

Ю.В. КУЗНЕЦОВА
Ю.В. ЧЕМАРИНА

**ЭЛЕМЕНТЫ АТОМНОЙ,
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ И ФИЗИКИ
ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ**

ТВЕРЬ 2015

**Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Тверской государственный университет»**

Ю.В. КУЗНЕЦОВА, Ю.В. ЧЕМАРИНА

ЭЛЕМЕНТЫ АТОМНОЙ, ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ И ФИЗИКИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Учебное пособие

ТВЕРЬ 2015

УДК 539.1 (075.8)

ББК В36я73–1+В38я73–1

К 89

Рецензенты:

Заведующий кафедрой математических методов современного естествознания Тверского государственного университета,
доктор физ.-мат. наук, доцент *А.Н.Цирулев*

Доцент кафедры сопротивления материалов, теории упругости и пластичности Тверского государственного технического университета,
кандидат технических наук *Е.Г. Алексеева*

Кузнецова Ю.В., Чемарина Ю.В.

К 89 Элементы атомной, ядерной физики и физики элементарных частиц: учеб. пособие. – Тверь: Твер. гос. ун-т, 2015. – 82 с.

Пособие предназначено для самостоятельной подготовки студентов естественных факультетов университетов при освоении учебного материала по атомной, ядерной физике и физике элементарных частиц, а также для подготовки к Интернет–экзамену в сфере профессионального образования по следующим дидактическим единицам: «Квантовая физика, физика ядра» и «Элементы ядерной физики и физики элементарных частиц». Пособие содержит теоретический материал и тестовые задания с решениями, многие из которых взяты с сайта www.i-exam.ru. В конце пособия приведены тестовые задания для самопроверки пройденного учебного материала. Учебное пособие может быть также эффективно использовано при проведении факультативных занятий со школьниками.

Печатается по решению научно-методического совета Тверского государственного университета.

УДК 539.1 (075.8)
ББК В36я73–1+В38я73–1

© Кузнецова Ю.В., Чемарина Ю.В., 2015

© Тверской государственной

университет, 2015

Предисловие

Данное учебное пособие является дополнением к курсу лекций по общей физике для студентов биологического факультета Тверского государственного университета.

Курс общей физики является достаточно объемным и включает ряд вопросов, трудных для усвоения студентами. Квантовая физика принципиально отличается от классической, ньютоновой физики. Классическая физика занимается описанием поведения материальных объектов, в то время как квантовая физика сосредоточена только на математическом описании процессов наблюдения и измерения. Кроме того, математический аппарат квантовой физики резко отличается от аппарата классической физики. Чтобы помочь студентам быстро освоить необходимые разделы атомной и ядерной физики, в учебном пособии рассмотрены теоретические аспекты, приведены подробные решения как теоретических, так и практических задач по указанной тематике. Ввиду отсутствия у студентов практики решения задач, в пособии содержатся задания с решениями, способствующие развитию у студентов навыков решения задач по соответствующим темам, а в конце пособия приведены тестовые задания для самопроверки пройденного учебного материала.

В соответствии с ФГОС ВПО в результате изучения физики обучающиеся должны:

знать фундаментальные законы физики, представлять общую картину мироздания;

понимать взаимосвязь процессов, происходящих с живой и неживой материей в природе;

применять полученные знания при решении профессиональных задач.

Целью курса является формирование и развитие у студентов следующих общекультурных компетенций:

способности к интеллектуальному, культурному, нравственному саморазвитию и совершенствованию (ОК-1);

критический анализ, переоценка своего профессионального и социального опыта, при необходимости готовность изменить профиль своей профессиональной деятельности (ОК-9);

проявление творческих качеств (ОК-14);

выстраивание и реализацию перспективных линий интеллектуального, культурного, нравственного, физического и профессионального саморазвития и самосовершенствования (ОК-4);

умение применять современные экспериментальные методы работы с биологическими объектами в полевых и лабораторных условиях, навыки работы с современной аппаратурой (ПК-5).

Обращаем внимание читателя на то, что пособие дает лишь краткое введение в курс атомной и ядерной физики. Цель, которую ставили авторы при ее написании, –помочь студентам в изучении лекций поэлементам атомной, ядерной физики и физики элементарных частиц, так как еще одной существенной проблемой, возникающей при изучении учебного материала по атомной и ядерной физике, а также по физике элементарных частиц, является недостаток времени, выделяемого для практических занятий.

Материал, рассмотренный в пособии, может быть использован так же при подготовке студентов к тестированию при аккредитации или при проверке остаточных знаний по курсу общей физики, так как содержит задания с решениями, многие из которых взяты с сайта www.i-exam.ru, а также при самостоятельной работе при освоении таких дидактических единиц, как «Квантовая физика, физика ядра» и «Элементы ядерной

физики и физики элементарных частиц». Кроме того, пособие может быть применено для углубленного изучения некоторых тем по атомной и ядерной физике учителями школ на факультативных занятиях.

Пособие предназначено для студентов биологического факультета, а также для студентов других специальностей, изучающий курс общей физики в высшем учебном заведении.

Введение

Область знаний, охватывающих вопросы атомной и ядерной физики, а также физики элементарных частиц, исключительно обширна и разнообразна. В настоящее время проблемы микромира оказались в глубочайшей связи с познаниями процессов, происходящих в космических объектах. Изучение космоса также базируется на достижениях современной атомной и ядерной физики и физики элементарных частиц. В данном курсе, конечно, нет никакой возможности охватить проблемы микромира в столь широком аспекте. Поэтому мы ограничили круг изучаемых вопросов.

В разделе «Квантовая физика, физика ядра» вначале рассматривается строение атома, а затем, после обсуждения дуализма свойств микрочастиц, достаточное внимание уделяется уравнениям Шредингера и квантовым числам, описывающим состояние электрона в атоме.

В разделе «Элементы ядерной физики и физики элементарных частиц» излагаются вопросы строения ядер, ядерных реакций, а также приводятся характеристики фундаментальных взаимодействий и участвующих в них элементарных частиц.

В разделе «Современные аспекты физики элементарных частиц» осуществляется попытка охватить современные тенденции развития данного раздела физики. Здесь представлены наиболее известные ускорители элементарных частиц, рассмотрены причины, по которым ученым необходимы такие крупные экспериментальные установки, как Большой адронный коллайдер, показана история развития атомной энергетики и ее применение.

В конце пособия приведены тестовые задания для самопроверки пройденного учебного материала и ответы на них.

КВАНТОВАЯ ФИЗИКА, ФИЗИКА ЯДРА

1. Строение атома

Согласно модели атома Резерфорда-Бора атом состоит из положительно заряженного ядра, вокруг которого по орбитам, имеющим форму окружности или эллипса, вращаются электроны. Ядро находится в одном из фокусов эллиптической орбиты или в центре окружности. Заряд ядра равен суммарному заряду всех электронов, входящих в состав атома.

Простейшим по своему строению атомом является атом водорода, состоящий из ядра, вокруг которого вращается один электрон. Основная масса атома сосредоточена в ядре.

Состояние атома разделяется согласно первому постулату Бора на стационарное или возбужденное. Стационарное состояние – устойчивое (электроны находятся на энергетических уровнях в определенном порядке), возбужденное состояние – неустойчивое (состояние атома, при котором электроны переходят на более высокие энергетические уровни по сравнению со стационарным состоянием).

Атом может перейти из стационарного состояния в возбужденное:

- под действием электромагнитного излучения;
- при взаимодействии с другим атомом;
- при взаимодействии с заряженной частицей;
- при сильном нагревании;
- при химических реакциях;
- при влиянии других факторов.

При переходе из одного устойчивого состояния с большей энергией в другое устойчивое состояние с меньшей энергией атом излучает

электромагнитную волну, частота которой определяется следующим условием(второй постулат Бора):

$$\nu = \frac{E_2 - E_1}{h}, \quad (1)$$

где E_2 –энергия начального состояния, E_1 –энергия конечного состояния, h -постоянная Планка.

Набор частот данного электромагнитного излучения, которое излучает вещество, определяет **спектр излучения вещества**.

Энергию электрона в атоме на соответствующей орбите можно вычислить по формуле:

$$E = - \frac{e^4 \cdot m}{8h^2 \cdot \epsilon_0^2 \cdot n^2}, \quad (2)$$

где e -заряд электрона, m -масса электрона, ϵ_0 -электрическая постоянная, n -номер орбиты электрона.

Частоты излучений (спектральных линий) водородоподобного атома при переходе с одной орбиты на другую могут быть определены по формуле(3):

$$\nu_{nm} = R c \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad (3)$$

где, n – номера орбит, c – скорость света в вакууме, $R=1,097 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$ – постоянная Ридберга.

Из формулы (3) следует, что спектры атомов имеют серийную структуру.

В спектре атома водороданазвания серий соответствуют именам ученых, нашедших эти серии спектральных линий экспериментально. Название и характеристики спектральных серий представлены в таблице №1.

Таблица №1. Характеристики спектральных серий водородоподобных атомов.

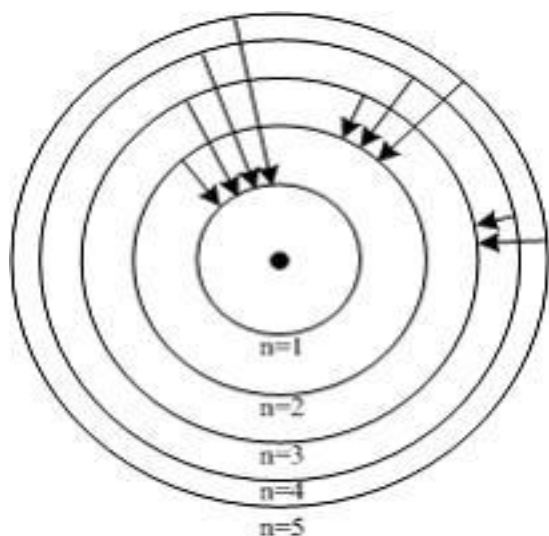
Название серии	Область спектра	Частота серии	Переход электронов
Лаймана	Ультра-фиолетовая	$\nu = R \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2} \right),$ $n = 2, 3, 4, \dots$	С верхних энергетических уровней на уровень $m=1$
Бальмера	Видимая и близлежащая ультра-фиолетовая	$\nu = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right),$ $n = 3, 4, 5, \dots$	С верхних энергетических уровней на уровень $m=2$
Пашена	Инфракрасная	$\nu = R \left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2} \right),$ $n = 4, 5, 6, \dots$	С верхних энергетических уровней на уровень $m=3$
Брэкета		$\nu = R \left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{n^2} \right),$ $n = 5, 6, 7, \dots$	С верхних энергетических уровней на уровень $m=4$
Пфуда		$\nu = R \left(\frac{1}{5^2} - \frac{1}{n^2} \right),$ $n = 6, 7, 8, \dots$	С верхних энергетических уровней на уровень $m=5$

Примеры решения задач:

Задание 1

На рисунке схематически изображены стационарные орбиты электрона в атоме водорода согласно модели Бора, а также показаны переходы электрона с одной стационарной орбиты на другую, сопровождающиеся излучением кванта энергии. В ультрафиолетовой области спектра эти переходы дают серию Лаймана, в видимой – серию

Бальмера, в инфракрасной – серию Пашена.



Какой переход соответствует наибольшей частоте кванта в серии Пашена (для переходов, представленных на рисунке)?

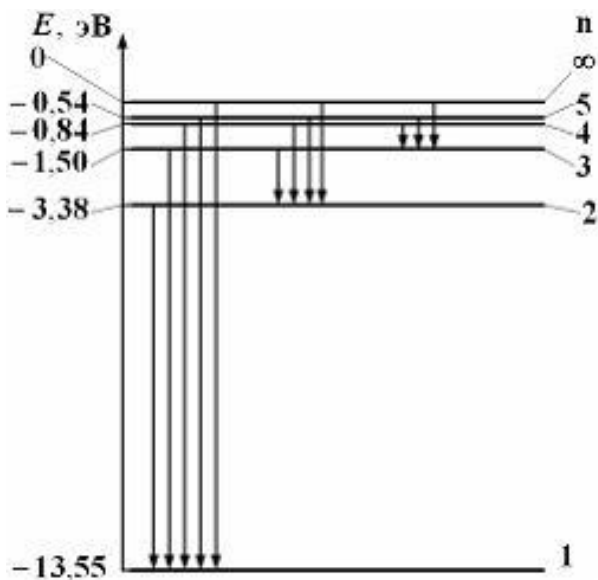
Решение:

Серию Пашена дают переходы на третий энергетический уровень (см. таблицу №1). Частота испускаемого кванта по формуле (1) зависит от разности энергий электрона в начальном и конечном состояниях. Поэтому наибольшей частоте кванта в серии Пашена (для переходов, представленных на рисунке) соответствует переход $n = 5 \rightarrow n = 3$.

Ответ: $n = 5 \rightarrow n = 3$.

Задание 2

На рисунке дана схема энергетических уровней атома водорода, а также условно изображены переходы электрона с одного уровня на другой, сопровождающиеся излучением кванта энергии.



В ультрафиолетовой области спектра эти переходы дают серию Лаймана, в видимой области – серию Бальмера, в инфракрасной области – серию Пашена и т.д. Чему равно отношение максимальной частоты линии в серии Пашена к минимальной частоте линии в серии Бальмера?

Решение:

Максимальная частота линии в серии Пашена:

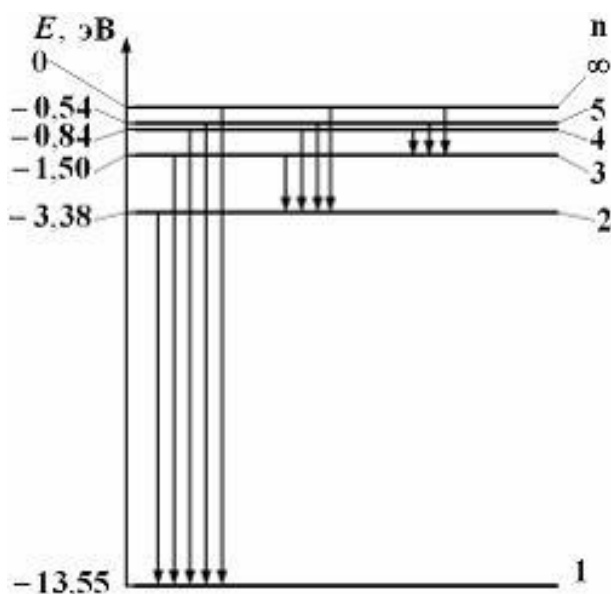
$$\nu_{max \text{ П}} = R \left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{\infty} \right) = R \cdot \frac{1}{9},$$

минимальная частота линии в серии

Бальмера: $\nu_{min \text{ Б}} = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{3^2} \right) = R \cdot \frac{5}{4 \cdot 9}$. Тогда $\frac{\nu_{max \text{ П}}}{\nu_{min \text{ Б}}} = \frac{4}{5}$.

Ответ: 4/5.

Задание 3



На рисунке дана схема энергетических уровней атома водорода.

Чему равна наибольшая длина волны спектральной линии (в нм) серии Лаймана? ($h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$)

Решение:

Серию Лаймана дают переходы в состояние с $n = 1$ (см. таблицу №1). Учитывая связь длины волны и частоты $\lambda \cdot \nu = c$ и формулу

$h\nu = E_n - E_m$, можно сделать вывод о том, что линии с наибольшей длиной волны (то есть с наименьшей частотой) в серии Лаймана соответствует переход со второго энергетического уровня. Тогда

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{ch}{E_2 - E_1} = \frac{3 \cdot 10^8 \cdot 6,63 \cdot 10^{-34}}{(13,55 - 3,38) \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} = 1,22 \cdot 10^{-7} \text{ м} = 122 \text{ нм.}$$

Ответ: 122 нм.

