



**Методические указания к лабораторным работам
по курсу «Атомная физика»
с использованием виртуального практикума «Физикон»**

В.Д. Степахин, Е.М. Кончиков, В.Д. Борзосеков

Методические указания к лабораторным работам
по курсу «Атомная физика» с использованием
виртуального практикума «Физикон»

Методическое пособие основано на курсах лекций и практических занятий по курсу общей физики для студентов кафедры физики МБФ ГБОУ ВПО РНИМУ им. Н.И. Пирогова Минздрава России.

Материал отбирался с учетом специализации кафедры для студентов обучающихся по специальностям 30.05.01 «медицинская биохимия», 30.05.02 «медицинская биофизика» и 30.05.03 «медицинская кибернетика».

Необходимо отметить, что пособие является почти целиком компилятивным. Вкладом авторов является главным образом отбор материала, проверка и оценка эффективности методик, основанные на личном опыте.

Составители: доцент, к.т.н. В.Д. Степахин, доцент, к.ф.-м.н Е.М. Кончиков, к.ф.-м.н. В.Д. Борзосеков

Под редакцией зав. кафедрой физики МБФ РНИМУ им. Н.И. Пирогова, д.ф.-м.н., профессор Гусейнзаде Н.Г.

Содержание

Допуск к лабораторной работе	3
Лабораторная работа № 1	5
«Прохождение электромагнитного излучения через вещество»	
Лабораторная работа № 2	17
«Спектр излучения атомарного водорода»	
Лабораторная работа № 3	24
«Ядра атомов»	
Литература	34

Допуск к лабораторной работе

Перед допуском к лабораторной работе необходимо пройти инструктаж по технике безопасности на рабочем месте.

Для получения допуска:

- Каждый студент предварительно оформляет свой персональный конспект в тетради для лабораторных работ (ЛР).
- Преподаватель индивидуально проверяет оформление конспекта и задает вопросы по теории, методике измерений, установке и обработке результатов.
- Студент отвечает на заданные вопросы (письменно в черновике конспекта или устно).
- При выполнении всех выше изложенных пунктов преподаватель допускает студента к работе и ставит свою подпись в конспекте студента (графа ДОПУСК в табличке перед лабораторной работой).

Конспект для допуска к ЛР готовится заранее в тетради в клетку.

1. Сверху на первом листе должна быть приведена таблица

Допуск	Номер бригады	Выполнение	Зачет

2. Название лабораторной работы.
3. Цель работы: _____ (переписать полностью из описания).
4. Краткая теория (выписать основные определения, формулы и пояснить каждый символ, входящий в формулу).
5. Экспериментальная установка (нарисовать чертеж и написать наименование узлов и деталей).
6. Таблицы (состав таблиц и их количество, определить самостоятельно в соответствии с методикой измерений и обработкой их результатов).
7. Оформление отчета.

Оформление лабораторной работы к зачету

Полностью оформленная и подготовленная к зачету работа должна соответствовать следующим требованиям:

1. Выполнение всех **пунктов** раздела описания “Оформление отчета” (в тетради представлены все расчеты требуемых величин, заполнены чернилами все таблицы, построены все графики).

2. **Графики** должны удовлетворять всем требованиям, приведенным ниже.
3. Для всех величин в таблицах должна быть записана соответствующая единица измерения.
4. Сделаны **выводы** по каждому графику (см. ниже шаблон)
5. Приведен **ответ** по установленной форме (см. ниже шаблон).
6. Сделаны и приведены **выводы** по полученному результату (см. ниже шаблон).

Требования к графикам:

- график строится на миллиметровой бумаге, размер не менее 1/2 тетрадного листа,
- на графике: оси декартовой системы, на концах осей - стрелки, индексы величин, единицы измерения,
- на каждой оси - **равномерный масштаб** (риски через равные промежутки, числа через равное количество рисок), если не указан специальный масштаб,
- под графиком - полное название графика **словами**,
- на графике - экспериментальные и теоретические точки ярко, различными цветами и формой точек,
- вид графика соответствует теоретической зависимости (не ломаная).

Анализ графика (шаблон):

Полученный экспериментально график зависимости «название функции словами» от «название аргумента» имеет вид прямой (проходящей через начало координат, параболы, гиперболы, плавной кривой) и качественно совпадает с теоретической зависимостью данных характеристик, соответствующих «формула».

Ответ: По результатам измерений и расчетов получено значение «название физической характеристики», равное «символ» = («среднее» ± «ошибка») «един. измер».

Ответ (шаблон):

Полученное экспериментально значение величины «полное название словами», равное «число, единица измерения», с точностью до ошибки измерений, составляющей «число, единица измерения», совпадает (не совпадает) с табличным (теоретическим) значением данной величины, равным «число, единица измерения».

Лабораторная работа № 1

Прохождение электромагнитного излучения через вещество

Цель работы

Целью работы является исследование с помощью компьютерного эксперимента процессов и закономерностей взаимодействия электромагнитного излучения (ЭМИ) с веществом, в частности, поглощения и усиления этого излучения при распространении в активной среде.

