10 класс

10 1 МЕЖДУНАРОДНАЯ КОСМИЧЕСКАЯ СТАНЦИЯ

О.С. Угольников

? Вам предложена фотография пролета Международной космической станции по диску Луны (автор – Эд Морана, США, 3 стр. обложки). Изображения МКС сделаны с интервалом 1/60 секунды друг после друга. Большой кратер, видимый на поверхности Луны – Тихо – имеет диаметр 85 км. Оцените размер Международной космической станции и ее высоту над поверхностью Земли. В момент съемки Луна проходила точку перигея орбиты и располагалась вблизи зенита в точке съемки.

! Для начала определим масштаб снимка. На нем присутствует один объект с известным нам размером – лунный кратер Тихо. Как известно, он располагается не в центре лунного диска и наблюдается с Земли под некоторым углом к лучу зрения. Поэтому для определения масштаба нам необходимо взять его видимую большую ось. Ее угловой размер составит

$$d = \frac{D}{L - R} = 0.00024$$

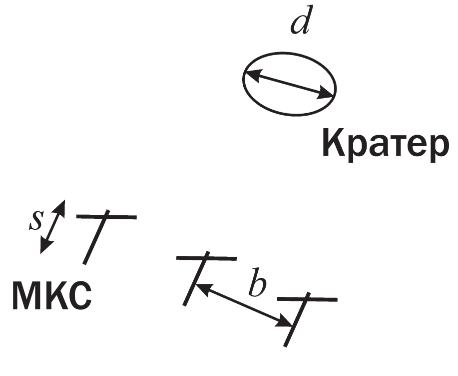
или $50''$. Здесь D – диаметр кратера Тихо, L – геоцентрическое расстояние до Луны в перигее, R – радиус Земли. Здесь было учтено, что Луна в пункте наблюдения располагается в зените. Обозначим через b угловое расстояние между двумя соседними положениями Международной космической станции на фотографии. Измеряя его, мы получаем

$$b = (8/7) \cdot d = 0.00027$$

или $57''$. Отсюда мы можем получить видимую угловую скорость Международной космической станции:

$$\omega = \frac{b}{t} = 0.016\ \text{с}^{-1}.$$

Здесь t – интервал времени между соседними изображениями МКС. По условию задачи, Луна и МКС в момент съемки находились вблизи зенита, а орбита станции круговая. Осевое вращение Земли и движение Луны мы не принимаем в расчет, так как их скорости (линейные и угловые) много меньше, чем у МКС. Тогда скорость станции v направлена перпендикулярно лучу зрения, и для видимой угловой скорости МКС справедливо соотношение



$$\omega = \frac{v}{H} = \frac{1}{H}\sqrt{\frac{GM}{(R+H)}} \approx \sqrt{\frac{GM}{RH^2}} \cdot (1-\frac{H}{2R}) = \sqrt{\frac{GM}{RH^2}} - \sqrt{\frac{GM}{4R^3}} = \sqrt{\frac{GM}{RH^2}} - \frac{\omega_0}{2}.$$

Здесь M – масса Земли, а H – высота станции над поверхностью Земли (т.е. над наблюдателем), при этом учтено, что величина H значительно меньше радиуса Земли R. Величина ω_0 есть геоцентрическая угловая скорость спутника с приземной круговой орбитой. Период для такой орбиты составляет 84 минуты, а величина ω_0 равна 0.0012 $с^{-1}$, что существенно меньше величины ω. Отсюда мы получаем значение высоты:

$$H = \sqrt{\frac{GM}{R}} \cdot \frac{1}{\omega + (\omega_0/2)} = \frac{v_1}{\omega + (\omega_0/2)}.$$

Здесь v_1 – первая космическая скорость для поверхности Земли. Высота МКС получается равной 470 км. По фотографии можно оценить видимый размер космической станции:

$$s = 0.6 \cdot d = 0.00014$$

или 30″. Пространственный размер станции составляет

$$S = H \cdot s = 65 \text{ м}.$$

10 2 ТЕЛЕСКОП В КОСМОСЕ
А.М. Татарников

? Помогите космонавту на борту орбитальной станции определить фокусное расстояние объектива большого зеркально-линзового телескопа и сложного (многолинзового) окуляра этого телескопа. Диаметр входного отверстия равен 300 мм. Из измерительных средств у космонавта имеется только устройство, похожее на линейку, но с большей точностью измерения (цена деления 0.1 мм).

