ЧАСТНОЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ «СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ КОЛЛЕДЖ ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ»

ЛЕКЦИЯ 7. ТЕМА 6. ЭЛЕМЕНТЫ КВАНТОВОЙ ФИЗИКИ

1. Квантовая оптика

Классическая электродинамика, успешно описывая макроскопические электромагнитные явления, оказалась неспособна объяснить спектральный состав теплового излучения: по формуле Рэлея — Джинса интенсивность излучения абсолютно чёрного тела неограниченно растёт с уменьшением длины волны (ультрафиолетовая катастрофа). Разрешение противоречия было найдено в 1900 г. М. Планком.

Квантовая гипотеза Планка. Атомные осцилляторы излучают и поглощают электромагнитную энергию не непрерывно, а отдельными порциями — квантами. Энергия кванта пропорциональна частоте излучения:

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda},$$

где $h = 6{,}626 \times 10^{-34}$ Дж·с — постоянная Планка. На основе этой гипотезы Планк вывел формулу спектральной плотности энергетической светимости абсолютно чёрного тела, точно совпадающую с экспериментом во всём диапазоне частот.

Фотоны. В 1905 г. А. Эйнштейн развил квантовую гипотезу, предположив, что само электромагнитное поле состоит из квантов — фотонов, распространяющихся со скоростью света. Основные характеристики фотона:

$$E = h\nu, \qquad p = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}, \qquad m_{\text{р}} = \frac{E}{c^2} = \frac{h}{c\lambda},$$

где p — импульс, $m_{\text{р}}$ — релятивистская масса. Фотон не имеет массы покоя и всегда движется со скоростью c; это подтверждается существованием светового давления и эффектом Комптона (1923).

Внешний фотоэлектрический эффект. Внешний фотоэффект — вырывание электронов из вещества под действием света (законы установлены А. Г. Столетовым, 1888–1889 гг.). Закономерности: число выбитых электронов пропорционально интенсивности излучения; максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов не зависит от интенсивности, а определяется только частотой; для каждого вещества существует красная граница фотоэффекта — минимальная частота, при которой эффект ещё наблюдается. Классическая волновая теория эти факты объяснить не могла. Уравнение Эйнштейна:

$$h\nu = A + \frac{mv_{\max}^2}{2},$$

где A — работа выхода электрона. Красная граница: $\nu_0 = A/h$. Экспериментальное подтверждение дал Р. Милликен (1916), определивший по вольт-амперным характеристикам постоянную Планка. За теорию фотоэффекта Эйнштейну присуждена Нобелевская премия (1921).

Внутренний фотоэффект. В отличие от внешнего, электроны не покидают вещество, а переходят внутри него из связанных состояний в свободные. К внутреннему фотоэффекту относятся:

- фотопроводимость — увеличение проводимости полупроводника под действием излучения;
- вентильный фотоэффект — возникновение ЭДС на границе полупроводников (p–n-переход), используемое в фотоэлементах солнечных батарей.

Типы фотоэлементов. По принципу действия выделяют: вакуумные фотоэлементы (фотоэлектронная эмиссия в вакууме, малые токи, малая инерционность); газонаполненные фотоэлементы (газовое усиление тока, но большая инерционность); фотоэлектронные умножители (ФЭУ) с каскадным усилением тока, применяемые в спектральных приборах и ядерной физике; полупроводниковые фоторезисторы (изменение сопротивления под действием света); фотодиоды и фототранзисторы; вентильные фотоэлементы — кремниевые солнечные батареи, КПД современных серийных элементов превышает 20%.

2. Физика атома

Развитие взглядов на строение вещества. Идея атома восходит к Демокриту; научное атомистическое учение оформилось в работах Дж. Дальтона (закон кратных отношений), А. Авогадро и Д. И. Менделеева. Открытие электрона Дж. Дж. Томсоном (1897) показало, что атом делим, и привело к модели Томсона — «пудинг с изюмом», в которой электрон вкраплены в положительно заряженную сферу. Эта модель была опровергнута опытами Резерфорда.

