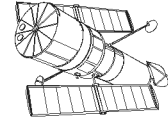


ПРАКТИЧЕСКИЙ ТУР



Полет к звездам (А.М. Татарников)

Класс:

9

Задача:

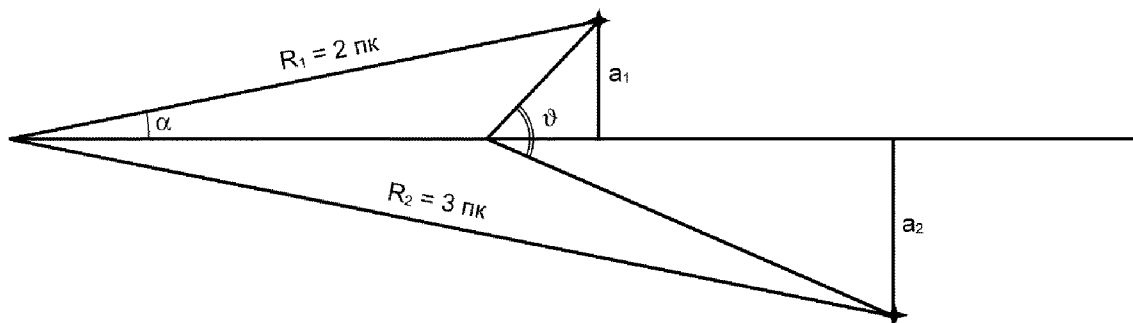
1

? Прямо по курсу звездолета находится визуально двойная звезда с угловым расстоянием между звездами $1'$. Расстояние от звездолета до первой звезды этой пары составляет 2 пк, до второй — 3 пк. Звездолет летит между этими звездами. Нарисуйте схематический график изменения углового расстояния между звездами, видимого со звездолета, летящего со скоростью в 0.5 скорости света, со временем на ближайшие 30 лет, считая звезды неподвижными. Влиянием звезд на движение звездолета пренебречь. Все измерения сделаны в системе отсчета, связанной со звездолетом. Релятивистские эффекты не учитывать.

! Оценим характерное время изменения угловых расстояний в задаче. Для этого найдем так называемое "прицельное расстояние" a (см. рисунок). Оно равно $R \cdot \alpha$, где α — угловое расстояние звезды от направления полета, R — расстояние до звезды. Для первой звезды прицельное расстояние получается равным 60 а.е., для второй — 90 а.е.

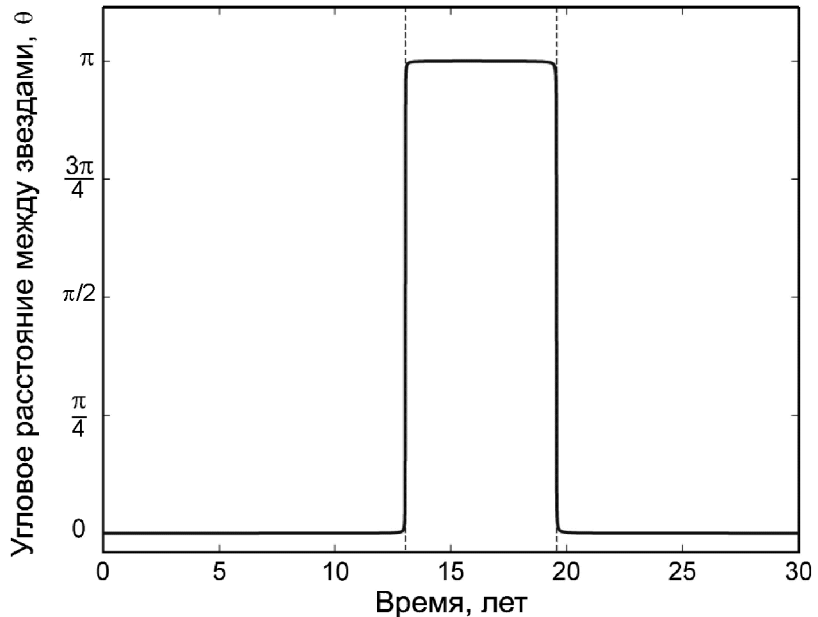
Вычислим, за какое время t звездолет пройдет расстояние, равное величине a . Для этого разделим ее на скорость звездолета v . Получаем, что это время по порядку величины составляет 1 сутки. Данная величина несравнимо меньше тех периодов времени, которые требуются звездолету, чтобы долететь до окрестностей первой и второй звезды. Эти периоды, как нетрудно вычислить, составляют 13.0 и 19.5 года.

