Задача 1

Ядро атома трития, находящегося в основном состоянии испытывает β−-распад. Считая, что за время вылета распадного электрона, состояние атомного электрона не успевает измениться, найти вероятность того, что атомный электрон окажется в состоянии 1s.

Волновая функция состояния 1s для атома водорода



Задача 2

Ядро атома трития, находящегося в основном состоянии испытывает β−-распад. Считая что за время вылета распадного электрона, состояние атомного электрона не успевает измениться, найти вероятность того, что атомный электрон окажется в состоянии 2s.

Волновая функция состояния 1s для атома водорода



Волновая функция состояния 2s для атома водорода



Задача 3

Мюон захватывается ядром атома титана , образуя мезоатом. При переходе мюона в основное состояние происходит испускание серии рентгеновских квантов, причем наиболее коротковолновая линия представляет собой дублет с энергиями перехода и  (). Какова будет энергия данного перехода в пионном мезоатоме титана? Считать, что для расчета спектра мезоатома применимо нерелятивистское приближение. Сверхтонкое взаимодействие мюона, а также сдвиг уровней пиона за счет сильного взаимодействия не учитывать. Отношение масс .

Задача 4

Мюон захватывается ядром атома свинца , образуя мезоатом. При переходе мюона в основное состояние происходит испускание серии рентгеновских квантов, причем наиболее коротковолновая линия представляет собой дублет с энергиями перехода и  (). Оценить, какова будет энергия данного перехода в пионном мезоатоме свинца? Считать, что для расчета спектра мезоатома применимо нерелятивистское приближение. Сверхтонкое взаимодействие мюона, а также сдвиг уровней пиона за счет сильного взаимодействия не учитывать. Отношение масс . Ядро считать равномерно заряженным по объему.

Задача 5

Явление комбинационного рассеяния состоит в том, что при поглощении фотона частоты  молекула может излучить фотон частоты , где - частота собственных колебаний молекулы, - целое. Найти частоту собственных колебаний линейной молекулы , если длины волн ближайших к длине волны падающего фотона равны  и . Считать, что электронное состояние молекулы в процессах излучения и поглощения не изменяется, а поглощаемый и излучаемый фотоны – электродипольные.

Задача 6

Попав в ядро свинца -лептон может образовать связанное состояние за счет кулоновского взаимодействия с ядром. Причем, из-за своей большой массы: , лептон не будет выходить за пределы ядра. Известно, что при переходе лептона с первого возбужденного уровня на основной образуется гамма-квант с энергией . Считая, что заряд ядра распределен равномерно объему, определить из приведенных данных его радиус *R*.

Задача 7

В случае альфа-распада четно-четного ядра зависимость его периода полураспада от энергии α-частицы *E* описывается законом Гейгера-Нэттола

,

где выражается в секундах, *E* - в мегаэлектрон-вольтах, а *Z ‑* заряд дочернего ядра.

Рассматривая модель, в которой α-частица находится в потенциальной яме, созданной сильным и кулоновским взаимодействиями, найти отношение периодов альфа-распада ядер и ? Считать, что плотность вероятности обнаружения α-частицы постоянна по объему ядра. Заряд ядра считать равномерно «размазанным» по его объему ‑ шару радиусом 0,855 фм. Энергия альфа-частицы после распада ядра плутония равна 5,50 МэВ.

Задача 8

В случае альфа-распада четно-четного ядра зависимость его периода полураспада от энергии α-частицы *E* описывается законом Гейгера-Нэттола

,

где выражается в секундах, *E* - в мегаэлектрон-вольтах, а *Z* ‑ заряд дочернего ядра.

Рассматривая модель, в которой α-частица находится в потенциальной яме, созданной сильным и кулоновским взаимодействиями, найти период альфа-распада ядра , если известно, что из ядра вылетает α-частица с энергией 4,78 МэВ. Считать, что плотность вероятности обнаружения α-частицы постоянна по объему ядра. Заряд ядра считать равномерно «размазанным» по его объему ‑ шару радиусом 0,855 фм.

