

КАКУЮ ПРОСТРАНСТВЕННУЮ ФОРМУ ИМЕЮТ ЭЛЛИПТИЧЕСКИЕ ГАЛАКТИКИ?

В. П. КОНДРАТЬЕВ и Л. М. ОЗЕРНОЙ

Истинную форму эллиптической галактики можно определить на основании того, совпадает ли ось вращения с видимой малой осью галактики, а также соосны ли ее изофоты. Приложение этих тестов к имеющимся данным свидетельствует о существовании эллиптических галактик как в виде сжатых сфероидов, так и трехосных эллипсоидов.

WHAT INTRINSIC SHAPE HAVE ELLIPTICAL GALAXIES? by V. P. Kondrat'ev and L. M. Ozernej. The intrinsic shape of elliptical galaxies can be determined from the data whether their spin axes coincide with observed minor axes, and whether their isofotes are co-axial. These tests being applied to available observational data indicate that both forms of elliptical galaxies — oblate spheroids as well as three-axis ellipsoids — do exist.

1. Введение. Недавние измерения вращения у эллиптических галактик (Иллингворт, 1977; см. также цитированную там литературу) показали, что оно слишком мало, чтобы объяснить наблюдаемую степень сжатия галактик. Этот факт привлек широкое внимание, напомнив о многих нерешенных вопросах динамики эллиптических галактик. В частности, до настоящего времени остается окончательно не известной даже такая принципиальная характеристика эллиптических галактик, как их пространственная форма.

До обнаружения малости вращения эллиптических галактик многие исследователи полагали, что их форма аксиально-симметрична и описывается эллипсоидом вращения, или сплюснутым сфероидом; вместе с тем не раз упоминалось и о возможности трехосного эллипсоида, в частности, в связи с формой перемычек у SB-галактик (Огородников, 1958; Фриман, 1975). Обнаруженное несоответствие между вращением и сплюснутостью эллиптических галактик еще не означает, что модель сфероида следует отвергнуть, так как равновесная сфероидальная форма может осуществляться не посредством вращения, а благодаря анизотропии дисперсии скоростей (Бинни, 1976). В то же время выяснение истинной формы эллиптических галактик имеет важное значение как для построения динамической теории равновесия, так и для теорий происхождения этих систем.

Имеющиеся подходы к отысканию формы эллиптических галактик состоят в нахождении распределения галактик по истинным сжатиям либо в изучении разброса данных в динамической плоскости (v_{rot}/σ , ϵ), где v_{rot} — максимальная скорость вращения, σ — дисперсия скоростей, ϵ — видимое сжатие галактики.

Распределение эллиптических галактик по истинным сжатиям на основе наблюдаемых сжатий построили Сэндидж и др. (1970), предполагая галактики сжатыми сфероидами, и на том же материале Бинни (1978), предполагая их вытянутыми сфероидами. Конкретное применение эти

распределения смогут найти после создания теории образования эллиптических галактик, способной предсказать их распределение по сжатиям.

Что касается положения эллиптических галактик в плоскости (v_{rot}/σ , ϵ), то оно зависит не только от формы галактики, но и от величины анизотропии дисперсии скоростей, которую нельзя заранее считать постоянной. Поэтому надежды по наблюдаемому разбросу точек в плоскости v_{rot}/σ , ϵ (Иллингворт, 1977) сделать выбор между формами сплюснутого и

вытянутого сфероидов (Бинни, 1978) преждевременны. Кроме того, подобный подход имеет тот принципиальный недостаток, что возможные формы эллиптических галактик рассматриваются как взаимоисключающие. Между тем априори нельзя отвергать возможность существования как сфероидальной, так и эллипсоидальной форм галактик.

В данной статье рассмотрены два новых наблюдательных теста, позволяющие судить более уверенно о форме эллиптических галактик. Мы покажем, что если галактика имеет форму трехосного эллипсоида, то ось его вращения будет, как правило, наблюдаться не совпадающей с видимой малой осью эллипсоида (п. 2), а изофоты галактики окажутся несоосными (п. 3).

2. Несовпадение оси вращения эллипсоида и его видимой малой оси.

