

XXIV Санкт-Петербургская
астрономическая олимпиада
практический тур, решения

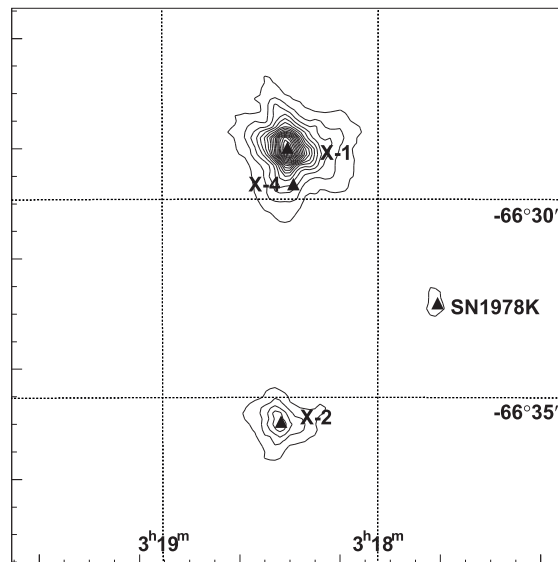
2017
12
марта

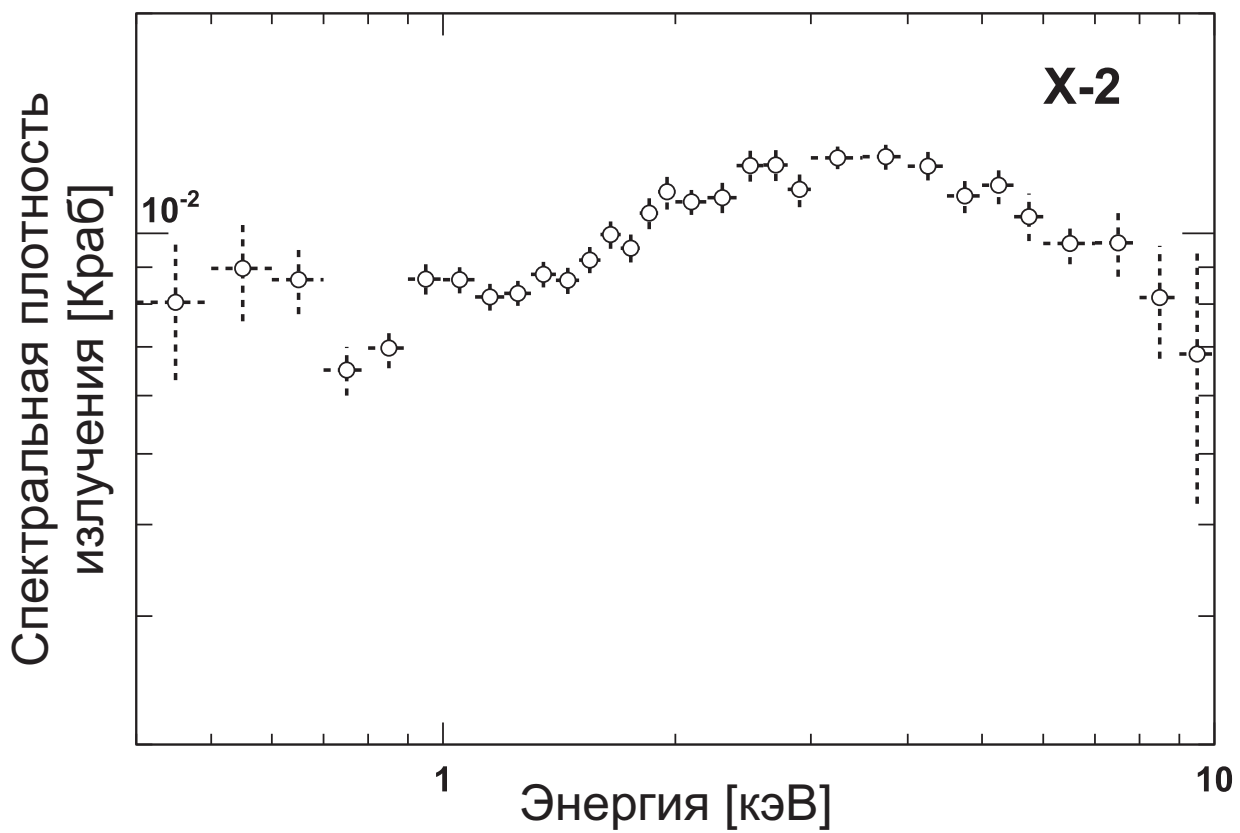
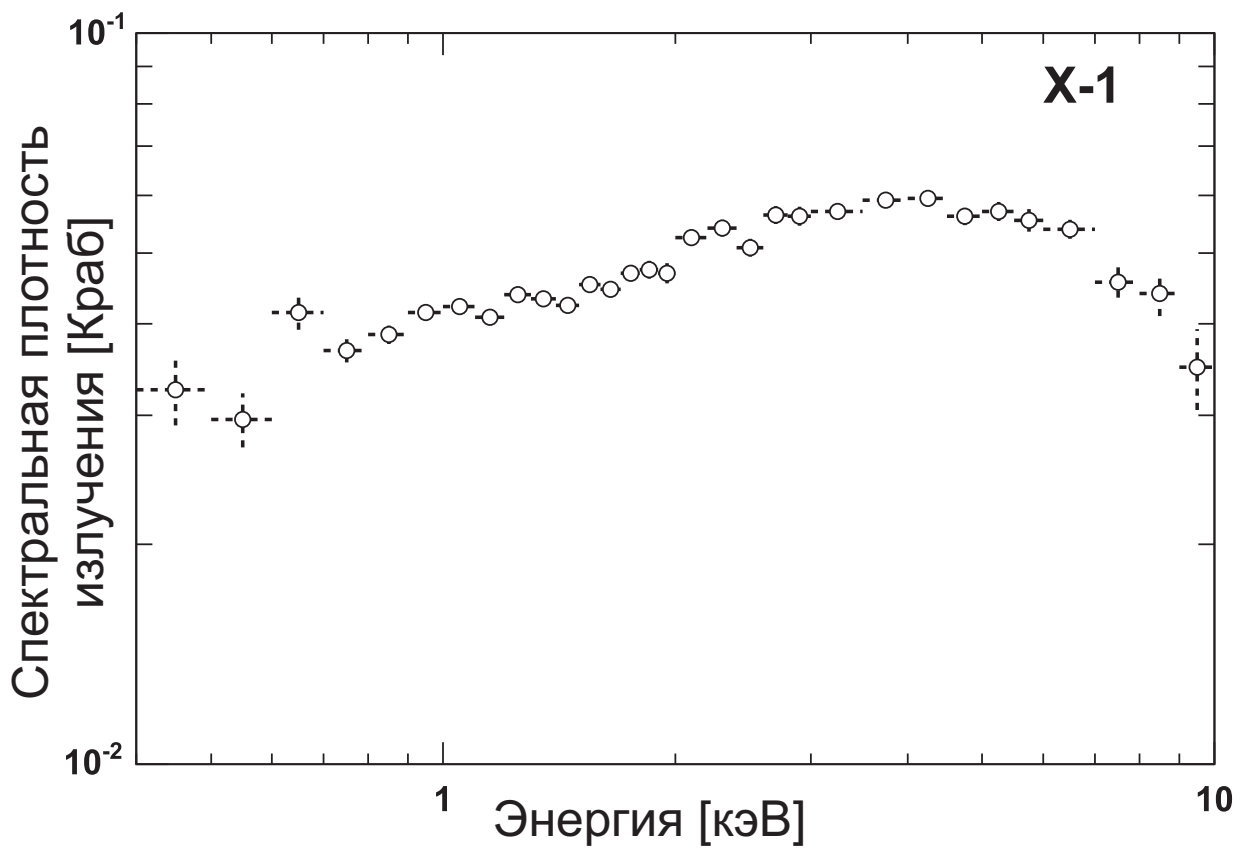
11 класс