Краткая теория

Распространение электромагнитного излучения (ЭМИ) внутри вещества сопровождается различными процессами, основными из которых являются поглощение ЭМИ, а также спонтанное и индуцированное излучение.

Для моделирования ЭМИ, участвующего в этих процессах, используется корпускулярная модель, имеющая вид потока фотонов. Если в волновой модели ЭМИ имеет вид гармонической одномерной волны, то в корпускулярной модели это же ЭМИ следует представлять, как поток фотонов, имеющих одну и ту же энергию E_{ϕ} , равную произведению циклической частоты волны ω на постоянную Планка \hbar :

$$E_{\phi} = \hbar\omega.$$

Для описания вещества, взаимодействующего с ЭМИ, используются модель, состоящая из одинаковых атомов, расположенных неподвижно. Каждым атом содержит один валентных электрон, который может находиться только в двух квантовых состояниях с энергией E_2 (верхнее) и энергией E_1 (нижнее). Такая модель называется *двухуровневой*.

В соответствии с принципом минимальности энергии, в стационарном состоянии с нулевой температурой все валентные электроны во всех атомах должны находиться в нижнем состоянии, то есть должны обладать энергией E_1 . Все остальные электроны атомов вещества с ЭМИ не взаимодействуют.

При распространении в веществе ЭМИ, у которого фотоны имеют энергию, недостаточную для обеспечения перехода валентных электронов с нижнего уровня энергии на верхний, происходит

абсолютно упругое столкновение фотонов с атомами. При этих столкновениях энергия фотона меняется крайне незначительно, но направление его движения меняется хаотически. Данное явление называется рассеянием ЭМИ веществом, и в этой работе мы его не исследуем.

Если фотон имеет энергию, равную энергии возбуждения атома ($\Delta E = E_2 - E_1$), то при взаимодействии с атомом вещества фотон поглощается валентным электроном атома. В результате электрон переходит из квантового состояния с энергией E_1 в другое квантовое состояние E_2 (на верхней энергетической уровень). Данное явление называется резонансным поглощением ЭМИ веществом.

При попадании в вещество и резонансном поглощении ЭМИ, имеющего постоянную интенсивность на входе в вещество, концентрация электронов на нижних энергетических уровнях $n_1(t)$ экспоненциально убывает со временем:

$$n_1(t) = n_1(0) \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_B}\right), \quad (1)$$

где τ_B – *постоянная времени* спонтанных переходов электронов в возбужденное состояние, равная промежутку времени, за которое концентрация электронов в веществе, находящаяся на нижних энергетических уровнях, то есть в стационарном состоянии, уменьшается в e раз;

$n_1(0)$ – начальное (при $t = 0$) значение концентрации электронов в веществе, находящихся на нижних энергетических уровнях.

После логарифмирования получим

$$-\ln\left(\frac{n_1(t)}{n_1(0)}\right) = \frac{t}{\tau_B}. \quad (1')$$

Электроны, перешедшие на верхний энергетический уровень (в возбужденное состояние с энергией E_2), через (как правило) очень короткое время после прекращения воздействия ЭМИ снова возвращаются на свободный нижний уровень (в стационарное состояние с энергией E_1). Процесс перехода носит случайный характер и поэтому называется *спонтанным излучением*. Направление движения спонтанно излучаемых фотонов имеют хаотический характер, а энергия каждого фотона равна разности энергией между уровнями E_2 и E_1 :

$$E_\Phi = E_2 - E_1.$$

Теоретический анализ показывает, что концентрация электронов в возбужденном состоянии $n_2(t)$ экспоненциально убывает со временем:

$$n_2(t) = n_2(0) \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_{и}}\right), \quad (2)$$

где $\tau_{и}$ – **постоянная времени** переходов электронов из возбужденного состояния в стационарное, равная промежутку времени, за которое концентрация электронов в возбужденном состоянии уменьшается в $e = 2,73$ раза;

$n_2(0)$ – начальное (при $t = 0$) значение концентрации электронов в возбужденном состоянии, обладающих энергией E_2 .

После логарифмирования получим

$$-\ln\left(\frac{n_2(t)}{n_2(0)}\right) = \frac{t}{\tau_{и}}. \quad (2')$$

Индукцированным излучением называется процесс перехода электрона из возбужденного в невозбужденное состояние, происходящий под воздействием фотона, пролетающего вблизи атома. Данный процесс был предсказан Эйнштейном и исследован многими учеными (Басов, Прохоров и Таунс получили Нобелевскую премию за теоретические и экспериментальные работы по созданию новых приборов, и, в частности, лазеров, использующих этот эффект).

Концентрация электронов в возбужденном состоянии $n_2(t)$ в этом случае также экспоненциально убывает со временем:

$$n_2(t) = n_2(0) \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_{ии}}\right), \quad (3)$$

где $\tau_{ии}$ – постоянная времени индуцированных переходов электронов из возбужденного состояния в стационарное; $n_2(0)$ – начальное (при $t = 0$) значение концентрации электронов в возбужденном состоянии.

