

# Майнор «Мир глазами физиков: квантовая физика»

## Задачи семинаров второго модуля

*Представленные тексты задач могут несколько отличаться от разбиравшихся на семинаре. Некоторые из подготовленных к семинару задач могли не разбираться. Нумерация семинаров по неделям курса*

### К семинару 8

#### **Задача 1.**

Сканирующим туннельным микроскопом исследуется поверхность графита. Туннельный ток через иглу в одном месте составил 0.2 нА. Затем, не меняя положения иглы по вертикали, ее начали двигать в сторону. В некий момент под иглой оказалась “ступенька” из еще одного слоя графита. Туннельный ток при этом увеличился до 0.65 нА. Чему равно измеренное в эксперименте расстояние между слоями графита? Работу выхода считать равной 4,6 эВ, ее отличием для иглы и графита пренебречь.

#### **Задача 2.**

Железный цилиндр длиной 1 см и массой 1 г подвешен в магнитном поле. С какой угловой скоростью начнет вращаться цилиндр, если изменить направление магнитного поля на противоположное. Считать что в обоих случаях цилиндр намагничивается до насыщения. Предположить, что момент импульса каждого атома равен моменту импульса электрона на первой боровской орбите, плотность железа - 7900 кг/м<sup>3</sup>.

#### **Задача 3.**

Оценить расстояние между двумя полупроводниковыми элементами в процессоре, при котором вероятность туннелирования электронов между элементами составит 1%. Эффективную высоту барьера оценить как 1 эВ.

## К семинару 9

### **Задача 1.**

Молекулярный водород встречается в двух модификациях: ортоводород и параводород. Они отличаются друг от друга разным взаимным расположением спинов протонов: в ортоводороде спины протонов параллельны, в параводороде противоположны друг другу (точнее, в ортовороде полный спин протонов равен 1, а в параводороде равен нулю). Из-за этого их свойства немного отличаются. Одна модификация может переходить в другую переориентацией спина протонов.

Известно, что концентрации этих модификаций равны друг другу при температуре 80 К, а при температуре близкой к абсолютному нулю в равновесном водороде практически все молекулы оказываются в состоянии параводорода. Найдите разницу энергий на одну молекулу, между этими модификациями, а также их относительное содержание при температурах 20К и 1000К.

### **Задача 2.**

Результаты, полученные при рассмотрении водорода справедливы для любых двух частиц, с противоположными зарядами, а не только для протона и электрона. В ускорительных экспериментах можно получить искусственно атом из протона и отрицательно заряженного мюона (его масса в 200 раз больше массы электрона). Оцените размер такого атома и энергию связи этих частиц (энергию ионизации).

Подобные атомы могут образовать молекулу, состоящую из двух протонов и соединяющего их мюона. Оцените размер такой молекулы, и энергию взаимодействия протонов в ней.

### **Задача 3.**

Взаимодействие магнитных моментов протона и электрона в атоме водорода приводит к расщеплению энергетических уровней и возникновению сверхтонкой структуры. Излучение межзвездного атомарного водорода, находящегося в основном состоянии, вызвано переориентацией электронного спина, т.е. переходами между компонентами сверхтонкой структуры. Оцените длину волны  $\lambda$  этого излучения.

## К семинару 10

### **Задача 1.**

Оцените размер нейтронной звезды, масса которой равна двум массам Солнца (масса Солнца равна  $2 \times 10^{30}$  кг), а температура не превышает  $10^9$  К.

### **Задача 2.**

Над сверхпроводящей плоскостью на изолирующей подложке высотой  $h=3$  мм лежит проволочное кольцо из тонкой проволоки радиусом  $r=10$  см. Масса кольца  $m=1$  г. При какой величине постоянного тока  $I$ , текущего по кольцу, кольцо будет левитировать над сверхпроводником?

### **Задача 3.**

Цилиндр из сверхпроводника массой  $M=80$  г, высотой  $h=20$  см, радиусом  $R = 0,5$  см при температуре ниже точки перехода подвешен без трения вертикально в магнитном поле, меньше критического и направленном вдоль оси цилиндра. При постоянной температуре величину поля начинают постепенно повышать, и при поле  $H = 80$  А/м сверхпроводимость исчезает. В результате цилиндр начинает вращаться. Найти угловую скорость этого вращения.

### **Задача 4.**

Как известно, в современной технике для получения сильных магнитных полей используются катушки из сверхпроводящих материалов. Благодаря им получение магнитного поля с индуктивностью 5 Тл не представляет особых технических сложностей. А что было бы без сверхпроводников? Оцените тепловую мощность, выделяющуюся в катушке из меди, создающую магнитное поле в 5Тл.

Параметры катушки: длина 1 м, диаметр 0,5 м, 5000 витков. Параметры медной проволоки: диаметр 1мм, удельное сопротивление  $0,018$  Ом\*мм<sup>2</sup>/м .

## К семинару 11

### Задача 1.

Электрон над поверхностью жидкого гелия притягивается к ней силами электростатического изображения, потенциальная энергия которых равна:

$$U(z) = \frac{e^2}{4z} \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 1},$$

где  $z$  - расстояние от электрона до поверхности гелия,  $\epsilon = 1.053$  - диэлектрическая проницаемость жидкого гелия.

С другой стороны, для того, чтобы попасть внутрь жидкого гелия электрон должен иметь энергию выше 1 эВ. В результате этого электрон оказывается в потенциальной яме и его движение в направлении, нормальном к поверхности начинает квантоваться.

