

Министерство образования Республики Беларусь  
Обсерватория Белорусского государственного университета  
Ассоциация «Белорусские астрономические олимпиады»



**Поплавский А.Л.  
Секержицкий С.С.  
Стетюкевич Н.И.**

# **XIII Республикаанская олимпиада по астрономии**

## **Условия и решения задач**



Минск, 2007

**Поплавский А.Л., Секержицкий С.С., Стетюкевич Н.И.**  
**XIII Республиканская олимпиада по астрономии**  
**Условия и решения задач теоретического и практического туров**  
Минск, 27–31 марта 2007 года, 20 стр.

Оригинал-макет и верстка А.Л. Поплавский.

# ★ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ТУР ★

**1** «Черная каракатица» Яхта «Черная каракатица» начала свое плавание в полдень в момент весеннего равноденствия на экваторе в акватории Индийского океана, двигаясь только днем строго в направлении Солнца. В течение путешествия зенитное расстояние дневного светила в верхней кульминации оставалось постоянным. На каком расстоянии и в каком направлении относительно точки старта будет находиться «Черная каракатица» в день олимпиады? Изобразите схематически и поясните траекторию движения яхты. Оцените скорость «Черной каракатицы» в день олимпиады.

Для того чтобы в течение плавания «Черной каракатицы» зенитное расстояние Солнца не менялось, необходимо, чтобы смещение яхты за сутки (а точнее, за часть

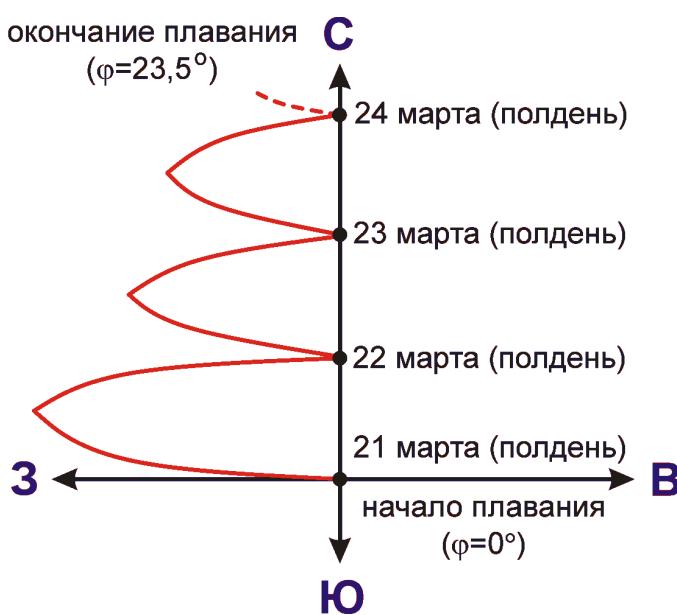
суток, когда дневное светило находится над горизонтом) происходило в северном направлении и при этом компенсировало суточное изменение склонения Солнца. Вблизи момента равноденствия склонение Солнца увеличивается на  $(2\pi \cdot 23,5/365,25)^\circ = 0,40^\circ$  за сутки.

Так как в течение всего путешествия в полдень Солнце находится в зените, широта «Черной каракатицы» должна увеличиваться на вычисленную выше величину  $0,4^\circ$  каждые сутки. Таким образом, широта яхты в день олимпиады (27 марта) составит  $+2,4^\circ$ , при этом она

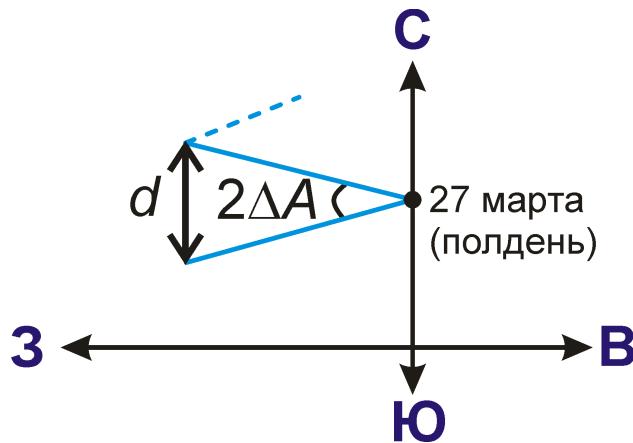
будет находиться в полдень в  $(\pi \cdot 6378 \cdot 2,4/180)$  км = 270 км к северу от точки старта.

На рисунке слева вверху указана траектория яхты. Она будет иметь вид полувинной цепочки с постоянным периодом звеньев, соответствующим суточному смещению судна на север.

Оценим скорость «Черной каракатицы»  $\langle V \rangle$  в день проведения олимпиады. Так как продолжительность дня увеличилась незначительно после дня весеннего равноденствия, кроме того, действия, описанные в задаче, происходят в районе экватора, поэтому считаем, что она равна  $12^h$ . Тогда 27 марта (см. рисунок ниже):



$$\langle V \rangle \approx \frac{d \cdot 180^\circ / (\pi \cdot \Delta A^\circ)}{12^h},$$



где  $d$  – суточное перемещение судна на север,  $2\Delta A$  – сумма азимутов точки восхода Солнца относительно точки востока и точки захода Солнца относительно точки запада.

Так как

$$d = (\pi \cdot 6278 \cdot 0,40^\circ / 180^\circ) \text{ км} = 44,5 \text{ км}$$

$$\text{и } \Delta A^\circ = 2,4^\circ,$$

$$\langle V \rangle \approx 88,5 \text{ км/ч} \approx 50 \text{ узлов.}$$

**2 «Аномалия Пионера»** Космический аппарат (КА) *Pioneer-10* (масса 258 кг, диаметр параболической антенны 2,75 м) покинул сферу действия Юпитера 4.12.1973 г. с гелиоцентрической скоростью 22,1 км/с и продолжает движение в направлении звезды Альдебаран ( $p = 0,0501''$ ). В начале 1980 г. на расстоянии 20 а.е. от Солнца было обнаружено постоянное аномальное торможение КА, составляющее  $8,74 \times 10^{-10} \text{ м/с}^2$ . Связь с КА поддерживалась до начала 2003 г. Используя данные задачи, рассчитайте: время путешествия КА до звезды Альдебаран; величину отклонения траектории КА от расчетной за время наблюдения и массу (в  $M_\oplus$ ) гипотетических невидимых объектов, вызвавших торможение КА. Предложите и обоснуйте другое объяснение данной аномалии.

