

УТВЕРЖДЕНО
Проректор по учебной работе
А. А. Воронов
15 июня 2022 г.

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
лекции – 30 часов
практические (семинарские)
занятия – 30 часов
лабораторные занятия – 60 часов
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. В. Н. Глазков
к.ф.-м.н., доц. А. С. Кобякин
к.т.н., доц. В. А. Овчинкин
д.ф.-м.н., проф. Ю. В. Петров
к.ф.-м.н., доц. А. О. Раевский

Программа принята на заседании
кафедры общей физики 20 мая 2022 г.

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

А. В. Максимычев

КВАНТОВАЯ ФИЗИКА

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 объем, 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.

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

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. Понятие о скрытых параметрах (гипотеза Эйнштейна) и неравенствах Белла.

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. Процесс квантового измерения физической величины — возможность получения только ее собственных значений в процессе идеального измерения. Редук-

ция волновой функции в процессе измерения. Необходимость серии идентичных измерений. Критерий возможности одновременного измерения нескольких физических величин.

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

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, сложение моментов. Движение в центральном поле, центробежная энергия, радиальное квантовое число, кратность вырождения. s -состояния в трёхмерной сферически симметричной яме конечной глубины, условие существования связанного состояния. Адиабатическое приближение в теории молекул. Вращательный и колебательный спектры, энергетические масштабы соответствующих возбуждений.

7. Водородоподобные атомы. Магнитный момент. Спин. Закономерности оптических спектров атомов. Движение в кулоновском поле. Спектр атома водорода и водородоподобных атомов, главное квантовое число, кратность вырождения. Изотопический сдвиг, модель атома Бора. Мезоатомы. Волновая функция основного состояния атома водорода. Качественный характер поведения радиальной и угловой частей волновых функций возбужденных состояний. Магнитный орбитальный момент электронов, гиромангнитное отношение, магнетон Бора. Опыт Штерна–Герлаха, гипотеза о спине электрона, спиновый g -фактор. Опыт Эйнштейна–де Гааза. Оператор полного момента импульса, g -фактор Ланде. Тонкая и сверхтонкая структура спектра атома водорода.

8. Тожественность частиц. Обменное взаимодействие. Сложные атомы. Тожественность частиц, симметрия волновой функции относительно перестановки частиц, бозоны и фермионы, принцип Паули. Обменное взаимодействие. Самосогласованное поле в сложных атомах, электронная конфигурация атома. Правило Маделунга–Клечковского. Таблица

Менделеева. Атомные термы, метод нахождения термов для заданной электронной конфигурации, спектроскопическая запись состояния атома. Правило Хунда. Характеристическое рентгеновское излучение (закон Мозли).

9. Спин-орбитальное и сверхтонкое взаимодействие. Атом в магнитном поле. Эффект Зеемана. Излучение, правила отбора. Спин-орбитальное взаимодействие. Типы связи: Рассела–Саундерса (LS) и $j-j$. Сверхтонкое взаимодействие. Тонкая структура терма для случая LS -связи. Эффект Зеемана для случаев слабого и сильного магнитных полей на примере $3P-3S$ -переходов. Сверхтонкое взаимодействие. Классификация фотонов по полному моменту и чётности (E - и M -фотоны). Интенсивность электродипольного излучения, соотношение интенсивностей излучения фотонов различных типов и мультипольностей. Естественная ширина уровня.

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. Прохождение излучения через среду, условие усиления (инверсная заселённость уровней). Принцип работы лазера.

11. Ядерные модели. Открытие ядра атома (опыты Резерфорда, Гейгера и Марсдена) и его строения (опыты Блэкетта и Чедвика). Энергия связи ядра, 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.

12. Радиоактивность. Альфа-, бета-, гамма-распады. 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, внутренней 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.

13. Ядерные реакции. Оценка сечений. Ядерные реакции: экзотермические и эндотермические реакции, порог реакции, сечение реакции (полное и парциальные сечения), каналы реакции, ширины каналов. Модель составного ядра Бора: классическое геометрическое сечение, поправки на волновой характер движения частиц, закон Бете. 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.

