

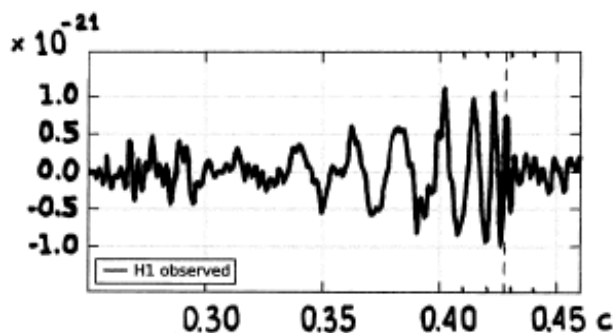
1	2	3	4	5	Σ	Оценка

Фамилия И.О.	№ группы

Государственный экзамен по физике (письменная часть 20 января 2017 года)

Вариант А

1А. 14 сентября 2015 года установками LIGO была зарегистрирована гравитационная волна, рожденная в процессе слияния двух черных дыр, вращавшихся вокруг общего центра масс по круговым орбитам. Временная зависимость сигнала, пропорционального амплитуде волны, изображена на рисунке. В момент слияния (обозначен штриховой линией) излучение прекращается. Оцените массу возникшей черной дыры, рассматривая исходные черные дыры как точечные массы m_1 и m_2 , взаимодействующие по закону Ньютона и обращающиеся по круговым орбитам вокруг общего центра масс. В момент слияния расстояние между ними равно $r_S = 2G(m_1 + m_2)/c^2$ (радиус Шварцшильда), где G — гравитационная постоянная, c — скорость света. Период гравитационной волны, равный половине периода обращения системы, оценивать в области максимальной амплитуды сигнала на графике.



Указание. Движение черных дыр рассматривать в нерелятивистском приближении.

2А. В некоторый день прогноз Гидрометцентра предсказывает температуру воздуха 20°C и относительную влажность $\psi = 60\%$. Оценить высоту нижней кромки облаков при этих условиях. В модели «Международная стандартная атмосфера» принято, что в тропосфере ($H \leq 11$ км) температура воздуха уменьшается с высотой по линейному закону с коэффициентом $\alpha = 6,49$ К/км. Давление насыщенных водяных паров при $T_0 = 293$ К составляет $P_{\text{н.п.}} = 2,34 \cdot 10^3$ Па. Удельную теплоту испарения воды считать не зависящей от температуры и равной $\Lambda = 2,54 \cdot 10^6$ Дж/кг.

Указание. Использовать условие $\alpha H \ll T_0$.

3А. В результате удара молнии на расстоянии $\ell = 1$ м от центра золотого проволочного кольца диаметром $D = 20$ см и толщиной $\delta < 0,5$ мм кольцо нагрелось на $\Delta T_{\text{к}} = 20$ К. Найти минимальный перенесенный молнией заряд. Считать, что зависимость тока молнии от времени t имеет вид $I = I_0(e^{-t/T} - e^{-t/\tau})$ с параметрами $\tau = 8 \cdot 10^{-6}$ с и $T = 10^{-4}$ с. Теплоемкость единицы объема золота $C_V = 2600$ кДж/(К · м³), его удельное сопротивление $\rho = 2 \cdot 10^{-8}$ Ом · м.

4А. Гамма-кванты с энергией $E = 10$ МэВ рождают электрон-позитронные пары в мишенях из ^{10}B . Найти максимальную энергию, приобретаемую ядрами бора в таком процессе.

5А. Один из способов оценки массы нейтрино состоит в измерении задержки прихода нейтрино по сравнению с фиксацией вспышки света при взрыве сверхновых. Как следует из изучения осцилляций нейтрино, его масса может быть порядка 0,01 эВ. Определить, каким временным разрешением Δt должен обладать нейтринный телескоп, чтобы зарегистрировать нейтрино с такой массой, если энергия нейтрино, испускаемого при взрыве сверхновой, расположенной на расстоянии 170 000 световых лет от Земли, в среднем составляет 10 МэВ.