Используя закон сохранения энергии, рассчитаем остаточную скорость КА:

$$v_\infty = \sqrt{v_0^2 - 2GM/R} = 11,3 \text{ км/с},$$

где:  $v_0 = 22,1 \text{ км/с}$  – скорость КА, покинувшего сферу действия Юпитера,  $M$  – масса Солнца,  $R$  – расстояние от КА до Солнца с учетом радиуса сферы действия Юпитера, определяемой из соотношения:

$$R_{\text{Д}} = R_{\text{С-Ю}} \left( \frac{M_{\text{Ю}}}{M_\odot} \right)^{2/5},$$

где:  $R_{\text{С-Ю}}$  – средний радиус орбиты Земли вокруг Солнца. Тогда время путешествия КА к звезде Альдебаран составит:

$$t = \frac{206265}{p''} \cdot \frac{1 \text{ а.е.(км)}}{v_\infty} \cdot \frac{1}{3600 \cdot 24 \cdot 365} = 1736000 \text{ лет.}$$

Величина отклонения траектории из-за действия аномального торможения за время наблюдения составляет:

$$l = \frac{a \cdot \Delta t^2}{2} = 434\,600 \text{ км.}$$

Предполагая сферически симметричное расположение массы, вызывающей торможение КА, для расстояния  $R = 20$  а.е. получаем значение тормозящей массы:

$$\frac{M}{M_{\oplus}} = \frac{aR^2}{gR_{\oplus}^2} = 4,2.$$

Где:  $M_{\oplus}$  – масса Земли,  $a$  – тормозящее ускорение,  $g$  – ускорение силы тяжести на поверхности Земли,  $R = 20$  а.е.,  $R_{\oplus}$  – радиус Земли. Поскольку ускорение сохраняет постоянное значение при удалении КА от Солнца, плотность среды, вызывающей торможение КА должна уменьшаться пропорционально  $1/R$ . Полученные результаты согласуются с реальными данными.

Оценим предполагаемую плотность межпланетной среды, предположив, что она вызывает механическое торможение КА:

$$\rho = \frac{2a}{Cv_{\infty}^2 S} = 1,2 \times 10^{-18} \text{ кг/м}^3,$$

где:  $C$  – коэффициент сопротивления (принимаемый равным 2 для торможения спутников в верхних слоях атмосферы),  $S$  – площадь сечения КА, равная площади его параболической антенны. Плотность межпланетной среды составляет, в среднем,  $1,67 \times 10^{-17}$  кг/м<sup>3</sup>, что не согласуется с расчетными данными.

«Аномалия Пионера» была обнаружена в ходе поисков гипотетической планеты Солнечной системы за пределами орбиты Плутона, которые вели НАСА с помощью космического зонда «*Pioneer-10*». Несмотря на окончание основной миссии, было решено в дальнейшем использовать данные мониторинга его траектории для обнаружения гипотетической планеты на окраине Солнечной системы. В современной космической навигации контроль скорости аппаратов осуществляется при помощи измерения доплеровского смещения частоты радиосигнала. Расстояние оценивается благодаря тому, что радиосигнал модулируется короткими импульсами более низкой частоты, время прихода которых регистрируются с точностью до миллионных долей секунды. Мгновенные значения скорости и расстояния являются исходными данными для моделирования траектории аппарата при помощи программ численного интегрирования с учетом окружающих его тел. Несовпадение измеренного доплеровского смещения с прогнозируемым на основании теоретических расчетов и представляет собой явление «аномалии Пионера». В тот момент, когда влияние основного негравитационного компонента (давления солнечного ветра) на движение аппарата стало пренебрежительно мало, было обнаружено обратное ускорение, которое не описывается общепринятыми уравнениями движения небесных тел в кос-

мическом пространстве. Даже за пределами Солнечной системы обратное ускорение аппарата по величине остается таким же, как и 20 лет назад.

Сразу после обнаружения аномалии в *Jet Propulsion Laboratory (JPL)* была создана группа экспертов под руководством Джона Андерсона с целью определить источник аномалии. За прошедшее время группа оценила величину всех возможных источников постоянного негравитационного воздействия на аппарат, таких как: утечка газа, тормозной эффект космической пыли, неравномерное распространение тепла в КА, импульс отдачи от радиосигналов, посыпаемых по направлению к Земле. В настоящий момент члены группы склоняются к мнению о том, что причину следует искать в направлениях, связанных с, так называемой, «новой физикой». Такой вывод следует из численной оценки величины обратного ускорения КА. Ее величина представляет собой частное от деления скорости света на постоянную Хаббла, которая описывает скорость космологического расширения Вселенной. Mordehai Milgrom полагает, что на больших расстояниях сила притяжения небесных тел убывает не пропорционально квадрату расстояния, как в законе Ньютона, а пропорционально первой степени расстояния. Carl Johan Masreliez считает источником аномалии гипотетическое явление изменения масштаба Вселенной в четырех измерениях, включая также и время. То, что в стандартной космологической модели считается возрастом Вселенной (13,4 млрд. лет), в данной теории является универсальной мировой константой, определяющей темп экспоненциального изменения космического масштаба, который считается пятым, «скрытым» измерением. Непосредственным следствием такой картины мира является нарушение первого закона Ньютона, приводящее к явлению космологического торможения (cosmic drag). Gary Page предложил новый метод выяснения природы таинственной «аномалии Пионера» – наблюдение за астероидами, имеющими чрезвычайно вытянутую орбиту и уходящими очень далеко за орбиту Плутона. Он идентифицировал 15 астероидов, которые могли быть подвержены действию данной таинственной силы.

Чрезвычайная важность скрупулезного исследования «аномалии Пионеров» связана с тем, что они стали первыми искусственными аппаратами, фактически покинувшими пределы Солнечной системы и приступившими к изучению свойств дальнего космоса.