Таким образом, угловое расстояние θ между звездами сначала крайне медленно увеличивается (на графике это изменение не заметно). Затем, через 13 лет полета, за очень короткий промежуток времени, почти мгновенно, увеличивается почти до 180° , после чего очень медленно продолжает расти (и этот рост на графике незаметен). В какой-то момент после пролета мимо первой звезды и до пролета мимо второй угловое расстояние между звездами достигает 180° и начинает очень медленно



Практический тур

уменьшаться. Через 6.5 лет после сближения с первой звездой происходит пролет мимо второй звезды, когда угловое расстояние между ними опять резко изменяется почти до нуля, после чего продолжает медленно уменьшаться весь дальнейший полет.



Лунная вершина (А.М. Татарников)

Класс: **9 10** Задача: **2**

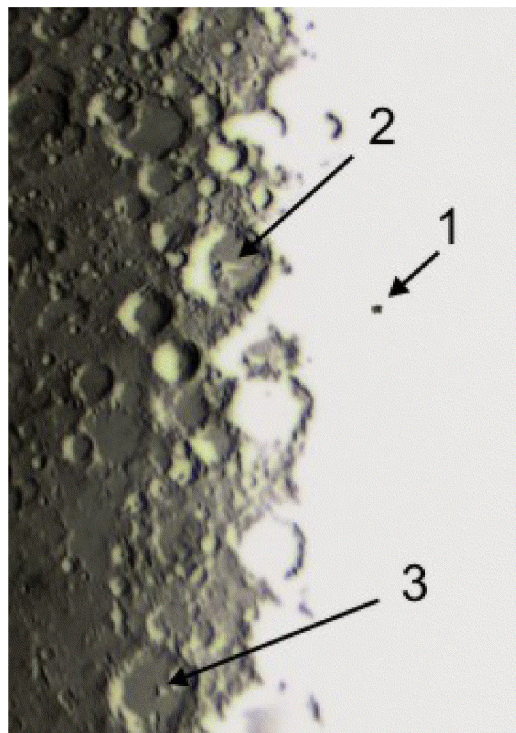
? На рисунке показан снимок Луны (негатив). Определите высоту горы, обозначенной цифрой 1 (видна справа от терминатора). Селенографические координаты центров кратеров №2 и №3 соответственно равны $\lambda_2=1^\circ 10'$, $\beta_2=0^\circ 20'$ и $\lambda_3=2^\circ 40'$, $\beta_3=-10^\circ 15'$. Оцените погрешность, с которой определена высота горы.

! Для того, чтобы определить масштаб фотографии, вычислим длину одного градуса лунного меридиана:

$$\omega = \frac{2\pi \cdot R}{360} = 30.3 \text{ км.}$$

Кратеры 2 и 3 находятся вблизи лунного экватора, а расстояние между ними, как видно из их координат, существенно меньше радиуса Луны. Поэтому его можно вычислить, пользуясь теоремой Пифагора:

$$L = \omega \sqrt{(\lambda_3 - \lambda_2)^2 + (\beta_3 - \beta_2)^2} = 325 \text{ км.}$$

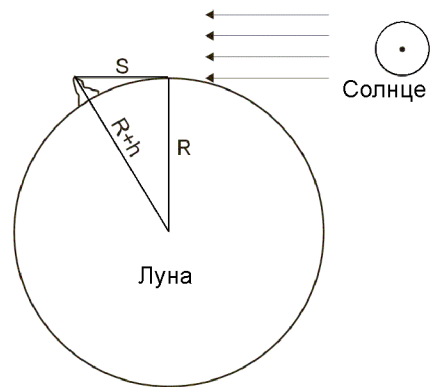


XVI Всероссийская олимпиада школьников по астрономии

Расстояние от горы до терминатора на рисунке составляет чуть более 0.2 от расстояния между кратерами. Следовательно, величина расстояния между горой и терминатором S составляет примерно 70 км.

Вершина горы освещается Солнцем, как показано на рисунке. Высота горы h мала по сравнению с радиусом Луны R , и для нее справедливо выражение:

$$h = \sqrt{R^2 + S^2} - R \approx \frac{S^2}{2R} = 1.4 \text{ км.}$$



Для оценки погрешности надо понять, что вносит наибольшую погрешность в измерения. Прежде всего, это неопределенность в проведении линии терминатора, которая для данного снимка может достигать 10 км. Подставляя в качестве величины S 60 и 80 км, получаем значение высоты горы 1.0 и 1.8 км. Соответственно, ошибка в определении высоты составит 0.4 км.