Пусть наблюдатель связан с системой координат (O, x_0, y_0, z_0), а произвольно ориентированный трехосный эллипсоид — с системой (O, x, y, z), в которой уравнение эллипсоида с полуосями a_1, a_2, a_3 имеет вид

$$\left(\frac{x}{a_1}\right)^2 + \left(\frac{y}{a_2}\right)^2 + \left(\frac{z}{a_3}\right)^2 = 1, \quad (1)$$

где $a_2 \geq a_1 > a_3$. Для определенности примем, что ось вращения эллипсоида направлена по оси Oz . С помощью матрицы перехода от системы координат наблюдателя к системе эллипсоида (α, β, γ — углы Эйлера, показанные на рис. 1)

$$A = \begin{pmatrix} \cos \alpha \cos \gamma - \sin \alpha \cos \beta \sin \gamma & -\sin \alpha \cos \gamma - \cos \alpha \cos \beta \sin \gamma & \sin \beta \sin \gamma \\ \cos \alpha \sin \gamma + \sin \alpha \cos \beta \cos \gamma & -\sin \alpha \sin \gamma + \cos \alpha \cos \beta \cos \gamma & -\sin \beta \cos \gamma \\ \sin \alpha \sin \beta & \cos \alpha \sin \beta & \cos \beta \end{pmatrix} \quad (2)$$

легко записать уравнение (1) в системе (x_0, y_0, z_0) и спроецировать видимую фигуру на плоскость (z_0, O, y_0), являющуюся картинной для наблюдателя. Уравнение проекции имеет вид

$$\frac{(a_{12}y_0 + a_{13}z_0)^2}{a_1^2} + \frac{(a_{22}y_0 + a_{23}z_0)^2}{a_2^2} + \frac{(a_{32}y_0 + a_{33}z_0)^2}{a_3^2} = 1, \quad (3)$$

где a_{ij} — член матрицы A . Проекция оси Oz на плоскость (z_0, O, y_0) равна

$$z_0 = -\cos \alpha \operatorname{tg} \beta y_0. \quad (4)$$

Обозначим через φ угол между проекцией оси Oz (4) и осью Oz_0 , тогда из (4) найдем

$$\operatorname{tg} \varphi = \cos \alpha \operatorname{tg} \beta. \quad (5)$$

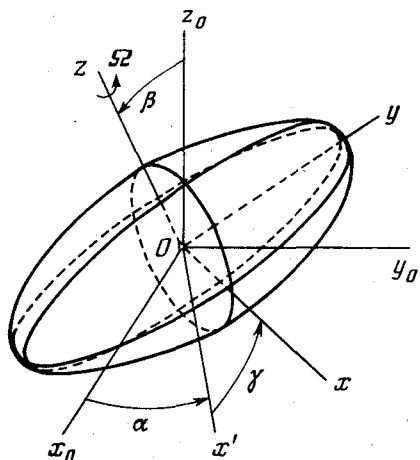


Рис. 1. Эллипсоид, связанный с системой координат (O, x, y, z), которая произвольно ориентирована относительно системы координат наблюдателя (O, x_0, y_0, z_0). Показаны меридиональные сечения эллипсоида и углы Эйлера α, β, γ

В дальнейшем нам потребуется иная запись выражения (5):

$$\operatorname{tg} 2\varphi = \frac{2 \cos \alpha \cos \beta \sin \beta}{\cos^2 \beta - \cos^2 \alpha \sin^2 \beta} \quad (6)$$

Перепишем (3) в таком виде

$$\left(\frac{a_{13}^2}{a_1^2} + \frac{a_{23}^2}{a_2^2} + \frac{a_{33}^2}{a_3^2} \right) z_0^2 + 2 \left(\frac{a_{12}a_{13}}{a_1^2} + \frac{a_{22}a_{23}}{a_2^2} + \frac{a_{32}a_{33}}{a_3^2} \right) y_0 z_0 + \left(\frac{a_{12}^2}{a_1^2} + \frac{a_{22}^2}{a_2^2} + \frac{a_{32}^2}{a_3^2} \right) y_0^2 = 1. \quad (7)$$

Нетрудно найти угол φ' (рис. 2) между малой осью эллипса (7) и осью Oz_0 (Корн и Корн, 1970):

$$\operatorname{tg} 2\varphi' = 2 \frac{(a_{12}a_{13}/a_1^2) + (a_{22}a_{23}/a_2^2) + (a_{32}a_{33}/a_3^2)}{(a_{12}^2 - a_{13}^2)/a_1^2 + (a_{22}^2 - a_{23}^2)/a_2^2 + (a_{32}^2 - a_{33}^2)/a_3^2}. \quad (8)$$