После логарифмирования получим

$$-\ln\left(\frac{n_2(t)}{n_2(0)}\right) = \frac{t}{\tau_{ии}}. \quad (3')$$

При распространении в веществе пучка ЭМИ его интенсивность может убывать, оставаться постоянной или увеличиваться. Вариант зависит от соотношения количество атомов n_1 с энергией E_1 и количество атомов n_2 с энергией E_2 . Концентрация фотонов $u(L)$ зависит от расстояния L , проходимогo ЭМИ в веществе, по экспоненциальному закону:

$$u(L) = u(0) \cdot \exp\{-\alpha L\}, \quad (4)$$

где α – коэффициент затухания, определяемый формулой

$$\alpha = \beta(B_{12}n_1 - B_{21}n_2) = \beta B_{12}(n_1 - n_2). \quad (5)$$

Здесь B_{12} и B_{21} – коэффициенты Эйнштейна, определяющие вероятность поглощения фотона веществом и вынужденного (индуцированного) перехода электрона с верхнего энергетического уровня на нижний, β – некоторая размерная константа. Можно доказать, что коэффициенты Эйнштейна по величине одинаковы, то есть $B_{12} = B_{21}$.

Коэффициент усиления k есть отношение концентрации фотонов на выходе из вещества $u(L)$ к концентрации на входе $u(0)$ или отношение количества фотонов за некоторый промежуток времени на выходе и на входе в среду.

$$k = \frac{u(L)}{u(0)} = \frac{N_{\text{ВЫХ}}}{N_{\text{ВХ}}}, \quad (6)$$

$$\ln(k) = \ln \frac{N_{\text{ВЫХ}}}{N_{\text{ВХ}}} = -\alpha L = -\beta B_{12}(n_1 - n_2)L = C(n_1 - n_2), \quad (7)$$

где C – константа, связанная с L соотношением

$$C = -\beta B_{12}L.$$

Состоянием заселенности уровней в веществе называется соотношение между n_2 и n_1 . **Нормальной заселенностью** называется состояние уровней когда $n_2 < n_1$. В этом случае $\alpha > 0$ и излучение ослабевает (затухает) при распространении в веществе, то есть на выходе из среды количество фотонов (за определенное время) будет меньше, чем на входе в нее ($k < 1$).

Инверсной заселенностью уровней называется состояние, когда $n_2 > n_1$, а количество фотонов на выходе из среды будет больше, чем на входе ($k > 1$). Среда с инверсной заселенностью уровней называется **активной** и должна быть создана искусственно. **«Накачкой»** называется процесс создания активной среды с инверсной заселенностью уровней. Примером подобного процесса является облучение среды дополнительным источником ЭМИ, например, импульсной газоразрядной лампой. Другим способом можно считать

интенсивный нагрев (например, при взрыве) до очень высоких температур.

Устройство, содержащее активную среду, можно использовать как **усилитель** сигналов, которые переносит ЭМИ. Кроме того, на основе такого устройства создаются **генераторы** соответствующего ЭМИ. Для возможности генерации подобный усилитель должен быть дополнен системой **положительной обратной связи**. В диапазоне видимого света положительную обратную связь создают полупрозрачные **зеркала**, которые располагают в торцах цилиндров, заполненных активным веществом.

Для эффективного усиления ЭМИ атомы среды должны обладать энергетическим уровнем, для которого время жизни электрона на нем будет аномально продолжительным. Состояние, связанное с этим энергетическим уровнем получило название метастабильного.

Метастабильным называется такое квантовое состояние, в котором электрон может находиться значительно более долгое время (примерно в 100 000 раз), чем в обычном возбужденном состоянии. Такие уровни широко используют в реальных устройствах усиления и генерации ЭМИ (например, в лазерах, мазерах и т. д.).

В данной **компьютерной модели** для создания активной среды используется некоторый внешний источник, имеющий определенную интенсивность (уровень) накачки. Чем больше интенсивность накачки (в некоторых относительных единицах), тем больше электронов «перебрасывается» с нижнего уровня на верхний. Обратите внимание, что инверсная заселенность уровней создается не сразу, а спустя некоторое время после включения генератора, создающего накачку с постоянной интенсивностью. Это время составляет 40–50 секунд. Только спустя это время в модели заканчивается переходный процесс и коэффициент усиления перестает существенно изменяться.

