XXX Санкт-Петербургская астрономическая олимпиада

практический тур, решения

2023

12 марта

11 класс

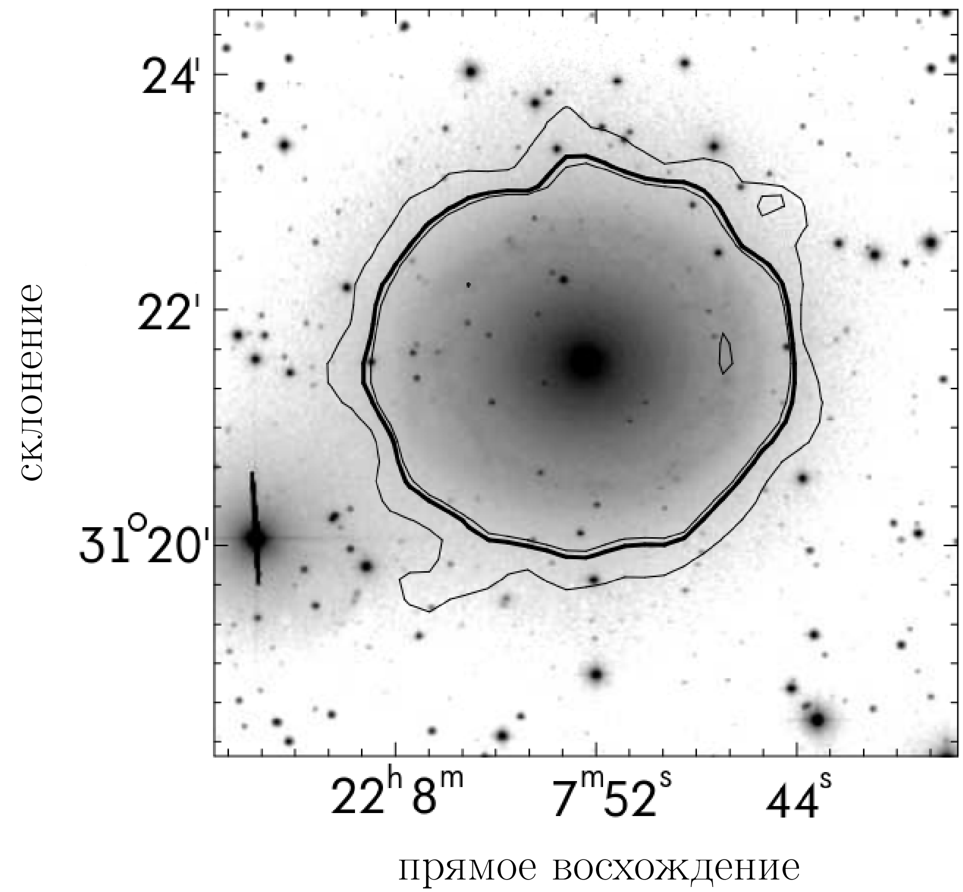
Вам на отдельном листе дано изображение диска спиральной галактики UGC 11914 (слева) в фильтре R (поэтому спиральные рукава не видны). Черными сплошными линиями показаны изофоты (линии одинаковой поверхностной яркости). На правом изображении находится диаграмма положение-скорость вдоль большой оси для той же галактики (скорость дана относительно нашей Галактики). Яркость означает количество вещества на данном расстоянии, движущегося с данной лучевой скоростью (чем темнее, тем больше вещества). Положение центра диска обозначено пунктирными линиями.

- Определите угол наклона галактики к картинной плоскости и позиционный угол, соответствующий положению ее большой оси (позиционный угол отсчитывается от направления на север против часовой стрелки).
- Оцените расстояние до галактики.
- Постройте кривую вращения галактики (зависимость линейной скорости вращения от расстояния до центра).
- Оцените массу балджа и массу всей галактики.
- Выделите на кривой вращения два участка, связанные с балджем и гало. Пренебрегая плоской компонентой (диском) и предполагая распределение плотности сферически симметричным, определите зависимость плотности от радиуса.