Закономерности в атомных спектрах водорода. Эмпирические исследования спектра водорода (И. Бальмер, 1885; И. Ридберг) привели к обобщённой формуле Бальмера — Ридберга:

$$\nu = R\left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right), \qquad R = \frac{c}{4\pi\varepsilon_0^2}\cdot\frac{me^4}{h^3} \approx 3{,}29\times10^{15}\ \text{с}^{-1},$$

где $n_1 = 1, 2, 3, \ldots,\ n_2 = n_1 + 1, n_1 + 2, \ldots$ Сериям соответствуют названия: Лаймана ($n_1 = 1$, ультрафиолет), Бальмера ($n_1 = 2$, видимая область), Пашена ($n_1 = 3$), Брэкета ($n_1 = 4$), Пфунда ($n_1 = 5$). Дискретность спектра не могла быть объяснена классической физикой.

Ядерная модель атома. Опыты Резерфорда. В 1909–1911 гг. Э. Резерфорд с сотрудниками (Г. Гейгер, Э. Марсден) исследовали рассеяние α-частиц на тонкой золотой фольге. Около 1 из 8000 частиц отклонялась на угол более 90°, что невозможно в модели Томсона: такое сильное отклонение требует, чтобы почти вся масса и весь положительный заряд атома были сосредоточены в малом объёме. Резерфорд предложил ядерную (планетарную) модель: в центре атома — ядро размером порядка 10^{-15}–10^{-14} м с зарядом $+Ze$, вокруг которого движутся электроны на расстояниях порядка 10^{-10} м. Однако планетарная модель противоречила классической электродинамике: вращающийся электрон должен непрерывно излучать и упасть на ядро за время порядка 10^{-8} с.

Модель атома водорода по Н. Бору. В 1913 г. Н. Бор разрешил это противоречие, введя два постулата:

1. *Постулат стационарных состояний:* электрон в атоме может находиться лишь на определённых орбитах, не излучая энергии.
2. *Правило частот:* при переходе с орбиты n_2 на орбиту n_1 излучается (или поглощается) квант

$$h\nu = E_{n_2} - E_{n_1}.$$

Условие квантования момента импульса: $mvr = n\hbar,\ n = 1, 2, 3, \ldots$ Отсюда радиусы орбит $r_n = a_0 n^2$ ($a_0 \approx 0{,}529$ нм — первый боровский радиус) и энергия уровней

$$E_n = -\frac{13{,}6 \text{ эВ}}{n^2}.$$

Модель Бора количественно объяснила спектр водорода и подтвердила формулу Ридберга, однако осталась полуклассической: она неприменима к многоэлектронным атомам и не объясняет интенсивность спектральных линий. Последовательное квантовое описание дала волновая механика (Л. де Бройль, 1924: волновые свойства частиц $\lambda = h/p$; Э. Шрёдингер, 1926: волновое уравнение).

Квантовые генераторы. Квантовый генератор — устройство когерентного излучения, основанное на вынужденном излучении, предсказанном А. Эйнштейном в 1917 г. Принцип действия требует инверсии населённости уровней (когда возбуждённых частиц больше, чем в основном состоянии) и создания резонатора, обеспечивающего положительную обратную связь. Первый квантовый генератор — мазер на молекулах аммиака в сантиметровом диапазоне — создан Ч. Таунсом (1954); независимо эту работу выполнили Н. Г. Басов и А. М. Прохоров, удостоенные вместе с Таунсом Нобелевской премии (1964). Оптический вариант — лазер (Т. Мейман, 1960, рубиновый генератор). Применения: волоконная оптическая связь, лазерная обработка материалов, медицина, дальнометрия, оптическая голография, спектроскопия.

