



# Элементы астрофизики в КИМ проверялись

- линией заданий 24 на множественный выбор двух утверждений из пяти предложенных. В основной день предлагалось лишь три модели заданий:
- С заданиями с привлечением диаграммы Герцшпрунга – Рессела справляются в среднем 66% участников экзамена. При этом большинство успешно: сравнивает длительность «жизненного цикла» звезд различных спектральных классов главной последовательности; распознает по описаниям звезд их отношение к главной последовательности, красным гигантам или белым карликам; распознает различия в плотности красных гигантов, звезд главной последовательности и белых карликов.

# Затруднения вызывают утверждения

связанные с понятиями «светимость» и «абсолютная звездная величина». Например, к типичным ошибкам можно отнести выбор в качестве верных утверждений *«Чем выше температура звезды, тем больше ее светимость»* и *«Чем ниже температура поверхности звезды, тем меньше ее абсолютная звездная величина»*.

С заданиями на базе таблицы с характеристиками звезд (температура поверхности, масса, радиус, название созвездия, к которому относится звезда) справляются в среднем около 68% выпускников. Здесь затруднения были связаны с отнесением звезд по их характеристикам к *красным гигантам и сверхгигантам*.

Более трудными оказались задания с использованием таблицы с характеристиками звезд, в числе которых указывалась средняя плотность.

Средний процент выполнения этого задания – 58. Затруднение вызывает отнесение

звезд к *гигантам*, белым *карликам* и звездам главной последовательности по сравнению их плотностей. Кроме того, без подсказки в виде диаграммы Герцшпрунга – Рассела

*значительная часть участников экзамена затрудняется в определении спектрального класса звезды по температуре ее поверхности.*

# Надо знать наизусть

Класс	Цвет	
О	Голубой	>28
В	Бело-голубой	28–10
А	Белый	10–7
Г	Бело-жёлтый	7–6
Г	Жёлтый	6–5
К	Оранжевый	5–3,5
М	Оранжево-красный	3,5–2

# 5.4 ЭЛЕМЕНТЫ АСТРОФИЗИКИ

- 5.4.1 Солнечная система: планеты земной группы и планеты-гиганты, малые тела Солнечной системы.
- 5.4.2 Звёзды: разнообразие звёздных характеристик и их закономерности. Источники энергии звёзд.
- 5.4.3 Современные представления о происхождении и эволюции Солнца и звёзд.
- 5.4.4 Наша Галактика. Другие галактики. Пространственные масштабы наблюдаемой Вселенной.
- 5.4.5 Современные взгляды на строение и эволюцию Вселенной.

# Список принятых сокращений

- 1) ГП — главная последовательность.
- 2) БК — белый карлик.
- 3) СС — Солнечная система.
- 4) Пк, кпк — парсек, килопарсек.
- 5) а.е. — астрономическая единица.
- 6) — Солнце,  $\oplus$  — Земля.

# Список формул, которые надо знать наизусть

Объём шара:  $V_{\text{шара}} = \frac{4}{3}\pi R^3$

Первая космическая скорость:  $v_I = \sqrt{\frac{GM}{R}} = \sqrt{gR} = \frac{v_{II}}{\sqrt{2}}$

Вторая космическая скорость:  $v_{II} = \sqrt{\frac{2GM}{R}} = \sqrt{2gR} = \sqrt{2} \cdot v_I$

Ускорение свободного падения:  $g = \frac{GM}{R^2} = \frac{v_I^2}{R} = \frac{v_{II}^2}{2R}$

Закон Стефана-Больцмана:  $L = 4\pi R^2 \sigma T^4$  ( $L$  — светимость [Вт],  $\sigma$  — константа)

Достаточно знать, что светимость (количество энергии, излучаемое в единицу времени) пропорциональна площади поверхности (т.е. квадрату радиуса) звезды и четвёртой степени температуры, чтобы сравнивать светимости звёзд:

$$L \sim R^2 T^4.$$



# Список величин, которые надо знать наизусть

- Средние расстояния (большие полуоси орбит) от Земли до Солнца  $a_{з-с} = 1 \text{ а.е.} = 150 \text{ млн км}$
- от Земли до Луны  $a_{з-л} = 384 \text{ 000 км}$
- 2) Для Земли  $v_I = 8 \text{ км/с}$ ,  $v_{II} = 11 \text{ км/с}$ .
- Солнца:  $T = 6000 \text{ К}$ .