Задача 9

Найти частоты переходов между уровнями сверхтонкой структуры основного состояния атома трития, которые будут наблюдаться в спектре поглощения в разреженном газе атомов, помещенных в однородное и постоянное магнитное поле *B*0 = 50 Гс при температурах близких к абсолютному нулю. В нулевом поле наблюдается переход на частоте *f*0 = 1517 МГц (выше лежит уровень с бо´льшим полным моментом). Полный момент (спин) ядра трития определять по оболочечной модели; при учете расщепления в магнитном поле величиной магнитного момента ядра пренебречь.

*Указание.* Наблюдаются только те переходы, при которых изменение полного момента системы не превышает по модулю единицы.

Задача 10

Найти частоты переходов, которые могут наблюдаться в спектре поглощения разреженного газа атомов водорода, находящихся в основном состоянии, в постоянном и однородном внешнем магнитном поле *B*0 = 4,5 Тл при температуре близкой абсолютному нулю при учете сверхтонкого взаимодействия. Энергия этого взаимодействия в атоме водорода может быть записана в виде , где угловые скобки означают усреднение по всем направлениям векторов, а *f*0 = 1420 МГц -- частота перехода между уровнями сверхтонкой структуры в нулевом магнитном поле.

*Указание.* Наблюдаются только те переходы, при которых изменение полного момента системы не превышает по модулю единицы.

Задача 11

Найти наибольшую частоту перехода между уровнями сверхтонкой структуры основного состояния атома дейтерия, если разреженный газ атомов помещен в постоянное и однородное магнитное поле *B*0 = 20 Гс. Расстояние по частоте между уровнями сверхтонкой структуры в нулевом магнитном поле равно *f*0 = 327 МГц (выше лежит уровень с бо´льшим полным моментом). Температуру считать близкой к абсолютному нулю. Полный момент (спин) ядра дейтерия равен *I* = 1; при учете расщепления в магнитном поле величиной магнитного момента ядра пренебречь.

*Указание.* Наблюдаются только те переходы, при которых изменение проекции полного момента системы не превышает по модулю единицы.

Задача 12

Нейтрон находится в сферической прямоугольной потенциальной яме радиусом   
 см. Определить минимальную глубину ямы , при которой в ней существует пятый *s*-уровень. Найти также энергию первого уровня , отсчитанную от дна такой ямы.

Задача 13

Гамма-кванты с энергией рождают электрон-позитронные пары в мишенях из . Найти максимальную энергию, приобретаемую ядрами бора в таком процессе.

Задача 14

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 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.

Задача 15

Межзвездная среда состоит в основном из нейтрального водорода с концентрацией . Фотоны с энергией кэВ из источников рентгеновского излучения, попадая в межзвездную среду, теряют свою энергию за счет комптоновского рассеяния, сечение которого можно принять равным  бн (томсоновское сечение) и не зависящим от частоты. Оценить, за какое время такие фотоны охладились бы до энергии . Рассеяние на все углы считать равновероятным.

Задача 16

Для регистрации мюонных антинейтрино используется реакция . Определить минимальную энергию антинейтрино, необходимую для того, чтобы мюон вызвал черенковское излучение в воде. Коэффициент преломления воды . 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.

Задача 17

Фотон с энергией МэВ рассеивается на покоящемся электроне. При каком угле рассеяния составляющая импульса электрона, перпендикулярная первоначальному импульсу фотона, будет максимальной?

Задача 18

В ряде расширений Стандартной Модели вводят новые массивные нейтрино (т.н. стерильные нейтрино). Их массу можно измерять по реакции *К*-захвата в атоме бериллия: где 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 должен обладать спектрометр, чтобы различить эти два пика, если бы масса стерильного нейтрино была равна ?

Задача 19

**Магнитные трубки** — оценить при какой величине магнитного поля в фотосфере Солнца (температура 6000 К, концентрация 1017 см-3) возможно образование устойчивых структур (магнитных трубок).

Задача 20

**Солнечные протоны** могут ускоряться и накапливаться в области ускорения достаточно длительное время, а потом разом ее покинуть. Оценить количество протонов, которое может быть ускорено до средней энергии 30 МэВ в короне Солнца в области с магнитным полем 100 Гс и характерным линейным размером L=1010 см.

Задача 21

**Корональный выброс массы** (КВМ) - выброс вещества из нижней короны Солнца в межпланетное пространство (концентрация вещества 1010 см-3, характерное магнитное поле 100 Гс) происходит в результате освобождения накопленной магнитной энергии и ее перехода в кинетическую энергию. Оценить скорость КВМ вблизи Солнца.