Вам дана карта, на которой отмечены источники рентгеновского излучения X-1 и X-2, находящиеся в галактике NGC 1313 в созвездии Сетки. По вертикальной оси карты отложено склонение, по горизонтальной — прямое восхождение. Кроме этого, на отдельном листе приведены спектры источников, где спектральные плотности потока принимаемого излучения выражены в условных единицах «Краба» — излучения в рентгеновском диапазоне от Крабовидной туманности, $1 \text{ Краб} = 2.6 \cdot 10^{-14} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{кэВ})$. Расстояние до NGC 1313 составляет 3.7 Мпк. На всякий случай упомянем, что 1 кэВ — единица измерения энергии, равная $1.6 \cdot 10^{-16} \text{ Дж}$.

Определите минимально возможные светимости этих источников. Считая, что излучение обоих источников образуется при аккреции (т.е. падении) водородной плазмы на компактный объект, оцените минимально возможные массы этих объектов. Что это за объекты? Могла ли вспышка указанной на карте сверхновой SN 1978K в той же галактике быть причиной свечения данных объектов?

Можно считать, что фотон сталкивается с электроном плазмы, если попадает в «поперечное сечение электрона» $\sigma_T = 6.6 \cdot 10^{-25} \text{ см}^2$ (оно называется томпсоновским сечением электрона), взаимодействием протонов с фотонами можно пренебречь.





Решение (20 баллов):

Поскольку у нас имеются данные об излучении источников только в части рентгеновского диапазона, то, очевидно, оценить минимально возможную светимость можно, если найти светимость в диапазоне, для которого приведены данные. Оба графика устроены однотипным образом: по оси абсцисс в логарифмическом масштабе отложена энергия кванта в кэВ, по оси ординат — спектральная плотность потока излучения. Соответственно, освещенность, создаваемую каждым из объектов, можно получить, если для каждого интервала энергий в 1 кэВ найти плотность потока излучения, после чего сложить полученные результаты (фактически мы при этом вычисляем интеграл от графически заданной функции). При этом важно заметить и учесть, что в интервале от 1 кэВ до 10 кэВ штрихи на оси абсцисс соответствуют интервалам в 1 кэВ, а в интервале энергий до 1 кэВ — 0.1 кэВ (например, заменяя все данные, которые находятся левее отметки 1 кэВ, на одну точку со средним значением плотности потока). Следует отметить, что знание, чему именно в джоулях равен 1 кэВ, для решения не требуется.

Измерения дают для источника X-1 около $48 \cdot 10^{-2}$ Крабов · кэВ, а для источника X-2 — $92 \cdot 10^{-3}$ Крабов · кэВ (эти числа могут несколько изменяться в зависимости от аккуратности «численного интегрирования» и, как следствие, все последующие результаты — тоже). Это означает, что источник X-1 создает освещенность $E_1 = 1.3 \cdot 10^{-14}$ Вт/м², а источник X-2 — примерно в 5 раз меньше.

Зная расстояние до источников, можно оценить их светимости. $r = 3.7$ Мпк — это примерно $r = 10^{23}$ м, следовательно, так как $L = 4\pi r^2 E$, получаем, что $L_1 \approx 1.5 \cdot 10^{33}$ Вт, $L_2 \approx 3 \cdot 10^{32}$ Вт.

Далее нам придется подумать, каким образом светимость источника может быть связана с массой объекта, на который падает вещество. На первый взгляд кажется, что такой зависимости быть не должно — чем больше вещества упало, тем больше энергии выделилось, и, следовательно, итоговая светимость определяется только темпом аккреции, который нам неизвестен. Однако, посмотрев внимательно на условие, можно обнаружить, что в нем явно упоминается возможность взаимодействия излучения с падающей плазмой. Что бы это значило?

Если в результате аккреции вещества на компактный объект образуется излучение, то возникает и световое давление этого излучения на падающее вещество. По-видимому, возможна ситуация, когда световое давление оказывается настолько большим, что световое давление останавливает дальнейшую аккрецию (заметим, что это действительно так, и соответствующий предел светимости носит название «эддингтоновского предела» в честь английского астрофизика Артура Стэнли Эддингтона).