Размеры	
Земли	$R_{\oplus} = 6400 \text{ км}$
Луны,	$R_l = 1700 \text{ км}$
Солнца	$R = 700 \text{ 000 км}$ ,
диска Млечного пути	$R_{МП} = 100 \text{ 000 св. лет}$
Составители хотят (2018 г) «радиус Солнечной системы»	Чтобы, учащиеся считали равным 40 а.е.

Планета	Большая полуось, а. е.
Меркурий	0,4
Венера	0,7
Земля	1
Марс	1,5
Пояс астероидов	~1,5 – 3,5
Юпитер	5,2
Сатурн	10
Уран	19
Нептун	30
Пояс Койпера	~30 – 50

# Что изменилось

Из вопросов исчезла подсказка, что одна астрономическая единица — это 150 млн км.

Теперь это значение фигурирует в справочных данных.

- Любопытно образованный человек, на мой взгляд, из области астрономии должен иметь представление о смене сезонов, фазах Луны, календаре, солнечной системе, Галактике, Вселенной, наблюдаемых невооружённым глазом объектах и явлениях. Ничего этого детям не предлагают. Разве что в вопросе из ЕГЭ крайне коряво обыгрывается смена сезонов.

# Дана таблица планет

- с колонкой «Наклон оси вращения». Наклон, позовольте поинтересоваться, к чему? Предлагается согласиться или не согласиться с бессмысленной фразой «На Сатурне может наблюдаться смена времён года». Подразумевается, что может, так как наклон оси вращения Сатурна к нормали к плоскости его орбиты, согласно таблице, около  $26^\circ$ . Позорнее вопрос про смену времён года придумать сложно. Сатурн — газовый гигант, твёрдой поверхности солнечный свет не достигает, постоянные сильные ветры очень быстро перемещивают верхние слои атмосферы. Какие там времена года? Где?

# Выберите два утверждения

- , которые соответствуют характеристикам планет:
- 1) Среднее расстояние от Венеры до Солнца в три раза меньше, чем от Марса до Солнца.
- 2) Вторая космическая скорость при старте вблизи поверхности Юпитера составляет 25 км/с.
- 3) Ускорение свободного падения на Марсе составляет около  $3,7 \text{ м/с}^2$ .
- 4) Чем дальше планета от Солнца, тем больше первая космическая скорость для её спутников.
- 5) На Сатурне может наблюдаться смена времён года.

# Выберите два утверждения

- , которые соответствуют характеристикам планет:
- 1) Среднее расстояние от Юпитера до Солнца составляет 780 млн км.
- 2) Вторая космическая скорость при старте с поверхности Меркурия составляет 1,7 км/с.
- 3) Ускорение свободного падения на Венере составляет около  $8,9 \text{ м/с}^2$  .
- 4) Чем дальше планета от Солнца, тем больше её диаметр.
- 5) На Марсе НЕ может наблюдаться смена времён года.

# Не легче с вопросом

- «На Меркурии может наблюдаться смена времён года» (составители предполагают, что на Меркурии смены времён года быть не может). Наклон его оси (предположу, что всё-таки к нормали к плоскости орбиты, хотя про это в задании ни слова) очень близок к нулю[1]. Да, солнце почти не меняет высоту над горизонтом в течение года. Но, во-первых, у его орбиты значительный эксцентриситет, так что расстояние до Солнца меняется от 46 до 70 млн км, то есть поток от Солнца меняется в 2,3 раза! Во-вторых, у Меркурия за один оборот вокруг Солнца проходит только половина солнечных суток. Может быть, день и ночь на Меркурии следует считать причиной смены времён года?

