спектроскопический анализ 286 богатых скоплений, ранее идентифицированных на основе наблюдений на телескопе Дюпон в обсерватории Лас-Кампанас. В работе [6] изучены радиоактивные члены скопления Эйбеля и составлен каталог 150 скоплений по параметрам рентгеновского и радиодиапазона. А в работе [7] обработано изображения из проекта SDSS-III и идентифицированы 132684 скопления галактик, причем более 95 % этих скоплений имеют массы $M_{200} > 10^{14} M_{\odot}$. В работе [8] исследованы динамические свойства 2092 богатых скоплений галактик на основе данных рентгеновского, оптического и радиодиапазона. В работе [9] приведены массы 1191 скоплений, и кроме того

данные приведенные в работе [8] были обновлены и/или дополнены. В работе [10] даны основные физические характеристики 275 богатых скоплений, в том числе, их массы.

В космологической модели Λ CDM скопления галактик создаются возмущениями плотности на больших масштабах [11]. Также классификация этих объектов до конца еще не определена. Надо отметить, что до сих пор анализ наблюдательных данных по скоплениям галактик не выполнен и соответствующая их теория формирования не разработана. Говоря более конкретно, отметим, что отсутствуют расширенный список-каталог богатых скоплений галактик и статистический анализ всех известных скоплений галактик с целью поиска их общих физических свойств, не выполнена классификация скоплений галактик по отдельным физическим параметрам. Изучение скоплений галактик представляет большой интерес также в связи с тем, что эти объекты можно использовать в качестве индикаторов физического состояния и эволюции.

Расчет параметра анизотропии. В настоящее время, когда наблюдательная база по многим астрофизическим объектам, в том числе, по скоплениям галактик, стала достаточно богатой, имеет смысл изучение проблемы эволюции скоплений галактик. Вероятным является тот факт, что скопления на первый взгляд весьма похожи друг на друга ввиду их почти сферической формы с весьма слабой симметрией. Но физически ясно, что эти скопления должны различаться внутренней структурой, степенью распределения скоростей и т.д. Надо отметить, что теоретические аспекты происхождения и эволюции скоплений галактик требуют создания базы данных наблюдений. Поэтому мы проанализировали данные наблюдений по этим объектам и нашли значения поверхностной плотности для нескольких скоплений галактик. Для этого нами были использованы базы данных SDSS DR8.

Из результатов анализа данных наблюдений для изучения вопросов эволюции скоплений галактик нам надо найти некоторые их параметры. Одним из них, в принципе, может быть параметр анизотропии скоростей. А его разные авторы определяют по-разному: как простое отношение средних значений компонент кинетической энергии радиальных и трансверсальных движений $2 < T_r > / < T_{\perp} >$, и как $1 - \sigma_r^2 / \sigma_t^2$, где σ_r^2 и σ_t^2 – Радиальная и трансверсальная компоненты дисперсии скоростей. В этой работе мы в качестве параметра анизотропии скоростей берем величину

$$A = \frac{(2\overline{\Pi^2} - \overline{T^2})}{\overline{\Pi^2}} \quad (1)$$

введенную впервые в работе [12]. В (1) $\overline{\Pi^2}$ и $\overline{T^2}$ – радиальная и трансверсальная дисперсии остаточных скоростей. Так же как в [12], мы полагаем его постоянным для всей системы в целом, хотя в реальности он должен зависеть от расстояния внутри скопления. Этот параметр нас интересует здесь, прежде всего, с точки зрения возможной его зависимости от других физических характеристик скоплений галактик, хотя он представляет также самостоятельный интерес. Дело в том, что параметр анизотропии удобен для анализа стадии эволюции скоплений галактик, потому что каждая стадия характеризуется определенной структурой и распределением плотности и скорости. С переходом от ранней стадии к более поздней, структура становится более сглаженной и стремится к более изотропному распределению скоростей (в отличие от радиально-вытянутого распределения на ранних стадиях). Значение параметра анизотропии скоростей $A=0$ соответствует сферическому распределению скоростей (поздняя стадия эволюции), $A=2$ соответствует радиально-вытянутому распределению (ранняя стадия эволюции системы).

