

УТВЕРЖДАЮ  
Проректор по учебной работе

\_\_\_\_\_ А. А. Воронов  
«\_\_\_» июня 2022 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**

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.

к.ф.-м.н., доц. Кобякин А.С.

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 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. Редукция 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. Прохождение

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, спин-г-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. Правила 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 Блэккетта 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, 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.

**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. За-

коны 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 литература**

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

### **Дополнительная литература**

1. *Гольдин Л.Л., Новикова Г.И.* Введение в квантовую физику. М.: Наука, 1988.
2. *Крылов И.П.* Основы квантовой физики и строение вещества: учебное пособие. М.: 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, Т4
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. — М.: 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  $6 \text{ Вт/см}^2$ . 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  $U = 2,5 \text{ эВ}$  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  $3 \text{ \AA}$ . 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  $3 \text{ \AA}$ , расстояние между первым и третьим уровнями частицы в яме составляет  $5 \text{ эВ}$ ?

**0-6-1.** При какой температуре средняя энергия поступательного движения молекулы  $\text{O}_2$  равна энергии, необходимой для возбуждения ее на первый вращательный уровень? Межъядерное расстояние в молекуле равно  $1,2 \text{ \AA}$ .

**0-6-2.** Электрон с энергией  $12,5 \text{ эВ}$  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  $T = 300 \text{ К}$ ) поток нейтронов из реактора направляют в сосуд с тяжелой 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  $B = 10 \text{ Тл}$ .  $g$ -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  $^{191}\text{Ir}$  с энергией возбуждения 129 кэВ перешло в основное состояние, испустив  $\gamma$ -квант. Вычислить относительное изменение энергии  $\gamma$ -кванта, возникающее в результате отдачи ядра.

**0-12-2.** 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.

**0-13-1.** 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  $\sigma = 10^{-42} \text{ см}^2$ . Какова вероятность поглотиться для такого нейтрино,двигающегося по диаметру в ядре Земли? Считать, что ядро состоит из железа ( $A = 56$  а.е.м.,  $\rho = 7,8 \text{ г/см}^3$ ), его радиус  $R = 3000 \text{ км}$ .

**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  $n = 10^5 \text{ м}^{-3}$ , скорость хаотического движения  $v \approx c$ , радиус протона  $R_p = 10^{-13} \text{ см}$ .

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

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

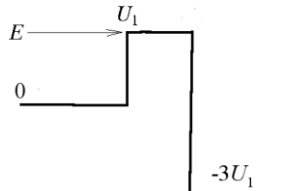
### Текстовые задачи

**T1.** Средняя температура поверхности Земли составляет  $15^\circ\text{C}$ . 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  $\lambda_0 = 20000 \text{ \AA}$ ; б) с длиной волны более  $\lambda_0 = 20000 \text{ \AA}$ . 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  $4^\circ\text{C}$ ; случай б): «глобальное потепление», температура повысится на  $4^\circ\text{C}$ .

**T2.** 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:*  $|x|_{\max} = \lambda/6$ ,  $|x|_{\min} = 5\lambda/12$ .

**T3.** Какая доля электронов с энергией  $E = 1$  эВ, падающих слева на показанный на рисунке несимметричный потенциальный барьер, сможет его преодолеть? Ширина барьера  $l = 7,8$  Å.



*Ответ:*  $8/73$ .

**T4.** Найти все термы невозбужденного атома углерода, на внешней оболочке  $2p$  оболочке которого находятся два электрона (электронная конфигурация  $1s^2 2s^2 2p^2$ ).

*Ответ:*  $^1D$ ,  $^3P$ ,  $^1S$ .

**T5.** В спектре полярных сияний самая интенсивная желто-зеленая линия с  $\lambda = 5577$  Å (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  $a = 1,25$  Å, а время электрических дипольных переходов составляет порядка  $\tau_1 \sim 10^{-7}$  с.

*Ответ:* испускается фотон  $E_2$ , время жизни состояния  $^1S_0$  составляет примерно  $\tau_2 \sim \tau_1/(ka)^2 = \tau_1\lambda^2/(2\pi a)^2 = 0,5 \cdot 10^6 \cdot 10^{-7}$  с =  $0,05$  с (точный ответ:  $\tau_2 = 0,7$  с).

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

1) Определить 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  $\nu = 36,5$  ГГц в поле  $H = 11,48$  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  $E = 10355$  МэВ родился  $\Upsilon(3S)$ -мезон, соответствующий возбужденному состоянию пары  $(b\bar{b})$  с параллельными спинами (так называемый орботтомониум в состоянии  $3^3S_0$ ). Рожденный мезон распадался на мезон  $\eta_b(1S)$  и  $\gamma$ -квант:  $\Upsilon(3S) \rightarrow \eta_b(1S) + \gamma$ . Определить массу  $\eta_b(1S)$ -мезона и тип испускаемого  $\gamma$ -кванта, если энергия  $\gamma$ -кванта  $E_\gamma = 921,2$  МэВ. Какова разница в энергиях основных состояний орто- и паработтомониума, определяемая переворотом спинов одного из кварков. Масса основного состояния орботтомония  $m_{\Upsilon(1S)} = 9460,4$  МэВ/ $c^2$ .

Ответ:  $m_{\eta_b(1S)}c^2 = E\sqrt{1 - 2E_\gamma/E} = 9388,7$  МэВ,  
 $\Delta mc^2 = (m_{\Upsilon(1S)} - m_{\eta_b(1S)})c^2 = 71,7$  МэВ,  
 испускается магнитный дипольный  $\gamma$ -квант ( $M1$ ).

**T8.** 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:  $m_Hc^2 = [2E_1E_2(1 - \cos\alpha)]^{1/2} = 130$  ГэВ.

**T9.** 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.