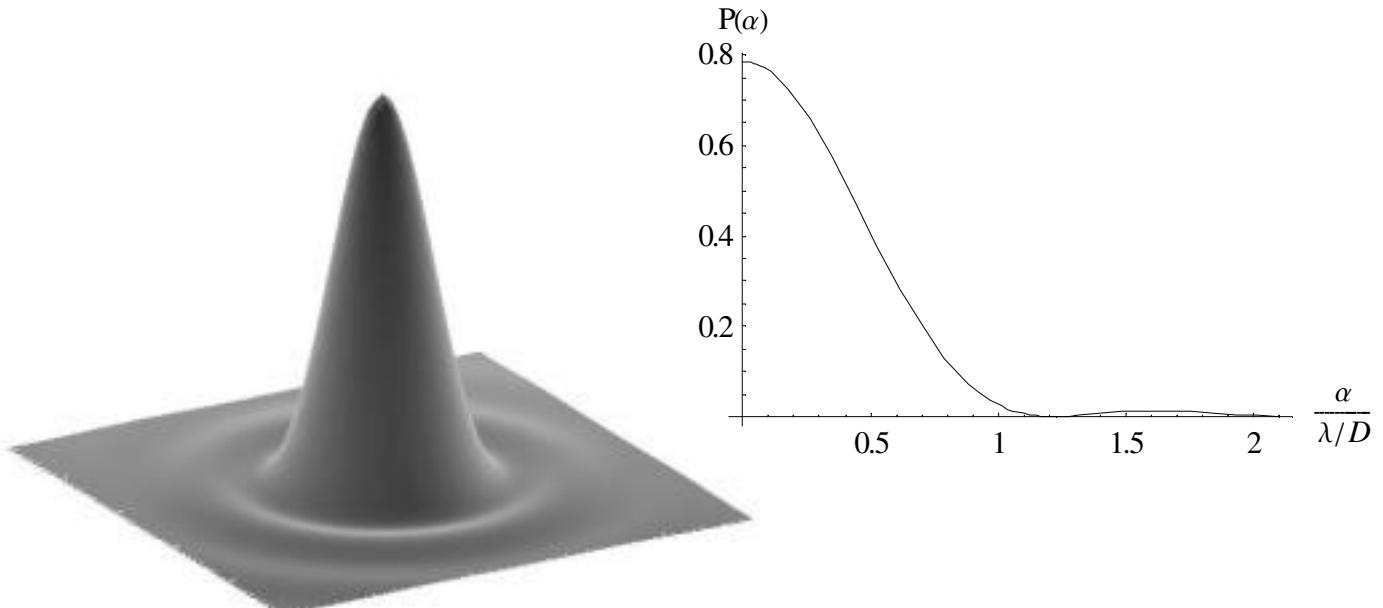
**❸ «Адаптивная оптика** Изображение звезды, полученное в лучах  $V$  на телескопе Кек II с выключенной системой адаптивной оптики, имеет вид равномерно освещенного кружка с интенсивностью в 100 раз меньшей интенсивности центра идеального дифракционного изображения. Рассчитайте разрешающую способность телескопа. Во сколько раз она повысится после включения адаптивной оптики? Найдите проникающую способность Кек II, если фон неба в лучах  $V$  на горе Мауна Кеа составляет  $23^m$  на квадратную угловую секунду.

Форма изображения точечного источника (звезды) в идеальном телескопе без атмосферы определяется только дифракцией и описывается функцией Эйри (см. рисунок внизу). При этом разрешающая способность равна:

$$\alpha_0 = 1,22 \frac{\lambda}{D},$$

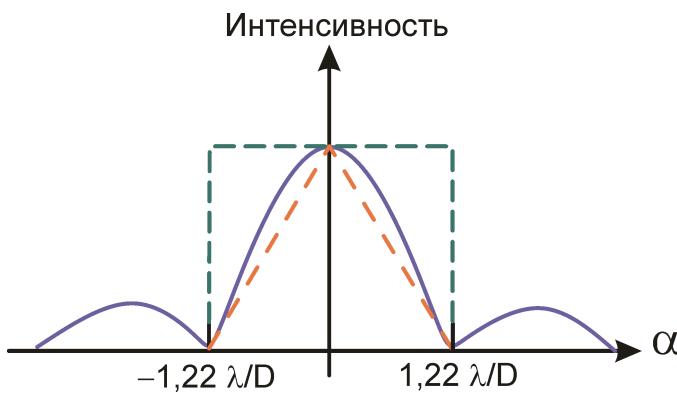
для полосы  $V$  ( $\lambda_{\text{eff}} = 5500 \text{ \AA}$ ):

$$\alpha_0 = \frac{138''}{D \text{ (мм)}}.$$



При  $D = 10 \text{ м}$  получаем  $\alpha_0 \approx 0,014''$ . Однако, вследствие атмосферной турбулентности реальная разрешающая способность  $\alpha$  оказывается во много раз хуже. При наличии атмосферной турбулентности полный поток излучения от астрономического объекта сохраняется (как и в случае идеального дифракционного изображения), только по-другому распределяется между пикселями. Так как физический смысл потока излучения – объем под поверхностью, описываемой зависимостью интенсивности изображения точечного источника света от угловой координаты, можем записать (см. рисунок внизу):

$$\frac{1}{100} \pi \alpha^2 = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{3} \pi \alpha_0^2 + \pi \alpha_0^2 \right) = \frac{2}{3} \pi \alpha_0^2 \Rightarrow \alpha = \alpha_0 \sqrt{200/3} \approx 8\alpha_0 = 0,1''.$$



Принцип действия адаптивной оптики заключается в исправлении атмосферной турбулентности деформируемым вторичным зеркалом телескопа и приведение вида точечного источника света к идеальному (или почти идеальному) дифракционному изображению.

Из последней формулы следует, что адаптивная оптика повышает разрешающую способность в 8 раз.

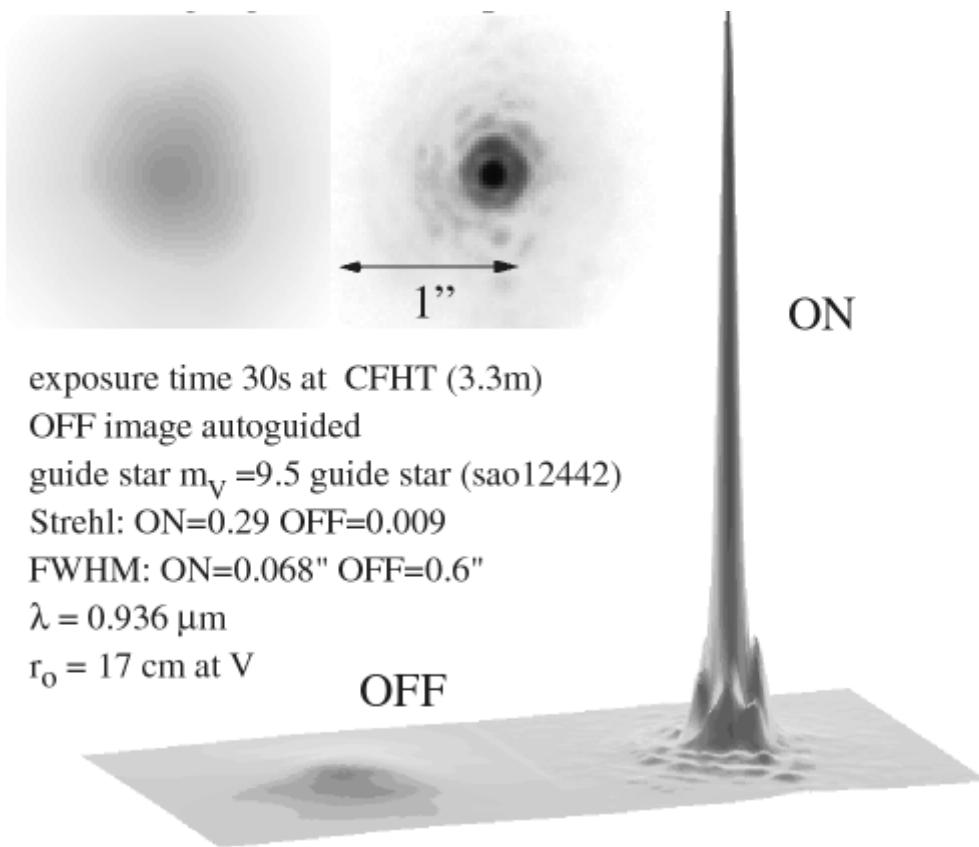
Проницающая способность  $m_{\text{пп}}$  телескопа Кек II (как и других больших телескопов) ограничена фоном неба:

$$2,5 \lg \frac{1'' \times 1''}{\pi \alpha^2} = m_{\text{пп}} - 23^{\text{m}},$$

откуда

$$m_{\text{пп}} = 21,8^{\text{m}} - 5 \lg \alpha.$$

При включенной системе адаптивной оптики  $m_{\text{пп}} = 31,1^{\text{m}}$ , а при выключенной –  $m_{\text{пп}} = 26,8^{\text{m}}$ . Кроме того, на практике значение предельной звездной величины, доступной современным телескопам, ограничено характеристиками ПЗС матриц.