# Боюсь,

- что в 2020-ом составители заинтересуются, меняются ли времена года на Венере (ось её тоже почти перпендикулярна плоскости орбиты). Вопрос в равной степени бессмысленный — атмосфера Венеры непрозрачна для солнечного света.



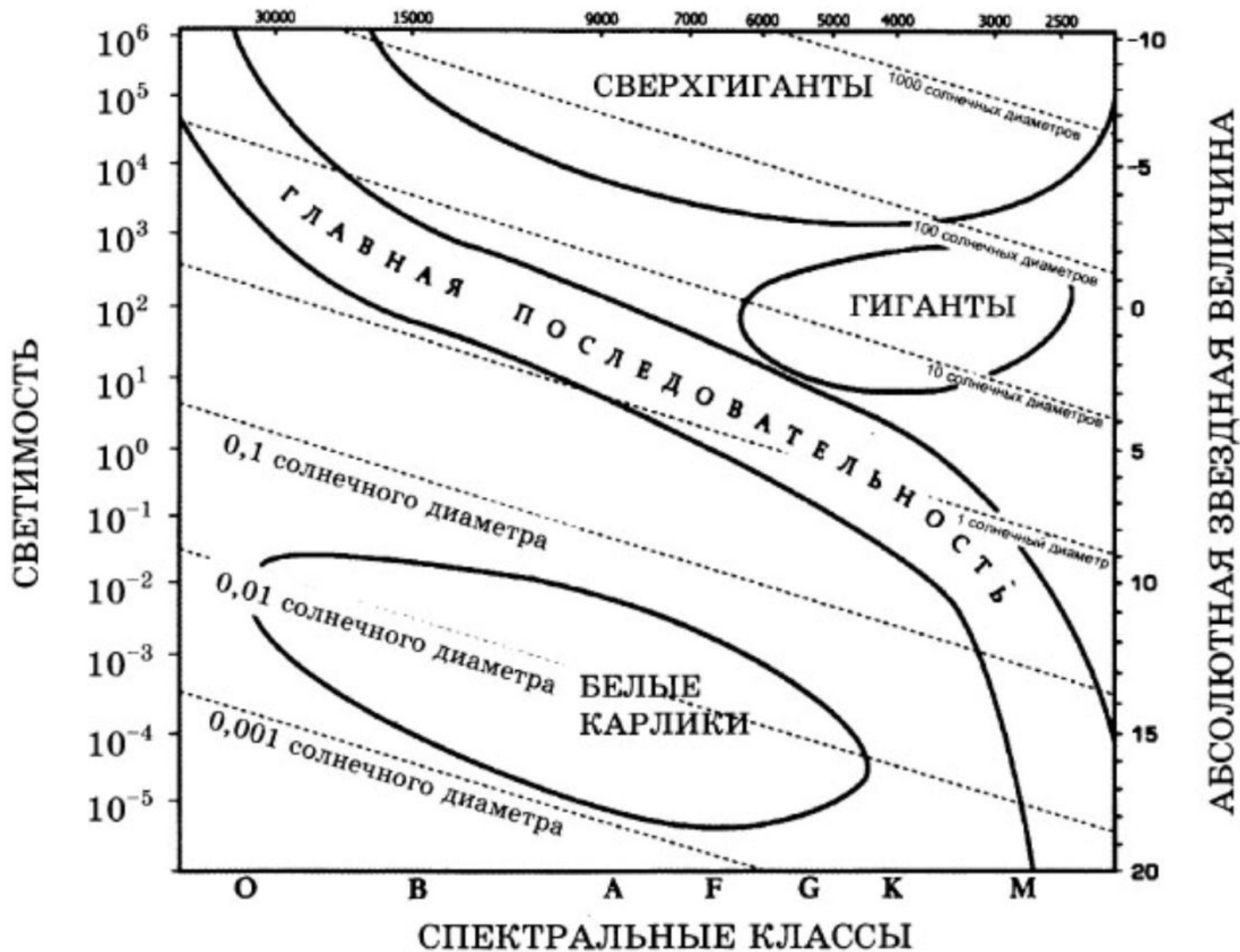
# Дана таблица планет с колонкой

- «Наклон оси вращения». Наклон, позвольте поинтересоваться, к чему? Предлагается согласиться или не согласиться с бессмысленной фразой «На Сатурне может наблюдаться смена времён года». Подразумевается, что может, так как наклон оси вращения Сатурна к нормали к плоскости его орбиты, согласно таблице, около  $26^\circ$ . Позорнее вопрос про смену времён года придумать сложно. Сатурн — газовый гигант, твёрдой поверхности солнечный свет не достигает, постоянные сильные ветры очень быстро перемешивают верхние слои атмосферы. Какие там времена года? Где?

# Про фазы Луны

- ни слова, а ведь 95% людей не понимает, почему они меняются. Гораздо полезнее абитуриентам будет вы зубрить перед экзаменом, разумеется, информацию про спектральные классы звёзд и подивиться на диаграмму Герцшпрунга-Рассела. Абсурд. Более того, картинка, которую они приводят в качестве таковой диаграммы, ужасна. *По осям (температура и светимость) не указаны единицы измерения.* И это второй год подряд. За такие ошибки снижают балл на проверке. *Область главной последовательности отмечена очень странной полосой, никогда в жизни не видел ничего подобного.*

# ТЕМПЕРАТУРА



# Представление о Солнечной системе

даётся в ужасающем виде. Есть вопрос, *где в таблице дан эксцентриситет ряда астероидов*. Далее прямо в вопросе идёт толкование этого параметра. И потом предлагается согласиться или не согласиться с фразой «*Астероид Аквитания вращается по более „вытянутой“ орбите, чем астероид Церера*». В вопросе для полной гармонии не хватает только слова «овал».

