

УДК 524.7–323.3; 524.74; 524.8

ОРИЕНТАЦИЯ СПИНОВ ПЛОСКИХ ГАЛАКТИК ОТНОСИТЕЛЬНО ФИЛАМЕНТОВ КРУПНОМАСШТАБНОЙ СТРУКТУРЫ ВСЕЛЕННОЙ

© 2021 А. В. Антипова^{1*}, Д. И. Макаров¹, Д. В. Бизяев^{2,3}¹ Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия² Обсерватория Апачи Пойнт, Санспот, 88349-0059 США³ Университет штата Нью-Мексико, Нью-Мексико, 88003 США

Поступила в редакцию 10 сентября 2020 года; после доработки 4 марта 2021 года; принята к публикации 4 марта 2021 года

Мы представляем результаты анализа ориентации моментов вращения галактик из пересмотренного каталога плоских галактик (Revised Flat Galaxy Catalog) относительно филаментов крупномасштабной структуры Вселенной. Этот каталог содержит галактики, видимые под большими углами к лучу зрения. Благодаря тому, что галактики видны практически с ребра, направление момента вращения галактик определяется с высокой точностью. Мы находим очень слабое параллельное выравнивание спинов галактик вдоль оси филаментов. Мы проанализировали зависимость выравнивания от яркости галактик, сплюснутости, их расстояния от оси филамента и красного смещения. Было найдено, что наиболее выраженное параллельное выравнивание (на уровне 2.4σ) показывают близкие ($z < 0.03$) и тонкие ($a/b > 10$) галактики.

Ключевые слова: галактики: расстояния и красные смещения — галактики: спиральные — крупномасштабная структура Вселенной

1. ВВЕДЕНИЕ

Для понимания эволюции галактик чрезвычайно важно искать зависимости между свойствами галактик и их окружением. Например, хорошо известна морфологическая сегрегация галактик в зависимости от окружения: эллиптические галактики в основном располагаются в центрах крупных скоплений (Dressler 1980), тогда как галактики поздних типов чаще наблюдаются в областях пониженной плотности (Karachentsev et al. 2016). Также обращает на себя внимание связь плоских галактик с их окружением. Плоскими галактиками, как правило, являются дисковые галактики без балджа, видимые под очень большим углом к наблюдателю, практически с ребра (Karachentsev et al. 1999). Подобные объекты занимают узкий диапазон морфологических типов Sc–Sd и имеют видимое отношение осей $a/b > 7$. Дисковые безбалджевые галактики достаточно распространены во Вселенной, но из современных представлений об эволюции следует, что галактик с простым диском должно быть очень мало. Многократные слияния с близкими карликовыми галактиками должны приводить к разогреву диска в вертикальном направлении и росту балджа (Kazantzidis et al. 2008, Naab and Burkert 2003).

Ориентация галактик относительно крупномасштабной структуры Вселенной связана с ее формированием. Протогалактики приобретают свой угловой момент из приливного поля (Efsthathiou and Jones 1979, Hoyle 1949, Peebles 1969, Porciani et al. 2002, White 1984). Таким образом, должна существовать корреляция между приливным полем и вращением галактики (Schäfer 2009).

Крупномасштабная структура Вселенной включает в себя скопления, филаменты, стены и войды. Большинство галактик находится в филаментах, которые соединяют скопления галактик и лежат между войдами. Далее по тексту под филаментами мы будем иметь в виду филаменты крупномасштабной структуры Вселенной.

N -body-моделирование дает согласованную картину выравнивания форм гало темной материи и вращения галактик относительно крупномасштабной структуры Вселенной. Например, спин массивного гало должен иметь перпендикулярную ориентацию относительно филамента-хозяина, в то время как спин маломассивного гало должен ориентироваться параллельно филаменту (Aragon Calvo 2013, Aragón-Calvo et al. 2007, Brunino et al. 2007, Codis et al. 2012, Hahn et al. 2010, Libeskind et al. 2012, Trowland et al. 2013).

Однако результаты, полученные по наблюдательным данным, выглядят противоречиво. В

*E-mail: osen.nayti@gmail.com

2002 г. было найдено перпендикулярное выравнивание оси галактик относительно филаментов (Lee and Pen 2002). Позже Tempel and Libeskind (2013), Tempel et al. (2013) обнаружили, что галактики ранних типов ориентированы перпендикулярно, в то время как спины галактик позднего типа преимущественно ориентированы параллельно филаментам. Однако также было найдено перпендикулярное выравнивание для спиральных галактик (Zhang et al. 2015).

