

## ИНСТРУКЦИЯ

1. Этот тест длится 5 часов. Вам заплатят 1.5 рубля.
2. Итоговые результаты выполнения пунктов заносите на **важный лист**. Укажите на нём код участника.
3. Для графиков используйте листы «График». На каждом листе укажите:
  - код участника,
  - номер задачи,
  - номер графика и полное их количество.
4. Для записей решений используйте **листы ответов**. На каждом листе укажите:
  - код участника,
  - номер задачи,
  - номер листа и полное их количество.
5. Каждую задачу начинайте с нового листа. **Не пишите на оборотной стороне листа.** Зачёркнутое не проверяется.
6. Постарайтесь помочь членам жюри понять вас. Используйте язык математики и короткие фразы на рунглише.
7. Покидать рабочее место без разрешения нельзя. Сигнализируйте о проблемах поднятием руки.
8. Громкие звуковые сигналы прозвучат в начале и конце теста, а также за 15 минут до его окончания.
9. По окончании теста прекратите писать. Нужные бумаги положите в одну стопку, ненужные — в другую. С собой не уносите.
10. Ожидайте, пока у вас не отберут работу и не выгонят из аудитории. Можете выдохнуть.
11. Таблицу констант смотрите на странице 2.

The data analysis competition lasts for 5 hours and is worth a total of 150 points.

Dedicated IOAA **Summary Answer Sheets** are provided for writing your answers. Enter the final answers into the appropriate boxes in the corresponding Summary Answer Sheet. On each Answer Sheet, please fill in

- Student Code

**Graph Paper** is required for your solutions. On each Graph Paper sheet, please fill in

- Student Code
- Question No
- Graph no. and total number of graph paper sheets used.

There are **Answer Sheets** for carrying out detailed work/rough work. On each Answer Sheet, please fill in

- Student Code
- Question No
- Page no. and total number of pages.

Start each problem on a separate Answer Sheet.

**Please write only on the printed side of the sheet. Do not use the reverse side.** If you have written something on any sheet which you do not want to be marked, cross it out.

Use as many mathematical expressions as you think may help the graders to better understand your solutions. The graders may not understand your language. If it is necessary to explain something in words, please use short phrases (if possible in English).

You are not allowed to leave your working desk without permission. If you need any assistance (malfunctioning calculator, need to visit a restroom, need more Answer Sheets, Graph Paper etc.), please put up your hand to signal the invigilator.

The beginning and end of the competition will be indicated by a long sound signal. Additionally, there will be a short sound signal fifteen minutes before the end of the competition (before the final long sound signal).

At the end of the competition you must stop writing immediately. **Sort and put your Summary Answer Sheets, Graph Papers, and Answer Sheets in one stack.** Put all other papers in another stack. You are not allowed to take any sheet of paper out of the examination area.

Wait at your table until your envelope is collected. Once all envelopes are collected, your student guide will escort you out of the competition room.

A list of constants is given on the next page.

