

## К ВОПРОСУ О НЕСТАЦИОНАРНОСТИ СКОПЛЕНИЯ ГАЛАКТИК В ДЕВЕ

И. Д. КАРАЧЕНЦЕВ  
Поступила 10 апреля 1965

Критически рассмотрено предположение Вокулера о существовании отдельных E и S облаков в области Девы. Присутствие в скоплении многих пар со смешанными (E и S) компонентами не согласуется с идеей пространственного разделения эллиптических и спиральных галактик. Применение теоремы вириала к скоплению дает для отношения массы к светимости  $f = 665 M_{\odot} L_{\odot}$ . Показано, что учет слабых галактик почти не меняет  $f$ , несмотря на увеличение интегральной светимости скопления. Приводятся данные о сегрегации галактик по яркостям и типам вдоль радиуса скопления. Применение теоремы вириала дает для групп галактик в Деве  $\bar{f} = 375 \pm 180$ , а для пар  $\bar{f} = 137 \pm 74$ . Анализируется влияние возможного присутствия „скрытой“ материи на величины  $f$  для пар, групп и скопления. Делается вывод, что никакими видами „скрытой“ материи невозможно удовлетворительно объяснить полученные значения  $f$ . Нестационарность и расширение скопления и входящих в него подсистем наряду с образованием новых галактик в нем наилучшим образом согласуется со всей совокупностью наблюдательных данных. Обнаружено ожидаемое при расширении уменьшение дисперсии лучевых скоростей галактик к краю скопления.

1. Известно, что применение теоремы вириала к скоплению галактик в Деве в предположении его стационарности дает для членов скопления отношение массы к светимости  $f$  намного больше нормальных значений, определяемых по внутреннему вращению отдельных галактик. Расхождение достигает почти двух порядков. Попытки устранения его осуществлялись тремя принципиально различными путями. Предполагалось, что:

а) на дисперсию скоростей галактик, определяющую кинетическую энергию скопления, влияют систематические эффекты (наложение галактик фона, наличие подскоплений) [1],

б) в скоплении присутствует большое количество невидимой темной материи [2],

в) скопление нестационарно и распадается [3].

Благодаря относительно богатому материалу по лучевым скоростям и звездным величинам галактик в области Девы, имеется возможность применить теорему вириала не только ко всему скоплению в целом, но и к отдельным динамически изолированным образованиям внутри него. Это позволяет сделать более определенное заключение о причине большого значения  $f$ .

2. Но прежде всего рассмотрим вопрос о физическом единстве наблюдаемой совокупности галактик в Деве. Вокулер [4], основываясь на лучевых скоростях галактик в центральной части скопления, выделяет два пространственно разделенных и проектирующихся друг на друга облака галактик. Одно состоит из эллиптических и линзовидных галактик и имеет среднюю лучевую скорость  $v_E = 950$  км/сек, другое, со спиральным населением, имеет скорость  $v_S = 1450$  км/сек. Однако такое сугубо кинематическое разделение скопления на две части вызывает некоторые возражения. Известно, что в области Девы много тесных пар галактик. Подсчет показывает, что только небольшая часть их объяснима эффектом случайного проектирования, то есть большинство пар следует считать физическими. Поэтому, если бы E и S облака галактик случайным образом проектировались друг на друга, то число смешанных (E + S) пар было бы значительно меньше, чем пар с только эллиптическими (E + E) или спиральными (S + S) компонентами. Подсчеты и классификация галактик на картах Паломарского атласа до предельного углового диаметра  $d_n = 1'.12$  показывает, что в области радиусом в  $5^\circ$  вокруг центра скопления Девы имеются 4 (E + E), 7 (E + S) и 8 (S + S) пар с угловым расстоянием компонентов менее  $5'.6$ . Таким образом, недостатка в смешанных парах по сравнению с (E + E) и (S + S) парами не наблюдается. Вероятность того, что смешанные пары образованы при случайном проектировании E и S галактик, менее 0.03. Наглядными примерами могут служить спирали NGC 4438 в известной цепочке из эллиптических галактик и NGC 4647 в группе эллиптических галактик к востоку от центра скопления. Обе спирали расположены в группах на расстоянии менее  $5'.6$  от соседних эллиптических галактик.

