

Корнеев Валерий Трофимович
Директор центра довузовской подготовки БГТУ им. В.Г. Шухова, старший преподаватель кафедры физики. Почётный работник высшего профессионального образования Российской Федерации.

ЕГЭ: Звёзды

Обратим внимание на изменения в задании 24 ЕГЭ: начиная с 2020 года, вместо выбора *двух* обязательных верных ответов предлагается выбор *всех верных* ответов, число которых может составлять либо 2, либо 3.

Чтобы избежать ненужных повторений, вначале приведём ряд заданий, а затем проведем «параллельный» разбор по темам. Это продиктовано неоднородным распределением вопросов: в одном и том же задании есть вопросы и по физике звезд, и по звездной астрономии, исследующей общие закономерности строения, состава, динамики и эволюции звёздных систем.

Кроме того, все справочные данные вынесены в начало статьи. Необходимо иметь ввиду, что в каждом из заданий ЕГЭ приводится только та таблица, номер которой указан в этом задании. Данные из других таблиц использовать не получится: на ЕГЭ их просто не будет «под руками».

1. Справочные данные

Таблица 1

Наименование звезды	Температура, К	Масса (в массах Солнца)	Радиус (в радиусах Солнца)	Расстояние до звезды, (св. год)
Альдебаран	3500	2,5	43	65
Альтаир	8000	1,7	1,7	17
Бетельгейзе	3600	15	1000	650
Вега	9600	2	3	25
Капелла	5200	3	12	42
Кастор	10400	2	2,5	50
Процион	6600	1,5	2	11
Спика	22000	11	8	260

Таблица 2

Наименование звезды	Температура, К	Масса (в массах Солнца)	Радиус (в радиусах Солнца)	Созвездие, в котором находится звезда
Капелла	5200	3	12	Возничий
Менкалинан (β Возничего А)	9350	2,7	2,4	Возничий
Денеб	8550	21	210	Лебедь
Садр	6500	12	255	Лебедь
Бетельгейзе	3600	15	1000	Орион
Ригель	11200	40	138	Орион
Альдебаран	3500	2,5	43	Телец
Эльнат	14000	5	4,2	Телец

Таблица 3

Наименование звезды	Температура, К	Масса (в массах Солнца)	Радиус (в радиусах Солнца)	Плотность по отношению к плотности воды
Альдебаран	3500	2,5	43	$7{,}7 \cdot 10^{-5}$
ε Возничего В	11000	10,2	3,5	0,33
Капелла	5200	3	12	$4 \cdot 10^{-4}$
Ригель	11200	40	138	$2 \cdot 10^{-5}$
Сириус А	9250	2,1	2,0	0,36
Сириус В	8200	1	210^{-2}	$1{,}75 \cdot 10^{6}$
Солнце	6000	1,0	1,0	1,4
α Центавра А	5730	1,02	1,2	0,80

Таблица 4

Наименование звезды	Собственное движение (сек./год)	Расстояние до звезды (пк)	Спектральный класс	Лучевая скорость[1] (км/с)
Звезда Барнарда	10,3	1,8	M	110
Звезда Каптейна	8,7	3,9	M	245
Грумбридж 1830	7,1	9,1	K	98
Лакайль 9352	6,9	3,3	M	8
HD 225213	6,1	4,3	M	25

[1] *Лучевой (или радиальной) скоростью называют проекцию вектора скорости звезды на луч зрения.*