2. Длина волны де Бройля

Целый ряд экспериментальных фактов (например, дифракция электронов) заставил физиков признать, что электроны (а также и другие частицы), наряду с фотонами, обладают не только корпускулярными, но и волновыми свойствами. Поэтому в квантовой механике вместо движения электронов по орбитам (или другим траекториям) рассматривается распространение волн, описываемых волновыми функциями.

Впервые представление о том, что движение частиц, обладающих энергией и импульсом, определяется движением некоторых волн, высказал французский физик-теоретик, один из основоположников квантовой механики Луи де Бройль. Согласно де Бройлю, с каждым микрообъектом связываются, с одной стороны, корпускулярные характеристики – энергия ε и импульс p , а с другой – волновые характеристики – частота ν и длина волны λ .

Таким образом, любой частице, обладающей импульсом, сопоставляют волну, длина которой вычисляется по формуле де Бройля,

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad (4),$$

где p – импульс частицы, h – постоянная Планка.

Необходимо подчеркнуть, что волны, связанные с движущимися частицами, не имеют никакого отношения к распространению какого-либо электромагнитного поля, к электромагнитным волнам. Среди известных в физике электромагнитных, акустических и других волн нет аналога «волнам вероятности», связанным с движущимися частицами вещества.

Открытие волновых свойств движущихся частиц вещества явилось величайшим достижением современной физики. Вместе с твердо установленным экспериментально квантовым характером законов, описывающих внутриатомные процессы, обнаружение волновых свойств частиц вещества послужило фундаментом для создания квантовой механики.

Примеры решения задач:

Задание 1

Если отношение скоростей двух микрочастиц $v_1/v_2=4$, а их длины волн де Бройля удовлетворяют соотношению $\lambda_2=2\lambda_1$, то чему будет равно отношение масс m_1/m_2 этих частиц?

Решение:

Учитывая, что импульс частицы равен $p=mv$, из формулы (4)

получаем выражение для массы частицы $m = \frac{h}{\lambda \cdot v}$.

Тогда искомое отношение $\frac{m_1}{m_2} = \frac{\lambda_2 \cdot v_2}{\lambda_1 v_1} = 2 \cdot \frac{1}{4} = 1/2$.

Ответ: 1/2.

Задание 2

Чему равно отношение длин волн де Бройля для дейтрона и α -частицы, прошедших одинаковую ускоряющую разность потенциалов?

Решение:

Дейтрон – ядро тяжелого водорода (дейтерия), состоит из одного протона и одного нейтрона. Длина волны де Бройля определяется по формуле (4). Импульс частицы можно выразить через ее кинетическую

энергию: $E_k = \frac{p^2}{2m} \Rightarrow p = \sqrt{2mE_k}$. По теореме о кинетической энергии,

согласно которой работа сил электрического поля идет на приращение

кинетической энергии, $qU_{\text{уск}} = \Delta E_k$. Отсюда можно найти E_k в

предположении о том, что первоначально частица покоилась

$qU_{\text{уск}} = E_k$. Окончательное выражение для длины волны де Бойля

через ускоряющую разность потенциалов имеет вид:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2mE_k}} = \frac{h}{\sqrt{2mqU_{\text{уск}}}}$$

Учитывая, что $m_d \cong 2m_p$, $m_\alpha \cong 4m_p$, $q_d = e$, $q_\alpha = 2e$, получим:

$$\frac{\lambda_d}{\lambda_\alpha} = \sqrt{\frac{m_\alpha q_\alpha}{m_d q_d}} = \sqrt{4} = 2$$

Ответ: 2.

Задание 3

В опыте Дэвиссона и Джермера исследовалась дифракция прошедших ускоряющее напряжение электронов на монокристалле никеля. Если ускоряющее напряжение уменьшить в 2 раза, то длина волны де Бройля электрона ...

Решение:

При прохождении электроном ускоряющего напряжения увеличивается его кинетическая энергия. Если считать начальную

скорость электрона равной нулю, то $\frac{mv^2}{2} = eU$, где m и e – масса и заряд электрона, U – ускоряющее напряжение, v – приобретенная электроном

скорость. После преобразований получим $\frac{p^2}{2m} = eU$, или $p = \sqrt{2meU}$.

Используя формулу (4), получим $\lambda = \frac{h}{\sqrt{2meU}}$, и при уменьшении ускоряющего напряжения U в 2 раза длина волны де Бройля электрона λ увеличится в $\sqrt{2}$ раз.

Ответ: увеличится в $\sqrt{2}$ раз.

3. Уравнения Шредингера

Классическая механика позволяет найти состояние системы в любой момент времени, позволяет найти положения, скорости, энергии образующих ее тел в любой момент времени, если заданы начальные состояния этих тел (их положения и скорости) и силы, действующие между ними. Однако теоретический анализ в квантовой механике резко отличается от классических методов, поскольку классические уравнения движения теряют смысл за счет того, что нельзя точно выразить импульс от совершенно неопределенной координаты. Поэтому математический аппарат квантовой механики резко отличается от аппарата классической физики. Вместо прямого определения динамических переменных x, y, z, p_x, p_y, p_z как функций времени t , квантовая механика ставит себе задачей

нахождение «волновой функции», описывающей состояние частицы. Состояние частицы, т.е. вид волновой функции определяется ее движением и взаимодействием с другими частицами вещества.

Уравнение для волновой функции была найдено впервые австрийским физиком Эрвином Шредингером в 1926 году и носит его имя. Это уравнение является основным уравнением нерелятивистской квантовой механики, волновой механики, которое позволяет определить волновую функцию частицы ψ - функцию (пси - функцию), полностью описывающую ее состояние.

Шредингер предложил уравнение, описывающих поведение волн, соответствующих каждой частице (волне де Бройля), во внешних силовых полях. Уравнение Шредингера не выводится, а постулируется. Правильность этого уравнения подтверждается согласием с опытом получаемых с его помощью результатов, что, в свою очередь, придает ему характер закона природы.

Уравнение Шредингера в общем виде записывается так:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \Psi + U(x, y, z, t) \Psi = i\hbar \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2}, \quad (4)$$

где m – масса частицы, i^2 – мнимая единица, ∇ – оператор Лапласа ($\nabla^2 \psi = \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2}$), $U(x, y, z, t)$ – потенциальная энергия частицы в силовом поле, в котором она движется, ψ – искомая волновая функция.

Если силовое поле, в котором движется частица, потенциально, то функция U не зависит явно от времени и имеет смысл потенциальной энергии. В этом случае решение уравнения Шредингера распадается на два сомножителя, один из которых зависит только от координаты, а другой – только от времени:

$$\Psi(x, y, z, t) = \Psi(x, y, z) e^{-i\frac{E}{\hbar}t}. \quad (5)$$

Здесь E – полная энергия частицы, которая в случае стационарного поля остается постоянной. Поэтому уравнение Шредингера для стационарных состояний примет вид:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \Psi + U\Psi = E\Psi \quad \text{или}$$

$$\nabla^2 \Psi + \frac{2m}{\hbar^2} (E - U)\Psi = 0. \quad (6)$$

Свободной частицей называется частица, движущаяся в отсутствие внешних полей, т.е. на нее силы не действуют. Пусть она движется вдоль оси x . Тогда потенциальная энергия частицы $U(x) = \text{const}$ и ее можно принять равной нулю. При этом полная энергия частицы совпадает с ее кинетической энергией. В таком случае уравнение Шредингера для стационарных состояний примет вид:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{2m}{\hbar^2} E\psi = 0. \quad (7)$$

В общем случае ψ – функция – это функция координат и времени $\psi = \psi(x, y, z, t)$. Если микрочастица находится в стационарном состоянии, то пси-функция не зависит от времени: $\psi = \psi(x, y, z)$. Конкретный вид волновой функции зависит от физических условий, которые характеризуют состояние частицы.

Решения волнового уравнения Шредингера для различных конкретных случаев рассмотрены ниже в таблице №2. Они дают возможность найти значения энергий устойчивых состояний микросистемы (атом, молекула или другая система).

Таблица №2. Примеры уравнения Шредингера.

Название	Вид уравнения
Одномерное движение свободной частицы	$-\frac{\hbar}{2m} \frac{d^2\Psi}{dx^2} = (E - U)\Psi$
Стационарное для микрочастицы в потенциальной одномерной яме	$\frac{\partial^2\psi}{\partial x^2} + \frac{2m}{\hbar^2} E\psi = 0$
Стационарное для электрона в водородоподобном атоме	$\nabla\psi + \frac{2m}{\hbar^2} \left(E + \frac{ze^2}{4\pi\epsilon_0 r}\right)\psi = 0$
Стационарное для гармонического осциллятора	$\frac{\partial^2\psi}{\partial x^2} + \frac{2m}{\hbar^2} \left(E - \frac{m\omega^2 x^2}{2}\right)\psi = 0$
Уравнение для одномерного осциллятора	$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2\Psi}{dx^2} + \frac{m\omega_0^2}{2} x^2\Psi = E\Psi$
Движение частицы вдоль оси ОХ под действием квазиупругой силы	$\frac{\partial^2\psi}{\partial x^2} + \frac{2m}{\hbar^2} \left(E - \frac{kx^2}{2}\right)\psi = 0$
Движение частицы в трехмерном бесконечно глубоком потенциальном ящике	$\nabla\psi + \frac{2m}{\hbar^2} E\psi = 0$
Для трехмерного описания свободной частицы	$-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2\Psi = E\Psi$
Нестационарное уравнение	$-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla\psi + U\psi = i\hbar \frac{\partial\psi}{\partial t}$

Выдающийся немецкий физик Макс Борн, являясь одним из основоположников квантовой механики, дал статистическую интерпретацию волновой функции: квадрат модуля волновой функции в какой-либо области пространства в данный момент времени определяет вероятность обнаружения частицы в единице объема данной области пространства. Вероятность dW нахождения частицы в элементе объема пространства dV , согласно Борну, равна: $dW = |\Psi(x, y, z)|^2 dV$. Квадрат модуля волновой функции $|\Psi(x, y, z)|^2$ можно рассматривать как вероятность обнаружения частицы в единичном объеме вблизи точки с координатами x, y, z . Эта величина называется **плотностью вероятности**.

Таким образом, волновая функция дает представление о вероятности нахождения электрона в пространстве (точнее, эта вероятность определяется квадратом амплитуды волновой функции), а решение волнового уравнения Шредингера позволяет найти функции распределения вероятности нахождения электронов (а также других частиц) в пространстве.

Примеры решения задач:

Задание 1

Какие из предложенных утверждений:

- 1) уравнение стационарно;
- 2) уравнение соответствует трехмерному случаю;
- 3) уравнение характеризует состояние частицы в бесконечно глубоком прямоугольном потенциальном ящике;
- 4) уравнение характеризует движение частицы вдоль оси Ox под действием квазиупругой силы, пропорциональной смещению частицы от положения равновесия,

являются справедливыми для уравнения Шредингера следующего вида:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{2m}{\hbar^2} \left(E - \frac{m\omega^2 x^2}{2} \right) \psi = 0$$

Решение:

Уравнение стационарно, так как волновая функция ψ не зависит от времени (отсутствует производная по времени).

$$U = \frac{m\omega^2 x^2}{2} = \frac{kx^2}{2}$$

Потенциальная энергия соответствует гармоническому осциллятору (см. таблицу №2), то есть движению частицы под действием квазиупругой силы. Следовательно, верными являются ответы 1 и 4.

Ответ: 1 и 4.

Задание 2

Какие из предложенных утверждений являются верными для квадрата модуля волновой функции ψ , входящей в уравнение Шредингера:

- 1) импульсу частицы в соответствующем месте пространства;
- 2) плотности вероятности обнаружения частицы в соответствующем месте пространства;
- 3) энергии частицы в соответствующем месте пространства?

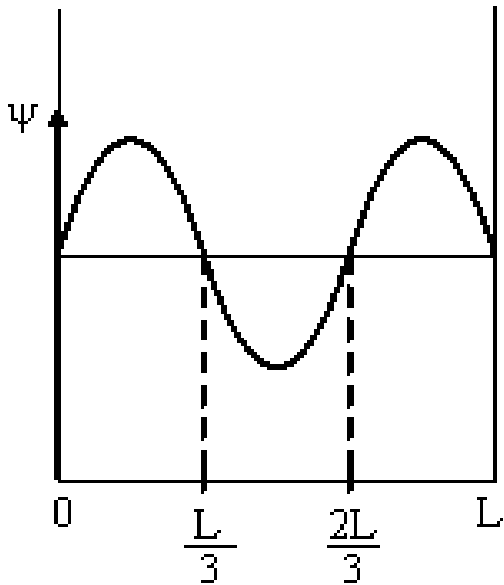
Решение:

Квадрат модуля волновой функции ψ можно рассматривать как вероятность обнаружения частицы в единичном объеме вблизи точки с координатами x, y, z . Эта величина называется **плотностью вероятности**, поэтому верным утверждением является утверждение 2.

Ответ: 2.

Задание 3

Чему равна вероятность обнаружить электрон в одномерном потенциальном ящике шириной L с бесконечно высокими стенками на участке $L/6 \leq x \leq L/2$, если $\psi_n(x)$ – функция электрона имеет вид, указанный на рисунке?



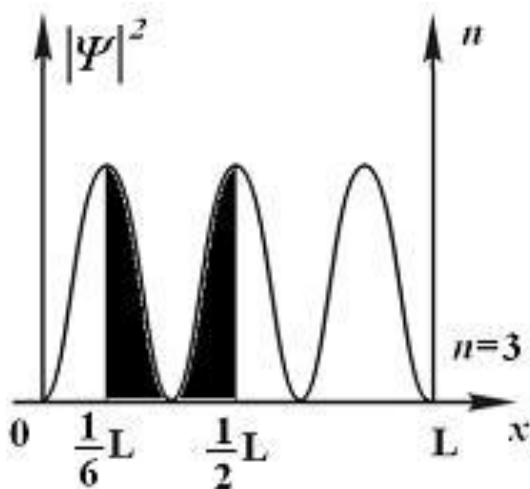
Решение:

Вероятность обнаружить микрочастицу в интервале (a,b) для состояния, характеризуемого определенной

$\psi_n(x)$ – функцией, равна:

$$W = \int_a^b |\psi_n(x)|^2 dx$$

Используя геометрический смысл интеграла, эту вероятность можно найти как отношение площади под кривой зависимости $|\psi_n(x)|^2$ в интервале (a,b) к площади под кривой во всем интервале существования $|\psi|^2$, т.е. в интервале $(0, L)$.



Кривая зависимости $|\psi_n(x)|^2$ от x представлена на рисунке где вероятность обнаружить электрон на участке $L/6 \leq x \leq L/2$, соответствует доле «закрашенной» площади от всей площади под кривой, т.е. $W = 2/6 = 1/3$.

Ответ: 1/3.

