УДК 524.7

АНИЗОТРОПИЯ ДИСПЕРСИИ СКОРОСТЕЙ В ЭЛЛИПТИЧЕСКИХ ГАЛАКТИКАХ

Б. П. КОН ДРАТЬЕВ

Исследуется влияние внутренней структуры эллиптических галактик — профилей сплюснутости изофот и объемного распределения вещества — на величину анизотропии дисперсии скоростей. Получаемая величина анизотропии является только нижним пределом ее истинного значения вследствие эффекта ориентации галактик относительно наблюдателя. Большая в среднем величина анизотропии подтверждает предположение о малой роли вращения в динамике эллиптических галактик.

ANISOTROPY OF THE VELOCITY DISPERSION IN ELLIPTICAL GALAXIES, by B. P. K on d r a t' e v. The influence of the internal structure in elliptical galaxies — such as profiles of isophotes ellipticity and of density distribution—on the value of velocity dispersion anisotropy, is investigated. Due to orientation effects the value of anisotropy determined is only a lower limit of its real value. The great value of the mean anisotropy is in agreement with the belief about negligible role of rotation in dynamics of elliptical galaxies.

1. Введение. До 1975 г. наблюдаемую сплюснутость эллиптических галактик пытались объяснить их вращением. Сказались традиционные представления о связи между сплюснутостью и вращением в жидких и газовых конфигурациях с изотропным давлением. Однако, как только удалось измерить вращение в некоторых Е-галактиках (см. [1] и цитированную там литературу), был обнаружен удивительный факт — величина этого вращения в среднем составляла лишь 1/3 предсказанного моделями. Встает вопрос о природе той причины, которая могла бы совместно с врашением играть роль в формировании фигур эллиптических галактик. Фундаментальное отличие эллиптических галактик от жидких и газовых гравитирующих конфигураций заключается в том, что первые с хорошим приближением (время релаксации превышает 1010 лет) являются бесстолкновительными, вследствие чего в этих звездных системах может существовать анизотропия дисперсии скоростей как результат условий их зарождения и эволюции [2, 3]. В качестве причины сжатия Е-галактик Бинни [4] предложил идею остаточной анизотропии дисперсии звезд, согласно которой писперсия скоростей в главной плоскости галактики превышает дисперсию скоростей в направлении малой оси. Считая слои равной плотности в Е-галактиках подобными друг другу, Бинни [5] определил среднюю величину анизотропии для группы галактик. Однако модели Бинни имеют скрытое расхождение с реальными галактиками: наблюдаемое изменение сплюснутости изофот в последних означает, что слои равной плотности в Е-галактиках не подобны друг другу, но что сплюснутость их изменяется от внешних слоев к внутренним. Динамика моделей со сложной структурой слоев равной плотности исследовалась в работе [6]. В ней показано, что: а) от структуры слоев одинаковой плотности существенно зависят масса, гравитационная энергия и другие механические характери-

2*

83

стики конфигураций; б) фундаментальный динамический параметр — отношение энергии вращения к гравитационной энергии — вообще не зависит от закона распределения плотности вещества, если слои равной плотности подобны. Если же сплюснутость слоев изменяется, то этот параметр зависит от распределения плотности в модели: чем быстрее убывает плотность в конфигурации, тем эффективнее влияние структуры слоев на механические характеристики моделей.

В данной статье мы исследуем динамику эллиптических галактик, учитывая их реальную внутреннюю структуру. Показано, что учет внутренней структуры галактик заметно изменяет величину анизотропии, которая требовалась бы для объяснения наблюдений в рамках моделей с подобными изофотами.