Ночь среди бела дня (О.С. Угольников)

Класс: **9 10** Задача: **3**

? В таблице приведены результаты измерений яркости фона неба в зените (звездные величины 1 квадратной секунды) перед началом и во время полной фазы солнечного затмения 1 августа 2008 года в Новосибирске. Приведены также значения фазы затмения и (для частных фаз) ослабления Солнца в звездных величинах. Пользуясь этими данными, сделайте вывод, является ли засветка от солнечной короны основным фактором, формирующим свечение неба во время полного солнечного затмения. Считать, что по своей яркости солнечная корона близка к полной Луне.

Время, UT	Яркость фона неба, m	Фаза затмения	Ослабление Солнца, m
10.40	7.14	0.935	3.93
10.41	7.39	0.952	4.36
10.42	7.83	0.969	4.99
10.43	8.09	0.986	6.17
10.44	12.55	1.003	—
10.45	12.40	1.019	—

Практический тур

! При условии стабильного состояния атмосферы, если весь фон неба определяется рассеянием света одного ярчайшего источника, у которого высота над горизонтом меняется мало, яркость фона должна быть пропорциональна яркости этого источника. Соответственно, звездная величина площадки неба должна меняться синхронно со звездной величиной источника. Разность одной и другой величины должна оставаться постоянной.

Очевидно, что ясным солнечным днем, в том числе и во время частных фаз затмения, фон неба определяется свечением самого Солнца. За 5 минут, в ходе которых проводились измерения, высота Солнца над горизонтом существенно не изменилась. Для проверки гипотезы о вкладе свечения солнечной короны в фон неба составим таблицу, в которую занесем звездную величину источника (частично затмившегося Солнца или солнечной короны), звездную величину одной квадратной секунды неба и разность обеих величин. Если эта разность с началом полной фазы не изменится, значит, вклад свечения короны в фон неба во время полной фазы столь же принципиален, как и для свечения Солнца днем.

Время, UT	Звездная величина Солнца/короны	Яркость фона неба, m	Разность, m
10.40	-22.85	7.14	29.99
10.41	-22.42	7.39	29.81
10.42	-21.79	7.83	29.62
10.43	-20.61	8.09	28.70
10.44	-12.7	12.55	25.25
10.45	-12.7	12.40	25.1

Мы видим, что с началом полной фазы разность двух величин достаточно резко уменьшается. Если бы фон неба создавался рассеянием свечения короны, он был бы примерно на 4-5^m слабее. Следовательно, вклад свечения короны не является определяющим. В этом можно убедиться еще и потому, что солнечная корона не так резко выделяется на фоне неба во время затмения, как, к примеру, полная Луна на ночном небе. Свечение неба во время затмения создается, прежде всего, многократным рассеянием (диффузией) света из областей, не попадающих в тень Луны в данный момент. Этот же свет создает явление "заревое кольцо".

Автор задания выражает благодарность Е.Ю. Цимеринову (проект Meteoweb.ru) за предоставление данных измерений фона неба во время солнечного затмения.