4. Электронное строение атомов. Квантовые числа электрона

Несмотря на большие успехи теории Бора в объяснении спектров атомного водорода и водородоподобных ионов она обнаружила и целый ряд недостатков в ее приложении к другим атомам. Так, например, для следующего за водородом элемента гелия, у атомов которого имеются два электрона, теория Бора не дала в ее простом виде сколько-нибудь удовлетворительных результатов. Кроме того, даже в приложении к одноэлектронным атомным системам предположение о круговых орбитах в атомах является очень большим упрощением, так как действие центральных сил вызывает движение по эллиптической орбите. Однако кроме кулоновского притяжения к ядру на электрон действуют другие силы (происходит изменение массы электрона при движении с большой скоростью по орбите, а также действие электрических полей соседних атомов), которые могут оказать влияние на энергию электронов, находящихся на квантовых орбитах. В этом случае полная энергия обуславливается уже не только квантовым числом n , определяющим степень удаления электрона от ядра (номер энергетического уровня), но и новыми квантовыми числами.

Квантовое число l характеризует момент количества движения электрона, траекторией которого является эллипс. Это число характеризует форму эллиптических орбит, поскольку определяется отношением их полуосей и энергией того взаимодействия, которое приводит к прецессии орбиты в ее плоскости.

Квантовое число l может принимать значения:

$$l=0, 1, 2, \dots, n-1.$$

Каждому значению l соответствует орбиталь особой формы.

Орбитали с $l = 0$ называются *s-орбиталями*, $l = 1$ – *p-орбиталями* (3 типа, отличающихся магнитным квантовым числом m), $l = 2$ – *d-орбиталями* (5 типов), $l = 3$ – *f-орбиталями* (7 типов).

Всего должно быть n орбит, поэтому l принимает n значений, а значит, максимальное значение l равно $n-1$.

Орбитальный момент импульса электрона может приобретать лишь дискретный ряд значений:

$$L = \hbar \sqrt{l(l+1)},$$

где \hbar – постоянная Планка.

При этом вектор момента импульса \vec{L} имеет лишь такие ориентации в пространстве, при которых его проекция на физически выделенное направление \mathbf{z} (например, направление внешнего магнитного поля) принимает значения, кратные \hbar :

$$L_z = m\hbar,$$

где m – магнитное квантовое число.

Магнитное квантовое число m определяет ориентацию орбитали в пространстве относительно внешнего магнитного или электрического поля. Его значения изменяются от $+l$ до $-l$, включая 0. Всего $2l+1$ значений. Например, при $l = 1$ число m принимает три значения: $+1, 0, -1$.

На рисунке 1 приведены возможные ориентации орбитального момента импульса L относительно физически выделенного направления \mathbf{z} для электрона в состоянии $l=2$.

Таким образом, величина момента импульса электрона в атоме и его проекции на произвольное направление \mathbf{z} квантуются, т.е. могут принимать значения, кратные \hbar .

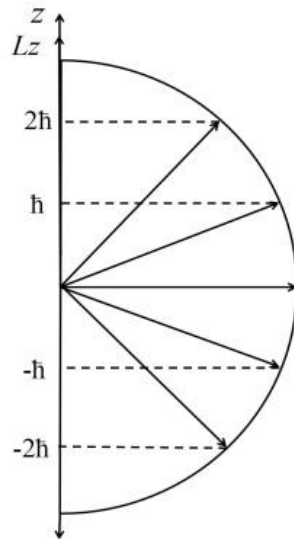


Рис.1. Возможные ориентации орбитального момента импульса

Кроме орбитального движения, электрон обладает вращением вокруг собственной оси. Такое вращение электрона характеризуется спиновым моментом импульса и соответствующим ему спиновым магнитным моментом. Данный механический момент был назван собственным моментом или спином (английское название слова «веретено»).

Спин электрона L_s есть величина векторная. Подобно орбитальному механическому моменту собственный момент (спин) и его проекция на физически выделенное направление z квантуется по тому же самому правилу, как и орбитальный механический момент импульса L :

$$L_s = \hbar\sqrt{s(s+1)},$$

где \hbar – постоянная Планка, s – спиновое квантовое число.

Спиновое квантовое число s может принимать лишь два возможных значения $+1/2$ и $-1/2$. Они соответствуют двум возможным и противоположным друг другу направлениям спина.

Проекция спина L_{sz} на выделенное направление z определяется соответствующим выражением: $L_{sz} = m_s \hbar$, где m_s – магнитное спиновое квантовое число, которое может принимать только два значения $+1/2$ и $-1/2$.

На рисунке 2 приведены возможные ориентации собственного момента импульса L_{sz} электрона относительно физически выделенного направления z .

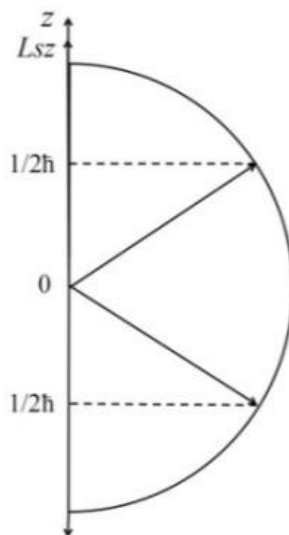


Рис.2. Возможные ориентации
собственного момента импульса электрона

Четыре квантовых числа описывают состояние электрона в атоме и характеризуют энергию электрона, его спин, форму электронного облака и его ориентацию в пространстве.

При переходе атома из одного состояния в другое происходит перестройка электронного облака, то есть изменяются значения квантовых чисел, что сопровождается поглощением или испусканием атомом квантов энергии.

Резюмируя вышесказанное, можно дать определение **квантовым числам** как энергетическим параметрам, определяющим состояние электрона и тип атомной орбитали, на которой он находится.

Информация об основных характеристиках квантовых чисел демонстрирует таблица №3.

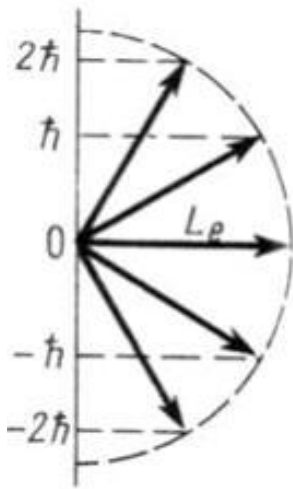
Таблица №3. Квантовые числа

Название квантового числа	Обозначение	Определяющая величина	Принимаемые значения
главное квантовое число	n	энергия электрона в атоме	$1, 2, 3, \dots, \infty$
орбитальное квантовое число	l	модуль орбитального момента импульса электрона	$0, 1, 2, \dots, n-1$
магнитное квантовое число	m	проекция орбитального момента импульса электрона на некоторое направление	$0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l$
спиновое квантовое число	s	модуль собственного момента импульса электрона	$+1/2$ и $-1/2$
магнитное спиновое квантовое число	m_s	проекция собственного момента импульса электрона на некоторое направление	$+1/2$ и $-1/2$

Примеры решения задач:

Задание 1

Момент импульса электрона в атоме и его пространственные ориентации могут быть условно изображены векторной схемой, на которой длина вектора пропорциональна модулю орбитального момента импульса \vec{L}_e электрона. На рисунке приведены возможные ориентации вектора \vec{L}_e . Чему равно минимальное значение главного квантового числа n для указанного состояния?



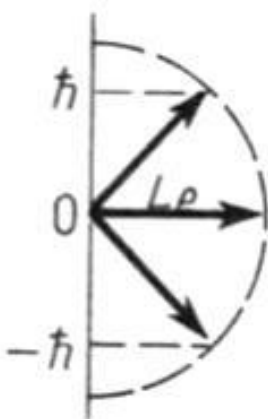
Решение:

Магнитное квантовое число m определяет проекцию вектора \vec{L}_e орбитального момента импульса на направление внешнего магнитного поля: $L_{ez} = m\hbar$, где $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l$ (всего $2l + 1$ значений). Следовательно, для указанного состояния $l = 2$. Квантовое число l не может превышать $n - 1$. Поэтому минимальное значение главного квантового числа n равно 3.

Ответ: 3.

Задание 2

Момент импульса электрона в атоме и его пространственные ориентации могут быть условно изображены векторной схемой, на которой длина вектора пропорциональна модулю орбитального момента импульса \vec{L}_e электрона. На рисунке приведены возможные ориентации вектора \vec{L}_e . Чему равна величина орбитального момента импульса (в единицах \hbar) для указанного состояния?



Решение:

Магнитное квантовое число m определяет проекцию вектора \vec{L}_e орбитального момента импульса на направление внешнего магнитного поля, $L_{ez} = m\hbar$, где $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l$ (всего $2l + 1$ значений). Поэтому для указанного состояния $l = 1$. Величина момента импульса электрона определяется по формуле $L = \hbar\sqrt{l(l+1)}$.

Тогда $L = \sqrt{1 \cdot 2} = \sqrt{2}$ (в единицах \hbar).

Ответ: $\sqrt{2}$.

Задание 3

Частица находится в потенциальном ящике шириной L с бесконечно высокими стенками в определенном энергетическом состоянии E_n с

квантовым числом n . Известно, что $\frac{E_{n+1}}{E_{n-1}} = 4$. В этом случае n равно ...

Решение:

Собственная энергия E_n микрочастицы в потенциальном ящике шириной L с бесконечно высокими стенками принимает лишь определенные дискретные значения, причем $E_n = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2mL^2} n^2 \sim n^2$,

где n – целое число, имеющее смысл номера уровня энергии. Тогда

отношение значений энергии $\frac{E_{n+1}}{E_{n-1}} = \frac{(n+1)^2}{(n-1)^2}$ и по условию $\frac{E_{n+1}}{E_{n-1}} = 4$.

Следовательно, $\sqrt{\frac{(n+1)^2}{(n-1)^2}} = \frac{n+1}{n-1} = 2$. Отсюда квантовое число $n = 3$.

Ответ: 3.

5. Соотношение неопределенностей Гейзенберга

После выдвижения де Бройлем гипотезы об универсальности дуализма волна-частица и экспериментального подтверждения наличия у частиц волновых свойств возникли принципиальные проблемы с описанием положения частицы в пространстве. Как совместить волновую природу частиц с привычным представлением о размещении частицы в определенной точке пространства и перемещении по траектории?

В классической механике частица в любой момент времени занимает строго определенное место в пространстве. Это означает, что в любой момент времени могут быть определены ее координаты (x, y, z) и импульс (скорость).

Но в опытах по дифракции пучка электронов наблюдается дифракционная картина. Это означает, что понятие траектории электрона не существует.

Следовательно, наличие у частиц волновых свойств приводит к необходимости введения нового способа описания состояния квантовой частицы. Отсутствие траектории частицы означает невозможность определения в данный момент времени всех ее значений координат (x, y, z) и соответствующих проекций импульса (P_x, P_y, P_z) . Это обстоятельство составляет содержание принципа неопределенности Гейзенберга.

Согласно *соотношению неопределенностей Гейзенберга* у микрочастицы всегда существует неопределенность координат $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ и неопределенность соответствующих проекций импульса $(\Delta P_x, \Delta P_y, \Delta P_z)$, причем эти неопределенности удовлетворяют условиям:

$$\Delta x \cdot \Delta P_x \geq \hbar, \quad \Delta y \cdot \Delta P_y \geq \hbar, \quad \Delta z \cdot \Delta P_z \geq \hbar, \quad (8)$$

т.е. произведение неопределенностей координаты и соответствующей ей проекции импульса не может быть меньше величины \hbar .

Из соотношений (8) вытекает фактическая невозможность одновременно и с одинаковой степенью точности измерить координату и импульс микрообъекта. Это не связано с несовершенством методов измерения или измерительных приборов, а отражает специфику микрообъектов.

В квантовой теории рассматривается также соотношение неопределенностей для энергии ΔE и времени Δt , в течение которого частица обладает этой энергией. Неопределенности в значениях этих величин удовлетворяют условию:

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar. (9)$$

Частица, имеющая в некотором состоянии среднее время жизни Δt , не может быть охарактеризована определенным значением энергии. Разброс энергии ΔE возрастает с уменьшением среднего времени жизни.

Примеры решения задач:

Задание 1

Неопределенность в определении местоположения частицы, движущейся вдоль оси x , равна длине волны де Бройля для этой частицы. Какова относительная неопределенность ее скорости?

Решение:

Из соотношения неопределенности Гейзенберга для координаты и соответствующей компоненты импульса (8) следует, что $\Delta x \cdot m \cdot \Delta v_x \geq \hbar$, где Δx – неопределенность координаты, Δv_x – неопределенность x – компоненты скорости, m – масса частицы, \hbar – постоянная Планка, деленная на 2π . По условию $\Delta x = \lambda$, где λ – длина волны де Бройля. Учитывая выражение для длины волны де Бройля (4) и соотношение неопределенностей, получаем:

$$\frac{h}{mv_x} \cdot m\Delta v_x \geq \frac{h}{2\pi}.$$

Отсюда относительная неопределенность равна:

$$\frac{\Delta v}{v} \geq \frac{1}{2\pi} = 0,159 \cong 0,16 = 16\%.$$

Ответ: 16%.

Задание 2

Ширина следа электрона на фотографии, полученной с использованием камеры Вильсона, составляет 1мм. Какова неопределенность в определении скорости электрона?

Решение:

Из соотношения неопределенностей Гейзенберга для координаты и соответствующей компоненты импульса (8) следует, что $\Delta x \cdot m \cdot \Delta v_x \geq \hbar$, где Δx – неопределенность координаты, Δv_x – неопределенность x-компоненты скорости, m – масса частицы, \hbar – постоянная Планка, деленная на 2π . Неопределенность x-компоненты скорости электрона можно найти из соотношения:

$$\Delta v \geq \frac{\hbar}{m_e \cdot \Delta x} = \frac{1,05 \cdot 10^{-34}}{9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 10^{-3}} = 0,12 \frac{\text{м}}{\text{с}},$$

где m_e – масса электрона.

Ответ: 0,12 м/с.

Задание 3

Среднее время жизни π^0 -мезона составляет $1,9 \cdot 10^{-16}$ с. Чему равна энергетическая разрешающая способность прибора, с помощью которого можно зарегистрировать π^0 -мезон?

Решение:

Соотношение (8) неопределенностей для энергии и времени имеет вид $\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar$, где ΔE – неопределенность в задании энергии (ширина энергетического уровня), Δt – время жизни частицы в данном состоянии. Для того чтобы частицу можно было зарегистрировать с помощью измерительного прибора, его энергетическая разрешающая способность должна быть не менее ΔE . Из соотношения неопределенностей (8)

$$\Delta E \geq \frac{\hbar}{\Delta t} = \frac{1,05 \cdot 10^{-34}}{1,9 \cdot 10^{-16}} = 0,55 \cdot 10^{-18} \text{ Дж} = 3,4 \text{ эВ} \approx 3 \text{ эВ}$$

Ответ: 3эВ.

ЭЛЕМЕНТЫ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ И ФИЗИКИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

1. Модель атомного ядра

Атомное ядро состоит из элементарных частиц – *протонов* и *нейтронов*. Протон имеет положительный заряд, равный заряду электрона, и массу покоя $m_p = 1,6726 \times 10^{-27}$ кг. Нейтрон – нейтральная частица с массой покоя $m_n = 1,6749 \times 10^{-27}$ кг. Протоны и нейтроны называются *нуклонами*. Общее число нуклонов в ядре называется *массовым числом* A . Общее число протонов в ядре называется *зарядовым числом* Z . Число нейтронов N в ядре составит $N = A - Z$. Зарядовое число ядра совпадает с порядковым номером химического элемента в таблице Менделеева, поэтому оно определяет тип химического элемента, к которому принадлежит ядро.

Ядро обозначается тем же символом, что и атом в таблице Менделеева с указанием массового и зарядового числа: ${}^A_Z X$.

Так, например, в ядре изотопа углерода ${}^{14}_6 C$ содержится 6 протонов и 8 нейтронов.