2. Результаты модельных вычислений. Применяя тензорную теорему вириала к эллипсоидальной конфигурации, ось вращения которой совпадает с осью OX₃, имеем соотношение [5]:

$$W_{33} - \frac{1}{2} (W_{11} + W_{22}) = T_{rot} + \widetilde{\Pi}_{11} - \widetilde{\Pi}_{33}, \qquad (1)$$

в которое входят энергия вращения T_{rot} , компоненты тензора гравитационной энергии W_{ij} и член $\Pi_{11} - \Pi_{33}$, учитывающий возможную анизотропию дисперсии скоростей о. При $\Pi_{11} > 0$ и $\Pi_{33} < 0$ существует важный для приложений случай: $\sigma_{33} < \sigma_{11}$. След тензора Π_{ij} равен нулю. Из (1) следует, что сплюснутость системы из «бесстолкновительного» газа с анизотропией дисперсии скоростей обусловлена как энергией вращения T_{rot} , так и величиной существующей анизотропии $\Pi_{11} - \Pi_{33}$. Для вычисления $T_{rot} / |W|$ и v_{rot} / σ данной галактики в рамках изо-

Для вычисления $T_{rot}/|W|$ и v_{rot}/σ данной галактики в рамках изотропной модели требуется знать профиль сплюснутости и пространственную форму слоев равной плотности, а также пространственное распределение плотности вещества. Данные фотометрии дают информацию о профиле сплюснутости изофот ε (*m*) и распределении поверхностной яркости в галактике. Для повышения надежности вычислений данные фотометрии должны охватывать как центральные, так и отдаленные периферийные области галактики. Этому требованию удовлетворяют данные Кинга [7]. Размеры большой полуоси модели определяются максимальным расстоянием от центра галактики, которое полностью охватывает наблюдаемый профиль сплюснутости изофот.

Если принять, что в эллиптической галактике отношение M/L остается постоянным с расстоянием от центра *, то профиль сплюснутости изофот позволяет знать профиль сплюснутости слоев равной плотности. Распределение поверхностной яркости удовлетворительно описывается формулой Хаббла [9]: $I = I_0/(1 + \beta m^2)$, где $0 \leq m \leq 1$; β — параметр, который находится выравниванием данных фотометрии. Для повышения точности мы разобьем интервал $0 \leq m \leq 1$ на 7 участков и для каждого определим свое β . Данные о распределении поверхностной яркости нам нужны для нахождения относительного распределения объемной плотности вещества. Подставляя формулу Хаббла в интегральное уравнение [10,

с. 219]
$$\rho(m) = 1/\pi \int_{m}^{r} \sqrt{r^2 - m^2} \frac{d}{dr} \left(\frac{1}{r} \frac{dI}{dr}\right) dr$$
 и сохраняя после интегри-

рования только главный член, получим:

$$\rho(m) = \frac{\arctan\left[\beta (1 - m^2)/(1 + \beta m^2)\right]^{1/2}}{\left[1 + \beta m^2\right]^{s/2}}.$$
 (2)

Зная для каждой галактики профили $\rho(m)$ и $\varepsilon(m)$, находим для них величину t_{is} (это отношение характеризует изотропную модель) по фор-

^{*} Согласно наблюдениям Строма и Стром [8], отношение *M/L* в Е-галактиках очень мало изменяется с расстоянием от центра.

муле *

$$t_{is} = T_{rot} / |W| = (T_1 - T_2 - T_3) / |W|.$$
(3)

Вычисление v_{rot}/σ по данному t производится по формуле:

$$v_{rot}/\sigma = 1.15 \cdot [t/(0.5 - t)]^{1/2}.$$
 (4)

В таблице приведены вычисленные для 11 галактик t_{is} и v_{rot}/σ . Из уравнения (1) мы получим формулу для вычисления анизотропии дисперсии скоростей, мерой которой служит величина $Q_3 = -\tilde{\Pi}_{33}/T_{rot}$:

$$\frac{3}{2}Q_3 = t_{is}/t_{obs} - 1.$$
 (5)

Величина t_{obs} находится с помощью формулы (4) по v_{rot} и с, известнымиз наблюдений. Значения $3/2 Q_3$ для 6 галактик, у которых известно v_{rot}/σ [11], приведены в таблице. Величины $3/2 Q_3$ вычислялись как в рамках

осесимметричной модели, так и модели вытянутого сфероида. Мы нашли также те значения анизотропии $3/2 Q'_3$, которые требуются для согласования наблюдений с расчетами по сжатым моделям, имеющим профиль сплюснутости изофот $\varepsilon = \text{const.}$