Можно по-разному объяснить несогласованность наблюдательных данных. Эффект может быть сглажен, если при создании исследуемой выборки не учитывать некоторые свойства входящих в нее галактик, например, такие как морфологический тип, яркость, масса, красное смещение, наличие близких соседей. Разница в результатах может наблюдаться из-за отсутствия согласованного способа выделения филаментов. На результатах отражается и отсутствие учета различных космологических эффектов, например, искажения пространства красного смещения под действием гравитации от близких структур. Также на результат влияет ограниченная статистика. Измерение угла наклона галактик является одной из основных трудностей для оценки ориентации спина, которая мешает надежно обнаружить корреляцию.

Один из способов решить проблему неопределенности направления спина — использовать галактики, видимые под очень большими углами к наблюдателю, практически с ребра. В данном случае направление спина будет определено с высокой точностью. В работе Navarro et al. (2004) было найдено, что спины спиральных галактик, видимых под очень большим углом к наблюдателю, ориентированы параллельно сверхгалактической плоскости. Этот эффект значим на уровне 92%. Всего в анализе было использовано около 30 галактик.

В данной работе мы ищем зависимость между ориентацией спина галактик и осью филаментов. Мы используем Revised Flat Galaxy Catalog (Kagachentsev et al. 1999), который содержит 4236 тонких галактики, видимые с ребра, а также каталог филаментов, созданный на основе Sloan Digital Sky Survey (SDSS) (Tempel et al. 2014). Наша выборка содержит 706 филаментов и 813 галактик, принадлежащих им.

2. ВЫБОРКА

Обновленный каталог плоских галактик, RFGC (Kagachentsev et al. 1999), охватывает все небо и содержит 4236 плоских галактик с соотношением осей $a/b > 7$ и большим диаметром $a > 0.6$. Каталог основан на данных Паломарского обзора

неба, выполненного на фотографических пластинках. Эти объекты имеют ряд преимуществ для данной работы. Поскольку плоские галактики наблюдаются почти с ребра, это позволяет нам измерить ориентацию спина с точностью лучше 5° . Благодаря критерию отбора галактики RFGC относятся к узкому диапазону поздних морфологических типов Sc–Sd. В свою очередь галактики позднего типа показывают более равномерное пространственное распределение, чем галактики ранних типов. Также каталог RFGC содержит значительное количество (817) ультраплоских галактик с $a/b > 10$. Ожидается, что такие диски не смогут «выжить» в случае большого количества слияния во время иерархической кластеризации, и, следовательно, они более чувствительны к влиянию среды.

На данный момент база данных HyperLeda¹ (Makarov et al. 2014) содержит скорости для 3058 RFGC-галактик. Наибольший вклад — 1689 измерений красных смещений для наших галактик — был получен в рамках проекта по измерению профилей линии нейтрального водорода HI в Extragalactic Distance Database (Courtois et al. 2009). В массовых оптических обзорах красных смещений SDSS (Alam et al. 2015) и 6dF (Jones et al. 2009) было получено 1157 и 880 скоростей соответственно. Слепой обзор ALFALFA (Haynes et al. 2018) внегалактических источников HI на радиотелескопе Аресибо добавил измерения еще для 733 плоских галактики.

Каталог филаментов Tempel et al. (2014) был создан по данным SDSS DR8 на основе выборки 499340 галактик с красным смещением $0.009 < z < 0.155$ в системе космического микроволнового фона (CMB) и содержит 15421 филамент. Каталог представляет собой набор таблиц, в которых имеется номер филамента, сопутствующие координаты точек, из которых состоят филаменты, номера и координаты галактик, принадлежащих данному филаменту, номер и координаты ближайшей к галактике точки филамента, расстояние от филамента до галактики.

Для каждого филамента мы отождествили принадлежащие ему галактики из каталога RFGC, используя координаты галактик. При этом учитывались случаи, когда в обзоре SDSS измерялась скорость не центра, а внешней части галактики. Наша полная выборка состоит из 706 филаментов, содержащих 813 плоских галактик.

3. ИЗМЕРЕНИЕ СИГНАЛА ВЫРАВНИВАНИЯ

В каталоге Tempel et al. (2014) для определения структуры филаментов используется декартова

¹<http://leda.univ-lyon1.fr/>

система координат, основанная на угловых координатах SDSS (η , λ)². Для упрощения работы с каталогом мы переводим данную систему координат сначала в экваториальную (α , δ), а затем в декартову систему координат (x , y , z), используя расстояние до филаментов D :

$$\begin{aligned} \text{RA} &= \arctg\left(\frac{\sin \lambda}{\cos \lambda \cos(\eta + 32.5)}\right) + 185.0, \\ \text{Dec} &= \arcsin(\cos \lambda \sin(\eta + 32.5)), \\ x &= D \cos(\text{Dec}) \cos(\text{RA}), \\ y &= D \cos(\text{Dec}) \sin(\text{RA}), \\ z &= D \sin(\text{Dec}). \end{aligned} \quad (1)$$

Каждый филамент мы описываем сплайном по соответствующим точкам из каталога Tempel et al. (2014). Для каждой галактики из нашей выборки мы находим «ближайшую точку» филамента и определяем в ней касательную. Для определения спина галактик мы используем повернутые на 90° позиционные углы из каталога RFGC. На рис. 1 показаны проекции филамента No. 227 в декартовой системе координат, а также изображения RFGC-галактик, принадлежащих данному филаменту.

