

241981

ТАРТУСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

Я. Эйнасто

СТРУКТУРА И ЭВОЛЮЦИЯ РЕГУЛЯРНЫХ ГАЛАКТИК

01.030 астрономия, астрометрия и небесная механика

Диссертация написана на русском языке

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Diss. Tart.

410750

ТАРТУ 1972

|

|

ТАРТУСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

Я. Эйвасто

СТРУКТУРА И ЭВОЛЮЦИЯ РЕГУЛЯРНЫХ ГАЛАКТИК

01.030 астрономия, астрометрия и небесная механика

Диссертация написана на русском языке

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

ТАРТУ 1972

Работа выполнена в Институте физики и астрономии АН Эстонской ССР.
Диссертация состоит из введения, четырех частей (24 главы) и заключения.
Содержание диссертации изложено на 366 стр. машинописи. Кроме того
имеется 139 рисунков, 69 таблиц и список литературы из 887 наименований.

Официальные оппоненты:

Академик АН Груз. ССР

доктор физ.-мат. наук, профессор Е. К. Харалдзе;

Доктор физ.-мат. наук, профессор Т. А. Агекян;

Доктор физ.-мат. наук, профессор Г. М. Идлис.

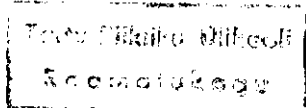
Ведущее учреждение: Физический институт имени П. Н. Лебедева АН СССР.

Автореферат разослан 15 февраля 1972 г.

Защита диссертации состоится 17 марта 1972 г. на заседании специализированного Совета по присуждению ученых степеней по физике Тартуского государственного университета в гор. Тарту, ул. Юликооли 18.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Тартуского государственного университета.

И. Маарос
Ученый секретарь ТГУ
(И. Маарос)



408561

ВВЕДЕНИЕ

Примерно 25 лет тому назад П. П. Паренаго ввел понятие практической звездной динамики, предметом которой является исследование структуры конкретных звездных систем на основе наблюдательных данных с применением теоретических соотношений, выводимых в динамике звездных систем. Основным методом практической звездной динамики является построение моделей исследуемых объектов. Практическая звездная динамика ставит в своей целью разработать возможно более репрезентативных моделей, в которых осуществляется синтез разнородной наблюдательной информации на основе результатов теории звездных систем. К задачам практической звездной динамики относится и исследование эволюции звездных систем. При этом проблема эволюции рассматривается как наблюдательная, т. е. эволюционные выводы делаются на основе теоретической интерпретации наблюдательных данных.

Совокупность работ, послужившая основой настоящей диссертации, посвящена разработке методов практической звездной динамики и их применению к исследованию структуры и эволюции регулярных галактик типа нашей Галактики. Мы не ставили целью дальнейшую разработку чистой теории на получение новых наблюдательных данных, так как уже имеющейся теоретической и наблюдательной информации больше, чем можно было обработать и объединить в одном цикле работ.

В I часть диссертации вошли исследования автора по звездной кинематике и о системе галактических параметров и модели Галактики. Во II части изложена теория построения пространственно-кинематических моделей звездных систем. III часть содержит исследования галактики Андромеды. В IV части изложены недавние работы автора о динамической и физической эволюции Галактики.

1 ПРОСТРАНСТВЕННО-КИНЕМАТИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА ГАЛАКТИКИ

А. Кинематика подсистем Галактики

Первые работы автора по данной проблематике посвящены исследованию кинематики звезд главной последовательности [1-7] и излагаются в гл. I диссертации.

Как известно, распределение скоростей однородных подсистем звезд приближенно подчиняется закону Шварцшильда. Анализ тангенциальных скоростей звезд главной последовательности показал, что у звезд ранних спектральных классов (горячих гигантов) распределение скоростей, действительно, хорошо представляется этим законом. У звезд же более поздних спектральных классов от F до K имеет место наложение двух или нескольких распределений Шварцшильда с различными дисперсиями скоростей. Аналогичная картина имеет место и у гигантов. Неоднородность кинематики очевидно вызвана большой дисперсией возрастов звезд: если у горячих гигантов мы имеем дело только с молодыми звездами, то звезды более поздних спектральных типов главной последовательности, также как и гиганты представляют собой смесь объектов весьма различного возраста.

При определении кинематических характеристик учитывались селекция наблюдательного материала по скоростям и влияние случайных ошибок. Показано, что широко непользувавшиеся результаты П. П. Паренаго в ряде случаев сильно искажены неучетом этих факторов.

В гл. 2 излагается предложенный в работе [4] простой способ определения средней дисперсии скоростей

$$\sigma^2 = \frac{1}{3}(\sigma_R^2 + \sigma_\theta^2 + \sigma_z^2) \quad (\sigma_R, \sigma_\theta, \sigma_z - \text{дисперсии скоростей в цилиндрической системе координат}) \text{ по формуле}$$

$$\overline{V^2} = \beta \sigma^2, \quad (1)$$

где β — некоторый безразмерный коэффициент, а V наблюдаемая скорость звезды. Под V можно подразумевать полную пространственную скорость V_s , тангенциальную скорость V_t или лучевую скорость V_r . Выражение коэффициента β найдено для всех этих вариантов при помощи обобщенной теоремы Клейбера [4]. С использованием этой методики изучена кинематика красных карликов [5, 7].

