

Исследование взаимосвязи системы шаровых скоплений Галактики и ее окружения

Аракелян Наира Рубеновна

защита диссертации
на соискание ученой степени к.ф.-м.н.

Специальность 01.03.02
<<Астрофизика и звездная астрономия>>

Научный руководитель:
канд. физ.-мат. наук
Пилипенко Сергей Владимирович

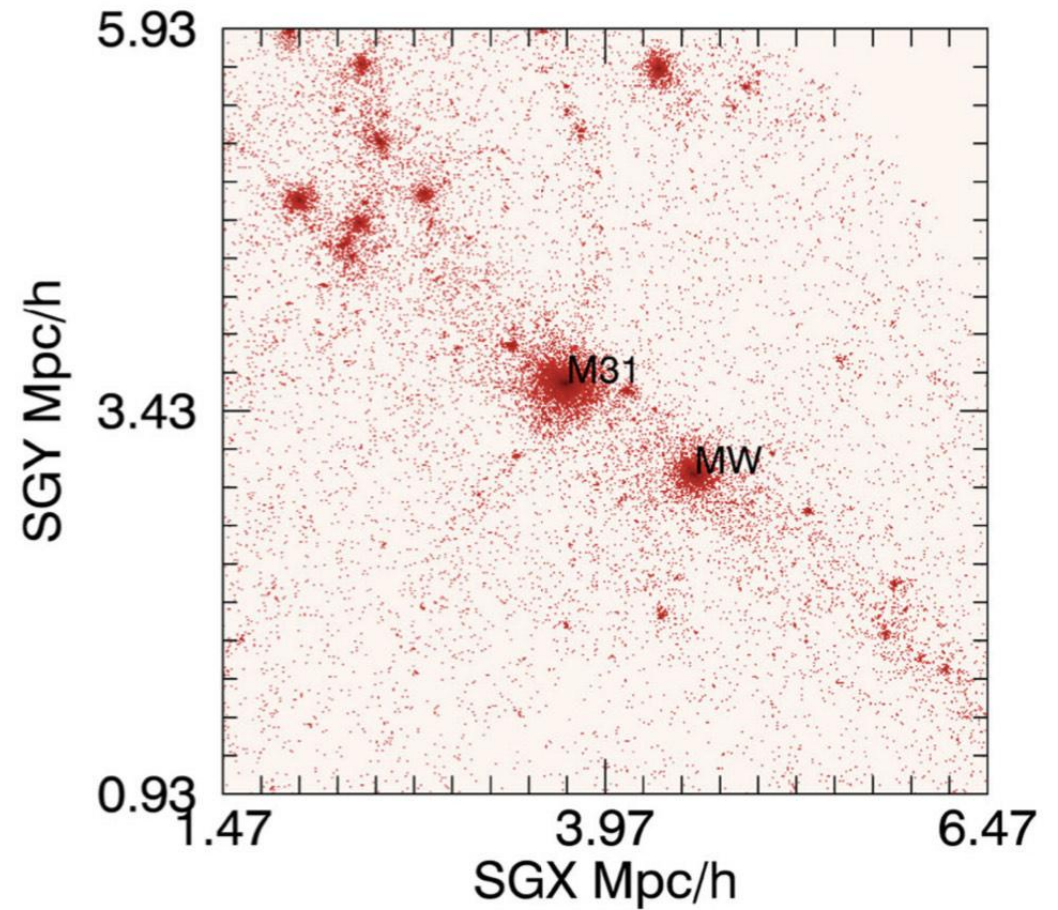
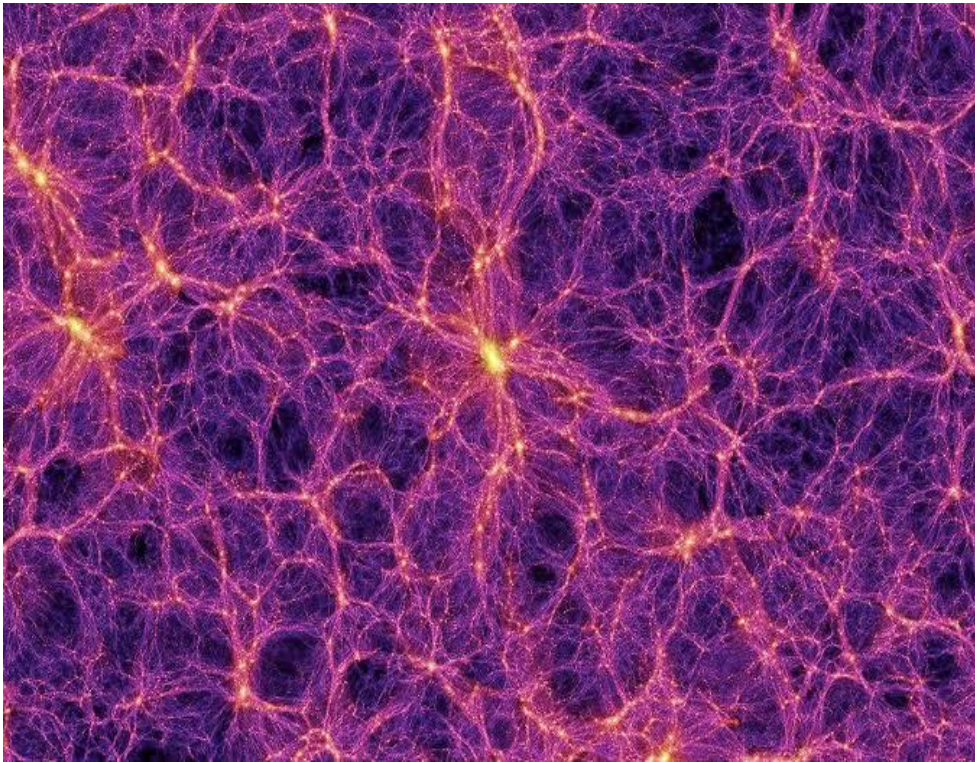
Целью данной работы является изучение взаимосвязи эволюции нашей Галактики с ее окружением с помощью самых старых объектов в Галактике, а именно шаровых скоплений (ШС). Для достижения поставленной цели были сформулированы и решены следующие основные задачи:

Глава 1: Измерение степени неоднородности распределения систем ШС и галактик-спутников Млечного Пути с помощью метода, не включающего в себя предположений о дискообразном распределении этих систем. Создание случайных искусственных каталогов сравнения, позволяющих оценить вероятность того, что та или иная структура является случайным образованием .

Глава 2: Поиск ШС, предположительно связанных с приливным потоком Стрельца (Sgr stream). Разработка нового и оригинального метода поиска.

Глава 3: Проверка пространственной ориентации системы ШС, которые образовались как внутри, так и вне Галактического диска и заведомо аккрецировавших на нашу Галактику извне. Сопоставление ориентации систем ШС с диском Галактики, а также с плоскостью Местного Сверхскопления для выявления вероятного влияния Местного Сверхскопления на распределение ШС Млечного Пути.

Крупномасштабная ячеистая структура, которая образуется в соответствии с теорией Зельдовича

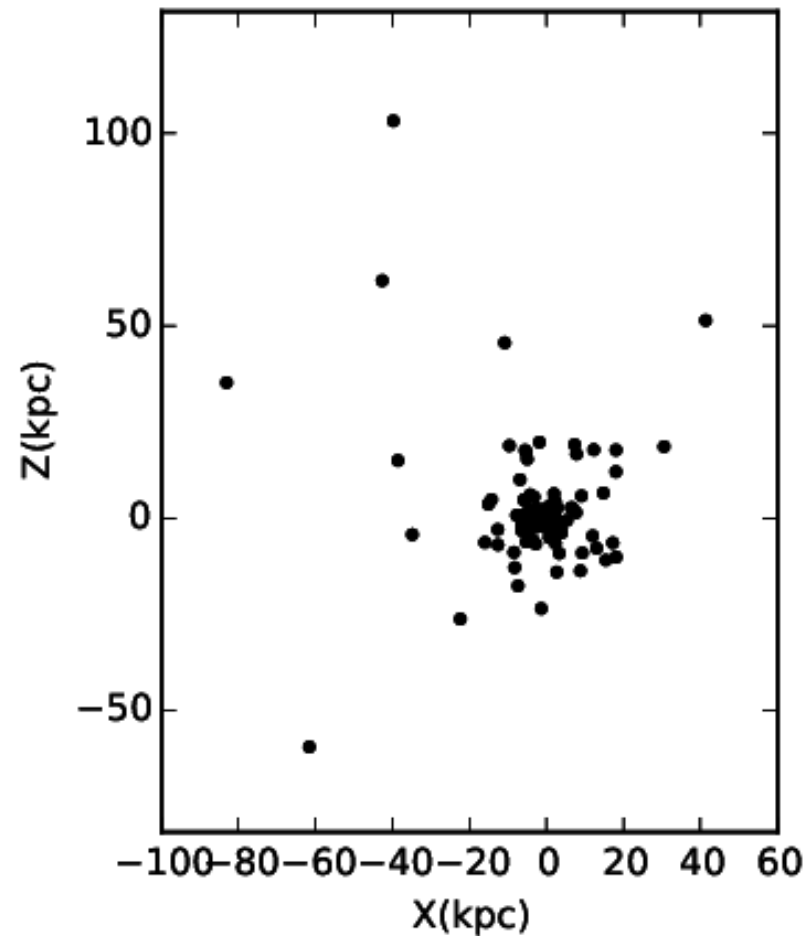
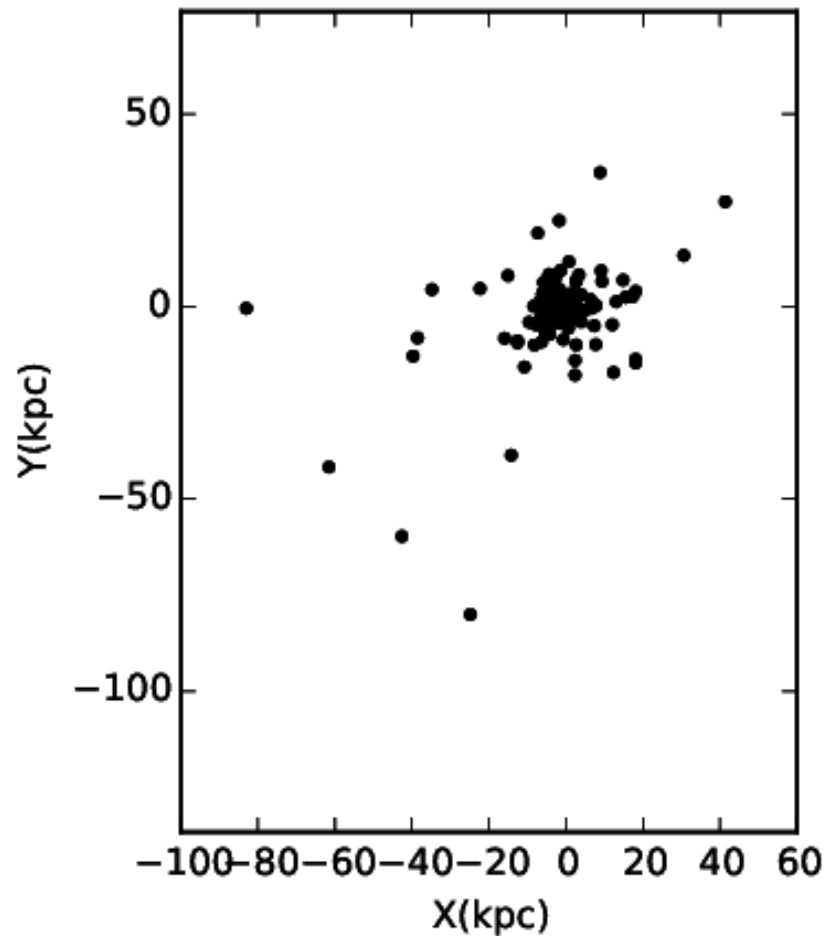