# Эксцентриситет орбиты определяется

- по формуле  $e = \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}}$ , где  $b$  — малая полуось,  $a$  — большая полуось орбиты.  $e = 0$  — окружность,  $0 < e < 1$  — эллипс. Выберите два утверждения, которые соответствуют характеристикам астероидов:
  - 1) Средняя плотность астероида Геба составляет  $400 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ .
  - 2) Орбита астероида Эвномия находится между орбитами Марса и Юпитера.
  - 3) Астероид Веста движется вокруг Солнца между орбитами Земли и Венеры.
  - 4) Астероид Паллада вращается по более «вытянутой» орбите, чем астероид Церера.
  - 5) Большие полуоси орбит астероидов Церера и Паллада одинаковы, следовательно, они движутся по одной орбите друг за другом.

- Также есть вопрос, требующий знания для формул первой и второй космической скоростей, объёма шара, ускорения свободного падения. Всё бы ничего, это знать и впрямь нужно, но делать расчёты с этими числами (не придуманными специально, в отличие от других заданий) крайне неприятно. Более того, оказывается, *что в большинстве тренировочных вариантов это зачастую единственный вопрос, где нужен калькулятор.* Большинство остальных заданий можно решить на бумаге или в уме благодаря хорошо подобранным значениям.

Выберите *два* утверждения, которые соответствуют характеристикам планет.

- 1) Масса Луны больше массы Ио.
- 2) Ускорение свободного падения на Тритоне примерно равно  $0,79 \text{ м/с}^2$ .
- 3) Сила притяжения Ио к Юпитеру больше, чем сила притяжения Европы.
- 4) Первая космическая скорость для Фобоса составляет примерно  $0,08 \text{ км/с}$ .
- 5) Период обращения Каллисто меньше периода обращения Европы вокруг Юпитера.

