

В. Е. Караченцева, И. Д. Караченцев

УРАВНЕНИЕ И СРЕДНИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СПИРАЛЬНЫХ РУКАВОВ ГАЛАКТИК

1. Наблюдаемая структура спиральных рукавов галактик довольно сложна, и это является значительным препятствием при попытках уяснить проблему их происхождения. Однако в первом приближении для построения модели рукавов можно использовать некоторое эмпирическое уравнение спирали и статистические параметры, наилучшим образом описывающие наблюдаемую форму спиральных рукавов.

Изучением формы спиральных рукавов у нескольких близких галактик занимался ряд исследователей (см. [1]). Наиболее обстоятельной работой, посвященной этому вопросу, является диссертация Данвера [1]. По измерениям на фотопластинках рукавов 98 галактик Данвер получил уравнение спирали в полярных координатах в виде

$$\rho = \rho_0 e^{xf} \quad (1)$$

(логарифмическая спираль).

2. После опубликования Паломарского атласа стало возможным провести измерения спиральных рукавов галактик на более обширном и однородном материале. В настоящей работе было измерено 237 спиральных рукавов: 116 галактик с двумя рукавами и 5 однорукавных. 50 галактик имеют номера по каталогу NGC (табл. 1), среди них у 11 известны лучевые скорости.

Измерения спиральных рукавов галактик проводились на синих картах Паломарского атласа, где контрастность и

Таблица 1

Список измеренных галактик

NGC	3958	4986
694	3982	5002
776	3987	5085
851	3992	5123
1398	4025	5149
2421	4079	5154
2558	4303	5194
2582	4440	5247
2608	4475	5364
2633	4504	5829
2649	4519	5876
3183	4535	IC
3227	4579	239
3455	4652	2627
3507	4654	4395
3684	4780	4479
3905	4878	
3930	4939	

длина рукавов больше, чем на красных картах. Для измерений были отобраны галактики с видимым малым наклоном оси симметрии к лучу зрения, с достаточно четкой и неразветвленной спиральной структурой и угловым диаметром $\geq 1'$; в основном это объекты типов Sc и Sb по Хабблу с числом рукавов не более двух.

Радиусы-векторы точек на средней линии спирального рукава* измерялись через интервалы $\frac{\pi}{8}$ угловой координаты

* Как правило, контуры спиральных рукавов определяются расположением ассоциаций горячих звезд. Ввиду размытости рукава приходится вводить понятие некоторой средней линии рукава как квазинепрерывной последовательности центров областей с максимальной концентрацией яркости.

2. Отсчет угловой координаты начинался от точки, в которой спиральный рукав выходил из области передержки на карте вокруг ядра галактики. Поскольку пересечение линии спирального рукава с границей области передержки определялось индивидуальным распределением яркости в каждой данной галактике, то нуль-пункт отсчета угловой координаты φ_0 был величиной условной, случайным образом меняющейся от галактики к галактике. Максимальное значение угла φ_m соответствовало точке, где порог чувствительности карты еще позволял уверенно различать рукав на окружающем фоне. Сопоставление двух серий измерений показало, что суммарные погрешности определения координат, вызванные размытостью рукава, неточностью наведения на центр галактики и случайной ошибкой отсчета, составляют в среднем $\Delta \rho = \pm 0.06$ и $\Delta \varphi = \pm 2^\circ$.

3. Распределение 237 рукавов по видимым угловым протяженностям φ_m представлено на рис. 1. Зависимость $N(\varphi_m)$ имеет максимум около $10 \frac{\pi}{8}$ с асимметрией по отношению к нему в сторону больших значений φ_m . Среднее значение угловой протяженности рукавов равно $11.1 \frac{\pi}{8}$, или 250° , с дисперсией $\sigma_{\varphi_m} = 114^\circ$. Заметим, что сравнение $N(\varphi_m)$ со случайным пуассоновским распределением при указанном среднем показывает, что по критерию χ^2 согласие хуже, чем в 1 из 10^6 случаев.

