

(D1) Двойной пульсар

В результате систематических поисков в течение последних десятилетий астрономы обнаружили большое количество миллисекундных пульсаров (с периодом вращения вокруг своей оси < 10 миллисекунд). Большинство этих пульсаров обнаружены в двойных системах с круговыми орбитами.

Измерения периода вращения пульсара вокруг своей оси P и проекции ускорения на луч зрения a показали, что обе величины систематически изменяются из-за орбитального движения. Для круговых орбит изменения этих величин могут быть выражены через орбитальную фазу ϕ ($0 \leq \phi \leq 2\pi$):

$$P(\phi) = P_0 + P_t \cos\phi, \text{ где } P_t = \frac{2\pi P_0 r}{c P_B}$$

$$a(\phi) = -a_t \sin\phi, \text{ где } a_t = \frac{4\pi^2 r}{P_B^2}$$

где P_B – орбитальный период двойной, P_0 – собственный период вращения пульсара и r – радиус орбиты.

В таблице ниже приведены значения P и a в различные гелиоцентрические моменты времени T , выраженные в «урезанных» модифицированных юлианских днях (tMJD), т. е. в количестве дней, прошедших с MJD=2 440 000.

No.	T (tMJD)	P (микросек.)	a (м/с ²)
1	5740.654	7587.8889	- 0.92 ± 0.08
2	5740.703	7587.8334	- 0.24 ± 0.08
3	5746.100	7588.4100	- 1.68 ± 0.04
4	5746.675	7588.5810	+ 1.67 ± 0.06
5	5981.811	7587.8836	+ 0.72 ± 0.06
6	5983.932	7587.8552	- 0.44 ± 0.08
7	6005.893	7589.1029	+ 0.52 ± 0.08
8	6040.857	7589.1350	+ 0.00 ± 0.04
9	6335.904	7589.1358	+ 0.00 ± 0.02

Построив зависимость $a(\phi)$ от $P(\phi)$, получим параметрическую кривую. Как следует из соотношений выше, кривая зависимости «период-ускорение по лучу зрения» представляет собой эллипс.

В данной задаче нужно оценить собственный период вращения P_0 , орбитальный период системы P_B и радиус орбиты r с помощью анализа представленных данных в предположении круговых орбит.

(D1.1) Постройте данные (с указанием диапазона ошибок) в координатах «период-ускорение по лучу зрения». (Подпишите график как “D1.1”) 7

(D1.2) Аккуратно нарисуйте эллипс, наиболее точно аппроксимирующий данные. (На том же графике “D1.1”) 2

(D1.3) По графику оцените P_0 , P_t и a_t и их погрешности. 7

(D1.4) Выразите P_B и r через P_0 , P_t и a_t . 4

- (D1.5) Вычислите приближенные значения P_B , r и их погрешности, используя оценки, полученные в (D1.3). 6
- (D1.6) Вычислите орбитальные фазы ϕ , соответствующие 5 моментам наблюдений, указанным в строках 1, 4, 6, 8, 9 в таблице выше. 4
- (D1.7) Уточните оценку орбитального периода P_B , используя результаты из (D1.6), следующим образом:

- (D1.7.a) Определите начальный момент времени T_0 , соответствующий ближайшему моменту с нулевой фазой перед первым наблюдением. 2
- (D1.7.b) Ожидаемое время T_{calc} , соответствующее некоторой фазе ϕ , выражается формулой: 7

$$T_{calc} = T_0 + \left(n + \frac{\phi}{360^\circ} \right) P_B ,$$

где n – количество полных оборотов между T_0 и T (или T_{calc}).

Найдите n и T_{calc} для каждого из пяти наблюдений, указанных в (D1.6). Вычислите разность T_{O-C} между наблюдаемым T и вычисленным T_{calc} . Запишите все результаты в таблицу на бланке ответов (Summary Answersheet).

- (D1.7.c) Постройте график зависимости T_{calc} от n (подпишите график как “D1.7”). 4
- (D1.7.d) Определите уточнённые значения начального момента времени $T_{0,r}$ и орбитального периода $P_{B,r}$. 7

(D2) Расстояние до Луны

В таблице ниже Вам даны геоцентрические эфемериды Луны на сентябрь 2015 года. Положения Луны в каждую дату указаны на 00:00 UT.