3. Влияние эффекта ориентации галактики на Q_3 . Предположим, что осесимметричная модель, в которой слои равной плотности имеют одинаковую сплюснутость ε_1 , случайным образом ориентирована относительно наблюдателя. Наблюдаемая и действительная сплюснутости ε_{obs} и ε_1 связаны с позиционным углом ориентации главной плоскости модели *i* соотношением [10, с. 366]

$$\cos i = \left[\frac{\varepsilon_{obs} \left(2 - \varepsilon_{obs}\right)}{\varepsilon_1 \left(2 - \varepsilon_1\right)}\right]^{1/2}.$$
 (6)



Сравнение наблюдаемой величины v_{rot}/σ (1) с вычисленной для моделей сжатого (2, 3) и вытянутого (4, 5) сфероидов. 2, 4 — модели с реальной для галактик внутренней структурой; 3, 5 — модели с подобными слоями

Отношение наблюдаемой скорости $(v_{rot})_{obs}$ к истинной $(v_{rot})_1$, также равно соз *i*. Вследствие того, что $\varepsilon_{obs} \ll \varepsilon_1$, имеем $(v/\sigma)_{obs} \ll (v/\sigma)_1$, а значит, $t_1 \ge t_{obs}$. Последнее неравенство, как легко видеть из (5), дает ограничение на величину Q_3 :

$$(Q_3)_{obs} \leqslant (Q_3)_1,$$

т. е. находимая из сравнения наблюдений с модельными расчетами величина анизотропии является только нижним пределом действительной анизотропии в галактике.

4. Обсуждение. Из рисунка видно, что учет внутренней структуры в галактиках дает существенные поправки на вычисляемые в рамках моделей величины v_{rot}/σ . Конкретная величина поправки зависит от того, насколько отличается профиль изофот от линии $\varepsilon = \text{const}$ и, в меньшей степени, от профиля объемной плотности. Особенно эффективно на величину v_{rot}/σ влияет внутренняя структура у галактик NGC 4406, 4552, 4374, 5846, 4472, 4365, 4636. Основным показателем влияния структуры изофот на динамику является разница между значениями ${}^{3}_{2}Q_{3}$ и ${}^{3}_{2}Q'_{3}$ (см. таблицу). Если учесть, что величина ${}^{3}_{2}Q_{3}$ *T* гоt составляет поправку к находимой

Формула (3) включает частные случаи моделей со слоями равной плотности в форме сжатого и вытянутого сфероидов (получена в работе [6]).

	(v _{rot} /o) _{obs}	Сжатый сфероид					Вытянутый сфероид			
NGC		v _{rot} /σ	tis	3/2Q3'	³/2Q3	σ_z/σ_r	v _{rot} /σ	tis	³ / ₂ Q ₃	σ _z /σ _r
4365	0,11-0,14	0,45	0,066	15-24	8-13,5	0,62-0,63	0,31	0,032	3,4-6	
4374		0,31	0,033				0,22	0,017		
4382		0,46	0,069				0,32	0,035		
4406	0,10-0,13	0,45	0,066	18-32	9,5-16,6	0,62	0,32	0,034	4,4-8	0,68-0,67
4472	0,11-0,14	0,36	0,045	7-12	58,9	0,65-0,66	• 0,26	0,023	2-4	- - -
4552		0,21	0,017		· .		0,15	0,008		
4621	0,18-0,32	0,60	0,109	2,4-9	2-8	0,57-0,60	0,42	0,057	0,7-3,8	
4636		0,41	0,056				0,28	0,027		,
4649	0,15-0,23	0,41	0,057	2,5-7	2-5,8	0,64-0,65	0,29	0,029	0,5-2,5	0,68–0,69
4697	0,27-0,41	0,69	0,133	1,7-4,8	. 1,4-4	0,56-0,58	0,48	0,071	0,3-1,7	
5846		0,21	0,016	[0,15	0,008		

из наблюдений T_{rot} (профиль сплюснутости изофот в галактике дина-мически обусловлен суммой T_{rot} (1 $+ \frac{3}{2}Q_3$), становится ясной важность учета структуры изофот у галактик. Например, для NGC4406 этот учет уменьшает величину анизотропии примерно на 8-16 наблюдаемых Trot. Таким образом, различие профилей изофот в эллиптических галактиках есть одна из причин наблюдаемого разброса точек в плоскости $(v_{rot}/\sigma, \epsilon)^*$.