## ТАБЛИЦА КОНСТАНТ

Масса	Mass	$M_{\oplus}$	$5.98 \times 10^{24}$ kg	<b>Земля</b>
Радиус	Radius	$R_{\oplus}$	$6.38 \times 10^6$ m	
Ускорение свободного падения	Acceleration of gravity	$g$	$9.81$ m s $^{-1}$	
Наклонение эклиптики	Obliquity of Ecliptic		$23^{\circ} 27'$	
Тропический год	Length of Tropic Year		365.2422 mean solar days	
Сидерический год	Length of Sidereal Day		365.2564 mean solar days	
Альбедо	Albedo		0.39	
Масса	Mass	$M_{\odot}$	$7.35 \times 10^{22}$ kg	<b>Луна</b>
Радиус	Radius	$R_{\odot}$	$1.74 \times 10^6$ m	
Среднее расстояние Земля–Луна	Mean Earth–Moon distance		$3.84 \times 10^8$ m	
Наклонение орбиты к эклиптике	Orbital inclination with the Ecliptic		$5.14^{\circ}$	
Альбедо	Albedo		0.14	
Видимая звёздная величина в среднее полнолуние	Apparent magnitude (mean full moon)		−12.74	
Масса	Mass	$M_{\odot}$	$1.99 \times 10^{30}$ kg	<b>Солнце</b>
Радиус	Radius	$R_{\odot}$	$6.96 \times 10^8$ m	
Светимость	Luminosity	$L_{\odot}$	$3.83 \times 10^{26}$ W	
Абсолютная звёздная величина	Absolute Magnitude		4.80	
Температура поверхности	Surface Temperature		5772 K	
Видимый угловой диаметр на Земле	Angular diameter at Earth		$30'$	
Орбитальная скорость в Галактике	Orbital velocity in Galaxy		$220$ km s $^{-1}$	
Расстояние от центра Галактики	Distance from Galactic center		8.5 kpc	
Астрономическая единица		1 au	$1.50 \times 10^{11}$ m	
Парсек		1 pc	206265 au	
Гравитационная постоянная	Gravitational constant	$G$	$6.67 \times 10^{-11}$ N m $^2$ kg $^{-2}$	
Постоянная Планка	Planck constant	$h$	$6.62 \times 10^{-34}$ Js	
Постоянная Больцмана	Boltzmann constant	$k_B$	$1.38 \times 10^{-23}$ J K $^{-1}$	
Постоянная Стефана–Больцмана	Stefan–Boltzmann constant	$\sigma$	$5.67 \times 10^{-8}$ W m $^{-2}$ K $^{-4}$	
Постоянная Хаббла	Hubble constant	$H_0$	$67.8$ km s $^{-1}$ Mpc $^{-1}$	
Скорость света в вакууме	Speed of light in vacuum	$c$	299792458 m s $^{-1}$	
Магнитная постоянная	Magnetic Permeability of free space	$\mu_0$	$4\pi \times 10^{-7}$ H m $^{-1}$	
Янский	Jansky	1 Jy	$10^{-26}$ W m $^{-2}$ Hz $^{-1}$	

$$\Delta \log_{10} x = \frac{\Delta x}{x \ln 10}$$

## (D1) Пыль и молодые звёзды

75 баллов

В областях звездообразования межзвёздная пыль поглощает ультрафиолет (UV) и оптическое излучение и переизлучает в далёком инфракрасном диапазоне (FIR), на длинах волн  $10 \div 300 \text{ } \mu\text{m}$ .

1.1. В UV-спектр галактики наибольший вклад вносит молодое звёздное население, поэтому UV-светимость является индикатором темпа звездообразования (SFR) в галактике. Поскольку наблюдаемая UV-светимость сильно ослаблена пылью, во внегалактической астрономии используется индекс — *наклон UV континуума*  $\beta$ :

$$f_\lambda = Q \cdot \lambda^\beta,$$

где  $f_\lambda [\text{W m}^{-2} \text{ m}^{-1}]$  — плотность монохроматического потока излучения галактики на длине волны  $\lambda$ ; коэффициент  $Q$  задаёт некоторую нормировку.

D 1.1.1. Блеск в фотометрической системе AB определяется как

$$m_{\text{AB}} = -2.5 \log \frac{f_\nu}{3631 \text{ Jy}}.$$

Для типичной галактики AB-блеск в UV примерно постоянный. Чему равен **наклон UV-континуума** такой галактики? Используйте соотношение (6 копеек)

$$f_\nu \Delta\nu = f_\lambda \Delta\lambda.$$

D 1.1.2. В таблице 1 приведены результаты наблюдаемой FIR-фотометрии галактики CR7 на  $z = 6.60$ . Под заголовком **Figure 1 постройте график** зависимости AB-блеска галактики CR7  $m_{\text{AB}}$  от логарифма лабораторной длины волны. (12 копеек)

D 1.1.3. Вычислите разумными способами наклон UV-континуума галактики CR7, **проведите прямую** на Figure 1 и сравните с результатом части D 1.1.1.