Будем считать, что падающее на компактный объект вещество состоит в основном из водорода. Сразу заметим, что хотя водород явно должен быть ионизован, силы электростатического взаимодействия между протонами и электронами очень велики, и в среднем плазма должна быть электронейтральной. Поэтому то, что масса падающего вещества почти полностью определяется протонами, а давление излучения связано с взаимодействием с излучением электронов, не должно приводить нас к выводу, что все протоны упадут на аккрецирующий объект, а электроны улетят под действием светового давления. Фактически мы можем считать, что в каждом малом элементе объема протонов и электронов примерно поровну.

На один «атом водорода» (для удобства будем так называть условную пару из протона и электрона) со стороны компактного объекта действует сила притяжения

$$F_{\text{грав}} = G \frac{\mathcal{M} m_p}{R^2},$$

где G — гравитационная постоянная, \mathcal{M} — масса объекта, m_p — масса протона (электрон существенно легче, и его массой можно пренебречь), R — расстояние от объекта.

На том же расстоянии R от объекта на «атом водорода» будет действовать давление излучения:

$$E(R) = \frac{L}{4\pi R^2}, \quad F_{\text{изл}} = \frac{E(R)\sigma_T}{c},$$

где L — уже известная нам светимость объекта, c — скорость света.

Предполагаем, что светимость равна эддингтоновской, т.е. попросту приравняем $F_{\text{грав}}$ и $F_{\text{изл}}$ и выражаем отсюда массу:

$$\mathfrak{M} = \frac{L\sigma_T}{4\pi c G m_p}.$$

Осталось вычислить массы. Возможно, некоторые не помнят массу протона, однако можно вспомнить, что она с достаточной для нас точностью равна атомной единице массы или, что то же самое, величине, обратной числу Авогадро (если выражать ее в граммах). В итоге $m_p \approx 1.7 \cdot 10^{-27}$ кг. Томпсоновское сечение $\sigma_T = 6.6 \cdot 10^{-29}$ м². Остальные параметры нам уже известны.

Подставляя числа, получаем, что

$$\mathfrak{M} = L \cdot 0.15 \text{ кг/Вт}.$$

Поскольку у нас есть оценки светимости источников снизу, то, соответственно, и оценки масс также получатся оценками снизу. Минимально возможная масса объекта X-1 равна $\mathfrak{M}_1 = 2 \cdot 10^{32}$ кг (т.е. около 10^2 масс Солнца), соответственно, масса объекта X-2 около $2 \cdot 10^1$ масс Солнца. Таким образом, оба компактных объекта — черные дыры.

Возможное влияние на эти объекты вспышки сверхновой (даже если не вдаваться в обсуждение того, каким именно это влияние могло бы быть) могло случиться в том случае, если информация о вспышке успела добраться до источников рентгеновского излучения. Однако из приведенной в условии карты видно, что угловые расстояния между сверхновой и источниками составляют по крайней мере примерно $5' = 300''$. На расстоянии до галактики около 3.7 Мпк это соответствует линейным расстояниям $3.7 \cdot 10^6 \times 3 \cdot 10^2 \approx 10^9$ а.е., или $10^9 / (2 \cdot 10^5) = 5 \cdot 10^3$ пк, т.е. примерно 16 тысяч световых лет. Очевидно, что вспышка сверхновой, свет от которой напрямую дошел до нас, в соответствии с обозначением сверхновой, в 1978 году, не могла повлиять на видимое нами сейчас излучение рентгеновских источников.

Правда, гипотетически возможна ситуация, когда сверхновая находится намного дальше, чем источники, и ее излучение, идущее к нам и к источникам, распространялось практически в одну сторону, но это предположение противоречит информации о том, что сверхновая вспыхнула в той же галактике: для реализации подобного случая нужно, чтобы разность расстояний от нас до источников и до сверхновой существенно — на порядки — превышала 5 кпк (расстояние «в проекции»), но тогда она заведомо превышает размеры любой, даже очень крупной галактики.