Отношение дисперсии скоростей по оси ОД к дисперсии в главной плоскости о, является более наглядной мерой анизотропии, чем величина $^{3}/_{2}$ Q_{3} . Легко показать, что $\sigma_{z}/\sigma_{r} = [(1-\varkappa)/(2+\varkappa)]^{1/2}$, где $\varkappa = ^{3}/_{2}Q_{3} (v_{rot}/\sigma)^{2}$. Величины σ_z/σ_r у разных галактик различаются не очень сильно: обычно искомая величина находится в области 0,5-0,7. Несмотря на то, что галактики имеют большие значения 3/2Q3, анизотропия в них невелика **. Не все галактики имеют вытянутую форму. Согласно тесту о нарушении соосности изофот [12], вытянутую форму могут иметь только NGC 4472 и NGC 4649. Поэтому только для этих двух галактик найдена величина σ_z/σ_r в рамках вытянутой модели.

Таким образом, в Е-галактиках действительно существует анизотропия дисперсии скоростей и ее истинная величина за счет эффекта ориентации даже больше, чем мы нашли в рамках рассмотренных моделей. Проблема существования анизотропии является важной в связи с происхождением и эволюцией эллиптических галактик. Более того, сейчас подтверждено [13], что сфероидальные составляющие спиральных галактик по многим признакам очень схожи с эллиптическими галактиками, поэтому изучение последних прольет свет на происхождение большинства галактик.

Автор благодарен Л. М. Озерному и А. М. Фридману за ценные замечания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Schechter P. L., Gunn J. E. - Astrophys. J., 1979, 229, 472.

2. Binney J. J., Aarseth S. J.- Monthly Not. Roy. Astron. Soc., 1978, 185, 227.

Binney J. J., Aarseth S. J.— Monthly Not. Roy. Astron. Soc., 1978, 185, 227.
 Sanders R. H., Albada T. S.— Monthly Not. Roy. Astron. Soc., 1979, 189, 791.
 Binney J. J.— Monthly Not. Roy. Astron. Soc., 1976, 200, 439.
 Binney J. J.— Monthly Not. Roy. Astron. Soc., 1978, 183, 501.
 Binney J. J.— Monthly Not. Roy. Astron. Soc., 1978, 183, 501.
 Kondpambes B. II.— Астрон. ж., 1981, 58 (в печати).
 King I. R.— Astrophys. J., 1978, 222, 1.
 Strom K. M., Strom S. E.— Astron. J., 1978, 83, 73.
 Hubbl E.— Astrophys. J., 1930, 71, 231.
 Ликблад Б.— В кн.: Строение звездных систем. М.: Изд-во иностр. лит., 1962.
 Illingmonth G.— Astrophys. J. (Letters). 1977, 218, L43.

11. Illingworth G.— Astrophys. J. (Letters), 1977, 218, L43. 12. Кондратьев Б. П., Озерной Л. М.— Письйа в АЖ, 1979, 5, 67. 13. Binney J. J.— Monthly Not. Roy. Astron. Soc., 1978, 183, 779.

Физический ин-т им. П. Н. Лебедева АН СССР, Москва

Поступила в редакцию 20 июня 1980 г.

* Ранее считалось [1, 5], что разброс точек в плоскости (vrot/o, c) связан только с разной ориентацией галактик относительно наблюдателя и с разной величиной анизотропии дисперсии скоростей. ** Действительно, найденные значения σ_z/σ_r не сильно отличаются от изотропного

случая $\sigma_r/\sigma_r = 1/\sqrt{2}$.