В гл. 3 изложены исследования автора эмпирического закона Стремберга асимметрического смещения скорости центра — да [8], а в гл. 4 рассмотрена зависимость кинематических характеристик звезд от их возраста. Если определить гало Галак-

тики как совокупность звезд с существенным дефицитом металлов, то оказывается, что к гало принадлежат все подсистемы звезд со средней дисперсией больше 50 км/сек и гелиоцентрической скоростью центронада тоже больше 50 км/сек.

Б. Модель Галактики и система галактических параметров

В работе [8] был поставлен вопрос об образовании согласованной системы локальных галактических параметров, т. е. околосолнечных значений функций описания Галактики. К галактическим параметрам относятся ротационные параметры Орта A и B , параметр Кузмина C , расстояние Солнца от центра Галактики R_0 , локальное значение круговой скорости V_c , отношения полюсов эллипсоида скоростей

$$k_0 = \frac{\sigma_\theta^2}{\sigma_R^2} \quad k_z = \frac{\sigma_z^2}{\sigma_R^2} \quad (2)$$

и др.

Имеется ряд соотношений между галактическими параметрами. Некоторые из этих соотношений являются следствиями определения, например, формула

$$V_c = (A + B)R_0 \quad (3)$$

Другие соотношения носят теоретический характер. Из теории стационарной галактики выводится формула Линдблада

$$k_0 = \frac{-B}{A - B} \quad (4)$$

а из теории действия иррегулярных сил формула Кузмина

$$k_z = \frac{k_0}{1 + k_0} \quad (5)$$

Соотношения между параметрами позволяют найти согласованную систему параметров. Автором совместно с С. А. Кутузовым предложен метод определения системы галактических параметров, в котором применяется уравнивание параметров способом наименьших квадратов [9—12]. Наблюдательные оценки параметров анализируются в гл. 6 диссертации. Сводка средних значений наблюдательных оценок параметров и их согласованная система воспроизведены в табл. 1. Там же даны и стандартные системы параметров, согласно Орту и нашей работе.

Проблема определения системы галактических параметров тесно связана с построением эмпирической модели распределения

Табл. 1

Параметр	Единица	Наблюдения		Система Эйнасто 1964		Стандарт. Оорт	система Эйнасто
R_0	кpc	9.0	± 0.7	9.05	± 0.4	10	10
A	км/сек/кпс	15.2	1.4	15.7	0.4	15	15
B	"	—	—	-10.3	0.4	-10	-10
C	"	70	3	71	2	90	72
ω	"	26.0	0.7	26.0	0.6	25	25
V	км/сек	226	21	235	10	250	250
W	"	142	6	142	6	150	150
k_θ		0.410	0.015	0.396	0.011	0.400	0.400
k_z		0.278	0.010	0.284	0.006	0.285	0.285
ρ_\odot	$\mathcal{M}_\odot/\text{пс}^3$	0.091	0.010	0.088	0.006	0.145	0.092

массы в Галактике. В гл. 5 описана наша первая модель, которая учитывает наличие в Галактике трех основных составляющих — плоской, промежуточной и сферической. Недавно мы построили новую модель Галактики со стандартной системой галактических параметров ([13, 14], гл. 7). Распределение массы Галактики представлено суммой трех эллипсоидов с модифицированным экспоненциальным законом плотности

$$\rho(a) = \rho(0) \exp \left\{ x_0 - \left[x_0^{2N} + \left(\frac{a}{ka_0} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2N}} \right\}, \quad (6)$$

где $\rho(0)$ — центральная плотность составляющей, x_0 и N — структурные параметры модели, a_0 — эффективный радиус модели, a — большая полуось эллипсоида равных плотностей и k — безразмерный нормирующий множитель.

Модель использована для установления соотношения между кинематическими и пространственными характеристиками различных тест-популяций, представляющих подсистемы Галактики. Основные параметры выбранных тест-популяций даны в табл. 2,

Табл. 2

Составл.	ϵ	a_0	N	x_0	σ_z	σ_R	V_θ	t	\mathcal{M}
		кпс			км/сек			10^9 лет	$10^9 \mathcal{M}_\odot$
Плоск.	0.02	8.0	0.5	0	8.8	16.4	250	0.9	13.2
Диск 1	0.05	7.4	1.0	1.5	19.9	37.3	239	3.9	
Диск 2	0.10	6.4	1.5	3.0	34.4	64.5	216	7.6	95.3
Гало 1	0.20	4.5	2.0	4.5	51.7	84.3	185	9.1	
Гало 2	0.40	1.9	3.0	7.5	71.4	92.8	142	9.4	
Гало 3	0.60	0.9	4.0	10.5	85.9	100.9	96	9.7	34.9
Гало 4	0.80	0.6	5.0	13.5	98.5	109.8	46	10.0	

три популяции совпадают с составляющими Галактики, для них даны и соответствующие массы. Вычисления показывают, что дисперсия скоростей в вертикальном направлении σ_z почти не зависит от z , а дисперсия скоростей в радиальном направлении σ_R сильно зависит от R , вопреки предсказанию классической теории стационарной галактики. Градиенты логарифма плотности

$$m = -\frac{d \log \rho}{dR}, \quad l = -\frac{d \log \rho}{dz} \quad (7)$$

в общем случае не постоянны, как обычно принималось раньше. Эллипсоид скоростей тем ближе к сфере, чем больше дисперсия скоростей.

II МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-КИНЕМАТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ РЕГУЛЯРНЫХ ЗВЕЗДНЫХ СИСТЕМ

Синтез наблюдательных данных о звездных системах на основе теории осуществляется в моделях. Проблему построения моделей звездных систем можно сформулировать следующим образом.

Из наблюдений известны: распределение яркости в звездной системе в различных фотометрических системах, распределение отдельных ярких объектов, распределение энергии в спектре, дисперсия скоростей и угловая скорость вращения в центральной части системы. Из теории известно, что пространственно-кинематическая структура подсистем звезд лишь очень медленно меняется с временем. Это позволяет использовать при описании структуры галактик теорию стационарных звездных систем, которая дает формулы связи между функциями описания. Задачей практической звездной динамики является разработка методов использования этой информации при моделировании звездных систем. Эту задачу можно разделить на два этапа: определение формул связи между функциями описания, и определение конкретного вида функций описания.

А. Основы теории построения эмпирических моделей звездных систем

Чтобы лучше разобраться в различных моделях звездных систем, автором совместно с С. А. Кутузовым предложена соответствующая классификация [15] (гл. 8, 13).

Каждая модель обладает целым рядом свойств, по которым ее можно классифицировать. Основные свойства, использован-

ные в классификации, следующие: 1) степень подробности описания, 2) степень учета физической структуры системы, 3) степень конкретности описания и 4) характер основного предположения. По этим свойствам модели разделяются на фазовые, пространственно-кинематические, пространственные и гросс-модели (свойство 1), на простые и составные (свойство 2), на абстрактные, специальные и конкретные (свойство 3) и на априорные, теоретические и эмпирические (свойство 4).

По форме изоповерхностей плотности модели могут быть классифицированы на а) несфероидальные, б) сфероидальные с постоянной и в) с переменной сплюснутостью. Эмпирические модели могут быть разделены еще на типы по аналитическому виду исходной функции описания, по методу построения модели, а также по тому, поведение какой физической величины считается заданным исходной функцией.

При моделировании звездных систем должны быть учтены критерии физической корректности модели ([15, 20], гл. 8, 13):

- 1) плотности, массы и светимости должны быть неотрицательными и конечными;
- 2) функции описания не должны иметь изломов и скачков;
- 3) функции описания должны быть однозначными;
- 4) моменты функции плотности должны быть конечными;
- 5) функции описания должны образовать согласованную систему.

В гл. 9 рассматриваются основные функции и параметры описания звездных систем [16]. Выражение формул связи между функциями описания зависит от формы поверхностей равных пространственных плотностей звездной системы или ее составляющих. Мы предполагаем, что звездные системы могут быть разделены на составляющие, поверхности равных плотностей которых являются соосными концентрическими эллипсоидами вращения с постоянным отношением полуосей $e = b/a$. Далее мы допускаем, что составляющие звездных систем физически однородны. Звездные системы, обладающие этими свойствами, мы называем регулярными.

Центральную роль среди функций описания играет функция массы (масса эллипсоидального слоя единичной толщины у экватора)

$$\mu(a) = 4\pi e \rho(a) a^2. \quad (8)$$

При сделанных предположениях спроектированные плотности массы $P(A)$ и светимости $L(A)$ связаны с функцией массы формулой

$$P(A) = iL(A) = \frac{1}{2\pi E} \int_A^\infty \frac{\mu(a) da}{a \sqrt{a^2 - A^2}}, \quad (9)$$

где A — большая полуось эллипсов равной спроектированной плотности с отношением полуосей E , а f — отношение массы к светимости, рассматриваемое как постоянная. Квадрат круговой скорости V^2 и радиальный компонент гравитационного ускорения K_R связаны с функцией массы формулой

$$V^2 = RK_R = G \int_0^R \frac{\mu(a) da}{R^2 - e^2 a^2} \quad (10)$$

причем G — гравитационная постоянная и $e^2 = 1 - \epsilon^2$. Если модель состоит из нескольких эллипсоидальных составляющих, то в этих формулах появляется знак суммы по составляющим.

Если задавать функцию массы численно, то спроектированная плотность и круговая скорость также получаются в численном виде. Но удобнее задавать функцию массы в аналитическом виде, тогда задача моделирования звездных систем сводится к определению параметров описания модели. Последние разделяются на модель-параметры (параметры в аналитических выражениях функций описания), гросс-параметры, определенные моментами функций описания и на локальные галактические параметры, рассмотренные в гл. 6. Модель- и гросс-параметры в свою очередь разделяются на масштабные параметры, определяющие массу и радиус модели, и на параметры сплюснутости и концентрации, определяющие структуру модели.