1	2	3	4	5	Σ	Оценка

Фамилия И.О.	№ группы

Государственный экзамен по физике (письменная часть 20 января 2017 года)

Вариант Б

1Б. 14 сентября 2015 года установками LIGO была зарегистрирована гравитационная волна, рожденная в процессе слияния двух черных дыр с массами примерно $29M_{\odot}$ и $36M_{\odot}$ ($M_{\odot} = 2,0 \cdot 10^{30}$ кг — масса Солнца). Оцените энергию излученных гравитационных волн, рассматривая черные дыры как точечные массы, взаимодействующие по закону Ньютона и обращающиеся по круговым орбитам вокруг общего центра масс. Считайте, что слияние происходит, когда расстояние между ними становится равным $r_S = 2GM/c^2$ (радиус Шварцшильда), где G — гравитационная постоянная, c — скорость света, и M — сумма масс двух исходных черных дыр.

Указание. Движение черных дыр рассматривать в нерелятивистском приближении.

2Б. В баллистике для учета зависимости плотности воздуха от высоты используется эмпирическая формула В.П. Ветчинкина: $\rho(H) = \rho_0 \frac{1-H/H_0}{1+H/H_0}$, где $H_0 = 2 \cdot 10^4$ м. Пользуясь этой формулой, определите вертикальный градиент температуры воздуха вблизи поверхности Земли. Оцените относительную влажность воздуха у Земли при температуре воздуха $T_0 = 7$ °С, если нижняя кромка сплошной облачности находится на высоте $H = 300$ м. Давление насыщенных водяных паров при 7 °С равно $P_{\text{н.п.}} = 10^3$ Па, удельная теплота испарения воды $\Lambda = 2,48 \cdot 10^6$ Дж/кг.

Указание. Использовать условие $H/H_0 \ll 1$.

3Б. Для плавки чистых металлов в вакууме используются индукционные печи. Какой должна быть амплитуда B_0 индукции переменного магнитного поля частотой $f = 400$ Гц для того, чтобы за время $t = 100$ с нагреть до температуры плавления тонкое золотое кольцо диаметром $D = 20$ мм, высотой $h = 3$ мм и толщиной $d = 1$ мм. Считать, что кольцо лежит в хорошо теплоизолирующей диэлектрической форме с малой теплоёмкостью. Самоиндукцией пренебречь. Начальная температура $T_0 = 300$ К, температура плавления $T_{\text{пл}} = 1300$ К. При температурах выше комнатной теплоёмкость единицы объёма золота можно считать постоянной: $C_V = 2600$ кДж/(К · м³), а его удельное сопротивление — пропорциональным температуре: $\rho = \rho_0 T/T_0$, где $\rho_0 = 2 \cdot 10^{-8}$ Ом · м.

4Б. Межзвездная среда состоит в основном из нейтрального водорода с концентрацией $n = 10^3$ см⁻³. Фотоны с энергией $E_0 = 40$ кэВ из источников рентгеновского излучения, попадая в межзвездную среду, теряют свою энергию за счет комптоновского рассеяния, сечение которого можно независимым от частоты и равным $\sigma = 0,665$ бн (томсоновское сечение). Оценить, за какое время такие фотоны охладятся бы до энергии $E = E_0/10$. Рассеяние на все углы считать равновероятным.

5Б. Для регистрации мюонных антинейтрино используется реакция $\bar{\nu}_{\mu} + p \rightarrow \mu^+ + n$. Определить минимальную энергию антинейтрино, необходимую для того, чтобы мюон вызвал черенковское излучение в воде. Коэффициент преломления воды $n = 1,33$. Энергией отдачи нейтрона пренебречь. Масса покоя протона равна 938,7 МэВ, нейтрона — 939,5 МэВ, мюона — 105,7 МэВ.

Указание. Черенковское излучение возникает, если скорость заряженной частицы больше фазовой скорости света в среде.