Carlesi et al. 2016

Глава I

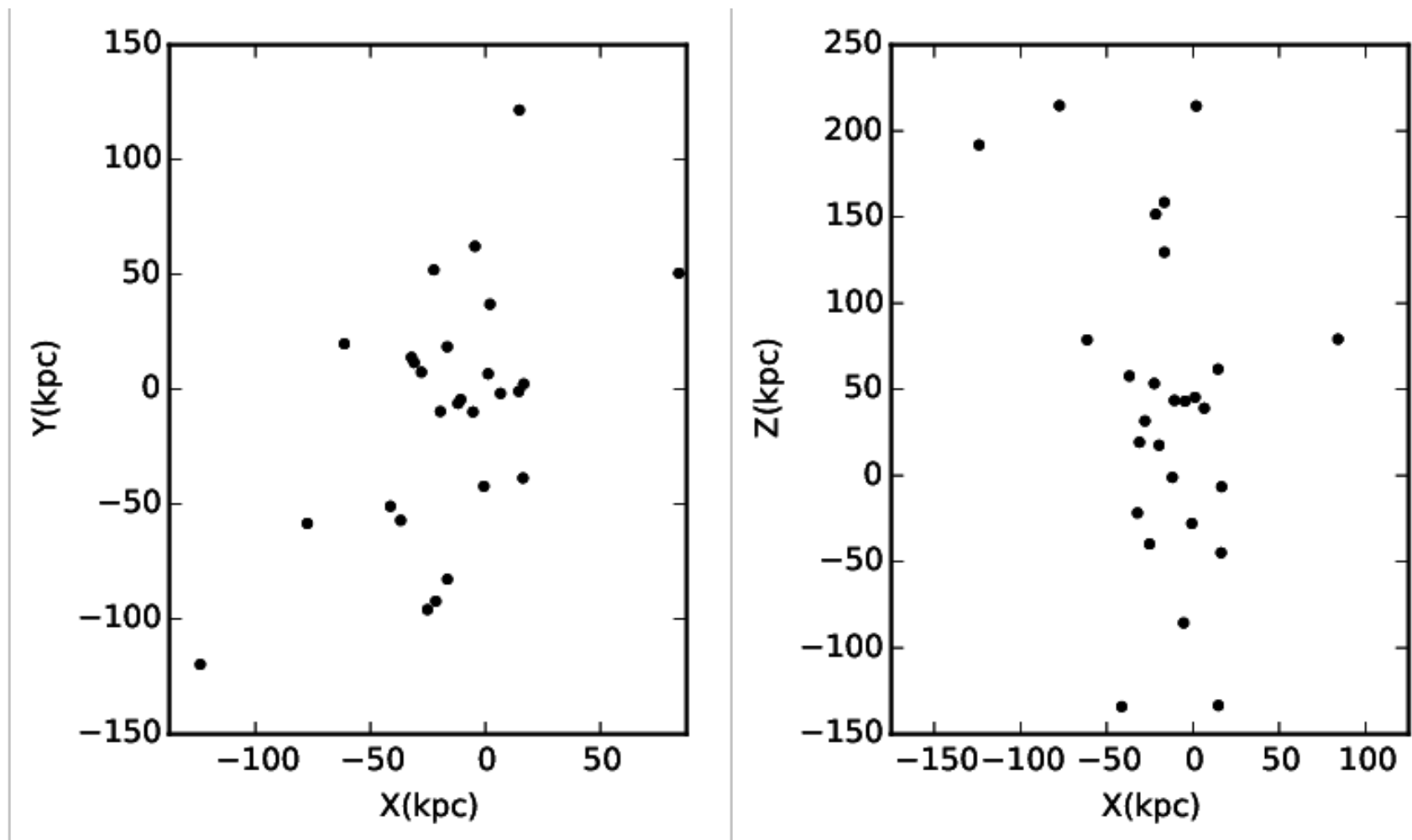
Пространственное распределение шаровых скоплений в Галактике

Распределение ШС



XYZ - декартовы координаты относительно центра Галактики. Z совпадает с полюсом Галактики, а координаты Солнца $(-8.34, 0, 0)$

Распределение галактик спутников



Kroupa et al. (2005); Metz et al. (2008); Pawlowski et al. (2015)

Тензор гирации

$$S_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_i^k x_j^k$$

Редуцированный тензор

$$J_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \frac{x_i^k x_j^k}{R_k^2}$$

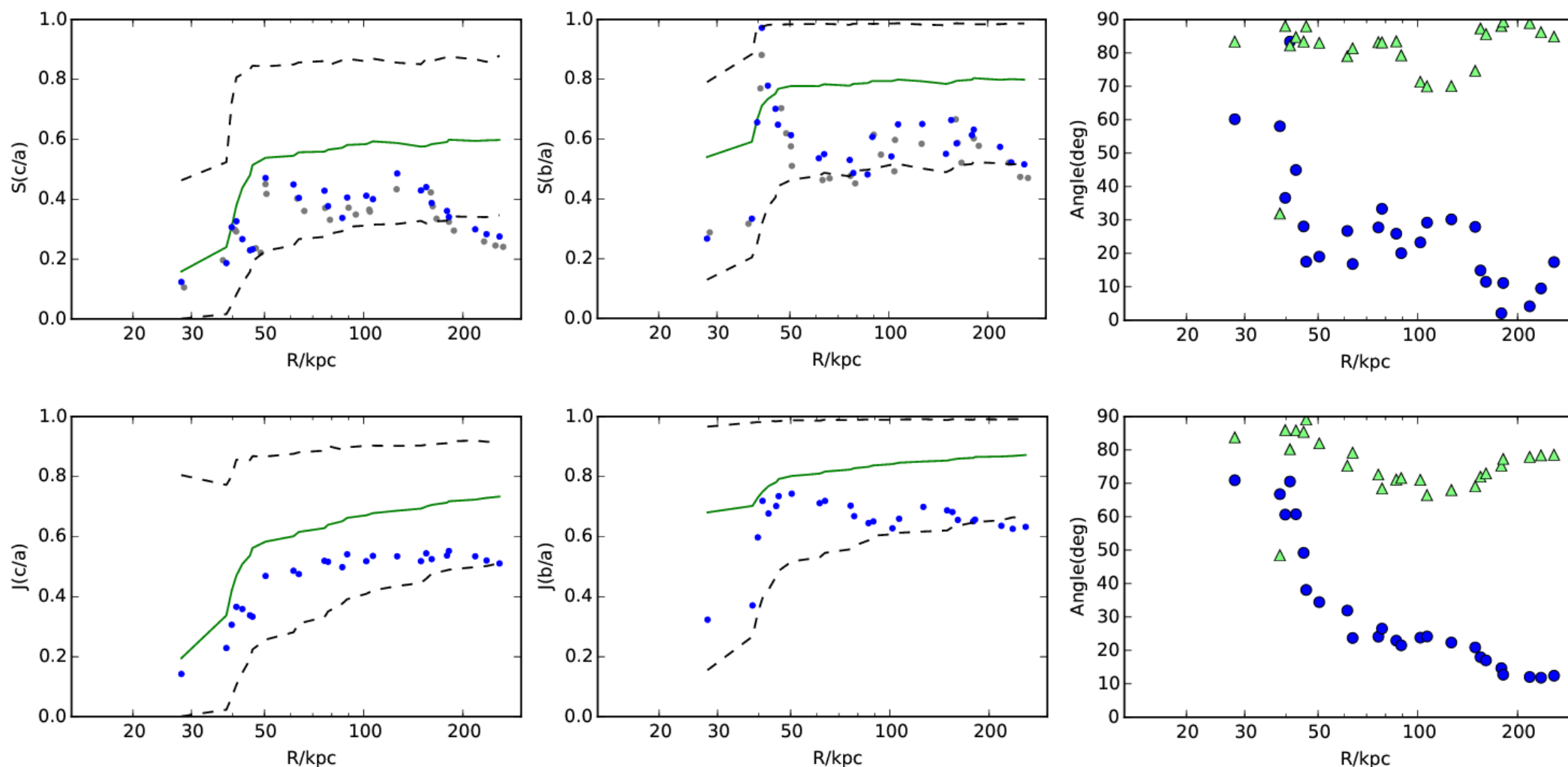
$$R_k^2 = x_k^2 + y_k^2 + z_k^2$$

Тензор инерции

$$I_{ij} = \sum_{k=1}^N m_k (\delta_{ij} r_k^2 - x_i^k x_j^k)$$

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{if } i \neq j \\ 1 & \text{if } i = j \end{cases}$$

Анизотропия для 27 галактик спутников

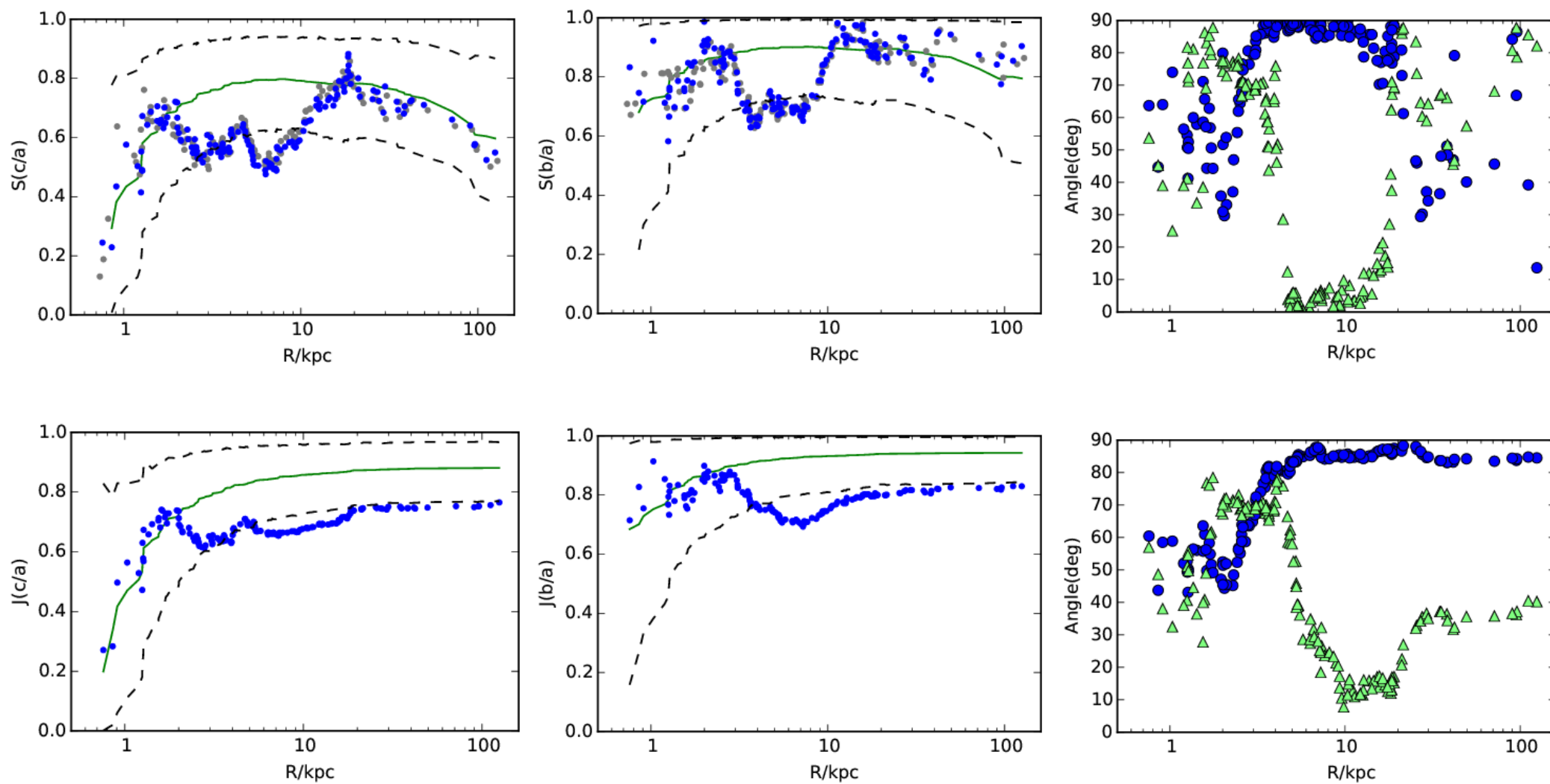


Верхний ряд для тензора гирации(S)

