ՀԱՅԿԱԿԱՆ ՍՍՌ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ ՏԵՂԵԿԱԳԻՐ
ИЗВЕСТИЯ АКАДЕМИИ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР
Ֆիզիկա-մաթեմատ. գիտություններ XVII, № 3, 1964 Физико-математические науки

АСТРОФИЗИКА

И. Д. Караченцев

О нестабильности сферического скопления галактик в Coma

§ 1. Общие сведения

В последнее время вопрос о стационарности различных систем галактик приобрел большую остроту и значимость. Начиная с 1955 года, в серии работ В. А. Амбарцумяна и других авторов [1, 2, 3, 4] было указано на неустойчивость конкретных групп и скоплений галактик.

Конференция по нестабильности систем галактик [5], состоявшаяся в 1961 году в Санта-Барбаре США, подвела итоги дискуссии по этому вопросу. Сделаны были следующие выводы:

1. Тесные физические пары галактик, по-видимому, стабильны.

2. Небольшие группы с трапецеидальной конфигурацией (Квинтет Стефана) расширяются.

3. Неправильные скопления типа Virgo подозреваются в нестабильности.

4. Компактные правильные скопления (Coma) имеют отрицательную полную энергию и стационарны.

Последнее утверждение подробно обосновано Ф. Цвикки, который много лет занимался изучением сферического скопления Coma. Перечислим его аргументы (в порядке возрастания убедительной силы):

а) высокая степень симметрии сферических скоплений прямо указывает на стационарность их;

б) распределение плотности числа галактик вдоль радиуса скопления соответствует ожидаемому из теории для изотермической газовой сферы Эмдена;

в) далекие скопления галактик не обнаруживают по сравнению с близкими каких-либо эволюционных изменений;

г) в скоплениях заметна сегрегация ярких и слабых галактик, имеется аналог больцмановского распределения плотности для смеси „газов". А такое распределение устанавливается лишь с достижением системой стационарного состояния;

д) в сферических скоплениях очень высок процент эллиптических и линзовидных (SO) галактик. Такое население образовалось в

результате взаимных столкновений, приводящих к потере пыли и сглаживанию структурных неоднородностей. Поскольку столкновения между галактиками редки, то обилие типов E и SO указывает на солидный возраст скопления;

е) положительный знак энергии у всех скоплений противоречит общеизвестному факту, что большинство галактик входит в скопления;

ж) для расширяющихся скоплений „время экспансии" в 5—10 раз меньше, чем возраст наблюдаемой части Метагалактики ($13 \cdot 10^9$ лет).

Единственным обстоятельством, не укладывающимся в эту систему аргументов, явилось применение к скоплениям теоремы вириала. В предположении стационарности скоплений из теоремы вириала получались ненормально большие значения отношения массы к светимости $\frac{M}{L}$ для галактик. Устранить указанную трудность пытались введением следующих предположений:

а) эллиптические галактики, входящие в скопления, действительно имеют $\frac{M}{L}$ большее, чем галактики фона;

б) в массу скопления существенный вклад вносит светящаяся и невидимая межгалактическая материя.

Однако, эти предположения кажутся искусственными и, более того, противоречат некоторым наблюдательным данным.

В сферическом скоплении галактик Coma как в системе гравитирующих частиц возможны четыре различных состояния стационарности:

1. Неустойчивое состояние с положительной полной энергией.
2. Состояние нестационарности в общем регулярном поле при отрицательной энергии.
3. Стационарное состояние в регулярном поле.
4. Квазистационарное состояние в поле иррегулярных сил.

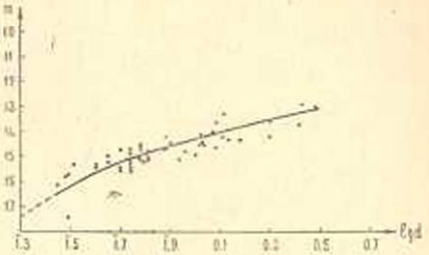
В четвертом случае должно устанавливаться равнораспределение энергии между галактиками с разными массами. Именно этой точки зрения и придерживается Ф. Цвикки. Предположение, что у Coma полная энергия положительна, впервые было выдвинуто В. А. Амбарцумяном [2]. Промежуточная точка зрения принадлежит Т. А. Агекяну [6]: он считает скопление Coma стационарным только в общем регулярном поле.

Задачей данной работы является отыскание таких морфологических и динамических критериев, которые могли бы однозначно указать на степень стационарности сферического скопления Coma.