Поскольку атом электронейтрален, то положительный заряд ядра равен заряду электронной оболочки, и, следовательно, зарядовое число ядра совпадает с количеством электронов в атоме.

Возможно существование ядер с одинаковым зарядовым числом Z , но разными массовыми числами A . Ядра с одинаковым числом протонов, но разным числом нейтронов называются *изотопами*. Например, водород имеет три изотопа:

${}^1_1 H$ – протий, ${}^2_1 H$ – дейтерий, ${}^3_1 H$ – тритий.

2. Дефект масс. Энергия связи

Масса ядра $M_{\text{я}}$ всегда меньше суммы масс покоя нуклонов, входящих в состав ядра. Дефектом массы ядра называется разность между суммой масс покоя нуклонов и массой ядра:

$$\Delta m = Z \cdot m_p + N \cdot m_n - m_{\text{я}} \quad . \quad (1)$$

Выделение и поглощение энергии связи можно выразить через изменение массы ядра по формуле Эйнштейна[3]:

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2. \quad (2)$$

Тогда энергия связи ядра будет определяться выражением:

$$E_{\text{св}} = \Delta m \cdot c^2 = [Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_n - m_{\text{я}}] \cdot c^2. \quad (3)$$

3. Радиоактивность

Нестабильность атомных ядер приводит к **радиоактивности** – способности к самопроизвольному превращению одних атомных ядер в другие, которые сопровождаются испусканием элементарных частиц. Этот процесс превращения ядер называют **радиоактивным распадом**.

К радиоактивным распадам относятся: α -распад, β -распад, γ -излучение, описание и схемы которых представлены в таблице №4. Кроме рассмотренных в таблице распадов, к радиоактивным распадам относятся также самопроизвольное деление ядер и протонная радиоактивность.

При распаде количество ядер исходного химического элемента уменьшается, так как они превращаются в ядра другого или других элементов. Такие процессы превращения ядер носят спонтанный характер и происходят независимо друг от друга, поэтому можно считать, что уменьшение числа радиоактивных ядер dN , распадающихся за малый промежуток времени dt , пропорционально как числу имеющихся ядер N , так и самому промежутку времени dt :

$$dN = -\lambda \cdot N \cdot dt, (4)$$

где коэффициент пропорциональности λ называется **постоянной распада**. Знак минус в правой части выражения (4) означает, что величина dN отрицательна, т.е. при распаде происходит уменьшение числа ядер исходного элемента.

Таблица №4.

Название распада	Описание распада	Схема распада
α -распад	Самопроизвольный распад атомного ядра на альфа-частицу (ядро атома гелия ${}^4_2\text{He}$) и ядро-продукт	${}^A_Z X \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2} Y + {}^4_2 \text{He}$
β -распад		
β^- -распад	Выбрасывание из ядра β^- -частицы (электрона)	${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z+1} Y + {}^0_{-1} \beta + \tilde{\nu}$, где $\tilde{\nu}$ -антинейтрино
β^+ -распад	Испускание из ядер β^+ -частицы (позитрона)	${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z-1} Y + {}^0_{+1} \beta + \nu$, где ν -нейтрино
e -захват	Захват ядром одного электрона с ближайшей к ядру оболочки, в результате которого протон ядра превращается в нейтрон	${}^A_Z X + {}^0_{-1} \beta \rightarrow {}^A_{Z-1} Y$
γ -излучение	Излучение электромагнитными волнами короткой длины волны, которые образуются при переходах между различными состояниями одного и того же возбужденного ядра	

Постоянная распада λ представляет собой относительное число распавшихся ядер в единицу времени и определяет скорость радиоактивного распада.

При радиоактивном распаде число радиоактивных (нераспавшихся) атомов убывает по закону:

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda t}, (5)$$

где N_0 – количество нераспавшихся ядер в начальный момент времени, N – количество нераспавшихся ядер в момент времени t . Формула (5) выражает собой **закон радиоактивного распада**, согласно которому число нераспавшихся ядер убывает со временем по экспоненте.

Периодом полураспада радиоактивного изотопа называется промежуток времени, в течение которого распадается половина радиоактивного вещества, имеющего в начальный момент времени:

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}. (6)$$

Средним временем жизни радиоактивного ядра называется величина, равная интервалу времени, за который число нераспавшихся ядер уменьшается в e раз:

$$\tau = \frac{1}{\lambda}. (7)$$

Скорость радиоактивного распада, называемая **активностью**, определяется по формуле:

$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda N_0 e^{-\lambda t}. (8)$$

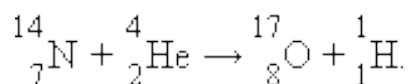
Удельная активность изотопа выражается соотношением:

$$a = \frac{A}{m}. (9)$$

4. Ядерные реакции

Ядерной реакцией называется превращение исходного атомного ядра при взаимодействии с какой-либо частицей в другое ядро, отличное от исходного. При ядерной реакции происходит процесс взаимодействия атомного ядра с другим ядром или элементарной частицей, сопровождающийся изменением состава и структуры ядра и выделением вторичных частиц или γ -квантов. В результате ядерных реакций могут образовываться новые радиоактивные изотопы, которых нет на Земле в естественных условиях. Кроме того к ядерным реакциям относят и самопроизвольные превращения ядер, т.е. радиоактивность, рассмотренную ранее в предыдущем пункте.

Первая ядерная реакция была осуществлена Э. Резерфордом в 1919 году в опытах по обнаружению протонов в продуктах распада ядер [2]. Резерфорд бомбардировал атомы азота α -частицами. При соударении частиц происходила ядерная реакция, протекавшая по следующей схеме:



В результате реакции образовались ядра кислорода и водорода. Ядро водорода Резерфорд предложил назвать протоном.

Ядерные реакции могут происходить под действием под действием альфа-частиц, протонов, дейтронов, нейтронов, электронов и фотонов. Существуют также реакции деление ядер (например, деление ядер урана при бомбардировке урана потоком нейтронов) и цепные ядерные реакции (возникает самоподдерживающийся процесс деления за счет появления вторичных нейтронов). Ядерные реакции могут идти с выделением энергии (такая реакция называется экзотермической), либо с поглощением энергии (эндотермическая).

Энергия ядерной реакции выражается соотношением:

$$W=c^2[(m_1+m_2)-(m_3+m_4)],$$

где m_1 и m_2 – массы покоя ядра-мишени и бомбардирующей частицы;
 $m_3 + m_4$ – сумма масс покоя ядер продуктов реакции.

Если $W>0$, то ядро устойчиво по отношению к распаду ядра на X и Y. Ядро, масса которого больше суммы масс ядер X и Y неустойчиво и может распасться, т.к. энергия $W>0$ перейдет в кинетическую энергию движения осколков X и Y.

При ядерной реакции выполняются следующие законы сохранения:

1. Заряда;
2. Энергии;
3. Импульса;
4. Момент импульса.

Выполняется также ряд других законов сохранения, специфических для ядерной физики и физики элементарных частиц, которые будут рассмотрены далее.

Примеры решения задач:

Задание 1

Сколько α - и β^- -распадов должно произойти, чтобы уран ${}^{235}_{92}\text{U}$ превратился в стабильный изотоп свинца ${}^{207}_{82}\text{Pb}$?

Решение:

α -частица – это ядро атома гелия с массовым числом 4 и зарядовым числом +2. β^- – частица – это электрон с массовым числом 0 и зарядовым числом –1. Так как при радиоактивном распаде выполняются законы сохранения массового и зарядового чисел, то в результате превращения урана в свинец массовое число изменяется на 28, а зарядовое число

изменяется на 10. Следовательно, произойдет 7 α -распадов. В результате 7 α -распадов зарядовое число уменьшится на 14. Чтобы зарядовое число увеличить на 4 единицы, должны произойти 4 β^- -распада.

Ответ: 7 α -распадов и 4 β^- -распада.

Задание 2

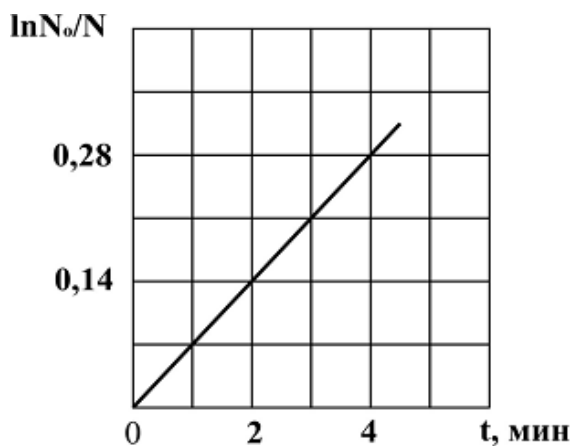
Известно, что через интервал времени осталось нераспавшимся 25% первоначального количества радиоактивных ядер. Чему равен интервал времени t в периодах полураспада?

Решение:

Период полураспада $T_{1/2}$ – это время, в течение которого первоначальное количество ядер данного радиоактивного вещества распадается наполовину. Через время, равное одному периоду полураспада, останется 50% радиоактивных ядер данного сорта, а еще через такой же промежуток времени – 25%. Следовательно, интервал времени t равен двум периодам полураспада.

Ответ: 2 периода полураспада.

Задание 3



На графике в полулогарифмическом масштабе показана зависимость изменения числа радиоактивных ядер изотопа ${}_{12}^{27}\text{Mg}$ от времени. Чему равно среднее время жизни данного изотопа? Ответ запишите в

минутах и округлите до целого числа.

Решение:

Прологарифмировав выражение (5), получим $\ln \frac{N}{N_0} = -\lambda \cdot t$, или $\ln \frac{N_0}{N} = \lambda \cdot t$. Подставив полученное соотношение в выражение (7), найдем среднее время жизни τ :

$$\tau = \frac{t}{\ln \frac{N_0}{N}} = \frac{2}{0,14} = 14 \text{ мин.}$$

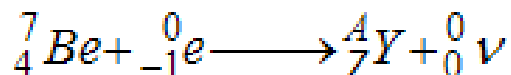
Ответ: 14 мин.

Задание 4

Примером e^- -захвата может быть превращение бериллия ${}^7_4\text{Be}$ в ...

Решение:

При e^- -захвате ядро захватывает электрон из K -оболочки атома:



По закону сохранения массового числа: $(7) + (0) = (A) + (0)$

По закону сохранения зарядового числа: $(4) + (-1) = (Z) + (0)$.

Следовательно, массовое и зарядовое числа соответственно равны:

$(A) = 7$, $(Z) = 3$. Значит, в результате ядерной реакции образуется ${}^7_3\text{Li}$.

Ответ: литий.

5. Атомные единицы энергии и массы

В атомной и ядерной физике из-за малости значений массы и энергии микрочастиц наряду с единицами физических величин

Международной системы часто употребляются две внесистемные единицы. Для выражения масс атомов и атомных ядер используется специальная единица – атомная единица массы. Атомная единица массы (а.е.м. или u) – это единица массы, равная $1/12$ массы атома изотопа углерода ^{12}C : Одна атомная единица массы в единицах СИ – килограммах – имеет значение:

$$1 \text{ а.е.м (} u) \approx 1,66057 \times 10^{-27} \text{ кг.}$$

В качестве единицы энергии используется 1 электрон-вольт (эВ) и его производные:

$$1 \text{ килоэлектронвольт (кэВ)} = 10^3 \text{ эВ,}$$

$$1 \text{ мегаэлектронвольт (МэВ)} = 10^6 \text{ эВ,}$$

$$1 \text{ гигаэлектронвольт (ГэВ)} = 10^9 \text{ эВ,}$$

$$1 \text{ тераэлектронвольт (ТэВ)} = 10^{12} \text{ эВ.}$$

1 эВ – это энергия, приобретаемая частицей, имеющей единичный электрический заряд, при прохождении в электрическом поле разности потенциалов в 1 вольт, т.е.

$$E = A = e\Delta\varphi, \quad 1 \text{ эВ} = 1,6021892 \times 10^{-19} \text{ Кл} \approx 1.6 \times 10^{-19} \text{ Дж.}$$

При вычислении выделяемой или поглощаемой энергии в ядерных процессах удобно пользоваться переводом дефекта массы Δm , выраженного в атомных единицах массы, в энергию в мегаэлектронвольтах.

Найдем значение коэффициента перевода по формуле $\Delta E = \Delta m \cdot c^2$:

$$\Delta E \approx 1.66057 \times 10^{-27} (299792458 \text{ м/с})^2 \approx 1,4924 \cdot 10^{-10} \text{ Дж,}$$

$$\Delta E \approx 1,4924 \cdot 10^{-10} \text{ Дж} / (1,6021892 \times 10^{-13} \text{ Дж/МэВ}) \approx 931,5 \text{ МэВ.}$$

Мы получили, что изменение массы взаимодействующей системы частиц на одну атомную единицу массы сопровождается выделением или

поглощением энергии 931,5 МэВ. В этом смысле можно записать равенство:

$$1 \text{ а.е.м (} u \text{)} = 931,5 \text{ МэВ.}$$

Для нахождения изменения энергии ΔE системы в ядерных процессах в мегаэлектронвольтах достаточно определить изменение массы Δm системы в атомных единицах массы и умножить его на переводной коэффициент 931,5 МэВ/а.е.м.

Массы протона и нейтрона в энергетических единицах имеют следующие величины:

$$m_p \approx 1.0073u \approx 938.272 \text{ МэВ}, m_n \approx 1.0087u \approx 939.565 \text{ МэВ.}$$

С точностью $\sim 1\%$ массы протона и нейтрона равны одной атомной единице массы ($1 u$).

6. Фундаментальные взаимодействия

Все взаимодействия, встречающиеся в различных физических явлениях, можно свести к основным или фундаментальным взаимодействиям:

- сильному;
- электромагнитному;
- слабому;
- гравитационному.

Атомные ядра являются устойчивыми образованиями. Это обеспечивается интенсивным внутриядерным взаимодействием между нуклонами, которое называется **сильным взаимодействием**. Таким образом, сильное, или ядерное взаимодействие определяет структуру ядра и взаимодействие нуклонов, входящих в его

состав. Сильное взаимодействие удерживает нуклоны на расстояниях 10^{-15} м друг от друга. Характеризуемые ими процессы имеют очень малую длительность ($\approx 10^{-22} - 10^{-23}$ секунд). Сильное взаимодействие переносится мезонами.

Электромагнитное взаимодействие – взаимодействие заряженных частиц посредством электрического и магнитного полей. Данное взаимодействие обусловлено электрическими зарядами и переносится фотонами. Время процессов, характеризующих это взаимодействие, порядка $10^{-18} - 10^{-20}$ секунд. Радиус действия не ограничен.

Слабые взаимодействия характеризуют процессы превращения типа β – распада, μ –распада и им аналогичные, а также все процессы взаимодействия нейтрино с веществом. Слабое взаимодействие, как и сильное, является короткодействующим. Оно передается массивными векторными или калибровочными бозонами, которые «весят» в 80-90 раз больше протона. В лабораторных условиях эти бозоны были впервые обнаружены лишь в начале 1980-х годов.

Гравитационное взаимодействие определяет взаимодействие тел в астрономических масштабах. Это взаимодействие далекодействующее, радиус его действия не ограничен. Оно очень быстро ослабевает для объектов с малыми массами и практически не играет роли для ядерных и атомных систем. Гравитационному взаимодействию подвержены все без исключения элементарные частицы. Переносчиками являются гравитоны, которые пока не обнаружены.

В таблице №5 приводятся основные характеристики фундаментальных взаимодействий.

Таблица №5. Характеристики фундаментальных взаимодействий.