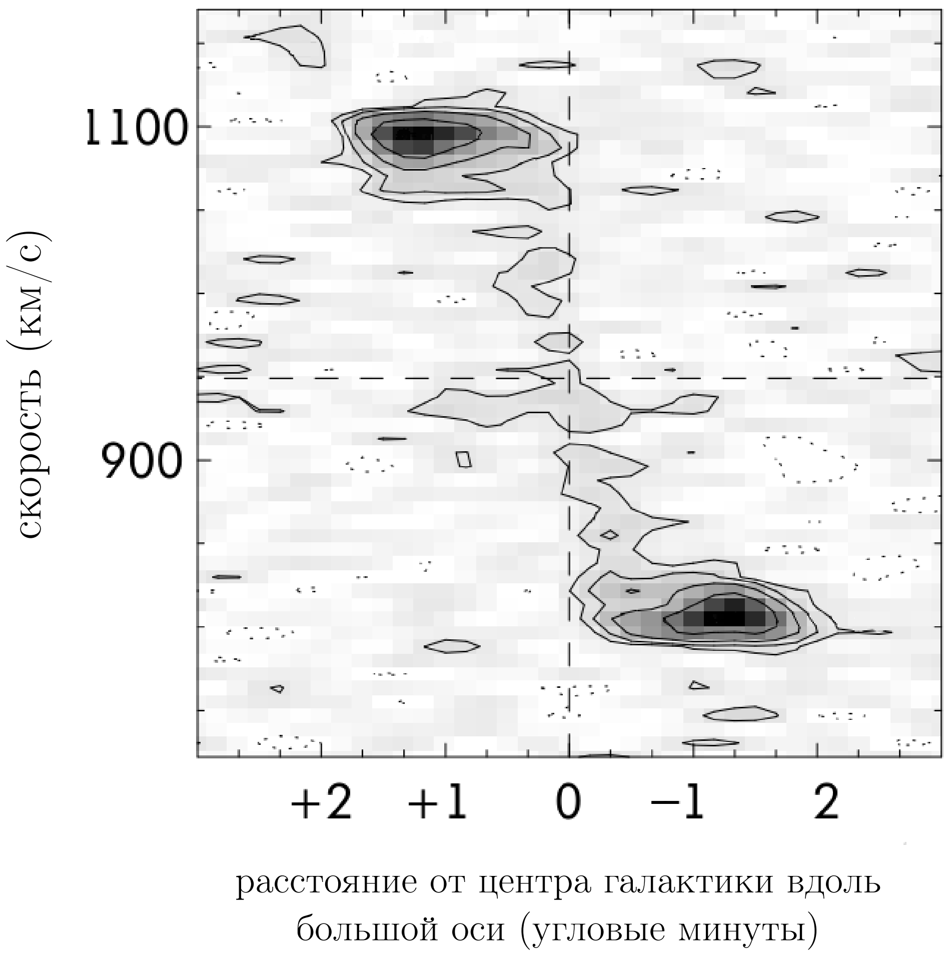
Решение:

- Для определения позиционного угла и угла наклона галактики, в первую очередь, необходимо вписать эллипс в изофоту, отмеченную черным цветом на изображении галактики (см. рис. 1). Угол наклона i определяется из отношения большой и малой полуосей вписанного эллипса:
$$\cos i = b/a \approx 0.9.$$
В таком случае угол наклона галактики равен 30°. При таком подходе ошибка может составлять ±10°.
Позиционный угол - угол между направлением на север и большой полуосью. Его значение можно оценить в границах от 75° до 90°.

- Расстояние до галактики оценивается, исходя из закона Хаббла:
$$V_c = Hr \qquad \Rightarrow \qquad r = V_c/H,$$
где H —постоянная Хаббла, V_c — скорость движения центра галактики (она определяется из диаграммы на рисунке справа). Таким образом расстояние можно оценить как
$$r = \frac{950\ \text{км/с}}{68\ \text{км/с/Мпк}} \approx 14\ \text{Мпк}.$$



24'
22'
31°20'
склонение
22h8m
7m52s
44s
прямое восхождение



1100
900
скорость (км/с)
+2
+1
0
−1
2
расстояние от центра галактики вдоль большой оси (угловые минуты)