§ 2. Результаты измерений

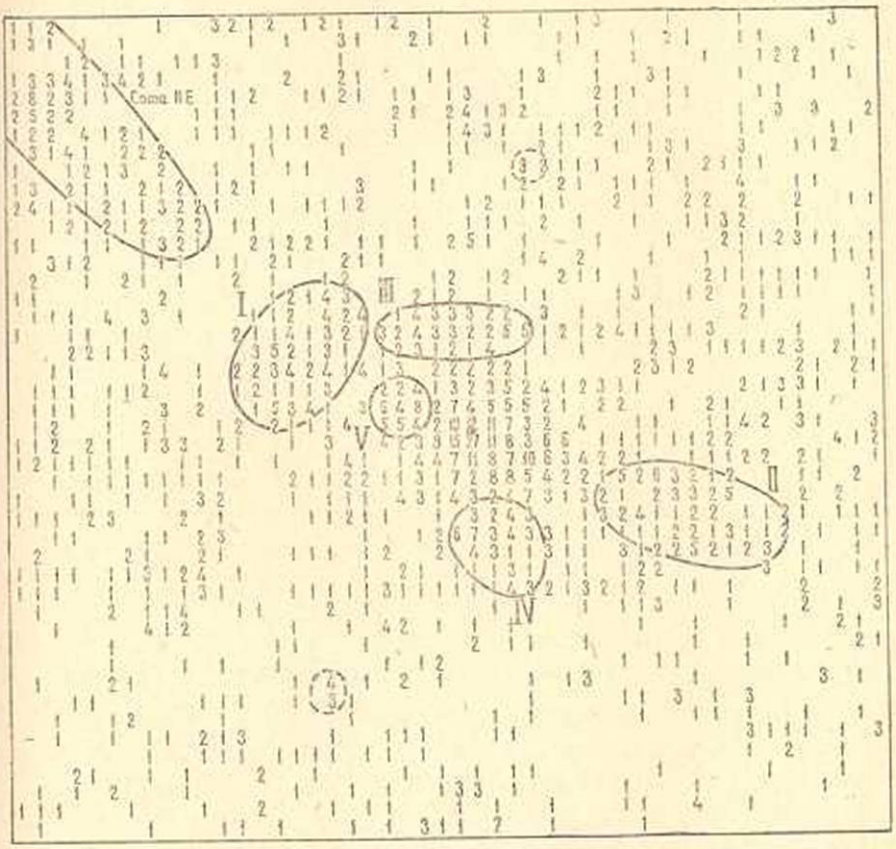
В районе скопления Coma на картах Паломарского атласа определялись координаты, угловые диаметры и типы галактик до определенного углового размера $d_{\min}$. По этим данным строилась диаграмма

распределения галактик. На диаграмму галактики наносились различными индексами и цветами в зависимости от яркости и типа. Такой способ изучения скоплений трудоемок, на зато дает гораздо больше морфологических сведений, чем обыкновенные подсчеты чисел галактик в единичных площадках. В частности, имеется возможность определять характер населенности скопления и количественно изучать эффекты сегрегаций. Для перехода от углового размера к фотографической звездной величине строилась зависимость $m_\phi \sim \lg d$ по 49 галактикам с известными звездными величинами (фиг. 1).



Фиг. 1. Зависимость звездная величина—логарифм углового диаметра для галактик Coma.

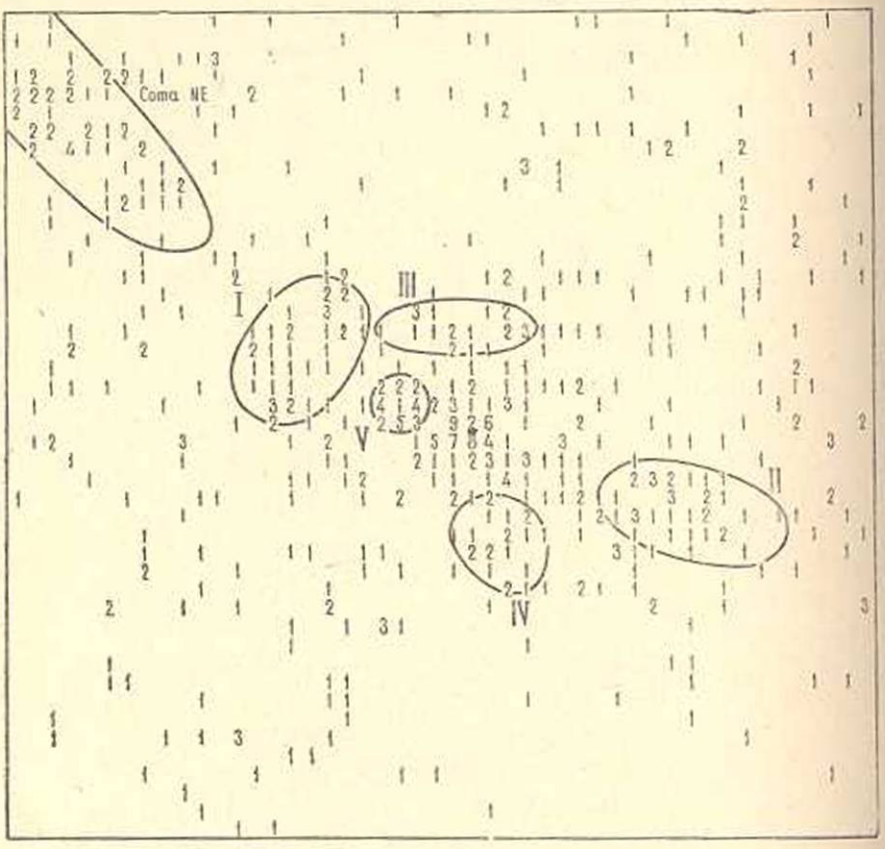
Изученная область имеет вид прямоугольника с размерами 9° × × 8°,4 и центром, приблизительно совпадающим с центром скопления (фиг. 2 и 3). На этой площади обнаружено 617 галактик ярче $15^m,6$ и 1937 галактик ярче $17^m,4$.



Фиг. 2. Распределение галактик ярче $17^m,4$. Центр скопления отмечен черным кружком. Каждая цифра указывает число галактик в квадрате со стороной 11',2.

Распределение их в первом приближении сферичное. Однако, имеются и заметные неоднородности. На фигурах они обведены линиями. Ниже будет показано, что эти неоднородности распределения образуют структурные особенности скопления Coma.