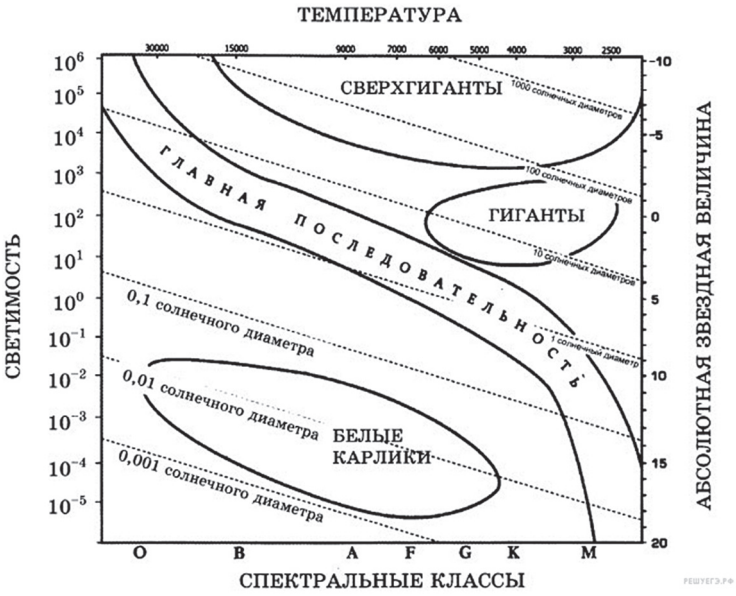


Рис. 1

2. Задания

Задание 1

Рассмотрите таблицу 1, содержащую сведения о ярких звёздах.

Выберите два утверждения, которые соответствуют характеристикам звёзд, и укажите их номера.

1) Температура поверхности и радиус Бетельгейзе говорят о том, что эта звезда относится к красным сверхгигантам.

2) Температура на поверхности Проциона в 2 раза ниже, чем на поверхности Солнца.

3) Звёзды Кастор и Капелла находятся на примерно одинаковом расстоянии от Земли и, следовательно, относятся к одному созвездию.

4) Звезда Вега относится к белым звёздам спектрального класса A.

5) Так как массы звёзд Вега и Капелла одинаковы, то они относятся к одному и тому же спектральному классу.

Задание 2

Рассмотрите таблицу 1, содержащую сведения о ярких звёздах.

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

1) Звезда Спика относится к звёздам спектрального класса F.

2) Плотность вещества звезды Вега составляет 1 г/см^3.

3) Звезда Альтаир находятся дальше от Солнца, чем Процион.

4) Звёзды Вега и Кастор имеют примерно одинаковую температуру и массу, следовательно, будет одинаковой и их видимая звёздная величина.

5) Температура поверхности и радиус Альдебарана говорят о том, что эта звезда относится к гигантам.

Задание 3

Рассмотрите таблицу 1, содержащую сведения о ярких звёздах. Выберите **два** утверждения, которые соответствуют характеристикам звёзд.

1) Звезда Процион относится к белым карликам.

2) Расстояние до Альтаира в 15 раз меньше расстояния до Спики.

3) Звёзды Кастор и Вега принадлежат к одному спектральному классу.

4) Звезда Капелла является звездой типа Солнце.

5) Плотность звезды Альдебаран близка к плотности Солнца.

Задание 4

Используя таблицу 2, содержащую сведения о ярких звёздах, выполните задание:

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

1) Звезда Альдебаран является сверхгигантом.

2) Звёзды Альдебаран и Эльнат имеют одинаковую массу, значит, они относятся к одному и тому же спектральному классу.

3) Звезда Бетельгейзе относится к красным звёздам спектрального класса М.

4) Звёзды Альдебаран и Эльнат относятся к одному созвездию, значит, находятся на одинаковых расстояниях от Солнца.

5) Температура на поверхности Солнца больше, чем на поверхности звезды Капелла.

Задание 5

Используя таблицу 2, содержащую сведения о ярких звёздах, выполните задание:

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

1) Звёзды Денеб и Садр относятся к одному созвездию, значит, находятся на одинаковых расстояниях от Солнца.

2) Звезда Ригель является сверхгигантом.

3) Температура на поверхности Солнца в 2 раза ниже, чем на поверхности Альдебарана.

4) Звезда Ригель относится к красным звёздам спектрального класса М.

5) Звёзды Садр и Ригель относятся к различным спектральным классам.

Задание 6

Вам даны характеристики ряда «быстрых» звёзд (Таблица 4).

Выберите два утверждения, которые соответствуют данным характеристикам.

1) Примерно через 150 000 лет звезда Каптейна совершит оборот по небу и вернётся в текущее положение.

2) Полная пространственная скорость относительно Солнца у звезды Барнарда больше, чем у Грумбридж 1830.

3) HD 225213 приближается к Солнцу.

4) За 10 лет звезда Каптейна проходит $1\frac{9}{20}$ угловой минуты по небесной сфере.

5) Грумбридж 1830 – самая горячая звезда в списке.