Мы находим угол между касательной к филаменту и спином галактики через скалярное произведение векторов:

$$\alpha = \arccos\left(\frac{\mathbf{f} \cdot \mathbf{s}}{|\mathbf{f}| |\mathbf{s}|}\right), \quad (2)$$

где α — угол между касательной к филаменту в ближайшей к галактике точке и спином галактики, \mathbf{f} — вектор касательной к филаменту, \mathbf{s} — вектор спина. Мы ограничиваемся поиском углов между спином галактики и филаментом в диапазоне от 0° до 90° . Таким образом, мы учитываем только положение спина, но не направление вращения диска галактики.

Для нашей полной выборки мы находим слабое указание на то, что спины плоских галактик предпочитают быть сонаправленными с осью филаментов. Эту корреляцию мы находим на уровне 2σ . На рис. 2 показано распределение плотности вероятности взаимной ориентации спинов плоских галактик и филаментов, к которым они принадлежат. Используя данное распределение, мы находим, что наклон аппроксимирующей прямой равен $(-2.4 \pm 2.4) \times 10^{-5}$. Ошибка указана для 95% уровня достоверности. Обращает на себя внимание тот факт, что наклон зависимости обеспечивается

несколько большей плотностью вероятности найти галактики с хорошо выравненными направлениями спина и филамента ($\alpha < 20^\circ$).

Далее мы исследовали корреляцию выравнивания в зависимости от абсолютной звездной величины галактики, красного смещения, видимого отношения осей и расстояния от галактики до оси филамента. По получившимся выборкам мы строим распределение плотности вероятности взаимной ориентации спинов галактик и филаментов в трехмерном пространстве, а затем аппроксимируем их прямой (см. рис. 3). Из угла наклона аппроксимирующей прямой мы определяем существование зависимости. Наилучший результат дает отбор галактик со звездными величинами $M_r < -18^m$ (панель (a)), красным смещением $z < 0.03$ (панель (b)), отношением осей $a/b > 10$ в голубом фильтре (панель (c)), расстоянием от оси филамента $D > 0.2$ Мпк (панель (d)). Для описанных выборок мы получаем углы наклона аппроксимирующих прямых соответственно равными: $(-3.2 \pm 3.4) \times 10^{-5}$; $(-4.2 \pm 4.1) \times 10^{-5}$; $(-7.1 \pm 7.0) \times 10^{-5}$; $(-1.5 \pm 3.1) \times 10^{-5}$. Все ошибки указаны для 95% уровня достоверности.

С помощью теста Колмогорова—Смирнова мы оцениваем значимость полученных нами результатов. Для этого мы накладываем ограничения на полную выборку по параметрам, описанным выше (z , a/b , M_r , D). Для сравнения мы используем две выборки. Сравнимые выборки отсортированы по одному и тому же параметру, но имеют различные диапазоны. Одна из выборок имеет диапазон, при котором наблюдается наиболее сильный эффект выравнивания, а во вторую выборку входят все оставшиеся галактики. Если применить тест Колмогорова—Смирнова к выборке галактик, у которых $M_r < -18^m$, и к выборке с большими звездными величинами, то мы получаем значение статистики, равное 0.1, что соответствует оценке $p\text{-value} = 0.2$. Для галактик, отобранных по z и a/b , тест Колмогорова—Смирнова дает соответствующие величины: 0.06 ($p\text{-value} = 0.5$), 0.08 ($p\text{-value} = 0.3$). Нулевая гипотеза отвергается, если $p\text{-value}$ меньше 0.01. Таким образом, согласно тесту Колмогорова—Смирнова, найденные нами эффекты выравнивания не являются статистически значимым.

Мы ограничиваем нашу полную выборку по красному смещению ($z < 0.03$) и по отношению осей ($a/b > 10$), так как эти ограничения дали наиболее сильный эффект. Используя критерий Стьюдента, мы нашли, что отклонение первого бина по отношению к остальным бином составляет 2.4σ (см. рис. 4, черные кружки).