Было также построено распределение 116 двурукавных галактик по разностям в угловых протяженностях первого и второго рукавов. Распределение оказалось непохожим на нормальное гауссово распределение. Среднее значение $|\varphi_{m1} - \varphi_{m2}|$ получилось равным 27.5, что заметно меньше, чем у Данвера (67.2).

4. Сведения об аналитической форме среднего спирального рукава по измерениям $\rho(\varphi)$ можно получить двояким образом.

1) Для каждого рукава в отдельности следует подбирать такое теоретическое уравнение спирали с соответствующими параметрами, чтобы сумма уклонений наблюдаемых значений $\rho(\varphi_i)$ от теоретической кривой была минимальной; затем выбрать уравнение, удовлетворительно описывающее наибольшее число случаев, и, применяя его снова ко всем рукавам, определить средние значения входящих в это уравнение параметров. Такой способ был использован Данвером [1].

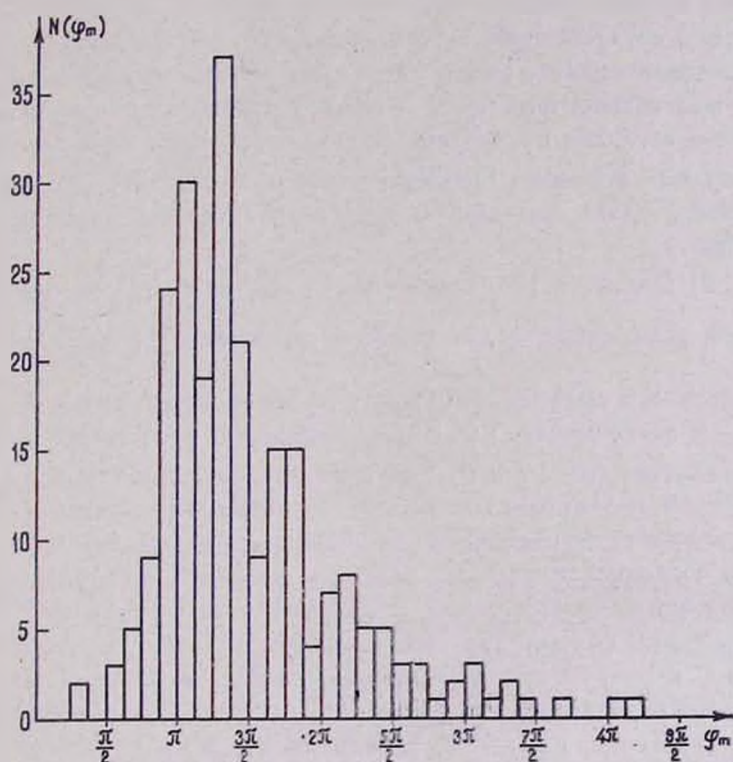


Рис. 1.

табл. 1.

Недостаток этой процедуры усреднения состоит в том, что при исправлении наблюдаемой зависимости $\rho(\varphi_i)$ за эффект наклона галактики возникает следующая неопределен-

ность. Связь между измеряемыми координатами ρ , φ и истинными координатами в плоскости галактики ρ' , φ' выражается соотношением

$$\begin{aligned}\rho' &= \rho \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \omega \sin^2 \varphi}, \\ \operatorname{tg} \varphi' &= \operatorname{tg} \varphi \sec \omega,\end{aligned}\quad (2)$$

где ω — угол наклона плоскости галактики к плоскости, перпендикулярной к лучу зрения. Угол ω приходится подбирать таким образом, чтобы исправленные значения ρ_i наилучшим образом согласовывались с предварительно выбранной теоретической кривой. Опыт учета влияния наклона показывает, что при разных значениях ω можно добиться одинаково хорошего согласия исправленных величин ρ_i с разными теоретическими кривыми. Особенно велика указанная неопределенность для спиралей с небольшой угловой протяженностью.