Методика построения эмпирических моделей распределения светимости и массы обсуждается в гл. 10 [19].

В гл. 11 рассматриваются способы определения кинематических функций описания для модели распределения массы [23].

Кинематические функции описания связаны с плотностью и компонентами гравитационного ускорения при помощи гидродинамических уравнений. При стационарности и осевой и плоскостной симметрии имеется два гидродинамические уравнения, которые могут быть написаны в виде

$$\begin{aligned} \frac{1}{R}(\sigma_R^2 - \sigma_\theta^2) + \frac{1}{\varrho} \frac{\partial}{\partial R}(\varrho \sigma_R^2) + \\ + \frac{1}{\varrho} \frac{\partial}{\partial z}[\varrho \gamma(\sigma_R^2 - \sigma_z^2)] - \frac{V_0^2}{R} = -K_R \end{aligned} \quad (11)$$

и

$$\begin{aligned} \frac{1}{R} \gamma(\sigma_R^2 - \sigma_z^2) + \frac{1}{\varrho} \frac{\partial}{\partial R}[\varrho \gamma(\sigma_R^2 - \sigma_z^2)] + \\ + \frac{1}{\varrho} \frac{\partial}{\partial z}(\varrho \sigma_z^2) = -K_z. \end{aligned} \quad (12)$$

Здесь K_R и K_z — радиальный и вертикальный компонент гравитационного ускорения соответственно, а

$$\gamma = \frac{1}{2} \lg 2\alpha, \quad (13)$$

причем α — угол наклона большой оси эллипсоида скоростей к плоскости симметрии галактики. К числу искомым функций в гидродинамических уравнениях принадлежат скорость центроида V_0 , дисперсии скоростей σ_R , σ_θ и σ_z , и параметр γ . Так как число неизвестных превышает число уравнений, то возникает проблема замыкания системы уравнений.

Систему уравнений можно замкнуть при помощи дополнительных уравнений для отношений дисперсии k_θ и k_z и параметра γ , которые в первом приближении зависят от гравитационного поля звездной системы. Вблизи плоскости симметрии галактики для плоских подсистем k_θ и k_z можно определить по формулам (4), и (5), параметр же γ может быть найден по теории третьего квадратичного интеграла, которая дает

$$\gamma = \frac{Rz}{R^2 + z_0^2 - z^2}, \quad (14)$$

где z_0 — некоторая постоянная.

В гл. 11 обсуждается также обобщение изложенного способа замыкания системы уравнений на общий случай и указывается на недостатки теории, которая пока не в состоянии предсказать достаточно точно форму и наклон эллипсоида скоростей вне плоскости галактики. Непосредственные вычисления, проведенные в гл. 7, также указывают на ограниченность изложенного способа. Оказывается, что отношение дисперсий скоростей k_z не является постоянной для данной области галактики, а зависит от дисперсии скоростей. Для плоских подсистем формулу (11) целесообразно рассматривать как выражение для определения скорости центроида, определив k_z по (4) и (5). Для подсистем гало лучше рассматривать (11) как дифференциальное уравнение для определения дисперсии σ_R , а скорость центроида брать пропорциональной круговой скорости, причем коэффициент пропорциональности можно определить по околосолнечным кинематическим данным.

В гл. 12 обсуждается теорема о вирнале и ее применение для определения масс звездных систем. Найдено выражение теоремы о вирнале для подсистем, которое позволяет вычислить среднюю дисперсию скоростей звезд подсистемы в радиальном и вертикальном направлении (относительно центра тяжести всей системы)

$$\overline{(\sigma_R^2)}_1 = \frac{\beta_R G}{\alpha_{01}} \sum_{j=1}^n \mathfrak{M}_j H_{1j}, \quad (15)$$

$$\overline{(\sigma_z^2)}_i = \frac{\beta_z G}{\alpha_{0i}} \sum_{j=1}^n \mathfrak{M}_j H_{ij}. \quad (16)$$

В этих формулах β_R, β_z — параметры, зависящие от сплюснутости ϵ_i подсистемы i , α_{0i} — эффективный радиус подсистемы i , \mathfrak{M}_j — масса подсистемы j , а H_{ij} — безразмерные коэффициенты, зависящие от распределения массы подсистем i и j . В диссертации даны формулы и таблицы для определения величин β_R, β_z, H_{ij} .

Б. Специальные модели звездных систем

В гл. 13 рассматриваются некоторые семейства специальных моделей, частным случаем которых является большинство использованных ранее моделей [20]. Исходная функция описания — функция массы (случай А) или спроектированная плотность (случай В) — имеют следующий вид:

а) полиномиальная модель

$$g(a) = g_0 \xi^\alpha \prod_{i=0}^n (1 - \chi_i \xi); \quad (17)$$

б) биномиальная модель

$$g(a) = g_0 \xi^\alpha \left(1 + \frac{1}{\beta} \xi^\nu \right)^{-\beta}. \quad (18)$$

В этих формулах $\xi = a/(ka_0)$, k — нормирующий параметр, g_0, a_0 — масштабные параметры, $\alpha, \beta, \nu = N^{-1}, \chi_i$ — структурные параметры. В качестве исходной функции описания может быть использована и радиальная компонента гравитационного ускорения (случай С), как это принято в обобщенной модели Боттлингера с выражением для K_R типа (18).