<i>Взаимодействие</i>	<i>Относительная интенсивность</i>	<i>Участвуют вовзаимодействии</i>	<i>Радиус действия(м.)</i>	<i>Время передачи взаимодействия(с.)</i>	<i>Переносчики (квант поля)</i>
Сильное(ядерное)	1	Адроны	10^{-15}	$10^{-22} - 10^{-23}$	Мезоны (пионы, каоны)
Электромагнитное	10^{-2}	Фотон, заряженные частицы	∞	$10^{-18} - 10^{-20}$	ФОТОНЫ
Слабое	10^{-10}	Все, кроме фотона и гравитона	$10^{-13} - 10^{-18}$	10^{-13}	Z^0, W^+, W^- – бозоны
Гравитационное	10^{-38}	все	∞		Гравитоны

7. Элементарные частицы

Изучение явлений электроники, строения атомов, атомных ядер, процессов в космических лучах, всевозможных реакций на быстрых заряженных частицах, получаемых в ускорителях, позволило твердо установить существование большого количества частиц, которые были названы элементарными частицами.

Название «элементарные частицы» в буквальном смысле слова должно означать «простейшие частицы», которые, если это понимать дословно, не могут быть дальше разложены на составные части.

Однако это не так. Элементарные частицы могут превращаться друг в друга и, безусловно, имеют каждая свою структуру. В современной физике этот термин обычно употребляется не в своём точном значении, а в менее строгом – для наименования большой группы мельчайших частиц материи, подчинённых условию, что они не являются атомами или атомными ядрами, за исключением протона.

К числу таких частиц в настоящее время относятся электроны, позитроны, протоны, антипротоны, нейтроны и антинейтроны, нейтрино и антинейтрино, мезоны, гипероны, фотоны и др.

Элементарные частицы характеризуются своей массой, электрическим зарядом, собственным моментом количества движения – спином. Спин частиц бывает либо целым (0, 1, 2, ...) – в этом случае они называются бозонами, либо полуцелым (1/2, 3/2, ...) – в этом случае их называют фермионами. Спин фотона равен 1; это означает, что частица примет тот же вид после полного оборота на 360° . Частица со спином 1/2 примет прежний вид при обороте, в 2 раза большем, т. е. в 720° . Спин протона, нейтрона и электрона равен 1/2. Существуют частицы со спином 3/2, 5/2 и т.д. Частица со спином, равным нулю, одинаково выглядит при любом угле поворота.

В зависимости от времени жизни элементарные частицы делятся на:

- стабильные;
- квазистабильные;
- нестабильные (резонансы).

Стабильными (в пределах точности современных измерений) являются: электрон (время жизни более $5 \cdot 10^{21}$ лет), протон (более 10^{31} лет), фотон и нейтрино. К квазистабильным относятся частицы, распадающиеся вследствие электромагнитного и слабого взаимодействия, их времена

жизни более 10^{-20} с. Резонансы распадаются за счет сильного взаимодействия, их характерные времена жизни 10^{-22} – 10^{-24} с.

Все частицы делятся на два класса:

- **фермионы**, которые составляют вещество;
- **бозоны**, через которые осуществляются взаимодействия.

Фермионы имеют полуцелый спин ($1/2, 3/2, \dots$), а бозоны – целый спин ($0, 1, 2, \dots$).

Также совокупность экспериментальных данных позволила объединить элементарные частицы в следующие группы:

- **фотоны** (как квант электромагнитного поля);
- **лептоны** (как семейство слабо взаимодействующих частиц);
- **адроны** (как семейство сильно взаимодействующих частиц).

Элементарные частицы, входящие в соответствующие группы, и их характеристики представлены в таблице №6.

К первой группе частиц, участвующих в электромагнитных и гравитационных взаимодействиях, относятся фотоны. Фотон представляет собой элементарную частицу электромагнитного поля, которую также часто называют квантом электромагнитного поля, основные характеристики которого подробно освещены в разделе оптики.

Однако следует подчеркнуть особенности фотонов высоких энергий, проявляющиеся в процессах взаимодействия и превращения других элементарных частиц: фотон не имеет «массы покоя». Его масса связана с энергией движения фотона относительно других тел и не связана с внутренней энергией фотона, т.е. у него нет массы, которая имеется у других частиц даже тогда, когда их поступательная скорость равна нулю.

Таблица 6. Элементарные частицы и их характеристики.

Группа	Название частицы	Символ		Заряд, ед. e	Масса покоя, ед. m_e	Спин, ед. \hbar	Изоспин I	Лептонное число L	Барьонное число B	Странность S	Приближенное время жизни, с		
		частицы	анти-частицы										
ФОТОНЫ	Фотон	γ		0	0	1	—	0	0	0	Стабилен		
ЛЕПТОНЫ	Электрон	e^-	e^+	1	1	$1/2$	—	+1	0	0	Стабилен		
	Электронное нейтрино	ν_e	$\bar{\nu}_e$	0	0	$1/2$	—	+1	0	0	Стабильно		
	Мюон	μ^-	μ^+	1	206,8	$1/2$	—	+1	0	0	$\approx 10^{-6}$		
	Мюонное нейтрино	ν_μ	$\bar{\nu}_\mu$	0	0	$1/2$	—	+1	0	0	Стабильно		
	Таон	τ^-	τ^+	1	3487	$1/2$	—	+1	0	0	$\approx 10^{-12}$		
	Таонное нейтрино	ν_τ	$\bar{\nu}_\tau$	0	0	$1/2$	—	+1	0	0	?		
МЕЗОНЫ	Пионы	π^0	π^-	0	264,1	0	1	0	0	0	$\approx 10^{-16}$		
		π^+		1	273,1	0	1	0	0	0	$\approx 10^{-8}$		
	Каоны	K^0	\bar{K}^0	0	974,0	0	$1/2$	0	0	+1	$10^{-10} - 10^{-8}$		
		K^+	K^-	1	966,2	0	$1/2$	0	0	+1	$\approx 10^{-8}$		
	Эта-мезон	η^0		1	1074	0	—	0	0	0	$\approx 10^{-19}$		
АДРОНЫ	Барьоны	Протон	p	\bar{p}	1	1836,2	$1/2$	$1/2$	0	+1	0	Стабилен	
		Нейтрон	n	\bar{n}	0	1838,7	$1/2$	$1/2$	0	+1	0	$\approx 10^3$	
		Гипероны: лямбда	Λ^0	$\bar{\Lambda}^0$	0	2183	$1/2$	0	0	0	+1	-1	$\approx 10^{-10}$
			сигма	Σ^0	$\bar{\Sigma}^0$	0	2334	$1/2$	1	0	+1	-1	$\approx 10^{-20}$
		Σ^+		$\bar{\Sigma}^+$	1	2328	$1/2$	1	0	+1	-1	$\approx 10^{-10}$	
		кси	Σ^-	$\bar{\Sigma}^-$	1	2343	$1/2$	1	0	+1	-1	$\approx 10^{-10}$	
			Ξ^0	$\bar{\Xi}^0$	0	2573	$1/2$	$1/2$	0	+1	-2	$\approx 10^{-10}$	
		омега	Ξ^-	$\bar{\Xi}^-$	1	2586	$1/2$	$1/2$	0	+1	-2	$\approx 10^{-10}$	
			Ω^-	$\bar{\Omega}^-$	1	3273	$3/2$	0	0	+1	-3	$\approx 10^{-10}$	

Во второй класс объединяются частицы, не участвующие в сильном взаимодействии, но способные к трем остальным. Они называются лептонами. Принадлежность к этому классу отмечается присвоением каждому члену лептонного «заряда» L , который равен +1 для частиц и -1 для античастиц; для остальных частиц этот заряд равен нулю.

К третьему классу частиц относятся адроны, участвующие во всех видах фундаментальных взаимодействий. Адроны подразделяются на мезоны и барионы.

Мезоны представляют собой нестабильные элементарные частицы с массой покоя, имеющей промежуточное значение между массой покоя электрона и протона, с электрическим зарядом, равным по модулю заряду электрона. Известны положительные, отрицательные и нейтральные мезоны.

Нуклоны (протоны и нейтроны) и гипероны были названы барионами, т.е. тяжелыми частицами. Гипероны—это тяжелые нестабильные частицы, масса которых больше массы нуклонов, но меньше массы дейтронов (ядро изотопа водорода 2_1H). Существуют нейтральные и заряженные гипероны. Барионы имеют полуцелый спин, а мезоны имеют целочисленный спин.

Принадлежность к барионам отмечается присвоением им барионного числа(заряда) B , равного $+1$ для частицы и -1 для античастицы; для мезонов, также как и для лептонов, барионный заряд равен нулю.

Гипотетические частицы, из которых построены адроны, были названы кварками. К настоящему времени известно шесть сортов («ароматов») кварков (u, d, s, c, t, b), каждый из которых существует в трех «цветовых» разновидностях («красный», «синий», «зеленый»). Кварки имеют полуцелый спин и дробный электрический заряд. Строение мезонов и барионов показано в таблице №7.

Таблица 7.Строение мезонов и барионов.

мезоны		барионы	
частица	кварковый состав	частица	кварковый состав
π^+	$u\bar{d}$	p^+	uud
π^-	$\bar{u}d$	n^0	udd
π^0	$\frac{1}{\sqrt{2}}(u\bar{u} - d\bar{d})$	Λ^0	uds
K^+	$u\bar{s}$	Σ^-	dss
K^-	$\bar{u}s$	Σ^0	uss
K^0	$d\bar{s}$	Σ^+	uus

Характерной особенностью элементарных частиц является то, что они существуют в двух видах – частица и античастица. Это выражается в том, что наряду с положительно заряженными частицами определенного вида существуют отрицательно заряженные частицы такого же вида, и наоборот. Для случаев нейтральных частиц различия заключаются в противоположной ориентации механических и магнитных моментов. Например, для электрона античастицей является позитрон, для протона – антипротон, а для нейтрона – антинейтрон. У фотона, в отличие от остальных элементарных частиц, античастица не обнаружена.

Все превращения элементарных частиц происходят с выполнением следующих законов сохранения:

- энергии;
- массы;

- импульса;
- момента количества движения;
- электрического заряда;
- барионного числа;
- лептонного числа.

Примеры решения задач:

Задание 1

Соблюдается ли закон сохранения лептонного заряда во взаимодействии протона с нейтрино по схеме $\nu_e + p \rightarrow n + e^+$?

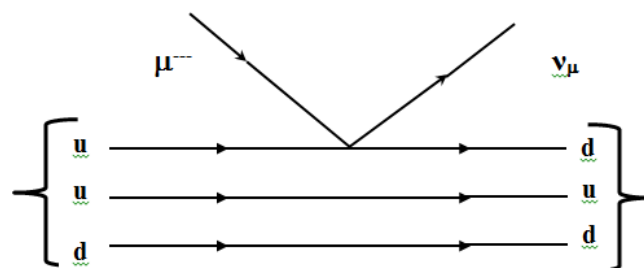
Решение:

Согласно закону сохранения лептонного заряда L в замкнутой системе при любых процессах суммарный лептонный заряд остается неизменным. Для лептонов $L=1$, а для антилептонов $L=-1$. Для всех остальных элементарных частиц лептонные заряды принимаются равными нулю. Для реакции взаимодействия протона с нейтрино в рамках нашей задачи получаем: $(+1)+(0) \rightarrow (0)+(-1)$. Отсюда следует, что реакция $\nu_e + p \rightarrow n + e^+$ не может идти из-за нарушения лептонного заряда.

Ответ: не соблюдается.

Задание 2

На рисунке показана кварковая диаграмма захвата нуклоном μ^- - мезона. Какая реакция соответствует данной диаграмме?



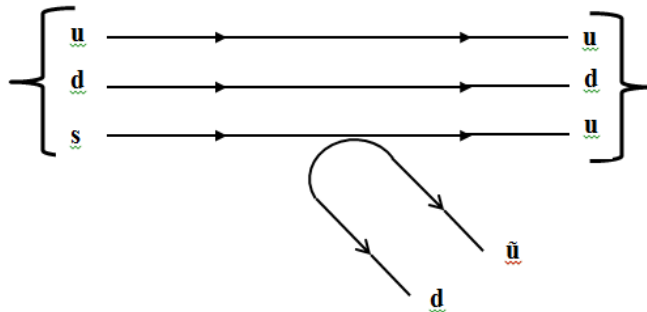
Решение:

Из таблицы №7 видно, что кварковый состав протона $-uud$, а нейтрона $-udd$. Поэтому диаграмма, представленная в данной задаче, соответствует реакции: $\mu^- + p \rightarrow n + \nu_\mu$.

Ответ: $\mu^- + p \rightarrow n + \nu_\mu$

Задание 3

На рисунке показана кварковая диаграмма распада Λ^0 -гиперона. Какая реакция соответствует данной диаграмме?



Решение:

Из таблицы №7 видно, что кварковый состав протона $-uud$, а π^- – пиона $d\bar{u}$. Поэтому диаграмма, представленная в данной задаче, соответствует реакции: $\Lambda^0 \rightarrow p + \pi^-$.

Ответ: $\Lambda^0 \rightarrow p + \pi^-$.

Задание 4

Из-за нарушения какого закона сохранения реакция $p + n \rightarrow e^+ + \nu_e$ невозможна?

Решение:

Во всех фундаментальных взаимодействиях выполняются законы сохранения: энергии, импульса, момента импульса (спина) и всех зарядов (электрического Q , барионного B и лептонного L).

Эти законы сохранения не только ограничивают последствия различных взаимодействий, но определяют также все возможности этих последствий. Для выбора правильного ответа надо проверить, каким законом сохранения запрещена и какими разрешена приведенная реакция взаимопревращения элементарных частиц. Согласно закону сохранения барионного заряда B для всех процессов с участием барионов и антибарионов суммарный барионный заряд сохраняется. Барионам (нуклонам p , n и гиперонам) приписывается барионный заряд $B = +1$. Антибарионам (антинуклонам \bar{p} , \bar{n} и антигиперонам) – барионный заряд $B = -1$, а всем остальным частицам – барионный заряд $B = 0$. Реакция $p + n \rightarrow e^+ + \nu_e$ не может идти из-за нарушения закона сохранения барионного заряда т.к. $(+1) + (+1) \neq (0) + (0)$

Ответ: из-за нарушения закона сохранения барионного заряда.

СОВРЕМЕННЫЕ АСПЕКТЫ ФИЗИКИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

В начале XX века в физике появились две основополагающие теории – общая теория относительности Альберта Эйнштейна, которая описывает Вселенную на макроуровне, и квантовая теория поля, которая описывает Вселенную на микроуровне. Однако эти теории несовместимы друг с другом. Например, для адекватного описания происходящего в чёрных дырах нужны обе теории, а они вступают в противоречие.

В конце XX века физикам удалось разработать теоретическую конструкцию в физике элементарных частиц под названием **Стандартная модель (СМ)**, которая объединяет три из четырёх фундаментальных взаимодействий – сильное, слабое и электромагнитное. Стандартная модель не является теорией всего, так как не описывает тёмную материю, тёмную энергию и не включает в себя гравитацию.

В связи с этим, СМ не может считаться окончательной теорией элементарных частиц. Она должна быть частью некоторой более глубокой теории строения микромира, той частью, которая видна в экспериментах на коллайдерах при энергиях ниже примерно 1 ТэВ. Такие теории еще называют «Новая физика» или «За пределами Стандартной модели».

1. Изучение элементарных частиц в настоящее время

Большой адронный коллайдер (БАК) – самый дорогостоящий и самый известный физический прибор для изучения элементарных частиц. БАК – ускоритель заряженных частиц на встречных пучках, предназначенный для разгона протонов и тяжёлых ионов (ионов свинца) и изучения продуктов их соударений.

