

XXX Санкт-Петербургская  
астрономическая олимпиада  
практический тур, решения

2023  
12  
марта

9 класс

Вам на отдельном листе даны изображения модельной галактики, построенные через одинаковые промежутки времени, равные 50 миллионам лет (первое изображение существенно увеличено, на его осях указаны размеры в килопарсеках, на остальных изображениях расстояния между отметками на осях также равны 10 кпк). В таблице дана зависимость скорости вращения звезд галактики от расстояния от ее центра.

- Оцените размеры бара (вытянутого образования в окрестности центра) галактики и определите угловую скорость его вращения, если известно, что за все время моделирования бар не успел совершить один полный оборот.
- Постройте график зависимости скорости вращения звезд галактики от радиуса.
- Оцените массу балджа галактики и массу галактики внутри радиуса 20 кпк.
- Найдите радиус коротации — расстояние от центра, на котором угловая скорость вращения бара и звезд в диске совпадают.
- Бар в галактике называется «быстрым», если отношение радиуса коротации к максимальному радиусу бара меньше 1.4. Является ли бар данной галактики быстрым?

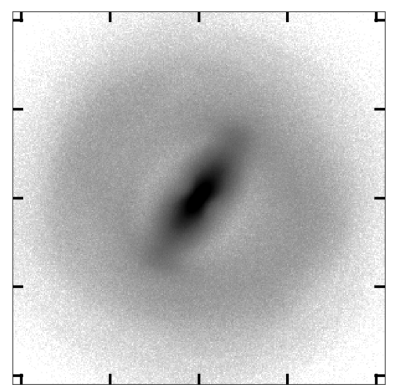
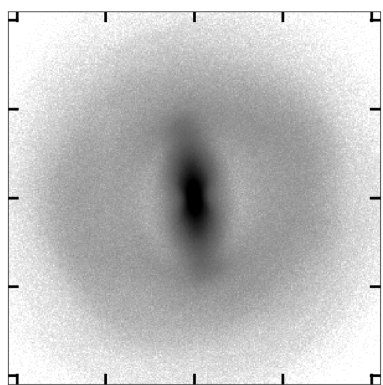
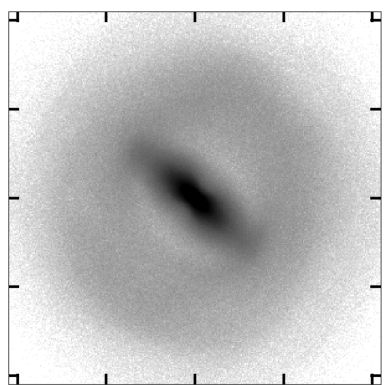
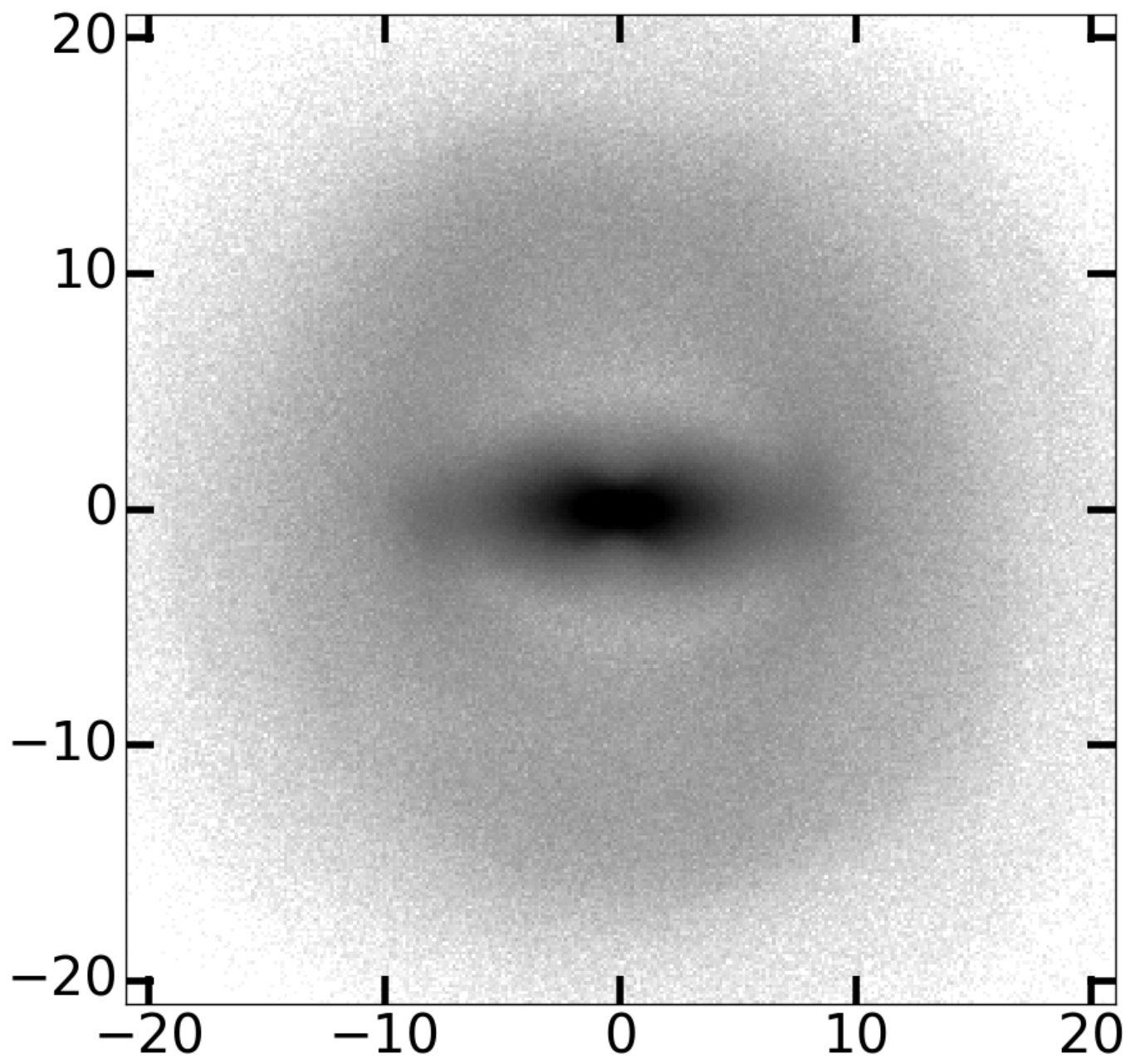
радиус, кпк	скорость, км/с	радиус, кпк	скорость, км/с
0.00	0	1.41	214
0.10	42	2.06	220
0.15	60	3.01	218
0.21	83	4.40	210
0.31	110	6.43	198
0.45	142	9.38	194
0.66	173	13.69	196
0.97	198	20.00	192