В гл. 13 показано, что обобщенная модель Боттлингера имеет слишком протяженное гало и не согласуется с соответствующим критерием физической корректности. Анализируются и другие модели, основанные на выражениях вида (17) и (18). Оказывается, что большинство использованных ранее моделей не согласуется с критериями физической корректности.

В гл. 14 и 15 дан детальный анализ полиномиальной и биномиальной модели. В гл. 16 приведены различные функции описания, в том числе и кинематические, для модифицированной экспоненциальной модели (6). Показывается, что ввод дополнительного структурного параметра x_0 значительно улучшает модель. Эта модель согласуется со всеми критериями физической корректности и лучше других моделей описывает реальные звездные системы.

III ПРОСТРАНСТВЕННО-КИНЕМАТИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА ГАЛАКТИКИ АНДРОМЕДЫ

Изучение галактики Андромеды представляет особый интерес, так как она является наиболее близкой внешней спиральной галактикой и по своему строению очень близка к нашей Галактике. Нами построена шестикомпонентная модель галактики Андромеды, состоящая из нуклеуса — небольшого по размерам, но очень плотного образования в центре системы, основного центрального тела (внутренняя и внешняя часть), диска и плоской составляющей.

Построение составной гидродинамической модели галактики осуществляется последовательными приближениями. Одно приближение состоит из следующих этапов:

- а) построение модели распределения массы;
- б) вычисление кинематических функций описания для полученной модели;
- в) сравнение модели с наблюдательными данными и определение поправок к параметрам модели.

Гидродинамическая модель М31 построена в трех приближениях. Первое приближение изложено в главах 17 и 18 и опубликовано в [22, 24], второе приближение опубликовано в [27], в диссертации оно не приводится, третье приближение дано в гл. 20. Основные параметры новой модели даны в табл. 3. Плотность составляющих аппроксимирована модифицированным экспоненциальным законом (6), истинный модуль расстояния принят равным $24.^m2$, а угол наклона галактики $i = 12.^{\circ}5$. Полная масса М31 получается $218 \times 10^9 M_{\odot}$.

Основная трудность при моделировании галактик заключается в определении масс отдельных ее составляющих и в выборе подходящего выражения для исходной функции описания. В первой модели мы использовали экспоненциальную модель, которая

Табл. 3

Величина	Един.	Нуклеус	Внутр. основн. тело	Внешн. основн. тело	Гало	Диск	Плоск. сост.	Вся сист.
ϵ		0.80	0.80	0.80	0.30	0.08	0.02	
N		2	4	4	4	1	0.5	
X_0		3	7	7	7	1	0	
a_0	кпс	0.005	0.15	0.8	3	9.2	8	
L_V	$10^9 \odot$	0.0057	0.501	2.94	6.18	7.57	2.46	19.65
L_V	"	0.0073	0.642	3.63	6.34	9.08	1.88	21.57
M	"	0.306	27.0	58.4	19.8	105.8	6.36	217.7
f_V		53.8	53.8	19.88	3.20	13.98	2.59	11.08
f_V		42.0	42.0	16.09	3.12	11.66	3.39	10.09
U—V		0.67	0.65	0.47	0.16	0.43	-0.17	
V—V		0.89	0.89	0.85	0.65	0.82	0.33	0.72

дает слишком острый пик плотности и глубокий минимум дисперсии скоростей в центре галактики. В следующих моделях этот недостаток устранен путем использования модифицированной экспоненциальной модели. Модель улучшена и в аспекте распределения масс по составляющим путем применения теоремы о вириале и использования уточненных данных о звездном составе нуклеуса. Но осталась неуверенность в распределении массы внешних частей галактики. Использование данных расчета физической эволюции галактик позволило устранить в третьей модели и этот недостаток.

Изучалась и спиральная структура галактики Андромеды по радионаблюдениям 21-см линии водорода (гл. 19 [25]). С учетом эффекта размазывания по положению и по частоте обработаны полученные из обсерватории Джодрел Бэнк данные с целью определения истинного распределения плотности и поля лучевых скоростей.

Основные результаты исследования структуры галактики M31 следующие.

Водород распределен в M31 неравномерно, как и в нашей Галактике, и образует спиральные и кольцевые уплотнения. Концентрации массы к центру галактики гораздо больше чем считалось раньше. Плотность вещества в нуклеусе M31 составляет ок. $10^6 M_{\odot}/\text{пс}^3$; в центре M31, вероятно, находится квазиточечное тело типа «черной дыры» массой порядка $10^8 M_{\odot}$. Нуклеус и внутренняя часть основного тела имеют повышенное содержание тяжелых элементов и отношение массы к светимости $i_v = 42$. Масса гало составляет 10% массы всей галактики, а отношение массы к светимости $i_v = 3$. Гало охватывает подсистемы в диапазоне сплюснутости от $\epsilon = 0.10$ до $\epsilon = 0.80$, среднее отношение полуосей $\epsilon = 0.30$. Удельный кинетический момент объектов сферической составляющей (нуклеус, основное центральное тело и гало) в 7 раз меньше соответствующего момента объектов диска и плоской составляющей.