Найти энергию основного состояния электрона в этой яме и установившееся среднее расстояние от электрона до жидкого гелия.

### Задача 2.

Оцените изменение частоты света, при его рассеянии на кристалле под углом 90 градусов. Скорость звука принять равной 3000 м/с.

### Задача 3.

Найти фермиевскую энергию в двумерном электронном газе при нулевой температуре.

Концентрация электронов на единицу поверхности  $n_s \approx 10^{13} \text{ см}^{-2}$

## К семинару 12

### Задача 1

В 1942 г. американский физик Аллен измерил максимальную энергию  $E_0$  атомов  ${}^7\text{Li}$ , образующихся в результате К-захвата в ядре  ${}^7\text{Be}$ , и она оказалась равной 50 эВ. Определить на основе этих данных разность масс атомов  ${}^7\text{Be}$  и  ${}^7\text{Li}$ .

### Задача 2

В работающем ядерном реакторе в числе многих элементов из урана всё время образуются изотопы иода  ${}^{135}\text{I}$ , претерпевающие следующую последовательность бета-распадов (периоды полураспада указаны)  ${}^{135}\text{I} \xrightarrow{6,7 \text{ час}} {}^{135}\text{Xe} \xrightarrow{9,2 \text{ час}} {}^{135}\text{Cs} \dots$ . Так как ядра  ${}^{135}\text{Xe}$  обладают очень большим сечением поглощения нейтронов, в работающем реакторе накопление этого изотопа

не происходит. Однако при остановке реактора ксенон начинает накапливаться, тем самым уменьшается коэффициент размножения нейтронов и сразу же повторный запуск реактора затрудняется (образуется так называемая иодная яма). Через какое время после остановки реактора количество ядер  $^{135}\text{Xe}$  будет максимальным? Считать, что в момент остановки реактора ядер ксенона в нем нет.

### Задача 3

Оценить запас термоядерной энергии в 1 литре морской воды, если использовать 10% находящегося в ней дейтерия для осуществления реакции синтеза  $\text{D}+\text{D}$ . Число атомов дейтерия в природной смеси изотопов равно 0,015%. Сравнить полученный результат с энергией, выделяющейся из одного литра бензина - 46,8 МДж.

### Задача 4

Согласно современным расчетам плотность потока высокоэнергетичных солнечных нейтрино на Земле должна быть равной  $j=5,6\cdot 10^6 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ . Нейтрино регистрируются детектором, содержащим  $M=615$  тонн перхлорэтилена  $\text{C}_2\text{Cl}_4$ . В естественной смеси изотопов хлора содержится 25% по массе изотопа  $^{37}\text{Cl}$ , на ядрах которого происходит реакция, обратная К-захвату. Среднее значение сечения захвата ядрами  $^{37}\text{Cl}$  таких нейтрино составляет  $\sigma=1,06\cdot 10^{-42} \text{ см}^2$ .

Период полураспада образующегося при этом  $^{37}\text{Ar}$  равен 35 суток. Какое максимальное количество атомов аргона можно выделить из вещества детектора после экспозиции в течении времени, равному периоду полураспада?

## К семинару 13

### Задача 1.

Исходя из законов сохранения, дописать следующие реакции:

- $\nu_\mu + p \rightarrow$
- $\nu_\mu + n \rightarrow$
- $\bar{\nu}_\mu + p \rightarrow$
- $\bar{\nu}_\mu + n \rightarrow$

Нарисовать кварковые схемы реакций.

Считая, что при превращении пары кварков в пару антилептон-антикварк, выделяется очень тяжелый X-бозон, существующий  $10^{-35}$  с., найти его энергию покоя и заряд, необходимые для обеспечения реакции распада протона:  $p \rightarrow \pi^0 + e^+$

### **Задача 2.**

В ходе экспериментов по обнаружению бозона Хиггса на LHC был зарегистрирован распад неизвестной массивной частицы на два фотона с энергиями  $E_1=70$  ГэВ и  $E_2=92$  ГэВ, которые разлетелись под углом  $\alpha=103^\circ$ . Определите массу распавшейся частицы.

### **Задача 3.**

Найти пороговую энергию, необходимую для образования  $J/\psi$ -мезона (3.097 ГэВ) в реакции  $p + \bar{p}$ , если а) антипротон налетает на покоящийся протон в мишени; б) протон и антипротон сталкиваются двигаясь с одинаковой скоростью в противоположных направлениях.

### **Задача 4.**

Монохроматический пучок заряженных пионов ( $\pi^+$ ,  $\tau=2,6 \cdot 10^{-8}$  с,  $m_\pi c^2=140$  МэВ), энергия которых  $E=10$  ГэВ, вследствие распада постепенно превращается в пучки мюонов и нейтрино. На каком расстоянии  $L$  от области формирования пучка число образовавшихся мюонов в три раза превышает число пионов?

## **К семинару 14**

### **Задача 1.**

Под действием первичного космического излучения в атмосфере Земли могут рождаться мюоны. Время жизни мюона в собственной системе равно  $2,2 \cdot 10^{-6}$  с, а масса 105 МэВ.

Какой минимальной энергией должны обладать мюоны, чтобы успевать долететь до поверхности Земли, если считать, что они образуются на высоте 40 км.

### **Задача 2.**

Оценить радиусы действия сильного и слабого взаимодействий. Массы переносчиков взаимодействия равны 136 МэВ/ $c^2$  и 80 ГэВ/ $c^2$  для  $\pi$ -мезона и W-бозона соответственно.