- 4 «Эволюция звезды» В межзвездной среде образовалась протозвезда массы  $0,9 M_{\odot}$  и выпадение окружающего вещества на нее завершилось. Во сколько раз плотность протозвезды в момент, когда ее радиус равен 0,1 а.е., меньше той, при которой термоядерные реакции остановят сжатие? Сколько времени звезда будет находиться на главной последовательности? Оцените скорость образования нейтрино во время этой стадии. Во время какой из фаз эволюции теплоемкость звезды максимальна?

**Массы ядер водорода и гелия равны соответственно**  $1,00813$  а.е.м. и  $4,00389$  а.е.м., **атомная единица массы**  $1$  а.е.м. =  $1,66 \times 10^{-27}$  кг, **астрономическая единица**  $1$  а.е. =  $149\,600\,000$  км, **радиус Солнца**  $R_{\odot} = 696\,000$  км, **солнечная постоянная**  $b = 1370$  Вт · м<sup>-2</sup>.

Первая фаза – гравитационное сжатие (гравитационная конденсация, контракционная фаза); вторая фаза – главная последовательность; третья фаза – гигант; четвертая фаза – белый карлик.

Плотность звезды в первом случае:  $\rho_1 = M / (4/3\pi R_1^3)$ . Термоядерные реакции останавливают гравитационное сжатие, когда звезда оказывается на главной последовательности, для звезд которой выполняются известные соотношения:  $L \sim R^{5,2}$ ,  $L \sim M^{3,9}$ . Проведя сравнение с Солнцем, получим:  $R_2^{5,2} / M^{3,9} = R_{\odot}^{5,2} / M_{\odot}^{3,9}$ . Отсюда:  $R_2 = (0,9)^{0,75} R_{\odot} = 0,924 R_{\odot}$ . Плотность звезды во втором случае:  $\rho_2 = M / (4/3\pi R_2^3)$ .

Отношение плотностей:  $\frac{\rho_2}{\rho_1} = \left( \frac{R_1}{R_2} \right)^3 = \left( \frac{0,01 \cdot 149600000}{0,924 \cdot 696000} \right)^3 = 12\,600$ .

Время нахождения на главной последовательности определяем по формуле:  $t = 10^{10} \frac{1}{M^3} = \frac{10^{10}}{0,9^3} = 13,7$  (млрд. лет).

Энерговыделение в звезде массы  $M = 0,9M_{\odot}$  на главной последовательности обеспечивает протон-протонный цикл, в каждом из которых образуется два нейтрино. Энергия, выделяющаяся в одном цикле:

$$E_1 = (4m_p - m_{He}) \cdot c^2 = \\ = (4 \cdot 1,00813 - 4,00389) \cdot 1,66 \cdot 10^{-27} \cdot 9 \cdot 10^{16} = 4,28 \cdot 10^{-12} \text{ Дж.}$$

Светимость звезды  $L = \left( \frac{M}{M_{\odot}} \right)^{3,9} L_{\odot} = \left( \frac{R}{R_{\odot}} \right)^{5,2} L_{\odot}$ .

Звездная постоянная  $b = \left( \frac{M}{M_{\odot}} \right)^{3,9} \cdot b_{\odot} = 0,66305 \cdot 1370 = 908$  Вт/м<sup>2</sup>.

Полная мощность  $P = b \cdot 4\pi a^2 = 908 \cdot 4\pi \cdot (149\,600\,000\,000)^2 = 2,55 \cdot 10^{26}$  Вт.

Скорость рождения нейтрино  $\frac{2 \cdot P}{E_1} = \frac{2 \cdot 2,55 \cdot 10^{26}}{4,28 \cdot 10^{-12}} = 1,2 \cdot 10^{38}$  штук/с.

Во время первых трех фаз теплоемкость звезды отрицательна (температура повышается, энергия излучается), а в фазе белого карлика положительна (температура понижается, энергия излучается), следовательно, является максимальной.

**5 «В окрестностях черной дыры»** В далеком будущем два космонавта изучают черную дыру ( $M = 10 M_{\odot}$ ), "открытую" около Сириуса. Оба находятся на круговых орbitах вокруг дыры с полуосями  $2R_g$  и чуть-чуть-чуть больше  $R_g$  ( $R_g$  – радиус сферы Шварцшильда). Какова средняя плотность исследуемой черной дыры? Чему равны периоды обращения космонавтов? Как выглядит Солнце для каждого из космонавтов? Опишите, как протекают основные этапы эволюции Солнца для каждого из космонавтов.

Ввиду сложности расчетов в данной задаче в рамках ОТО, можно ограничиться приближением СТО.

Определим радиус сферы Шварцшильда:

$$R_g = \frac{2GM}{c^2} = \frac{2 \cdot 6,67 \cdot 10^{-11} \cdot 10 \cdot 2 \cdot 10^{30}}{9 \cdot 10^{16}} = 29600 \text{ м}. \text{ Среднюю плотность рассчитываем по формуле: } \rho = \frac{3 \cdot M}{4\pi R_g^3} = 2,44 \times 10^{17} \text{ кг/м}^3. \text{ Отметим, что эта плотность ниже, чем средняя плотность нейтронной звезды.}$$

Периоды обращения космонавтов вокруг черной дыры в собственных системах отсчета найдем, используя соотношения для круговых скоростей:

$$v_1 = \frac{c}{\sqrt{2 \cdot 2}} = 150000 \text{ км/с}; v_2 = \frac{c}{\sqrt{2}} = 212000 \text{ км/с}.$$

Откуда:  $T_1 = \frac{2\pi \cdot a_1}{v_1} = 2,48 \cdot 10^{-3} \text{ с}, T_2 = \frac{2\pi \cdot a_2}{v_2} = 8,78 \cdot 10^{-4} \text{ с}.$  В системах же отсчета,

связанных с космонавтами, ситуация следующая. Первый космонавт второго наблюдает практически "застывшим", следовательно, его период обращения  $T_{21} = \infty$ , Второй космонавт видит первого "размазанным" по орбите  $T_{12} = 0$ .