Подсчеты галактик в кольцевых зонах и вычисленное по ним распределение плотности числа галактик вдоль радиуса приведены в табл. 1. Центр скопления ($\alpha = 12^h57,^m3$, $\delta = +28°\ 14'$) выбирался по мак-



Фиг. 3. Распределение галактик ярче $15,^m6$. Масштаб тот же, что и на фиг. 2.

симальной концентрации, он приходится на самую яркую галактику *NGC* 4874. Из таблицы видно, что граница скопления довольно неопределенна. Если из подсчетов чисел галактик фона не исключать соседнее скопление (Coma *NE*), то падение плотности прекращается на расстоянии 3°—4° от центра. Если же Coma *NE* исключить, то плотность падает вплоть до последней зоны, т. е. до 5°—6°. Возможно, что скопление простирается еще дальше.

Чтобы найти количество членов скопления, нужно принять определенное значение числа галактик фона на квадратный градус N_Φ. При $N_\Phi = 15$ к скоплению принадлежит 890 галактик ярче $17,^m4$.

Заметим, что изучаемая область располагалась на четырех картах. Из-за непостоянства атмосферных условий N_ϕ различно для разных карт. Сравнение подсчетов галактик на участках, общих для двух карт, показывает, что N_ϕ меняется от карты к карте всего на 15—20%.

Для выявления эффекта сегрегации ярких и слабых членов скопления в каждой зоне вычислялась средняя звездная величина галактик $\overline{m}$. Такая характеристика удобнее критерия Цвикки (отношения чисел галактик ярче и слабее 16^m5) [7], т. к. зависимость $\overline{m}(r)$, вообще говоря, может быть получена и теоретически. Значения $\overline{m}$ указаны в табл. 2. В ней же приводится и процентное содержание галактик различных типов (галактики фона не исключались).

Таблица 1

Номер зоны	Радиусы зоны	Число галактик в зоне	Число галактик на квадратный радиус	
1	0′—5′	22	1010	
2	5—10	33	494	
3	10—15	40	367	
4	15—20	32	210	
5	20—25	25	127	
6	25—30	42	175	
7	30—35	31	110	
8	35—40	40	123	
9	40—45	32	86	
10	45—50	36	87	
11	50—55	26	57	
12	55—60	39	78	
13	60—70	67	59	
14	70—80	65	50	
15	80—90	54	37	
16	90—100	59	36	
17	100—110	54	30	
18	110—120	66	33	
19	120—140	135	30	
20	140—160	99	19.0	
21	160—180	108	18.2	
22	180—200	130	19.6	
23	200—220	139	19.0	
24	220—240	150	18.7	17.1**)
25	240—260	146	16.8	16.2
26*)	260—360	287	17.4	11.7

Анализ таблицы позволяет подметить следующие тенденции: $\overline{m}$ с большими колебаниями возрастает от центра к периферии; процент эллиптических галактик убывает от 80—90% в центре до 30% на краю скопления; процент *SO* приблизительно постоянен; процент спиралей возрастает с 5 до 40—50%; неправильные галактики почти

* Последняя зона охватывает не все направления, а только четыре угла прямоугольника. Среднее расстояние вершин углов от центра равно 367′.

** Число галактик на квадратный градус после исключения соседнего скопления Coma *NE*.

отсутствуют в центре, а на периферии составляют 5—10%; галактики с низкой поверхностной яркостью составляют 1—2%; процент пекулярных убывает от 15% в центре до 5% на краю скопления.

Может показаться, что Coma состоит исключительно из *E* и *SO* галактик и что наличие спиралей, также как сегрегация спиралей и

Таблица 2

Номер зоны	$\bar{m}$	E%	SO%	S%	Ir%	С низкой поверхностной яркостью %	Из них пекулярных %	N_s
1	14^m77	86	9	5	—	—	18	50
2	15,10	91	6	3	—	—	13	15
3	16,16	73	15	12	—	—	13	46
4	15,26	47	34	13	6	—	6	27
5	15,91	64	16	20	—	—	8	25
6	15,80	52	31	17	—	—	7	30
7	15,82	45	32	17	6	—	—	19
8	15,98	45	22	28	5	—	3	34
9	15,67	59	16	19	6	—	13	16
10	15,37	42	33	25	—	—	3	22
11	16,42	77	15	8	—	—	12	5
12	15,59	39	23	25	8	5	8	20
13	15,59	48	18	25	9	—	9	15
14	15,46	40	22	29	6	3	14	15
15	15,00	28	30	35	4	3	11	13
16	15,29	29	32	22	14	3	9	8
17	15,73	33	9	54	4	—	2	16
18	15,73	36	29	29	6	—	—	10
19	15,46	32	13	46	5	4	6	13
20	16,10	32	13	48	7	—	2	9
21	16,12	40	19	37	4	—	6	7
22	15,64	38	20	34	8	—	5	7
23	16,16	36	15	41	7	1	4	8
24	15,80	30	21	37	11	1	1	7
25	15,51	30	15	46	7	2	7	8
26	15,61	31	17	45	4	3	3	8
26*	15,80	24	12	51	8	5	2	6

Во втором столбце приводится средняя звездная величина галактик в зоне.
В третьем—шестом указан процент галактик различных типов.
Последний столбец дает число спиралей на квадратный градус.

эллиптических галактик, обусловлены наложением галактик фона. Последний столбец табл. 2 дает число спиралей на квадратный градус для каждой зоны. Убыль N_s от центра наружу указывает на реальное присутствие спиралей в скоплении.

