

**XXXIII Санкт-Петербургская
Астрономическая олимпиада**
практический тур, решения

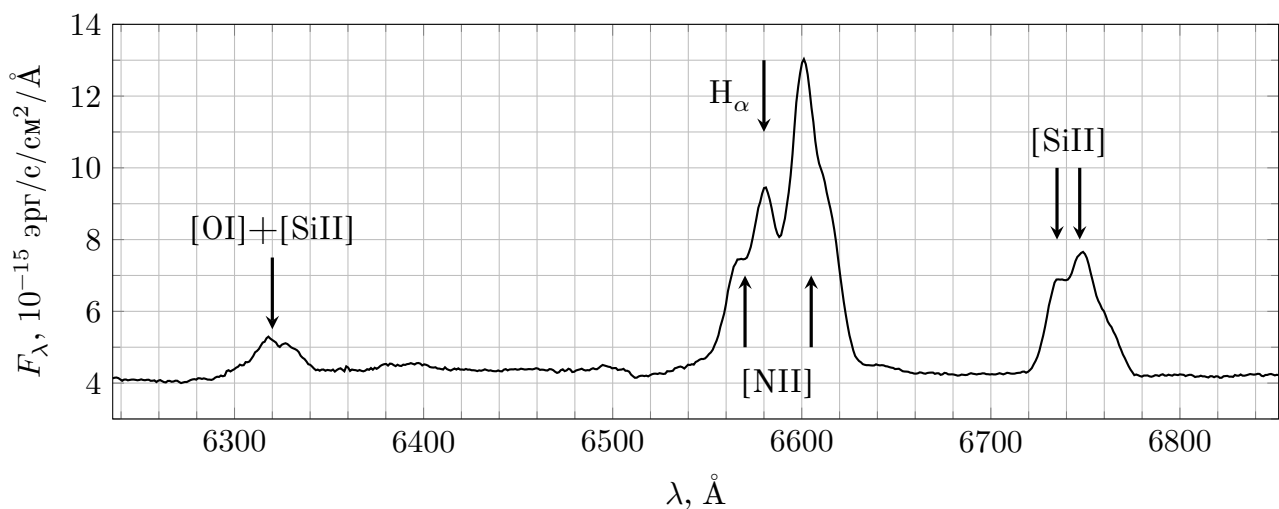
2026
15
марта

10 класс

Перед вами — негативное изображение «тени» сверхмассивной черной дыры в центре галактики M87, полученное с помощью Event Horizon Telescope в 2017 году, с указанным угловым масштабом, а также спектр центральных областей галактики с идентифицированными линиями. Пекулярная скорость M87 составляет 170 км/с. Оцените на основании этих данных массу сверхмассивной черной дыры.