2) В данной работе использовался иной способ усреднения. Для каждого дискретного значения φ_i (через $\frac{\pi}{8}$) вычислялась средняя величина $\bar{\rho}$ по всем спиральным рукавам, и зависимость $\rho(\varphi_i)$ представлялась в прямоугольных координатах (рис. 2 и 3). Эффект наклона давал волну переменной амплитуды с периодом π . Поскольку отсчет угловой координаты начинался от области передержки, а величина последней случайным образом менялась от галактики к галактике, то при таком усреднении „волны наклона“ со случайными фазами взаимно компенсировались. Из соображений корректности усреднения совокупность спиральных рукавов разбивалась на группы по угловой протяженности φ_m . Чтобы при каждом φ_i усреднялось одно и то же число значений ρ , часть $\rho(\varphi_i)$ с i больше некоторого минимального в данной группе приходилось отбрасывать.

5. На рис. 2 черными кружками обозначены средние значения $\bar{\rho}(\varphi_i)$ для 78 рукавов, у которых угловая протя-

женность $\varphi_m \geq \frac{3\pi}{2}$. Из рисунка видно, что усредненные величины хорошо ложатся на линейную зависимость

$$\rho = a(\varphi + \varphi_0), \quad (3)$$

то есть в среднем рукава галактик описываются архимедовой спиралью. Если провести усреднение для самых протяженных спиралей, то зависимость $\bar{\rho}(\varphi)$ также получается

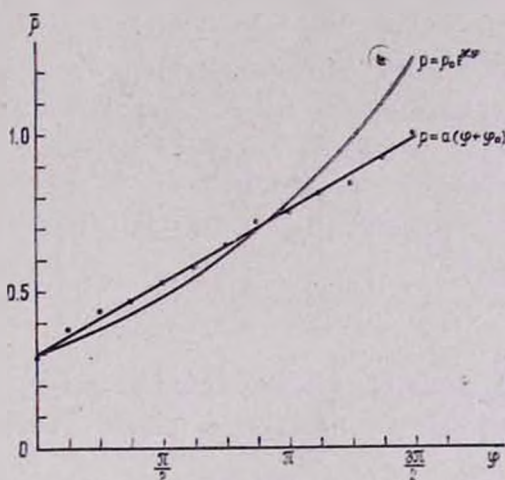


Рис. 2.
в. 4. 2.

линейной. На рис. 3 представлены результаты усреднения для 19 спиральных рукавов, у которых ρ измерено для 20 или более значений угловой координаты φ . Процедура усреднения была здесь несколько изменена: совмещались не начальные точки рукавов, а конечные, т. е. φ_m и $\rho(\varphi_i)$ для каждого рукава выражались в долях $\rho(\varphi_m)$. Вертикальными линиями у каждой точки отмечены интервалы среднеквадратичных погрешностей, вычисленных по уклонениям $\frac{\rho(\varphi_i)}{\rho(\varphi_m)}$ у индивидуальных рукавов от среднего значения. Аналогич-

ным образом были обработаны и группы спиралей с малой угловой протяженностью. В каждом случае усредненная зависимость $\bar{\rho}(\varphi)$ также оказалась линейной.

Для всей совокупности спиралей средние значения коэффициентов a и φ_0 в (3) получились равными $a = 0.45 \pm 0.04$ и $\varphi_0 = 0.62 \pi \pm 0.07 \pi$.

6. На рис. 2 изображена логарифмическая спираль с коэффициентом $\kappa = 0.30$, приводимым Данвером в качестве

