

УТВЕРЖДЕНО  
Проректор по учебной работе  
и довузовской подготовке  
А. А. Воронов  
30 мая 2018 года

## ПРОГРАММА

по дисциплине: Общая физика: квантовая физика  
по направлению подготовки: 03.03.01 «Прикладные математика и физика»  
физтех-школа: для всех физтех-школ  
кафедра: общей физики  
курс: 3  
семестр: 5

Трудоёмкость:

теор. курс: базовая часть – 2 зач. ед.;

физ. практикум: базовая часть – 3 зач. ед.;

лекции – 30 часов

практические (семинарские)

занятия – 30 часов

лабораторные занятия – 60 часов

Диф. зачёт – 5 семестр

Диф. зачёт – 5 семестр

ВСЕГО АУДИТОРНЫХ ЧАСОВ – 120

Самостоятельная работа:

теор. курс – 30 часов

физ. практикум – 75 часов

Программу и задание составили:

к.ф.-м.н., доц. Глазков В.Н.

д.т.н., проф. Кубышкин А.В.

д.ф.-м.н., проф. Морозов А.И.

к.т.н., доц. Овчинкин В.А.

д.ф.-м.н., проф. Петров Ю.В.

к.ф.-м.н., доц. Раевский А.О.

Программа принята на заседании кафедры общей физики 25 мая 2018 г.

Заведующий кафедрой  
д.ф.-м.н., профессор

А. В. Максимычев

## КВАНТОВАЯ ФИЗИКА

**Лекция 1. Ультрафиолетовая катастрофа. Гипотеза Планка. Законы излучения АЧТ.** Основные нерешенные проблемы классической физики на рубеже XIX–XX веков. Подсчет числа состояний поля в заданном объеме; фазовый объём, приходящийся на одно квантовое состояние, плотность состояний. Формула Рэлея–Джинса и ультрафиолетовая катастрофа, формула Вина. Гипотеза Планка, распределение Планка. Закон смещения Вина. Равновесное излучение как идеальный газ фотонов. Абсолютно черное тело. Законы Кирхгофа, Ламберта и Стефана–Больцмана.

**Лекция 2. Корпускулярные свойства электромагнитных волн.** Основные экспериментальные результаты по внешнему фотоэффекту. Гипотеза Эйнштейна относительно квантов света (фотонов). Уравнение Эйнштейна и объяснение фотоэффекта. Импульс фотона. Эксперимент Комптона по рассеянию рентгеновских лучей на лёгких ядрах, формула для изменения длины волны квантов при рассеянии на свободных электронах, комптоновская длина волны.

**Лекция 3. Волновые свойства частиц. Соотношение неопределенностей.** Гипотеза де Бройля о волновых свойствах материальных частиц – корпускулярно-волновой дуализм. Длина волны де Бройля нерелятивистской частицы. Опыты Девиссона–Джермера и Томсона по дифракции электронов. Критерий квантовости системы. Соотношения неопределенностей (координата–импульс; энергия–время). Виртуальные частицы. Радиус взаимодействия при обмене виртуальными частицами (фундаментальными бозонами). Волновая функция свободной частицы (волна де Бройля). Вероятностная интерпретация волновой функции, выдвинутая Борном. Гипотеза Эйнштейна о скрытых параметрах, неравенства Белла и их экспериментальная проверка.

**Лекция 4. Формализм квантовой механики.** Понятие об операторах физических величин. Операторы координаты, импульса, потенциальной и кинетической энергии системы, гамильтониан. Собственные функции и собственные значения. Уравнение Шредингера. Свойства волновой функции стационарных задач: непрерывность, конечность, однозначность, непрерывность производной. Принцип суперпозиции квантовых состояний. Формула для среднего значения физической величины в заданном состоянии. Закон сохранения вероятности, вектор плотности потока вероятности (без вывода). Процесс квантового измерения физической величины – возможность получения только ее собственных значений в процессе идеального измерения. Редукция волновой функции в процессе измерения. Необходимость серии идентичных измерений. Критерий возможности одновременного измерения нескольких физических величин.