IV ЭВОЛЮЦИЯ ГАЛАКТИКИ

Для выяснения возможной динамической эволюции Галактики в диссертации исследуются пространственно-кинематические характеристики подсистем разного возраста. Такой метод реконструкции эволюции Галактики был использован ранее фон Хэрнером и Эггеном, Линден-Беллом и Сэндиджем. Эти авторы исследовали кинематические характеристики разного возраста в окрестности Солнца. Мы же рассматриваем эволюцию всей Галактики, используя помимо локальных кинематических данных еще данные, вытекающие из модели Галактики (гл. 21 [13]).

Зависимость кинематических характеристик от возраста подсистем имеет три существенно различные области, занимаемые соответственно объектами плоской составляющей, диска и гало. В первой и третьей области кинематические характеристики быстро меняются с изменением возраста, в средней области они меняются сравнительно медленно.

Быстрое изменение кинематических характеристик молодых звезд с возрастом может быть обусловлено отчасти действием иррегулярных сил, а отчасти нестационарностью подсистем молодых звезд. Нестационарность связана с тем, что межзвездный газ вращается вокруг центра Галактики со скоростью, меньше круговой на 10—14 км/сек, и тем, что газ не сконцентрирован точно в галактической плоскости, а образует волнообразный слой. Эти особенности могут быть обусловлены влиянием электромагнитных сил. После образования звезды освобождаются от влияния электромагнитных сил и «падают» к центру и плоскости Галактики. Колебание подсистем молодых звезд в радиальном направлении было открыто Диксоном, а в вертикальном направлении Йизвээрм. Через 2—4 оборота вокруг центра Галактики подсистема молодых звезд приходит в стационарное состояние в согласии с уравнениями гидродинамики.

Зависимость кинематических характеристик подсистем диска и гало от возраста использована для реконструкции динамической эволюции Галактики. При этом предполагается, что подсистемы вновь образующихся звезд приобретают те же пространственные и кинематические характеристики, что имели облака газа при формировании звезд, и что характеристики пространственно-кинематической структуры звезд не меняются или меняются мало с течением времени. Результаты анализа показывают, что в начальной фазе развития Галактика сильно сжималась как в радиальном, так и в вертикальном направлении, во время этой фазы образовались объекты гало. После фазы сжатия облака газа потеряли свою избыточную кинетическую энергию в результате неупругих столкновений. Облака с малым удельным кинетическим моментом сконцентрировались в центральных областях Галактики, а облака с большим моментом — в плоский диск. Толщина последнего с течением времени увеличилась, вероятно под действием иррегулярных гравитационных сил. Вычислено время сжатия протогалактики в предположении свободного падения. Оказывается, что объекты гало и центрального тела образовались в течение 2×10^8 лет после начала сжатия, а весь процесс сжатия длился несколько меньше миллиарда лет.

В гл. 22 рассматривается физическая эволюция галактик. На основании опубликованных данных об эволюции звезд разной массы составлены эволюционные треки для звезд в диапазоне масс от $0.05 M_{\odot}$ до $60 M_{\odot}$, каждый трек начинается

в фазе первоначального гравитационного сжатия звезды и заканчивается при переходе звезды в область вырожденных застывших тел. Далее найдены болометрические поправки и истинные цвета как функции от эффективной температуры и болометрической светимости, что позволяет вычислить наблюдаемые фотометрические параметры модель-галактик в системе UBVRIJKL.

Функция звездообразования принимается в виде

$$dM_s(m, t) = F(m) m R(t) dm dt, \quad (19)$$

где M_s — полная масса звезд в галактике,

$$F(m) = am^{-n} \quad (20)$$

— функция распределения образующихся звезд по массам m , причем a и n — параметры, а $R(t)$ — быстрота звездообразования. Для последней функции на основе формулы Шмидта

$$\frac{dq_s}{dt} = \gamma q_s^s \quad (21)$$

найдено выражение

$$R(t) = \frac{M}{K} \left[1 + (s-1) \frac{t}{K} \right]^{-\frac{s}{s-1}}. \quad (22)$$

В этих формулах q_s и ρ_g — плотность звезд и газа соответственно, s и γ — постоянные, M — полная масса галактики и

$$K = (\gamma \bar{\rho}^{s-1})^{-1} \quad (23)$$

— характерное время звездообразования, причем $\bar{\rho}$ — средняя плотность вещества в галактике.