Дата	α			δ			Угловой диаметр (θ) "	Фаза (ϕ)	Элонгация Луны
	h	m	s	°	'	"			
Сен 01	0	36	46.02	3	6	16.8	1991.2	0.927	148.6° З
Сен 02	1	33	51.34	7	32	26.1	1974.0	0.852	134.7° З
Сен 03	2	30	45.03	11	25	31.1	1950.7	0.759	121.1° З
Сен 04	3	27	28.48	14	32	4.3	1923.9	0.655	107.9° З
Сен 05	4	23	52.28	16	43	18.2	1896.3	0.546	95.2° З
Сен 06	5	19	37.25	17	55	4.4	1869.8	0.438	82.8° З
Сен 07	6	14	19.23	18	7	26.6	1845.5	0.336	70.7° З
Сен 08	7	7	35.58	17	23	55.6	1824.3	0.243	59.0° З
Сен 09	7	59	11.04	15	50	33.0	1806.5	0.163	47.5° З
Сен 10	8	49	0.93	13	34	55.6	1792.0	0.097	36.2° З
Сен 11	9	37	11.42	10	45	27.7	1780.6	0.047	25.1° З
Сен 12	10	23	57.77	7	30	47.7	1772.2	0.015	14.1° З
Сен 13	11	9	41.86	3	59	28.8	1766.5	0.001	3.3° З
Сен 14	11	54	49.80	0	19	50.2	1763.7	0.005	7.8° В
Сен 15	12	39	50.01	-3	20	3.7	1763.8	0.026	18.6° В
Сен 16	13	25	11.64	-6	52	18.8	1767.0	0.065	29.5° В
Сен 17	14	11	23.13	-10	9	4.4	1773.8	0.120	40.4° В
Сен 18	14	58	50.47	-13	2	24.7	1784.6	0.189	51.4° В
Сен 19	15	47	54.94	-15	24	14.6	1799.6	0.270	62.5° В
Сен 20	16	38	50.31	-17	6	22.8	1819.1	0.363	73.9° В
Сен 21	17	31	40.04	-18	0	52.3	1843.0	0.463	85.6° В
Сен 22	18	26	15.63	-18	0	41.7	1870.6	0.567	97.6° В
Сен 23	19	22	17.51	-17	0	50.6	1900.9	0.672	110.0° В
Сен 24	20	19	19.45	-14	59	38.0	1931.9	0.772	122.8° В
Сен 25	21	16	55.43	-11	59	59.6	1961.1	0.861	136.2° В
Сен 26	22	14	46.33	-8	10	18.3	1985.5	0.933	150.0° В
Сен 27	23	12	43.63	-3	44	28.7	2002.0	0.981	164.0° В
Сен 28	0	10	48.32	0	58	58.2	2008.3	1.000	178.3° В
Сен 29	1	9	5.89	5	38	54.3	2003.6	0.988	167.4° З
Сен 30	2	7	39.02	9	54	16.1	1988.4	0.947	153.2° З

На коллаже¹ внизу сложены отдельные фотографии Луны, полученные в разное время в течение полного лунного затмения, которое произошло также в сентябре 2015 г. На каждом изображении прямая линия, соединяющая северный и южный край тени, проходит через центр кадра.

Считайте, что наблюдатель находится в центре Земли.



- (D2.1)** В сентябре 2015 апогей лунной орбиты был ближе всего к положению Луны в фазе 3
- New Moon (новолуния)
 - First Quarter (первой четверти)
 - Full Moon (полнолуния)
 - Third Quarter (последней четверти).

Отметьте галочкой верный ответ в бланке ответов (Summary Answersheet). Объяснений не требуется.

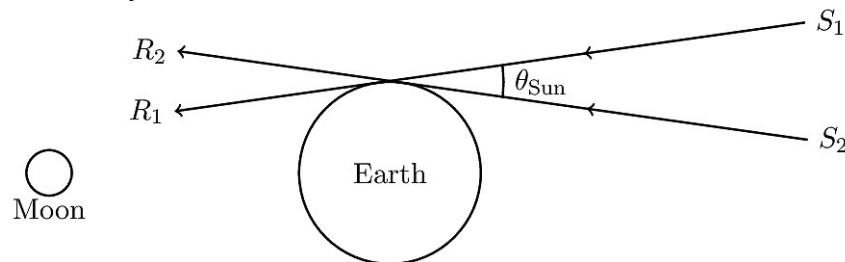
- (D2.2)** В сентябре 2015 восходящий узел лунной орбиты по отношению к эклиптике был ближе всего к положению Луны в фазе 4
- New Moon (новолуния)
 - First Quarter (первой четверти)
 - Full Moon (полнолуния)
 - Third Quarter (последней четверти).

Отметьте галочкой верный ответ в бланке ответов (Summary Answersheet). Объяснений не требуется.

- (D2.3)** Исходя из приведённых данных, оцените эксцентриситет (e) лунной орбиты. 4

- (D2.4)** Оцените угловой диаметр тени θ_{umbra} в единицах углового диаметра Луны θ_{Moon} . Выполните необходимые построения на обратной (BACK) стороне бланка ответов (Summary Answersheet). 8

- (D2.5)** Известно, что в день лунного затмения угловой диаметр Солнца был равен $\theta_{Sun} = 1915.0''$. На рисунке (не в масштабе) внизу S_1R_1 и S_2R_2 — лучи, идущие от противоположных краёв солнечного диска. 9



Вычислите угловой диаметр полутени $\theta_{penumbra}$ в единицах углового диаметра Луны θ_{Moon} . Считайте, что наблюдатель находится в центре Земли. 5

- (D2.6)** Пусть θ_{Earth} — угловой диаметр Земли при наблюдении из центра Луны. Вычислите угловой диаметр Луны θ_{Moon} в день затмения при наблюдении из центра Земли в единицах углового диаметра Земли θ_{Earth} .