Методика и порядок измерений

В данной лабораторной работе (рис. 1) используется компьютерная модель «двухуровневой среды», в которой предполагается, что

- все 20 атомов одинаковы и неподвижны,
- валентные электроны, по одному на каждый атом, могут иметь только 2 энергетических состояния: нижнее с энергией E_1 и верхнее с энергией E_2

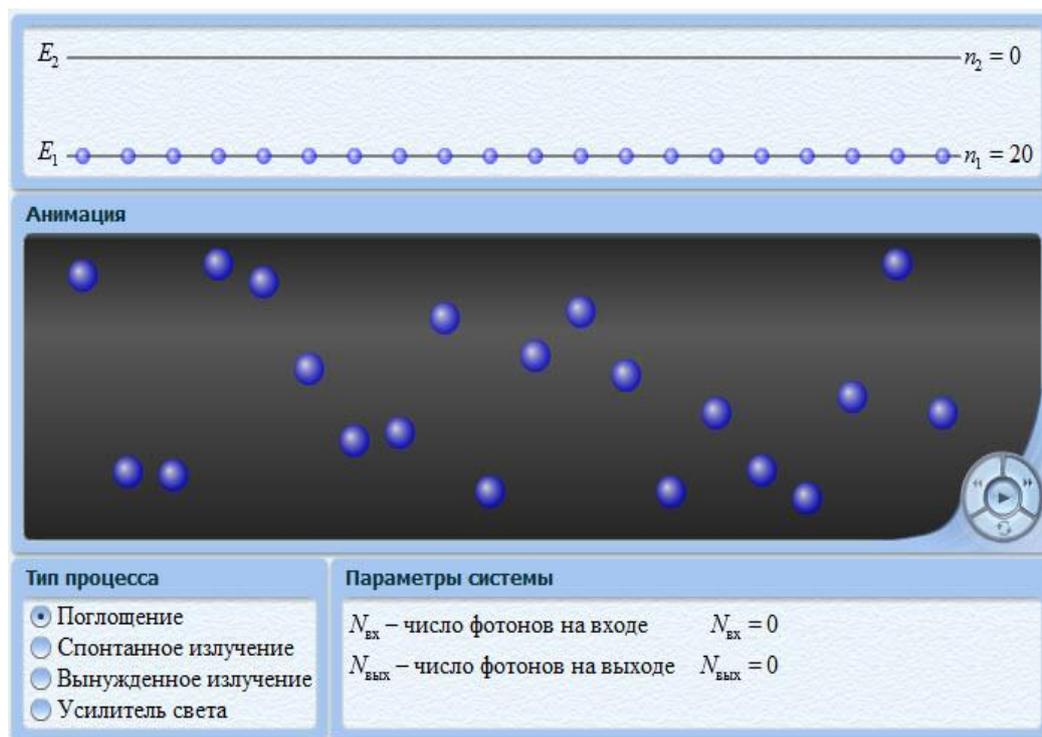


Рис. 1. Модель для исследования поглощения ЭМИ веществом.

При этом можно моделировать

- процесс только поглощения падающего ЭМИ без реализации процессов спонтанного и индуцированного излучения;
- процесс только спонтанного излучения из состояния с полностью возбужденной средой;
- процесс только индуцированного (вынужденного) излучения (без спонтанного);
- процесс прохождения ЭМИ через активную среду с накачкой.

Замечания

1. В компьютерной модели течение времени сильно замедлено: 1 секунда в модели соответствует 1 наносекунде реального времени.
2. Интенсивность падающего на вещество излучения считается постоянной с момента включения.

Таблица 1 (не перерисовывать). Значения уровня накачки

№ бригады	1	2	3	4	5	6	7	8
p (отн. ед.)	30	40	50	60	70	80	90	100

**Таблица 2. Количество заполненных состояний нижнего уровня $n_1(t)$.
Только поглощение**

t, c	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
1	20													
2	20													
3	20													
4	20													
5	20													
6	20													
$\langle n_1 \rangle$	20													
$-\ln(\langle n_1 \rangle/20)$	0													

**Таблица 3. Количество заполненных состояний верхнего уровня $n_2(t)$.
Только спонтанное излучение**

t, c	0	5	10	15	20	25	30
1	20						
2	20						
3	20						
4	20						
5	20						
6	20						
$\langle n_2 \rangle$	20						
$-\ln(\langle n_2 \rangle/20)$	0						

**Таблица 4. Количество заполненных состояний верхнего уровня $n_2(t)$.
Только индуцированное излучение**

t, c	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
1	20													
2	20													
3	20													
4	20													
5	20													
6	20													
$\langle n_2 \rangle$	20													
$-\ln(\langle n_2 \rangle/20)$	0													

Таблица 5. Количество заполненных состояний обоих уровней и количество фотонов на входе $N_{ВХ}$ и выходе $N_{ВЫХ}$

Интенсивность (уровень) накачки p (отн.ед.) = _____

t (мин)	1	2	3	4	5	6	Среднее
n_1							
n_2							
n_2/n_1							
$N_{ВХ}$							
$N_{ВЫХ}$							
K							

Измерения

Эксперимент 1. Исследование резонансного поглощения ЭМИ веществом.