3. Физика атомного ядра

Естественная радиоактивность. В 1896 г. А. Беккерель обнаружил самопроизвольное испускание солями урана невидимого проникающего излучения; последующие исследования П. и М. Кюри (открытие полония и радия) и Э. Резерфорда показали природу излучения: α-лучи — ядра гелия $^4_2\mathrm{He}$, β-лучи — электроны, γ-лучи — электромагнитное излучение высокой энергии. Радиоактивность — процесс внутриядерный, не зависящий от химического состояния и внешних условий (температуры, давления). При распаде выполняются законы сохранения заряда и массового (нуклонного) числа; смещение элементов в таблице описывается правилами Содди — Фаянса.

Закон радиоактивного распада. Радиоактивный распад — статистический процесс; число ядер, распавшихся за время dt, пропорционально числу наличных ядер:

$$-dN = \lambda N\, dt, \qquad N = N_0 e^{-\lambda t},$$

где λ — постоянная распада. Основные характеристики: период полураспада $T_{1/2} = \ln 2/\lambda$ — время, за которое распадается половина наличных ядер; среднее время жизни $\tau = 1/\lambda$; активность $A = \lambda N$ (единица — беккерель: 1 Бк = 1 распад/с; внесистемная единица — кюри, 1 Ки = $3{,}7 \times 10^{10}$ Бк).

Способы наблюдения и регистрации заряженных частиц. Основные методы:

- *Сцинтилляционный счётчик* — регистрация световых вспышек от ударов частиц в люминесцирующем веществе;
- *Счётчик Гейгера — Мюллера* — газоразрядный счётчик, регистрирующий сам факт прохождения частицы;
- *Камера Вильсона* — треки частиц в пересыщенном паре (капли конденсируются вдоль траектории);
- *Пузырьковая камера* (Д. Глейзер, 1952) — треки в перегретой жидкости;
- *Метод толстослойных фотоэмульсий* — следы частиц, проявляемые после облучения;
- *Полупроводниковые детекторы*, пропорциональные и искровые камеры, газовые и сцинтилляционные спектрометры.

Эффект Вавилова — Черенкова. В 1934 г. П. А. Черенков, работая под руководством С. И. Вавилова, обнаружил свечение чистых жидкостей под действием гамма-излучения. Природа эффекта объяснена в 1937 г. И. М. Франком и И. Е. Таммом (Нобелевская премия 1958 г. совместно с Черенковым): свечение возникает, когда заряженная частица движется в среде со скоростью, превышающей фазовую скорость света в этой среде c/n. Условие излучения: $v > c/n$. Излучение аналогично ударной волне, распространяется вдоль конуса с углом $\cos\theta = c/(nv)$. Эффект используется в черенковских счётчиках для регистрации быстрых заряженных частиц и определения их скорости, в детекторах нейтрино.

Строение атомного ядра. По протонно-нейтронной модели (Д. Д. Иваненко, В. Гейзенберг, 1932) ядро состоит из нуклонов: протонов (заряд $+e$, масса $1{,}00728$ а.е.м.) и нейтронов (заряд 0, масса $1{,}00866$ а.е.м.). Общее число нуклонов — массовое число A; заряд ядра Z определяет химический элемент. Ядра с одинаковым Z, но разным A — изотопы; с одинаковым A, разным Z — изобары. Нуклоны удерживаются ядерными силами — короткодействующими (радиус действия порядка 10^{-15} м), заряд-независимыми, обладающими насыщением и притяжением при средних расстояниях. Нуклоны, согласно современной кварковой теории, состоят из кварков: протон и нейтрон — из трёх кварков (uud и udd соответственно).

Дефект массы, энергия связи и устойчивость ядер. Масса ядра всегда меньше суммы масс свободных нуклонов. Разность

$$\Delta m = Z m_p + (A - Z) m_n - m_{\text{я}}$$

— дефект массы. По соотношению Эйнштейна $E = \Delta m c^2$ он определяет энергию связи — энергию, необходимую для полного расщепления ядра на нуклоны. 1 а.е.м. соответствует $931{,}5$ МэВ. Удельная энергия связи $\varepsilon_{\text{св}} = E_{\text{св}}/A$ имеет максимум ($\approx 8{,}7$–$8{,}8$ МэВ/нуклон) в области железа и никеля; для лёгких ядер она растёт с A, для тяжёлых — падает. Отсюда следствие: энергию можно получить как синтезом лёгких ядер, так и делением тяжёлых. Ядра с чётным числом протонов и чётным числом нейтронов наиболее устойчивы; спонтанно распадаются все ядра тяжелее висмута, а также многие лёгкие изотопы.