14. Фундаментальные взаимодействия и частицы. Элементарные частицы. Методы регистрации элементарных частиц. Стандартная модель. Законы сохранения и внутренние квантовые числа. Кварковая структура адронов — мезоны и барионы. Новое квантовое число «цвет», обобщенный принцип Паули. Магнитные моменты протона и нейтрона. Резонансы. Адронные струи. Элементы квантовой хромодинамики: асимптотическая свобода, гипотеза конфайнмента кварков и глюонов, кварковый потенциал. Оценка адронных сечений при высоких энергиях. Несохранение чётности при слабом взаимодействии, опыт Ву. Проблема солнечных нейтрино, нейтринные осцилляции.

Литература

Основная

1. *Сивухин Д.В.* Общий курс физики. Т.5. Ч.I. Ч.П. Москва : Наука, 1989.
2. *Ииханов Б.С., Капитонов И.М., Юдин Н.П.* Частицы и атомные ядра. Москва : URSS, 2013.
3. *Ципенюк Ю.М.* Квантовая микро- и макрофизика. Москва : Физматкнига, 2019.
4. *Фаддеев М.А., Чупрунов Е.В.* Лекции по атомной физике. Москва : Физматлит, 2008.
5. *Карлов Н.В., Кириченко Н.А.* Начальные главы квантовой механики. Москва : Физматлит, 2006.
6. *Белонучкин В.Е., Заикин Д.А., Ципенюк Ю.М.* Основы физики. Т.П / под ред. Ю.М. Ципенюка. Москва : Физматлит, 2006.

Дополнительная

1. *Гольдин Л.Л., Новикова Г.И.* Введение в квантовую физику. Москва : Наука, 1988.
2. *Крылов И.П.* Основы квантовой физики и строение вещества : учебное пособие. Москва : МФТИ, 1989.
3. *Рубаков В.А.* К открытию на Большом адронном коллайдере новой частицы со свойствами бозона Хиггса // УФН. 2012. Т. 182, № 10. С.1017.
4. *Казаков Д.И.* Хиггсовский бозон открыт: что дальше? // УФН. 2014. Т. 184, № 10. С. 1004.
5. *Казаков Д.И.* Перспективы физики элементарных частиц // УФН. 2019. Т. 189, № 4. С. 387.

ЗАДАНИЕ ПО ФИЗИКЕ

для студентов 3-го курса на осенний семестр 2022-2023 учебного года

№ сем.	Даты	Темы семинарских занятий	Задачи	
			0	1
1	1 – 7 сен.	Законы излучения АЧТ.	0-1-1, 0-1-2	1.26*, 1.32*, 1.38*, 1.44*, 1.50*, Т.1
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, 2.38. 2.44
4	22 – 28 сен.	Уравнение Шредингера. Потенциальные барьеры. Туннельный эффект.	0-4-1, 0-4-2	3.27, 3.33, 3.35, 3.45, Т.2, Т.3
5	29 сен. – 5 окт.	Потенциальные ямы. Квазиклассическое приближение.	0-5-1, 0-5-2	3.5, 3.6, 3.14, 3.21, 3.23, 3.49
6	6 – 12 окт.	Колебательные и вращательные уровни. Водородоподобные атомы.	0-6-1, 0-6-2	4.29, 4.38, 4.45, 5.16, 5.25, 5.51
7	13 – 19 окт.	Магнитный момент. Спин. Обменное взаимодействие.	0-7-1, 0-7-2	6.8. 6.10, 6.15, 6.66, 6.68, 6.78
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-го з а д а н и я		
10	3 – 9 нояб.	Сложные атомы. Тонкая и сверхтонкая структуры. Эффект Зеемана.	0-10-1, 0-10-2	6.20, 6.48, 6.75, 6.77, 6.80, Т.4
11	10 – 16 нояб.	Излучение, правила отбора. ЭПР и ЯМР.	0-11-1, 0-11-2	6.21, 6.34, 6.56, 1.56*, 1.57*, Т.5, Т.6
12	17 – 23 нояб.	Ядерные модели. Радиоактивность.	0-12-1, 0-12-2	7.5, 7.16, 7.20, 7.51, 7.58, 7.64
13	24 – 30 нояб.	Ядерные реакции.	0-13-1, 0-13-2	7.10, 8.45, 8.62, 8.68, 9.4, 9.11
14	1 – 7 дек.	Фундаментальные взаимодействия и частицы. Сильное взаимодействие.	0-14-1, 0-14-2	10.7, 10.24, 10.62, 10.70, Т.7, Т.8
15	8 – 14 дек.	Фундаментальные взаимодействия и частицы. Слабое взаимодействие.	0-15-1, 0-15-2	10.52, 10.73, 10.75, 10.85, 10.92, Т.9
16	15 – 21 дек.	С д а ч а 2-го з а д а н и я		