§ 3. Структурные неоднородности Coma

Изучая распределение галактик в Coma, Шейн и Виртанен [8] обнаружили подскопление к югу от центра на расстоянии 1°. Ван ден Берг [9] исследовал угловые расстояния между галактиками и тоже пришел к выводу, что в Coma существуют подскопления. Однако, его методика не давала возможности исключать эффекты поглощения и наложения далеких скоплений.

* Та же зона, но без скопления Coma *NE*.

На диаграмме распределения галактик выделяются, по крайней мере, пять подскоплений (I—V) возле центрального ядра, а к северо-востоку на расстоянии 5° от центра находится скопление, обозначенное символом Coma *NE*.

Поскольку Coma находится вблизи галактического полюса, то поглощение света пылью Галактики невелико. Чтобы выявить межгалактическое поглощение света, использовался следующий прием. Ослабление света сопровождается покраснением. При наличии поглощения в областях, бедных галактиками, должен наблюдаться избыток цвета *CE*. Следовательно, должна существовать связь между числами галактик в единичных площадках на красной (N_k) и синей (N_c) картах Паломарского атласа. Выясним вид этой зависимости.

Для однородного поля одинаковых по яркости галактик справедливо соотношение:

$$N = N^{\circ} \cdot 3{,}98^{-\Delta m}, \tag{3.1}$$

где Δm—поглощение света в звездных величинах, N° и N, соответственно,—числа галактик на единичной площадке в отсутствии и при наличии поглощения.

Применяя (3.1) к синей и красной картам, имеем

$$\frac{N_c}{N_k} = \frac{N_c^0}{N_k^0} \cdot 3{,}98^{-(\Delta m_c - \Delta m_k)} = \text{const} \cdot 3{,}98^{-CE}.$$

Избыток цвета линейно связан с поглощением: $CE = \frac{\Delta m_c}{\gamma}$; здесь коэффициент γ выражается через эффективные длины волн двух спектральных областей следующим образом: $\gamma = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1}$; для Паломарского атласа $\lambda_2 = 6500\ \mathring{A}$, $\lambda_1 = 4300\ \mathring{A}$ и $\gamma = 2{,}96 \simeq 3$. Тогда

$$\frac{N_c}{N_k} = \text{const} \cdot N_c^{\frac{1}{3}}. \tag{3.2}$$

Следовательно, между $\lg \frac{N_c}{N_k}$ и $\lg N_c$ должна наблюдаться линейная зависимость. Подсчеты галактик до 20^m в 102-х площадках, расположенных на разных расстояниях от центра скопления, дали для коэффициента корреляции между $\lg \frac{N_c}{N_k}$ и $\lg N_c$ значение $K = 0{,}3 \pm 0{,}1$. Но галактики 20^m заметно ослабляются красным смещением. Для галактик ярче 17^m9 $K = +0,\ 1 \pm 0{,}1$.

Аналогичные подсчеты проводились и для звезд. Полученные результаты позволяют утверждать, что ни галактическое, ни межгалактическое поглощения не могут быть причиной наблюдаемых неоднородностей в Coma.

На реальность существования подскоплений указывают также данные табл. 3. Мы видим, что в каждом подскоплении процент ярких галактик выше, чем у фона. Средняя звездная величина $\bar{m}$ галактик подскопления меньше $\bar{m}$ для галактик соседних областей, находящихся от центра скопления на том же расстоянии. Следовательно, наложение далеких скоплений не может быть ответственным за наблюдаемые неоднородности распределения.

Таблица 3

Область	$N_{\square}$ %	N_{Δ} %	$\bar{m}$	$\bar{m}_{\text{зоны}}$	$\bar{m}_{10}$	$\left[\frac{W(n)}{W(\bar{n})}\right]_{\square}$	$\left[\frac{W(n)}{W(\bar{n})}\right]_{\Delta}$
Coma I	9	34	$15^m.40$	$15^m.67$	$14^m.3$	$4\cdot10^{-9}$	$6\cdot10^{-5}$
Coma II	13	34	15,39	15,58	14,3	$2\cdot10^{-10}$	$3\cdot10^{-13}$
Coma III	14	26	15,32	15,50	14,4	$8\cdot10^{-2}$	$3\cdot10^{-1}$
Coma IV	12	19	15,54	15,56	14,5	$1\cdot10^{-2}$	$5\cdot10^{-1}$
Coma V	9	41	15,36	15,64	14,6	$1\cdot10^{-4}$	$5\cdot10^{-10}$
Coma *NE*	10	34	15,46	15,73	14,2	—	—
Фон	5	18	—	—	—	—	—

$N_{\square}$ % — процент галактик ярче $14^m.6$,

N_{Δ} % — процент галактик в интервале $15^m.6$—$14^m.6$,

$\bar{m}$ — средняя звездная величина галактик подскопления (ярче $17^m.4$),

$\bar{m}_{\text{зоны}}$ — средняя звездная величина галактик в зоне (ярче $17^m.4$), в которой расположено подскопление,

$\bar{m}_{10}$ — средняя звездная величина 10 ярчайших членов подскопления,

$\left[\frac{W(n)}{W(\bar{n})}\right]_{\square}$ — относительная вероятность случайной флюктуации для галактик ярче $17^m.4$.

$\left[\frac{W(n)}{W(\bar{n})}\right]_{\Delta}$ — относительная вероятность случайной флюктуации для галактик ярче $15^m.6$.