Для определения параметра анизотропии скоростей в скоплениях галактик по данным наблюдений видимой поверхностной плотности мы будем рассматривать стационарную модель со сферической симметрией. Легко вывести из гидродинамического уравнения следующее

$$\frac{d}{dr} \left[\frac{r^2}{D} \frac{d}{dr} (D \overline{\Pi^2}) + (2\overline{\Pi^2} - \overline{T^2}) r \right] = -4\pi G D r^2, \quad (2)$$

исключая потенциал в гидродинамическом уравнении при помощи уравнения Пуассона. В (2) введена безразмерная плотность D . Если перейти к новой переменной $x = 4\pi G r / \overline{\Pi^2}$ тогда уравнение (2) примет сравнительно простой вид:

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{x^2}{D} \frac{dD}{dx} \right) = -Dx^2 - A. \quad (3)$$

Решая численно уравнение (3), получим зависимости D и $D' = \frac{dD}{dx}$ от x , причем безразмерная плотность D явно зависит от значения параметра анизотропии. Уравнение (3) мы решаем для различных значений $A \in [0; 2]$. По известным значениям D и D' можно перейти к поверхностной плотности, т.е. к проекции пространственной плотности на картинную плоскость. Далее, вычисляем поверхностную плотность посредством выражения

$$F(r) = -A \int_{r/\alpha}^{\infty} \sqrt{x^2 - (r/\alpha)^2} D'(x) dx. \quad (4)$$

Получая для заданных значений параметра анизотропии соответствующие значения поверхностной плотности $F(r)$ и сравнивая их с наблюдаемыми поверхностными плотностями для конкретных систем, выбираем оптимальное значение A . Масштабные множители определяются путем минимизации разности наблюдаемой и теоретической плотностей. Исходя из физической природы данной задачи, удобно применение достаточно апробированного симплектического метода минимизации следующей функции

$$f = \sum_{i=1}^N \left[-A \int_{r_i/\alpha}^{\infty} \sqrt{x^2 - (r_i/\alpha)^2} D(x) dx - F_0 \right]^2 \quad (5)$$

по параметрам α , A и F_0 . Здесь N - число круговых зон на фотопластинках (или изображениях), в которых подсчитывалось число звезд. Таким образом, то значение параметра анизотропии, которое дает минимум f , принимается как наиболее вероятное значение A .

Вышеуказанным методом нами вычислены значения параметра анизотропии A для 31 скоплений галактик, используя симплексный метод минимизации квадрата разности между теоретический и наблюдаемой функциями плотности. Результаты расчета даны ниже в таблице 1.

Таблица 1. Основные физические характеристики и значения параметра анизотропии для скоплений галактик

№	Названия галактик	скопления	r_m mag	R_L^*	z	r_0 arcmin	A
1	J001051.4+290940		17.98	88.90	0.3320	0.1931	0.08
2	J002016.1+000446		16.73	104.60	0.2156	0.8172	0.00
3	J002712.5-193045		17.42	94.00	0.2586	0.5740	0.88
4	J002800.9+244744		18.79	73.50	0.4839	0.2310	1.50
5	J004118.5+252609		15.77	112.30	0.1675	0.2149	0.60
6	J004511.7+084111		17.28	96.06	0.3014	2.4684	0.48
7	J023127.6+065856		15.67	156.70	0.2262	0.5312	1.12
8	J023952.7-013419		17.73	144.92	0.3712	0.1613	1.44
9	J083057.3+655031		16.25	209.09	0.1853	0.4227	0.88
10	J085007.9+360414		18.33	117.09	0.3639	1.1409	0.72
11	J090912.7+105829		15.56	200.20	0.1681	0.1259	1.24
12	J091609.0-002226		18.05	125.16	0.3163	1.4599	0.56
13	J091753.4+514338		16.08	173.82	0.2161	0.1315	1.32
14	J092048.3+302818		17.04	184.93	0.2928	0.1242	0.72
15	J094951.8+170711		17.88	133.91	0.4124	0.5140	0.92
16	J100226.8+203102		18.08	141.21	0.3376	0.6505	0.76
17	J105417.5+143904		17.18	135.02	0.2956	0.2526	1.00
18	J111450.3-121351		16.10	150.92	0.1926	0.1563	1.08
19	J112358.8+212850		16.78	108.06	0.1907	0.5638	0.96
20	J131129.5-012028		15.69	168.86	0.1791	1.0006	0.84
21	J131505.2+514903		16.76	130.18	0.2838	0.5160	1.04
22	J133238.4+503336		17.33	185.14	0.2775	0.1807	1.12
23	J133520.1+410004		16.37	176.94	0.2304	0.1898	0.8.
24	J140102.1+025242		16.06	205.45	0.2615	1.1394	0.72
25	J144431.8+311336		16.65	87.06	0.2340	0.0694	1.00
26	J153940.5+342527		16.95	135.85	0.2254	0.2480	0.96
27	J155820.0+271400		14.40	157.09	0.0871	0.1008	0.20
28	J160319.0+031645		16.67	156.13	0.2383	0.5564	0.84
29	J164019.8+464242		16.55	181.34	0.2301	0.0326	1.00
30	J164325.4+132236		16.45	114.19	0.1909	0.2691	0.00
31	J212823.4+013536		17.77	144.58	0.3857	1.4662	0.80

Из таблицы 1 видно, что 5 скоплений галактик имеют значения параметра анизотропии, близкие к нулю, т.е. в около 16 % скоплений имеет место почти сферическое распределение скоростей, и они, вероятно, находятся на более поздней стадии эволюции. Заметим, что именно при найденных значениях параметра анизотропии соответствующие полученные теоретические результаты хорошо согласуются с наблюдательными функциями поверхностной плотности. Для 4 скоплений значения параметра анизотропии скоростей являются близкими к 2. Поэтому распределение скоростей в этих скоплениях соответствует радиально-вытянутому случаю, что может быть связано, вероятно, с их нестационарностью в регулярном поле. Остальные значения параметра анизотропии для скоплений галактик оказались близкими к 1.