Задача 22

**Магнитосфера.** Магнитное поле Земли в первом приближении является диполем с магнитным моментом μE=8.1·1025 Гс·см3. Оценить размер магнитосферы Земли (области, где магнитное давление больше динамического давления солнечного ветра) в условиях спокойного солнечного ветра (np=10 см-3; V = 400 км/с).

Задачи 1 и 2

Задача 3

Боровский радиус мюона , где - заряд ядра. Из-за большого отношения масс боровский радиус мюона намного меньше радиуса электронной *К*- оболочки титана и поэтому экранирующим действием электронов внутренних оболочек можно пренебречь. Тогда при = 22 получаем, что (см).

Радиус ядра титана  (см). Поскольку , то можно считать, что мы имеем дело с водородоподобным атомом. Энергия наиболее коротковолнового фотона соответствует переходу . Поскольку спин мюона равен ½, то уровень из-за спин-орбитального взаимодействия  представляет собой дублет  и . При этом ,  (считаем, что как в атоме водорода уровень  лежит выше уровня ). Здесь  - энергия головной линии серии Лаймана мюонного атома водорода. Поскольку спин пиона равен 0, то для него спин-орбитальное взаимодействие будет отсутствовать и энергия перехода .

Задача 4

Боровский радиус мюона , где - заряд ядра. Из-за большого отношения масс боровский радиус мюона намного меньше радиуса электронной *К*- оболочки свинца и поэтому экранирующим действием электронов внутренних оболочек можно пренебречь. Тогда при = 82 получаем, что (см).

Радиус ядра свинца  (см). Поскольку , то можно считать, что мюон в основном состоянии находится внутри ядра, где потенциал квадратично зависит от расстояния и мы имеем задачей о трехмерном осцилляторе (см. 2002. 3А,Б). При этом уровни энергии , а . Наиболее коротковолновый квант соответствует переходу . Поскольку спин мюона равен ½, то из-за спин-орбитального взаимодействия  уровень будет расщеплен на два подуровня  и  Т.о. , а (мы считаем, что для мюона, как и для нуклона выше по энергии лежит подуровень с меньшим ). Поскольку спин пиона равен 0, то для него спин-орбитальное взаимодействие будет отсутствовать, и энергия перехода равна . Окончательно .

P.S.1. Строго говоря, надо проверить, что область локализации состояний и , вычисленная для идеального осциллятора, окажется меньше размеров ядра. Как показано в 2002 3А,Б , а соответственно,  . Поэтому в условии и написано оценить.

Задача 5

При поглощении и излучении фотонов должен выполняться закон сохранения четности: произведение четностей начального  и конечного  состояний равно  для  фотонов или  для . Поэтому для фотонов  начальное и конечное колебательные состояния молекулы должны иметь различную пространственную четность. Поскольку в задаче об одномерном осцилляторе четность волновой функции определяется четностью квантового числа *n*, то для излучения красного спутника картина выглядит так (стрелка слева – поглощаемый фотон, а справа – излучаемый)

*n+*3

*n+*2

*n+*1

*n*

*n-*1

*n-*2

а для фиолетового спутника - так

*n+*1

*n*

*n-*1

*n-*2

Отсюда следует, что или , откуда , что соответствует длине волны . Частота падающего фотона , что соответствует длине волны .

Задача 6

Кулоновский потенциал внутри ядра



это потенциал трехмерного гармонического осциллятора, с уровнями энергии



Поскольку энергия гамма-кванта равна расстоянию между уровнями, то  и



*Дополнение*. Из теории гармонического осциллятора характерный размер орбитали



Таким образом *a* примерное в 2,5 раза меньше чем *R* – т.е. предположение о локализации тау-лептона в ядре хорошо оправдано. Время жизни -лептона , что много больше «характерного времени оборота» тау-лептона на орбитали . Время жизни возбужденного состояния можно оценить из полуклассических соображений:



Итак  т.е. все косвенно сделанные предположения оправданы.