Нижний ряд для редуцированного тензора (J)

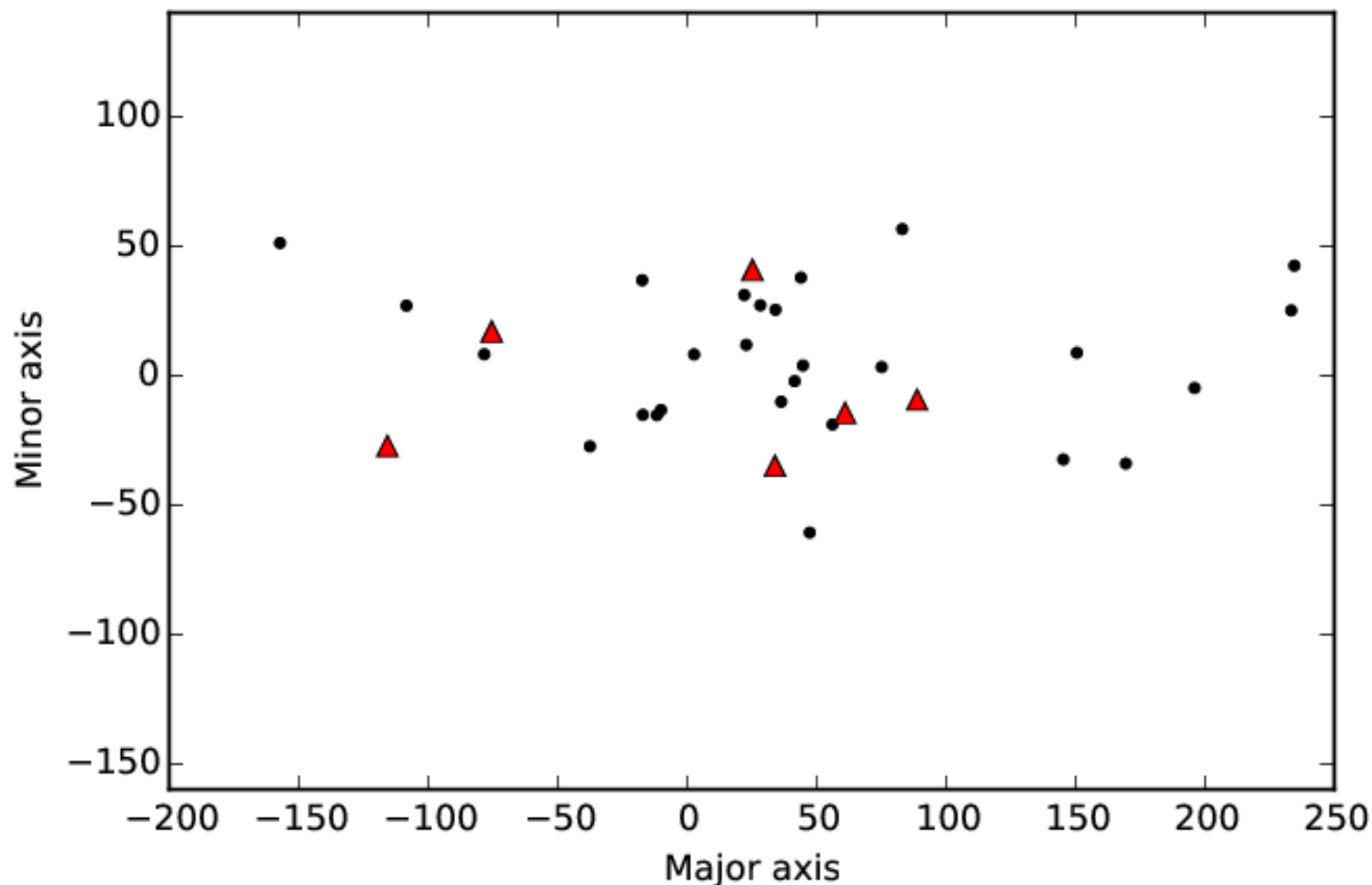
a, b, c – величины собственных осей ($a > b > c$)

Анизотропия для ШС

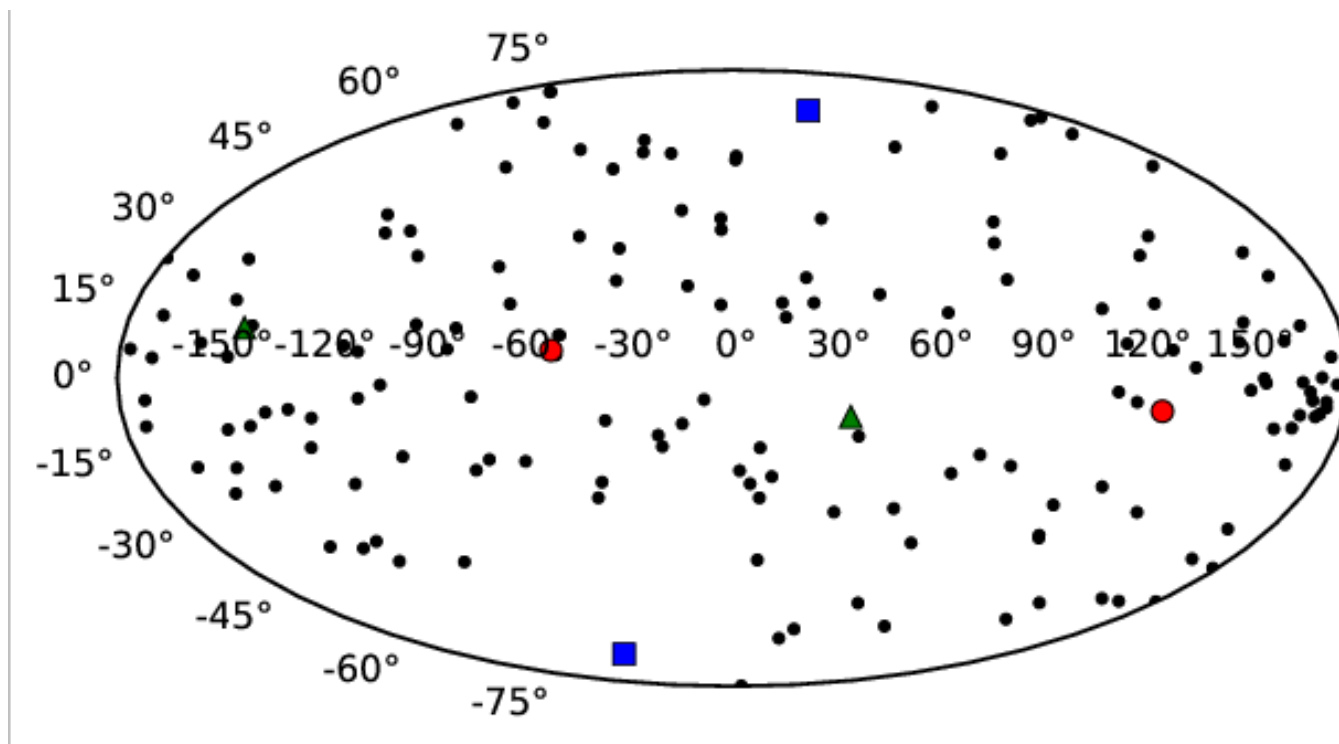


$$N(> \pm 3\sigma) = 54$$

Распределение галактик спутников в системе координат, заданной собственными векторами тензора гирации, с добавлением 6 самых отдаленных ШС



Карта неба с распределением ШС в галактических координатах. Вид из центра Галактики.



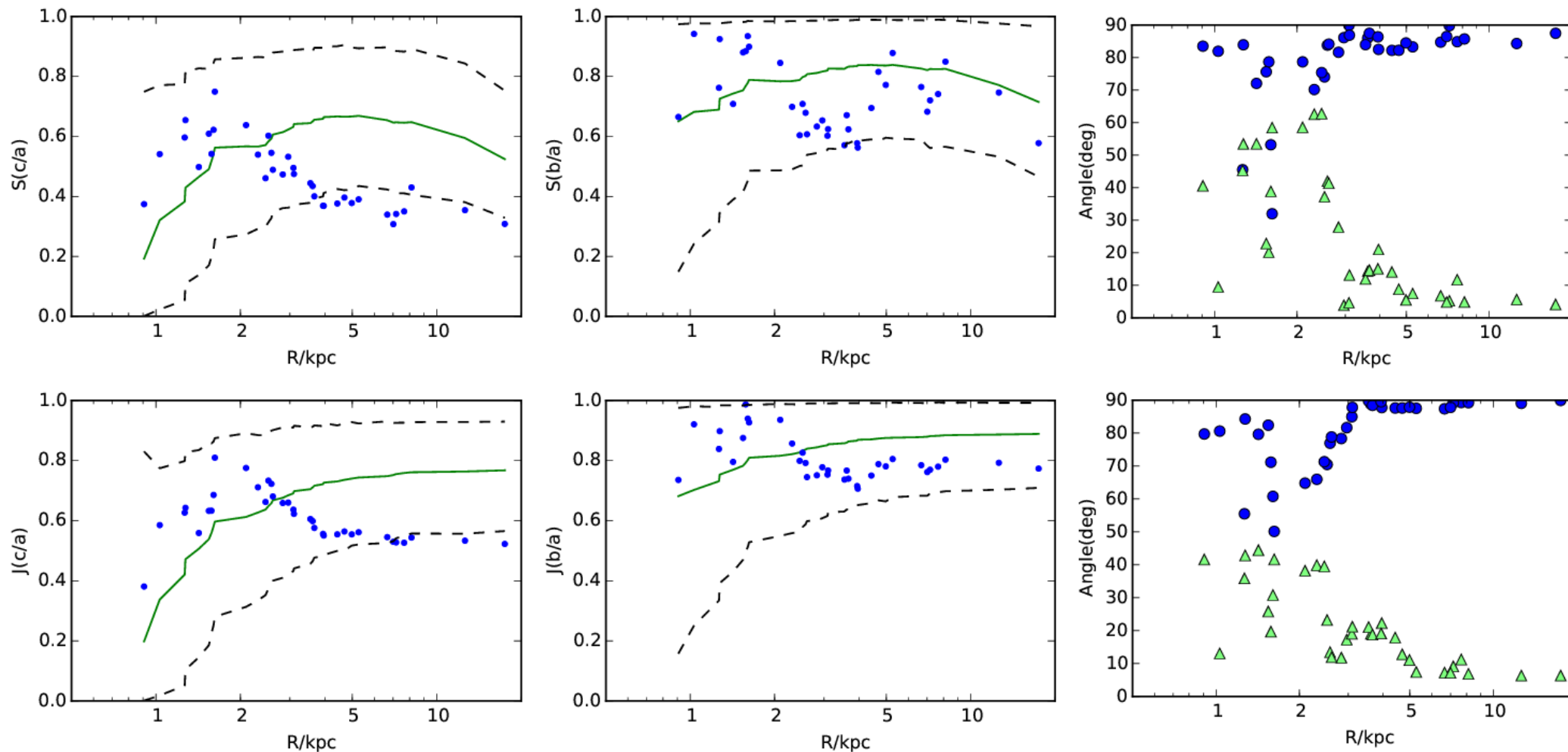
Круг - наименьшая ось тензора; Треугольник - средняя ось тензора; Квадрат - наибольшая ось тензора

