

МГУ им. М.В. Ломоносова  
Физический факультет  
Кафедра астрофизики и звёздной астрономии

Методическое пособие к задаче специального астрономического практикума  
для студентов 4 курса физического факультета, обучающихся по программе  
«МС\_АСТРОНОМИЯ»  
(специальность 03.05.01 «Астрономия»)

ЗАДАЧА  
**«Построение и анализ кривой вращения галактики по данным  
о скоростях звезд «старого» диска.»**

Составитель:  
Канд. физ-мат. наук  
*Катков Иван Юрьевич*

Москва, 2019

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Радиальный профиль скорости вращения диска галактики называется кривой вращения. Это важная характеристика, зависящая как от распределения массы в галактике, так и от степени динамического нагрева диска.

Определение кривой вращения по анализу звездного спектра – значительно более сложная задача, чем по эмиссионным линиям, и требует использования совокупности линий поглощения, а также учета дисперсии скоростей звездного населения.

Исходными данными в задаче является спектр, полученный на БТА с использованием длинной щели спектрографа, проходящей через центр галактики. Спектр обработан, и на его основе получено распределение вдоль щели лучевой скорости и дисперсии скоростей вдоль луча зрения для звездного населения.

Дано (в цифровом виде):

Распределение скорости вращения звездного диска вдоль большой оси.

Распределение дисперсии скоростей звезд вдоль большой оси.

Задаётся также взятая из наблюдений фотометрическая радиальная шкала диска, звездная величина и красное смещение галактики.

Требуется

А) Восстановить кривую круговой скорости для галактики.

Б) Оценить интегральную массу в пределах  $R_{25}$  (в предположении плато на кривой вращения).

В) Оценить верхний предел массы диска, сопоставить со светимостью.

Г) Сопоставить радиальную дисперсию скоростей звезд диска с минимальным значением, которое требуется для гравитационной устойчивости диска.

## НЕМНОГО ТЕОРИИ

В первом приближении, звездная кривая вращения  $v_*(R)$  близка к кривой кругового вращения  $v_g(R)$ , однако различие все же нельзя пренебречь, особенно для внутренней области диска. Восстановление  $v_g(R)$  – это довольно сложная математическая задача, подробно рассмотренная в [1], и в общем случае она решается лишь методом численного моделирования. Но без большой потери точности она может быть решена с упрощающими допущениями.

1. Соотношения компонент дисперсии скоростей  $C_z/C_r$  и  $C_\phi/C_r$  считаются известными (0.6 и  $2\Omega/\kappa$  соответственно), где  $\kappa$  – эписциклическая частота

$$\kappa = 2\Omega (1 + R/2\Omega \, d\Omega/dR)^{1/2} \quad (1)$$

2. Считается, что распределение плотности диска пропорционально распределению яркости, то есть фотометрическая радиальная шкала диска  $h_R$  совпадает со шкалой плотности.

3. Для равновесного гравитационно устойчивого диска локальная дисперсия скоростей звезд, составляющих основную массу диска, должна быть равна или выше критической дисперсии скоростей принимается приближительное аналитическое выражение

$$C_{crit}(R) = Q \cdot 3.36 \, G\Sigma_{disc}/\kappa, \quad (2)$$

где  $\Sigma_{disc}$  – поверхностная плотность диска на данном  $R$ ,  $Q \sim 1.5$ .

Область применимости предположений:  $v_g/\sigma_\phi \gg 1$ , однако с хорошей точностью приближение работает до  $v_g/\sigma_\phi = 2$ .

При указанных упрощениях можно использовать приближенную формулу для оценки асимметричного дрейфа (см. напр. [2]).

$$v_g^2 - \overline{v_*}^2 = \frac{1}{2} \sigma_R^2 \left( \frac{\partial \ln \overline{v_*}}{\partial \ln R} + 4 \frac{R}{h_R} - 1 \right) \quad (3)$$

Соотношение между наблюдаемой дисперсией скоростей и ее компонентами определяется из геометрии:

$$\sigma_{maj}^2 = \sigma_\phi^2 \sin^2 i + (\eta \sigma_R)^2 \cos^2 i \quad (4)$$

Здесь  $\eta \sigma_R = \sigma_z$  – вертикальная z-компонента дисперсии,  $\eta \sim 0.6 \pm 0.1$ , а  $\sigma_\phi = 2\Omega/\kappa = 2\sigma_R v_*/\kappa R$

## ПРИМЕРНЫЙ ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАЧИ

1. Просмотреть графически радиальные профили скорости вращения и дисперсии скоростей звезд. Выделить центральную область, где приближение асимметричного дрейфа не работает. Остальной интервал R рассматривается как рабочий диапазон.
2. Найти и выписать все необходимые данные для галактики ( $i$ ,  $h_R$ ,  $R_{25}$ , расстояние, светимость).
3. Представить наблюдаемую (звездную) кривую вращения и дисперсию скоростей в рабочем диапазоне R аналитически/

Рекомендуемая аппроксимационная формула (Evans, Zeeuv, 1994):

:

$$V(R) = V_0 R / R_{\text{mod}}, \text{ где } R_{\text{mod}} = (R^2 + R_c^2)^\beta,$$

где  $V_0$ ,  $R_c$  и  $\beta$  – свободные параметры. В качестве первого, и, чаще всего, последнего приближения, можно принять  $\beta = 1/2$ , и тогда  $V_0$  – это скорость вращения на бесконечности.

Для радиальной зависимости дисперсии скорости удобно использовать аппроксимацию

$$\sigma(R) = \sigma_0 + \sigma_1 \exp(-R_{\text{mod}}/R_1).$$

. В дальнейшем использовать полученные аналитические представления.

4. Рассчитать радиальный ход угловой скорости  $\Omega(R)$  и эпитциклической частоты  $\kappa(R)$  по (1).
5. Используя (4), получить зависимость  $\sigma_R(R)$ .
6. Используя (3), получить зависимость  $v_g(\mathbf{R})$ , то есть искомую кривую кругового вращения.
7. С помощью программы GR оценить массу, отношение M/L и верхний предел массы диска, а также поверхностную плотность диска на  $R = 2h_R$  и  $3h_R$ .
8. Сравнить полученные оценки радиальной дисперсии скоростей  $C_R$  на этих расстояниях (если позволяет точность оценки дисперсии скоростей) с оценкой критической дисперсии по (2) (принимая параметр Тоомре  $Q=1.2$  на  $R = 2h_R$  и  $Q=1.6$  на  $3h_R$ ).

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Должны быть представлены следующие результаты, полученные при выполнении задачи.

1. Кривая вращения звездного диска
2. Кривая круговой скорости вращения
3. Оценка интегральной массы галактики в пределах фотометрического радиуса
4. Оценка верхнего предела массы диска и его поверхностной плотности
5. Вывод о динамической устойчивости (неустойчивости) звездного диска при полученных значениях плотности и радиальной дисперсии скоростей.