(Тренировочная работа по физике 2018, вариант ФИ10304)

3. Расположение звёзд в пространстве

Наблюдаемое на небе расположение звёзд – лишь проекция их истинного положения на небесную сферу. Взяв школьный учебник астрономии (таблица «Наиболее яркие звёзды, видимые на территории России»), даже без тщательных расчётов мы заметим, что довольно близкие на небе звёзды α и β Ориона удалены друг от друга в пространстве на расстояние около 150 пк. А звёзды, видимые на небе практически в противоположных направлениях небесной сферы – α Тельца и α Скорпиона, – в пространстве находятся друг от друга на вдвое меньшем расстоянии.

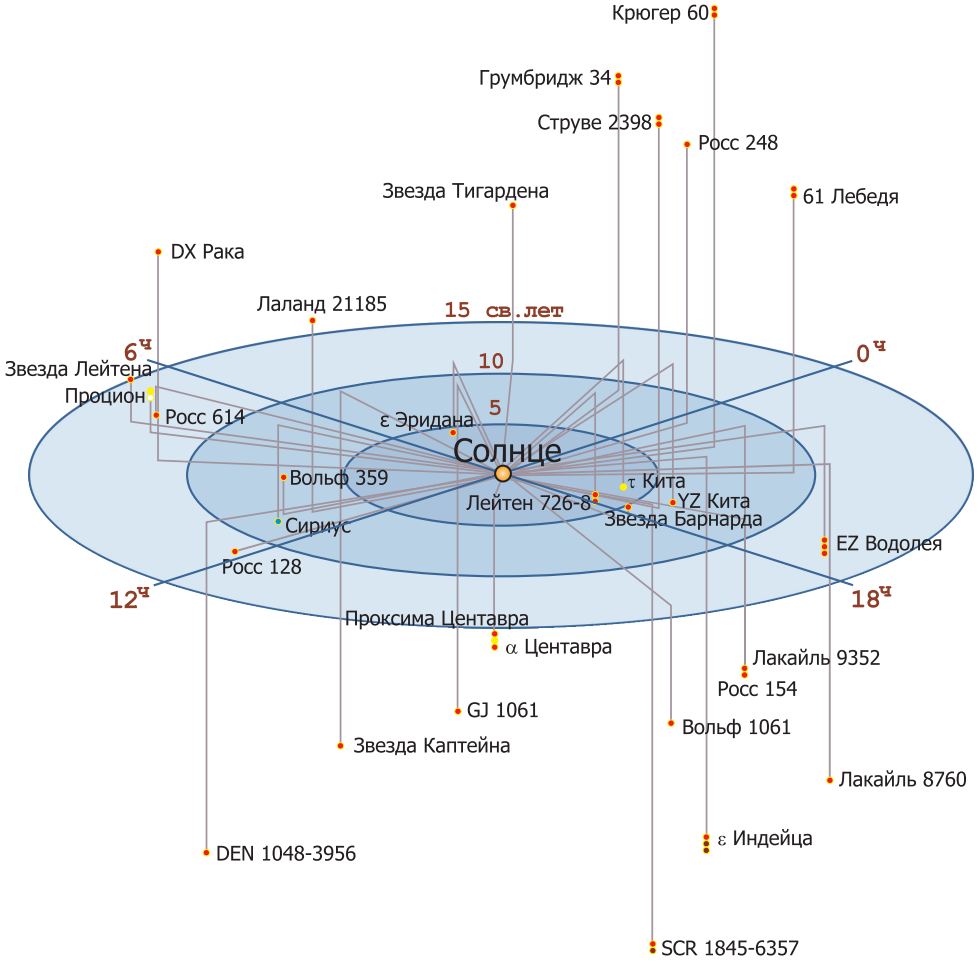


Рис. 2

На рисунке показано расположение в пространстве ближайших к Солнцу звёзд (https://kosmoved.ru/blizhayshaya-zvezda.shtml)

Рассмотрим утверждения на эту тему из разных заданий, то есть задание 1 (утверждение 3); задание 4 (утверждение 4); задание 5 (утверждение 1).

Ответы к этим заданиям. Звёзды одного созвездия находятся на небольших *угловых расстояниях* друг от друга, при этом они могут находиться на существенно разных расстояниях от Солнца. Расстояния звёзд до Земли не влияют на разбиение их по созвездиям. Созвездие – условный участок звёздного неба, имеющий определенные границы. В созвездие входят все светила, проекции которых приходятся на данный участок, независимо от их расстояния до наблюдателя.