ШС: $|b| < 5^\circ$ 16 ШС, для случайных - $13,7 \pm 3,5$

$|b| < 10^\circ$ 39 ШС, для случайных - $27,3 \pm 4,8$

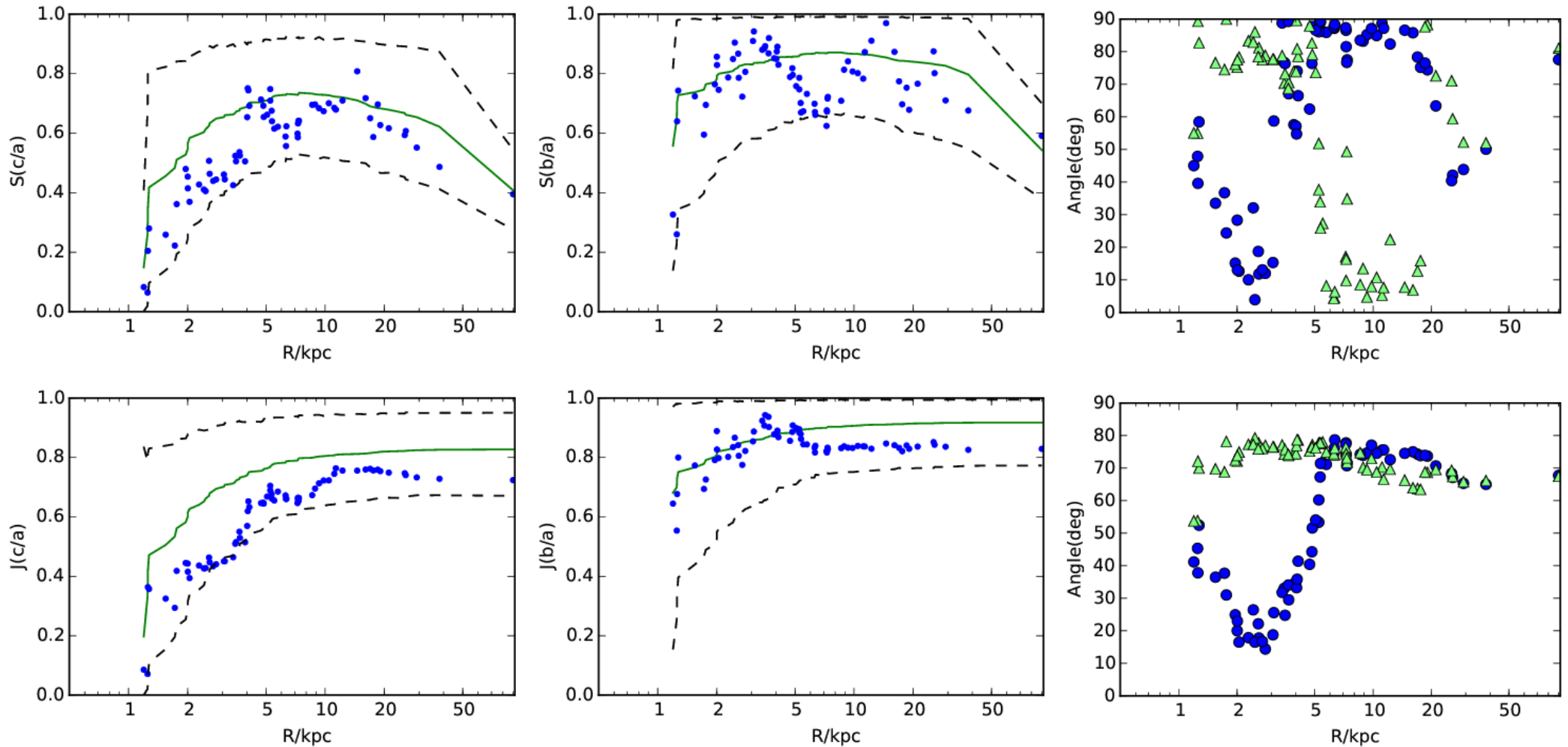
Г-С: $|b| < 5^\circ$ и $|b| < 10^\circ$ 1 спутник, для случайных - 2.4 ± 1.5 и 4.7 ± 2

Анизотропия для ШС в балдже/диске (BD)



ШС в BD (37 ШС) лежат на расстоянии от центра Галактики примерно от 0.8 до 17.5 кпк (8 ШС расположены на расстоянии > 5 кпк).

Анизотропия для ШС в старом гало (ОН)



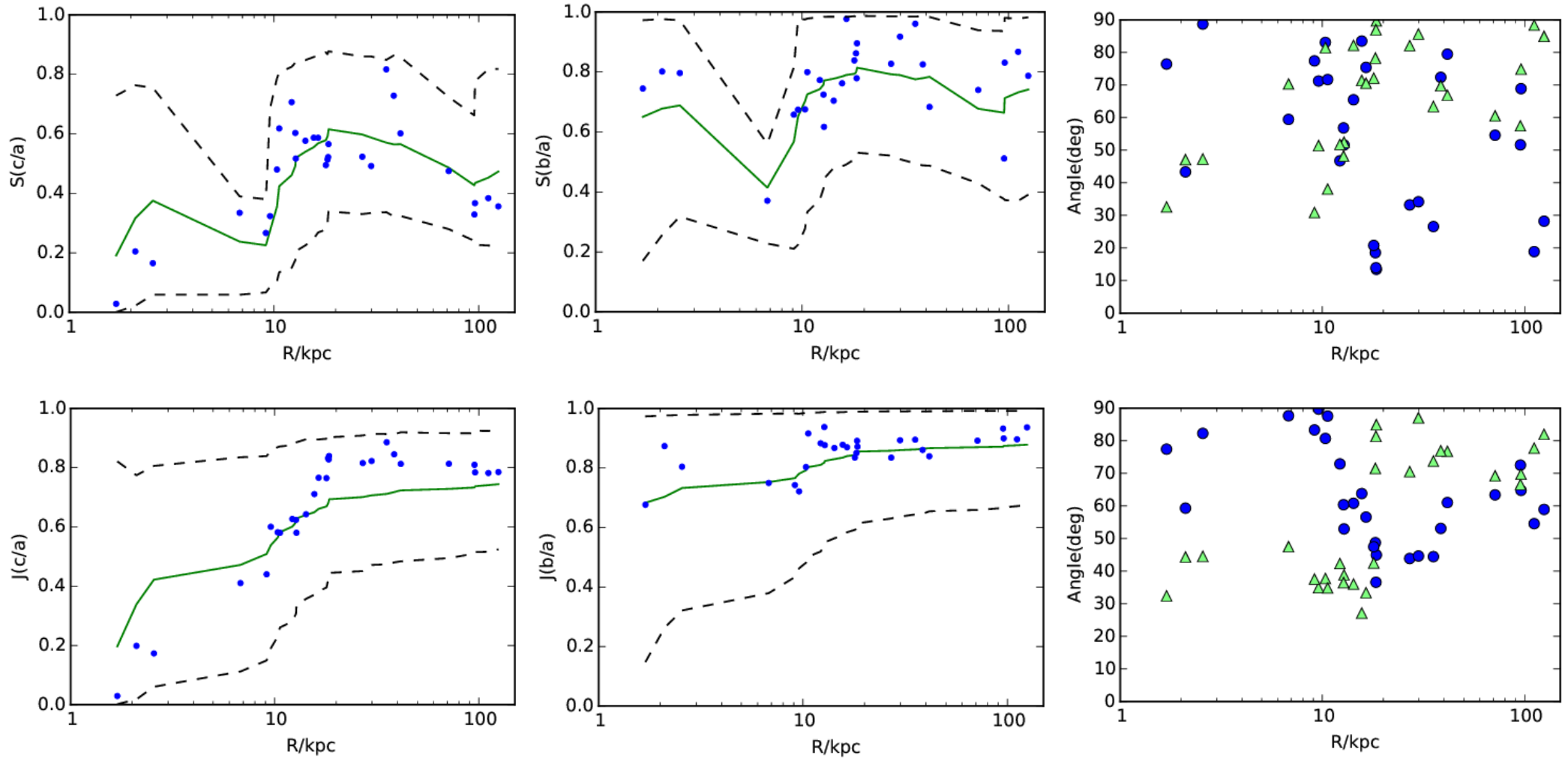
ШС в ОН (70 ШС) лежат на расстоянии от центра Галактики примерно от 0.5 до 90.2 кпк (20 ШС расположены на расстоянии > 8 кпк).

70-90° и $R < 3$ - 16 измерений малой оси с вероятностью 0.032

0-20° и $R > 6$ - 15 измерений малой оси с вероятностью 0.004

0-20° и $6 < R < 20$ - 15 измерений малой оси с вероятностью 0.001

Анизотропия для ШС в молодом гало (УН)



ШС в УН (30 ШС) лежат на расстоянии от центра Галактики примерно от 1.4 до 125 кпк.

Выводы главы I

- Для ШС полная выборка показывает значительную анизотропию только в диапазоне расстояний $2 < R < 10$ кпк. Структура имеет удлиненную форму с $c/a \approx 0.5$ и $b/a \approx 0.6$, с большой осью, лежащей в галактической плоскости. Мы считаем, что эта структура связана с галактическим диском.
- Пространственное распределение 6 самых отдаленных ШС показывает совпадение с известной плоской структурой в распределении галактик спутников. Вероятность случайной реализации такого распределения составляет 1.7%.
- Влияние зоны избегания на распределения ШС и галактик спутников на низкой галактической широте незначительное.
- ВД ШС показывают изотропное распределение при $R < 2$ и дискообразную структуру при $R > 3$ с $c/a \approx 0.3$ и $b/a \approx 0.6$ компланарную с галактическим диском. ОН ШС на $R < 3$ кпк, показывают сигараподобную структуру, перпендикулярную к галактической плоскости с $c/a \approx 0.3$ и $b/a \approx 0.7$. При $R > 6$ кпк он трансформируется в почти изотропное распределение. УН ШС не показывают явной анизотропии.