! Конструкция зеркально-линзового телескопа не позволит определить фокусное расстояние простым измерением расстояния от объектива до фокальной плоскости. Тем не менее, существует несколько способов определения оптических характеристик объектива телескопа даже в столь стесненных условиях. Приведем лишь один, наиболее очевидный вариант решения.

Фокусное расстояние объектива может быть определено по масштабу изображения в фокальной плоскости. Для этого направим объектив на объект с известным угловым размером, например, на Луну. Измерим размер изображения Луны в фокальной плоскости. Он зависит только от фокусного расстояния:

$$L = \alpha \cdot F,$$

где α – угловой диаметр Луны в радианах, F – фокусное расстояние объектива. Отсюда:

$$F = \frac{L}{\alpha}.$$

Угловой диаметр Луны равен 0.5°, следовательно

$$F = \frac{L}{0.5} \cdot \frac{180}{\pi} \approx 115 \cdot L.$$

Существуют разные методы определения фокусного расстояния окуляра, но не все они применимы к любому окуляру сложной конструкции. Наиболее универсальный метод измерения фокусного расстояния окуляра состоит в нахождении увеличения, даваемого телескопом с его использованием. Установим окуляр в телескоп, направим его на ярко освещенный предмет (ту же Луну) и измерим диаметр выходного зрачка d. Тогда увеличение равно:

$$\Gamma = \frac{D}{d} = \frac{F}{f}.$$

Здесь D – диаметр входного отверстия. Отсюда находим фокусное расстояние окуляра:

$$f = \frac{d \cdot F}{D} = \frac{d \cdot F}{300}.$$

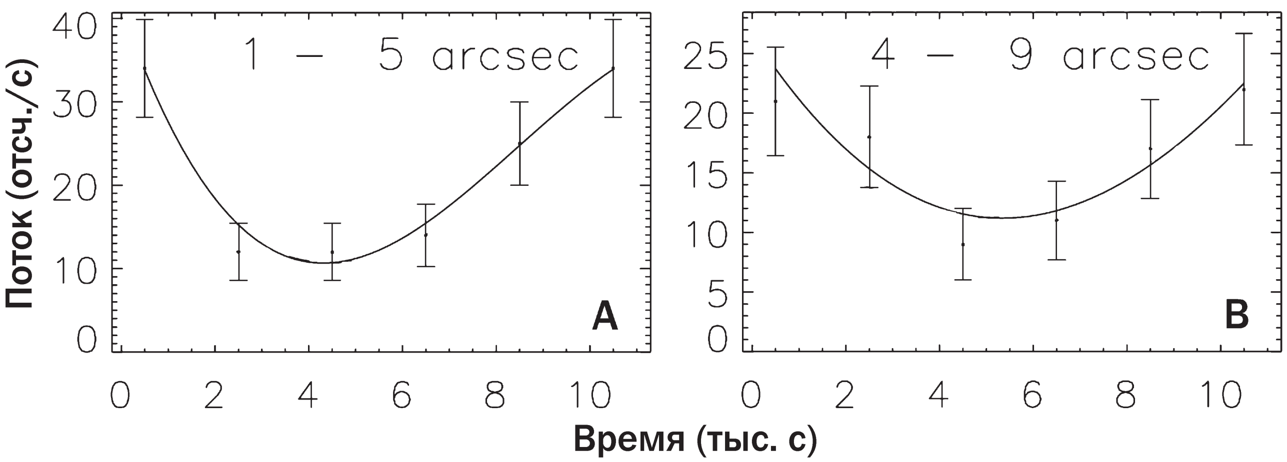
В последнем равенстве все величины выражаются в миллиметрах.