**Лекция 5. Потенциальные барьеры. Потенциальные ямы. Осциллятор.** Рассеяние частиц на потенциальной ступеньке конечной высоты, прохождение частицы над ямами и барьерами конечной ширины, эффект Рамзауэра. Прохождение частицы через прямоугольный потенциальный барьер конечной ширины (туннельный эффект), вывод формулы для прозрачности барьера произвольной формы в квазиклассическом приближении. Бесконечно глубокая потенциальная яма. Состояния частицы в одномерной симметричной потенциальной яме конечной глубины. Связанные состояния в такой яме. Уровни энергии одномерного гармонического осциллятора (без вывода).

**Лекция 6. Движение в центральном поле. Колебательные и вращательные спектры молекул.** Оператор момента импульса. Квантование собственных значений проекции момента на выделенную ось и квадрата момента импульса. Движение в центральном поле, центробежная энергия, радиальное квантовое число, кратность вырождения,  $s$ -состояния в трёхмерной сферически симметричной яме конечной глубины, условие существования связанного состояния. Вращательные и колебательные уровни молекул, энергетический масштаб соответствующих возбуждений (иерархия молекулярных спектров).

**Лекция 7. Водородоподобные атомы. Магнитный момент. Спин. Тонкая и сверхтонкая структура атома водорода.** Модели атома Томсона и Резерфорда. Закономерности оптических спектров атомов. Движение в кулоновском поле. Феноменологическая теория Бора. Спектр атома водорода и водородоподобных атомов, главное квантовое число, кратность вырождения, изотопический сдвиг. Мезоатомы. Качественный характер поведения радиальной и угловой частей волновой функции. Волновая функция основного состояния. Магнитный орбитальный момент электронов, гиромагнитное отношение,  $g$ -фактор, магнетон Бора. Опыт Штерна–Герлаха. Гипотеза Уленбека и Гаудсмита о спине электрона, спиновый  $g$ -фактор. Опыт Эйнштейна–Гааза. Векторная модель сложения спинового и орбитального моментов электрона, оператор полного момента импульса, фактор Ланде.

**Лекция 8. Тожественность частиц. Обменное взаимодействие. Сложные атомы.** Тожественность частиц, симметрия волновой функции относительно перестановки частиц, бозоны и фермионы, принцип Паули. Обменное взаимодействие. Сложные атомы. Самосогласованное поле. Электронная конфигурация атома. Правило Маделунга–Клечковского. Таблица Менделеева. Атомные термы, метод нахождения термов для заданной электронной конфигурации, спектроскопическая запись состояния атома. Правила Хунда. Характеристическое рентгеновское излучение (закон Мозли).

**Лекция 9. Спин-орбитальное взаимодействие. Атом в магнитном поле. Эффект Зеемана. Излучение, правила отбора.** Спин-орбитальное взаимодействие. Типы связи: Рассела–Саундерса ( $LS$ ) и  $j-j$ . Тонкая структура терма

для случая  $LS$ -связи. Эффект Зеемана для случаев слабого и сильного магнитных полей на примере  $3P-3S$ -переходов. Сверхтонкое взаимодействие. Понятие спина (спиральности) фотона, полный момент и четность. Классификация фотонов по полному моменту и четности ( $E$ - и  $M$ -фотоны), отношение вероятностей излучения фотонов различной мультипольности. Вероятность дипольного излучения (закон  $\omega^3$ ). Естественная ширина уровня.

**Лекция 10. ЭПР и ЯМР. Спонтанное и вынужденное излучение. Лазеры.** Ядерный и электронный магнитный резонанс (квантовомеханическая трактовка). Строгие и нестрогие правила отбора при поглощении и испускании фотонов атомами (на примере эффекта Зеемана и ЯМР). Двухуровневая квантовая система в поле равновесного излучения, принцип детального равновесия, спонтанные и индуцированные переходы, соотношения Эйнштейна и его вывод распределения Планка. Прохождение излучения через среду, условие усиления (инверсная заселённость уровней). Принцип работы лазера и его устройство.