Глава II

Шаровые скопления, потерянные сфероидальной карликовой галактикой в Стрельце

Параметры для карликовой сфероидальной галактики в Стрельце в LM10a

$$(l, b) = (5^{\circ}.6, -14^{\circ}.2)$$

Расстояние от Солнца 28 кпк

Орбита спутника в момент наблюдения характеризуется

направлением полюса

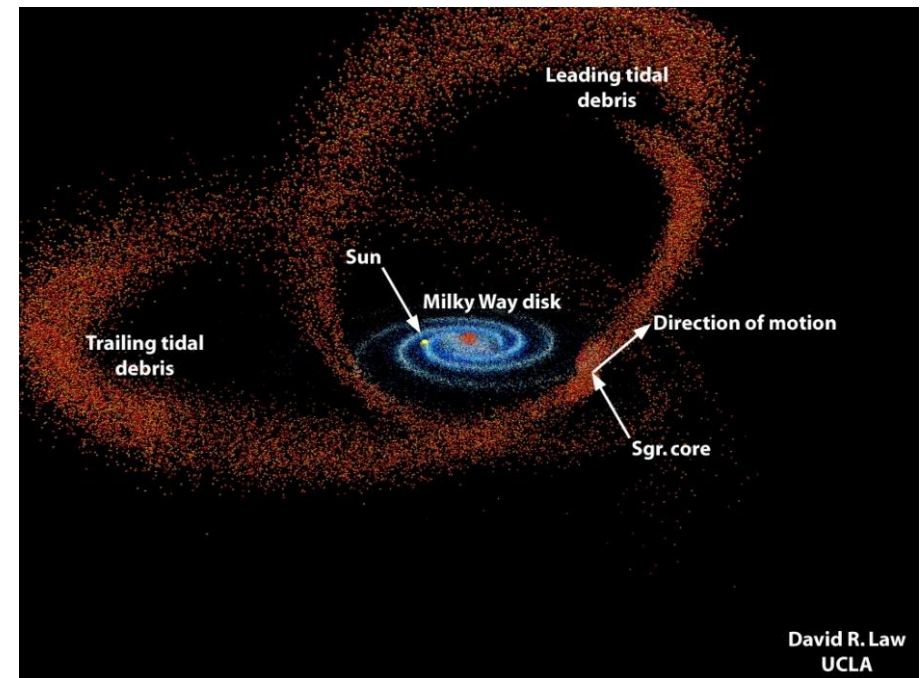
$$(l_p, b_p) = (273^{\circ}.8, -14^{\circ}.5)$$

Лучевой скоростью 171 км/с

Трёхмерная скорость галактики в Стрельце

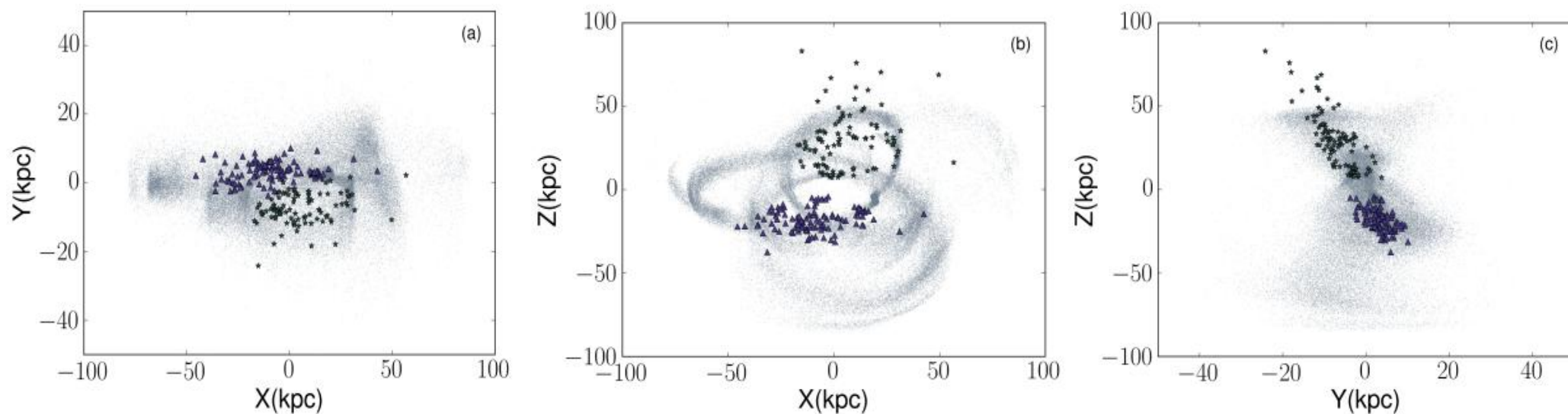
$$(V_x, V_y, V_z) = (230, -35, 195) \text{ км/с}$$

$$\text{Масса } 2.5^{+1.3}_{-1.0} \times 10^8 M_{\odot}$$



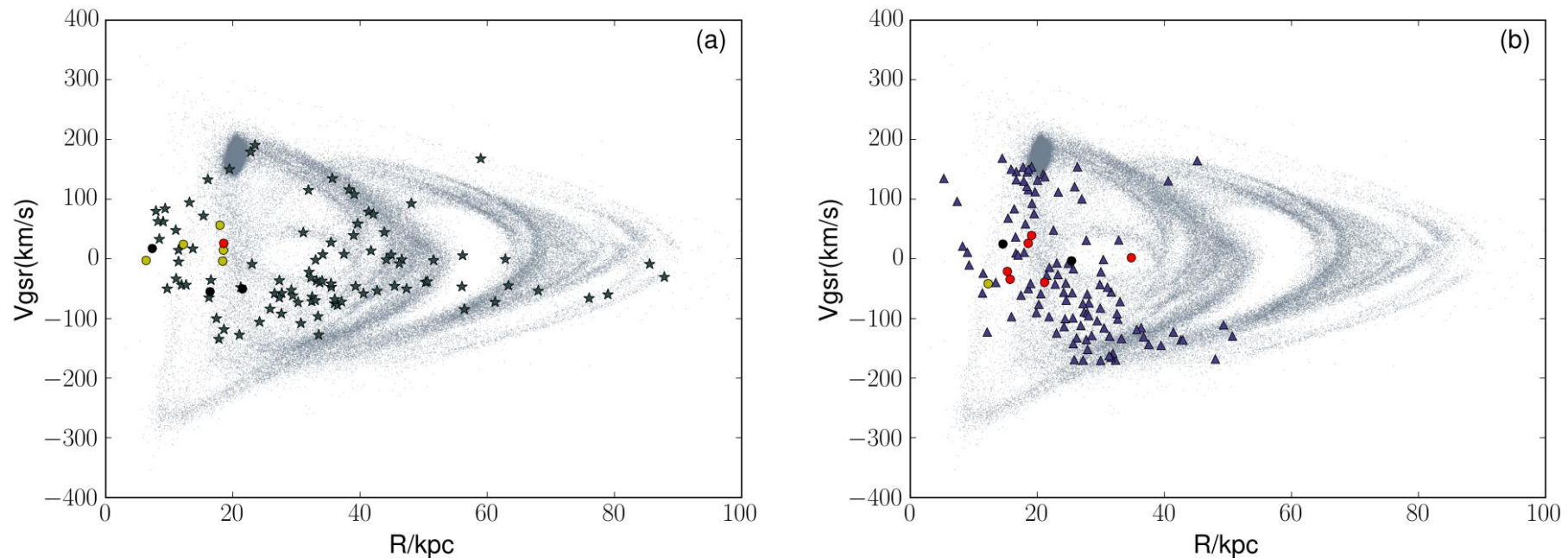
LM10a – Law and Majewski (2010a)

Приливной поток Sgr в трех проекциях



Серыми точками представлен модель потока Sgr (LM10a), звездочками показаны звезды в ведущем рукаве потока, а треугольниками показаны звезды в ведомом рукаве (наблюдаемые данные). XYZ – Декартовы координаты относительно центра Галактики.

Лучевые скорости в зависимости от Галактоцентрического расстояния



Наблюдаемые скорости звезд из ведущего (звездочки) и ведомого рукава (треугольники). Модели LM10a приливного потока Sgr (серые точки). Красные кружки – ШС, с большой вероятностью принадлежащие потоку (0 ШС в ведущем рукаве, 5 ШС в ведомом рукаве и еще 1 ШС, которое показано на обеих панелях (a, b) – NGC6715, которое находится в центре Sgr dSph). Желтые точки – кандидаты в шаровые скопления – члены потока Sgr (5 ШС в ведущем и 1 в ведомом рукаве). Черными точками показаны остальные 5 ШС.

$V_{gsr} = V_{lsr} + 220 \sin(l) \cos(b)$ км/с, где V_{lsr} – скорость в локальном стандарте покоя.

Вероятности принадлежности ШС потоку Sgr

Название	Вероятность	V_{gsr} (км с ⁻¹)	$\langle V_{gsr}^* \rangle$ (км с ⁻¹)	$\langle V_{gsr}^{**} \rangle$ (км с ⁻¹)	Рукав	Тип
NGC 6864 (M75)	0.013	-189.08	129.40±377.31	147.12±99.31	Ведомый	ОН
NGC 5466	0.016	106.93	-32.85 ±102.40	-53.47 ±189.40	Ведущий	УН
→ NGC 288	0.019	-44.83	154.59±260.99	-34.31 ±167.99	Ведомый	ОН
→ NGC 5272 (M3)	0.036	-147.28	-72.07 ±213.21	-36.70 ±135.21	Ведущий	УН
→ NGC 5053	0.048	42.77	-35.98 ±274.16	-51.16 ±193.16	Ведущий	УН
NGC 5897	0.052	101.31	-264.20 ±126.87	53.56±132.87	Ведущий	ОН
→ NGC 5024 (M53)	0.060	-62.85	-4.01 ±102.88	-63.52 ±210.88	Ведущий	ОН
NGC 7492	0.071	-176.70	156.99±264.21	-5.92 ±115.21	Ведомый	ОН
→ Pal 12	0.076	27.91	104.26±110.60	69.52±116.60	Ведомый	SG
→ NGC 5904 (M5)	0.079	53.70	-189.19 ±471.07	25.57±207.07	Ведущий	ОН
→ Pal 5	0.083	-58.60	-124.22 ±159.52	74.13±174.52	Ведущий	УН
→ Terzan 7	0.092	159.45	183.57±172.53	151.15±94.53	Ведомый	SG
NGC 4147	0.100	179.52	51.25±89.13	-91.64 ±149.13	Ведущий	SG
→ NGC 6715 (M54)	0.144	143.06	187.46±91.94			SG
→ Arp 2	0.252	123.01	169.73±93.48	146.45±87.48	Ведомый	SG
→ Whiting 1	0.275	-130.41	-114.02 ±118.97	-106.11 ±139.97	Ведомый	UN
→ Terzan 8	0.586	148.53	164.84±87.39	146.45±84.39	Ведомый	SG

Название	V_x (км с ⁻¹)	V_y (км с ⁻¹)	V_z (км с ⁻¹)	$\langle V_x \rangle$ $3\sigma_x$ (км с ⁻¹)	$\langle V_y \rangle$ $3\sigma_y$ (км с ⁻¹)	$\langle V_z \rangle$ $3\sigma_z$ (км с ⁻¹)
NGC 6864	66.92	-83.26	49.40	-202.82 478.13	39.98 113.00	108.39 221.00
NGC 5466	235.28	-50.46	232.32	341.41 78.38	10.72 137.24	62.21 95.24
NGC 288	9.89	-80.69	50.55	-232.32 291.17	80.45 74.39	-176.78 207.83
NGC 5272	-60.46	135.49	-134.57	336.64 108.89	-76.25 258.14	-12.86 204.53
NGC 5053	-52.38	148.20	35.11	333.11 68.72	-12.02 90.50	22.92 281.93
NGC 5897	34.13	-133.63	88.40	378.21 99.05	-77.91 142.43	36.30 160.49
NGC 5024	-58.06	158.52	-71.86	334.13 68.24	-8.40 80.15	49.14 82.31
NGC 7492	-5.14	-95.43	63.68	-239.03 135.29	62.02 171.92	-74.85 257.15
→ Pal 12	-339.19	12.40	116.00	-328.84 77.72	-30.82 87.35	105.78 95.45
NGC 5904	-304.75	86.82	-183.79	284.51 784.37	-23.71 384.20	-7.75 135.14
Pal 5	50.24	-170.32	-8.79	303.09 94.01	-19.26 124.97	117.33 231.80
→ Terzan 7	-260.69	-5.65	182.9	-266.06 183.56	16.76 210.95	175.38 191.66
NGC 4147	40.98	-10.08	130.87	319.89 75.53	-34.38 106.73	30.07 94.40
→ NGC 6715	-229.62	3.26	189.18	-247.83 84.02	-28.67 87.77	205.01 81.35
→ Arp 2	-251.65	-20.12	180.69	-253.95 91.07	-31.41 82.49	173.64 78.89
→ Whiting 1	-210.54	36.01	12.03	-254.12 103.82	7.99 110.99	-5.52 99.65
→ Terzan 8	-271.58	-1.88	161.22	-265.75 81.59	-28.79 79.37	176.13 82.73