Более детальное распределение средних лучевых скоростей в зависимости от морфологического типа галактик также вызывает сомнение в реальности существования отдельных E и S облаков. В табл. 1 представлены средние лучевые скорости галактик для пяти хаббловских типов E, S0, Sa, Sb, Sc. Чтобы судить о влиянии размеров площади, на которой проводилось усреднение лучевых ско-

ростей, а также точности классификации, приведены в отдельности данные для выделенной Вокулером области (первая строка) и по всему району скопления  $\alpha = 12^h \div 13^h$ ,  $\delta = 0^\circ \div +20^\circ$  (вторая строка). Для последней строки морфологические типы брались по Хьюмасону, Мэйоллу и Сандэйджу [5]. Из анализа таблицы можно заключить, что средняя лучевая скорость для S<sub>b</sub> галактик, а в последней строке и для S<sub>b</sub>, почти не отличается от таковых для эллиптических и линзовидных галактик. Таким образом, исходя из лучевых скоростей было бы правильнее говорить не о E и S, а о E—S0—Sa—(Sb) и (Sb)—Sc облаках. Однако не видно никаких физических причин, способных объяснить такое странное разделение различных подтипов спиралей.

Таблица 1

	E	S0	Sa	Sb	Sc
Вокулер E и S области	981	957	942	1283	1604
Вокулер Все поле	994	1016	953	1371	1431
ХМС Все поле	1018	1020	1152	1096	1395

Распределение средних исправленных лучевых скоростей в км/сек по типам галактик. В первой строке данные только для выделенной Вокулером области; во второй и третьей—по всему полю  $\alpha = 12^h \div 13^h$ ,  $\delta = 0^\circ \div +20^\circ$ . Хаббловские типы в последней строке взяты по определениям Хьюмасона, Мэйолла и Сандэйджа. Компактная группа вокруг NGC 4261 при анализе не учитывалась.

3. Для вычисления массы скопления по теореме вириала воспользуемся распределением галактик до  $15^m 7$  в области Девы, содержащихся в I и II томах каталога Цвикки [6]. Ввиду явной несферичности скопления в Деве, удобно массу его вычислять посредством подсчетов галактик в параллельных полосах. При этом подсчеты следует делать в полосах, ориентированных как вдоль большой оси скопления, то есть при  $\alpha = \text{const}$ , так и в перпендикулярном направлении. Считая, что все члены скопления имеют одинаковую массу, для полной массы всего скопления имеем выражение

$$M = 233 \frac{N^2}{\sum_{i=1}^{\infty} [N_i(y) \Delta y]^2} \langle \Delta v^2 \rangle \Delta y, \quad (1)$$

где  $\langle \Delta v^2 \rangle$  — среднее значение квадрата дисперсии пространственных скоростей галактик в км/сек,  $\Delta y$  — ширина полосы в парсеках,