**Лекция 11. Ядерные модели.** Эксперименты Резерфорда и Гейгера по рассеянию  $\alpha$ -частиц в газах. Открытие нейтрона Чадвиком. Экспериментальная зависимость удельной энергии связи ядра от массового числа  $A$ . Свойства ядерных сил: радиус действия, глубина потенциала, насыщение ядерных сил, спиновая зависимость. Ядерные силы как проявление сильного взаимодействия. Модель Юкавы. Модель жидкой заряженной капли. Формула Вайцзеккера для энергии связи ядра. Оболочечная модель и магические числа в осцилляторном потенциале. Одночастичные и коллективные возбуждённые состояния ядра.

**Лекция 12. Радиоактивность. Альфа, бета, гамма распада.** Радиоактивность. Закон радиоактивного распада, константа распада, период полураспада, среднее время жизни, вековое уравнение. Альфа-распад, закон Гейгера–Нэттола и его вывод (формула Гамова). Бета-распад, энергетический спектр бета-распада, гипотеза нейтрино и его опытное обнаружение, внутренняя конверсия электронов,  $K$ -захват. Гамма-излучение, изомерия ядер. Спонтанное деление ядер, механизм формирования барьера деления – зависимость кулоновской и поверхностной энергии от деформации, параметр делимости, энергия, выделяемая при делении ядер, предел стабильности ядер относительно деления.

**Лекция 13. Ядерные реакции. Оценка сечений.** Ядерные реакции: экзо-термические и эндотермические реакции, порог реакции, сечение реакции (полное и парциальные сечения), каналы реакции, ширины каналов. Составное ядро. Нерезонансная теория – классическое сечение, поправки на волновой характер частиц, коэффициент проникновения частицы в прямоугольную яму, закон Бете (на примере проникновения частицы в прямоугольную яму).

Резонансные реакции — формула Брейта–Вигнера. Деление ядер под действием нейтронов, мгновенные и запаздывающие нейтроны, цепная реакция деления. Роль запаздывающих нейтронов в работе ядерного реактора. Схема реактора на тепловых нейтронах.

**Лекция 14. Фундаментальные взаимодействия и частицы. Элементарные частицы.** Методы регистрации элементарных частиц. Фундаментальные взаимодействия и фундаментальные частицы (лептоны, кварки и переносчики взаимодействий). Законы сохранения и внутренние квантовые числа. Кварковая структура адронов — мезоны, барионы и резонансы. Адронные струи. Квантовая хромодинамика, асимптотическая свобода. Гипотеза конфайнмента кварков и глюонов, кварковый потенциал. Оценка адронных сечений при высоких энергиях на основе кварковой структуры. Открытие  $W$ - и  $Z$ -бозонов,  $t$ -кварка и бозона Хиггса. Стандартная модель. Несохранение чётности при бета-распаде, опыт Ву. Проблема солнечных нейтрино, нейтринные осцилляции.

### Литература

#### Основная литература

1. Ципенюк Ю.М. Квантовая микро- и макрофизика. – М.: Физматкнига, 2006.
2. Белонучкин В.Е., Заикин Д.А., Ципенюк Ю.М. Основы физики. Т. II / под ред. Ю.М. Ципенюка. – М.: Физматлит, 2006.
3. Карлов Н.В., Кириченко Н.А. Начальные главы квантовой механики. – М.: Физматлит, 2006.
4. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т.5. Ч. I. Ч. II. – М.: Наука, 1989.
5. Сборник задач по общему курсу физики. Ч. 3. Атомная и ядерная физика / под ред. В.А. Овчинкина. – 2-е изд, 2009.
6. Ишиханов Б.С., Капитонов И.М., Юдин Н.П. Частицы и атомные ядра. – М.: ЛКИ, 2007.

#### Дополнительная литература

7. Гольдин Л.Л., Новикова Г.И. Введение в квантовую физику. – М.: Наука, 1988.
8. Крылов И.П. Основы квантовой физики и строение вещества: учебное пособие. – М.: МФТИ, 1989.
9. Фаддеев М.А., Чупрунов Е.В. Лекции по атомной физике. – М.: Физматлит, 2008.
10. Казаков Д.И. Хиггсовский бозон открыт: что дальше? // УФН. – 2014. – Т. 184, № 10. – С. 1004.