Основные вычисления проводились для звезд нормального химического состава $Z = 0.02$, параметрам функции звездообразования были даны различные значения: $n = 7/3, 2; s = 0, 1, 2; K = 0.3 \dots \dots \dots 20 \times 10^9$ лет. Для выяснения зависимости получаемых характеристик от химического состава звезд часть вычислений проводились со смещенными эволюционными треками. Вычислялась: функция светимости, полная светимость, цвета, распределение энергии в спектре и ряд других величин. Результаты сравнивались с интегральными фотометрическими характеристиками звездных скоплений известного возраста и химического состава. Оказывается, что функция светимости старых звездных систем не заканчивается при светимости 20^m , как предполагалось раньше, а продолжается далеко в сторону более слабых звезд.

В гл. 23 функция звездообразования рассматривается более

подробно. Из наблюдений выводятся значения параметров формулы (21)

$$s = 2, \gamma = 4 \left(\frac{M_{\odot}}{\text{пс}^3} \times 10^9 \text{ лет} \right)^{-1}.$$

По космологическим данным, данным об эволюции звезд второго населения и методом радиоактивных изотопов оценивается возраст Галактики. Все три метода дают результаты, которые хорошо согласуются между собой. В качестве среднего получается возраст

$$t = 10 \times 10^9 \text{ лет.}$$

Наконец, функция звездообразования используется для объяснения составной структуры галактик и наличия галактик разных типов. Основную роль здесь играет различие в плотности. В галактиках с высокой плотностью вещества (эллиптические галактики и центральные области галактик) звездообразование протекало быстро, в настоящее время почти весь газ уже исчерпан. В галактиках с малой плотностью (иррегулярные) процесс звездообразования протекал медленно, вследствие чего эти галактики теперь имеют много газа и представляются нам «молодыми».

Разработанная методика может быть использована для изучения структуры и эволюции всех близких регулярных галактик. Программа уточнения сведений о структуре нашей Галактики и комплексного исследования других галактик дана в гл. 24 [29].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты диссертации могут быть суммированы в виде следующих пунктов.

А. Методы практической звездной динамики

1. На основе способа наименьших квадратов разработан метод уточнения параметров функции распределения, который применен для исследования функции распределения тангенциальных скоростей звезд (гл. 1).

2. Разработан метод определения дисперсии скоростей звезд по их лучевым, тангенциальным или пространственным скоростям с учетом влияния наблюдательных ошибок (гл. 2).

3. Обобщена теорема Клейбера о средних лучевых и тангенциальных скоростях звезд (гл. 2).

4. Разработана концепция согласованной системы локальных галактических параметров и предложен метод ее вывода (гл. 3, 5, 6).

5. Уточнен метод построения модели распределения массы в Галактике (гл. 7).

6. Разработаны классификация и требования физической корректности моделей звездных систем (гл. 8, 13).

7. Уточнена система функций и параметров описания звездных систем, найдены интегральные соотношения между ними (гл. 9).

8. Разработана методика построения пространственно-кинематических моделей звездных систем (гл. 10, 11).

9. Найдена модификация теоремы о вириале применительно к отдельным составляющим галактик (гл. 12).

10. Найдено общее выражение исходной функции описания модели звездной системы, которое в частных случаях дает большинство использованных до сих пор функций. Исследованы свойства некоторых семейств пространственных моделей (гл. 13—15).

11. Вычислены все основные функции и параметры описания для модифицированной экспоненциальной модели (гл. 16).

12. Уточнена методика обработки радионаблюдений для определения плотности и поля скоростей водорода во внешних галактиках (гл. 19).

13. Разработан метод реконструкции динамической эволюции Галактики по данным о структуре и кинематике подсистем разного возраста (гл. 21).

14. Усовершенствован метод исследования физической эволюции звездных систем по данным об эволюции звезд и функции звездообразования (гл. 22).

15. Разработан метод определения параметров функции звездообразования (гл. 23).

Б. Исследование структуры и эволюции галактик

16. Показано, что звезды главной последовательности спектрального класса позднее F и гиганты кинематически неоднородны (гл. 1).

17. Исследована зависимость кинематических характеристик от возраста звезд (гл. 3, 4).

18. Проанализированы имеющиеся определения околосолярных галактических параметров и найдена их согласованная система (гл. 5, 6).

19. Критически пересмотрены существующие модели Галактики и разработана новая модель Галактики, которая используется для исследования пространственно-кинематической структуры подсистем Галактики (гл. 7).

20. Исследована структура галактики Андромеды M31 и построена ее пространственно-кинематическая модель (гл. 17—20).

21. На основе кинематических характеристик подсистем разного возраста и модели Галактики реконструирована ее динамическая эволюция (гл. 21).

22. На основе теории эволюции звезд и функции звездообразования выполнены расчеты физической эволюции звездных систем (гл. 22).

23. Уточнено выражение функции звездообразования и определены численные значения ее параметров (гл. 23).

Результаты диссертации доложены на астрономических семинарах обсерваторий Тарту, Москвы, Ленинграда, Крыма, а также Бабелсберга и Иены, на всесоюзных совещаниях по динамике и кинематике звездных систем и физике галактик с 1953 по 1971 г., на XII съезде Международного астрономического союза (МАС) в Гамбурге (1964 г.), на XIV съезде МАС в Брайтоне (1970 г.), на симпозиуме МАС по спиральной структуре Галактики в Базеле (1969 г.) и по физике галактик в Уппсала (1970 г.).