## Решение.

1) Масса небесного тела равна  $M = \rho V = \frac{4}{3}\pi\rho R^3$ . Поскольку и радиус, и средняя плотность Луны меньше, чем у Ио, масса Луны меньше массы Ио.

Утверждение 1 *неверно*.

2) Ускорение свободного падения на небесном теле  $g = G\frac{M}{R^2}$ , а вторая космическая скорость

$v_2 = \sqrt{2G\frac{M}{R}}$ , поэтому можно выразить  $g = \frac{v_2^2}{2R}$ . Ускорение свободного падения на Тритоне

$$g = \frac{1450^2}{2 \cdot 1350 \cdot 10^3} \approx 0,78 \text{ м/с}^2.$$

Утверждение 2 *верно*.

3) Сила притяжения двух небесных тел равна  $F = G\frac{Mm}{r^2}$ . Масса Ио больше массы Европы и Ио находится ближе к Юпитеру, значит, сила притяжения Ио к Юпитеру больше, чем сила притяжения Европы.

Утверждение 3 *верно*.

4) Первая космическая скорость в  $\sqrt{2}$  раз меньше второй. Первая космическая скорость для Фобоса  $\frac{11 \text{ м/с}}{\sqrt{2}} \approx 8 \text{ м/с} = 0,008 \text{ км/с}$ .

Утверждение 4 *неверно*.

5) Каллисто находится дальше от Юпитера, чем Европа, поэтому по третьему закону Кеплера период обращения Каллисто больше периода обращения Европы вокруг Юпитера.

Утверждение 5 *неверно*.



- Значения в таблицах, несмотря на очевидное улучшение по сравнению с прошлым годом, содержат большое количество ошибок. Скажем,
- *Альдебаран имеет массу около 1,2 солнечной, тогда как в таблице указано 5.*
- *Масса Ригеля завышена в два раза (40 против ~20 масс Солнца), радиус тоже почти в два раза. Откуда эти данные — непонятно.*

#### 4. Задание 24 № 9441

Используя таблицу, содержащую сведения о ярких звездах, выполните задание.

Наименование звезды	Температура, К	Масса (в массах Солнца)	Радиус (в радиусах Солнца)	Созвездие, в котором находится звезда
Капелла	5200	3	2,5	Возничий
Менкалинан (β Возничего А)	9350	2,7	2,4	Возничий
Денеб	8550	21	210	Лебедь
Садр	6500	12	255	Лебедь
Бетельгейзе	3100	20	900	Орион
Ригель	11 200	40	138	Орион
Альдебаран	3500	5	45	Телец
Эльнат	14 000	5	4,2	Телец

Выберите **два** утверждения, которые соответствуют характеристикам звезд.

- 1) Звезда Альдебаран является сверхгигантом.
- 2) Звезды Альдебаран и Эльнат имеют одинаковую массу, значит, они относятся к одному и тому же спектральному классу.
- 3) Звезда Бетельгейзе относится к красным звездам спектрального класса М.
- 4) Звезды Альдебаран и Эльнат относятся к одному созвездию, значит, находятся на одинаковом расстоянии от Солнца.
- 5) Температура на поверхности Солнца больше, чем температура на поверхности звезды Капелла.

## Решение.

1) Светимость звезды связана с её температурой и радиусом соотношением  $L = R^2 \left( \frac{T}{T_{\odot}} \right)^4$  (светимость и радиус выражены в единицах Солнца). Светимость Альдебарана  $L = 45^2 \left( \frac{3500}{6000} \right)^4 \approx 234$ . Его абсолютная звёздная величина  $M = 5 - 2,5 \lg L \approx -0,9$ . К сверхгигантам относят звёзды с абсолютной звёздной величиной от  $-5^m$  до  $-12^m$ . Альдебаран не является сверхгигантом. (По классификации он относится к нормальным гигантам.)

Утверждение 1 *неверно*.