Подставляя a_{ij} из (2) и выполнив простые преобразования, получим

$$\begin{aligned} & \cos \alpha \sin \beta \cos \beta \left[\sin^2 \gamma + \left(\frac{a_1}{a_2} \right)^2 \cos^2 \gamma - \left(\frac{a_1}{a_3} \right)^2 \right] + \\ & + \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma \cos \gamma \left(1 - \left(\frac{a_1}{a_2} \right)^2 \right) \\ \operatorname{tg} 2\varphi' = & 2 \frac{\quad}{(\cos^2 \alpha \cos^2 \beta - \sin^2 \beta) \left[\sin^2 \gamma + \left(\frac{a_1}{a_2} \right)^2 \cos^2 \gamma - \left(\frac{a_1}{a_3} \right)^2 \right] +} \quad (9) \\ & + \sin^2 \alpha \left[\cos^2 \gamma + \left(\frac{a_1}{a_2} \right)^2 \sin^2 \gamma - \left(\frac{a_1}{a_3} \right)^2 \right] + \\ & + \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma \cos \gamma \left(1 - \left(\frac{a_1}{a_2} \right)^2 \right) \end{aligned}$$

Рассмотрим частные случаи:

1) $a_1 = a_2 > a_3$ (**сжатый сфероид**). В этом случае (9) дает

$$\operatorname{tg} 2\varphi' = 2 \frac{\cos \alpha \sin \beta \cos \beta}{\cos^2 \beta - \cos^2 \alpha \sin^2 \beta}, \quad (10)$$

т. е. результат, тождественный (6). Таким образом, если галактика имеет форму сжатого сфероида, проекция малой оси на картинную плоскость совпадает с направлением оси вращения при любой ориентации галактики относительно наблюдателя (рис. 2, а), что, конечно, довольно очевидно;

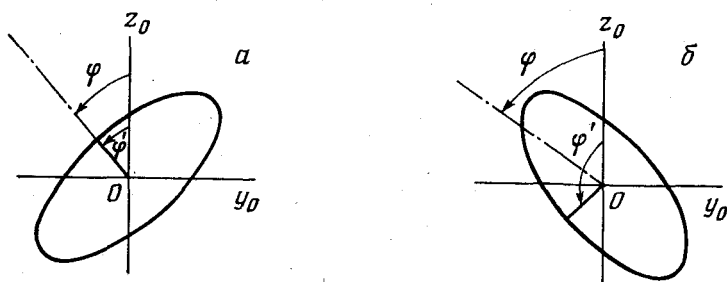


Рис. 2, а — проекция сжатого сфероида на картинную плоскость (y_0, Oz_0). Направление проекции оси Oz на эту плоскость (штрихпунктир) задается углом φ , а направление видимой малой полуоси эллипса (сплошная линия) — углом φ' ; б — проекция трехосного эллипсоида (или вытянутого сфероида) на плоскость (y_0, Oz_0). Углы φ и φ' имеют тот же смысл, что и на рисунке а

2) $a_1 = a_3 < a_2$ (**вытянутый сфероид**). Из (9) легко видеть, что для этого случая, вообще говоря, нет совпадения оси вращения и видимой малой оси, т. е. $\varphi \neq \varphi'$ (рис. 2, б);

3) $a_2 > a_1 > a_3$ (**трихосный эллипсоид**). Совпадения оси вращения и видимой малой оси в общем случае нет. В самом деле, возможны следующие

щие варианты:

a.	$\alpha \neq 0$,	$\beta \neq 0$,	$\gamma \neq 0$	— нет совпадения,
b.	$\alpha \neq 0$,	$\beta \neq 0$,	$\gamma = 0$	— нет совпадения,
c.	$\alpha \neq 0$,	$\beta = 0$,	$\gamma \neq 0$	— совпадение,
d.	$\alpha = 0$,	$\beta \neq 0$,	$\gamma \neq 0$	— совпадение.

Легко видеть, что вариант а будет встречаться гораздо чаще, чем варианты с и d, в силу того, что не требует специально равенства нулю какого-либо из трех углов α , β , γ . Таким образом, при трехосной форме наблюдатель будет гораздо чаще видеть несовпадение осей. Из анализа формулы (9) следует, что разность $|\varphi - \varphi'|$ может достигать 90° .