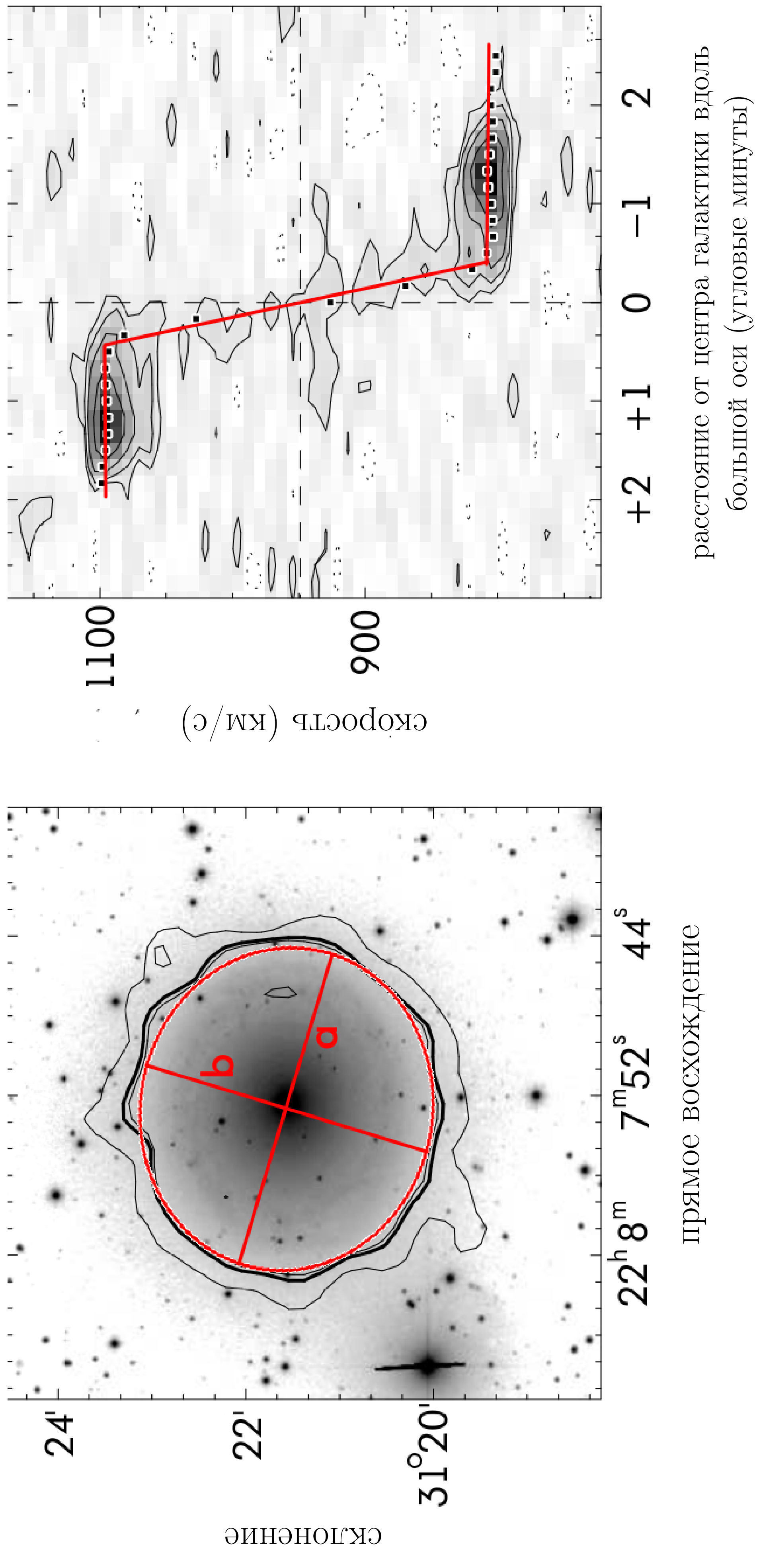


Рис. 1: Определение угла наклона, позиционного угла и кривой вращения.

- Для построения кривой вращения найдем значения лучевых скоростей в зависимости от расстояния вдоль большой оси галактики. Они определяются из диаграммы положение-скорость (черные точки на рис. 1 справа). Для определения кривой скоростей относительно центра галактики UGC 11914 из каждого значения скорости необходимо вычесть скорость движения центра галактики. Заметим, что на кривой вращения должны появиться круговые скорости (а не их проекции), поэтому значения лучевых скоростей необходимо разделить на $\sin i \approx 1/2$. Итоговая кривая вращения представлена на рис. 2.