²<https://www.sdss.org/dr14/algorithms/surveycoords/>

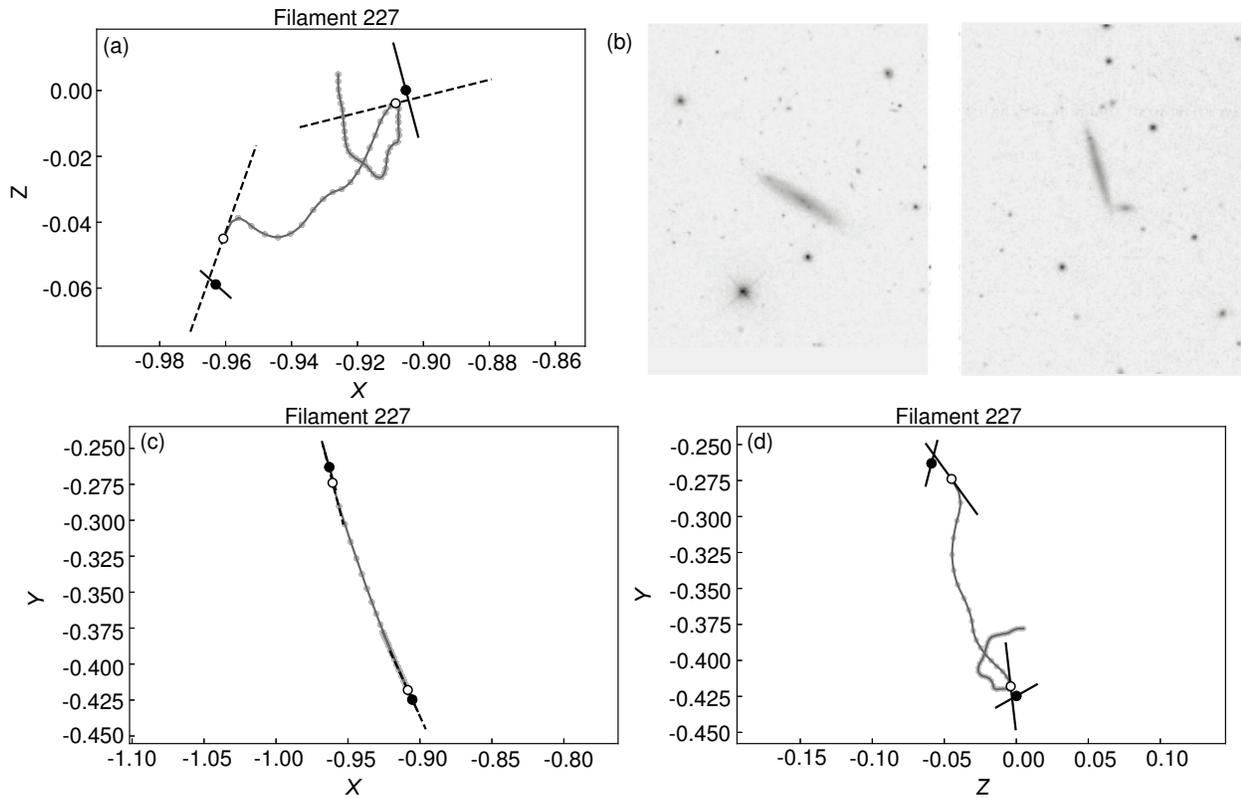


Рис. 1. Изображения галактик (RFGC 2625, RFGC 2437), их проекции и проекции соответствующего филамента (No. 227) в декартовой системе координат. На изображениях галактик север находится вверху, восток — слева. Светло-серые точки являются точками филамента из каталога Tempel et al. (2014); серая сплошная линия — сплайн-интерполяция точек филамента; черные круги — галактики RFGC 2625, RFGC 2437; белые круги — самые близкие к галактикам точки филамента, взятые из каталога филаментов; черная сплошная линия — спин галактики, штриховая черная линия — касательная к филаменту в ближайшей к галактике точке филамента.

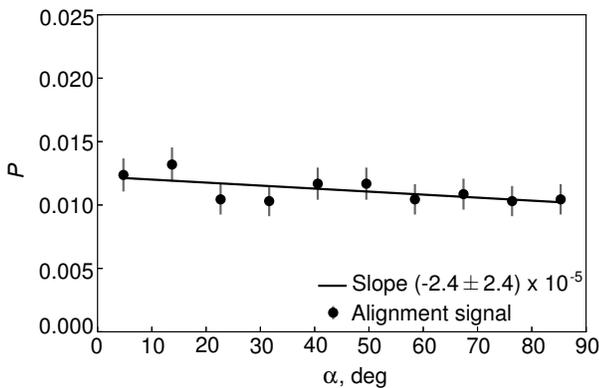


Рис. 2. Распределение плотности вероятности взаимной ориентации спинов галактик и филаментов в трехмерном пространстве. Распределение основано на выборке из 813 галактик, видимых практически с ребра, из RFGC (Karachentsev et al. 1999) и 706 филаментов из каталога Tempel et al. (2014).