Приведённые утверждения – неверны.

В задании 1(3) Кастор и Капелла находятся на значительном угловом расстоянии друг от друга и попадают в разные созвездия (Близнецы и Возничий соответственно).

В заданиях 4(4) и 5(1) звёзды, относящиеся к одному созвездию, расположены на разных расстояниях: Альдебаран – на расстоянии 65 св. лет, а Эльнат – 130 св. лет от Солнца; Денеб 900 св. лет, Садр – 550 св. лет.

В задании 2 (утверждение 3) и в задании 3 (утверждение 2) утверждения верны. Это просто видно из приведённых таблиц: звезда Альтаир находятся дальше от Солнца (17 св. лет), чем Процион (11 св. лет); расстояние до Альтаира в 15 раз (очень округленно) меньше расстояния до Спики.

Для решения этих заданий достаточно было внимательно работать с данными и знать основные понятия.

4. Движение звёзд в пространстве

Рассмотрим **утверждения 1, 2, 3 и 4 из задания 6**. Проверим правильность утверждений.

1) Чтобы наблюдалось указанное в утверждении явление, необходимо вращение звезды Каптейна относительно Солнца (точнее, вокруг общего центра масс). Масса звезды составляет приблизительно 0,3 массы Солнца, расстояние до неё 3,9 пк. Можно было бы подсчитать период обращения такой звёздной пары по закону Кеплера применительно к двойной звезде:

$$\frac{m_1 + m_2}{m_\odot} = \frac{a^3}{P^2}.$$

Здесь m_1 и m_2 – массы компонентов двойной звезды (одна из них – Солнце), $m_\odot$ – масса Солнца, a – большая полуось орбиты, p – период обращения. Желающие могут убедиться в том, что период обращения получился бы в полторы тысячи раз больше.

На самом деле, оснований для такого предположения нет. Наблюдаемая угловая скорость звезды не сохранится в течение столь долгого промежутка времени – звезда обладает ретроградным движением (обратным по отношению к другим звёздам), входит в состав гало Галактики. У неё большая лучевая скорость. Всё это подтверждает, что Солнце и звезда Каптейна не составляют физическую звёздную пару. Утверждение 1 неверно.

2) Скорость звезды в пространстве можно представить как векторную сумму двух компонент, один из которых направлен вдоль луча зрения, другой перпендикулярен ему. Первый компонент представляет собой лучевую, второй – тангенциальную скорость. Тангенциальная скорость вычисляется по формуле $V_t = 4{,}74\mu D$км/с где μ – собственное движение, а D – расстояние до звезды. Полная пространственная скорость есть $V = \sqrt{V_t^2 + V_л^2}$. Отсюда делаем вывод, что полная пространственная скорость относительно Солнца у звезды Барнарда меньше, чем у Грумбридж 1830. Утверждение 2 – неверно.

3) Лучевая скорость положительна, если объект удаляется от наблюдателя, и отрицательна, если приближается к нему. Таким образом, звезда HD 2252213 удаляется от Солнца. Утверждение 3 – неверно.

4) За 10 лет звезда Каптейна пройдет 87 угловых секунд или $1\frac{9}{20}$ угловой минуты по небесной сфере. Утверждение 4 – верно.

5. Физические характеристики звёзд

Для решения этих заданий необходимо внимательно изучить главу *V* (Солнце и звезды) учебника астрономии (Б.А. Воронцов-Вельяминов Астрономия. 11 класс). Очень желательно **помнить** диаграмму Герцшпрунга–Рассела и классификацию звёзд по спектральным классам, потому что предлагаемые в некоторых задачах справочные данные должны быть проанализированы с учётом диаграммы и классификации. К сожалению, в школьном учебнике астрономии диаграмма Герцпрунга–Рассела не очень подробная, а о спектральной классификации звёзд сказано чрезвычайно мало. Можно рекомендовать использовать «Справочник любителя астрономии» П.Г. Куликовского (М., ЛИБРОКОМ, 2016), где необходимые данные изложены более полно.