Таким образом, тест, позволяющий судить об истинной форме эллиптической галактики, состоит в том, что в случае произвольно ориентированного сжатого сфероида ось вращения будет всегда видна совпадающей с видимой малой осью, а в случае вытянутого сфероида и трехосного эллипсоида наиболее вероятно наблюдать эти оси несовпадающими. Последнее обстоятельство делает несущественным для предлагаемого теста использованное выше предположение о совпадении оси вращения эллиптической галактики с ее истинной малой осью. В самом деле, для сжатого сфероида справедливость данного предположения очевидна. Тем самым, наблюдая у эллиптической галактики несовпадение видимой малой оси с осью вращения, мы можем быть уверены в трехосной форме галактики, тогда как в случае совпадения осей можно констатировать с вероятностью, близкой к единице (хотя и не равной ей строго из-за возможности случайной проекции), что галактика является сплюснутым сфероидом.

3. Отсутствие соосности изофот. Как известно, у эллиптических галактик сплюснутость изофот, как правило, меняется от центра к краю (Туллю, 1978). Если эллиптическая галактика представляет собой трехосный эллипсоид, неизбежным следствием будет отсутствие соосности изофот. Возможность использования этого эффекта для выбора между сфероидом и трехосным эллипсоидом как формами эллиптической галактики вытекает из анализа ф-лы (9). Имеем два случая:

а) $a_1 = a_2 > a_3$ (сжатый сфероид). Из (10) следует, что $\operatorname{tg} 2\varphi'$ не зависит от отношения осей, т. е. если поверхности равной плотности имеют форму сжатых сфероидов, то нарушения соосности нет. Этот вывод справедлив вне зависимости от того, изменяется ли сжатие изофот с расстоянием от центра или нет.

б) $a_2 > a_1 \geq a_3$ (трехосный эллипсоид и вытянутый сфероид). В этом случае из (9) следует, что для двух эллипсоидов с разными отношениями a_1/a_2 и a_1/a_3 углы φ' будут различаться. Следовательно, проекции изофот трехосных эллипсоидов и вытянутых сфероидов на картинную плоскость ($z_0 O y_0$) окажутся несоосными.

4. Сопоставление с наблюдательными данными. Имеющиеся к настоящему времени наблюдательные данные, с которыми можно было бы сопоставить предлагаемые тесты, довольно немногочисленны и разрозненны. Особенно это относится к измерениям позиционного угла оси вращения у эллиптических галактик. Описанное в п. 2 несовпадение оси вращения и видимой малой оси эллиптической галактики хорошо заметно у NGC 3379 (E1), где угол между ними составляет 22° (Саргент и др., 1978). Большая величина этого угла дает серьезные основания считать эту галактику трехосным эллипсоидом. Было бы интересно проверить справедливость этого заключения, обнаружив ожидаемое отсутствие соосности изофот у данной галактики.

Отсутствие соосности замечено к настоящему времени уже у целого ряда галактик (Картер, 1978; Кинг, 1978; Стром и Стром, 1978). Так, Кинг (1978) обнаружил нарушение соосности изофот у 5 эллиптических галактик, причем у одной из них (NGC 7626) поворот позиционного угла большой полуоси изофот достигает 70° . По данным Строма и Строма, из

96 E- и SO-галактик скопления Coma девять, т. е. около 10%, обнаруживают существенное изменение позиционного угла. Учитывая, что сглаженная и весьма регулярная форма эллиптических галактик является весомым аргументом в пользу их стационарности, едва ли можно приписать отсутствие соосности изофот какой-либо иной причине, кроме как трехосности этих галактик.

Таким образом, применение предложенных выше тестов к имеющимся данным свидетельствует, что среди эллиптических галактик содержатся как сфероиды, так и трехосные эллипсоиды. Доля последних, судя по неполным и скудным данным, невелика, что, однако, не противоречит преобладанию типа E4 среди эллиптических галактик, истинное сжатие которых заметно отличается от критической величины, отвечающей точке бифуркации последовательности сжатых сфероидов.