**ЗАДАНИЕ ПО ФИЗИКЕ**  
**для студентов 3-го курса**  
**на осенний семестр 2018–2019 учебного года**

№ сем.	Даты	Темы семинарских занятий	Задачи группы 1
1	1–7 сен.	Законы излучения АЧТ.	0-1-1, 0-1-2, 1.22*, 1.26*, 1.30*, 1.38*, 1.44*, 1.50*
2	8–14 сен.	Фотоэффект. Эффект Комптона.	0-2-1, 0-2-2, 1.7, 1.18, 1.23, 1.35, 1.39, 1.48
3	15–21 сен.	Волны де Бройля. Соотношение неопределенностей.	0-3-1, 0-3-2, 2.10, 2.15, 2.26, 2.30, 2.31, 2.44
4	22–28 сен.	Уравнение Шредингера. Потенциальные барьеры. Туннельный эффект.	0-4-1, 0-4-2, 3.27, 3.33, 3.40, 3.41, 3.45, Т.1.
5	29 сен. – 5 окт.	Потенциальные ямы. Квазиклассическое приближение.	0-5-1, 0-5-2, 3.14, 2.38, 3.5, 3.6, 3.21, 3.49
6	6–12 окт.	Колебательные и вращательные уровни. Водородоподобные атомы.	0-6-1, 0-6-2, 5.13, 5.25, 5.31, 4.19, 4.28, 4.29.
7	13–19 окт.	Магнитный момент. Спин. Обменное взаимодействие. Сложные атомы. Тонкая и сверхтонкая структуры.	0-7-1, 0-7-2, 6.10, 6.15, 6.78, Т.2, 6.20, 6.48, 6.77
8	20–26 окт.	К о н т р о л ь н а я   р а б о т а	
9	27 окт. – 2 нояб.	С д а ч а   1-г о   з а д а н и я	
10	3–9 нояб.	Атом в магнитном поле. Эффект Зеемана. Излучение, правила отбора. ЭПР и ЯМР. Лазеры	0-10-1, 0-10-2, 6.22, 6.34, 6.57, 6.59, Т.3, Т.4, 1.59*, 1.73*
11	10–16 нояб.	Ядерные модели. Радиоактивность.	0-11-1, 0-11-2, 7.5, 7.16, 7.32, 7.51, 7.58, 7.64
12	17–23 нояб.	Ядерные реакции.	0-12-1, 0-12-2, 7.10, 8.11, 8.62, 8.68, 9.4, 9.11
13	24–30 нояб.	Фундаментальные взаимодействия и частицы. Сильное взаимодействие.	0-13-1, 0-13-2, 10.7, 10.60, 10.62, 10.70, 10.90, Т.5, Т.6

14	1–7 дек.	Фундаментальные взаимодействия и частицы. Слабое взаимодействие.	0-14-1, 0-14-2, 10.49, 10.73, 10.85, 10.95, Т.7, Т.8
15	8–14 дек.	С д а ч а 2-го з а д а н и я	
16	15–21 дек.	Обсуждение вопросов по выбору З а ч ё т	

Номера задач указаны по Сборнику задач по общему курсу физики. Ч. III. Атомная и ядерная физика. Строение вещества / под ред. В.А. Овчинкина. – М.: Физматкнига, 2009.

Задачи, отмеченные \*, берутся из раздела 2 этого задачника.

В каждой теме семинара задачи разбиты на 2 группы:

- 0 — задачи для самостоятельного решения студентами к предстоящему семинару. При необходимости эти задачи разбираются на семинаре;
- 1 ... 10, Т — задачи, рекомендованные для обсуждения на семинаре и для самостоятельного решения после него.

Все задачи должны быть решены и оформлены в тетради для сдачи задания. Преподаватель по своему усмотрению разбирает часть задач на семинаре. Возможен разбор и других равноценных задач.