Средняя звездая величина 10 ярчайших членов у каждого подскопления приблизительно одинакова, значит подскопления находятся примерно на одинаковом расстоянии от наблюдателя и образуют физическую систему.

Обнаруженные неоднородности распределения не могут быть случайными. Вероятности случайных флюктуаций распределения галактик внутри областей Coma I—V для галактик ярче $17^m.4$ и ярче $15^m.6$ приведены в последних столбцах табл. 3. Вероятности рассчитывались по формуле

$$W(n) = W(\bar{n}) \cdot e^{-\frac{(n-\bar{n})^2}{2\bar{n}}},$$

где $\bar{n}$—среднее (наивероятнейшее) число галактик в данной области, n—наблюдаемое число, $W(\bar{n})$—вероятность наивероятнейшего распределения, а $W(n)$—вероятность флюктуации $(n-\bar{n})$. Вероятность случайного скучивания в областях I, II, V составляет ничтожную величину: 10^{-4}—10^{-13}. Для областей III и IV вероятность порядка 10^{-1}—10^{-2}. Однако, нужно помнить, что пространственная флюктуация плотности всегда больше, чем в проекции на картинную плоскость. Поэтому вычисленные вероятности систематически завышены на несколько порядков.

Подсчеты галактик на диаграмме 2 показывают, что в подскопления I—V входит более четверти всего населения Coma.

Отметим такой любопытный факт: скопление Coma *NE* вытянуто в направлении Coma, а система подскоплений Coma I—V, в свою очередь, ориентирована на Coma *NE*. Такая диагональная асимметрия Coma хорошо заметна и на фиг. 2 в статье Мэйалла [10]. Судя по звездным величинам ярчайших галактик, оба скопления равноудалены от наблюдателя. Вполне возможно, что здесь мы имеем сверхсистему, напоминающую цепочку скоплений в Геркулесе.

На диаграмме распределения галактик, выделяются еще две небольшие группы. Они обведены на фиг. 2 пунктиром. Северная из них имеет диаметр 12′ и состоит из 8 эллиптических галактик средней яркости, угловой диаметр южной—25′, состоит она исключительно из спиралей (9 членов ярче $17^{m}4$). Эти группы находятся, по-видимому, за скоплением, но не исключена возможность и того, что они принадлежат скоплению.

§ 4. Оценки массы и светимости скопления

По данным Мэйалла [10] средняя лучевая скорость для 50 галактик скопления составляет $+6920\frac{км}{сек}$, а дисперсия лучевых скоростей $-982\frac{км}{сек}$. Этому соответствует при $H=75\frac{км}{сек\ мпс}$ расстояние $r=92$ *мпс*. Прокалиброванная зависимость $m_{\Phi}\sim\lg d$ позволяет найти интегральную светимость скопления. С учетом галактического ($0,^{m}24$) и межгалактического ($0^{m}21$) ослабления света общая светимость составляет $4{,}9\cdot10^{12}\,L_{\odot}$*. Абсолютная фотографическая величина Солнца бралась по Аллену [11] равной $5^{m}31$. Интегральная светимость скопления соответствует излучению от 950 галактик с абсолютной звездной величиной $-19,^{m}0$. Основной вклад в светимость скопления вносят яркие галактики. Для них зависимость $m_{\Phi}\sim\lg d$ прокалибрована достаточно хорошо. Точность оценки L составляет примерно 30%.

* Эйбелл получил несколько меньшее значение—$4{,}5\cdot10^{12}L_{\odot}$. Но за радиус Coma он принимал $R=2^{\circ},5$.

Для определения массы скопления предположим, что оно стационарно и применим теорему вириала:

$$2T + U = 0. \tag{4.1}$$

Кинетическая энергия T вычисляется по дисперсии лучевых скоростей. Потенциальную энергию U можно оценить двумя следующими способами:

а) разобъем скопление эквипотенциальными поверхностями на ряд тонких концентрических слоев. Потенциал внутри каждого сферического слоя считаем постоянным. Тогда гравитационная энергия скопления представляется формулой

$$U = \frac{1}{2} G \frac{M^2}{\bar{R}}, \tag{4.2}$$

где

$$\bar{R} = \frac{5}{6} \frac{\left(\sum_{i=1}^{k} N_i\right)^2}{\sum_{i=1}^{k} N_i^2 \frac{r_i^5 - r_{i-1}^5}{(r_i^3 - r_{i-1}^3)^2}}, \tag{4.3}$$

здесь r_i — радиус i-го сферического слоя, N_i — число галактик в нем, а индекс „k" связан с радиусом скопления: $r_k = R$. Записанное в явном виде относительно массы уравнение (4.1) принимает вид:

$$M = 233 \langle \Delta v^2 \rangle \cdot 2\bar{R}, \tag{4.4}$$

масса скопления выражена в солнечных массах, дисперсия скоростей $\langle \Delta v^2 \rangle$ в $\frac{км}{сек}$, а эффективный радиус $\bar{R}$ в парсеках. Беря N_i из табл. 1, имеем $\bar{R} = 0{,}45\,R$. Для $R = 5^\circ$ получается $M = 5{,}03 \cdot 10^{15} M_\odot$. Эта оценка дает нижний предел массы скопления, т. к. при вычислении $\bar{R}$ использовалось распределение плотности в проекции на картинную плоскость;