$N_i(y) \Delta y$  — число галактик в  $i$ -той полосе, а  $N$  — полное число галактик. Масса скопления при этом получается в единицах солнечной. Чтобы в значительной мере исключить влияние эффекта подскоплений на дисперсию скоростей галактик, в выражение (1) подставлялось  $\langle \Delta v^2 \rangle$  не для отдельных галактик, а для центров групп и пар, члены которых имеют измеренные лучевые скорости. Подсчеты в полосах вдоль  $\delta = \text{const}$  дали для массы скопления величину  $M_s = 9.34 \cdot 10^{14} M_\odot$ ; подсчеты в перпендикулярном направлении —  $M_s = 6.86 \cdot 10^{14} M_\odot$ . Естественно, что реальное значение массы скопления соответствует среднему от этих крайних случаев. Таким образом получаем  $M = (8.1 \mp 1.3) \cdot 10^{14} M_\odot$ . Интегральную светимость скопления можно вычислить по фотометрическим данным каталога Цвикки. При этом следует учитывать, что звездные величины Цвикки систематически слабее величин Холмберга и Хьюмасаона, Мэйолла, Сандэйджа [1] на  $+0^m.40$ . Приводя к системе Холмберга и учитывая галактическое поглощение ( $0^m.25$ ), для интегральной фотографической звездной величины скопления имеем  $m_{рк} = 5^m.91$ . При средней лучевой скорости скопления  $v = 1182 \text{ км/сек}$ , значении параметра Хаббла  $h = 75 \text{ км/сек} \cdot \text{мпс}$  и абсолютной фотографической величине Солнца  $+5^m.37$  интегральная светимость скопления равна  $1.21 \cdot 10^{13} L_\odot$ . Заметим, что использованный нами ранее [7] прием оценки интегральных светимостей скоплений по угловым диаметрам галактик с помощью калибровочной зависимости  $m_{рк} \sim 5 \lg d$ , дал для скопления в Деве светимость  $1.02 \cdot 10^{13} L_\odot$ . Согласие между двумя оценками следует считать хорошим, если учесть еще, что в последнем случае предельная звездная величина подсчетов меньше, чем у Цвикки примерно на  $0^m.7$ . Интегральная видимая величина скопления по Холмбергу [1]  $m_{рк} = 6^m.0$  также близка к приведенному выше значению. Итак, при  $M = 8.1 \times 10^{14} M_\odot$  и  $L = 1.21 \cdot 10^{13} L_\odot$  отношение массы к светимости для скопления в Деве равно  $668 M_\odot / L_\odot$  с точностью  $\pm 20\%$ . Представляет интерес выяснить, в какой степени отношение массы к светимости  $f$  зависит от предельной звездной величины измеряемых галактик. С этой целью подсчеты галактик в полосах по каталогу Цвикки проводились отдельно до  $15^m.7$ ,  $15^m.0$  и  $14^m.0$  звездных величин. Соответствующие значения  $f$  получились следующими:  $f_{15.7} = 668$ ,  $f_{15.0} = 665$  и  $f_{14.0} = 694$ . Таким образом, несмотря на увеличение интегральной светимости скопления при учете более слабых галактик, отношение массы к светимости меняется всего на  $4\%$ . Такое постоянство  $f$  объясняется тем, что в скоплении имеется сегрегация ярких и слабых галактик. Относительно большая распространенность слабых га-

лактик на периферии скопления, чем в центре, обуславливает увеличение эффективного радиуса скопления с ростом предельной звездной величины измеряемых галактик. А это влечет за собой увеличение массы скопления, находимой из теоремы вириала. Поэтому одностороннее изменение отношения  $f$  с 400 до 200, которое сделал Цвикки [8] для скопления  $01^h 23^m - 01^s 38'$  при учете слабых галактик, выглядит малооправданным и нуждается в проверке.

4. Распределение галактик в области скопления Девы крайне неоднородно. Статистические соображения показывают, что флуктуации распределения не могут быть вызваны случайными причинами. Малое галактическое поглощение в направлении Девы также не способно объяснить наблюдаемые неоднородности. Естественно предположить, что галактики скопления образуют физические группы и кратные системы. На основе имеющегося материала [5, 9] представляется возможность применить теорему вириала к 6 парам и 5 группам галактик и вычислить для них соответствующие значения массы и отношения массы к светимости. Результаты расчетов приведены в табл. 2 и 3. Суммарные массы групп вычислялись по формуле

$$M = \gamma^{-1} \frac{3\pi}{2} \frac{N}{N-1} \langle \Delta v_r^2 \rangle \rho, \quad (2)$$