Содержит ли CR7 больше пыли, чем галактика из D 1.1.1 — **ответьте YES или NO**.

Указание: выражите  $m_{\text{AB}}$  через длину волны  $\lambda$  и  $m_{1600}$ , где  $m_{1600}$  — это AB-блеск на  $\lambda_0 = 160 \text{ nm}$  ( $1600 \text{ \AA}$ ). (5 копеек)

As a by-product of the star-forming process in a galaxy, interstellar dust can significantly absorb stellar light in ultraviolet (UV) and optical bands, and then re-emit in far-infrared (FIR), which corresponds to a wavelength range of  $10 \div 300 \text{ } \mu\text{m}$ .

1.1. In the UV spectrum of a galaxy, the major contribution is from the light of the young stellar population generated in recent star-formation processes, thus the UV luminosity can act as a reliable tracer of the star-formation rate (SFR) of a galaxy. Since the observed UV luminosity is strongly affected by dust attenuation, extragalactic astronomers define an index called the *UV continuum slope* ( $\beta$ ) to quantify the shape of the UV continuum:

$$f_\lambda = Q \cdot \lambda^\beta,$$

where  $f_\lambda$  is the monochromatic flux of the galaxy at a given wavelength  $\lambda$  (in the unit of  $\text{W m}^{-3}$ ) and  $Q$  is a scaling constant.

(D1.1.1) (6 points) AB magnitude is a specific magnitude system. The AB magnitude is defined as:

$$m_{\text{AB}} = -2.5 \log \frac{f_\nu}{3631 \text{ Jy}}.$$

The AB magnitude of a typical galaxy is roughly constant in the UV band. What is the **UV continuum slope** of this kind of galaxy? Hint:

$$f_\nu \Delta\nu = f_\lambda \Delta\lambda.$$

(D1.1.2) (12 points) Table 1 presents the observed IR photometry results for a  $z = 6.60$  galaxy called CR7. Plot the AB magnitude of CR7 versus the logarithm of the rest-frame wavelength on graph paper and labelled as **Figure 1**.

(D1.1.3) (5 points) Calculate CR7's UV slope, plot the best-fit UV continuum on Figure 1 and make a comparison with the results you obtained in (D1.1.1). Is it dustier than the typical galaxy in (D1.1.1)?

**Please answer with [YES] or [NO].**

Hint: Express  $m_{\text{AB}}$  as a function of  $\lambda$  and  $m_{1600}$ , where  $m_{1600}$  is the AB magnitude at  $\lambda_0 = 160 \text{ nm}$  ( $1600 \text{ \AA}$ ).

Таблица 1. Наблюдаемая FIR-фотометрия галактики CR7 ( $z = 6.60$ )

Полоса	$Y$	$J$	$H$	$K$
Центр ( $\mu\text{m}$ )	1.05	1.25	1.65	2.15
$m_{\text{AB}}$	$24.71 \pm 0.11$	$24.63 \pm 0.13$	$25.08 \pm 0.14$	$25.15 \pm 0.15$

1.2. В предположении, что пылинки поглощают энергию в UV и переизлучают её чернотельно, соотношение между наклоном UV-континуума  $\beta$ , потоком в UV на длине волны 1600 Å и потоком в FIR выглядит так:

$$\text{IRX} \equiv \log \frac{F_{\text{FIR}}}{F_{1600}} = S(\beta),$$

где  $F_{\text{FIR}}$  — наблюдаемый поток в FIR,  $F_{1600}$  — на «лабораторных» 160 nm (1600 Å). Здесь поток  $F_\lambda$  определяется как  $F_\lambda = \lambda f_\lambda$ . В таблице 2 представлены значения  $\beta$ ,  $F_{\text{FIR}}$  и  $F_{1600}$  для 20 близких галактик.