Задача 7

Т.к. туннелирование является изоэнергетическим процессом, энергия альфа-частицы на бесконечности равна энергии частицы в потенциальной яме, созданной сильным и кулоновским взаимодействиями. Поскольку массовое число у обоих ядер одинаково, то вклад сильного взаимодействия в энергию альфа-частицы для двух ядер будет одинаковым. Одинаковым будет и вклад кинетической энергии. Вся разница будет связана с различным вкладом отталкивательного кулоновского потенциала – потенциала однородно заряженного шара

.

Здесь *w* = const – плотность вероятности обнаружить альфа-частицу в произвольной точке ядра, а интегрирование идет по объему шара. Вычисляя интегралы, получаем ==1,30 МэВ. Очевидно, что уровень альфа-частицы в ядре с большим *Z*, будет лежать выше. Т.о. *E*α(Z=92) = *E*α(Z=94) –Δ*E* = 5,50-1,30=4,20 МэВ. Подставляя числа в формулу Гейгера-Нэттола, получаем

 или 

Экспериментальное значение ‑ в  раз.

Задача 8

Т.к. туннелирование является изоэнергетическим процессом, энергия альфа-частицы на бесконечности равна энергии частицы в потенциальной яме, созданной сильным и кулоновским взаимодействиями. Поскольку массовое число у обоих ядер одинаково, то вклад сильного взаимодействия в энергию альфа-частицы для двух ядер будет одинаковым. Одинаковым будет и вклад кинетической энергии. Вся разница будет связана с различным вкладом отталкивательного кулоновского потенциала – потенциала однородно заряженного шара

.

Здесь *w* = const – плотность вероятности обнаружить альфа-частицу в произвольной точке ядра, а интегрирование идет по объему шара. Вычисляя интегралы, получаем ==1,32 МэВ,

*E*α(Z=90) = *E*α(Z=88) +Δ*E* = 4,78+1,32=6,10 МэВ.

Подставляя числа в формулу Гейгера-Нэттола, получаем

 или  с.

Экспериментальное значение 1900 с.

Задача 9

При учете сверхтонкого взаимодействия угловые моменты электронов оболочки *J* и ядра *I* больше не являются интегралами движения. Сохраняющейся величиной является полный (суммарный) момент атома . Поскольку электрон в атоме трития находится в основном состоянии 1*s*1/2, то *L*=0, а *J*=*S*=1/2. Согласно оболочечной модели два нейтрона и протон ядра трития занимают ядерный уровень 1*s*1/2. При этом суммарная проекция полного момента нейтронов равна 0 и, следовательно, полный момент ядра *I* определяется неспаренным протоном и равен ½. Полный момент атома может принимать два значения: *F* = 0 и *F* = 1, причем *E*эл (*F* = 1) - *E*эл (*F* = 0) = *hf*0.

При помещении газа в магнитное поле, уровни энергии электрона *E*эл расщепляются – эффект Зеемана. Тип эффекта – простой или сложный – определяется сравнением величин *h f*0 и μБ*В*0 (энергия взаимодействия c магнитным моментом протона на три порядка меньше, поэтому ей мы пренебрегаем). Подставляя числа, получаем: μБ*В*0/*h* = 1,4 (МГц/Э)50 Гс = 70 МГц << *f*0 = 1517 МГц. Следовательно, эффект сложный и будет происходить расщепление каждого уровня сверхтонкой структуры.

По аналогии с определением фактора Ланде при спин-орбитальном взаимодействии можно найти и ядерный *g*-фактор при сверхтонком взаимодействии. «Мгновенный» магнитный момент электрона  надо спроектировать на направление сохраняющегося вектора : , где



а . В нашей задаче  при любом *F*, поскольку *J* = *I*.

Энергия взаимодействия магнитного момента электрона (атома) с внешним полем



Таким образом верхний уровень *F* = 1 расщепится на три подуровня : , , а нижний - с *F* = 0 не расщепится совсем: .

Поскольку температура близка к 0 К, нижний уровень (*F* = 0) будет заполнен, а верхний (*F* = 1) – пуст. В результате резонансное поглощение может происходить с нижнего, нерасщепленного магнитным полем, подуровня на верхние три подуровня. Окончательно, резонансные частоты: переход  70 = 1447 МГц; переход   МГц; переход   = 1587 МГц.

В первом и третьем случае переменное магнитное поле нормально к постоянному, а во втором – параллельно.