1. Выберите режим «Поглощение», щелкнув мышью на соответствующей кнопке слева внизу поля модели.
2. Включите часы Windows: Установите маркер мыши на указатель времени справа внизу экрана, нажмите правую кнопку мыши и выберите «Настройка даты/времени». Перенесите окно с часами в удобное место на экране.
3. При прохождении стрелки на часах через удобное деление (например, мимо длинного штриха) щелкните мышью по

- кнопке «Пуск» (средняя часть круглой управляющей кнопки) слева внизу поля модели.
4. Через 5 секунд повторно щелкните по той же кнопке, что остановит процесс, происходящий в модели.
 5. Запишите появившееся справа вверху значение количества заполненных состояний стационарного уровня энергии n_1 в первой строке табл. 2.
 6. Повторяйте действия по пп. 3–5, пока не заполнится вся строка таблицы.
 7. Нажмите кнопку «Сброс» (нижняя часть круглой управляющей кнопки) и повторите действия по пп. 3–6, заполняя вторую строку табл. 2.
 8. Измерив 6 раз значения $n_2(t)$, переходите к следующему эксперименту.

Эксперимент 2. Исследование спонтанного излучения ЭМИ.

1. Выберите режим «Спонтанное излучение» и нажмите кнопку «Сброс». Обратите внимание на то, что все доступные состояния на возбужденном уровне будут заняты.
2. При прохождении стрелки на часах через удобное деление (например, мимо длинного штриха) щелкните мышью по кнопке «Пуск» (средняя часть круглой управляющей кнопки) слева внизу поля модели.
3. Через 5 секунд повторно щелкните по той же кнопке, что остановит процесс, происходящий в модели.
4. Запишите появившееся справа вверху значение количества заполненных состояний возбужденного уровня n_2 в соответствующей строке табл. 3.
5. Повторяйте действия по пп. 2–4, пока не заполнится вся строка таблицы.
6. Нажмите кнопку «Сброс» и повторите действия по пп. 2–5, заполняя следующую строку таблицы.
7. Измерив 6 раз значения $n_2(t)$, переходите к следующему эксперименту.

Эксперимент 3. Исследование индуцированного излучения ЭМИ.

1. Выберите режим «индуцированное излучение» и нажмите кнопку «Сброс». Обратите внимание на то, что все доступные состояния на возбужденном уровне будут заняты.
2. При прохождении стрелки на часах через удобное деление щелкните мышью по кнопке «Пуск» (средняя часть круглой управляющей кнопки) слева внизу поля модели.
3. Через 5 секунд повторно щелкните по той же кнопке, что остановит процесс, происходящий в модели.

4. Запишите появившееся справа сверху значение количества заполненных состояний стационарного уровня n_1 в первой строке табл. 4.
5. Повторяйте действия по пп. 3–5, пока не заполнится вся строка таблицы.
6. Нажмите кнопку «Сброс» и повторите действия по пп. 3–6, заполняя вторую строку табл.3.
7. Измерив 6 раз значения $n_2(t)$, переходите к следующему эксперименту.

Эксперимент 4. Исследование усиления ЭМИ при распространении в активной среде.

1. Выберите режим «Усилитель света» и нажмите кнопку «Выбор». Обратите внимание на то, что все доступные состояния на возбужденном уровне будут свободны. Установите интенсивность накачки в соответствии с величиной из табл. 1 для вашей бригады.
2. Нажмите кнопку «Пуск» (средняя часть круглой управляющей кнопки) при прохождении стрелки на часах через удобное деление, после чего начнется накачка. Надо подождать окончания процесса установления, который длится около 1 мин.
3. В момент времени, указанный первым в табл. 6, повторно щелкните по той же кнопке, что остановит процесс, происходящий в модели.
4. Запишите появившиеся на модели величины заселенностей уровней n_1 и n_2 , а также количества вошедших фотонов $N_{ВХ}$, вышедших фотонов $N_{ВЫХ}$ и коэффициента усиления K в первом столбце табл. 5.
5. При прохождении стрелки на часах через удобное деление щелкните мышью по кнопке «Пуск» (средняя часть круглой управляющей кнопки) и через 1 минуту повторно нажмите ту же кнопку.
6. Повторите действия по пп. 4–5, пока не заполнятся все столбцы таблицы.

Обработка результатов и оформление отчета

1. Вычислите средние значения всех измеренных характеристик и заполните соответствующие строки в каждой таблице.
2. Вычислите логарифмы относительных концентраций и заполните соответствующие строки в табл. 2, 3 и 4.

3. По эксперименту 4 вычислите заселенность второго уровня n_2/n_1 , вычислите средние значения, заполните последний столбец табл. 5.
4. На одном чертеже постройте графики зависимости логарифма относительной заселенности уровня с обратным знаком от времени для экспериментов 1, 2, и 3.
5. По заданию преподавателя обработайте полученные результаты методом наименьших квадратов.
6. Сделайте выводы по графикам для экспериментов 1, 2 и 3, сравнивая их с теоретическими зависимостями (1'), (2') и (3').
7. Используя графики (или результаты обработки по методу наименьших квадратов) определите постоянные времени процессов поглощения (τ_B), спонтанного излучения ($\tau_{И}$) и индуцированного излучения ($\tau_{ИИ}$). Используйте общую формулу

$$\tau = \frac{\Delta t}{\Delta(-\ln(\dots))},$$

где $\Delta\dots$ – длины соответствующих катетов из графиков.