Ядерные реакции. Взаимодействие ядра с нуклоном или другим ядром, приводящее к превращению, записывается символически:

$$^{A}_{Z}X + a \to {}^{A'}_{Z'}Y + b.$$

Выполняются законы сохранения заряда, массового числа, энергии и импульса. Реакции бывают экзоэнергетические и эндоэнергетические. Порог первой искусственной ядерной реакции был открыт в 1919 г. Резерфордом: $^{14}_{7}\mathrm{N} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} \to {}^{17}_{8}\mathrm{O} + p$. В 1932 г. Дж. Чедвик открыл нейтрон, а Дж. Кокрофт и Э. Уолтон осуществили первую реакцию под действием ускоренных частиц (расщепление лития протонами).

Искусственная радиоактивность. В 1934 г. Ф. Жолио-Кюри и И. Жолио-Кюри обнаружили, что при бомбардировке алюминия α-частицами образуется радиоактивный фосфор $^{30}_{15}\mathrm{P}$ (период полураспада около 2,5 мин), распадающийся с испусканием позитрона. Искусственные радиоактивные изотопы могут быть получены практически для всех элементов и являются основой изотопного производства.

Деление тяжёлых ядер. В 1938 г. О. Ган и Ф. Штрассман обнаружили, что при облучении урана нейтронами образуются барий и лантан — продукты деления ядра. Деление тяжёлых ядер ($A \gtrsim 230$) сопровождается выделением энергии (порядка 200 МэВ на акт деления), испусканием 2–3 вторичных нейтронов и осколков деления, имеющих значительную радиоактивность. Механизм — Капельно-жидкостная модель ядра, предложенная Н. Бором и Дж. Уилером (1939): захваченный нейтрон возбуждает ядро, оно деформируется и разрывается. Ключевое условие цепной реакции — вторичные нейтроны способны вызвать деление других ядер.

Цепная ядерная реакция. Цепная реакция — самоподдерживающийся процесс деления, при котором на каждый акт деления приходится хотя бы один новый акт. Количественная характеристика — коэффициент размножения нейтронов k (отношение числа нейтронов в данном поколении к числу нейтронов предыдущего). При $k < 1$ реакция затухает, при $k > 1$ — лавинообразно нарастает (взрыв), при $k = 1$ — идёт стационарно. Критические условия определяются критической массой и формой заряда (для урана-235 критическая масса сферического заряда без отражателя — порядка 47–50 кг; наличие отражателя и изменение геометрии снижают её). Первый управляемый ядерный реактор построен под руководством Э. Ферми в Чикаго (2 декабря 1942 г.).

Управляемая цепная реакция. Ядерный реактор. Ядерный реактор — устройство, в котором поддерживается управляемая стационарная цепная реакция ($k = 1$). Основные элементы реактора на тепловых нейтронах: топливо (природный или обогащённый уран, диоксид урана); замедлитель (графит, тяжёлая вода, обычная вода), снижающий энергию нейтронов до тепловых; регулирующие стержни из материалов, интенсивно поглощающих нейтроны (бор, кадрий, гафний), — управление мощностью и аварийная защита; теплоноситель (вода, жидкий натрий, газ), отводящий тепло; отражатель и биологическая защита. Тепло реактора используется для выработки электроэнергии: в парогенераторе теплоноситель производит пар, вращающий турбину. Первая в мире атомная электростанция введена в Обнинске в 1954 г. Сегодня ядерная энергетика обеспечивает значимую долю мировой генерации, при этом проблема обращения с отработанным топливом и радиоактивными отходами остаётся одной из ключевых для отрасли.