б) верхний предел массы можно оценить методом „полос" Амбарцумяна [12]. В этом методе все галактики проектируются на некоторую произвольную ось y, проходящую через центр сферического скопления. Потенциальная энергия дается точной формулой

$$U = G \int_{-\infty}^{\infty} [\varphi(y)]^2 dy, \tag{4.5}$$

где G — постоянная тяготения, а $\varphi(y)$ — распределение плотности в проекции на ось y. Задача нахождения U сводится к подсчетам чисел галактик в параллельных полосах шириной Δy. Подставляя (4.5) в теорему вириала (4.1), получаем

$$M = 233 \frac{N^2}{\left[\sum_{i=1}^{n} N_i(y)\Delta y\right]^2} \cdot \langle \Delta v^2 \rangle \cdot \Delta y; \qquad (4.6)$$

здесь Δy—ширина полосы в парсеках, $\langle \Delta v \rangle$—дисперсия скоростей в $\frac{км}{сек}$, $N_i(y)\Delta y$—число галактик в i-ой полосе, а N—полное число галактик. В силу неравенства Коши-Буняковского методом „полос" получается верхнее значение массы. Расчет массы по формуле (4.6) (полосы брались шириной в 33′) дает $M = 4{,}96 \cdot 10^{15} M_\odot$.

Как видим, согласие независимых оценок массы хорошее. Для среднего значения $M = 5{,}0 \cdot 10^{15} M_\odot$ получаем отношение массы к светимости $\frac{M}{L} = 1020 \frac{M_\odot}{L_\odot}$, т. е. на полтора порядка больше обычного.

Объяснить избыток M присутствием между галактиками темного газо-пылевого вещества невозможно: за Coma видно много далеких скоплений. По данным радионаблюдений [13] масса нейтрального водорода не превышает 3% общего количества вещества в Coma.

Если предположить, что избыток M сосредоточен в невидимых плотных телах с массами порядка массы галактики, то снова натолкнемся на трудность. Для Coma время релаксации $t_E = 10^{11} - 10^{12}$ *лет*. Чтобы удовлетворить критерию устойчивости скопления, требуется отнести на долю невидимых тел 98% всей массы. Но тогда t_E уменьшится до $2 \cdot 10^9 - 2 \cdot 10^{10}$ *лет*, то есть скопление быстро достигло бы квазистационарного состояния в иррегулярном поле. А в Coma нет признаков стационарности даже в регулярном поле (подскопления!).

Некоторые полагают, что у гигантских эллиптических галактик могут быть чрезвычайно большие значения $\frac{M}{L}$, и поэтому в $\frac{M}{L}$ Coma $= 1020$ нет ничего удивительного. Однако, если для слабых галактик $\frac{M}{L}$ нормальное, т. е. примерно 20—30, то у ярких должно быть ~ 1000—2000. Поскольку из теоремы вириала, применяемой к внутреннему движению звезд в галактиках, $M \sim \langle \Delta v^2 \rangle R$, а из графика 1 $L \sim R$, то $\frac{M}{L} \sim \langle \Delta v^2 \rangle$. Из этого следует, что у гигантских галактик дисперсия скоростей звезд должна быть на порядок больше, чем у нормальных и составлять примерно 2000 $\frac{км}{сек}$. Но в пользу такой большой дисперсии скоростей звезд у гигантов нет никаких наблюдательных данных. Более того, большая размытость спектральных линий поглощения у E—гигантов приводила бы к большим погрешностям в оценках их лучевых скоростей. Однако, в каталоге

[14] лучевые скорости ярчайших галактик *NGC* 4874 и 4889 приведены с погрешностью $\pm 30 \frac{км}{сек}$ и $\pm 40 \frac{км}{сек}$, соответственно, тогда как у слабых галактик погрешность в 2—3 раза больше. К этому следует добавить, что, имея $\frac{M}{L} \sim 1000$, галактики Coma заметно отличались бы от галактик фона. При той же светимости или их диаметры должны были быть на два порядка больше нормальных или же внутренняя дисперсия скоростей звезд больше на порядок, чем у галактик фона. Ни то, ни другое не подтверждается наблюдениями.

Попытка объяснить большую кинетическую энергию скопления ссылкой на существование в нем подскоплений не устраняет количественного расхождения. Прибавление к трем степеням свободы поступательного движения галактики еще двух степеней вращательного движения меняет коэффициент при кинетической энергии менее, чем в два раза.

Таким образом остается единственный выбор: скопление нестационарно и расширяется.

§ 5. Аргументы, подтверждающие нестабильность Coma

Мэйалл [10] обнаружил уменьшение дисперсии лучевых скоростей галактик Coma при переходе от центральных областей скопления к периферии, что указывает на радиальный характер движений в скоплении. Такой эффект как раз и должен наблюдаться, если скопление расширяется.

Для ярких галактик дисперсия $\langle \Delta v_r \rangle$ меньше, чем для слабых. Коэффициент корреляции между $\langle \Delta v_r \rangle$ и m равен $+0{,}1$. Этим, по-видимому, и обусловлена сегрегация ярких и слабых галактик. Если стать на точку зрения образования галактик за счет деления и выбросов из ядер, то эффект получает естественную интерпретацию: в процессе деления менее массивная галактика получает по закону сохранения количества движения большую скорость относительно центра тяжести. Поэтому массивные галактики—родительницы имеют малую дисперсию скоростей. К примеру, средняя скорость двух ярчайших центральных галактик *NGC* 4874 и 4889 отличается от средней для скопления всего на $115 \frac{км}{сек}$.