Таблица 2

NGC	$\langle \Delta v_r^2 \rangle^{1/2}$	$\rho_{\text{кнс}}$	$\Sigma L/L_{\odot}$	$f/f_{\odot}$
4374, 4387, 4406, 4435, 4438, 4458, 4461, 4473, 4477, 4479.	850	182	$1.4 \cdot 10^{11}$	1137
4464, 4467, 4472, 4492.	274	70	$9.3 \cdot 10^{10}$	81
4478, 4486, апоп.	91	40	$6.6 \cdot 10^{10}$	9
4550, 4551, 4552.	317	64	$2.5 \cdot 10^{10}$	482
4621, 4638, 4647, 4649, 4660.	368	88	$9.8 \cdot 10^{10}$	168

В первом столбце приведены номера галактик по NGC, входящих в группы, во втором и третьем, соответственно, — дисперсия лучевых скоростей в км/сек и среднее расстояние между компонентами в клс. В четвертом столбце даны интегральные светимости групп, а в последнем — отношение массы к светимости в единицах солнечного.

где  $\gamma$  — постоянная тяготения,  $\langle \Delta v_r^2 \rangle$  — среднее значение дисперсии лучевых скоростей галактик,  $N$  — число их в рассматриваемой системе, а  $\bar{r}$  — среднее расстояние между членами системы в проекции на картинную плоскость.

Таблица 3

NGC	$\Delta v_r$	$R_{12 \text{ кпс}}$	$\Sigma L/L_\odot$	$f/f_\odot$
4294 4299	203	26	$5.7 \cdot 10^9$	175
4382 4394	<50	36	$5.2 \cdot 10^{10}$	<1.5
4527 4536	204	128	$4.3 \cdot 10^{10}$	110
4567 4568	129	6.2	$1.7 \cdot 10^{10}$	5
4647 4749	204	13	$5.5 \cdot 10^{10}$	10
4754 4762	393	47	$2.8 \cdot 10^{10}$	523

Данные о парак галактик. Обозначения те же, что и в табл. 2.

Для расчета масс пар галактик использовалось выражение:

$$M = \gamma^{-1} \frac{12}{\pi} \langle \Delta v_{12}^2 \rangle \rho_{12}; \quad (3)$$

здесь  $\rho_{12}$  — расстояние между компонентами пары в проекции на картинную плоскость,  $\langle v_{12}^2 \rangle$  — квадрат разности лучевых скоростей, а  $12/\pi$  — фактор проекции в предположении, что члены пар движутся по эллиптическим орбитам.

Обе формулы были получены из теоремы вириала при условии, что массы членов систем одинаковы. Пары галактик считались изолированными на том основании, что вклад окружающих галактик в потенциальную энергию пары составлял менее 20%.

Как видно из табл. 2 и 3, дисперсия значений  $f$  и  $u$  группы и  $u$  пар большая. Среднее арифметическое отношение массы к светимости для групп составляет 375 с квадратичной погрешностью  $\pm 180$ . Среднее значение для пар заметно меньше:  $f_{\text{пар}} = 137 \pm 74$ . Суммарная светимость рассмотренных групп составляет 35% от всей светимости скопления. Светимость пар — 16%.

5. Прежде чем перейти к обсуждению полученных результатов, рассмотрим еще несколько морфологических характеристик скопления в Деве как целого. Подсчеты и классификация галактик на Па-

ломарских картах до предельного диаметра  $1'.12$  позволили выявить отчетливые сегрегации членов скопления по яркостям и типам. Результаты в виде изменения среднего углового диаметра галактик  $\bar{d}$  и процентного состава E и S0 галактик вдоль радиуса скопления  $R$  представлены в табл. 4. Центр скопления отождествлялся с радиогалактикой NGC 4486, имеющей пекулярную скорость всего  $12 \text{ км/сек}$ . Последняя строка табл. 4 дает зависимость от радиуса скопления дисперсии лучевых скоростей галактик. Как видим, уменьшение всех трех величин вдоль радиуса довольно монотонное.