Мы сравниваем выборку галактик с наилучшей корреляцией ($a/b > 10$ & $z < 0.03$) с выборкой галактик с обратной селекцией ($a/b < 10$ & $z > 0.03$)

(см. рис. 4). Наблюдается значимое превышение вероятности обнаружения близких ультратонких сонаправленных галактик (направление спина отклоняется менее чем на 8° от оси филамента) по сравнению с более далекими и менее тонкими галактиками. Тест Колмогорова–Смирнова дает величину 0.3 при сравнении этих выборок.

4. ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Существует большое количество работ, направленных на изучение ориентации галактик относительно крупномасштабной структуры Вселенной. Теория предсказывает сильную корреляцию между спином галактик и приливным полем. Работы по наблюдательным данным дают противоречивые результаты. Как правило, в наблюдениях такие корреляции либо не видны, либо проявляются на уровне 2σ . В ряде наблюдательных работ было найдено параллельное выравнивание спинов спиральных галактик относительно филаментов крупномасштабной структуры Вселенной (Tempel and Libeskind 2013, Tempel et al. 2013, Zhang et al. 2013; 2015) и перпендикулярное выравнивание для

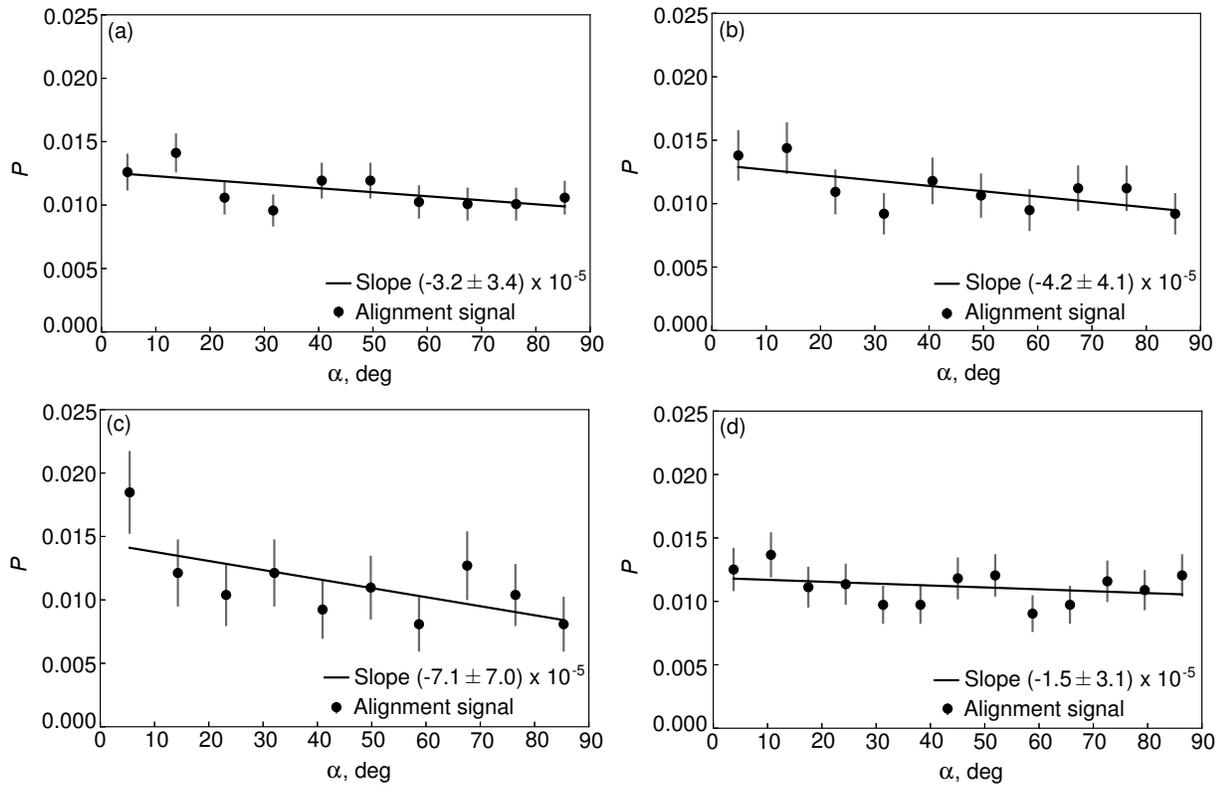


Рис. 3. Распределение плотности вероятности взаимной ориентации спинов галактик и филаментов в трехмерном пространстве. Выборка плоских галактик и филаментов та же, что и для распределения, показанного на рис. 2, но ограниченная по параметрам: (a) — $M_r < -18^m$ (содержит 665 галактик), (b) — красное смещение $z < 0.03$ (389 галактик), (c) — отношение осей $a/b > 10$ в голубом фильтре (195 галактик), (d) — расстояние от оси филамента $D > 0.2$ Мпк (627 галактик).