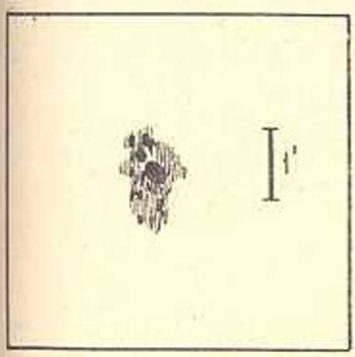
В Coma найдено 15 двойных и 3 тройных системы галактик, члены которых соединены перемычками или диффузной светящейся материей. Общая оболочка указывает на то, что пары эти физические. Однако, в случае достижения скоплением квазистационарного состояния в иррегулярном поле между числом пар и числом одиночных галактик должно установиться диссоциативное равновесие. Применяя формулу Амбарцумяна [15] к данному скоплению галактик, получаем

$$\frac{\delta n}{n} = 10^{-8}, \tag{5.1}$$

где δn—число пар, а n—число одиночных галактик. Для $n = 1000$ имеем $\delta n = 10^{-5}$, то есть на 100000 скоплений типа Coma должна приходиться одна физическая пара галактик (с расстоянием между компонентами в 50 *кпс*). Следовательно, факт существования в Coma нескольких пар говорит об отсутствии в нем квазистационарного состояния.

На расстоянии 4° от центра скопления расположена пекулярная система *NGC* 4676 („играющие мышки"). Лучевая скорость „мышек" $v_r = 6550 \frac{км}{сек}$ отличается от средней для скопления всего на $370 \frac{км}{сек}$. Бэрбиджи [16] считают эту пару членом скопления. Они полагают, что возраст „мышек" порядка 10^8 *лет*.

На 85′ к северу от центра находится объект, изображенный на фиг. 4. Из эллиптической галактики как бы вытекает шлейф светящейся материи. В голубоватую материю вкраплены три галактикоподобных сгущения.



Фиг. 4. Пекулярный объект в Coma.

Возле самого центра скопления находится двухядерная галактика *NGC* 4898. Небольшой возраст этих систем не вызывает сомнений. Список подобных объектов можно было бы продолжить. Пекулярные галактики составляют 9% от общего числа галактик в области Coma, т. е. приблизительно около 80 из них принадлежат скоплению.

Будет небезынтересен такой подсчет. Разделяющиеся галактики выглядят пекулярными в течение примерно $5 \cdot 10^8$ *лет*. Если возраст Coma равен возрасту Метагалактики, то в настоящее время процент пекулярных должен составлять $\frac{5 \cdot 10^8}{1{,}3 \cdot 10^{10}} = 4\%$ (образование галактик предполагается равномерным и непрерывным во времени). Эта величина по порядку согласуется с наблюдениями.

Подчеркнем: присутствие молодых объектов в Coma говорит о том, что члены скопления возникли неодновременно; процесс образования галактик продолжается в настоящее время. Именно благодаря постоянному возникновению новых членов расширяющееся скопление все еще наблюдается нами как скопление.

Экспансионный возраст Coma для $R = 5°$ равен $5 \cdot 10^9$ *лет*, то есть в два раза меньше H^{-1}. Однако, нет никаких оснований считать $R = 5°$ предельным радиусом скопления. На таких расстояниях плотность $N(r)$ настолько мала, что совершенно замывается соседними в проекции скоплениями. Если возраст Coma равен H^{-1}, то до расстоя-

ния в 15°—20° от центра скопления должны попадаться галактики с лучевыми скоростями, мало отличающимися от средней, поскольку они движутся под небольшими углами к картинной плоскости. И действительно, в каталоге Хьюмасона, Мэйалла и Сандейджа [14] имеется пара пекулярных галактик *IC* 3481 и anon (№ 43 в каталоге „взаимодействующих" галактик Воронцова-Вельяминова), удаленных от центра Coma на 18° и имеющих среднюю скорость $v_r = 7120 \frac{км}{сек}$, то есть всего на $200 \frac{км}{сек}$ больше, чем у скопления. Принадлежность этой системы к Coma весьма вероятна.

Выводы

Вернемся к аргументам а)—ж), якобы подтверждавшим стационарность сферических скоплений. Им можно соответственно противопоставить следующие факты и соображения:

а) сферическая симметрия скоплений весьма условна. Даже самое регулярное скопление Coma имеет крупные неоднородности и вытянуто в направлении $SW - NE$;

б) модель изотермической газовой сферы Эмдена находится в противоречии с радиальным характером движений галактик в скоплении. Более того, ход плотности, предсказываемый теорией, плохо согласуется с данными табл. 1. Если считать, что в центре скопления теоретическая плотность равна наблюдаемой, то уже на расстоянии 30′ от центра теоретическое значение составляет 50% наблюдаемого, а на расстоянии 160′ — только 20%. Можно увязать теорию с наблюдениями следующим способом (Цвикки). Масса и радиус изотермической сферы Эмдена бесконечны. Произвольно вычитая некоторую постоянную величину можно урезать плотность до нуля на конечном расстоянии от центра. Но даже такое согласование плотности на периферии не в состоянии устранить больших расхождений теории с наблюдениями в средних областях скопления;

в) сравнение далеких скоплений с близкими производилось до лучевой скорости $V_r = 61000 \frac{км}{сек}$ (*Hydra*). Скопление *Hydra* находится от нас на расстоянии $2{,}7 \cdot 10^9$ *световых лет*. Этого мало, чтобы заметить при большой селекции наблюдений эволюционные изменения в скоплении, имеющем возраст порядка $1{,}3 \cdot 10^{10}$ *лет*;