10 3 РЕНТГЕНОВСКИЙ ИСТОЧНИК

О.С. Угольников

? Вам представлена рентгеновская фотография объекта Лебедь X-3, сделанная с борта орбитального рентгеновского телескопа «Чандра» (3 стр. обложки). Данный объект, входящий в состав тесной двойной системы, изменяет свою яркость с периодом 4.8 часа (орбитальный период системы). С помощью телескопа «Чандра» одновременно были построены кривые блеска двух областей гало объекта Лебедь X-3. Эти области показаны в виде кругов на фотографии. Кривые блеска (зависимость рентгеновского потока от времени) приведены на графиках. Считая, что гало возникает вследствие рассеяния излучения в межзвездной среде на полпути между источником и наблюдателем, оцените расстояние до источника Лебедь X-3.

! По графикам изменения рентгеновской светимости мы видим, что все измерения источника Лебедь X-3 рентгеновским телескопом «Чандра» охватывали интервал около 10 000 секунд или 3 часов, что меньше периода изменений блеска. На графиках представлена часть периодической кривой, содержащий момент минимума светимости. Зона **A** попадает во внутреннюю область гало, непосредственно примыкающую к источнику. В этой области минимум наступает несколько раньше, чем в зоне **B**, более удаленной от источника Лебедь X-3. Чтобы



понять причину этой разницы, рассмотрим геометрию распространения излучения, регистрируемого в гало источника Лебедь X-3.

Излучение, идущее от источника, рассеивается в точке межзвездной среды **М**, равноудаленной от источника и Земли. Далее оно регистрируется на Земле. Путь, который прошло излучение по данной траектории, составляет

$$L = 2\sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 + h^2} = 2\sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 + \left(\frac{D\alpha}{2}\right)^2} = D\sqrt{1+\alpha^2} \approx D + \frac{D\alpha^2}{2}.$$

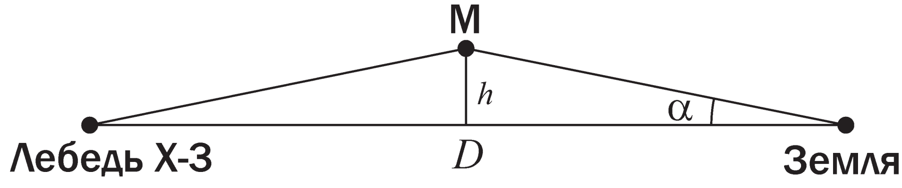
Здесь α – угловое расстояние между наблюдаемой точкой гало и источником. Полученная длина больше, чем расстояние между источником и наблюдателем D. Если источник характеризуется колебаниями блеска, то они будут повторяться и в гало, но с временной задержкой, связанной с разностью длин траекторий. Величина этой задержки составит

$$\Delta t = \frac{L-D}{c} = \frac{D\alpha^2}{2c}.$$

Из графиков изменения блеска в зонах **A** и **B** мы не можем напрямую получить значение величин задержки в этих зонах, но можем определить их разность. При наблюдении в зоне **B** минимум наступает на 700 секунд позже, чем в зоне **A**. Обозначим эту величину как t_{AB}. Тогда справедливо выражение

$$t_{AB} = \Delta t_B - \Delta t_A - N \cdot T.$$

Здесь T – период изменения блеска источника, а N – целое неотрицательное число. Обратим внимание, что обе зоны имеют некоторые угловые размеры и даже частично перекрываются друг с другом. Если бы число N отличалось от нуля, и разница временных задержек в зонах **A** и **B** превышала период T, то она существенно



изменялась бы и внутри каждой зоны. В результате, колебания блеска в таких зонах были бы полностью замыты. Мы же видим, что они весьма существенны – поток изменяется примерно вдвое. Это дает нам основание считать число N равным нулю (еще одно подтверждение этому будет дано в конце решения). Следовательно,

$$t_{AB} = \frac{D(\alpha_B^2 - \alpha_A^2)}{2c}.$$

Величины α_A и α_B есть угловые расстояния между источником и центром каждой из зон. Их можно определить по рисунку, а также по данным графика – 3″ и 6.5″ соответственно. Их нужно перевести в радианную меру и подставить в выражение для расстояния до источника:

$$D = \frac{2ct_{AB}}{\alpha_B^2 - \alpha_A^2}.$$

Расстояние до источника Лебедь X-3 получается равным 17 кпк. Обратим внимание, что при подстановке числа $N>0$ мы бы получили расстояние, существенно большее размеров нашей Галактики. Это также может рассматриваться как подтверждение правильного выбора числа N, равного нулю.