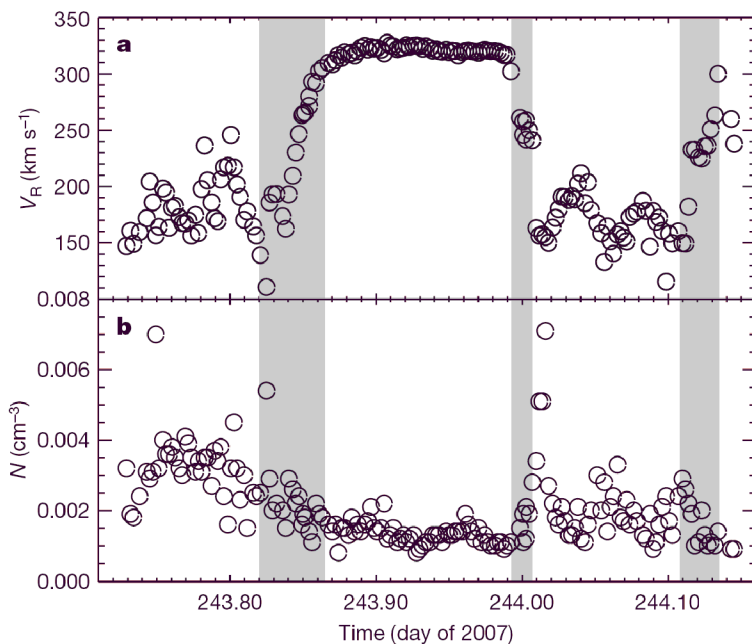
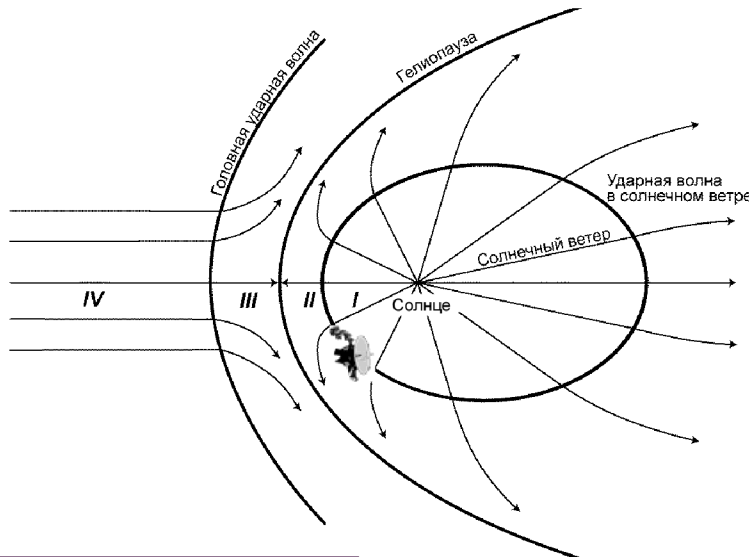
Вояджер 2 (Е.Н. Фадеев)

Класс: **10 11**

Задача: **1**

? Космический аппарат Вояджер 2 в августе 2007 года пересек ударную волну в солнечном ветре на границе гелиосферы. Схема гелиосферы показана на рисунке. Момент прохождения сквозь ударную волну характеризовался резкой сменой характеристик солнечного ветра: плотности, скорости, температуры. Вам предоставлен график изменения скорости и плотности солнечного ветра. Серым цветом показаны участки пересечения ударной волны. На втором графике показано изменение скорости солнечного ветра на большем масштабе времени: в самой левой части Вояджер 2 всё еще находился в области невозмущенного солнечного ветра, в самой правой части — окончательно прошел ударную волну.

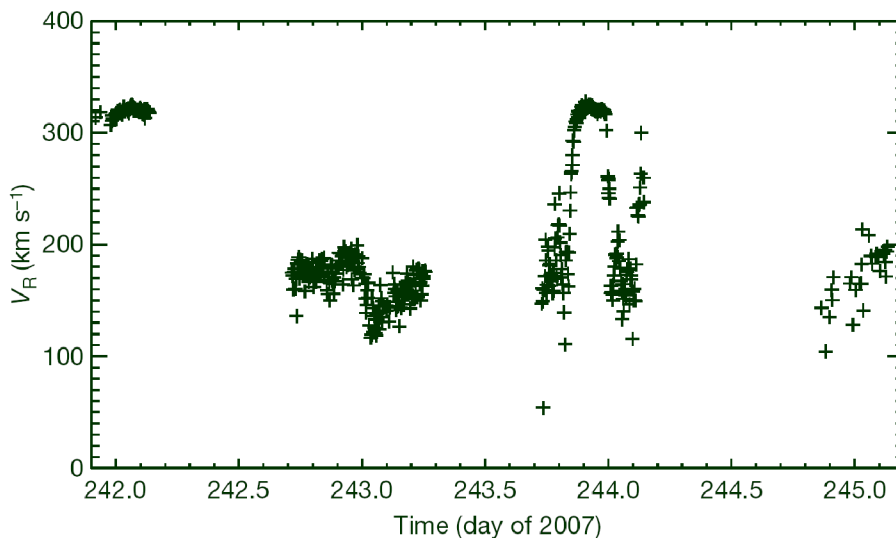
Объясните, почему было зарегистрировано несколько участков пересечения ударной волны. Оцените толщину зоны, в которой можно встретиться с ударной волной. Оцените толщину ударной волны. Гелиоцентрическая скорость Вояджера 2 — 3.3 а.е. в год.



! Расстояние до ударной волны определяется скоростью и плотностью потока как межзвездного газа, так и солнечного ветра. Поскольку эти величины не строго постоянны, ударная волна колеблется около своего среднего положения. Этим и объясняется повторные входы и выходы в область пространства, называемую в английской литературе *heliosheath*

(примерный русский термин — "оболочка гелиосферы").