1.2. Under the assumption that dust grains in the galaxy absorb the energy of UV photons and re-emit it by blackbody radiation, the relation between the UV continuum slope ( $\beta$ ), UV brightness (at 1600 Å) and FIR brightness could be established:

where  $F_{\text{FIR}}$  is the observed far-infrared flux and  $F_{1600}$  is the observed flux at rest-frame wavelength 160 nm (1600 Å) (The “flux”  $F_\lambda$  is **defined** as  $F_\lambda = \lambda \cdot f_\lambda$ ). Table 2 presents 20 measurements of  $\beta$ ,  $F_{\text{FIR}}$  and  $F_{1600}$  in nearby galaxies (Meurer et al. 1999).

Таблица 2. Сведения о 20 близких галактиках

Галактика	Наклон UV-континуума $\beta$	$\log \frac{F_{1600}}{10^{-3} \text{ W m}^{-2}}$	$\log \frac{F_{\text{FIR}}}{10^{-3} \text{ W m}^{-2}}$
NGC4861	-2.46	-9.89	-9.97
Mrk 153	-2.41	-10.37	-10.92
Tol 1924-416	-2.12	-10.05	-10.17
UGC 9560	-2.02	-10.38	-10.41
NGC 3991	-1.91	-10.14	-9.80
Mrk 357	-1.80	-10.58	-10.37
Mrk 36	-1.72	-10.68	-10.94
NGC 4670	-1.65	-10.02	-9.85
NGC 3125	-1.49	-10.19	-9.64
UGC 3838	-1.41	-10.81	-10.55
NGC 7250	-1.33	-10.23	-9.77
NGC 7714	-1.23	-10.16	-9.32
NGC 3049	-1.14	-10.69	-9.84
NGC 3310	-1.05	-9.84	-8.83
NGC 2782	-0.90	-10.50	-9.33
NGC 1614	-0.76	-10.91	-8.84
NGC 6052	-0.72	-10.62	-9.48
NGC 3504	-0.56	-10.41	-8.96
NGC 4194	-0.26	-10.62	-8.99
NGC 3256	0.16	-10.32	-8.44

D 1.2.1. Используя данные из таблицы 2, **постройте график IRX( $\beta$ )**, озаглавьте «Figure 2» и аппроксимируйте эту зависимость разумным способом. Полученное соотношение вида  $\text{IRX} = a \cdot \beta + b$  **укажите на том же листе.** (14 копеек)

D 1.2.2. Вычислите **дисперсию** IRX в единицах dex (единицы, в которых «измеряется»  $\log_{10}$ , например,  $\log 10^9 - \log 10^4 = 5$  dex). Для малограмотных — формула для вычисления: (6 копеек)

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (\Delta \text{IRX}_i)^2}{N - 1}} \text{ [dex]},$$

где  $\Delta \text{IRX}_i = \text{IRX}_{i,\text{obs}} - \text{IRX}_{i,\text{pred}}$  — разность величины наблюдаемой и вычисленной через аппроксимацию.

(D1.2.1) (14 points) Based on the data given in Table 2, plot the  $\text{IRX}-\beta$  diagram on graph paper and labelled as **Figure 2** and find a linear fit to the data. **Write down** your best-fit equation (i. e.  $\text{IRX} = a \cdot \beta + b$ ) by the side of your diagram.

(D1.2.2) (6 points) Quantify the **dispersion** (in units of dex,  $\text{dex } x = 10^x$ ; for example,  $\log 10^9 - \log 10^4 = 5$  dex) between the predicted  $\text{IRX}_{\text{obs}}$  and expected  $\text{IRX}_{\text{pred}}$  using the following equation:

where  $\Delta \text{IRX}_i = \text{IRX}_{i,\text{obs}} - \text{IRX}_{i,\text{pred}}$ .