Список работ, опубликованных по материалам диссертации

1. Кинематическое разделение главной последовательности на две части. Публ. Тартуской АО, 32, 231—257, 1952.
2. О кинематической структуре главной последовательности. Публ. Тартуской АО, 32, 371—462, 1954.
3. О кинематике звезд второй части главной последовательности. В кн.: Труды четвертого совещания по вопросам космогонии. М., 479—482, 1955.
4. Определение дисперсии скоростей звезд по радиальным тангенциальным и пространственным скоростям. Публ. Тартуской АО, 33, 35—56, 1957.
5. О кинематике Ме-карликов. Публ. Тартуской АО, 33, 57—61, 1955.
6. О распределении логарифмов тангенциальных скоростей звезд. Бюлл. Абастуманской АО, № 27, 103—108, 1962.
7. Факторный анализ красных карликов. Публ. Тартуской АО, 34, 156—168, 1964 (Соавтор Э. Тийт).
8. Об асимметричном смещении центроидов звезд. Публ. Тартуской АО, 33, 371—386, 1961.
9. О построении составной модели Галактики и определении системы галактических параметров. В кн.: Кинематика и динамика звездных систем и физика межзвездной среды. Алма-Ата, 87—100, 1965.
10. Предварительная система околосолнечных галактических параметров. Сообщ. Тартуской АО, № 10, 1—10, 1964 (Соавтор С. А. Кутузов).
11. О системе галактических параметров. Сообщ. Тартуской АО, № 11, 11—20, 1964 (Соавтор С. А. Кутузов).
12. The value of dynamical parameter C . Transaction of the International Astronomical Union, vol. 12B. London, New York, 436—439, 1956.
13. On the structure and evolution of the Galaxy, Papers presented to the IAU XIV General Assembly, Tartu AO Teated No. 26, 1—22, 1970.
14. Descriptive functions of the Galaxy. Tartu AO Teated No. 36, p. 46—54, 1972 (coauthor L. Einasto).
15. О построении моделей звездных систем. I. К классификации моделей. Публ. Тартуской АО, 36, 341—356, 1968 (соавтор С. А. Кутузов).
16. О построении моделей звездных систем. II. Функции и параметры описания. Публ. Тартуской АО, 36, 357—378, 1968.

17. О построении моделей звездных систем. IV. Степенно-полиномиальная модель. Публ. Тартуской АО, **36**, 396—413, 1968.
18. О построении моделей звездных систем. V. Биномиальная модель. Публ. Тартуской АО, **36**, 414—441, 1968.
19. О построении моделей звездных систем. VI. К методике построения моделей. Публ. Тартуской АО, **36**, 442—469, 1968.
20. On galactic descriptive functions. *Astr. Nachr.* **291**, 97—109, 1969.
21. Modified Exponential Models of Stellar Systems, Tartu AO Teated No. 36, p. 3—45, 1972 (coauthor L. Einasto).
22. Галактика Андромеды M31. Предварительная модель. *Астрофизика* **5**, 137—159, 1969.
23. Галактика Андромеды M31. II. Гидродинамическая модель. Теория. *Астрофизика* **6**, 149—163, 1970.
24. Галактика Андромеды M31. III. Гидродинамическая модель. Результаты. *Астрофизика* **6**, 241—259, 1970, (соавтор У. Рюммель).
25. Density distribution and the radial velocity field in the spiral arms of M31, IAU Symposium No. 38, "The spiral structure of our Galaxy", Reidel, Dordrecht 42—50, 1970 (coauthor U. Rümmler).
26. The rotation curve, mass, light, and velocity distribution of M31, IAU Symposium No. 38, "The Spiral Structure of Our Galaxy", Reidel, Dordrecht, 51—60, 1970 (coauthor U. Rümmler).
27. Structural and kinematic properties of populations of the Andromeda galaxy, in *External galaxies and quasi stellar objects*, D. S. Evans (ed.), Reidel, p. 37—45, 1971. (Preprint Tartu AO Teated No. 26, p. 23—35, 1970).
28. Descriptive functions of the Andromeda galaxy, Tartu AO Teated No. 36, p. 55—63, 1972, (coauthor U. Rümmler).
29. Proposals for the complex investigation of the structure and evolution of the Galaxy and near-by external galaxies, Papers presented to the IAU XIV General Assembly, Tartu AO Teated No. 26, 36—38, 1970 (coauthor G. Kuzmin).

Я. Эйнасто
СТРУКТУРА И ЭВОЛЮЦИЯ
РЕГУЛЯРНЫХ ГАЛАКТИК

Сдано в набор и подписано к печати 6/1
1972. Бумага 60 × 90 ¹/₁₆. Печатных листов
1,25. Тираж 250 экз. МВ-01312. Заказ 107.
Типография им. Х. Хейдеманна,
г. Тарту, ул. Юликооли 17/19. П.

Бесплатно