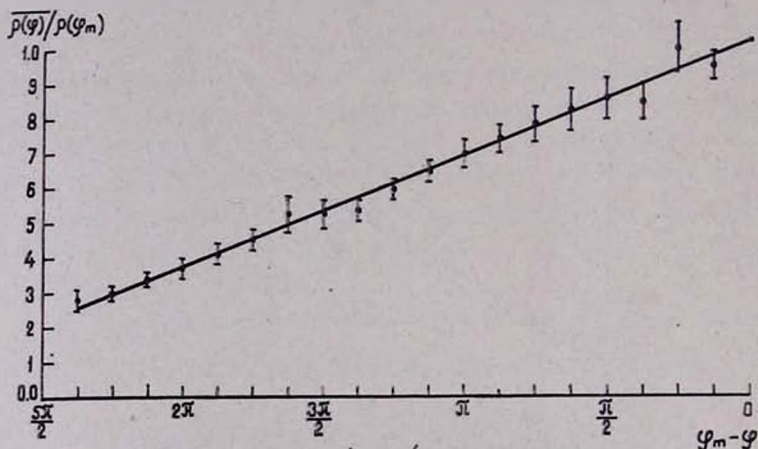


Рис. 3.

Ил. 3.

среднего значения по 190 рукавам. Как видно, логарифмическая спираль плохо представляет зависимость $\bar{\rho}(\varphi)$. Вероятно поэтому Данвер и отметил в [1], что „у большинства спиральных рукавов заметна тенденция к уменьшению коэффициента κ при переходе от области ядра к внешним частям рукавов“. Такая зависимость $\kappa(\varphi)$ должна приподнимать первые точки у экспоненты и опускать последние, то есть приближать логарифмическую спираль к архимедовой.

Следует отметить, что представление формы рукава уравнением $\rho = \rho_0 e^{\kappa \varphi}$ в некотором смысле удобнее, чем уравнением $\rho = a(\varphi + \varphi_0)$. В первом случае масштабный фактор входит только в ρ_0 , а κ характеризует степень разворота

рукава; в линейном представлении оба фактора объединяются в коэффициенте α .

7. Чтобы выразить параметр α архимедовой спирали в линейной мере, было проведено усреднение $\bar{\rho}(\varphi_l)$ отдельно для галактик с известными лучевыми скоростями. У всех галактик, за исключением M51, лучевые скорости больше 1000 км/сек, что позволило определять расстояния до них по зависимости $v = hr$ ($h = 75 \text{ км сек}^{-1} \text{ мпс}^{-1}$). Зависимость $\bar{\rho}$ в клс от φ_l для 22 спиральных рукавов представлена на рис. 4. Из-за уменьшения числа усредняемых членов дисперсия $\bar{\rho}(\varphi_l)$ с ростом φ_l возрастает. Крестиками обозначены те $\bar{\rho}(\varphi_l)$, для которых число усредняемых членов было меньше половины. Прямая линия проведена по 15 наиболее уверенным точкам. Как и в предыдущих случаях, линейность зависимости $\bar{\rho}(\varphi_l)$ проявляется достаточно отчетливо и выражается формулой

$$\bar{\rho} = 0.98 (\varphi + 0.86 \pi), \quad (4)$$

где $\bar{\rho}$ выражено в клс, а φ в радианах. Из (4) следует, что расстояние между смежными ветвями у двуручавной галактики составляет в среднем 3.08 клс^{*}.

8. Представляет интерес безразмерное отношение l/R длины спирального рукава к радиусу галактики. Если определить R как $\bar{\rho}(\varphi_m)$, то для l можно записать выражение:

$$l = \int_0^R \sqrt{1 + \frac{\rho^2}{a^2}} d\rho = \frac{1}{2} R \left\{ \sqrt{1 + \frac{R^2}{a^2}} + \right. \\ \left. + \frac{a}{R} \ln \left| \frac{R}{a} + \sqrt{1 + \frac{R^2}{a^2}} \right| \right\}. \quad (5)$$

* Ввиду того, что не все галактики расположены анфас, полученное значение α несколько занижено. Если углы наклона галактик не превышают 45°, то коэффициент α следует умножить на фактор 1.17.