Коллайдер построен в научно-исследовательском центре Европейского совета ядерных исследований (CERN), на границе Швейцарии и Франции, недалеко от Женевы.

Ускоритель является самой крупной экспериментальной установкой в мире, т.к. длина основного кольца ускорителя составляет 26 659 м. Из-за того, что он ускоряет адроны, то есть частицы, состоящие из кварков, его назвали адронным, а коллайдером (англ. collide – сталкиваться) – из-за того, что пучки частиц ускоряются в противоположных направлениях и сталкиваются в специальных точках столкновения.

Главная задача Большого адронного коллайдера – не только подтвердить или опровергнуть известные теории, но и получить новую более глубокую теорию.

Вторым в мире по энергии столкновения частиц после БАК является кольцевой ускоритель-коллайдер Тэватрон, позволявший ускорять заряженные частицы – протоны и антипротоны в подземном кольце длиной 6,3 км до энергии 980 ГэВ (~ 1 ТэВ), отсюда и название – Тэватрон. Благодаря исследованиям, проведенным на данном ускорителе была обнаружена самая тяжёлая из открытых пока элементарных частиц – **Топ-кварк**. Его масса составляет $173,1 \pm 1,3 \text{ ГэВ}/c^2$. Из-за своей большой массы топ-кварк до сих пор наблюдался пока лишь на этом ускорителе, поскольку на других ускорителях просто не хватало энергии для его рождения. Топ-кварки интересуют физиков не только сами по себе, но и как «рабочий инструмент» для изучения бозона Хиггса.

Бозон Хиггса – элементарная частица, квант поля Хиггса. В рамках Стандартной модели физики элементарных частиц бозон отвечает за инертную массу элементарных частиц. Постулирован британским физиком Питером Хиггсом в его фундаментальных статьях, вышедших в 1964 году. Предсказанный в рамках СМ, после нескольких десятков лет поисков

июля 2012 года в результате исследований на БАК был обнаружен кандидат на его роль – новая частица с массой около $125 - 126 \text{ ГэВ}/c^2$. Имелись веские основания считать, что эта частица является бозоном Хиггса. В марте 2013 года появились сообщения от отдельных исследователей ЦЕРНа, что найденная полугодом ранее частица действительно является бозоном Хиггса.

Первым значительным научным достижением экспериментов на БАК может стать доказательство или опровержение «суперсимметрии» – теории, гласящей, что любая элементарная частица имеет гораздо более тяжёлого партнера, или «суперчастицу». Как показывают Фейнмановские диаграммы, возможны варианты рождения W - и Z -бозонов, которые в совокупности образуют нейтральный бозон Хиггса. Поэтому планируется исследование свойств W и Z -бозонов, ядерных взаимодействий при сверхвысоких энергиях, процессов рождения и распадов тяжёлых кварков.

2. Применение энергии атома

В 1948 г. по предложению И.В. Курчатова начались первые работы по практическому применению энергии атома для получения электроэнергии. Первая в мире промышленная атомная электростанция мощностью 5 МВт была запущена 27 июня 1954 года в СССР, в городе Обнинск, расположенном в Калужской области.

За пределами СССР первая АЭС промышленного назначения мощностью 46 МВт была введена в эксплуатацию в 1956 в Колдер-Холле (Великобритания). Через год вступила в строй АЭС мощностью 60 МВт в Шиппингпорте (США).

Самый большой в мире парк АЭС принадлежит США. В эксплуатации находятся 104 энергоблока суммарной мощностью около 100 ГВт. Они обеспечивают производство 20% электроэнергии.

Мировым лидером по использованию АЭС является Франция. Ее 59 атомных станций вырабатывают около 80% всей электроэнергии. При этом их суммарная мощность меньше, чем у американских — около 70 ГВт. Среди лидеров по количеству ядерных реакторов в мире можно встретить и две азиатские страны - Японию и Южную Корею.

3. Ядерный реактор

Ядерным реактором называют реактор, в котором осуществляется управляемая цепная ядерная реакция деления. В настоящее время существует очень много различных типов ядерных реакторов разной мощности, которые различаются по величине энергии используемых нейтронов, по типу используемого ядерного топлива, по структуре активной зоны реактора, по типу замедлителя, теплоносителя и т.д.

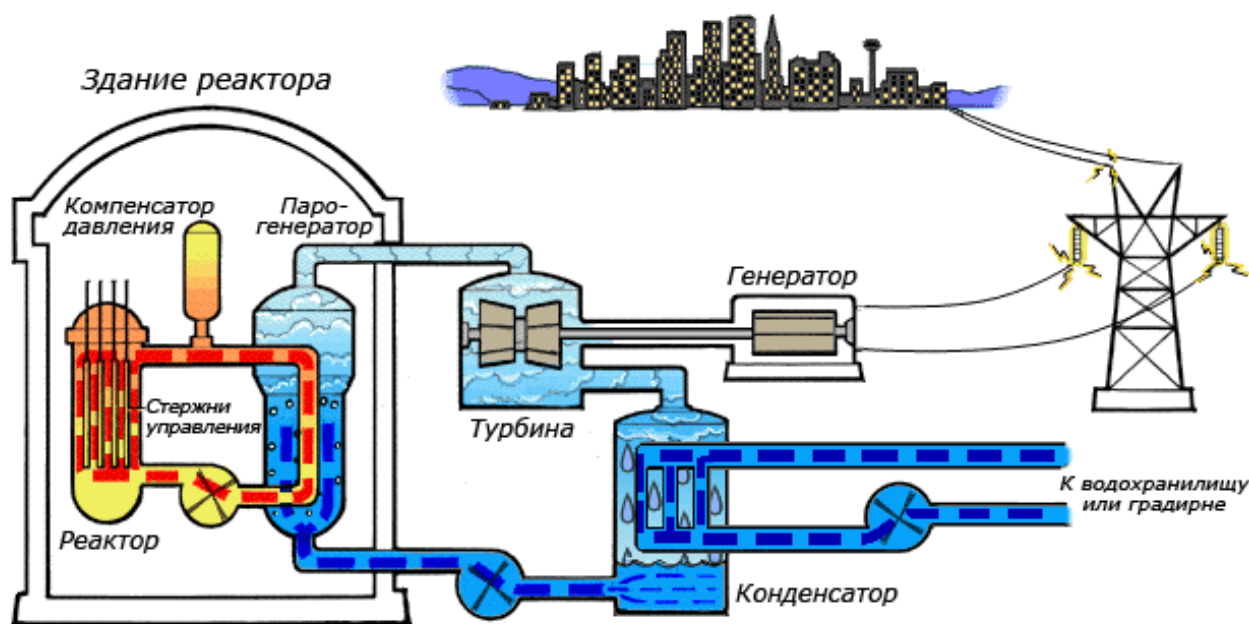


Рис. 1. Схема работы атомной электростанции

На рисунке 1 показана схема работы атомной электростанции с двухконтурным водо-водяным энергетическим реактором. Энергия, выделяемая в активной зоне реактора, передаётся теплоносителю первого

контура. Далее теплоноситель поступает в теплообменник (парогенератор), где нагревает до кипения воду второго контура. Полученный при этом пар поступает в турбины, вращающие электрогенераторы. На выходе из турбин пар поступает в конденсатор, где охлаждается большим количеством воды, поступающим из водохранилища.

4. Реакторы на медленных нейтронах

Реакторы, работающие на тепловых нейтронах (их скорости $2 \cdot 10^3$ м/с), состоят из следующих основных частей:

а) *делящегося вещества*, в качестве которого используют изотопы урана ($U-233$, $U-235$), тория ($Th-232$) или плутония ($Pu-239$, $Pu-240$, $Pu-241$);

б) *замедлителя нейтронов*, которым служит графит, тяжелая или обычная вода;

в) *отражателя нейтронов*, в качестве которого обычно используют те же вещества, что и для замедления нейтронов;

г) *теплоносителя*, предназначенного для отвода теплоты из активной зоны реактора. В качестве теплоносителя используют воду, жидкие металлы, некоторые органические жидкости;

д) *регулирующих стержней*;

е) *системы дозиметрического контроля и биологической защиты* окружающей среды от потоков нейтронов и γ -излучения, возникающих в активной зоне реактора.

Уран входит в состав ядерного топлива в виде тугоплавких соединений. Среди них особенно популярна двуокись урана U_2O_5 , химически инертная и выдерживающая температуры до 2800 °С. Из этой керамики изготавливают небольшие таблетки диаметром в несколько

сантиметров. Получившееся ядерное топливо упаковывают в так называемые *тепловыделяющие элементы* (ТВЭЛы), устройство одного из которых показано на рисунке 2. Циркониевая оболочка служит для изоляции урана и радиоактивных продуктов цепной реакции от химического контакта с внешней средой, прежде всего, с теплоносителем. ТВЭЛ должен хорошо проводить тепло, передавая его от ядерного топлива к теплоносителю.

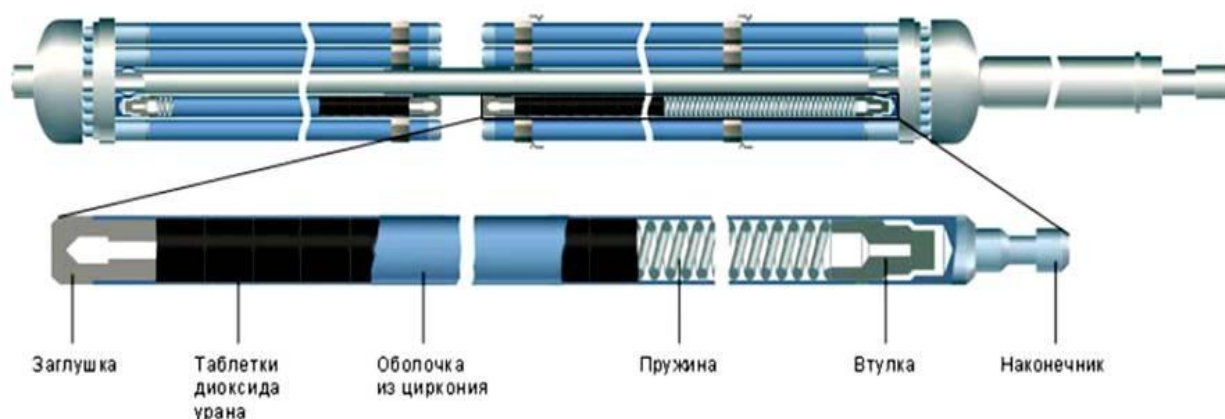


Рис. 2. Тепловыделяющие элементы (ТВЭЛы)

Если при реакции нейтронов будет образовываться меньше, чем нужно, то цепная реакция рано или поздно прекратится. В том случае, если нейтронов будет образовываться больше, чем нужно, количество ядер урана, вовлекаемых в реакцию деления, будет лавинообразно нарастать. Если не увеличить скорость поглощения нейтронов, то управляемая реакция может перерасти в ядерный взрыв.

Изменять скорость поглощения нейтронов можно при помощи управляющих стержней, изготовленных из кадмия, гафния, бора или других веществ (рис. 3).

Теплота, выделяемая в ядерном реакторе при цепной реакции деления ядер, уносится теплоносителем — водой, находящейся под давлением 10 МПа, вследствие чего вода нагревается до 270°C не закипая.

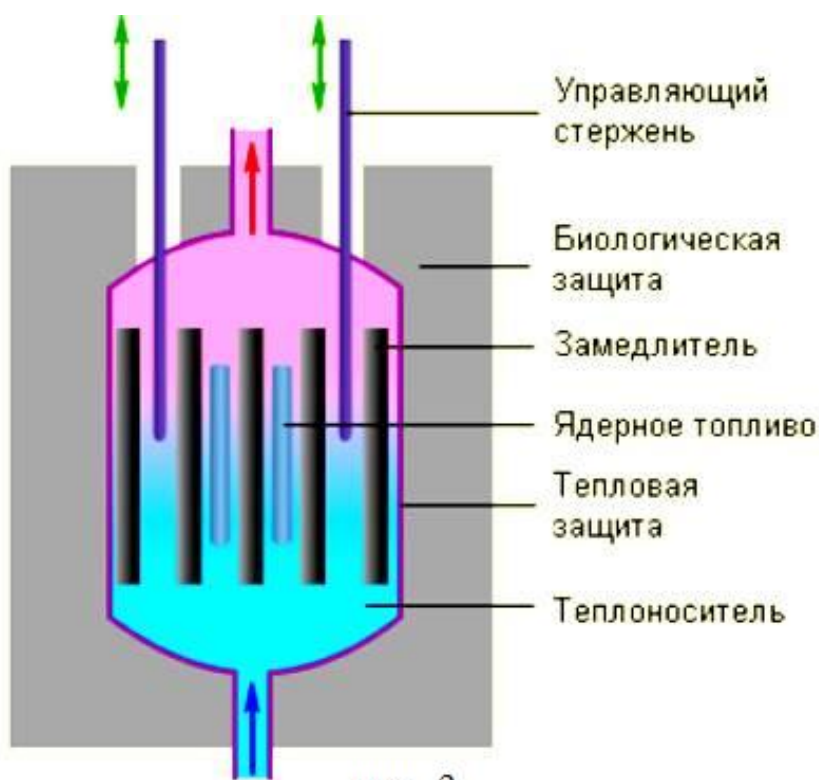


рис. 3

Далее вода поступает в теплообменник, где отдает значительную часть своей внутренней энергии воде второго контура и с помощью насосов вновь попадает в активную зону реактора. Вода второго контура в теплообменнике превращается в пар, который поступает в паровую турбину, приводящую в действие электрогенератор. Второй контур, как и первый, является замкнутым. После турбины пар попадает в конденсатор, где змеевик охлаждается холодной проточной водой. Здесь пар превращается в воду и с помощью насосов вновь попадает в теплообменник. Направление движения воды в контурах таково, что в теплообменнике потоки воды в обоих контурах движутся навстречу друг другу. Раздельные контуры необходимы и потому, что в первом контуре вода, проходя через активную зону реактора, становится радиоактивной. Во втором же контуре пар и вода практически нерадиоактивны.

5. Назначение ядерных реакторов

По своему назначению ядерные реакторы делятся на следующие типы:

а) исследовательские – с их помощью получают мощные пучки нейтронов для научных целей;

б) энергетические – предназначены для получения электрической энергии в промышленных масштабах;

в) теплофикационные – в них получают теплоту для нужд промышленности и теплофикации;

г) воспроизводящие – служат для получения из урана U^{238}_{92} и тория Th^{232}_{90} делящихся материалов плутония $^{239}_{94}Pu$ и урана $^{233}_{92}U$;

д) транспортные – их используют в двигательных установках кораблей и подводных лодок;

е) реакторы для промышленного получения изотопов различных химических элементов, обладающих искусственной радиоактивностью.

6. Преимущества АЭС

АЭС имеют ряд преимуществ по сравнению с тепловыми электростанциями, работающими на органическом топливе:

- небольшой объём используемого топлива и возможность его повторного использования после переработки;
- в атмосферу выбрасывается небольшое количество ионизированного газа, в отличие от тепловой электростанции, которая выводит ещё большее количество радиационных выбросов из-за содержания радиоактивных элементов в каменном угле;
- с одного реактора АЭС может быть получена большая мощность (1000-1600 МВт на энергоблок).