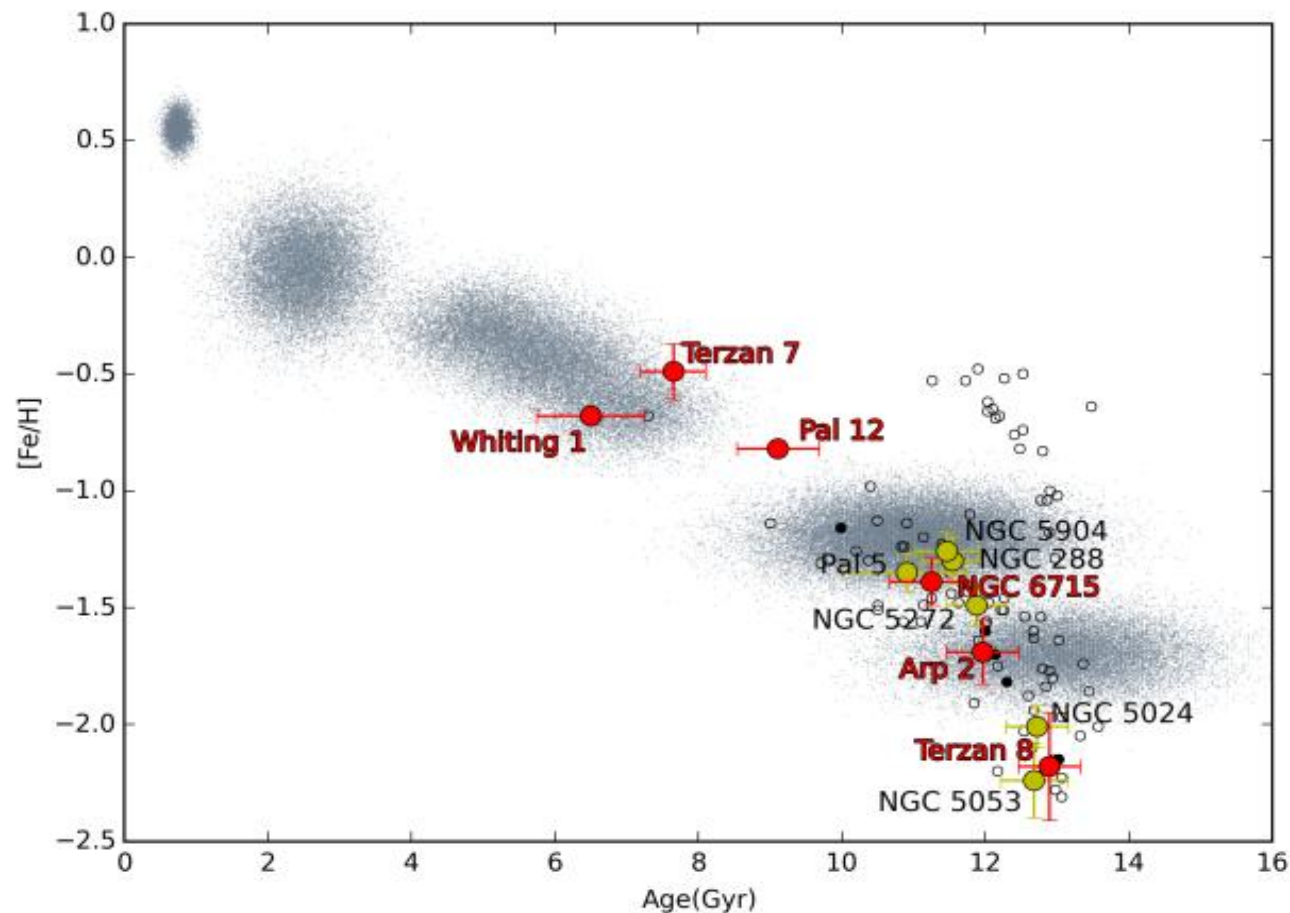
Пространственные скорости (V_x, V_y, V_z) для 17 ШС (Baumgardt et al. 2019) в потоке и средние пространственные скорости для ближайших 6 звезд в модельном потоке, где ось X направлена от центра Галактики к Солнцу, Y совпадает с направлением вращения Галактики в солнечной позиции и Z указывает на северный Галактический полюс.

Категория А: 6 скоплений, которые по кинематике принадлежат потоку - Pal 12; Terzan 7; NGC 6715; Arp 2; Whiting 1 и Terzan 8

Категория Б: 6 скоплений, для которых наблюдается расхождение по собственным движениям - NGC 288; NGC 5272; NGC 5053; NGC 5024; NGC 5904 и Pal 5

Категория В: 5 скоплений, которые не принадлежат потоку по кинематике - NGC 6864; NGC 5466; NGC 5897; NGC 7492 и NGC 4147

Зависимость “возраст – металличность”



Серые точки - модель LM10a. Красные точки - 6 ШС из категории А, желтые точки - 6 скоплений категории Б. Черные точки (5 ШС) - скопления категории В. Пустые черные круги – это оставшиеся ШС Галактики.

Выводы главы II

Из 157 ШС 17 с большой вероятностью связаны с карликовой сфероидальной галактикой в Стрельце. Эти 17 ШС делятся на 3 категории:

- А: несомненно в потоке, 6 ШС: Terzan 8; Whiting 1; Arp 2; NGC 6715; Terzan 7 и Pal 12. Выбранные скопления совпадают по всем параметрам: по пространственным положениям, по положению на зависимости “возраст – металличность”, по лучевым и пространственным скоростям.
- Б: кинематические выбросы, 6 ШС: Pal 5; NGC 5904; NGC 5024; NGC 5053; NGC 5272 и NGC 288. Это шаровые скопления, которые совпадают по пространственному положению, по положению на зависимости “возраст – металличность”, но отличаются по пространственным скоростям.
- В: кандидаты низшего ранга, 5 ШС: NGC 6864; NGC 5466; NGC 5897; NGC 7492; и NGC 4147. Эти скопления совпадают по положению на зависимости “возраст – металличность”, и вероятности пространственного нахождения в потоке велики, но они расходятся по лучевым и пространственным скоростям.

Глава III

Шаровые скопления как индикаторы эволюции Галактики

Процент ШС, образовавшихся *ex situ*, а затем аккрецировавших:

Forbes et al. (2020) – 54 % ШС (87 скоплений из 160)

Kruijssen et al. (2019) - 43 %

Massari et al. (2019) – 60 %

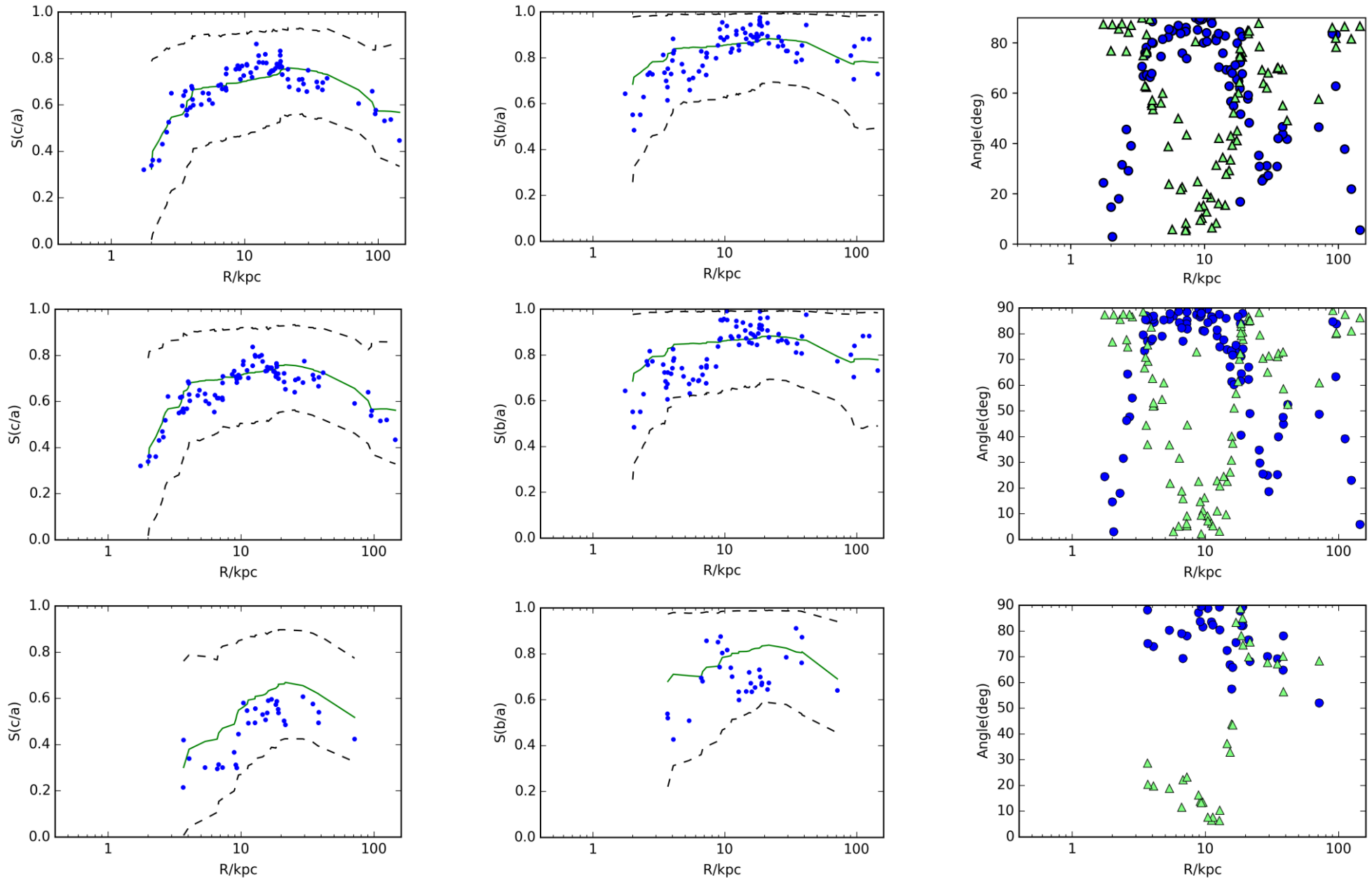
Количество ШС, принадлежащих разным потокам:

Forbes– 87 ШС (Forbes et al. (2020)) на расстоянии от 1.42 до 144.77 кпк от центра Галактики	Massari – 89 ШС (Massari et al. (2019)) от 1.42 до 144.77 кпк	Myeong – 34 ШС (Myeong et al.(2019)) от 2.42 до 71.36 кпк
6 - (Sgr dSph); 28 - карликовой галактике Gaia-Enceladus; 9 - карликовой галактике Sequoia; 21- низкоэнергетическому спутнику Koala; 9 - маломассивному спутнику – Helmi streams; 11 -объединены в отдельную группу - High energy group	8 - (Sgr dSph); 26 (+6 кандидатов) - Gaia- Enceladus; 10 - Helmi streams; 7 - Sequoia; 25 - Low energy; 11 - High energy	6 - (Sgr dSph); 21 - Gaia Sausage; 7 - Sequoia