### Контрольные задачи и вопросы к семинарам (задачи группы 0)

**0-1-1.** Вследствие повышения температуры положение максимума спектральной энергетической светимости абсолютно черного тела переместилось с 2 мкм на 1 мкм. Во сколько раз изменилась его интегральная энергетическая светимость?

**0-1-2.** Оценить давление теплового излучения во внутренней области Солнца, где температура равна  $1,3 \cdot 10^7$  К.

**0-2-1.** В опытах П.Н. Лебедева, доказавшего существование светового давления, падающий световой поток составлял  $6 \text{ Вт/см}^2$ . Вычислить давление, которое испытывали зачернённые и зеркальные лепестки его измерительной установки.

**0-2-2.** Монохроматическое гамма-излучение рассеивается на покоящихся электронах. Найти частоту излучения, рассеиваемого назад, если энергия налетающего фотона равна энергии покоя электрона.

**0-3-1.** Определить кинетическую энергию электрона, при которой его дебройлевская и комптоновская длины волн равны между собой.

**0-3-2.** Исходя из соотношения неопределенностей, оцените минимальную энергию осциллятора с частотой  $\omega$ .

**0-4-1.** Найти минимальную кинетическую энергию электрона, при которой он без отражения пройдёт над одномерной прямоугольной потенциальной ямой глубиной  $U = 2,5$  эВ, размером  $a = 2r_B$ ,  $r_B$  – боровский радиус.

**0-4-2.** Электрон с энергией 3 эВ проходит через прямоугольный потенциальный барьер высотой 5 эВ и шириной 3 Å. Во сколько раз должна возрасти высота барьера, чтобы вероятность прохождения через барьер упала в 10 раз?

**0-5-1.** Частица массой  $m$  заключена в одномерном потенциальном ящике шириной  $l$  с непроницаемыми стенками. Найти работу, которую надо затратить на квазистатическое сжатие ящика вдвое, если частица находится в основном состоянии.

**0-5-2.** Незвестная частица заключена в одномерном потенциальном ящике с непроницаемыми стенками. Какова масса этой частицы, если при ширине ящика 3 Å. расстояние между первым и третьим уровнями частицы в яме составляет 5 эВ?

**0-6-1.** При какой температуре средняя энергия поступательного движения молекулы  $O_2$  равна энергии, необходимой для возбуждения ее на первый вращательный уровень? Межъядерное расстояние в молекуле равно 1,2 Å.

**0-6-2.** Электрон с энергией 12,5 эВ сталкивается с неподвижным атомом водорода, находящимся в основном состоянии. Найдите минимально возможную энергию рассеянного электрона. Энергию отдачи атома не учитывать.

**0-7-1.** Определить возможные значения полного углового момента электрона и его проекции на выделенную ось в атоме водорода, находящемся в возбужденном состоянии с главным квантовым числом  $n = 3$ .

**0-7-2.** Атом водорода находится в  $2p$ -состоянии. Определить возможные значения полного момента количества движения.

**0-10-1.** Для получения тепловых нейтронов (с максвелловским распределением скоростей, отвечающим температуре  $T = 300$  К) поток нейтронов из реактора направляют в сосуд с тяжёлой водой (модератор), размер которого много больше длины пробега нейтрона в воде. Избавляясь от избытка энергии при столкновениях с ядрами дейтерия, нейтроны термализуются после нескольких десятков столкновений. Найти, чему будет равна относительная разность чисел тепловых нейтронов, магнитные моменты которых направлены по полю или против поля, если модератор поместить в магнитное поле индукцией  $B = 10$  Тл.  $g$ -фактор нейтрона равен  $-3.8$ .

**0-10-2.** При какой температуре абсолютно черного тела вероятность индуцированного излучения в видимой области превосходит вероятность спонтанного излучения?



**0-11-1.** Свободное покоившееся ядро  $^{191}\text{Ir}$  с энергией возбуждения 129 кэВ перешло в основное состояние, испустив  $\gamma$ -квант. Вычислить относительное изменение энергии  $\gamma$ -кванта, возникающее в результате отдачи ядра.