Поскольку $R = a(\varphi_m + \varphi_0)$, для отношения l/R получаем

$$l/R = \frac{1}{2} \left\{ \sqrt{1 + (\varphi_m + \varphi_0)^2} + (\varphi_m + \varphi_0)^{-1} \ln \left| (\varphi_m + \varphi_0) + \sqrt{1 + (\varphi_m + \varphi_0)^2} \right| \right\}. \quad (6)$$

Подставляя в (6) $\overline{\varphi}_m = 1.39 \pi$ (из рис. 1) и $\overline{\varphi}_0 = 0.62 \pi$, имеем $\overline{l}/R = 3.4$. Для спиралей с известными лучевыми скоростями это отношение несколько больше: $\overline{l}/R = 4.2$. А согласно Данверу $\overline{l}/R = \sqrt{1 + \frac{1}{x^2}} = 3.5$.

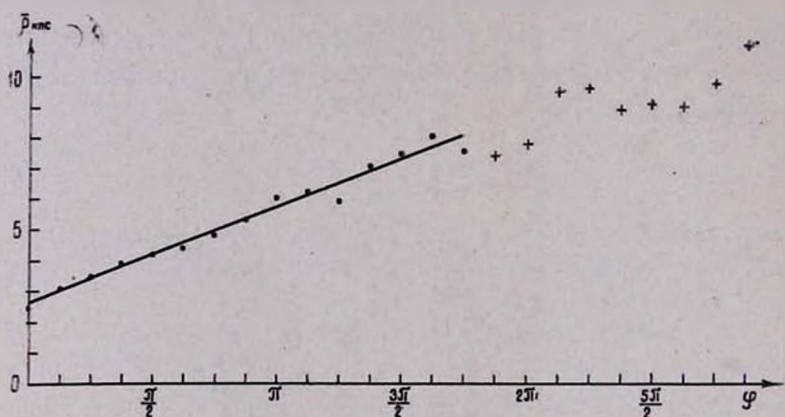


Рис. 4.
вд. 4.

В заключение подчеркнем, что линейное уравнение (3) представляет формулу спирального рукава лишь статистически. Иногда (NGC 5247, IC 239) для описания рукава лучше подходит логарифмическая спираль. В некоторых случаях встречаются весьма причудливые формы рукавов, а у NGC 4654, например, ход одного рукава совершенно не похож на ход другого.

Վ. Ե. ԿԱՐԱՉԵՆՏԵՎԱ, Ի. Դ. ԿԱՐԱՉԵՆՏԵՎ

ՍՊԻՐԱԼ ԳԱԼԱՍԻԿԱՆՆԵՐԻ ԹԵՎԵՐԻ ՀԱՎԱՍԱՐՈՒՄ ԵՎ ՄԻՋԻՆ
ԽԱՐԱԿՏԵՐԻՍՏԻԿԱՆՆԵՐ

Ա մ փ ո փ ու մ

Պալոմարի աստասի քարտեզների վրա 237 գալակտիկաների սպիրալ թևերի ուսումնասիրությունից արվում է եզրակացություն, որ սպիրալ թևի ձևը միջինում լավ է նկարագրվում Արքիմեդի սպիրալի հավասարմամբ՝ $\varphi = a(\varphi_0 + \varphi)$ ։ Յույց է տրվում սպիրալի հավասարման որոշման ժամանակ միջինացման ձևի նշանակությունը։ Տրվում է սպիրալ թևերի թվի բաշխումը ըստ մաքսիմալ անկյունային տարածվածությունների φ_m ։ Տրվում են նաև սպիրալ թևերի որոշ միջինացված պարամետրեր։

V. E. KARACHENTSEVA, I. D. KARACHENTSEV

THE EQUATION AND THE AVERAGE CHARACTERISTICS OF THE ARMS OF SPIRAL GALAXIES

Summary

From the measurements of the 237 spiral arms of the galaxies on the Palomar Sky Survey prints a conclusion is made, that the shape of the spiral arms is well described by Archimed's spirals equation $\varphi = a(\varphi_0 + \varphi)$.

The importance of the method of averaging by the determination of a spirals equation is examined. The results of Danver's work [1] are discussed critically.

The distribution of spiral arms of different galaxies according to their maximal angular lengths φ_m is presented; mean values of some parameters of the spiral arms are given.

ЛИТЕРАТУРА

1. C.—G. Danver, Annals of the observatory of Lund. № 10, 1942.