Практический тур



К сожалению, сеанс связи на интересующем участке прерывался трижды. Верхняя оценка толщины зоны перехода между двумя областями — 2.7 дня, она соответствует интервалу от конца последнего сеанса, до которого аппарат постоянно пребывал во внутренней зоне (242.2 дня) до начала первого сеанса, после которого аппарат постоянно оставался во внешней зоне (244.9 дня). Двигаясь со скоростью 3.3 а.е. в год или 16 км/с, аппарат пролетел за это время 3.7 млн км. Минимальное время пролета зоны перехода составляет 1.5 дня (от начала сеанса, где Вояджер во внутренней зоне, 242.7 дня, до конца сеанса, в котором он переходит из одной зоны в другую, 244.2 дня). Это соответствует ее толщине 2 млн км. Таким образом, внутренняя ударная волна колеблется относительно точки равновесия на $1.0-1.8 \cdot 10^6$ км.

При каждом прохождении сквозь ударную волну относительная скорость аппарата и волны была разной. Из трех измеренных прохождений дважды ударная волна догоняла Вояджер, и однажды, вероятно, прошла ему на встречу. В первом и третьем случае ударная волна догоняла Вояджер 2, вследствие чего он двигался с неизвестной скоростью относительно ударной волны. Во втором случае неизвестно, в каком направлении двигалась ударная волна относительно Солнца. Вполне возможно, что Вояджер 2 догнал волну, медленно удаляющуюся от Солнца. Однако, можно предположить что в этом случае волна покоилась, или двигалась по направлению к Солнцу. Прохождение сквозь волну длилось примерно 0.015 дня, за которые Вояджер 2 прошел 20 тысяч км. Эту величину можно считать нижней оценкой на толщину ударной волны.



Балдж и звездное скопление (А.С. Расторгуев)

Класс: **11**

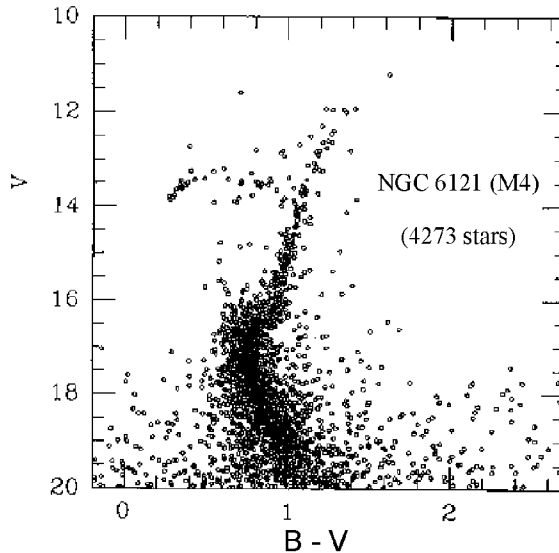
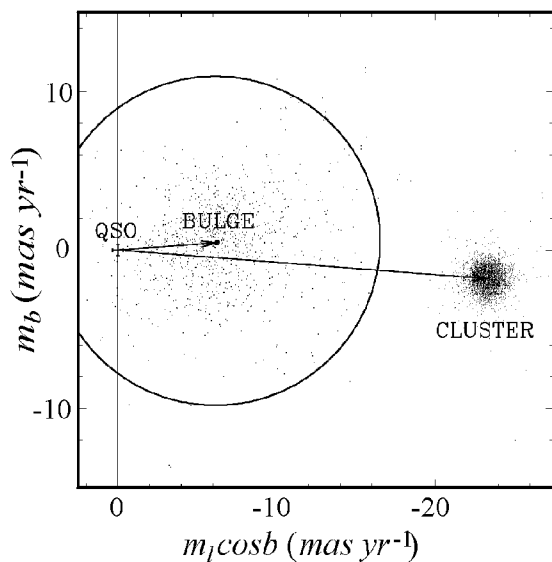
Задача: **2**

? На рисунке слева показана диаграмма собственных движений для звезд галактического балджа (центральной области Галактики) и шарового скопления М4 (NGC 6121), измеренных относительно далекого квазара. По горизонтальной оси отложено собственное движение вдоль галактической долготы (отсчитываемой в плоскости Галактики), а по вертикальной оси — собственное движение по галактической широте (в направлении, перпендикулярном к плоскости Галактики). Собственные движения даны в единицах 0.001 угловой секунды в год. Измерения собственных движений проводились с помощью Космического телескопа им. Хаббла.