8. Вычислите значение константы C , используя формулу (7).
9. Сформулируйте физический смысл этой константы.

Вопросы и задания

1. Назовите основные процессы, которыми сопровождается распространение электромагнитного излучения (ЭМИ) внутри вещества.
2. Что такое фотоны?
3. Как связана энергия фотона с характеристиками гармонической электромагнитной волны?
4. Опишите модель ЭМИ, используемую в данной лабораторной работе.
5. Опишите модель вещества, взаимодействующего с ЭМИ в данной лабораторной работе.
6. Что такое валентный электрон?
7. Что такое рассеяние и каково условие его появления?
8. Каково условие резонансного поглощения ЭМИ веществом?
9. Как меняется со временем количество электронов на нижнем энергетическом уровне при резонансном поглощении?
10. Что такое постоянная времени перехода электронов в возбужденное состояние?
11. Что такое спонтанное излучение?
12. Как меняется во времени количество электронов в возбужденном состоянии при спонтанном излучении?

13. Что такое постоянная времени перехода электронов из возбужденного в стационарное состояние?
14. Что такое индуцированное излучение?
15. Сформулируйте зависимость интенсивности потока фотонов $u(L)$ от расстояния L , проходимого ЭМИ в веществе.
16. Нарисуйте график зависимости $u(L)$.
17. От чего зависит коэффициент затухания ЭМИ в данном эксперименте?
18. Каково условие усиления ЭМИ при его распространении в веществе?
19. Что такое активная среда?
20. Какой элемент, помимо активной среды, необходим для генерации ЭМИ?
21. Насколько замедлено течение времени в компьютерной модели?
22. Что такое метастабильное состояние электрона в атоме?
23. Что такое коэффициент усиления интенсивности ЭМИ в данной модели?
24. Сколько атомов входят в состав компьютерной модели? Как они себя ведут?

Лабораторная работа № 2

Спектр излучения атомарного водорода

Цель работы

- Знакомство с планетарной и квантовой моделями атома при моделировании процесса испускания электромагнитного излучения возбужденными атомами водорода.
- Экспериментальное подтверждение закономерностей формирования линейчатого спектра излучения атомарного водорода при низких давлениях.
- Экспериментальное определение постоянной Ридберга.

Краткая теория

Спектром электромагнитного излучения (ЭМИ) называется совокупность электромагнитных волн, излучаемых или поглощаемых атомами (молекулами) данного вещества.

Линейчатый спектр состоит из отдельных компонент (спектральных линий).

Спектральной линией называется электромагнитное излучение, испускаемое (или поглощаемое) атомом при переходе его электрона из одного стационарного квантового состояния в другое.

Модели (классические) спектральной линии:

- гармоническая электромагнитная волна с частотой ν ,
- поток фотонов с одной и той же энергией $E_{\text{ф}} = h\nu$.

Расстояние между линиями (по шкале длин волн или частот) в линейчатом спектре много больше ширины линий. Такой спектр излучают атомарные газы.

Кроме линейчатого выделяют еще **полосатый** спектр, который излучают молекулярные газы, и сплошной спектр, излучаемый нагретыми твердыми телами.

Планетарная (орбитальная) модель атома: в центре атома расположено очень малое положительно заряженное ядро, вокруг которого по определенным (разрешенным) стационарным круговым орбитам движутся электроны, масса которых во много раз меньше массы ядра. При движении по орбите электрон не испускает электромагнитного излучения (ЭМИ). При поглощении ЭМИ (фотона)

электрон переходит на более «высокую» разрешенную орбиту, на которой его энергия становится больше на величину $\Delta E_{\text{эл}}$, равную энергии поглощенного фотона $E_{\text{ф}}$. При обратном переходе электрон испускает фотон с такой же энергией $E_{\text{ф}} = |\Delta E_{\text{эл}}|$.

Квантовая модель атома отличается от планетарной в первую очередь тем, что в ней электрон не имеет точно определенного радиус-вектора (координаты) и вектора скорости, поэтому бессмысленно говорить о траектории его движения. Можно определить (и нарисовать) только границы области его преимущественного движения (орбитали).

Уравнение Шредингера для движения электрона в кулоновском поле ядра атома водорода используется для анализа квантовой модели атома. В результате решения этого уравнения получается **волновая функция**, определяющая плотность вероятности нахождения электрона вблизи данной точки. Она зависит не только от координаты \vec{r} и времени t , но и от четырех параметров, имеющих дискретный набор значений и называемых квантовыми числами. Они имеют названия: главное, азимутальное, магнитное и магнитное спиновое.