1.3. В рамках той же физической модели

1.3. Under the previous assumption of the energy transfer process, the ratio of  $F_{\text{FIR}}$  to  $F_{1600}$  can be expressed as:

$$\frac{F_{\text{FIR}}}{F_{1600}} \approx 10^{0.4A_{1600}} - 1,$$

где  $F_{1600}$  — поток до поглощения, а  $A_{\lambda}$  — поглощение на длине волны  $\lambda$  (в звёздных величинах).

where  $F_{1600}$  is the unattenuated flux and  $A_{\lambda}$  is the dust absorption (in magnitudes) as a function of wavelength  $\lambda$ .

D 1.3.1. Выразите  $A_{1600}$  через IRX. (6 копеек)

(D1.3.1) (6 points) Express  $A_{1600}$  as a function of IRX.

D 1.3.2. По данным таблицы 2 и зависимости  $A_{1600}(\text{IRX})$  постройте график  $A_{1600}(\beta)$ , озаглавьте «Figure 3» и аппроксимируйте эту линейную зависимость разумным способом. Полученное соотношение вида  $A_{1600} = a' \cdot \beta + b'$  укажите на том же листе. (12 копеек)

(D1.3.2) (12 points) Based on Table 2 data and the function of  $A_{1600}(\text{IRX})$  you derived above, plot the  $A_{1600}-\beta$  diagram on graph paper and label it as **Figure 3** and find a linear fit to the data. Write down your best-fit equation (i.e.  $A_{1600} = a' \cdot \beta + b'$ ) by the side of your diagram.

D 1.3.3. Каков ожидаемый наклон UV-континуума  $\beta_0$  в галактике без пыли? (2 копейки)

(D1.3.3) (2 points) If your linear model in (D1.3.2) is correct, what is the expected **UV continuum slope**  $\beta_0$  of a dust-free galaxy?

## (D2) Компактный объект в двойной системе

75 баллов

В ходе эксперимента APOGEE астрономы обнаружили необычную двойную систему в созвездии Возничего. Воспроизвести их открытие нетрудно, и глупо упускать такую возможность.

Для поиска компактных объектов в двойных системах используется метод лучевых скоростей (RV). Сначала по спектрам «одиночных» звёзд были определены их лучевые скорости. Среди двух сотен звёзд с наибольшими изменениями лучевых скоростей были выделены те, периодические вариации блеска которых по данным ASAS-SN максимальны, — кандидаты на транзиты, эллипсоидальную переменность или звёздные пятна. В результате была выделена звезда 2M05215658+4359220 с наибольшими колебаниями лучевой скорости и блеска.

2.1. В таблице 3 приведены три спектроскопических измерения лучевой скорости звезды 2M05215658+4359220 проекта APOGEE. Предполагается, что изменение её лучевой скорости происходит из-за наличия невидимого компаньона. Собственным движением системы будем пренебречь.

Таблица 3. Лучевая скорость RV (по APOGEE)

№	MJD	RV ( $\text{km s}^{-1}$ )
1	56204.9537	$-37.417 \pm 0.011$
2	56229.9213	$34.846 \pm 0.010$
3	56233.8732	$42.567 \pm 0.010$

D 2.1.1. В линейном приближении оцените наблюдаемое **максимальное ускорение** звезды: (6 копеек)

$$a_{\max} = \frac{\Delta \text{RV}}{\Delta t} \Big|_{\max} \quad [\text{km s}^{-1} \text{ day}^{-1}]$$

D 2.1.2. Оцените **массу** невидимого компонента в массах Солнца. Это будет нашей начальной оценкой. (9 копеек)

Astronomers discovered an extraordinary binary system in the constellation of Auriga during the course of the Apache Point Observatory Galactic Evolution Experiment (APOGEE). In these questions, you will try to analyse the data and recreate their discovery for yourself.

The research team is aiming to find compact stars in binary systems using the radial velocity (RV) technique. They examined archival APOGEE spectra of “single” stars and measured the apparent variation of their RV within this data. Among  $\sim 200$  stars with the highest accelerations, researchers searched for periodic photometric variations in data from the All-Sky Automated Survey for Supernovae (ASAS-SN) that might be indicative of transits, ellipsoidal variations or starspots. After this process, they spotted a star named 2M05215658+4359220, with a large variation in RV and photometric variability.