г) сегрегация ярких и слабых галактик появляется при достижении скоплением квазистационарного состояния в иррегулярном поле. Однако, за то же время должно устанавливаться и диссоциативное равновесие между числом пар и одиночных галактик. Так как последнее не наблюдается, то причина сегрегации должна быть иная (см. выше);

д) нельзя считать *E* и *SO* галактики более старыми, чем спирали. Они (*E* и *SO*) входят во многие группы галактик с положи-

тельной полной энергией. Цепочки в Virgo и Perseus также состоят из этих типов. А системы в виде цепочки или трапеции имеют возраст порядка 10^8-10^9 *лет*;

е) скопление, в котором постоянно образуются новые галактики, будет выглядеть скоплением даже несмотря на расширение. При этом остается справедливым утверждение, что большинство галактик входит в скопления (в наблюдательном отношении процесс образования новых членов компенсирует расширение скопления);

ж) малое время экспансии для скоплений вызвано, по-видимому, недооценкой их размеров.

Изучение других сферических скоплений (Cancer, Perseus, Pegasus) показало, что и эти скопления нестабильны. Признаки нестационарности выражены у них не менее явно, чем в Coma. Среди больших систем галактик, по-видимому, вообще нет устойчивых образований.

Считаю долгом выразить признательность академику В. А. Амбарцумяну и доценту А. Ф. Богородскому за внимание к работе и ценные советы.

Бюраканская астрофизическая обсерватория
АН Армянской ССР

Поступила 17 XII 1963

Ի. Դ. Կարաչենցև

Coma-ՈՒՄ ԳԱԼԱԿՏԻԿԱՆԵՐԻ ՍՖԵՐԻԿ ԿՈՒՏԱԿՄԱՆ ԱՆԿԱՅՈՒՆՈՒԹՅԱՆ ՄԱՍԻՆ

Ա Մ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Քննադատաբար դիտարկված են տարբեր փաստարկներ, որոնք հիմնավորում են Coma *գալակտիկաների կուտի ստացիոնարությունը։ Տարբեր անկլունային չափերի գալակտիկաների հաշվումներով որոշվում է* Coma *կուտի ինտեգրալ պայծառությունը։ Բերվում են մորֆոլոգիական տվյալներ կուտի մասին, մասնավորապես՝ գալակտիկաների անդրսգացիալի էֆեկտները ըստ պայծառության և տիպերի։ Հաշվառված են մի քանի ենթահակուտեր։ Երկու տարբեր վարիանտներով գնահատվում է մասսան, մասսայի լուսատվության հարաբերությունն ատացվում է 1020 (մինչև 30%-ի ճշտությամբ)։*

Ատացված տվյալների համաձայն, կուտի լրիվ էներգիան դրական է։ Բերված են լրացուցիչ փաստարկներ, որոնք խոսում են Coma*-ի լայնացման օգտին։ Արվում է ենթադրություն, որ կուտը ատրածվում է շատ ավելի հեռու, քան ընդունված է ներկայումս։

ЛИТЕРАТУРА

1. *Амбарцумян В. А.* Некоторые замечания о кратных галактиках. Сообщение на симпозиуме Международного астрономического союза в Дубавне. Ереван, 1955.

2. *Амбарцумян В. А.* Об эволюции галактик. Известия АН АрмССР, серия физ-мат. наук, **11**, № 5, 1958, 9.
3. *Burbidge G.* and *Burbidge Marg E.* The Hercules cluster of nebulae. Ap. J., **130**, № 2, 1959, 629.
4. Gerard de Vaucouleurs. The apperent density of matter in groups and clusters of galaxies. Ap. J., **131**, № 3, 1960, 285.
5. Proceedings of the conference on instability of systems of galaxies. Middletown, Connecticut, U. S. A., 1961.
6. *Агекян Т. А., Петровская И. В.* О распределении плотности в сферических скоплениях звезд и галактик. Уч. зап. ЛГУ, серия матем. наук, **36**, № 307, 1962, 187.
7. *Zwicky F.* Morphological astronomy. Berlin, Springer, 1957.
8. *Shane C. D.* and *Wirtanen C. A.* The distribution of extragalactic nebulae. A. J., **59**, № 8, 1954, 285.
9. Sidney van den Bergh. The clustering of galaxies. PASP, **73**, № 430, 1961, 46.
10. *Mayall N. U.* Advantages of electronic photography for extragalactic spectroscopy. Ann. d'a. p., **23**, 3, 1960, 344.
11. *Аллен К. У.* Астрофизические величины. И. Л., М., 1960.
12. *Амбарцумян В. А.* О гравитационной потенциальной энергии открытых скоплений. ДАН СССР, **24**, 1939, 875.
13. *Muller C. A.* 21-cm observations on the Coma cluster. B. A. N. **14**, № 493, 1959, 339.
14. *Humason M. L., Mayall N. U.* and *Sandage A. R.* Redshifts and magnitudes of extragalactic nebulae. A. J., **61**, № 3, 1956, 97.
15. *Амбарцумян В. А.* К статистике двойных звезд. А. Ж., **14**, 1937, 207.
16. *Burbidge G.* and *Burbidge Marg E.* NGC 4676, a peculiar system in the Coma cluster of galaxies. Ap. J., **133**, № 2, 1961, 726.