Задача 10

При учете сверхтонкого взаимодействия угловые моменты электронов оболочки *J* и ядра *I* больше не являются интегралами движения. Сохраняющейся величиной является полный (суммарный) момент атома . Поскольку электрон в атоме трития находится в основном состоянии 1*s*1/2, то *L*=0, а *J*=*S*=1/2. Согласно оболочечной модели два нейтрона и протон ядра трития занимают ядерный уровень 1*s*1/2. При этом суммарная проекция полного момента нейтронов равна 0 и, следовательно, полный момент ядра *I* определяется неспаренным протоном и равен ½. Полный момент атома может принимать два значения: *F* = 0 и *F* = 1, причем *E*эл (*F* = 1) - *E*эл (*F* = 0) = *hf*0.

При помещении газа в магнитное поле, уровни энергии электрона *E*эл расщепляются – эффект Зеемана. Тип эффекта – простой или сложный – определяется сравнением величин *h f*0 и μБ*В*0 (энергия взаимодействия c магнитным моментом протона на три порядка меньше, поэтому ей мы пренебрегаем).

В данном случае μБ*В*0/*h* = 1,4 (МГц/Э) 45000 Гс ≈ 63 ГГц >> *f*0 = 1,42 ГГц и в нулевом приближении можно пренебречь сверхтонким взаимодействием (связью моментов электрона и протона) по сравнению с энергией зеемановского взаимодействия электронного спина с внешним магнитным полем. В этом случае полные моменты оболочки *J* и ядра *I* сохраняются, т.е. интегралами движения являются величины их квадратов и *z*-проекций. Дополнительная магнитная энергия атома - энергия взаимодействия магнитного момента атома с внешним магнитным полем и энергия магнитного сверхтонкого взаимодействия оболочки с ядром - имеет вид

.

Здесь ,  и учтено, что знаки зарядов электрона и протона различны. В случае сильного поля дополнительная энергия принимает вид (см. задачу 6.56)

.

Каждый подуровень энергии будет характеризоваться двумя значениями проекций моментов оболочки и ядра на направление магнитного поля . Расположение подуровней по возрастанию энергии с учетом того, что , будет выглядеть следующим образом

 ,

 ,

 ,

 .

При температуре близкой к абсолютному нулю будет заполнен самый нижний уровень . Поэтому возможны следующие переходы:

1) с переворотом ядерного спина :  с частотой  (длина волны примерно 30 см);

2) с переворотом электронного спина  с частотой ;

3) с одновременным переворотом электронного и протонного спинов  с частотой  Два последних перехода соответствуют длине волны примерно 2,5 мм.

Задача 11

При учете сверхтонкого взаимодействия угловые моменты электронов оболочки *J* и ядра *I* больше не являются интегралами движения. Сохраняющейся величиной является полный (суммарный) момент атома . Поскольку электрон в атоме трития находится в основном состоянии 1*s*1/2, то *L*=0, а *J*=*S*=1/2. Согласно оболочечной модели два нейтрона и протон ядра трития занимают ядерный уровень 1*s*1/2. При этом суммарная проекция полного момента нейтронов равна 0 и, следовательно, полный момент ядра *I* определяется неспаренным протоном и равен ½. Полный момент атома может принимать два значения: *F* = 0 и *F* = 1, причем *E*эл (*F* = 1) - *E*эл (*F* = 0) = *hf*0.

Поскольку электрон в атоме дейтерия находится в основном состоянии 1*s*1/2, то *L*=0, а *J*=*S*=1/2. Полный момент атома  может принимать два значения: *F* = 1/2 и *F* = 3/2, причем *E*эл (*F* = 3/2) - *E*эл(*F* = 1/2) = *hf*0.

Определим тип эффекта Зеемана в данной задаче. Подставляя числа, получаем: μБ*В*0/*h* = 1,4 (МГц/Э)20 Гс ≈ 28 МГц << *f*0 = 327 МГц. Следовательно, эффект сложный и будет происходить расщепление каждого уровня сверхтонкой структуры.

По аналогии с определением фактора Ланде при спин-орбитальном взаимодействии можно найти и ядерный *g*-фактор при сверхтонком взаимодействии. «Мгновенный» магнитный момент электрона  надо спроектировать на направление сохраняющегося вектора : , где



а . Подставляя числа, получим , а .