Номера задач указаны по задачнику «Сборник задач по общему курсу физики. Ч. III. Атомная и ядерная физика. Строение вещества» / под ред. В. А. Овчинкина. — Москва : Физматкнига, 2009. Задачи, отмеченные «*», — из раздела 2 этого задачника.

В каждой теме семинара имеются задачи 2-х групп:

0 — задачи для самостоятельного решения студентами к предстоящему семинару. При необходимости эти задачи разбираются на семинаре.

1 — 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.

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 Вт/см². 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 де-бройлевская и комптоновская длины волн равны между собой.

0-3-2. Исходя из соотношения неопределенностей, оцените минимальную энергию осциллятора с частотой ω .

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 массы 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. Частица массы m заключена в одномерном потенциальном ящике с непроницаемыми стенками. Какова масса 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. Найти возможные значения полного спина атома водорода в основном состоянии.

0-7-2. Оценить энергетическое расщепление состояний, найденных в предыдущей задаче, при учете магнитного взаимодействия протона и электрона, рассматриваемых, как точечные магнитные диполи.

0-10-1. Определить возможные значения полного углового момента электрона и его проекции на выделенную ось в атоме водорода, находящемся в возбужденном состоянии с главным квантовым числом $n = 3$.

0-10-2. Атом водорода находится в $2p$ -состоянии. Определить возможные значения полного момента количества движения.

0-11-1. 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 в 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 $-3,8$.

0-11-2. При какой температуре абсолютно черного тела вероятность индуцированного излучения в видимой области превосходит вероятность спонтанного излучения?

0-12-1. Свободное покоившееся ядро ^{191}Ir с энергией возбуждения 129 кэВ перешло в основное состояние, испустив γ -квант. Вычислить относительное изменение энергии γ -кванта, возникающее в результате отдачи ядра.

0-12-2. Препарат полония активностью $3,7 \cdot 10^9$ распад/с помещен в калориметр теплоемкостью 1 кал/К. Найти повышение температуры калориметра за 1 час, если известно, что полоний испускает α -частицы с энергией $5,3$ МэВ. Считать период полураспада полония много большим времени эксперимента.

0-13-1. В реакции синтеза ядер дейтерия и трития $d + t \rightarrow \alpha + n + Q$ выделяется энергия $Q = 17,8$ МэВ. Какова энергия, уносимая нейтроном?

0-13-2. Сечение поглощения нейтрино с энергией более 5 МэВ ядром железа составляет $\sigma = 10^{-42}$ см². Какова вероятность поглотиться для такого нейтрино, двигающегося по диаметру в ядре Земли? Считать, что ядро состоит из железа ($A = 56$ а.е.м., $\rho = 7,8$ г/см³), его радиус $R = 3000$ км.

0-14-1. Определите минимальную кинетическую энергию протона, налетающего на неподвижный протон, необходимую для рождения пары протон–антипротон.

0-14-2. Оценить среднюю длину свободного пробега и среднее время между двумя соударениями протонов в галактических космических лучах. Считать, что их концентрация $n = 10^5$ м⁻³, скорость хаотического движения $v \approx c$, радиус протона $R_p = 10^{-13}$ см.

0-15-1. Определить энергию релятивистского электрона, если радиус кривизны его следа в камере Вильсона, помещенной в магнитное поле $B = 10^5$ Гс, составляет 2 м.

0-15-2. Какой минимальной энергией должен обладать γ -квант, чтобы он смог родить электрон-позитронную пару? Возможен ли данный процесс в вакууме?