2.1. The following table presents the radial velocity measurements of 2M05215658+4359220 during three epochs of APOGEE spectroscopic observation. Here we assume the variation of its RV is due to the existence of an unseen companion. The proper motion of the stars can be ignored.

(D2.1.1) (6 points) Use the data and a simple linear model to obtain an initial estimate of the apparent **maximum acceleration** of the star:

(D2.1.2) (9 points) Now use the data to obtain an initial estimate of the mass of its unseen companion.

2.2. После открытия этой звезды были проведены дополнительные измерения на 1.5-метровом телескопе TRES — см. таблицу 4:

(D2.1.2) (9 points) After discovering this peculiar star, astronomers conducted follow-up observations using the 1.5-m Tillinghast Reflector Echelle Spectrograph (TRES) at the Fred Lawrence Whipple Observatory (FLWO) located on Mt. Hopkins in Arizona, USA. The following table presents the RV measurements using this instrument:

Таблица 4. Ещё измерения RV (по TRES)

MJD	RV ( $\text{km s}^{-1}$ )
58006.9760	$0.000 \pm 0.075$
58023.9823	$-43.313 \pm 0.075$
58039.9004	$-27.963 \pm 0.045$
58051.9851	$10.928 \pm 0.118$
58070.9964	$43.782 \pm 0.075$
58099.8073	$-30.033 \pm 0.054$
58106.9178	$-42.872 \pm 0.135$
58112.8188	$-44.863 \pm 0.088$
58123.7971	$-25.810 \pm 0.115$
58136.6004	$15.691 \pm 0.146$
58143.7844	$34.281 \pm 0.087$

D 2.2.1. Постройте график зависимости лучевых скоростей, измеренных на TRES, от времени. Озаглавьте его «Figure 4» и сгладьте гармонической функцией (проведите синусоидальную кривую). По графику определите орбитальный период  $P_{\text{orb}}$  и абсолютную величину амплитуды лучевой скорости  $K$ . (14 копеек)

(D2.2.1) (14 points) Plot the diagram of RV variation (measured with TRES) versus time on your graph paper and label it as Figure 4. Draw a suitable **sinusoidal function** to fit the given data. Estimate the orbital period ( $P_{\text{orb}}$ ) and radial velocity amplitude ( $K$ ) from your plot.

D 2.2.2. Считая, что звезда движется по круговой орбите, определите **минимальное возможное значение** орбитального радиуса  $r_{\text{orb}}$  звезды в единицах  $R_{\odot}$  и астрономических единицах (au). (4 копейки)

(D2.2.2) (4 points) If the star is moving in a circular orbit, calculate the **minimum value** of the orbital radius ( $r_{\text{orb}}$ ) of the star in units of both  $R_{\odot}$  and au.

D 2.2.3. Функция масс двойной системы задаётся как

(D2.2.3) (7 points) The mass function of a binary system is defined as:

$$f(M_1, M_2) = \frac{(M_2 \sin i_{\text{orb}})^3}{(M_1 + M_2)^2},$$

где индекс 1 соответствует главной звезде, а 2 — компаньону;  $i_{\text{orb}}$  — наклонение плоскости орбит к картинной плоскости. Вычислите **функцию масс этой системы**, ответ выразите в  $M_{\odot}$ . (7 копеек)

where the subscript “1” represents the primary star and “2” represents its companion. The parameter  $i_{\text{orb}}$  is the orbital inclination of the binary system. This mass function can also be expressed in terms of observable parameters. Calculate the **mass function of this system** in units of  $M_{\odot}$ .