7. Ядерные ракетные двигатели

Приведем еще одно необычное применение энергии реакции распада ядра. Ученые и инженеры, работающие в области космонавтики, всегда стремились создавать наиболее эффективные ракетные двигатели. Понятно, что они не могли не попытаться использовать ядерную энергию для нагрева рабочего тела. Ведь это сулило большие перспективы в освоении ближнего и дальнего космоса, позволяло сделать доступным полет космонавтов на Марс. Однако всевозможных трудностей, в том числе финансовых, возникло очень много, и сегодня ни Россия, ни США не имеют вполне пригодных для установки на космический аппарат ядерных ракетных двигателей (ЯРД). Может быть, главная причина в том, что реально ЯРД не планировалось применять для военной ракетно-космической техники. Тем не менее, СССР и США примерно в одно время создали и испытывали на стендах прототипы таких двигателей. И если об этих работах в Америке можно было прочитать в специальной литературе, то сведения о советской программе в открытых источниках до последних лет отсутствовали.

Многие его системы устроены так же, как у жидкостного ракетного двигателя (ЖРД). Только температура рабочего тела, истекающего из сопла и создающего тягу, повышается не за счет реакции окисления (горения) двух компонентов, а за счет тепловой энергии, выделяющейся в процессе деления ядер радиоактивного вещества. Вместо камеры сгорания, как у ЖРД, в ядерном двигателе размещен реактор, способный нагреть газ более чем до 3000 К. Эта температура ограничивается стойкостью применяемых материалов.

Дело в том, что в реакторе можно разогреть любой газ, а энергетическая эффективность ракетного двигателя тем выше, чем это

рабочее тело имеет меньшую молекулярную массу. Вот и получается, что если в ЯРД применить водород, то скорость истечения его из сопла будет в 3 раза выше, чем в лучшем - кислородно-водородном ЖРД. Все потому, что молекулярная масса в первом случае - 2 г/моль, а во втором - 18. Значит, для космического полета потребуется существенно меньшая масса рабочего тела.

Делящееся вещество в активной зоне реактора может находиться в твердом, жидком или газообразном состоянии. До полноразмерных натуральных испытаний дошли ЯРД только одного типа. Они состоят из тепловыделяющих сборок, содержащих соединение урана-235 с замедлителем нейтронов (для уменьшения массы урана с десятков до нескольких килограммов) и окруженных отражателем нейтронов, а также из устройств, обеспечивающих запуск, регулирование и останов.

Разработку и испытания ЯРД вели только СССР и США. С 1955 года в Америке приступили к выполнению программы по созданию ядерных реакторов типа NERVA, предназначенных для космических ракетных двигателей. Отработка велась сразу на опытных полноразмерных реакторах без сопла –Kiwi. При этом тепловыделяющие элементы часто разрушались из-за трещин в защитном покрытии. В конце 1963 года была поставлена задача осуществить общую разработку технологии ЯРД для обеспечения в 2014-2016 гг. пилотируемого полета к Марсу.

До 1972 года прошли испытания 20 ядерных реакторов, в том числе система NRX-A6 в течение одного часа работы реактора на полной мощности. 28 запусков стендовых ЯРДов имели суммарную продолжительность около 4 ч. Испытания проходили на полигоне в штате Невада.

В СССР проектирование первых ЯРД велось во второй половине 50-х годов. Этими работами занимались КБ главных конструкторов

А.М. Люльки, С.А. Лавочкина, В.М. Мясищева, М.М. Бондарюка, В.П. Глушко совместно с рядом научно-исследовательских институтов – НИИТП, ЦИАМ, ИАЭ, ВНИИНМ.

Уже летом 1959 года сотрудники НИИТП В.М. Иевлев и Ю.А. Трескин доложили о постановке эксперимента на реакторе ИГР, первый запуск которого состоялся в 1961-м. Конструкции совершенствовались, и в 1975-1989 гг. на реакторе ИВГ-1 была выполнена отработка тепловыделяющих сборок на ресурс в форсированном режиме при температурах до 3100 К и тепловых потоках 20 кВт/см³ (на порядок выше, чем в США). А на стендовом реакторе ЯРД минимальной размерности ИРГИТ проводились запуски при мощности до 60 МВт и температуре 2650 К. В отличие от американских российские ученые использовали более экономичные и эффективные испытания отдельных тепловыделяющих элементов в исследовательских реакторах.

Все это в 70-80-е годы позволило в КБ "Салют", КБ химавтоматики, ИАЭ, НИКИЭТ и НПО "Луч" (ПНИТИ) разрабатывать различные проекты космических ЯРД и ядерных энергодвигательных установок. В КБ химавтоматики при научном руководстве НИИТП создавались ЯРД РД 0411 и ядерный двигатель минимальной размерности РД 0410 тягой 40 и 3,6 т соответственно.

В результате были изготовлены реактор, "холодный" двигатель и стендовый прототип для проведения испытаний на газообразном водороде. В отличие от американского, с удельным импульсом не больше 8250 м/с, советский ЯРД за счет более жаростойких и совершенных по конструкции тепловыделяющих элементов и высокой температуры в активной зоне имел этот показатель равным 9100 м/с.

Стендовая база для испытаний ЯРД объединенной экспедиции НПО "Луч" размещалась в 50 км юго-западнее г. Семипалатинск-21. Она начала

работать в 1962-м. В 1971-1978 гг. на полигоне испытывались натурные тепловыделяющие элементы прототипов ЯРД. При этом отработанный газ поступал в систему закрытого выброса. Стендовый комплекс для полноразмерных испытаний ядерных двигателей "Байкал-1" находится в 65 км к югу от г. Семипалатинск-21. С 1970 по 1988 год проведено около 30 "горячих" пусков реакторов. При этом мощность не превышала 230 МВт при расходе водорода до 16,5 кг/с и его температуре на выходе из реактора 3100 К. Все запуски прошли успешно и безаварийно.

В настоящее время подобные работы на полигоне прекращены, хотя оборудование поддерживается в работоспособном состоянии. Стендовая база НПО "Луч" - единственный в мире экспериментальный комплекс, где можно без значительных финансовых и временных затрат проводить испытания элементов реакторов ЯРД. Не исключено, что возобновление в США работ по ЯРД для полетов к Планетам Солнечной системы в нашем столетии.

8. Позитронный ракетный двигатель

Идеи о будущем космонавтики.

Идею двигателя на антиматерии впервые выдвинул немецкий физик Ойген Зенгер (Eugen Sänger) в 1953г. Этот исследователь, долгое время работал на нацистскую Германию и оставил после себя массу интереснейших разработок.

В двигателе Зенгера гамма-лучи, получающиеся в результате аннигиляции антивещества и обычной материи, должны были отражаться от специального зеркала, двигая корабль в нужном направлении. Правда, как в те времена, так и сегодня создать подобные зеркала не представляется возможным: пока что не существует материалов,

способных эффективно отражать гамма-излучение, так как оно пронизывает насквозь любой экран.

Разработки двигателя, использующего античастицы в качестве топлива, теоретические уже ведутся, этим занимаются разные научные организации. К их числу принадлежит фирма PositronicsResearch из США, которую финансирует NASA[14]. Специалисты этой компании считают, что топливом для двигателей должны стать именно позитроны. PositronicsResearch предложила четыре варианта компоновки двигателя (рис. 4).

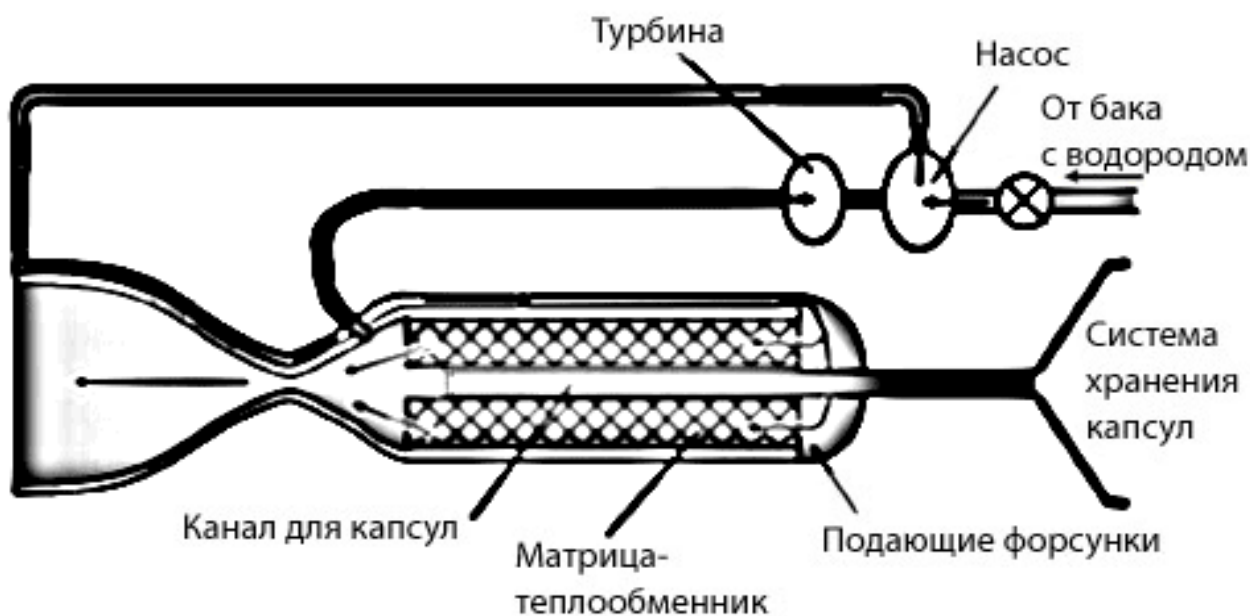


Рис. 4

Предполагается, что сотые доли грамма позитронов, произведенных на земных установках, будут помещены в миниатюрные магнитные капсулы-ловушки. Эти капсулы по очереди, с большой частотой, направляют в центр реактора, наполненного специальным теплообменником – тугоплавкой вольфрамовой матрицей. В центре реактора ловушку выключают, в результате чего позитроны взаимодействуют с вольфрамом и дают вспышку излучения,

нагревающего матрицу. Через нее пропускают водород, который разогревается и с большой скоростью истекает из сопла двигателя, а другая часть горячего водорода отводится для привода насоса. Холодный водород из бака, прежде чем попасть в реактор, проходит через двойные стенки сопла для их охлаждения.

К преимуществам данной конструкции следует отнести ее простоту и технологичность. Вместе с тем, конечная эффективность установки будет существенно ниже теоретического предела, поскольку скорость вылетающих из сопла газов ограничена температурой плавления вольфрама.

Разработчики утверждают, что позитронный реактор на каждый грамм водорода, израсходованного за секунду, дает 900 граммов тяги, что примерно в 2-3 раза выше, чем у химических двигателей.

Существуют и другие варианты компоновки двигателя:

- Второй вариант предусматривает непосредственный нагрев рабочего тела гамма-лучами, без использования матрицы-теплообменника.

- Третий и четвёртый варианты, основаны на феномене абляции — захвата частиц с поверхности твердого тела обтекающим его потоком горячих газов. В данном случае речь идет не о газах, а о лучах.

Ученым еще предстоит решить массу проблем, связанных с получением и хранением антиматерии. Однако специалисты PositronicsResearch отмечают, что и в этой области последнее время заметен существенный прогресс. По их оценкам, первый полет к Марсу на позитронном двигателе может состояться уже в 2030 г.

В будущем ученые смогут решить серьезные технологические и финансовые трудности, с которыми сталкиваются сегодня. И станут

возможными полёты в межзвёздном пространстве на звездолётах, использующих в качестве топлива антиматерию.

«Плюсы» топлива из антиматерии	«Минусы» топлива из антиматерии
<p>Одной из главных причин разработки именно этих двигателей является их КПД. В отличие, скажем, от водородной бомбы, превращающей в энергию 1% собственной массы, двигатель на антивеществе – все 100%.</p>	<p>Однако производство антивещества является очень дорогостоящим процессом. Несколько триллионных грамма антивещества обошлись CERN в 20 млн долларов. При таких темпах производство 1 г стоило бы сто квадриллионов долларов и заняло бы 100 млрд лет непрерывной работы фабрики! Это делает антивещество самым дорогим продуктом на свете.</p>
<p>При вступлении во взаимодействие 1 кг антивещества и 1 кг обычного вещества выделяется энергия, эквивалентная взрыву 47 мегатонн тротила.</p>	<p>Годовая наработка антивещества исчисляется в нанограммах (при цене \$10 триллионов за грамм), что крайне мало даже для межпланетных путешествий, несмотря на чудовищную мощность аннигиляции.</p>
	<p>Современные магнитные ловушки могут удерживать античастицы лишь в течение</p>

	нескольких дней.
--	------------------

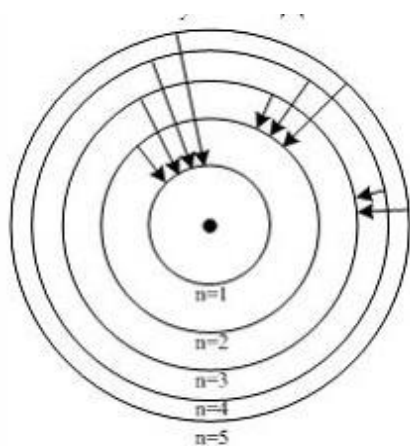
Хотя на сегодняшний день создание водородно-позитронного двигателя (позитронного реактора) пока не представляется возможным, уже имеющийся способ получения позитронов обеспечивает возможность испарения по крайней мере 20 кг сжиженного водорода. Кроме того, предложен ряд альтернативных методов получения антиматерии.

ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

Квантовая физика, физика атома

Вариант 1

1. На рисунке изображены стационарные орбиты атома водорода согласно модели Бора, а также условно изображены переходы электронов с одной стационарной орбиты на другую, сопровождающиеся излучением кванта энергии. В ультрафиолетовой области спектра эти переходы дают серию Лаймана, в видимой – серию Бальмера, в инфракрасной серию Пашена.



Наибольшей частоте кванта в серии Лаймана соответствует переход ...

- А) $n=5 \rightarrow m=3$;
- Б) $n=5 \rightarrow m=1$;
- В) $n=5 \rightarrow m=2$
- Г) $n=3 \rightarrow m=1$

2. Стационарное уравнение Шредингера в общем случае имеет вид :

$\nabla\psi + \frac{2m}{\hbar^2}(E - U)\psi = 0$, где U – потенциальная энергия микрочастицы. Электрону в атоме водорода соответствует уравнение...

А) $\frac{\partial^2\psi}{\partial x^2} + \frac{2m}{\hbar^2}E\psi = 0$

Б) $\nabla\psi + \frac{2m}{\hbar^2}E\psi = 0$

В) $\frac{\partial^2\psi}{\partial x^2} + \frac{2m}{\hbar^2}\left(E - \frac{m\omega^2 x^2}{2}\right)\psi = 0$

Г) $\nabla\psi + \frac{2m}{\hbar^2}\left(E + \frac{ze^2}{4\pi\epsilon_0 r}\right)\psi = 0$

3. Если протон и α -частица движутся с одинаковыми скоростями, то отношение длин волн де Бройля этих частиц равно...

А) 1/4; Б) 4; В) 2; Г) 1/2.

4. Отношение скоростей двух микрочастиц $v_1/v_2=4$. Если их длины волн де Бройля удовлетворяют соотношению $\lambda_2=2\lambda_1$, то отношение масс этих частиц m_1/m_2 равно ...