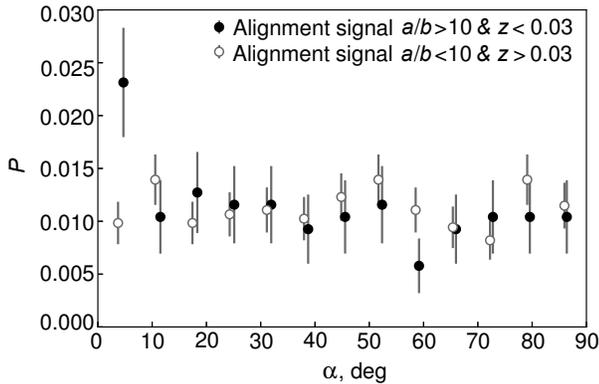


Рис. 4. Распределение плотности вероятности взаимной ориентации спинов галактик и филаментов в трехмерном пространстве. Выборка плоских галактик и филаментов та же, что и для распределения, показанного на рис. 2, но ограниченная по красному смещению и по отношению осей. Для черных кружков $z < 0.03$ & $a/b > 10$ (127 галактик); белые кружки соответствуют $z > 0.03$ & $a/b < 10$ (356 галактик).

галактик ранних типов. Зависимость направления корреляции от морфологического типа может быть

связана с тем, что галактики ранних типов имеют тенденцию быть более массивными, чем спиральные галактики (Tempel and Libeskind 2013). В данной работе мы исследуем связь ориентации спинов видимых с ребра галактик и филаментов. Галактики из нашей выборки находятся под очень большим углом к наблюдателю, что позволяет определять ориентацию оси вращения с большой точностью, однако количество таких объектов существенно меньше, чем в общих выборках галактик. Мы находим, что спины тонких безбалджевых галактик показывают слабую тенденцию выравнивания параллельно оси филамента-хозяина. Эта корреляция заметна на уровне 2σ .

Мы не получили значимой корреляции при отборе галактик по яркости и расстоянию от оси филамента. Однако численное моделирование предсказывает, что массивные галактики располагаются вблизи оси филаментов, в среднем на расстоянии $0.7h^{-1}$ Мпк, где происходит множество слияний вдоль направления потока, в то время как галактики малых масс чаще наблюдаются в областях пониженной плотности и располагаются дальше от оси филамента, в среднем на расстоянии

$2h^{-1}$ Мпк (Codis et al. 2012). В работе Tempel and Libeskind (2013) было найдено, что выравнивание значительно сильнее для спиральных галактик ярче $M_r < -20^m5$, которые находятся дальше от оси филамента, в диапазоне $0.2-0.5h^{-1}$ Мпк. Также в ряде наблюдательных работ было отмечено, что галактики низкой поверхностной яркости располагаются дальше от филаментов, в среднем на расстоянии 5 Мпк (Bizyaev et al. 2017, Mo et al. 1994, Rosenbaum and Bomans 2004). Bizyaev et al. (2017) представили доказательства сходства ультратонких галактик с галактиками с низкой поверхностной яркостью. Следовательно, наибольшая корреляция должна была бы наблюдаться для самых ярких ультратонких галактик нашей выборки, находящихся на расстояниях $0.2-0.5$ Мпк. Однако эта зависимость не получает наблюдательного подтверждения. Наш результат может быть объяснен малой статистикой галактик в нашей выборке. В диапазоне $0.2-0.5h^{-1}$ Мпк от оси филамента находятся 124 галактики и 12 галактик ярче $M_r < -20^m5$. Соответственно, с увеличением расстояния выборка еще больше редет: так на расстоянии больше $0.5h^{-1}$ Мпк есть всего 48 галактик, из них только шесть ярче $M_r < -20^m5$.