На рисунке справа показана диаграмма "цвет — величина" $V-(B-V)$ для шарового скопления М4. Шаровое скопление находится на небе недалеко от центра Галактики.

Исходя из известной скорости вращения Галактики на расстоянии Солнца (220 км/с), оцените расстояние до центра Галактики. В предположении равноправности всех направлений движения звезд балджа, определить характерную величину их пространственной скорости.

Оцените также полную пространственную скорость шарового скопления М4 в Галактике, если его лучевая скорость равна +70 км/с. Для простоты можно считать, что скопление находится на луче зрения, соединяющем Солнце и центральную область Галактики (балдж).



! Для начала вспомним, что квазары являются очень далекими внегалактическими объектами (активными ядрами галактик), фактически задающими современную астрономическую систему отсчета, близкую к лабораторной. Это означает, что система отсчета практически не обладает собственным вращением, и видимое смещение звезд и звездных скоплений относительно квазаров (собственное движение) есть

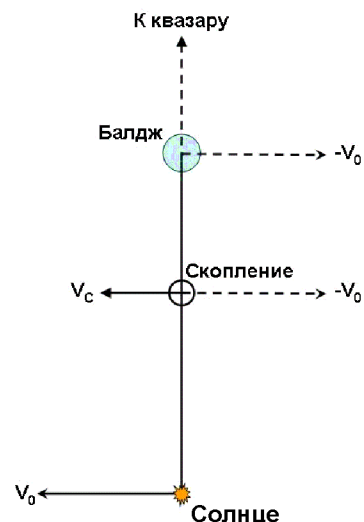
Практический тур

проявление их абсолютных пространственных движений, спроектированных на небесную сферу.

Вспомним также, что измерения собственных движений звезд и звездных скоплений проводятся наблюдателем, движущимся в Галактике вместе с Солнцем. Поэтому смещение звезд балджа относительно квазара является простым отражением солнечного движения со скоростью около V_0 , составляющей 220 км/с и направленной в сторону вращения Галактики. Более того, в собственных движениях всех объектов Галактики (включая указанное в условии шаровое скопление) также содержится "отраженная" компонента, равная по величине и направленная противоположно скорости Солнца V_0 .

Приводимый рисунок иллюстрирует движение объектов относительно Солнца в проекции на плоскость Галактики. В нем учтено, что скопление М4 находится практически на луче зрения, соединяющем Солнце с центральной областью Галактики (балджем).

Штриховыми стрелками показано отраженное движение Солнца в скоростях объектов (балджа и скопления). Пусть V_C есть скорость шарового скопления поперек луча зрения (будем считать ее положительной, если скопление движется в ту же сторону, что и Солнце в Галактике). Обозначим через R_0 расстояние от Солнца до центра Галактики (оно же — среднее расстояние до звезд балджа), а через d — расстояние от Солнца до шарового скопления.



Обозначим также через μ_B и μ_C компоненты среднего собственного движения звезд балджа и скопления соответственно относительно квазара, измеренные в направлении галактической долготы (параллельно горизонтальной оси). Из рисунка следует, что собственные движения μ_B и μ_C составляют 6 mas/год и 23.5 mas/год соответственно (mas обозначает угловую меру, равную миллисекунде дуги). Собственные движения представляют собой угловые скорости объектов, вычисленные относительно Солнца.

Теперь, очевидно, мы можем оценить расстояние до центра Галактики из выражения для среднего собственного движения звезд балджа:

$$\mu_B = V_0/R_0 \quad (1).$$

Аналогично вычисляется собственное движение скопления относительно квазара:

$$\mu_C = (V_0 - V_C)/d.$$

По их разности можно рассчитать один из компонентов пространственной скорости скопления (скорость вдоль галактической плоскости) V_C из выражения

$$\mu_C - \mu_B = (V_0 - V_C)/d - V_0/R_0,$$

откуда получаем

$$V_C = V_0(1 - d/R_0) - d(\mu_C - \mu_B) \quad (2).$$

XVI Всероссийская олимпиада школьников по астрономии

Для расчетов необходимо оценить расстояние до скопления d . Для этого используем приведенную на втором рисунке диаграмму "цвет-величина". На ней указаны видимые величины в фотометрической полосе V и наблюдаемые цвета ($B-V$). Оценку видимого модуля расстояния ($V-M_V$) можно выполнить тремя способами:

(а) По звездам горизонтальной ветви, абсолютная величина которых близка к $M_V(\text{HB}) \sim +1^m$. Согласно рисунку, их видимая величина приблизительно равна $V(\text{HB}) \sim +13.5^m$. Следовательно,

$$(V-M_V)_{\text{HB}} = 12.5^m.$$

(б) По ярчайшим звездам скопления – красным гигантам, абсолютная величина которых составляет примерно $M_V(\text{RG}) \sim -1^m$. К сожалению, на приведенной на рисунке диаграмме ГР виден всего 1 яркий красный гигант с $V(\text{RG}) = 11.2^m$. В итоге,

$$(V-M_V)_{\text{RG}} = 12.2^m.$$

(в) По звездам вблизи точки поворота от главной последовательности в область красных гигантов, светимость которых немного превышает солнечную и для большинства шаровых скоплений близка к $M_V(\text{TP}) \sim +4^m$. Согласно рисунку, их видимая величина составляет приблизительно $V(\text{TP}) \sim 17^m$. Следовательно,

$$(V-M_V)_{\text{TP}} = 13^m.$$

Разброс этих значений невелик, поэтому можно в качестве среднего из трех значений принять для видимого модуля расстояний величину $\langle V-M_V \rangle = 12.5^m$. К сожалению, величину межзвездного поглощения оценить сложно, однако можно вспомнить, что звезды в точке поворота (самые голубые звезды главной последовательности) в шаровых скоплениях должны иметь нормальный цвет (неискаженный поглощением) примерно

$$(B-V)_0 = 0.4^m,$$

откуда избыток цвета можно оценить как

$$E(B-V) = (B-V) - (B-V)_0 = 0.34^m,$$

а полную величину поглощения как

$$A_V = 3 E(B-V) = 0.9^m.$$

Расстояние до скопления оценим из полного выражения для видимого модуля расстояния:

$$\langle V-M_V \rangle = 5 \lg d(\text{пк}) - 5 + A_V.$$

Подставляя найденные величины, получаем оценку расстояния до скопления: 2 кпк. Полученная величина очень хорошо согласуется со значениям по каталогам. Если же влиянием поглощением пренебречь, расстояние оценивается в 3 кпк. Далее, из выражения (1) получаем

$$R_0 = (220 \text{ км/с}) / (6 \text{ мас/год}) = 7.6 \text{ кпк},$$

где было учтено учитывая, что 1 км/с соответствует 10^{-6} пк/год, а 1 мас – $4.85 \cdot 10^{-9}$ радиан. Подставляя найденные значения и исходно заданные величины в выражение (2), получим

Практический тур

$$V_C = 220 \text{ км/с} (1 - 2/7.6) - 2000 \text{ пк} (23.5 - 6) \text{ мас/год} \cdot 4.85 \cdot 10^{-3} = -8 \text{ км/с}.$$

На рисунке видно, что скопление имеет вертикальную скорость (собственное движение по галактической широте около 2 мас/год), которую можно оценить в

$$V_C(b) = d \mu_b = 2000 \text{ пк} \cdot 2 \text{ мас/год} \cdot 4.85 \cdot 10^{-3} = 19 \text{ км/с}$$

Следовательно, полная пространственная скорость скопления (с учетом лучевой скорости V_R) составляет приблизительно

$$V = \sqrt{V_C^2 + V_C(b)^2 + V_R^2} = 73 \text{ км/с}.$$

Наконец, ответим на вопрос о характерных скоростях звезд в балдже Галактики. Для этого рассмотрим рассеяние точек на первом рисунке, представляющих звезды балджа. На глаз среднее собственное движение звезд оценить сложно, однако видно, что максимальное собственное движение равно примерно 10 мас/год. Для нормального (Гауссового) распределения максимальное отклонение примерно втрое больше среднеквадратического (дисперсии), следовательно, в качестве характерного значения собственного движения можно взять 2-3 мас/год. Наблюдательные ошибки собственных движений не даны, поэтому ими придется пренебречь.

На расстоянии 7.6 кпк указанное собственное движение по одной координате соответствует линейной скорости около 70-110 км/с. Если все три пространственных направления равноправны, характерная пространственная скорость будет в $\sqrt{3}$ раза выше, т.е. около 120-190 км/с. Если ошибки измерений не учтены, то это будет, скорее всего, верхний предел характерных скоростей.