Для ответа на вопрос о виде Солнца используем известную формулу для красного смещение света, выходящего с поверхности белого карлика:  $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{GM}{Rc^2}$ . Получим:  $\Delta\lambda_1/\lambda_1 = 1/4, \Delta\lambda_2/\lambda_2 = 1/2$ . В нашем случае процесс обратный, следовательно, красное смещение становится синим. Вместо желтого Солнца  $\lambda = 600 \text{ нм}$ :

первый космонавт видит Солнце  $\lambda_1 = \lambda - \Delta\lambda_1 = 450 \text{ нм}$  – фиолетовое;

второй космонавт видит Солнце  $\lambda_2 = \lambda - \Delta\lambda_2 = 300 \text{ нм}$  – ультрафиолетовое.

В системе отсчета, связанной с первым космонавтом процессы эволюции Солнца ускоряются в  $\frac{t_0}{t} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{m_1}{m_{10}} = \frac{G \cdot M}{2 \cdot a_1 \cdot c^2} + 1 = \frac{6,67 \cdot 10^{-11} \cdot 2 \cdot 10^{31}}{2 \cdot 2 \cdot 29600 \cdot 9 \cdot 10^{16}} = 1,25 \text{ раз.}$

В системе отсчета, связанной со вторым космонавтом – в

$$\frac{t_0}{t} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{m_2}{m_{20}} = \frac{G \cdot M}{2 \cdot a_2 \cdot c^2} + 1 = \frac{6,67 \cdot 10^{-11} \cdot 2 \cdot 10^{31}}{2 \cdot 29600 \cdot 9 \cdot 10^{16}} = 1,5 \text{ раз.}$$

В рамках же ОТО второй космонавт относительно прочих наблюдателей "завис" – процессы эволюции Солнца для него прокручиваются практически мгновенно.

# ★ ПРАКТИЧЕСКИЙ ТУР ★

**1 «Астрономические наблюдения»** Опишите результаты ваших собственных наблюдений (реальных или виртуальных в сети Интернет) примечательных астрономических явлений 2007 года: комета *McNaught*, максимальная элонгация Меркурия, полное затмение Луны. 1) Укажите дату и время явления, а также положение объекта на небесной сфере. 2) Опишите вид наблюдаемого объекта. 3) Если во время данных наблюдений Вы совершили открытия, противоречащие тому, что пишут в книгах, обязательно сообщите о них.

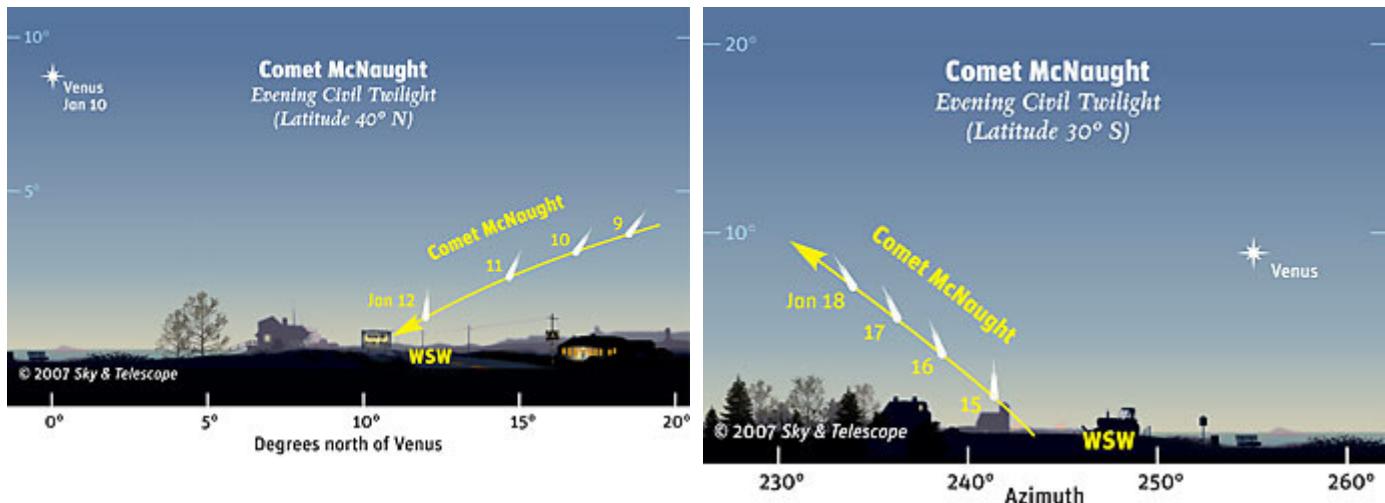
### Комета McNaught

Комета *McNaught* в Беларуси наблюдалась 9–13 января 2007 года.

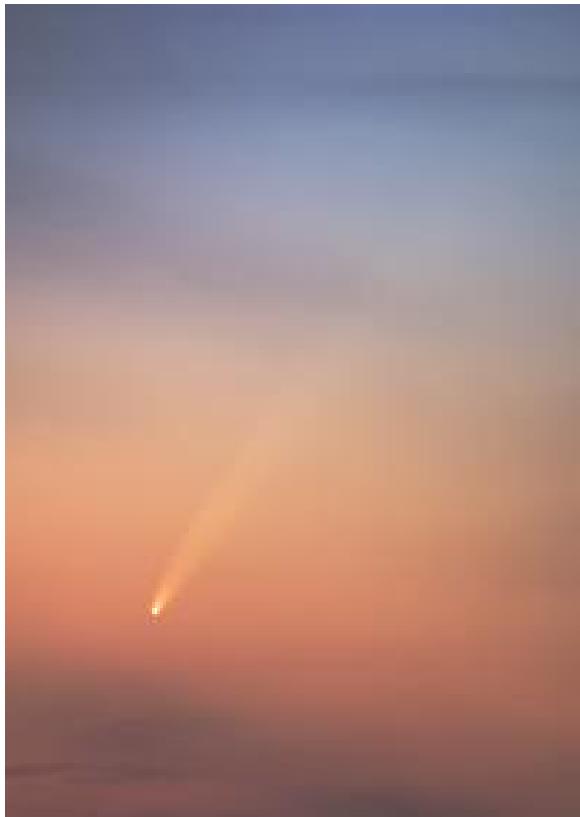
Обстоятельства наблюдения представлены в таблице.

Дата	Прямо восходжение	Склонение	Элонгация	Видимая звездная величина
10.01.2007	19 <sup>h</sup> 32 <sup>m</sup>	−10° 08'	12,1°	−0,9
11.01.2007	19 <sup>h</sup> 39 <sup>m</sup>	−11° 43'	10,6°	−1,5
12.01.2007	19 <sup>h</sup> 48 <sup>m</sup>	−13° 56'	8,6°	−1,9
13.01.2007	19 <sup>h</sup> 56 <sup>m</sup>	−16° 49'	6,6°	−2,0
14.01.2007	20 <sup>h</sup> 03 <sup>m</sup>	−20° 12'	5,4°	−1,9
15.01.2007	20 <sup>h</sup> 10 <sup>m</sup>	−23° 47'	6,4°	−1,6
16.01.2007	20 <sup>h</sup> 16 <sup>m</sup>	−27° 16'	8,7°	−1,1
17.01.2007	20 <sup>h</sup> 22 <sup>m</sup>	−30° 30'	11,5°	−0,6
18.01.2007	20 <sup>h</sup> 26 <sup>m</sup>	−33° 25'	14,2°	−0,1

Схемы наблюдения в северном и южном полушариях изображены на рисунках ниже.