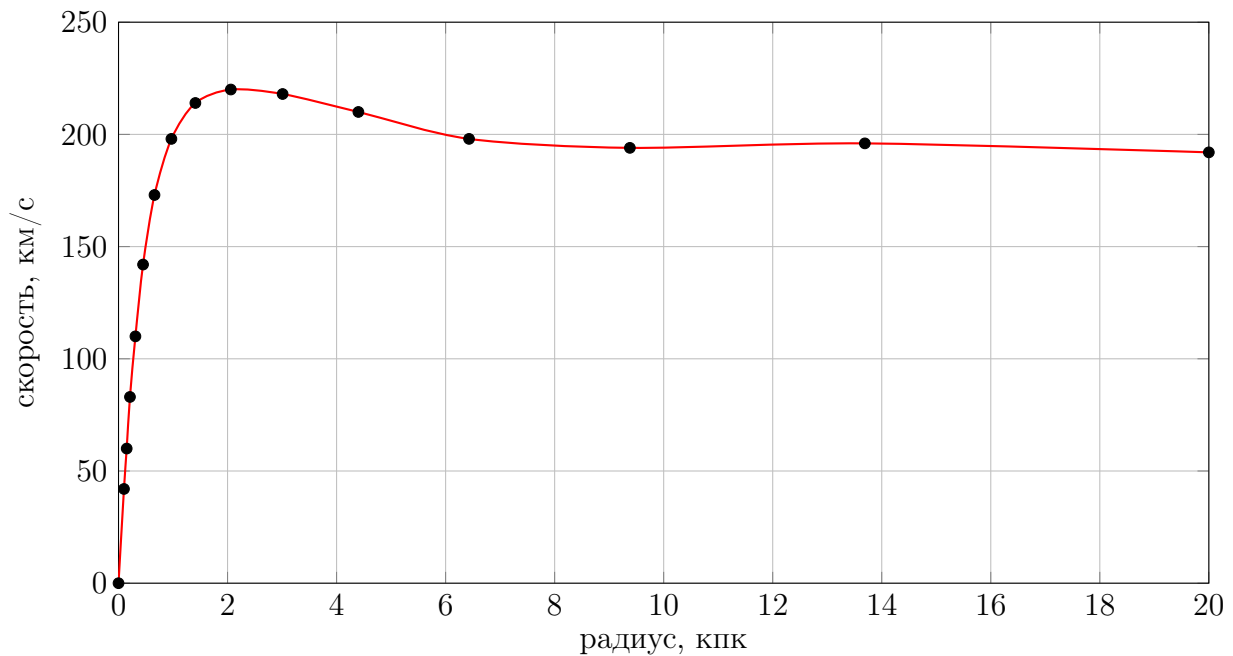
**Решение:**

Бар — это протяжённая структура в центральной области галактики. На самом большом изображении определим размеры этой структуры, исходя из того, что область за пределами бара должна обладать осевой симметрией. Тогда максимальный радиус бара (большая полуось) находится в пределах от 6 до 9 килопарсек, а минимальный (малая полуось) составляет около 3 килопарсек.

По точкам в таблице построим график зависимости скорости вращения звезд галактики от радиуса (кривую вращения).

Массу балджа можно вычислять по-разному, результат зависит от оценки его размеров. Можно воспользоваться либо соображением, что балдж вращается с примерно постоянной угловой скоростью, и принять в качестве его радиуса положение максимума на кривой вращения, можно на крупном изображении выделить центральную симметричную компоненту. Оба варианта дадут в качестве результата  $r_0 \approx 2$  кпк.





Массу  $M_r$  внутри некоторого радиуса  $r$  можно оценить, считая, что скорость вращения галактики — круговая скорость

$$v = \sqrt{\frac{GM_r}{r}}.$$

Тогда масса балджа  $M_0$  вычисляется как

$$M_0 = \frac{v^2 r_0}{G}$$

Для вычислений удобно воспользоваться уже знакомой вам после теоретического тура «звездноастрономической» системой единиц, в которой массы измеряются в массах Солнца, расстояния — в астрономических единицах, а время — в годах. В ней гравитационная постоянная  $G = 4\pi^2$ . Можно также вычислить, что  $1 \text{ а.е./год} \approx 4.74 \text{ км/с} \approx 5 \text{ км/с}$ , после чего подставить имеющиеся данные в формулу выше. Получим