**0-11-2.** Препарат полония активностью  $3,7 \cdot 10^9$  распад/с помещен в калориметр теплоёмкостью 1 кал/К. Найти повышение температуры калориметра за 1 час, если известно, что полоний испускает  $\alpha$ -частицы с энергией 5,3 МэВ. Считать период полураспада полония много большим времени эксперимента.

**0-12-1.** В реакции синтеза ядер дейтерия и трития  $d + t \rightarrow \alpha + n + Q$  выделяется энергия  $Q = 17,8$  МэВ. Какова энергия, уносимая нейтроном?

**0-12-2.** Сечение поглощения нейтрино ядром железа составляет  $\sigma = 10^{-42}$  см<sup>2</sup>. Какова вероятность поглотиться для нейтрино, двигающегося по диаметру в ядре Земли? Считать, что ядро состоит из железа ( $A = 56$  а.е.м.,  $\rho = 7,8$  г/см<sup>3</sup>), его радиус  $R = 3000$  км.

**0-13-1.** Определите минимальную кинетическую энергию протона, налетающего на неподвижный протон, необходимую для рождения пары протон-антипротон:  $p + p \rightarrow p + p + p + \bar{p}$ .

**0-13-2.** Оценить среднюю длину свободного пробега и среднее время между двумя соударениями протонов в галактических космических лучах. Считать, что их концентрация  $n = 10^5$  м<sup>-3</sup>, скорость хаотического движения  $v \approx c$ , радиус протона  $R_p = 10^{-13}$  см.

**0-14-1.** Определить энергию релятивистского электрона, если радиус кривизны его следа в камере Вильсона, помещенной в магнитное поле  $B = 10^5$  Гс, составляет 2 м.

**0-14-2.** Какой минимальной энергией должен обладать  $\gamma$ -квант, чтобы он смог родить электрон-позитронную пару? Возможен ли данный процесс в вакууме?

### Текстовые задачи

**Т.1.** На одномерную прямоугольную потенциальную ступеньку высотой  $U_0 > 0$ , расположенную в точке  $x = 0$ , из области  $x < 0$  падают микрочастицы с энергией  $E = U_0/4$ . На каком наименьшем расстоянии слева от ступеньки (в длинах волн де Бройля) плотность вероятности обнаружения частицы будет максимальна и на каком – минимальна?

*Ответ:*  $|x|_{\max} = (1/6)\lambda$ ,  $|x|_{\min} = (5/12)\lambda$ .

**Т.2.** Найти все термы невозбужденного атома углерода, на внешней  $2p$ -оболочке которого находятся два электрона (электронная конфигурация  $1s^2 2s^2 2p^2$ ).

*Ответ:*  $^1D$ ,  $^3P$ ,  $^1S$ .

**Т.3.** В спектре полярных сияний самая интенсивная желто-зеленая линия с  $\lambda = 5577 \text{ \AA}$  (aurora borealis) соответствует переходу между состояниями  $^1S_0$  и  $^1D_2$  нейтрального атома кислорода. Определить тип перехода и оценить время жизни возбужденного состояния, считая, что размер атома кислорода равен  $a = 1,25 \text{ \AA}$ , а характерное время электрических дипольных переходов составляет по порядку величины  $\tau_1 \sim 10^{-7} \text{ с}$ .

*Ответ:* испускается фотон  $E2$ , время жизни состояния  $^1S_0$  составляет примерно:  $\tau_2 \sim \tau_1 / (ka)^2 = \tau_1 \lambda^2 / (2\pi a)^2 = 0,5 \cdot 10^6 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 0,05 \text{ с}$  (точный ответ:  $\tau_2 = 0,7 \text{ с}$ ).