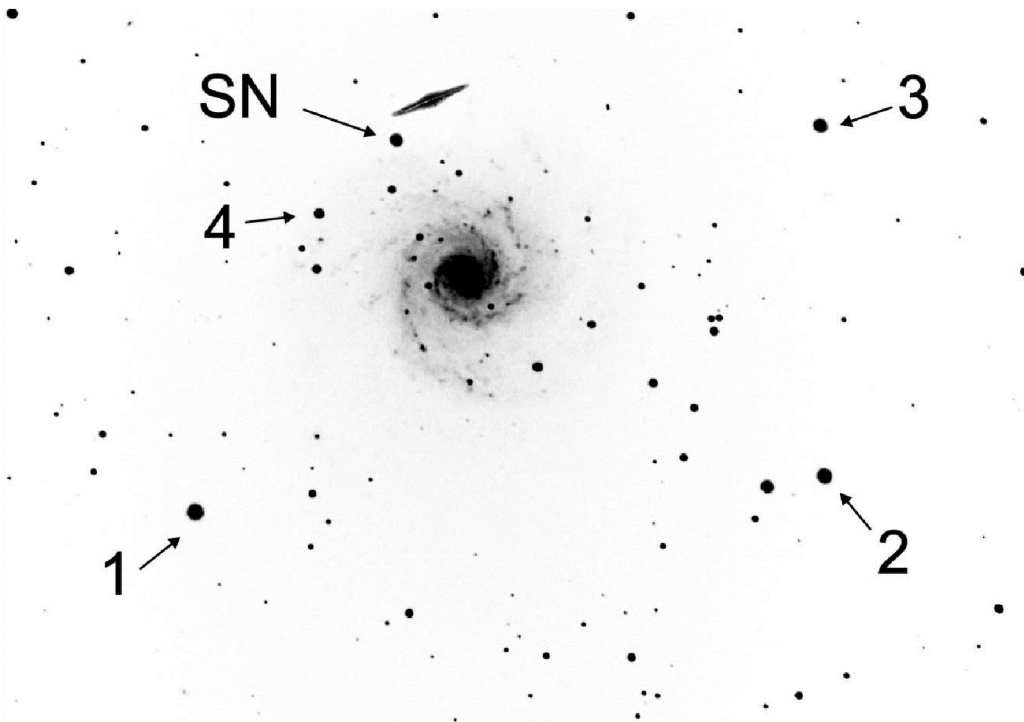
Далекая Сверхновая (А.А. Татарникова, А.М. Татарников)

Класс: **11**

Задача: **3**

? На рисунке (негатив, стр. 26) приведен снимок сверхновой II типа, полученный на фотопластинку в фильтре V (сверхновая отмечена стрелкой). На этом снимке цифрами от 1 до 4 обозначены фотометрические стандарты (координаты и блеск звезд даны в таблице). Определите пространственное расстояние между сверхновой и центром галактики, в которой она вспыхнула. Известно, что абсолютная звездная величина данной сверхновой равна -16^m .

№ звезды	m_V	α	δ
1	15.0	10h 30m 47.4s	18°09'41"
2	15.5	10h 30m 12.0s	18°10'12"
3	15.7	10h 30m 12.2s	18°15'10"
4	16.5	10h 30m 40.4s	18°13'54"



! Для начала необходимо выяснить, в какой из двух галактик, представленных на снимке, вспыхнула сверхновая. Речь идет о сверхновой II типа, предшественником которой является массивная молодая звезда, принадлежащая дисковой составляющей галактики. Следовательно, сверхновая не могла вспыхнуть в галактике, видимой с ребра, так как при этом она окажется очень далеко от галактической плоскости. Значит, она вспыхнула в спиральной галактике, запечатленной на снимке плашмя, причем на ее периферии, не проработавшейся на этом снимке. Искомое расстояние между сверхновой и центром галактики может послужить хорошей оценкой радиуса самой галактики.

Найдем сначала угловое расстояние α между звездой и центром галактики. Из рисунка можно получить, что оно составляет 0.45 от углового расстояния между звездами 2 и 3. Последнее, в свою очередь, равно $298''$, исходя из координат звезд. В итоге, сверхновая располагается в $2.25'$ от центра галактики.

Сравнивая размер изображения сверхновой звезды с размерами изображений звезд с известными величинами, оцениваем видимый блеск сверхновой: 16^m . Исходя из координат звезд, участок неба находится в созвездии Льва, вдали от Млечного Пути, и межзвездным поглощением можно пренебречь. Это позволяет найти расстояние до сверхновой и галактики в парсеках:

$$\lg r = 1 + \frac{m - M}{5}.$$

Расстояние до сверхновой получается равным 25 Мпк. При таких расстояниях еще не нужно учитывать космологические эффекты. Умножая его на угол α в радианной мере, получаем искомое расстояние между сверхновой и центром галактики: 16 кпк.