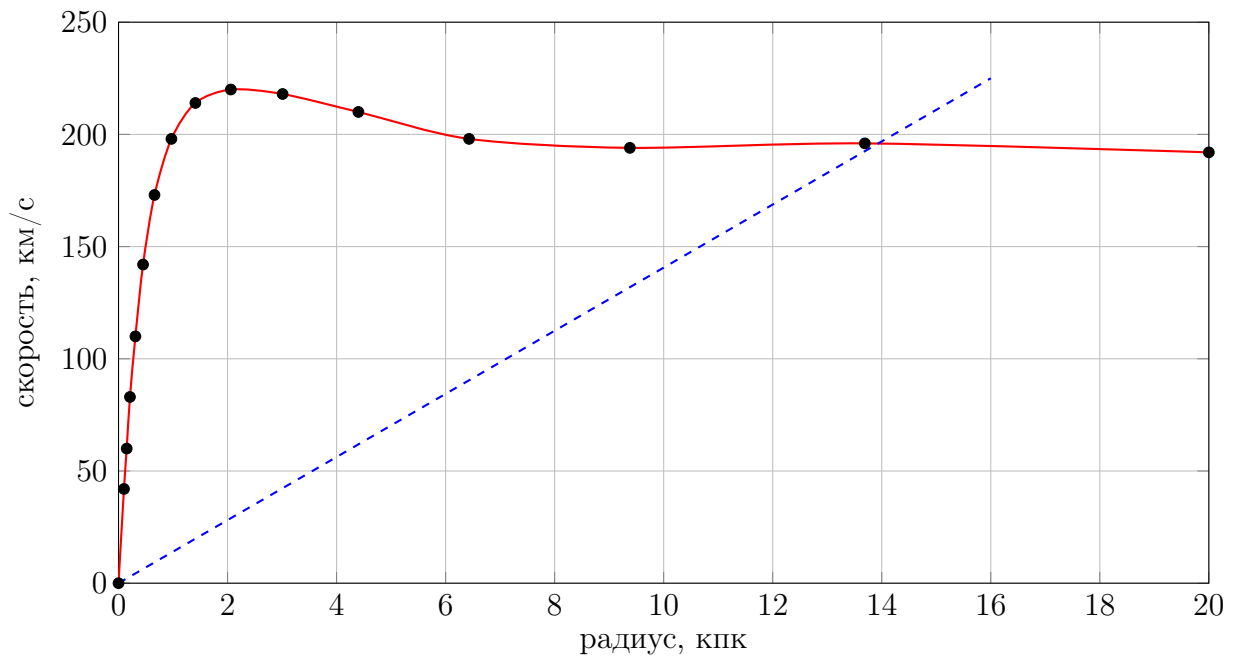
$$M_r = \frac{v^2 r_0}{G} = \frac{(220/5)^2 \cdot 2 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot 10^5}{4 \cdot 10} = 2 \cdot 10^{10} M_\odot.$$

Масса вещества внутри радиуса 20 кпк считается аналогичным образом, но можно сразу же заметить, что скорость за пределами балджа почти не меняется, а радиус увеличился в 10 раз, поэтому оценка массы внутри этого радиуса также будет в 10 раз больше оценки массы внутри балджа и составит  $2 \cdot 10^{11} M_\odot$ .

Угловую скорость можно определить из изображений моделей галактик. Последовательно измерим углы, на которые повернулся бар в разные промежутки времени (либо просто транспортом), либо продолжив ось симметрии бара до края картинке и измерив тангенс угла поворота, впрочем, для получения результатов с разумной точностью подойдет даже простая оценка углов «на глаз»). При отсутствии транспорта можно заметить, что угол поворота между двумя соседними изображениями составляет чуть меньше  $45^\circ$ , после чего оценить его как  $40^\circ - 45^\circ$ .

Более точным будет измерение отклонения бара от вертикали на третьем по времени (центральном из трех небольших) изображении — тангенс угла отклонения окажется около  $1/8$ , а это значит, что угол, на который за два интервала времени повернулся бар, отличается от  $90^\circ$  примерно на  $60^\circ/8 \approx 7^\circ$ .

В итоге тем или иным способом мы получаем, что угол поворота между соседними изображениями составил около  $42^\circ$ . Таким образом, угловая скорость составляет  $42^\circ/50$  млн. лет или примерно  $0''.2$  в год.



Теперь на построенной нами кривой вращения проведём прямую, соответствующую постоянной угловой скорости  $v = \omega r$ . Для этого выразим угловую скорость в более подходящих для данной цели единицах — км/с/кпк. Если за 50 миллионов лет бар поворачивается на  $42^\circ$ , то полный оборот на  $360^\circ$  он сделает за примерно 430 миллионов лет. Следовательно, на радиусе 1 кпк (выбранном для удобства) точка бара должна будет пройти  $2\pi$  кпк за этот срок. Получаем, что в нужных нам единицах

$$\omega = \frac{2\pi \cdot 10^3 \cdot 3 \cdot 10^{13}}{4.3 \cdot 10^8 \cdot 3 \cdot 10^7} \approx 14 \text{ км/с/кпк.}$$

Точка пересечения кривой вращения и построенной прямой соответствует положению радиуса коротации. Таким образом получаем, что радиус коротации оказывается равным примерно 14 кпк. В итоге, вне зависимости от того, какой размер бара мы получили, быстрым он не является.

*В.Д.Зозуля*