Фотография кометы  
*McNaught*, полученная в  
Бресте 13 января 2007 года  
в 16 часов 50 мин  
(С.С. Секержицкий)



### Меркурий

Речь идет об западной элонгации Меркурия 22 марта, которая составила  $27^\circ$ , что практически близко к теоретически максимально возможному значению  $28^\circ$ , обусловленному эллиптичностью орбит как Земли так и Меркурия. Наблюдения 22 марта в Минске возможны с 5 часов 47 минут – высота Меркурия примерно  $1^\circ$  до 6 часов 10 минут – восход Солнца. Видны также Марс и Юпитер. Сатурн заходит, Луна и Венера еще не взошли.

В таблице ниже приведены для 2007 года положения Меркурия в афелии и перигелии.

09.02.2007	Перигелий	0,31 а.е.
08.05.2007	Перигелий	0,31 а.е.
04.08.2007	Перигелий	0,31 а.е.
31.10.2007	Перигелий	0,31 а.е.
25.03.2007	Афелий	0,47 а.е.
21.06.2007	Афелий	0,47 а.е.
17.09.2007	Афелий	0,47 а.е.
14.12.2007	Афелий	0,47 а.е.

В таблице ниже приведены для 2007 года положения Меркурия в максимальных восточной и западной элонгациях.

07.02.2007	восточная элонгация	$18^\circ$
22.03.2007	западная элонгация	$27^\circ$
02.06.2007	восточная элонгация	$23^\circ$
20.07.2007	западная элонгация	$20^\circ$
29.09.2007	восточная элонгация	$25^\circ$
08.11.2007	западная элонгация	$18^\circ$

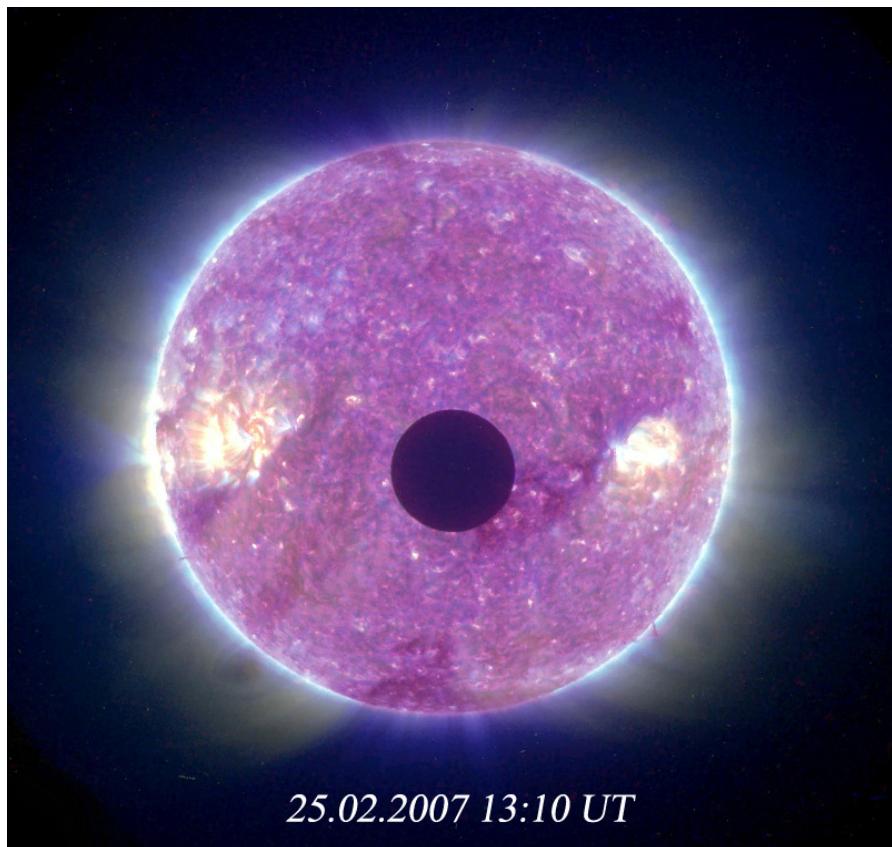
## Полное лунное затмение

Обстоятельства наблюдения в Бресте:

Вхождение в полутень 03.03.2007, 22:21  
Вхождение в тень 03.03.2007, 23:33  
Начало полной фазы 04.03.2007, 00:47 (высота 44°, азимут 4°)  
Конец полной фазы 04.03.2007, 01:57 (высота 41°, азимут 16°)  
Выход из полной тени 04.03.2007, 03:11  
Выход из полутени 04.03.2007, 04:25

Следует отметить, что по причине достаточной удаленности Луны от плоскости математического горизонта, ее багровость была различима только в телескоп.

- 2 «Прохождение Луны по диску Солнца» Космический аппарат (КА) *STEREO-B (Solar TErrestrial RElations Observatory)* зафиксировал прохождение Луны по диску Солнца (см. фото), находясь на расстоянии 1,006421 а.е. от центра Солнца. Используя данное изображение: 1) рассчитайте и нанесите местоположение КА в пространстве относительно Земли, Луны и Солнца в проекции на плоскость эклиптики; 2) рассчитайте радиус сферы действия Земли и сделайте заключение о характере орбиты КА; 3) опишите физическую природу деталей поверхности Солнца, наблюдаемых на данном изображении ( $\lambda_m=304 \text{ \AA}$ ).



1) Расстояние от КА до Луны определим по соотношению угловых размеров Солнца и Луны на представленном изображении и расстоянию от Земли до Луны, исходя из равенства расстояний от КА и Земли до Солнца:

$$R_1 = \frac{D_{\odot}}{D_{\text{Л}}} R_{3-\text{Л}} = 1773\,000 \text{ км},$$

где:  $R_{3-\text{Л}}$  – средний радиус лунной орбиты. Для нахождения положения КА в качестве системы отсчета выберем линию Солнце–Земля. Поскольку 3 марта 2007 г. в 23:40 UT ( $t_1$ ) состоялось полное лунное затмение, Солнце, Земля и Луна находились в этот момент на одной линии. 25 февраля 2007 г. в 13:10 UT ( $t_2$ ) линия Луна–Земля относительно линии Солнце–Земля составляла угол:

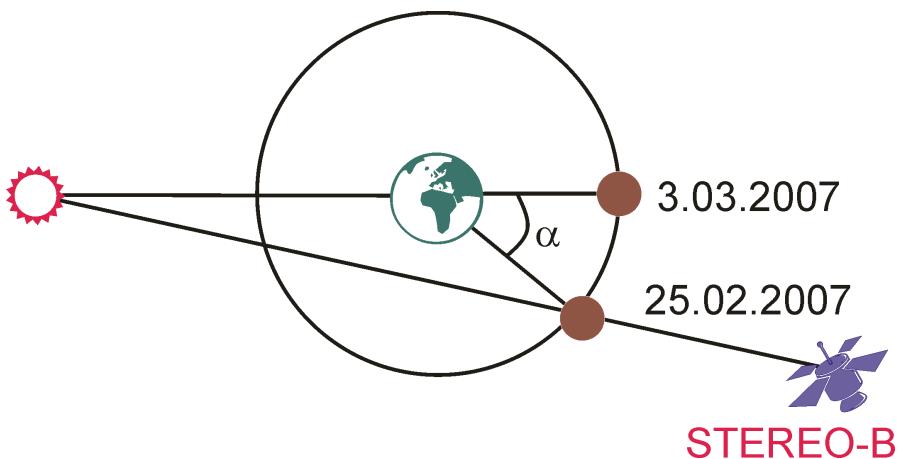
$$\alpha = \frac{t_1 - t_2}{T_{\text{Л}}} \cdot 360^\circ = 80^\circ,$$

где:  $T_{\text{Л}}$  – синодический период обращения Луны. КА *STEREO-B* в момент наблюдения находился на линии Солнце–Луна на расстоянии  $R_1$  от Луны.

2) Радиус сферы действия Земли по отношению к Солнцу составляет:

$$\rho = R_{\text{C-3}} \left( \frac{M_{\oplus}}{M_{\odot}} \right)^{2/5} = 925\,000 \text{ км},$$

где  $R_{\text{C-3}}$  – средний радиус орбиты Земли вокруг Солнца. Поскольку расстояние от КА до Земли превышает данное значение (исходя из расчета  $R_1$ ), то КА *STEREO-B* является спутником Солнца.



3) На ультрафиолетовом изображении Солнца, полученном КА, наблюдаются детали солнечной хромосфера: супергрануляция, активные горячие области ( $T \geq 80\,000 \text{ K}$ ), связанные с всплывающими магнитными полями.

**❸ «Джет и водородное облако»** В результате наблюдений, выполненных на крупнейших телескопах мира, обнаружено несколько удивительных объектов в скоплении галактик Abell 194: активная галактика NGC 541 с джетом и водо-

**родное облако – объект Минковского ( $\alpha = 1^{\text{h}}25^{\text{m}}47,5^{\text{s}}$ ,  $\delta = -1^{\circ}22'20''$ ), в котором интенсивно происходит процесс звездообразования. Красное смещение объектов одинаково и равно 0,019. С помощью изображения участка скопления Abell 194 и спектра водородного облака: 1) определите тип галактики NGC 541 по классификации Хаббла; 2) определите размеры NGC 541 и облака водорода; 3) объясните роль джета в эволюции водородного облака; 4) оцените время, за которое джет достиг водородного облака; 5) найдите температуры входящих в облако звезд и межзвездного газа, объясните полученный результат; 6) оцените, сколько лет назад в исследуемом облаке начался процесс звездообразования; 7) определите классы светимости звезд, входящих в облако.**

**Значение постоянной Хаббла принять равным  $H = 73 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$  (по данным проекта WMAP 2006 г.).**

1) Изображенная на иллюстрации галактика NGC 541 – эллиптическая, E0-1 по классификации Хаббла.

2) Масштаб изображения участка скопления Abell 194 составляет 0,349 кпк''. Поэтому размеры галактики составляют  $\sim 30'' = 11 \text{ кпк}$ , а водородного облака –  $\sim 15'' = 5,7 \text{ кпк}$ .

3) Джет является причиной инициирования звездообразования в облаке (S. Croft и др. *Astrophys. J*, том 647, стр. 1040–1055, 2006 г.).

4) Экспериментальные результаты, полученные в настоящее время, свидетельствуют об ультраквазаристских скоростях джетов, поэтому искомое время

$$\tau \approx \frac{50'' \cdot 0,349 \text{ кпк}''}{c} = \frac{17,5 \text{ кпк}}{3 \times 10^5 \text{ км/с}} \approx 60\,000 \text{ лет},$$

где 50'' – угловая длина джета от центра галактики до водородного облака.

5) Спектр исследуемого облака водорода – непрерывный с наложенными на него эмиссионными линиями водорода ( $\text{H}_\alpha$ ,  $\text{H}_\beta$ ,  $\text{H}_\gamma$ ), гелия ( $\text{He I}$ ), кислорода ( $\text{O I}$ ,  $\text{O II}$ ,  $\text{O III}$ ), азота ( $\text{N II}$ ) и других элементов. Происхождение такого спектра связано со звездами (непрерывная составляющая) и горячей межзвездной средой (эмиссионная составляющая). Среднюю температуру звезд оценим по максимуму непрерывного спектра:

$$\lambda_{\max} \approx 4200 \text{ \AA} \Rightarrow T_* = \frac{2900 \text{ K} \cdot \text{мкм}}{0,42 \text{ мкм}} \approx 7000 \text{ K}.$$

Температуру межзвездного газа оценим по характерным ширинам эмиссионных линий. Считаем, что уширение линий вызвано тепловым движением частиц межзвездной среды, тогда с помощью эффекта Доплера получим:

$$\frac{\Delta\lambda_D}{\lambda} = \frac{V_{\text{MC}}}{c}, \quad V_{\text{MC}} = \sqrt{\frac{2kT_{\text{MC}}}{m_0}} \Rightarrow T_{\text{MC}} = \frac{m_0 c^2}{2k} \left( \frac{\Delta\lambda_D}{\lambda} \right)^2,$$

где  $\Delta\lambda_D/\lambda$  – полуширина эмиссионной линии,  $V_{MC}$  и  $T_{MC}$  – соответственно тепловая скорость и температура частиц межзвездной среды,  $m_0$  – масса одной частицы.

Для измерения полуширин выбираем линии ионов О II и О III как наиболее удобные для измерений. Кроме того, эти линии однозначно связаны с горячим межзвездным газом (а не, например, атмосферами звезд). Получаем:

$$\Delta\lambda_D/\lambda [O\text{ II}] = 1,7 \times 10^{-3}; \quad \Delta\lambda_D/\lambda [O\text{ III}] = 1,6 \times 10^{-3}.$$

Используя полученные значения, определяем:  $T_{MC} \approx 200$  млн. К. Такой фантастический результат объясняется, вероятно, ударной волной, вызванной джетом.