**Т.4.** Ион меди  $\text{Cu}^{2+}$ , входящий в состав многих магнитных солей, имеет электронную конфигурацию внешней незаполненной оболочки  $3d^9$ . 1) Определить, пользуясь правилами Хунда, квантовые числа свободного иона меди  $\text{Cu}^{2+}$ ; записать его спектроскопический символ и вычислить  $g$ -фактор. 2) В ионных кристаллах магнитный ион взаимодействует с электрическим полем своих соседей, поэтому его более нельзя считать свободным и формула Ланде становится неприменимой. В соли  $\text{CuGeO}_3$  (магнитным моментом в этом соединении обладает только ион  $\text{Cu}^{2+}$ ) в одной из ориентаций магнитного поля относительно кристалла резонансное поглощение наблюдается на частоте  $\nu = 36,5 \text{ ГГц}$  в поле  $H = 11,48 \text{ кЭ}$ . Определить по этим данным эффективный  $g$ -фактор иона меди в этом кристалле.

*Ответ:* 1.  $L = 2, S = 1/2, J = L + S = 5/2; ^2D_{5/2}, g = 6/5 = 1,2$ .  
2.  $g_{\text{эф}} = h\nu / (\mu_B B) = 2,27$ .

**Т.5.** Выразить через ядерный магнетон магнитные моменты протона и нейтрона, используя антисимметричность волновой функции тождественных фермионов, зная, что спины нуклонов и кварков равны  $1/2$ , кварки внутри нуклонов находятся в состоянии с нулевым орбитальным моментом, и предполагая, что гиромагнитное отношение для кварка выражается через его заряд и массу аналогично случаю электрона. Считать, что масса кварка в нуклоне (конституэнтного кварка) равна  $1/3$  массы нуклона.

*Ответ:*  $\mu_p = 3\mu_{\text{яд}}, \mu_n = -2\mu_{\text{яд}}$ .

**Т.6.** В экспериментах 2011–2012 гг. на Большом адронном коллайдере (ЦЕРН, Женева) в протон-протонных столкновениях была открыта частица, напоминающая по своим свойствам бозон Хиггса (хиггсон), предсказанный в 1964 г. В соответствии с выводами Стандартной Модели был обнаружен распад предполагаемого бозона Хиггса на два фотона, причем энергии фотонов оказались равными  $E_1 = 70$  ГэВ и  $E_2 = 92$  ГэВ, а угол разлета фотонов —  $\alpha = 103^\circ$ . Найти массу распавшейся частицы.

*Ответ:*  $m_{\text{H}}c^2 = [2E_1 E_2 (1 - \cos \alpha)]^{1/2} = 130$  ГэВ.

**Т.7.** Мюонное нейтрино, попав в жидководородную камеру, рождает промежуточный бозон  $W^+$  ( $m_W c^2 = 81$  ГэВ). Найти минимальную энергию нейтрино.

*Ответ:*  $E \approx (m_W)^2 c^2 / (2m_p) = 3500$  ГэВ.

**Т.8.** Согласно современным представлениям, нейтрино (антинейтрино) рождается и исчезает как частица определенного типа  $\nu_e, \nu_\mu$  или  $\bar{\nu}_e$ , но при этом является суперпозицией состояний  $\nu_1, \nu_2, \nu_3$  с определенными массами. В упрощенной модели (пренебрегая разницей между  $\nu_2$  и  $\nu_3$ ) можно выразить состояния  $\nu_e$  и  $\nu_\mu$  как  $\nu_e = \cos\theta \nu_1 + \sin\theta \nu_2$ ;  $\nu_\mu = -\sin\theta \nu_1 + \cos\theta \nu_2$ , где  $\theta$  — константа, называемая углом смешивания. В реакторном эксперименте Kamland наблюдались осцилляции потока электронных антинейтрино, испускаемых ядерным реактором. Эксперимент показал, что вероятность зарегистрировать электронное антинейтрино с энергией  $E \approx 3$  МэВ осциллирует с расстоянием до реактора с периодом  $L \approx 100$  км. Найти разность квадратов энергий покоя антинейтрино типов 1 и 2 (в эВ<sup>2</sup>), предполагая, что она мала по сравнению с  $E$ , и что в начальный момент времени импульсы антинейтрино типов 1 и 2 совпадали.

*Ответ:*  $(m_2^2 - m_1^2)c^4 = \frac{2Ehc}{L} = 8 \cdot 10^{-5}$  эВ<sup>2</sup>.