В магнитном поле нижний уровень сверхтонкой структуры расщепится на два подуровня, а верхний – на четыре. Из-за разного знака *g*-факторов у уровня *F* = 1/2 ниже по энергии будет лежать проекция *mF* = +1/2, а у уровня *F* = 3/2 - проекция *mF* = - 3/2. При температуре абсолютного нуля заполен будет подуровень с *mF*= +1/2 у уровня *F* = 1/2. Максимальная частота поля будет соответствовать разрешенный переход . Частота этого перехода



Подставляя числа, получаем  МГц.

Задача 12

Уровни энергии с нулевым орбитальным моментом в такой яме находятся из условий

, ,

где .

Условие появления уровня с номером  в указанной яме:, откуда  и .Следовательно, глубина ямы Для , получаем .

Для первого уровня , , поскольку для  и. В первом приближении  и , откуда.

Задача 13

Максимальная энергия отдачи ядра соответствует максимальному импульсу отдачи, что возможно, если пара как целое вылетает в направлении противоположном направлению импульса фотона. Запишем законы сохранения энергии и импульса (*P* – импульс ядра, *p* – импульс пары как целого)

,

.

Из этих двух уравнений получаем

.

Даже если ядро уносит весь импульс фотона (), то  и поэтому

.

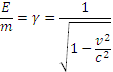
Следовательно, можно отбросить все члены в левой части по сравнению с членами в правой. Тогда получаем

.

Откуда (знак «–» отбрасываем) , и

МэВ = 21, 5 кэВ.

Задача 14

Определим скорость массивного нейтрино из соотношения *E/mс*2 = (1–*v*2/*c*2)–1/2. Получаем *v/c* = [1– (*mс*2/*E*)2]1/2. Задержка по времени между вспышкой света и вспышкой нейтрино равна   
Δ*t = l/v –l/c =* (*l/c*) (*c/v –* 1). Используя разложение в ряд Тейлора по малой величине *mc*2/*E*, получаем: Δ*t =* (*l/*2*c*) (*mc*2*/E*)2 = 0,85·10-13 года ≈ 2,7 мкс.

Задача 15

Увеличение длины волны фотона при комптоновском рассеянии на угол *θ*: Δλ = =2ΛК sin2 *θ/*2, где ΛК  – комптоновская длина волны электрона, равная 2,4·10-10 см. Для оценки можно считать, что за один акт рассеяния фотон теряет половину максимально возможной энергии, т.е. длина волны увеличивается при любом акте рассеяния на ΛK. Длина свободного пробега фотона *L* = 1/*nσ* = 1,5·1021 см, а время между двумя последовательными столкновениями τ = *L/c* = = 0,5·1011 с. Начальная длина волны фотона λнач = 0,3·10-8 см, конечная λкон = 10λнач = 3·10-8 см. В результате получаем, что необходимое число актов рассеяния N = (λкон  – λнач)/ ΛК = 100, а полное время *t* = *Nτ =* 5 ·1012 с =1,7·105 лет.

Задача 16

Пороговое значения скорости мюона найдем из условия *v=c/n* . Тогда пороговая энергия мюона равна

МэВ.

Пренебрегая отдачей нейтрона, запишем закон сохранения энергии . Отсюда

 МэВ

Задача 17

Энергия фотона после рассеяния

 .

Модуль искомой составляющей импульса электрона

, где .

Дифференцируя, находим условие экстремума: , откуда

.

Задача 18

### Поскольку импульс отдачи ядра лития и импульс нейтрино равны, то закон сохранения энергии примет вид (*Т* – кинетическая энергия ядра лития)

### .

Здесь учтено, что в силу очень большой массы по сравнению с нейтрино движение ядра лития можно описывать нерелятивистскими формулами: . Кроме того, кинетическая энергия ядра лития ничтожно мала по сравнению с массами покоя ядер. Уединяя корень и возводя в квадрат, получим после отбрасывания члена *T*2

.

Считая, что масса электронного нейтрино равна нулю (по крайней мере, она пренебрежимо мала по сравнению с массой стерильного нейтрино), получаем

мэВ.

Задача 19

*= 0.15 Тл*

Задача 20

протонов.

Задача 21

Задача 22