Приводим для справки краткую спектральную классификацию звезд

Таблица 5

Класс	O	B	A	F	G	K	M
Температура (Кельвин)	60 000 – 30 000	30 000 – 10 000	10 000 – 7 500	7 500 – 6 500	6 000 – 5 000	5 000 – 3 500	3 500 – 2 000
Цвет	Голубой	Белый, голубой	Белый	Белый, жёлтый	Жёлтый	Жёлтый, оранжевый	Оранжевый, красный
Солнечных масс	60	18	3,1	1,7	1,1	0,8	0,3
Солнечных радиусов	15	7	2,1	1,3	1,1	0,9	0,4
Солнечных светимостей	1 400 000	20 000	80	6	1,2	0,4	0,04
Линии водорода	Слабые	Средние	Сильные	Средние	Слабые	Очень слабые	Очень слабые

https://spacegid.com/spektralnyie-klassyi-zvezd.html

Необходимо также **помнить** некоторые характеристики Солнца. Температура видимой поверхности слоёв Солнца 6000 К. Солнце – жёлтый карлик класса G2V. Это – средняя звезда – по своим размерам, массе, температуре поверхности, плотности и т.д.

Решение задания 1

Утверждение 1. Для ответа на этот вопрос необходимо **вспомнить** диаграмму Гершпрунга–Рассела (в данном задании она не приведена). К красным сверхгигантам относят звёзды с низкой температурой (3000–5000 К) и большим радиусом (200–1500 радиусов Солнца). Бетельгейзе попадает в эту категорию. Утверждение 1 *верно*.

Утверждение 2. Из таблицы 1 к заданию видно: температура на поверхности Проциона (6600 К) больше, чем на поверхности Солнца (6000 К). Утверждение 2 *неверно*.

Утверждение 4. Рассмотрим классификацию звёзд по спектральным классам (таблица 4). Учитывая массу, радиус и температуру, заключаем, что Вега попадет в спектральный класс А. Утверждение 4 *верно*.

Утверждение 5. Из таблицы 1 к заданию видно: температуры поверхностей Веги и Капеллы сильно различаются, они относятся к различным спектральным классам. Утверждение 5 *неверно*.

Решение задания 2

Утверждение 1. К спектральному классу F относятся звёзды с температурой 6000–7500 К. Звезда Спика относится к звёздам спектрального класса В. Утверждение 1 *неверно*.

Утверждение 2. Средняя плотность звезды $\rho = \frac{M}{V} = \frac{3M}{4\pi R^3}$. Относительная плотность вещества Веги по сравнению с солнечной составляет

$$\frac{\rho}{\rho_\odot} = \frac{M/M_\odot}{(R/R\odot)^3} = \frac{2}{3^3} \approx 0{,}074 .$$

И, значит, $\rho = 0{,}074 \cdot 1.4 \approx 0{,}1 \text{г}/\text{см}^3$. Утверждение 2 *неверно*.

Утверждение 4. 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 Веги $L = 3^2 \left(\frac{9600}{6000}\right)^4 \approx 59$. Её абсолютная звёздная величина $M = 5 - 2{,}5 \lg L \approx$ $\approx 0{,}57$; светимость Кастора $L = 2{,}5^2 \left(\frac{10400}{6000}\right)^4 \approx 56{,}4$. Абсолютная звёздная величина Кастора $M = 5 - 2{,}5 \lg L \approx 0{,}62$.

Сравним видимые звёздные величины Веги и Кастора. $m = M - 5 + 5 \lg D$, D – расстояние до звезды в парсеках. (1 пс = 3,26 св. года).

Вега: $m = 0{,}57 - 5 + 5 \lg 7{,}67 \approx 0$.

(Кстати, мы должны помнить, что Вега была принята за «стандартную звезду нулевой величины»).

Кастор: $m = 0{,}62 - 5 + 5 \lg 15.34 \approx 1{,}6$.

Интересно, что Кастор – двойная звезда; $1{,}6^{\text{m}}$ – суммарная звездная величина компонент Кастора.

Приведём рассуждения, проведённые на качественном уровне: «Вега и Кастор находятся на разном расстоянии от Земли (Вега ближе), и при

примерно одинаковой температуре и массе у них разные радиусы и, следовательно, разная светимость (светимость Веги больше). Таким образом, у Веги и Кастора разные видимые звёздные величины ($+0^m$ у Веги и $+2^m$ у Кастора)». (См. «Решу ЕГЭ»).

Все правильно. Но не очень убедительно. А в данном случае характеристики звёзд близки друг другу и не очень-то легко «попасть» в правильный ответ!

Утверждение 4 *неверно*.