Более точное уравнение Дирака добавляет еще одно квантовое число, которое называется «магнитное спиновое». Его появление связывается с наличием у электрона некоторого внутреннего движения, называемого спиновым (коротко «спин»). При дальнейших исследованиях обнаружилось, что спиновым движением (спином) обладают и многие другие частицы.

Для модуля вектора момента импульса спинового движения \vec{s} имеет место соотношение:

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

где s – спиновое квантовое число, которое у каждой частицы имеет только одно значение. Например, для электрона $s_{\text{эл}} = 1/2$.

Аналогичные значения имеют спиновые квантовые числа протона и нейтрона. Но у фотона $s_{\text{ф}} = 1$.

Главное квантовое число n может принимать целочисленные значения 1, 2, ... Оно определяет величину энергии электрона в атоме:

$$E_n = -\frac{E_{iH}}{n^2},$$

где E_{iH} – энергия ионизации атома водорода (13,6 эВ).

Азимутальное (орбитальное) квантовое число l определяет модуль момента импульса электрона при его орбитальном движении:

$$|\vec{L}| = \hbar\sqrt{l(l+1)}.$$

Оно принимает целочисленные значения $l = 0, 1, 2, \dots, n - 1$.

Магнитное квантовое число m_l определяет проекцию вектора момента импульса орбитального движения электрона L_z на направление внешнего магнитного поля \vec{B} . Оно принимает положительные и отрицательные целочисленные значения, по модулю меньшие или равные l :

$$L_z = \hbar m_l,$$

где $m_l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l$.

Магнитное спиновое квантовое число m_s , определяет проекцию вектора собственного момента импульса электрона (**спина** \vec{S}) на направление внешнего магнитного поля \vec{B} :

$$s_z = \hbar m_s,$$

принимает только два значения:

$$m_s = +\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}.$$

Вырожденными называются состояния электрона с одинаковой энергией.

Кратность вырождения равна количеству состояний с одной и той же энергией.

Краткая запись состояния электрона в атоме:

- цифра, равная главному квантовому числу,
- буква, определяющая азимутальное квантовое число:

Буквенное обозначение для этого числа приведено в таблице:

Буква	<i>s</i>	<i>p</i>	<i>d</i>	<i>f</i>	<i>g</i>
Значение <i>l</i>	0	1	2	3	4

Пример: Электрон в атоме имеет главное квантовое число $n = 3$, а азимутальное $l = 2$. Тогда краткая запись его состояния такова: «3*d*».

Правило отбора азимутального квантового числа: $\Delta l = \pm 1$. Электрон в атоме может переходить только между состояниями, удовлетворяющему указанному правилу.

Спектральной серией называется совокупность линий излучения, соответствующих переходу электрона в атоме на один и тот же нижний уровень энергии. Для атома водорода

Серия	Лаймана	Бальмера	Пашена	Брэкета
Переходы	$np \rightarrow 1s$	$ns \rightarrow 2p,$ $nd \rightarrow 2p$	$nf \rightarrow 3d,$ $np \rightarrow 3d$	$ng \rightarrow 4f,$ $nd \rightarrow 4f$

Методика и порядок измерений

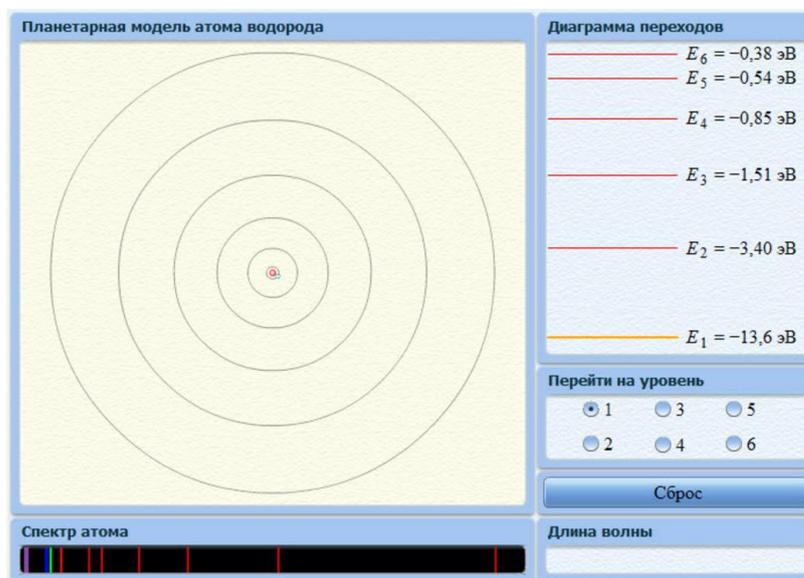


Рис.1. Орбитальная (планетарная) модель атома водорода.

Зарисуйте необходимое в свой конспект лабораторной работы.

Получите у преподавателя допуск для выполнения измерений.