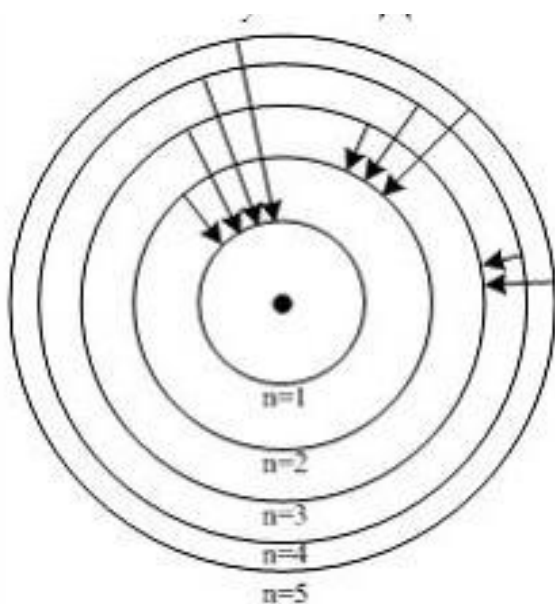
А) 1/2; Б) 4; В) 2; Г) 1/4.

5. Отношение неопределенностей проекций скоростей нейтрона и α -частицы на некоторое направление при условии, что соответствующие координаты частиц определены с одинаковой точностью, равно ...

А) 4; Б) 1/2; В) 2; Г) 1/4.

Вариант 2

1. На рисунке изображены стационарные орбиты атома водорода согласно модели Бора, а также условно изображены переходы электронов с одной стационарной орбиты на другую, сопровождающиеся излучением кванта энергии. В ультрафиолетовой области спектра эти переходы дают серию Лаймана, в видимой – серию Бальмера, в инфракрасной серию Пашена.



Наименьшей частоте кванта в серии Бальмера соответствует переход ...

- А) $n=3 \rightarrow m=2$;
- Б) $n=5 \rightarrow m=2$;
- В) $n=2 \rightarrow m=1$;
- Г) $n=4 \rightarrow m=3$

2. Нестационарным уравнением Шредингера является уравнение...

$$\text{А)} -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi + U(x, y, z) \psi = i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t}$$

$$\text{Б)} \nabla^2 \psi + \frac{2m}{\hbar^2} \left(E + \frac{ze^2}{4\pi\epsilon_0 r} \right) \psi = 0$$

$$\text{В)} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{2m}{\hbar^2} E \psi = 0$$

$$\text{Г)} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{2m}{\hbar^2} \left(E - \frac{m\omega^2 x^2}{2} \right) \psi = 0$$

3. Отношение длин волн де Бройля для протона и α -частицы, имеющих одинаковую кинетическую энергию, равно...

А) 1/2; Б) $\sqrt{2}$; В) $1/\sqrt{2}$; Г) 2.

4. Если протон и дейтрон прошли одинаковую ускоряющую разность потенциалов, то отношение их длин волн де Бройля равно ...

А) $\sqrt{2}$; Б) 1; В) 2; Г) $1/\sqrt{2}$.

5. Высокая монохроматичность лазерного излучения обусловлена относительно большим временем жизни электронов в метастабильном состоянии, равном 10^{-3} с. Учитывая, что постоянная Планка $\hbar = 1,05 \cdot 10^{-34}$ Дж·с, ширина метастабильного уровня будет не менее ...

А) 0,66 пэВ; Б) 66 пэВ; В) 1,52 ТэВ; Г) 0,66 нэВ.

**Элементы ядерной физики и
физики элементарных частиц**

Вариант 1

1. В природе осуществляются четыре типа фундаментальных взаимодействий. Фотоны участвуют в ...

- А) Сильном и гравитационном
- Б) Сильном, слабом и гравитационном
- В) Электромагнитном и гравитационном
- Г) Слабом, электромагнитном и гравитационном

2. Сколько α - и β - распадов должно произойти, что бы уран $^{235}_{92}\text{U}$ превратился в стабильный изотоп свинца $^{207}_{82}\text{Pb}$

- А) 7 α - и 4 β - распадов
- Б) 8 α - и 3 β - распадов
- В) 5 α - и 6 β - распадов
- Г) 6 α - и 5 β - распадов

3. Радиоактивность – это

- А) самопроизвольный распад неустойчивых ядер с испусканием других ядер или элементарных частиц;
- Б) явление вырывания электронов с поверхности вещества под действием света;
- В) явление испускания электронов с поверхности твердого тела при его бомбардировке ионами.

4. Для сильного взаимодействия радиус (в м) действия составляет...

А) 10^{-18} ; Б) ∞ ; В) 10^{-15} ; Г) 10^{-10} .

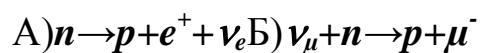
5. Если через интервал времени τ осталось нераспавшимся 25% первоначального количества радиоактивных ядер, то это время равно _____ периодам (-у) полураспада.

- А) периоду полураспада
- Б) четырем периодам полураспада
- В) половине периода полураспада
- Г) двум периодам полураспада

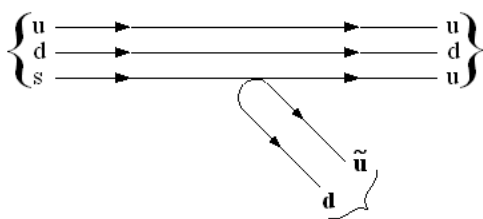
6. В центральной части атома, занимая небольшой объем и обладая его основной массой, находится положительно заряженное ядро. Верным является утверждение, что ...

- А) ядра с одинаковыми массовыми, но разными зарядовыми числами называются изотопами
- Б) наименее устойчивы ядра с четными числами протонов и нейтронов
- В) ядерные силы обладают зарядовой независимостью
- Г) масса ядра равна сумме масс образующих ядро нуклонов

7. Законом сохранения электрического заряда **запрещена** реакция ...



8. На рисунке показана кварковая диаграмма распада Λ -гиперона.

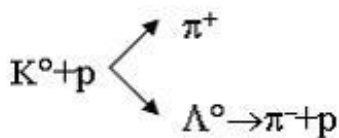


Эта диаграмма соответствует реакции ...

А) $\Lambda^0 \rightarrow p + \pi^-$ Б) $\Lambda^0 \rightarrow n + \pi^-$

В) $\Lambda^0 \rightarrow n + \pi^+$ Г) $\Lambda^0 \rightarrow p + \pi^0$

9. Взаимодействие K^0 -мезона с протоном в водородной пузырьковой камере идет по схеме



Если спин π -мезона $S=0$, то характеристиками K^0 -мезона будут ...

А) $S=0, Q=0$ Б) $S=0, Q=+1$

В) $S=1/2, Q=1$ Г) $S=1/2, Q=+1$

10. Укажите основные характеристики элементарных частиц:

А) Масса, заряд, квантовые числа, валентность, аромат.

Б) Масса покоя, странность, энталпия, цвет.

В) Время жизни, энтропия, заряд, момент импульса.

Г) Масса, заряд, спин, время жизни, внутренние квантовые числа.

Элементы ядерной физики и

физики элементарных частиц

Вариант 2

1. В процессе сильного взаимодействия принимают участие ...

- А) Фотоны
- Б) Нейтроны
- В) Электроны
- Г) Нуклоны

2. Два ядра гелия ${}^4_2\text{He}$ слились в одно, при этом был излучен протон. В результате этой реакции образовалось ядро ...

- А) ${}^7_3\text{Li}$ Б) ${}^8_3\text{Li}$
- Б) ${}^6_4\text{Be}$ Г) ${}^6_3\text{Li}$

3. В ядре изотопа кобальта ${}^{60}_{27}\text{Co}$ содержится...

- А) 33 протона и 60 нейтронов;
- Б) 33 протона и 27 нейтронов;
- В) 27 протонов и 33 нейтрона;
- Г) 27 протонов и 87 нейтронов.

4. Относительная интенсивность гравитационного взаимодействия равна...

- А) 1; Б) 10^{-21} ; В) 10^{-38} ; Г) 10^{-10} .

5. Через интервал времени, равный двум периодам полураспада, нераспавшихся радиоактивных атомов останется...

А) 25%

Б) 50%

В) 75%

Г) 33%

6. Для ядерных сил не характерно (-а) ...

А) действие по линии, соединяющей центры взаимодействующих нуклонов, что характерно для центральных сил

Б) короткодействие

В) зависимость от взаимной ориентации спинов взаимодействующих нуклонов

Г) насыщение

7. Законом сохранения лептонного заряда **разрешена** реакция ...

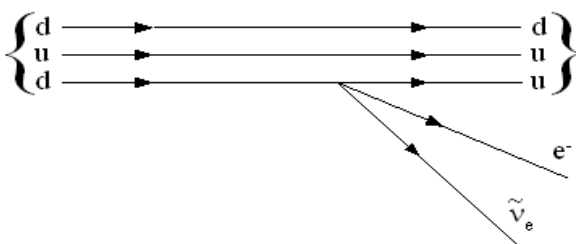
А) $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$

Б) $\nu_e + p \rightarrow n + e^+$

В) $n \rightarrow p + e^- + \nu_e$

Г) $p + e^- \rightarrow n + \bar{\nu}_e$

8. На рисунке показана кварковая диаграмма β^- -распада нуклона.

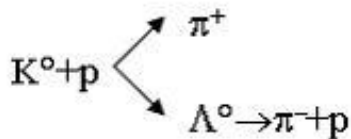


Эта диаграмма соответствует реакции ...

А) $p \rightarrow n + e^- + \bar{\nu}_e$ Б) $n \rightarrow n + e^- + \bar{\nu}_e$

В) $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$ Г) $p \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$

9. Взаимодействие K^0 -мезона с протоном в водородной пузырьковой камере идет по схеме



Если спин π -мезона $S=0$, то характеристиками Λ^0 -гиперона будут...

А) $S=0, Q=-1$ Б) $S=1/2, Q=0$

В) $S=0, Q=+1$ Г) $S=1/2, Q=-1$

10. Принцип квантовой механики, устанавливающий границы применимости классической физики, называется ...

А) А. Постулатом теории относительности

Б) Б. Принципом наблюдательности

В) В. Принципом соответствия

Г) Г. Соотношением неопределенности

ОТВЕТЫ ТЕСТОВЫХ ЗАДАНИЙ

Номер вопроса	Вариант 1	Вариант 2
Квантовая физика, физика атома		
1	Б	А
2	Г	А
3	Б	Г
4	А	А
5	А	А
Элементы ядерной физики и физики элементарных частиц		
1	В	2
2	А	1
3	А	В
4	В	В
5	Г	А
6	В	А
7	А	Б
8	А	В
9	А	В
10	Г	Г

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основная

1. Ремизов А.Н., Потапенко А.Я. Курс физики.– Дрофа, 2004, 720 с. Зисман Г.А., Тодес О.М. Курс общей физики, Т.3.– Наука, 1974, 496 с.
2. Королев Ф.А. Курс физики. Оптика. Атомная и ядерная физика. – М.: Просвещение, 1974, 608 с.
3. Суханов А.Д., Голубева О.Н. Лекции по квантовой физике: учебное пособие. – М.: Высш. шк., 2006. – 300 с.: ил.
4. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики: учебное пособие для вузов. – 4-е изд., испр. – М.: Высш. шк., 2002. – 718 с.
5. Трофимова Т.И. Курс физики: учеб. пособие для вузов. – Изд. 9-е, перераб. и доп. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. – 560 с.
6. Фейман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Феймановские лекции по физике: в 9 т.: – М.: Мир, 1978. – Т. 8, 9.
7. Ивлиев А.Д. Физика, 2009, 672 с.
8. Савельев И.В. Сборник вопросов и задач по физике.–Астрель АСТ, 2005, 320 с.
9. Дж. Коллиер, Дж. Хьюитт «Введение в ядерную энергетику» Москва: Энергоатомиздат, 1989 г.
10. Х. Маргулова «Атомная энергетика сегодня и завтра» Москва: Высшая школа, 1989 г. Л. Б. Окунь. Физика элементарных частиц. М.: Наука, 1988
11. Ф. Бопп. Введение в физику ядра, адронов и элементарных частиц. М.: Мир, 1999.

Дополнительная

1. Джанколли Д. Физика. – М.: Мир, 1989. – 342 с.
2. Н. А. Власов. Антивещество. М.: Атомиздат, 1996.
3. А. Аль-Ани // Молодой ученый. — 2014. — №18.(77) — С. 213-216. «Молодой учёный» .№ 18 (77) . Ноябрь, 2014 г.
4. под ред. проф. А. Д. Трухня Основы современной энергетики / под общ. ред. чл.-корр. РАН Е. В. Аметистова. — М.: Издательский дом МЭИ, 2008. — Т. 1. — с. 174–175. — 472 с
- 5.
6. Л. Квасников, А. Костылев, Вестник Воздушного Флота 6 (1996) 53
7. Дьякова Е.В., Самсонов В.М. Разработка теоретических основ реактивного позитронного двигателя. // Труды Семнадцатой научной конференции молодых ученых и специалистов (ОМУС-2013). С. 31-34.
8. <http://lhc.web.cern.ch/lhc/>
9. <http://www.pr-llc.com/>
10. <http://www.nasa.gov/>

Содержание

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	3
ВВЕДЕНИЕ.....	6
КВАНТОВАЯ ФИЗИКА, ФИЗИКА ЯДРА.....	7
1. СТРОЕНИЕ АТОМА	7
2. ДЛИНА ВОЛНЫ ДЕ БРОЙЛЯ.....	12
3. УРАВНЕНИЯ ШРЕДИНГЕРА	15
4. ЭЛЕКТРОННОЕ СТРОЕНИЕ АТОМОВ. КВАНТОВЫЕ ЧИСЛА ЭЛЕКТРОНА	22
5. СООТНОШЕНИЕ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ ГЕЙЗЕНБЕРГА	29
ЭЛЕМЕНТЫ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ И ФИЗИКИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ	33
1. МОДЕЛЬ АТОМНОГО ЯДРА	33
2. ДЕФЕКТ МАСС. ЭНЕРГИЯ СВЯЗИ.....	34
3. РАДИОАКТИВНОСТЬ	34
4. ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ	37
5. АТОМНЫЕ ЕДИНИЦЫ ЭНЕРГИИ И МАССЫ	41
6. ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ	42
7. ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ.....	44
СОВРЕМЕННЫЕ АСПЕКТЫ ФИЗИКИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ	53
1. ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ В НАСТОЯЩЕЕ ВРЕМЯ	53
2. ПРИМЕНЕНИЕ ЭНЕРГИИ АТОМА.....	55
3. ЯДЕРНЫЙ РЕАКТОР	56
4. РЕАКТОРЫ НА МЕДЛЕННЫХ НЕЙТРОНАХ	57
5. НАЗНАЧЕНИЕ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ.....	60

6.ПРЕИМУЩЕСТВА АЭС	60
7.ЯДЕРНЫЕ РАКЕТНЫЕ ДВИГАТЕЛИ	61
8.ПОЗИТРОННЫЙ РАКЕТНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ	64
ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ	69
ОТВЕТЫ ТЕСТОВЫХ ЗАДАНИЙ	79
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	80

КУЗНЕЦОВАЮлияВасильевна,
ЧЕМАРИНА Юлия Владимировна

ЭЛЕМЕНТЫ АТОМНОЙ, ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ И ФИЗИКИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Учебное пособие

Технический редактор А.В. Жильцов
Подписано в печать 11.11.2014. Формат 60 × 84 ¹/₁₆.
Усл. печ. л. 5,25. Тираж 100 экз. Заказ № 3.
Тверской государственный университет
Редакционно-издательское управление
Адрес: Россия, 170100, г. Тверь, ул. Желябова, 33.
Тел. РИУ: (4822) 35-60-63