Далее нас интересует вопрос: можно ли классифицировать скопления галактик по параметру анизотропии скоростей? С этой целью нами составлена таблица 1.

Прежде всего, сравнивая значения параметра анизотропии скоростей, замечаем, что их можно уверенно разделить на три класса:

Классы	A	Кол. скоплений
БСГ 1	$0 < A < 0.5$	5
БСГ 2	$0.5 < A < 1$	18
БСГ 3	$1 < A < 1.5$	8

Заметим, что в интервале $1.5 < A < 2$ нет ни одного скопления, а это требует поиска в будущем дополнительных данных по видимой плотности для скоплений галактик. Тем не менее, интересно сравнить средние значения основных физических параметров трех классов этих скоплений.

Таблица 2. Средние значения характеристик трех групп

Классы	$\langle z \rangle$	$\langle r_m \rangle$, [mag]	$\langle r_{200} \rangle$, [Мпк]	$\langle R_L^* \rangle$	$\langle r_0 \rangle$, [arcmin]
БСГ 1	0.22	16.57	1.87	112.17	0.77
БСГ 2	0.27	16.97	2.02	145.39	0.59
БСГ 3	0.25	16.46	2.10	163.13	0.26

В табл. 2. даны средние значения ряда характеристик указанных групп скоплений галактик: фотометрическое красное смещение - $\langle z \rangle$, величина самого яркого члена в рентгеновском диапазоне - $\langle r_m \rangle$, радиус, в пределах которого средняя плотность скопления в 200 раз превышает критическую плотность Вселенной - $\langle r_{200} \rangle$, богатство скоплений - $\langle R_L^* \rangle$ [7], радиус ядра скоплений - $\langle r_0 \rangle$.

Также отметим результаты расчетов значений коэффициента корреляции параметра анизотропии с хорошо известными данными по другим физическим характеристикам, по которым, в принципе, можно составить двумерные или

многомерные классификации. К сожалению, эти значения коэффициента очень малы и нет возможности создания таких классификаций.

Заключение. Выполнен анализ данных наблюдений по скоплениям галактик из SDSS DR8. На основе данных наблюдений вычислено количество галактик и найдены распределения поверхностной плотности в скоплениях галактик. С помощью этих данных определены значения параметра анизотропии скоростей для 31 скопления галактик. По результатам расчета распределения скоростей, 5 скопления галактик имеют сферическую симметрию. Также, разработана классификация скопления галактик по параметрам анизотропии скоростей и показано, что их можно условно разделить на три группы. Изучены зависимости между параметром анизотропии и основными физическими характеристиками скопления галактик.

ЛИТЕРАТУРА

1. Abell G.O. // *Astrophys. J. Supp.*, Volume. 3, p.211, 1958
2. Kopylova F.G., Kopylov A.I. // *Astrophys. Bull.*, Volume 77, Issue 4, p.347, 2022
3. Kluge M., Bender R. // *Astrophys. J. Supp. Ser.*, Volume 267, Issue 2, id.41, 32 pp, 2023
4. Piraino-Cerda F., Jaffe Y.L., Lourenço A.C., Crossett J.P., Salinas V., Kim D., Sheen Y.K., Kelkar K., Pallero D., Bravo-Alfaro H. // *MNRAS*, Volume 528, Issue 1, pp.919, 2024
5. Quintana H., Ramirez A. // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, Volume 96, p.343, 1995
6. Morrison G.E., Owen F.N., Ledlow M.J., Keel W.C., Hill J.M., Voges W., Herter T. // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, Volume 146, p.267, 2003
7. Wen Z.L., Han J.L., Liu F.S. // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, Volume 199, p.34, 2012,
8. Wen Z.L., Han J.L. // *MNRAS*, Volume 436, p.275, 2013
9. Wen Z.L., Han J.L. // *ApJ*, Volume 807, p.178, 2015
10. Andreon S. // *Astron. Astrophys.*, Volume 587, p.158, 2016
11. Einasto J., Suhhonenko I., Hutsi G. et al. // *A&A*, Volume 534, p.128, 2011
12. Агекян Т.А., Петровская И.В. // *Учен. записи ЛГУ*, № 307, p.187, 1962