5. Обсуждение. Вывод о возможном существовании двух форм эллиптических галактик, полученный в п. 4 как результат применения развитых в пп. 2 и 3 тестов к имеющимся наблюдательным данным, должен иметь важные следствия для динамики эллиптических галактик. Естественное (и простейшее) предположение заключается в том, что при истинных сжатиях $0 \leq \varepsilon < \varepsilon_0$ эллиптические галактики имеют форму сжатых сфероидов, а при $\varepsilon_0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_1$ — вытянутых сфероидов или трехосных эллипсоидов, вращающихся около наименьшей оси. Это предположение опирается на аналогию с фигурами равновесия несжимаемой жидкости: сфероиды Маклорена при $\varepsilon_0 = 0.417$ ($\varepsilon_0 \equiv \sqrt{1 - (1 - \varepsilon_0)^2} = 0.813$) имеют точку бифуркации, за которой они переходят в последовательность эллипсоидов Якоби; последние динамически неустойчивы при $\varepsilon_1 = 0.655$ ($e_1 = 0.939$).

Факторы, отличающие реальные эллиптические галактики от равновесных несжимаемых тел (бесстолкновительный характер движений звезд, неоднородное распределение плотности, нетвердотельный характер вращения, возможное наличие систематических внутренних движений типа вихревых токов вещества), не должны качественно нарушить указанную аналогию. В самом деле, если только плотность в эллиптических галактиках постоянна на подобных сфероидальных поверхностях, а сами галактики обладают твердотельным вращением, положение точки бифуркации не зависит от закона распределения плотности и совпадает со значением ε_0 для однородных фигур равновесия (Робертс, 1962)*. Далее, вращение в эллиптических галактиках в центральных областях твердотельное, а отклонение от жесткого вращения наблюдается в периферических областях; не исключено, что дифференциальный характер вращения там обусловлен вихревыми токами, представление о которых дает самосогласованная модель Фримана (1966). Возможность существования в эллиптических галактиках вихревых токов только усиливает их аналогию с эллипсоидами Римана — последовательностью фигур равновесия с твердотельным вращением Ω и внутренними вихревыми движениями, характеризуемыми вектором ξ ; для каждой последовательности $\xi/\Omega = \text{const}$ (Чандрасекхар, 1968).

Было бы интересно проверить предположение о существовании точки бифуркации и определить ее значение ε_0 по данным наблюдений, исходя из того, что в области сжатий, больших ε_0 , галактик с признаками трехосной формы должно быть больше, чем не проявляющих этих признаков.

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

Поступила в редакцию
4 июля 1978 г.

* Правда, в эллиптических галактиках сплюснутость изофот меняется с расстоянием от центра, поэтому точка бифуркации может несколько отличаться от канонической величины $\varepsilon_0 = 0.417$.

ЛИТЕРАТУРА

- Бинни* (Binney J. J.), 1976. Monthly Not. Roy. Astron. Soc., 177, 19.
Бинни (Binney J. J.), 1978. Monthly Not. Roy. Astron. Soc., 183, 501.
Иллингворт (Illingworth G.), 1977. Astrophys. J. (Letters), 218, L43.
Картер (Carter D.), 1978. Monthly Not. Roy. Astron. Soc., 182, 797.
Кинг (King J. R.), 1978. Astrophys. J., 222, 1.
Корн Г. и Корн Т., 1970. Справочник по математике, «Наука», М.
Огородников К. Ф., 1958. «Динамика звездных систем». Гос. Изд-во физ.-мат. лит., М.
Робертс (Roberts P. H.), 1962. Astrophys. J., 136, 1108.
Саргент и др. (Sargent W. L. W., Young P. J., Boksenberg A., Shortridge K., Lynds C. R., Hartwick F. D. A.), 1978. Astrophys. J., 221, 731.
Стром и Стром (Strom K. M., Strom S. E.), 1978. Astron. J., 83, 73.
Сэндидж и др. (Sandage A., Freeman K. C., Stokes N. R.), 1970. Astrophys. J., 160, 831.
Туллио (Tullio G.), 1978. Astron. and Astrophys., 62, L17.
Фриман (Freeman K. C.), 1966. Monthly Not. Roy. Astron. Soc., 134, 1.
Фриман (Freeman K. C.), 1975. In «Galaxies and the Universe» (Stars and Stellar Systems, vol. 9). Ed. A. and M. Sandage and J. Kristian (Chicago Univ. Press), Ch. 11.
Чандрасекхар (Chandrasekhar S.), 1968. Ellipsoidal Figures of Equilibrium, Yale Univ. Press, New Haven. (русск перев. В. Н. Рубановского «Эллипсоидальные фигуры равновесия», под ред. В. В. Румянцев. «Мир», М., 1973).