2.3. По совокупности измерений APOGEE, TRES и GAIA были получены некоторые физические параметры звезды:

Таблица 5. Избранные сведения об этой звезде

Эффективная температура $T_{\text{eff}}$ (K)	Ускорение свободного падения на поверхности $\log \frac{g}{\text{cm s}^{-2}}$	Параллакс $\pi$ (mas)	Измеренная скорость осевого вращения $v_{\text{rot}} \sin i$ ( $\text{km s}^{-1}$ )	Болометрический поток $F$ ( $\text{W m}^{-2}$ )
$4890 \pm 130$	$2.2 \pm 0.1$	$0.272 \pm 0.049$	$14.1 \pm 0.6$	$(1.1 \pm 0.1) \times 10^{-12}$

Анализ кривой блеска показал, что периоды осевого и орбитального вращения звезды равны. Кроме того, равны соответствующие наклонения:

$$P_{\text{rot}} = P_{\text{orb}} \equiv P; \\ i_{\text{orb}} = i_{\text{rot}} \equiv i.$$

D 2.3.1. **Вычислите** синус угла наклонения  $\sin i$ , радиус  $R_1$  (в  $R_{\odot}$ ), светимость  $L_1$  (в  $L_{\odot}$ ), массу  $M_1$  (в  $M_{\odot}$ ) видимого компонента. **Оцените** погрешность полученных результатов. (16 копеек)

D 2.3.2. **Определите** тип звезды (укажите цифру):

- (1) голубой гигант
  - (2) жёлтая звезда главной последовательности
  - (3) красный гигант
  - (4) красная звезда главной последовательности
  - (5) белый карлик
- (4 копейки)

D 2.3.3. Используя функцию масс  $f(M_1, M_2)$ , **постройте график** зависимости  $M_2$  (по вертикали) от  $M_1$  (по горизонтали) под заголовком *Figure 5*.

Используйте полученную в части D 2.3.1 величину  $\sin i$  как соответствующую самой вероятной кривой  $M_2(M_1)$ , а также значения  $\sin i \pm \Delta \sin i$  как граничные. В итоге на вашем графике будет три кривых. (10 копеек)

D 2.3.4. На *Figure 5*:

две **вертикальными прямыми и штриховкой** выделите область  $[M_1 - \Delta M_1, M_1 + \Delta M_1]$ ;  
проведите две **горизонтальные пунктирные линии**, соответствующие предельным массам белых карликов и нейтронных звёзд.

Какой может быть масса невидимого компонента, и объектом какого типа он определённо является?  
(5 копеек)

2.3. Based on a detailed analysis on APOGEE, TRES spectra and GAIA parallax measurements, astronomers derived the following stellar parameters:

Photometric observations indicate that the period of its light curve is identical to its orbital period, thus we may assume that the rotation period and the inclination satisfy

(D2.3.1) (16 points) **Calculate** the luminosity ( $L_1$ , in unit of  $L_{\odot}$ ), radius ( $R_1$ , in unit of  $R_{\odot}$ ), sine of the inclination angle ( $\sin i$ ), as well as mass ( $M_1$ , in unit of  $M_{\odot}$ ) of the visible star. Please **include** the uncertainty in your results.

(D2.3.2) (4 points) **Choose** the correct type of this star from the following options:

- (1) Blue Giant
- (2) Yellow main sequence star
- (3) Red Giant
- (4) Red main sequence star
- (5) White Dwarf

(D2.3.3) (10 points) Based on the mass function  $f(M_1, M_2)$  of the binary system, **plot** the rough relationship of  $M_2$  (as vertical axis) and  $M_1$  (as horizontal axis) on your graph paper and label it as *Figure 5*. Plot the most probable relation (by using  $\sin i$ ), upper limit (with  $\sin i + \Delta \sin i$ ) and lower limit (with  $\sin i - \Delta \sin i$ ) derived in (D2.3.1).

(D2.3.4) (5 points) Draw a vertical **shaded region** of  $[M_1 - \Delta M_1, M_1 + \Delta M_1]$ , as well as two horizontal **dashed lines** showing the maximum mass of the white dwarf and neutron star, on your *Figure 5*. What is the possible mass of the invisible companion, and what kind of celestial object could it be?