Основной список приливных потоков, из которых аккрецировала значительная часть ШС:

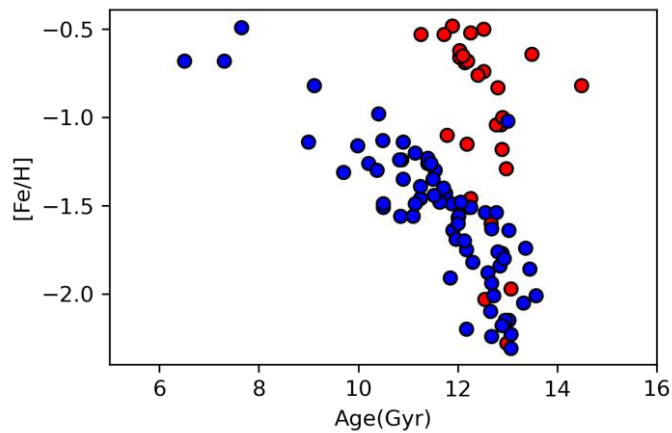
- 1) Карликовая сфероидальная галактика Стрельца (Sgr dSph) с ядром NGC 6715 (M54).
- 2) Галактика Секвоя (Sequoia) с ядром NGC 5139 (ω Cen).
- 3) Поток Хелми (H99).
- 4) Гайя-Энцелад (Gaia-Enceladus) с ядром NGC 1851. Другие возможные вариации (названия) этого потока: Колбаса Гайи (Gaia Sausage) или Большой Пес (СМа).
- 5) Низкоэнергетический прародитель Коала, которому может быть эквивалентен Kraken, а так же низкоэнергетичная группа (Low energy) ($E < -1.86 \times 10^5 \text{ км}^2 \text{ с}^{-2}$).
- 6) Высокоэнергетичная группа (High energy) ($E > -1.5 \times 10^5 \text{ км}^2 \text{ с}^{-2}$).

Анизотропия для выборок ШС по Forbes , Massari и Myeong

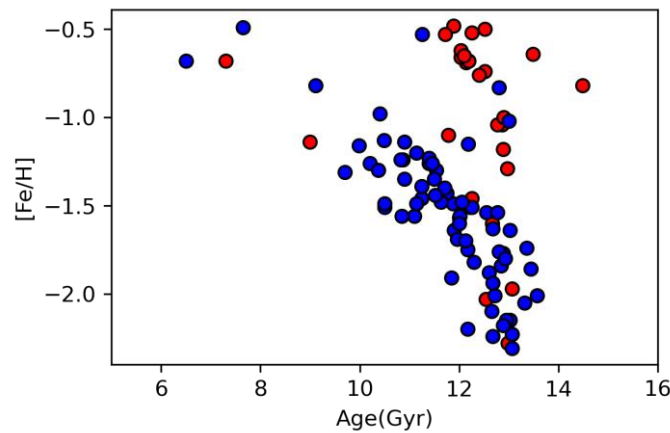


На расстоянии от 3.5 до 20 кпк под углом более 70° , с $n=0$, вероятность получить распределение, подобное правому столбцу равна 4.5, 0.6 и 1.1% для выборок Forbes, Massari и Myeong соответственно. Чтобы вероятность превысила 10% , в диске должно находиться $n=6$, 16 и 8 ШС.

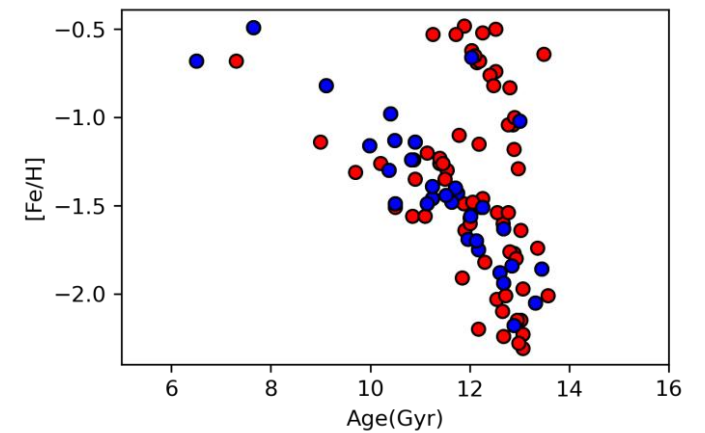
Возраст в зависимости от металличности ШС для выборок скоплений по Forbes, Massari и Myeong



Forbes



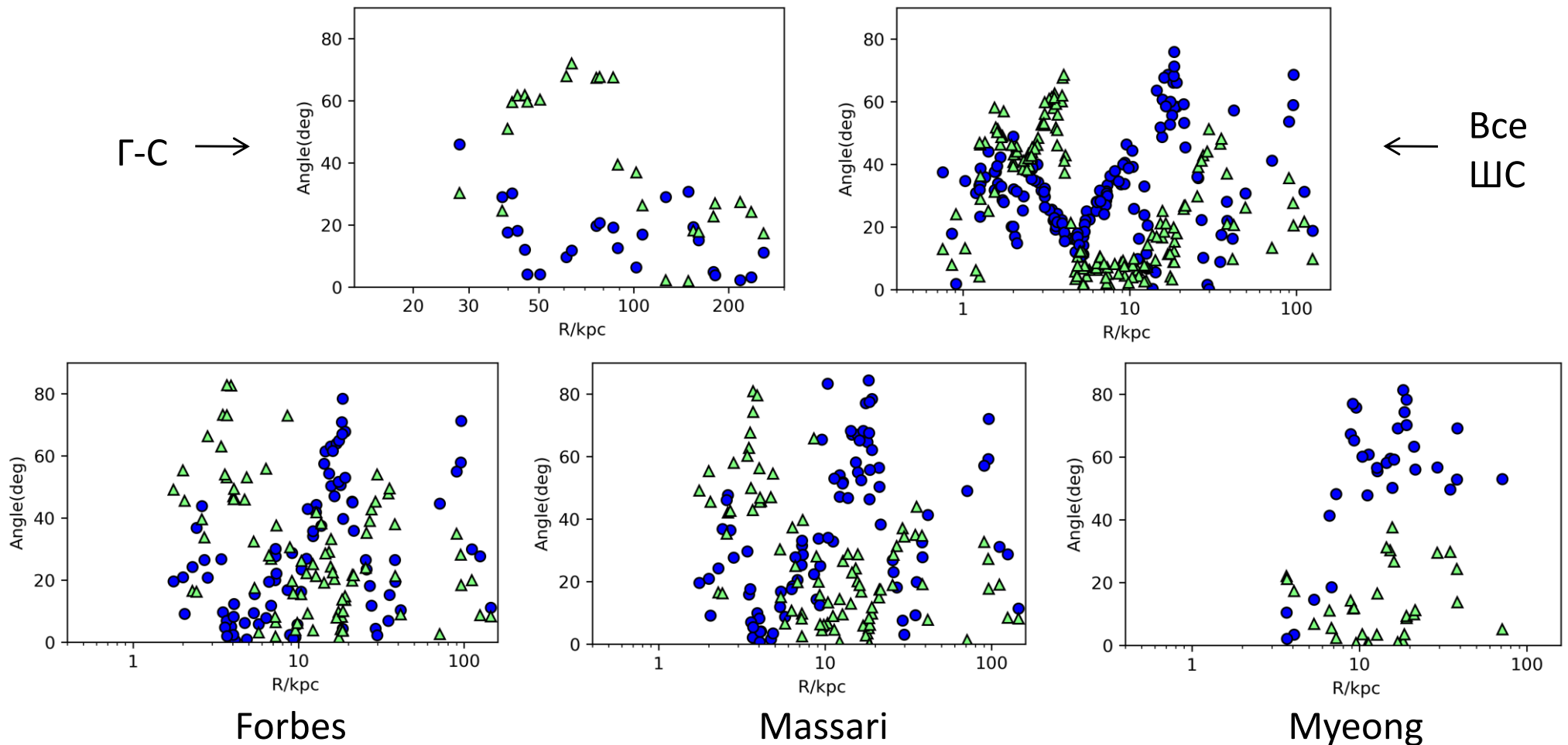
Massari



Myeong

- - скопления, образовавшиеся ex situ
- - скопления, образовавшиеся in situ.

Влияние местного сверхскопления на распределение ШС, а также карликовых галактик- спутников Млечного Пути



“Угол” между плоскостью LSC и малой (зеленые треугольники) или большой (синие точки) осью распределения представлен как функция галактоцентрического расстояния для спутников Галактики и ШС .

Выводы главы III

- Измерения анизотропного распределения ШС, принадлежавших приливным потокам, с помощью тензора гирации показало, что для аккрецированных ШС не наблюдается статистически значимой анизотропии.
- С помощью случайных каталогов показано, что часть ШС из выборок Forbes, Massari и Myeong возникли в диске Галактики, и это хорошо согласуется с результатами других авторов, что часть ex-situ скоплений на самом деле генетически связана с нашей Галактикой.
- Зависимость “возраст–металличность” демонстрирует бимодельность, и две разные ветви явно показывают разницу между скоплениями, образовавшимися в потоках и в диске Галактики.
- Проверка вероятного влияния Местного Сверхскопления на распределение галактик-спутников и ШС Млечного Пути показало, что плоскость галактик-спутников перпендикулярна диску Галактики и сверхгалактической плоскости одновременно. Для ШС на расстояниях до 20 кпк прослеживается влияние только диска Галактики, на расстояниях около 30 кпк возможно совпадение ориентации системы ШС со сверхгалактической плоскостью, а на больших расстояниях (более 100 кпк) ориентация напоминает таковую для галактик-спутников.

Основные положения, выносимые на защиту:

1) Найдены следующие особенности распределения шаровых скоплений (ШС) Галактики. Система ШС показывает статистически значимую анизотропию только в диапазоне расстояний $2 < R < 10$ кпк, и эта анизотропия связана с диском Галактики. Структура имеет удлиненную форму с отношением осей $c/a \approx 0.5$ и $b/a \approx 0.6$, с большой осью, лежащей в Галактической плоскости. Пространственное распределение шести самых отдаленных ШС показывает совпадение с известной плоской структурой в распределении галактик-спутников, которая может представлять собой остаток “блина Зельдовича”, а шесть ШС в этом случае были аккрецированы вместе с галактиками-спутниками. Вероятность случайной реализации такого распределения составляет 1.7%. Влияние зоны избегания на распределения ШС и галактик-спутников на низкой Галактической широте несущественное. (Глава 1).

2) Из 157 известных на данный момент ШС 17 с большой вероятностью связаны с карликовой сфероидальной галактикой в Стрельце и образованным при ее частичном разрушении приливным потоком. Эти 17 ШС делятся на три категории на основании того, совпадают ли они со звездным потоком только по пространственным положениям и соотношению “возраст–металличность” (В), также по лучевым скоростям (Б) или также по лучевым и пространственным скоростям (А) :

А: несомненно в потоке, шесть ШС: *Terzan 8; Whiting 1; Arp 2; NGC 6715; Terzan 7* и *Pal 12*.

Б: кинематические выбросы, шесть ШС: *Pal 5; NGC 5904; NGC 5024; NGC 5053; NGC 5272* и *NGC 288*.

В: кандидаты низшего ранга, пять ШС: *NGC 6864; NGC 5466; NGC 5897; NGC 7492* и *NGC 4147*. (Глава 2).

3) Для ШС, принадлежащих известным на сегодня приливным потокам, образовавшимся при разрушении аккрецированных на Галактику спутников, не наблюдается статистически значимой анизотропии. Вместе с тем, пространственная ориентация распределения аккрецированных ШС свидетельствует о том, что около 10% ШС ошибочно отнесены другими авторами к аккрецированным, на самом деле они генетически связаны с Галактикой. (Глава 3).