Таблица 4

$R^\circ$	0—2	2—4	4—8	8—16
$\bar{d}$	2'.54	2'.20	2'.06	2'.02
E+S0 (%)	64	41	31	20
$ \overline{v-v}  \text{ км/сек}$	629	613	482	332

Изменение среднего углового диаметра галактик  $\bar{d}$ , процентного содержания E и S0 типов E+S0 (%) и дисперсии лучевых скоростей галактик  $|\overline{v-v}|$  вдоль радиуса скопления. Последняя зона 8—16° охватывает в основном южный сектор скопления.

6. Рассмотрим различные возможности объяснения большого значения  $f$  для скопления в целом. Интуитивно кажется очевидным, что учет эффектов, искажающих реальную дисперсию скоростей галактик, не может менять значение  $f$  на порядок. Действительно, при вычислении  $f$  использовался прием, автоматически учитывающий эффект подскоплений. Влияние же галактик переднего и заднего фона должно быть несущественным по следующей причине. Если выделить две группы галактик с экстремальными значениями скоростей, скажем, с  $v_r < 400 \text{ км/сек}$  и  $v_r > 2000 \text{ км/сек}$ , то средняя звездная величина 8 галактик в первой группе будет  $11^m3$ , а для 9 галактик второй группы  $11^m7$ . Поскольку скопление в Деве имеет угловые размеры  $\sim 20^\circ$ , то галактики, находящиеся на передней границе скопления, должны быть ярче галактик на задней границе в среднем на  $0^m7$ . Если бы в выделенных нами группах содержалась ощутимая доля галактик фона, то разность звездных величин была бы заметно больше, чем  $0^m7$ . Следовательно, влияние эффекта фона на дисперсию скоростей галактик в действительности невелико.

Обсудим возможность присутствия в Деве „скрытой“ материи. Поскольку находимые по внутреннему вращению отдельных галактик значения  $f$  заключены в среднем в пределах 5—20, то на долю тем-

ной материи в Деве следует отнести 80% вычисленной по теореме вириала массы. Цвикки полагает, что существенный вклад в массу скопления могут вносить компактные галактики. Однако первые определения  $f$  для компактных галактик [10] дали  $\bar{f} < 115$ . Таким образом, если бы даже скопление в Деве целиком состояло из компактных галактик, то и тогда расхождение устранить не удалось бы. В качестве курьеза отметим, что в одной из групп (возле NGC 4486) находится компактная галактика  $12^{\text{h}}28^{\text{m}}0 + 12^{\circ}46'$ , но именно у этой группы отношение массы к светимости самое меньшее из всех пяти групп. Предполагать наличие большого количества пыли в скоплении также не приходится, так как в области Девы видно много далеких скоплений галактик. Если допустить, что за большое значение  $f$  ответственен некий метагалактический фон невидимой (скажем, нейтринной) материи, то плотность его должна быть на два порядка больше критической при  $h=75 \text{ км}\cdot\text{сек}^{-1}\cdot\text{мпс}^{-1}$ . А это не было бы незамеченным по наблюдениям далеких скоплений галактик. Остается последняя мыслимая форма „скрытой“ материи — темные компактные образования с массами порядка масс звезд или галактик. Однако распределение ее в скоплении Девы должно быть очень причудливым. Действительно, так как  $f$  для пар галактик на порядок выше нормальных значений, то в малом объеме между членами пар должно концентрироваться большое количество подобных объектов. Для групп галактик отношение  $f$  в среднем еще в 2.5 раза больше, чем для пар. Но по сравнению с  $f$  для всего скопления, отношение массы к светимости в группах приблизительно в два раза меньше. Следовательно, темные объекты должны быть рассредоточены между группами галактик. Вряд ли такая запутанная картина может служить подходящей основой для объяснения аномальных значений  $f$ .