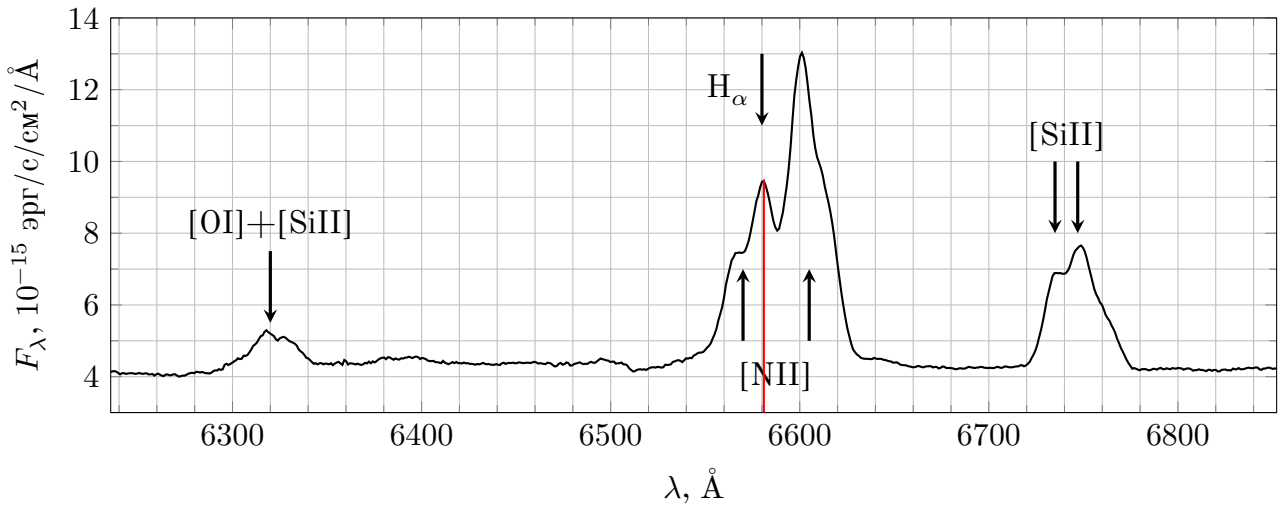


50 микросекунд дуги



Решение:

Для начала обратим внимание на идентифицированную линию водорода H_{α} в спектре центральных областей галактики M87.



Измерения линейной показывают, что наблюдаемая длина волны данной линии $\lambda = 6581 \text{ \AA}$. Лабораторную длину волны линии H_α можно либо просто знать ($\lambda_0 = 6563 \text{ \AA}$), либо вычислить, воспользовавшись формулой Ридберга:

$$\lambda_0 = 912 \text{ \AA} \cdot \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{3^2} \right)^{-1} = \frac{36}{5} \cdot 912 \text{ \AA} \approx 6566 \text{ \AA}.$$

Таким образом, лучевая скорость M87

$$v_r = cz = c \cdot \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{18 \cdot 3 \cdot 10^5}{6563} \approx 8 \cdot 10^2 \text{ км/с}.$$

Пекулярная скорость галактики — это «собственная» скорость галактики, не связанная с космологическим расширением. Поскольку измерить тангенциальную скорость галактики невозможно, то эта скорость должна входить в лучевую, причем, поскольку она положительна, она соответствует удалению галактики от нас. Поэтому вычтем из v_r пекулярную скорость галактики и получим, что компонента лучевой скорости, напрямую связанная с расширением Вселенной, равна $v \approx 6 \cdot 10^2 \text{ км/с}$. В таком случае расстояние до черной дыры в центре галактики $r = v/H \approx 10 \text{ Мпк}$, где $H \approx 7 \cdot 10^1 \text{ км/с/Мпк}$ — постоянная Хаббла.

Теперь оценим радиус Шварцшильда R . Для этого воспользуемся масштабом изображения. Изображение черной дыры негативное, поэтому нас интересует угловой размер светлого (а в реальности — темного) пятна посередине. Следует отметить, что качество изображения очень низкое, и граница тени проходит не по границе светлого участка, а по средней изофоте между средним и темным участками — например, в качестве диаметра тени можно использовать характерное расстояние между двумя концами «рогов», составляющее примерно 40 микросекунд дуги. Учтем, что радиус «тени» больше радиуса Шварцшильда примерно в 2.6 раза (если точно, то коэффициент равен $\sqrt{27/4}$), и получим, что радиус Шварцшильда соответствует примерно 8 микросекундам дуги.

На расстоянии 10 Мпк одна микросекунда дуги должна соответствовать 10 а.е., таким образом, радиус Шварцшильда составляет 80 а.е. или $1.2 \cdot 10^{13} \text{ м}$. Поскольку он связан с массой черной дыры как

$$R = \frac{2G\mathfrak{M}}{c^2},$$

получаем массу черной дыры (выражая все величины в СИ)

$$\mathfrak{M} = \frac{Rc^2}{2G} \approx \frac{1.2 \cdot 10^{13} \cdot 9 \cdot 10^{16}}{2 \cdot 7 \cdot 10^{-11}} \approx 8 \cdot 10^{39} \text{ кг} = 4 \cdot 10^9 \mathfrak{M}_\odot.$$

Реальное значение примерно в полтора раза больше, что обусловлено ошибкой в определении расстояния по спектральным данным (оно несколько больше).

К сожалению, в условии задачи слишком поздно обнаружилась опечатка — угловой масштаб был указан как «50 миллисекунд дуги». При этом общий ход решения задачи остается

неизменным, но во второй части все величины увеличиваются в 10^3 раз, в том числе и итоговый ответ.

С.А.Русаков, И.В.Чугунов