- (D2.7)** Оцените радиус Луны R_{Moon} в километрах, используя результаты, полученные ранее. 3

- (D2.8)** Оцените наименьшее $r_{perigee}$ и наибольшее r_{apogee} расстояния до Луны. 4

- (D2.9)** Используя приведённые данные оцените расстояние d_{Sun} от Земли до Солнца 10 сентября. 10

(D3) Сверхновая типа Ia

Кривые блеска всех сверхновых Ia при подходящем масштабировании могут быть подогнаны к единой модельной кривой блеска. Для того, чтобы добиться этого, мы должны сначала привести кривые блеска в систему отсчёта галактики, принимая во внимание космологическое растяжение всех наблюдаемых временных интервалов, Δt_{obs} , с коэффициентом $(1 + z)$. Интервал времени в системе отсчёта галактики обозначается Δt_{gal} .

В системе отсчёта галактики блеск сверхновой изменяется на две звездные величины по сравнению с максимумом за время Δt_0 после него. Если далее промасштабировать интервалы времени с коэффициентом s (т.е. $\Delta t_s = s\Delta t_{\text{gal}}$) таким образом, что новое значение Δt_0 становится одинаковым для всех сверхновых, то кривые блеска будут иметь одинаковую форму. Кроме того, оказывается, что величина s линейно связана с абсолютной звездной величиной M_{peak} в максимуме яркости сверхновой. То есть, мы можем записать:

$$s = a + bM_{\text{peak}},$$

где a и b – некоторые константы. Зная коэффициент масштабирования, можно определить абсолютные звездные величины сверхновых на неизвестных расстояниях.

В таблице ниже приведены следующие данные для трех сверхновых: модуль расстояния μ (для двух из них), скорость удаления cz , видимая звездная величина m_{obs} , для разных моментов времени. Время $\Delta t_{\text{obs}} \equiv t - t_{\text{peak}}$ показывает количество дней от той даты, когда соответствующая сверхновая достигла максимума яркости. Наблюдаемые величины уже исправлены за межзвездное и атмосферное поглощения.

Название	SN2006TD	SN2006IS	SN2005LZ
μ (зв.вел.)	34.27	35.64	
cz (км/с)	4515	9426	12060
Δt_{obs} (сутки)	m_{obs} (зв.вел.)	m_{obs} (зв.вел.)	m_{obs} (зв.вел.)
-15.00	19.41	18.35	20.18
-10.00	17.48	17.26	18.79
-5.00	16.12	16.42	17.85
0.00	15.74	16.17	17.58
5.00	16.06	16.41	17.72
10.00	16.72	16.82	18.24
15.00	17.53	17.37	18.98
20.00	18.08	17.91	19.62
25.00	18.43	18.39	20.16
30.00	18.64	18.73	20.48

- (D3.1) Вычислите значения Δt_{gal} для всех трех сверхновых и запишите их в соответствующих пустых полях в таблицах данных на обратной (BACK) стороне бланка ответов. На миллиметровой бумаге отметьте точки и нарисуйте кривые блеска, относящиеся к системе отсчёта галактики, на одном графике (подпишите график как "D3.1"). 15
- (D3.2) Пусть коэффициент масштабирования s_2 для сверхновой SN2006IS равен 1.00. Вычислите коэффициенты масштабирования, s_1 и s_3 , для сверхновых SN2006TD и SN2005LZ, соответственно, посчитав для них Δt_0 . 5
- (D3.3) Рассчитайте Δt_s для всех трех сверхновых. Запишите значения Δt_s в тех же таблицах данных в Бланке Ответов. На другой миллиметровой бумаге, отметьте точки и нарисуйте три кривые блеска, для того чтобы показать, что они теперь имеют одинаковый профиль (подпишите график, как "D3.3"). 14
- (D3.4) Рассчитайте абсолютные звездные величины в максимуме блеска $M_{\text{peak},1}$ для SN2006TD и $M_{\text{peak},2}$ для SN2006IS. Используйте полученные значения для расчета коэффициентов a и b . 6

- (D3.5) Вычислите абсолютную звездную величину в максимуме блеска $M_{\text{peak},z}$ и модуль расстояния μ_z для SN2005LZ. 4
- (D3.6) Используя μ_z , оцените значение постоянной Хаббла H_0 . Далее оцените хаббловский возраст Вселенной T_H . 6