Проще и разумнее всего допустить, что скопление галактик в Деве нестационарно и расширяется. Тогда применение теоремы вириала к скоплению, а также к подсистемам галактик в нем, дает фиктивное значение массы. Величина отношения массы к светимости при этом отражает степень нестационарности или кинетического избытка системы. Единственным серьезным возражением против расширения скопления является малое время экспансии. Для Девы оно равно  $4 \cdot 10^9$  лет. Поэтому за время  $\sim 10^{10}$  лет большинство скоплений рассеялось бы и не наблюдалось. Но при последовательном объяснении больших значений  $f$  у групп и пар галактик следует допустить, что и эти образования распадаются. Тогда экспансионный возраст групп и пар в Деве получается порядка  $3 \cdot 10^9$  лет. Молодость этих образований определенно указывает на то, что в скоплении

идет процесс возникновения новых галактик. Благодаря ему скопление не рассеивается и не теряется на общем фоне.

Подтверждением нестационарности скопления и молодости отдельных образований в нем могут служить несимметричная форма скопления, присутствие в нем голубых галактик Aro, наличие выброса из ядра радиогалактики NGC 4486 и другие пекулярные особенности. Убывание дисперсии лучевых скоростей галактик от центра скопления к периферии указывает на радиальный характер движений в скоплении, что естественным образом объясняется его расширением.

Автор признателен академику В. А. Амбарцумяну и чл.-корр. АН АрмССР Б. Е. Маркарян за обсуждение результатов работы.

Бюраканская астрофизическая  
обсерватория

## ON INSTABILITY OF THE VIRGO CLUSTER OF GALAXIES

I. D. KARACHENTSEV

It is shown, that the presence of many pairs of galaxies with mixed (E and S) components in the cluster does not agree with Vaucouleurs's assumption on the existence of separate E and S clouds in Virgo cluster region.

The Virial Theorem gives for the ratio of mass to the luminosity in this cluster  $f=665 M_{\odot}/L_{\odot}$ . Possible presence of faint galaxies can not change  $f$  appreciably. The data on the segregation of the galaxies by the brightnesses and the types along the radii of the cluster are given.

The values  $\bar{f}=375 \pm 180$  for 5 groups of the galaxies and  $\bar{f}=137 \pm 74$  for the pairs have been obtained. The influence of possible presence of all kinds of „latent“ matter can not explain these values of  $f$ . The instability and the expansion of the cluster together with the origin of new galaxies in it, is in the best agreement with the observational data. The decrease of the dispersion of the radial velocities of the galaxies to the boundary of the cluster, expected for this case, has been found.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. E. Holmberg, A. J., 66, 10, 620, 1961.
2. F. Zwicky, Morphological astronomy, Berlin, Springer, 1957.
3. В. А. Амбарцумян, Научные труды, т. 2, 298, АН АрмССР, Ереван, 1960.
4. G. de Vaucouleurs, Ap. J., Suppl. ser., VI, 56, 213, 1961.

5. *M. L. Humason, N. U. Mayall, A. R. Sundage, A. J.*, 61, 3, 97, 1956.
6. *F. Zwicky, E. Herzog, P. Wild*, Catalogue of galaxies and of clusters of galaxies, I, California Institute of technology, 1961.
7. *F. Zwicky, E. Herzog*, Catalogue of galaxies and of clusters of galaxies, II, California Institute of technology, 1963.
8. *И. Д. Караченцев*, Изв. АН АрмССР (серия физ.-мат. наук), 17, 4, 109, 1964.
9. *Problems of extra-galactic research, I. A. U. Symp. № 15*, 347, The MacMillan company, New York, 1962.
10. *N. U. Mayall, A. de Vaucouleurs, A. J.*, 67, 6, 363, 1962.
11. *F. Zwicky, Ap. J.*, 140, 4, 1467, 1964.