Утверждение 5. Для оценки этого утверждения **вспомним** диаграмму Герцшпрунга–Рассела (к этому заданию она не даётся!). Температура поверхности и радиус Альдебарана говорят о том, что эта звезда относится к гигантам. Утверждение 5 *верно*.

Решение задания 3

Утверждение 1. К белым карликам относятся звёзды с диаметрами в сотни раз меньше, чем у Солнца. Процион не является белым карликом. Утверждение 1 *неверно*.

Утверждение 3. Звёзды Кастор и Вега относятся к одному спектральному классу А. Утверждение 3 *верно*.

Утверждение 4. Капелла имеет большой радиус и относится к жёлтым гигантам. Утверждение 4 *неверно*.

Утверждение 5. Средняя плотность звезды $\rho = \frac{M}{V} = \frac{3M}{4\pi R^3}$. Относительная плотность Альдебарана по сравнению с солнечной составляет

$$\frac{\rho}{\rho_\odot} = \frac{M/M_\odot}{(R/R\odot)^3} = \frac{2{,}5}{43^3} \approx 3\cdot 10^{-5}.$$

Плотность Альдебарана в десятки тысяч раз меньше плотности Солнца. Утверждение 5 *неверно*.

Решение задания 4

Утверждение 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*.

Утверждение 2. Спектральный класс в первую очередь определяется температурой звезды. Альдебаран и Эльнат имеют разную температуру и относятся к разным спектральным классам. Утверждение 2 *неверно*.

Утверждение 3. Бетельгейзе, имея температуру 3100 К, относится к красным звёздам спектрального класса М. Утверждение 3 *верно*.

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

Решение задания 5

Утверждение 2. Высокая температура, большие масса и радиус Ригеля позволяют отнести его к сверхгигантам. Утверждение 2 *верно*.

Утверждение 3. Температура на поверхности Альдебарана (3500 К) меньше, чем на поверхности Солнца (6000 К). Утверждение 3 *неверно*.

Утверждение 4. Температура Ригеля 11200 К. Ригель относится к звёздам спектрального класса В. Утверждение 4 *неверно*.

Утверждение 5. Температуры поверхностей Садра и Ригеля сильно различаются, они относятся к различным спектральным классам. Утверждение 5 *верно*.

Решение задания 6

Утверждение 5. Грумбридж 1830 – самая горячая звезда в списке. Она принадлежит спектральному классу К (2000-3500 К), остальные звёзды списка – спектральному классу М (3500-2000 К). Утверждение 5 *верно*.

Проверьте, как вы усвоили материал

Предлагаем два задания для самостоятельного выполнения. Ответы к ним даны в таблице 6.

Задание 7

Гелиоцентрический годичный параллакс некоторой звезды равен 0,00625″. Выберите из приведённых вариантов расстояний до этой звезды все правильные.

1) 160 световых лет,
2) 160 парсек,
3) 160 астрономических единиц,
4) 49 парсек,
5) 522 световых года.

Примечание: параллакс – это наблюдаемая характеристика звезды:

$$\pi'' = \frac{1}{D(\text{пк})}.$$

(Тренировочная работа по физике 2019 года 11 класс, вариант ФИ1910101)

Задание 8

Рассмотрите таблицу 3, содержащую сведения о ярких звёздах. Выберите все верные утверждения, которые соответствуют характеристикам звёзд.

1) Температура звезды α Центавра А соответствует температуре звёзд спектрального класса G.

2) Звезда Ригель является сверхгигантом.

3) Наше Солнце относится к гигантам спектрального класса В.

4) Средняя плотность звезды Сириус В больше, чем у Солнца.

5) Звезда ε Возничего В относится к звёздам главной последовательности на диаграмме Герцшпрунга – Рессела.

В заключение приводим таблицу ответов ко всем рассмотренным заданиям 1– 8.

Таблица 6

	Утверждение				
№ задания	1	2	3	4	5
1	верно	неверно	неверно	верно	неверно
2	неверно	неверно	верно	неверно	верно
3	неверно	верно	верно	неверно	неверно
4	неверно	неверно	верно	неверно	верно
5	неверно	верно	неверно	неверно	верно
6	неверно	неверно	неверно	верно	верно
7	неверно	160 парсек	неверно	неверно	522 световых года
8	неверно	верно	неверно	верно	верно