В нашем исследовании более сильные эффекты корреляции наблюдаются при отборе галактик по красному смещению и отношению осей a/b . Мы находим, что галактики на $z < 0.03$ стремятся выравнивать спин с осью филамента: угол наклона аппроксимирующей прямой равен $(-4.2 \pm 4.1) \times 10^{-5}$. Такой же эффект мы наблюдаем для галактик с отношением осей $a/b > 10$: угол наклона аппроксимирующей прямой равен $(-7.1 \pm 7.0) \times 10^{-5}$. Более сильный эффект (на уровне 2.4σ) наблюдается при отборе галактик по двум последним критериям ($z < 0.03$ & $a/b > 10$). Считается, что существует связь между отношением осей галактики и массой. Галактики с отношением осей $a/b > 10$ могут существовать только при наличии массивного темного гало (Gerritsen and de Blok 1999, Zasov et al. 1991), так как массивное гало может стабилизировать звездный диск. Нижнюю границу массы темного гало галактики можно оценить через соотношение радиальной и вертикальной шкал (Zasov et al. 2002), и масса гало тем больше, чем тоньше диск галактики. Ультратонкие галактики расположены в областях с низкой плотностью, поэтому трудно оценить их массу по спутникам. Однако в работе Karachentsev et al. (2016) была оценена орбитальная масса для 30 ультратонких галактик. Их характерная полная масса составляет около $5 \times 10^{11} M_{\odot}$, отношение полной массы к звездной приблизительно равно 30. Полученные соотношения для ультратонких галактик существенно

не отличаются от значений для таких галактик, как M 31, M 81. В недавней работе Karachentsev and Karachentseva (2019) были измерены массы безбалджевых галактик позднего типа Sc–Scd–Sd по орбитальным движениям их спутников. По 43 карликовым спутникам было получено отношение орбитальной массы к светимости в K -полосе, равное 20 ± 3 . В этой же работе для галактик E, S0, Sa типов было получено отношение полной массы к светимости, равное 88 ± 30 . Таким образом, из перечисленных выше наблюдательных данных следует, что основная часть ультратонких галактик не является массивными галактиками. Кроме того, из космологического моделирования следует, что массивные галактики образуются из галактик меньших масс, а спин галактики может изменить свое направление. В частности, считается, что маломассивные галактики образовались в филаментах с высокой завихренностью, поэтому эти галактики имеют спин, параллельный филаменту (см., например, Hahn et al. 2007, Laigle et al. 2015, Libeskind et al. 2013, Zhang et al. 2009). Галактики больших масс образуются в более поздних слияниях, которые происходят вдоль оси филаментов (см., например, Libeskind et al. 2013, Sousbie et al. 2008), следовательно, эти галактики имеют спин, перпендикулярный оси филаментов. Переход ориентации спина происходит при массе около $(5 \pm 1) \times 10^{12} M_{\odot}$ при нулевом красном смещении (Codis et al. 2012), что на порядок меньше характерной массы ультратонких галактик, полученной в работе Karachentsev et al. (2016). Мы находим большее выравнивание между спином галактики и осью филамента на малых красных смещениях. Этот эффект можно объяснить с методологической точки зрения: на больших красных смещениях труднее обнаружить ультратонкие галактики, так как наблюдается визуальный эффект размытия из-за ограниченного разрешения фотоэмульсии (Karachentseva et al. 2016), а также сложнее идентифицировать филамент.