Получение радиоактивных изотопов и их применение. Изотопы получают облучением материалов в реакторах нейтронами (реакторный метод) или на ускорителях заряженных частиц (наработку радионуклидов ведут также из продуктов деления). Основные применения:

- *Медицина*: радионуклидная диагностика (технеций-99m — наиболее употребительный изотоп в ядерной медицине), радионуклидная терапия (йод-131 при заболеваниях щитовидной железы, кобальт-60 в лучевой терапии), стерилизация медицинского инструмента и материалов;
- *Наука и техника*: метод меченых атомов в биохимии и агрохимии, дефектоскопия (гамма-дефектоскопия сварных швов), изотопные источники питания, измерение толщин и уровней;
- *Археология и геология*: радиоуглеродный метод датирования (углерод-14, период полураспада около 5730 лет).

Биологическое действие радиоактивных излучений. Ионизирующее излучение ионизирует атомы и молекулы тканей, вызывая радиационно-химические повреждения, прежде всего в ДНК. Количественные характеристики: активность источника (Бк); поглощённая доза — энергия излучения на единицу массы (грей, 1 Гр = 1 Дж/кг); эквивалентная доза с учётом коэффициента качества излучения (зиверт, Зв). Тяжесть поражения зависит от дозы, мощности дозы, вида излучения и облучённого органа. При больших дозах развивается острая лучевая болезнь (пороговая доза порядка 1 Гр; тяжелые формы — при дозах свыше нескольких Гр). Отдалённые последствия включают повышение онкологического риска. Действие излучения ослабляется экранированием, расстоянием до источника и сокращением времени пребывания в поле излучения.

4. Элементарные частицы

Элементарные частицы — наименьшие известные частицы, из которых построено вещество, не имеющие внутренней структуры из более мелких составляющих. Ключевые этапы открытия: позитрон (П. Дирак предсказал 1928, К. Андерсон обнаружил 1932), нейтрон (Чедвик, 1932), мюон (1937), пионы (1947), антипротон (1955), нейтрино (прямо зарегистрированы в 1956 г.), кварки (гипотеза М. Гелл-Манна и Дж. Цвейга, 1964), W- и Z-бозоны (1983), бозон Хиггса (обнаружен на Большом адронном коллайдере в 2012 г.).

Классификация. Все частицы (кроме фотона и, возможно, гравитона) участвуют в сильном или слабом взаимодействии; по этому признаку их делят на:

- *Адроны* — частицы, участвующие в сильном взаимодействии; делятся на барионы (протон, нейтрон, гипероны — фермионы) и мезоны (пионы, каоны — бозоны). Адроны имеют кварковое строение: барионы состоят из трёх кварков, мезоны — из кварка и антикварка. Выделено шесть ароматов кварков (u, d, s, c, b, t); кварки не наблюдаются в свободном состоянии (конфайнмент).
- *Лептоны* — не участвующие в сильном взаимодействии: электрон, мюон, тау-лептон и три нейтрино, а также их античастицы. Всего три поколения (по 2 лептона и 2 кварка в каждом).

Частицы-переносчики взаимодействий: фотон (электромагнитное), глюоны (сильное, кварковая хромодинамика), W- и Z-бозоны (слабое), гипотетический гравитон (гравитационное). Совокупность этих представлений — Стандартная модель физики элементарных частиц; её основные положения подтверждены экспериментально, включая существование бозона Хиггса. Важнейшие сохраняющиеся величины: энергия, импульс, электрический заряд, барионное и лептонное заряды; в реакциях частиц с высокой энергией выполняются также законы сохранения чётности (с нарушениями в слабом взаимодействии).

Рождение частиц подчиняется релятивистской кинетике: при столкновении энергия может переходить в массу новых частиц, что изучается на ускорителях (Большой адронный коллайдер — протонный коллайдер с энергией 13 ТэВ в системе центра масс). Взаимные превращения частиц подчиняются квантовой электродинамике и квантовой хромодинамике — наиболее точно проверенным теориям современной физики.