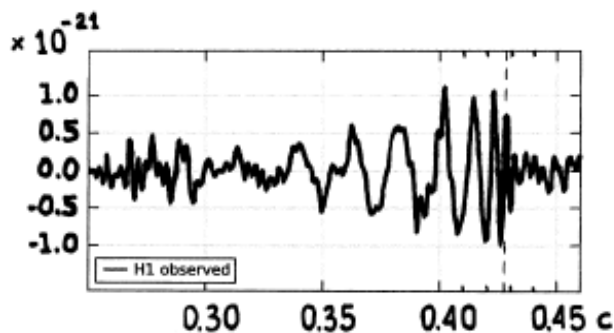
1	2	3	4	5	Σ	Оценка

Фамилия И.О.	№ группы

Государственный экзамен по физике (письменная часть 20 января 2017 года)

Вариант В

1В. На рисунке показана временная зависимость амплитуды гравитационной волны, зарегистрированная 14 сентября 2015 года установками LIGO. Эта волна возникла при слиянии двух черных дыр с массами m_1 и m_2 , вращающихся вокруг общего центра масс по круговым орбитам (момент слияния отмечен штриховой линией). В этот момент расстояние между черными дырами равно $r_S = 2G(m_1 + m_2)/c^2$ (радиус Шварцшильда), где



G — гравитационная постоянная, c — скорость света. Амплитуда гравитационной волны безразмерна и убывает с расстоянием r до источника как $A = 0,1r_S/r$ (при $r \gg r_S$). Считая черные дыры материальными точками, взаимодействующими по закону Ньютона, оценить r и r_S . Период гравитационной волны, равный половине периода обращения системы, оценить в области максимальной амплитуды сигнала на графике.

Указание. Движение черных дыр рассматривать в нерелятивистском приближении.

2В. В артиллерии используется модель так называемой «нормальной артиллерийской атмосферы», разработанная в 1927 г. советским баллистиком Д.А. Ветцлером. В этой модели температура на уровне мирового океана считается равной $t_0 = +15^\circ\text{C}$ и понижается на $\Delta t = 0,63^\circ\text{C}$ на каждые 100 м высоты вплоть до границы тропосферы (9300 м над уровнем моря). До какой максимальной высоты поднимется в такой атмосфере аэростат, состоящий из заполненной неоном теплоизолирующей оболочки, масса которой составляет $\delta = 15\%$ от массы содержащегося в ней газа? Оболочка непроницаема для газа и не препятствует его расширению. В момент старта с уровня моря температура газа в аэростате равна t_0 .

3В. Тонкое золотое кольцо диаметром $D = 20$ мм, толщиной $d = 1$ мм и высотой $h = 3$ мм подвешено в вакууме и помещено в нормальное к плоскости кольца переменное магнитное поле с амплитудой индукции $B_0 = 1$ мТл и частотой $f = 400$ Гц. Стенки вакуумной полости находятся при комнатной температуре $T_0 = 300$ К. Определить установившуюся температуру кольца. Теплопроводность подвеса и самоиндукцию кольца не учитывать. Удельное сопротивление при комнатной температуре $\rho_0 = 2 \cdot 10^{-8}$ Ом · м. Считать, что золото отражает 98% излучения во всем диапазоне.

4В. Фотон с энергией $\varepsilon = 0,511$ МэВ рассеивается на покоящемся электроне. При каком угле рассеяния составляющая импульса электрона, перпендикулярная первоначальному импульсу фотона, будет максимальной?

5В. В ряде расширений Стандартной Модели вводят новые массивные нейтрино (т.н. стерильные нейтрино). Их массу можно измерять по реакции K -захвата в атоме бериллия: ${}^7_4\text{Be} + e^- \rightarrow {}^7_3\text{Li} + \nu$ где ν может быть как электронным, так и стерильным нейтрино. В случае существования последнего, в спектре отдачи атомов лития будут наблюдаться два пика: один соответствует электронным нейтрино с массой примерно равной нулю, а второй — стерильным нейтрино. Каким разрешением по энергии ΔE должен обладать спектрометр, чтобы различить эти два пика, если бы масса стерильного нейтрино была равна $m_\nu c^2 = 10$ кэВ?