БЛАГОДАРНОСТИ

В работе использовалась база данных HyperLEDA <http://leda.univ-lyon1.fr/>.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа поддержана грантом РФФ 19–12–00145.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. M. A. Aragon Calvo, Amer. Astron. Soc. Meet., No. 221, id. 132.04 (2013).
2. M. A. Aragón-Calvo, R. van de Weygaert, B. J. T. Jones, and J. M. van der Hulst, *Astrophys. J.* **655**, L5 (2007).
3. S. Alam, F. D. Albareti, C. Allende Prieto, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **219**, 12 (2015).
4. D. V. Bizyaev, S. J. Kautsch, N. Y. Sotnikova, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **465**, 3784 (2017).
5. R. Brunino, I. Trujillo, F. R. Pearce, and P. A. Thomas, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **375**, 184 (2007).
6. S. Codis, C. Pichon, J. Devriendt, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **427**, 3320 (2012).
7. H. M. Courtois, R. B. Tully, J. R. Fisher, et al., *Astron. J.* **138**, 1938 (2009).
8. A. Dressler, *Astrophys. J.* **236**, 351 (1980).
9. G. Efstathiou and B. J. T. Jones, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **186**, 133 (1979).
10. J. P. E. Gerritsen and W. J. G. de Blok, *Astron. and Astrophys.* **342**, 655 (1999).
11. O. Hahn, C. Porciani, C. M. Carollo, and A. Dekel, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **375**, 489 (2007).
12. O. Hahn, R. Teyssier, and C. M. Carollo, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **405**, 274 (2010).
13. M. P. Haynes, R. Giovanelli, B. R. Kent, et al., *Astrophys. J.* **861**, 49 (2018).
14. F. Hoyle, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **109**, 365 (1949).
15. D. H. Jones, M. A. Read, W. Saunders, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **399**, 683 (2009).
16. I. D. Karachentsev and V. E. Karachentseva, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **486**, 3697 (2019).
17. I. D. Karachentsev, V. E. Karachentseva, Y. N. Kudrya, et al., *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **47**, 5 (1999).
18. I. D. Karachentsev, V. E. Karachentseva, and Y. N. Kudrya, *Astrophysical Bulletin* **71**, 129 (2016).
19. V. E. Karachentseva, Y. N. Kudrya, I. D. Karachentsev, et al., *Astrophysical Bulletin* **71**, 1 (2016).
20. S. Kazantzidis, J. S. Bullock, A. R. Zentner, et al., *Astrophys. J.* **688**, 254 (2008).
21. C. Laigle, C. Pichon, S. Codis, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **446**, 2744 (2015).
22. J. Lee and U.-L. Pen, *Astrophys. J.* **567**, L111 (2002).
23. N. I. Libeskind, Y. Hoffman, J. Forero-Romero, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **428**, 2489 (2013).
24. N. I. Libeskind, Y. Hoffman, A. Knebe, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **421**, L137 (2012).
25. D. Makarov, P. Prugniel, N. Terekhova, et al., *Astron. and Astrophys.* **570**, id. A13 (2014).
26. H. J. Mo, S. S. McGaugh, and G. D. Bothun, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **267**, 129 (1994).
27. T. Naab and A. Burkert, *Astrophys. J.* **597**, 893 (2003).
28. J. F. Navarro, M. G. Abadi, and M. Steinmetz, *Astrophys. J.* **613**, L41 (2004).
29. P. J. E. Peebles, *Astrophys. J.* **155**, 393 (1969).
30. C. Porciani, A. Dekel, and Y. Hoffman, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **332**, 325 (2002).
31. S. D. Rosenbaum and D. J. Bomans, *Astron. and Astrophys.* **422**, L5 (2004).
32. B. M. Schäfer, *Int. J. Modern Physics D* **18**, 173 (2009).
33. T. Sousbie, C. Pichon, S. Colombi, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **383**, 1655 (2008).
34. E. Tempel and N. I. Libeskind, *Astrophys. J.* **775**, L42 (2013).
35. E. Tempel, R. S. Stoica, V. J. Martínez, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **438**, 3465 (2014).
36. E. Tempel, R. S. Stoica, and E. Saar, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **428**, 1827 (2013).
37. H. E. Trowland, G. F. Lewis, and J. Bland-Hawthorn, *Astrophys. J.* **762**, 72 (2013).
38. S. D. M. White, *Astrophys. J.* **286**, 38 (1984).
39. A. V. Zasov, D. V. Bizyaev, D. I. Makarov, and N. V. Tyurina, *Astronomy Letters* **28**, 527 (2002).
40. A. V. Zasov, D. I. Makarov, and E. A. Mikhailova, *Sov. Astron. Lett.* **17**, 374 (1991).
41. Y. Zhang, X. Yang, A. Faltenbacher, et al., *Astrophys. J.* **706**, 747 (2009).
42. Y. Zhang, X. Yang, H. Wang, et al., *Astrophys. J.* **779**, 160 (2013).
43. Y. Zhang, X. Yang, H. Wang, et al., *Astrophys. J.* **798**, 17 (2015).

Orientation of the Spins of Flat Galaxies Relative to Filaments of a Large-Scale Structure**A. V. Antipova¹, D. I. Makarov¹, and D. V. Bizyaev^{2,3}**¹Special Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nizhnij Arkhyz, 369167 Russia²Apache Point Observatory, Sunspot, 88349-0059 USA³New Mexico State University, New Mexico, 88003 USA

We present the analysis of the orientation of the rotation moments of galaxies from the Revised Flat Galaxy Catalogue relative to the filaments of the large-scale structure of the Universe. This catalog contains galaxies visible at large inclination angles. Due to the fact that the galaxies are seen almost edge-on, the direction of angular moments of the galaxies is determined with high accuracy. We found a very weak parallel alignment of the galaxy spins along the filament axis. We analyzed the relationship of the alignment on the brightness of the galaxies, their flatness, their distance from the filament axis, and the redshift. It was found that the closest ($z < 0.03$) and thinnest ($a/b > 10$) galaxies show the greatest parallel alignment (at the level of 2.4σ).

Keywords: *galaxies: distances and redshifts—galaxies: spiral—large-scale structure of Universe*