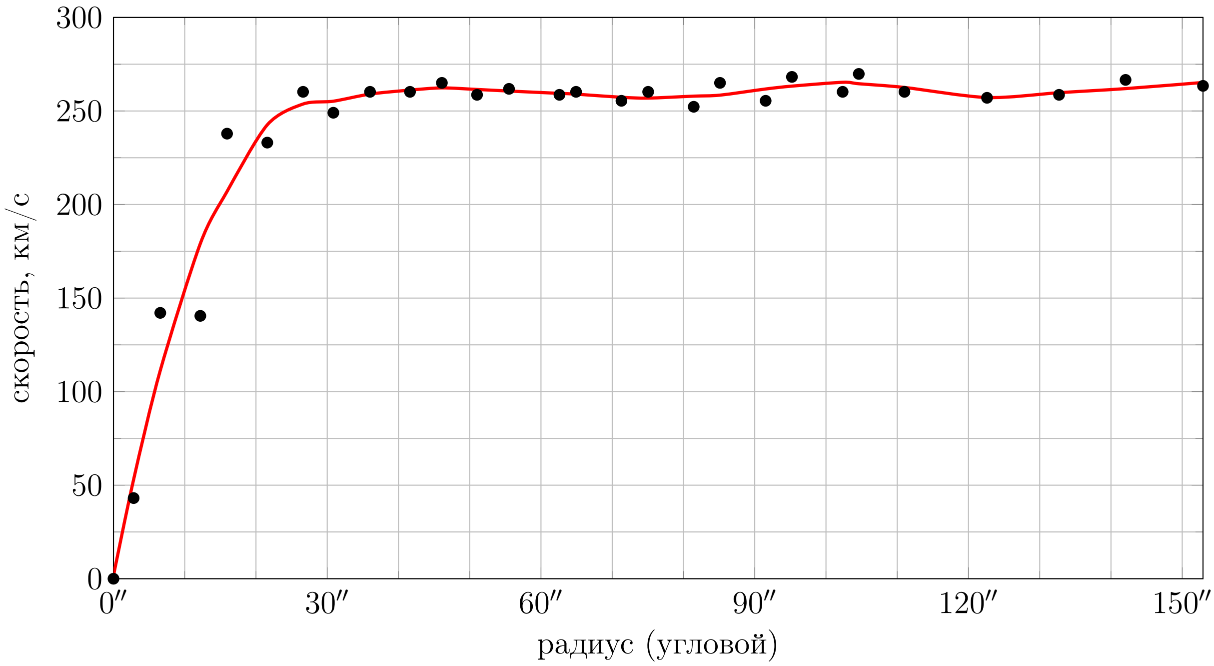


Рис. 2: Кривая вращения галактики для угла наклона $i \approx 30°$.

- Массу балджа M_b и всей галактики M_g можно оценить из формулы круговой скорости:

$$V = \sqrt{\frac{GM}{R}}.$$

  Определим размер балджа R_b, его граница проходит в точке перехода к плоской кривой вращения (см. на красную линию на рис. 1 справа). Соответствующий радиус можно оценить в пределах от $20''$ до $30''$ (что соответствует 1.4 – 2 кпк). Значение скоростей (скорость на плато) на данных расстояниях можно принять равными 145 км/с без учёта угла наклона. Если учесть наклон, то скорость может лежать в диапазоне от 225 км/с до 425 км/с. Такой большой разброс значений связан с ошибкой определения угла наклона галактики.

  В итоге массу балджа можно оценить в пределах $(2 \div 8) \times 10^{10}\ M_\odot$.

  Оценим размер галактики по последней измеренной точке на кривой вращения, соответствующей радиусу $150''$ (или 10 кпк). Подставив данные значения в формулу, получим оценку массы галактики $(1 \div 4) \times 10^{11}\ M_\odot$.

- Распределение плотности можно получить из зависимости скорости от радиуса. Кривую вращения можно разбить на два участка:

  1) $v \propto R,\ R < R_b$,

  2) $v = \text{const},\ R > R_b$.

Тогда зависимость массы внутри внутри некоторого радиуса R_0 можно задать следующим образом:

$$M(R < R_0) = \frac{V^2 R_0}{G} = \begin{cases} M_b \dfrac{R_0^3}{R_b^3}, & R_0 < R_b \\ M_b \dfrac{R_0}{R_b}, & R_0 > R_b \end{cases}$$

В случае сферической симметрии масса внутри данного радиуса выражается через интеграл

$$M(R < R_0) = \int\limits_0^{R_0} \rho(R) 4\pi R^2 \, dR \qquad \Longrightarrow \qquad \frac{dM}{dR} = \rho(R) 4\pi R^2.$$

Отсюда, взяв производную, можно получить зависимость плотности от радиуса:

$$\rho(R_0) = \begin{cases} \dfrac{M_b}{\frac{4}{3}\pi R_b^3}, & R_0 < R_b \\ \\ \dfrac{M_b}{4\ \pi R_b} \dfrac{1}{R_0^2}, & R_0 > R_b \end{cases} = \begin{cases} \rho_0, & R_0 < R_b \\ \\ \dfrac{\rho_0}{3} \dfrac{R_b^2}{R_0^2}, & R_0 > R_b \end{cases}$$

где

$$\rho_0 = \frac{M_b}{\dfrac{4}{3}\pi R_b^3}.$$

В.С.Костюк, В.Д.Зозуля