2) Спектральный класс определяется спектром звезды. Он в первую очередь зависит от температуры звезды. Альдебаран и Эльнат имеют разную температуру и относятся к разным спектральным классам.

Утверждение 2 *неверно*.

3) Бетельгейзе, имея температуру 3100 К, относится к красным звёздам спектрального класса М.

Утверждение 3 *верно*.

4) Звёзды одного созвездия находятся на небольших *угловых расстояниях* друг от друга, при этом они могут находиться на существенно разных расстояниях от Солнца. (В астрономических справочниках указано, что Альдебаран находится на расстоянии 65 св. лет, а Эльнат — 130 св. лет от Солнца.)

Утверждение 4 *неверно*.

5) Температура на поверхности Солнца (6000 К) больше, чем температура на поверхности звезды Капелла (5200 К).

Утверждение 5 *верно*.

# Сверхгиганты — одни из самых массивных звёзд.

- На диаграмме Герцшпрунга — Рассела расположены в верхней части.
- В Йеркской классификации сверхгигантам соответствуют классы Ia (яркие сверхгиганты) и Ib (менее яркие сверхгиганты). Обычно полная (болометрическая) абсолютная звёздная величина сверхгиганта находится между  $-5m$  и  $-12m$ . Особо яркие сверхгиганты, ярче  $-8m$  часто классифицируются как гипергиганты.
- Массы сверхгигантов варьируются от 10 до 70 масс Солнца,
- *светимости — от 30 000 вплоть до сотен тысяч солнечных.*
- Радиусы могут сильно отличаться — от 30 до 500, а иногда и превышают 1000 солнечных, тогда их ещё можно называть гипергигантами.

## Задания

### Задания Д13 В24 № [9416](#)

Первый спутник планеты Юпитера — Ио обращается вокруг неё за 42 ч 28 мин на среднем расстоянии 421,8 тыс. км. С каким периодом обращается вокруг Юпитера его спутник Европа, большая полуось орбиты которого равна 671,1 тыс. км. Ответ дайте в часах с точностью до десятых.

**Решение.**

Для спутников, как и для планет, справедлив третий закон Кеплера (42 ч 28 мин  $\approx$  42,47 ч):

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{a_1^3}{a_2^3} \Leftrightarrow T_2 = T_1 \sqrt{\left(\frac{a_2}{a_1}\right)^3} = 42,47 \cdot \sqrt{\left(\frac{671,1}{421,8}\right)^3} \approx 85,2 \text{ ч.}$$

Ответ: 85,2

- У Луны вторая космическая скорость в вариантах номер 5, 6, 17, 18 дана 2400 м/с (правильно), а в вариантах 29, 30 — 2074 м/с (неправильно). Однако в 30 варианте нужно рассчитать первую космическую для Луны. И если взять правильное значение, то не сойдётся с неправильным 1,47 км/с, которое они предлагают вместо настоящих 1,68 км/с.

- Загадочно и происхождение данных про Капеллу. Это система из четырёх звёзд, две по массивнее из которых примерно равны по массе (2,5 солнечной массы). О какой из них идёт речь, если указана масса 3,3 солнечной? Радиусы этих компонент — около 9 и 12 солнечных. В задании предлагается 23 солнечных радиуса.

# Вывод

- Надо было очень постараться, чтобы вопрос по астрономии был самым неудачным в экзамене с большим отрывом. Кстати, можно ли простым смертным поинтересоваться, кто придумал добавить этот вопрос и выбрал темы? Принималось ли во внимание мнение ведущих астрономов и физиков, работающих в сфере образования?



# Любопытно,

- что в тренировочных вариантах от ФИПИ 2018 года наклон оси Меркурия к нормали его орбиты был дан ошибочно ( $28^\circ$  вместо нуля). В таблице 2018 года для этого вопроса **шесть из восьми** значений для наклона оси были даны неправильно. В этом году значения исправили.