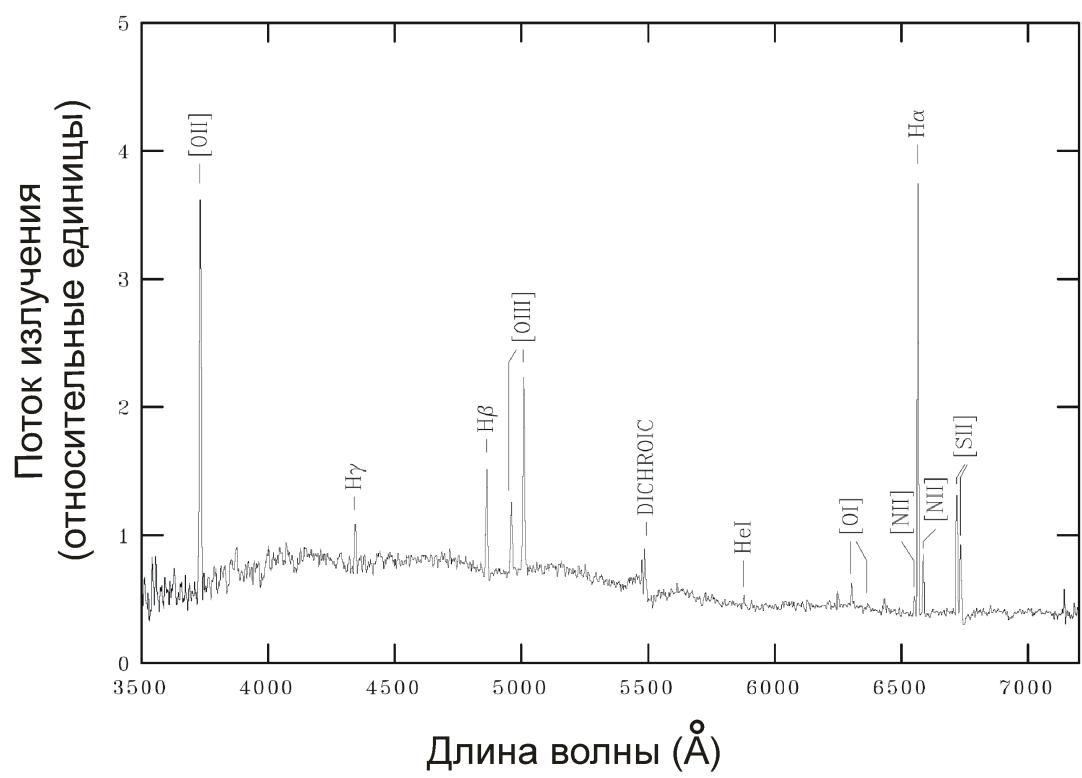
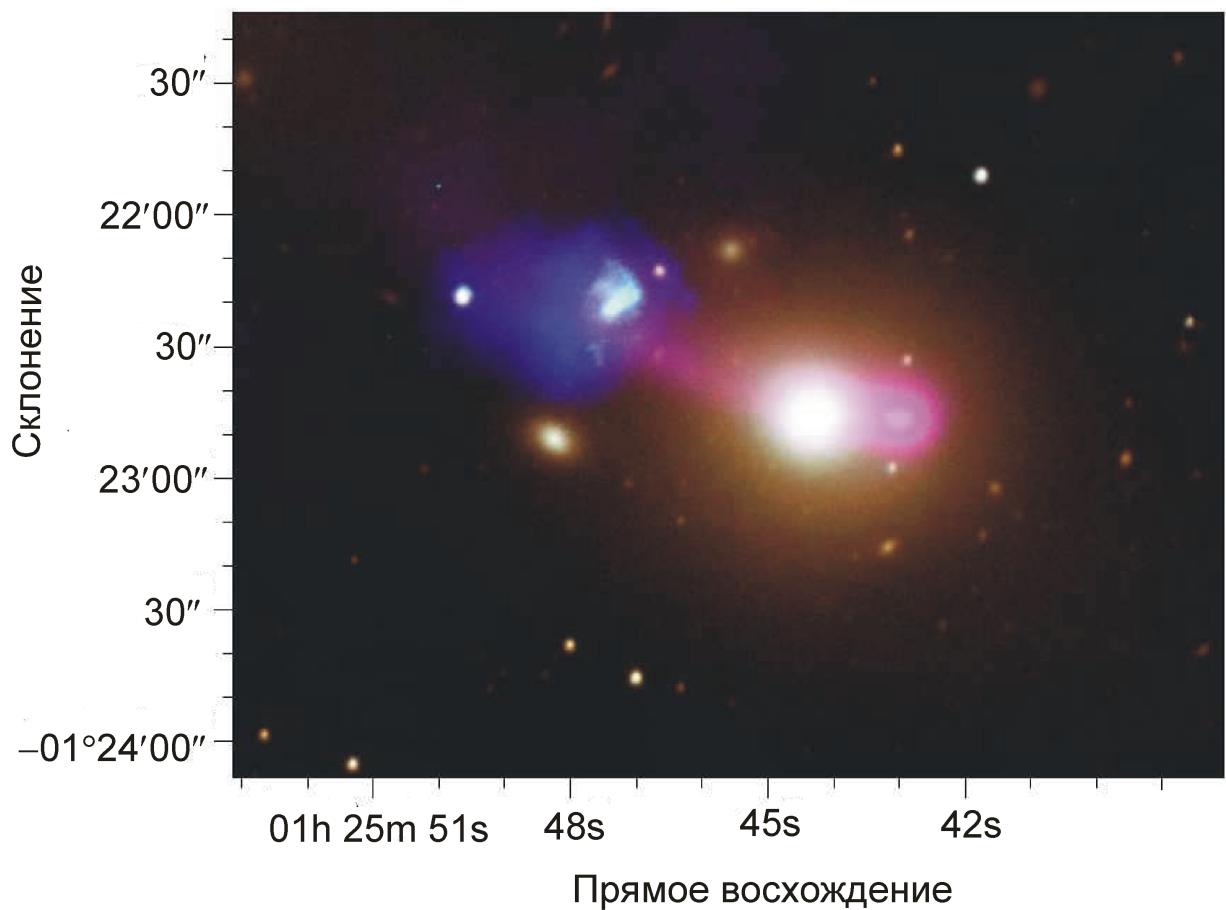
6) Если в водородном облаке есть звезды, находящиеся на главной последовательности, то возраст новорожденного звездного скопления должен превышать характерное время Кельвина-Гельмгольца:

$$t \geq t_{KH} = \frac{GM^2}{LR},$$

где  $L$  – светимость звезды,  $R$  и  $M$  – ее радиус и масса. Максимум непрерывного спектра свидетельствует о том, что в скоплении в большинстве своем присутствуют звезды спектрального класса F. Тогда

$$t \geq \frac{GM_\odot}{L_\odot R_\odot} = 30 \text{ млн. лет.}$$

7) Если не считать протозвезды, молодое скопление в водородном облаке должно включать в себя звезды главной последовательности V, сверхгиганты I, а также остатки звездной эволюции нейтронные звезды и черные дыры звездных масс.



★ Белорусские астрономические олимпиады ★

ОФИЦИАЛЬНЫЙ САЙТ:

[www.belastro.org](http://www.belastro.org)