4) Плоскость галактик-спутников перпендикулярна диску Галактики и сверхгалактической плоскости одновременно. Для ШС на расстояниях до 20 кпк прослеживается влияние только диска Галактики, на расстояниях около 30 кпк возможно совпадение ориентации системы ШС со сверхгалактической плоскостью, а на больших расстояниях (более 100 кпк) ориентация напоминает таковую для галактик-спутников. (Глава 3).

Список работ, опубликованных по теме диссертации в журналах, рекомендованных ВАК:

[A1] Arakelyan N. R., S. Pilipenko V., Libeskind N. I. Spatial distribution of globular clusters in the Galaxy // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society - 2018, Vol. 481, Issue 1, p. 918-929.

[A2] Аракелян Н. Р. Влияние Галактического диска и галактик-спутников на пространственное распределение шаровых скоплений // Краткие Сообщения по физике ФИАН - 2019, № 3, С. 12-16 (Англоязычная версия: Arakelyan N. R. Effect of the Galactic disk and satellite galaxies on the spatial distribution of globular clusters // Bulletin of the Lebedev Physics Institute - 2019, Vol. 46, p. 86-88.)

[A3] Аракелян Н. Р., Пилипенко С. В., Шарина М. Е. Шаровые скопления, потерянные сфероидальной карликовой галактикой в Стрельце // Астрофизический Бюллетень - 2020, Т. 75, № 4, С. 444-458 (Англоязычная версия: Arakelyan N. R., S. Pilipenko V., Sharina M. E. Globular clusters lost by the Sagittarius dwarf spheroidal galaxy // Astrophysical Bulletin - 2020, Vol. 75, Issue 4, p. 394-406.)

[A4] Аракелян Н. Р., Пилипенко С. В. Шаровые скопления как индикаторы эволюции Галактики // Астрономический журнал - 2022, Т. 99, № 3, С. 179-188 (Англоязычная версия: Arakelyan N. R., S. Pilipenko V. Globular cluster as indicators of Galactic evolution // Astronomy Reports – 2022, Vol. 66, № 3, p. 191-199.)

В других изданиях:

[B1] Аракелян Н. Р., Пилипенко С. В., Шарина М. Е. Пространственное распределение шаровых скоплений в Галактике // Известия Крымской Астрофизической Обсерватории - 2018, Т. 114, № 1, С. 171-173.

Апробация работы

Результаты диссертации докладывались и обсуждались на семинарах отдела теоретической астрофизики Астрокосмического центра ФИАН (Москва, Россия), на конференциях и симпозиумах:

- 1) XXXIII Всероссийская конференция "Актуальные проблемы внегалактической астрономии", Пущино, Россия, 19-22 апреля 2016;
- 2) 59 Всероссийская научная конференция МФТИ с международным участием, Московская обл., г. Долгопрудный, Россия, 21-26 ноября 2016;
- 3) XXXIV Всероссийская конференция "Актуальные проблемы внегалактической астрономии", Пущино, Россия, 18-21 апреля 2017;
- 4) 2017 Annual CLUES Workshop, Constrained Local UniversE Simulations, Мирафлорес -де-ла-Сьерра, Мадрид, Испания, 18-23 июня 2017;
- 5) Всероссийская астрономическая конференция (ВАК-2017) «Астрономия: познание без границ», Ялта, Крым, 17-22 сентября 2017;
- 6) VII Молодежная конференция "Физика элементарных частиц и космология", ФИАН, Москва, Россия, 9-10 апреля 2018;
- 7) XXXV Всероссийская конференция "Актуальные проблемы внегалактической астрономии", Пущино, Россия, 24-27 апреля 2018;
- 8) Семинар отдела теоретической астрофизики АКЦ ФИАН, Москва, Россия, 27 сентября 2018;
- 9) Конференция "Астрономия - 2018", Девятая конференция из цикла "Современная звездная астрономия", ГАИШ МГУ, Москва, Россия, 22-26 октября 2018;
- 10) 10th Alexander Friedmann International Seminar on gravitation and cosmology; 4th Symposium on the Casimir Effect, Санкт-Петербург, Россия, 23-29 июня 2019;
- 11) BASIS Foundation Summer School 2019 "Evolution of galaxies and stars", Сочи, Россия, 15-27 июля 2019;
- 12) Международная конференция Diversity of the Local Universe, Нижний Архыз, Россия, 30 сентября - 04 октября 2019;
- 13) Семинар отдела теоретической астрофизики АКЦ ФИАН, Москва, Россия, 19 ноября 2020.

Спасибо за внимание!

2. Введение: фраза «...за галактикой образуется приливной хвост...» говорит о неверном представлении автора о влиянии приливного эффекта. (Это не оговорка, поскольку повторяется в п. 3.1.) Автору следует иметь в виду, что приливные выступы и потоки не похожи на хвосты комет.

Согласна, это калька с “tidal tail”, используемая в некоторой англоязычной литературе.

3. Глава 1. Утверждение о малой роли межзвездного поглощения света выглядит неубедительным. Например, замеченная автором сигарообразная структура в распределении шаровых скоплений при $R < 3$ кпк, ориентированная большой осью перпендикулярно галактической плоскости, явно указывает на влияние поглощения света в плоскости Галактики, усложняющее обнаружение скоплений вблизи этой плоскости.

Влияние поглощения света, действительно, может оказаться важным для скоплений совсем вблизи диска, поэтому мы проводили анализ с искусственной «зоной избегания». Мы это делали для больших расстояний, и не нашли влияния зоны на наши результаты. На малых расстояниях мы не проверяли, но она вполне может повлиять.

4. Глава 2. В пункте 2.1. фраза «Из-за высоких скоростей движений возникают приливные хвосты...» свидетельствует о том, что автор недостаточно ясно понимает суть приливного эффекта, проявление которого, на самом деле, уменьшается с ростом скоростей.

Согласна, неправильно сформулированное предложение.

5. Глава 3. Исследуя распределение шаровых скоплений, отнесённых в приливным потокам, автор обнаруживает избыток скоплений, концентрирующихся к плоскости Галактики и заключает, что они не могут быть связаны с распадом галактик-спутников. При этом, однако, не обсуждается эффект динамического трения, под действием которого околополярные орбитальные плоскости скоплений приближаются к экваториальной плоскости Галактики. Без обсуждения этого эффекта сделанный в работе вывод становится менее надёжным.

Эффект динамического трения, действительно, важен для скоплений, пролетающих сравнительно близко от центра Галактики. Это тема, заслуживающая отдельного исследования. Так, недавно вышла работа Морено и др. 2021, где были посчитаны орбиты ШС с $R < 10$ кпк и $|z| < 5$ кпк с учетом динамического трения, и найдено, что по крайней мере для 5 скоплений (Liller 1, Terzan 4, Terzan 5, NGC 6440 и NGC 6553) трение сильно изменило орбиту. В том числе трение способно изменить полную энергию и угловой момент орбитального движения ШС, которые принимались постоянными в работах Массари, Мейонга и Форбса при составлении каталогов ШС, аккрецированных нашей Галактикой, могут поменяться и некоторые выводы этих работ. Для более точного ответа на вопрос о влиянии трения на конкретные скопления нужны более точные данные о поле дисперсии скоростей разных компонент Галактики на разных расстояниях от центра. Мы постараемся учесть результаты этой и других работ по динамическому трению в нашей дальнейшей работе.

9. На рис. 2.6а соискатель привела относительные содержания титана в скоплениях, собранных из разных источников. Такая процедура не вполне корректна, поскольку разные авторы исследуют разное количество звёзд в скоплениях, используют разные модели атмосфер, разные солнечные содержания химических элементов и т.д., поэтому определения разных авторов могут значительно отличаться друг от друга и следует все обилия по возможности сводить в единую шкалу.

Согласна, следует отметить, что это результат соавтора.

10.К сожалению, в выбранной соискателем несколько устаревшей модели потока от карликовой галактики Sgr её начальная масса всего $6 \times 10^8 M_{\odot}$. Тогда как более позднее моделирование кинематики приливного хвоста звёзд галактики Sgr в работе (Gibbons et al. 2017) показало, что для того чтобы воспроизвести дисперсию скоростей в потоке от этой галактики, масса её тёмного гало должна быть на два порядка больше. Такое расхождение могло привести к потере некоторых кандидатов, например, обсуждаемого в диссертации скопления NGC 2419.

Согласна, но результаты выбранной нами модели есть в открытом доступе, чего нету у модели Gibbons et al. 2017, кроме этого, этой задачей мы начали заниматься еще до выхода указанной статьи.

2. Рассматривая влияние на результаты зоны избегания, связанной с поглощением света в диске Галактики, автор не учитывает две другие зоны избегания: 1) зацентральной и 2) осевой. Первая из этих зон обусловлена экранированием галактическим баром (точнее пылью, с ним связанной) ШС в дальней по отношению к Солнцу части бара и за баром (Nikiforov I.I., Smirnova O.V. // *Astronomische Nachrichten*. 2013. V. 334. N. 8. P. 749–755, figs. 5, 6; Schultheis M. et al. // *Astron. and Astrophys.* 2014. V. 566. A120, fig. 8). Эта зона хорошо заметна и на рис. 1.11 диссертации — на распределении ШС в галактоцентрических координатах в полосе между долготами от -50° до 110° на низких широтах. Учет этой зоны избегания, приводящей из-за отсутствия ШС в области за центром Галактики к дополнительному дефициту ШС вдоль галактической плоскости, должен усилить «дископодобную» анизотропию распределения и, возможно, изменить ее пределы по R . Осевая зона избегания (ШС дефицитны в конусе/желобе с углом полураствора 15°) ориентирована вдоль оси вращения Галактики (Никифоров И.И., Агладзе Е.В. // *Письма в Астрон. ж.* 2017. Т. 43. № 2. С. 97–128) и сама по себе вполне может быть проявлением связи ШС с плоскостью галактик-спутников, особенно в варианте желоба.

Мы проверяли влияние зоны избегания для больших расстояний, потому и использовали искусственную «зону избегания» и не учитывали другие. Про две другие зоны, указанные оппонентом, мы не знали на момент написания статьи. Возможно, что проверка осевой и зацентральной зон избегания могла бы улучшить понимание связи ШС с плоскостью галактик-спутников, так что мы постараемся учесть ее в нашей дальнейшей работе. По осевой зоне: очень интересна проблема ее происхождения, было бы интересно заниматься этим.

5. Отрадно, что (случайные) ошибки расстояний до ШС были учтены. Однако принятая величина ошибки — 5% от расстояния, т.е. $0^m.1$, — представляется слишком оптимистичной. Только среднеквадратический разброс калибровочного соотношения в каталоге Harris (2010, *astroph/1012.3224*) уже составляет $1^m.1$ (5.1%). А есть еще ошибки измерения зв. величины горизонтальной ветви, $V(HB)$, ошибки величины покраснения $E(B - V)$, вариации отношения общего поглощения к селективному, $A_V/E(B - V)$, и др. источники ошибок. В известном автору файле *mwgc.ref* с описанием каталога прямо сказано, что абсолютная величина $M_V(HB)$ только в наилучших случаях составляет, вероятно, $\pm 0^m.1$. Таким образом, более реалистичной выглядит средняя ошибка $\sim 0^m.2$, или $\approx 10\%$ от расстояния. Насколько бы изменились результаты работы при принятии такой величины ошибки?

Принятие величины ошибки 10% почти не меняет зависимость анизотропии от расстояния, и, соответственно, результаты работы тоже не меняются.