Текстовые задачи

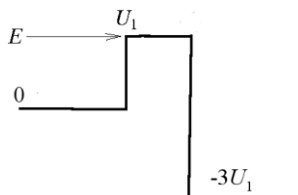
Т1. Средняя температура поверхности Земли составляет 15°C . В результате природных процессов или влияния промышленных выбросов прозрачность атмосферы может измениться. Оценить, как изменится равновесная температура земной поверхности если прозрачность атмосферы уменьшится на 5% для излучения: а) с длиной волны меньше $\lambda_0 = 20\,000\text{ \AA}$; б) с длиной волны более $\lambda_0 = 20\,000\text{ \AA}$. Под прозрачностью понимается доля излучения, преодолевающая расстояние от верхних слоёв атмосферы до поверхности. Считать для оценки, что прозрачность атмосферы постоянна для $\lambda > \lambda_0$ и $\lambda < \lambda_0$.

Ответ: случай а): «ядерная осень», температура понизится на 4°C ;
случай б): «глобальное потепление», температура повысится на 4°C .

Т2. 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: $|x|_{\max} = \lambda/6$, $|x|_{\min} = 5\lambda/12$.

Т3. Какая доля электронов с энергией $E = 1\text{ эВ}$, падающих слева на показанный на рисунке несимметричный потенциальный барьер, сможет его преодолеть? Ширина барьера $l = 7,8\text{ \AA}$.



Ответ: $8/73$.

Т4. Найти все термы невозбужденного атома углерода, на внешней оболочке $2p$ оболочке которого находятся два электрона (электронная конфигурация $1s^2 2s^2 2p^2$).

Ответ: 1D , 3P , 1S .

Т5. 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 время электрических дипольных переходов составляет порядка $\tau_1 \sim 10^{-7}\text{ с}$.

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: $\tau_2 = 0,7 \text{ с}$).

T6. Ион меди Cu^{2+} , входящий в состав многих магнитных солей, имеет электронную конфигурацию внешней незаполненной оболочки $3d^9$.

1) Определить квантовые числа свободного иона меди 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 CuGeO_3 (магнитным моментом в этом соединении обладает только ион 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) $g_{\text{эф}} = h\nu / (\mu_B B) = 2,27$.

T7. В августе 2008 г. группа BABAR Collaboration сообщила о регистрации $\eta_b(1S)$ -мезона — основного состояния боттомониума, соответствующего антипараллельной ориентации спинов пары $(b\bar{b})$ (так называемый *паработтомониум* в состоянии 1^1S_0). На встречных (e^-, e^+)-пучках при суммарной энергии $E = 10\,355 \text{ МэВ}$ рождался $\Upsilon(3S)$ -мезон, соответствующий возбужденному состоянию пары $(b\bar{b})$ с параллельными спинами (так называемый *ортоботтомониум* в состоянии 3^3S_0). Рожденный мезон распался на мезон $\eta_b(1S)$ и γ -квант: $\Upsilon(3S) \rightarrow \eta_b(1S) + \gamma$. Определить массу $\eta_b(1S)$ -мезона и тип испускаемого γ -кванта, если энергия γ -кванта $E_\gamma = 921,2 \text{ МэВ}$. Какова разница в энергиях основных состояний орто- и паработтомониума, определяемая переворотом спинов одного из кварков. Масса основного состояния ортоботтомониума $m_{\Upsilon(1S)} = 9460,4 \text{ МэВ}/c^2$.

Ответ: $m_{\eta_b(1S)} c^2 = E \sqrt{1 - 2E_\gamma/E} = 9388,7 \text{ МэВ}$,

$$\Delta mc^2 = (m_{\Upsilon(1S)} - m_{\eta_b(1S)}) c^2 = 71,7 \text{ МэВ},$$

испускается магнитный дипольный γ -квант ($M1$).

Т8. 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: $m_{\text{H}}c^2 = [2E_1E_2(1-\cos\alpha)]^{1/2} = 130$ ГэВ.

Т9. Мюонное нейтрино, попав в жидководородную камеру, рождает промежуточный бозон W^+ ($m_Wc^2 = 81$ ГэВ). Найти минимальную энергию нейтрино.

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