Измерения

1. Запишите в табл. 2 величину главного квантового числа n_0 для нижнего уровня энергии данной серии, указанную в табл. 1 для вашей бригады. Запишите туда же название соответствующей серии.
2. Подведите маркер мыши к круглой кнопке (в окне «Перейти на уровень»), соответствующей уровню энергии электрона с номером n_0 и щёлкните левую кнопку мыши.
3. Подведите маркер мыши к кнопке для уровня энергии электрона с номером $n_1 = n_0 + 1$, большим, чем n_0 , и щёлкните левую кнопку мыши.
4. Наблюдайте и зарисуйте фотографию модели атома водорода (в левом поле), а также стрелки в правом верхнем поле и отметку в нижнем поле, соответствующие линии в данной серии.
5. Запишите в табл. 2 длину волны данной линии.
6. Повторите измерения, начиная с п. 2 для других уровней данной спектральной серии ($n_2 = n_0 + 2, n_3 = n_0 + 3, \dots$).

Таблица 1 (не перерисовывать). Начальные условия

Номер бригады	Гл. кв. число ниж. уровня n_0
1 и 5	1
2 и 6	2
3 и 7	3
4 и 8	4

Таблица 2. Результаты измерений. Серия _____ . $n_0 =$ _____

Номер линии i	n_i	$\frac{1}{n_i^2}$	λ_i , мкм	$\frac{1}{\lambda_i}$, мкм ⁻¹
1				
2				
3				
4				

Обработка результатов и оформление отчета

1. Вычислите и запишите в табл. 2 обратные длины волн.

2. Определите, переходы между какими квантовыми состояниями электрона в атоме водорода соответствует каждая линия излучения. Запишите в таблицу значения n .
3. Постройте график зависимости обратной длины волны $(\frac{1}{\lambda_i})$ от обратного квадрата главного квантового числа $(\frac{1}{n_i^2})$ для данной спектральной серии.
4. Определите по наклону графика значение постоянной Ридберга

$$R = \frac{\Delta(\frac{1}{\lambda})}{\Delta(\frac{1}{n^2})}$$

5. Запишите ответ и проанализируйте ответ и графики.

Табличное значение: Постоянная Ридберга $R = 1,1 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$.

Вопросы и задания

1. Что такое спектр электромагнитного излучения (ЭМИ)?
2. Что такое линейчатый спектр ЭМИ?
3. Что является источником линейчатого спектра ЭМИ?
4. Что такое полосатый спектр ЭМИ и что является его источником?
5. При каких условиях излучается сплошной спектр ЭМИ?
6. Опишите планетарную модель атома.
7. При каких условиях электроны в атоме излучают или поглощают ЭМИ?
8. Как связаны друг с другом характеристики фотона и электрона, который излучает данный фотон?
9. Какое уравнение используется для анализа квантовой модели атома?
10. Что является решением этого уравнения?
11. Как описывается электрон и его движение в квантовой модели атома?
12. Что определяет квадрат модуля волновой функции?
13. Дайте определение орбитали электрона в атоме.
14. Что определяет главное квантовое число? Напишите формулу для его нахождения.
15. Что определяет азимутальное квантовое число? Напишите формулу для его нахождения.
16. Что определяет магнитное квантовое число? Напишите формулу для его нахождения.
17. Что такое спин электрона?

18. Что определяет спиновое квантовое число? Напишите формулу для его нахождения.
19. Что определяет магнитное спиновое квантовое число? Напишите формулу для его нахождения.
20. Что такое вырожденные состояния?
21. Как определить кратность вырождения состояния?
22. Расшифруйте краткую запись состояния электрона в атоме ($2s, 2p$).
23. Может ли электрон иметь состояние $2d$ и почему?
24. Сформулируйте правило отбора.
25. Что такое спектральная серия?
26. Назовите названия спектральных серий излучения атомарного водорода. Запишите условия для их возникновения.

Лабораторная работа № 3

Ядра атомов

Цель работы

Знакомство с основными свойствами ядер атомов. Исследование состава ядер и его влияния на количество изотопов.

Краткая теория

Ядром называется центральная часть атома, которая имеет очень малый размер и в которой сосредоточена основная масса атома. Оно в 2000–4000 раз массивнее, чем электроны, заполняющие основной объем атома.

В **состав ядра** входят частицы, называемые «нуклонами» (в переводе – ядерные частицы).

A – **массовое число** ядра равно количеству нуклонов в данном ядре.

Нуклоны подразделяют на протоны и нейтроны.

Протоном называется нуклон, имеющий положительный заряд, равный элементарному заряду.

Z – **зарядовое число** ядра, равное количеству протонов в данном ядре. Оно же равно порядковому номеру данного химического элемента в таблице Менделеева.

Символ протона «р». Заряд протона $Q_p = +e$, где e – элементарный заряд, равный $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл. Масса протона $m_p = 1839,7 m_e$, где масса электрона $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31}$ кг.

Протон обладает собственным моментом импульса – **спином**, модуль которого равен

$$|\vec{S}| = \hbar \sqrt{s_p(s_p + 1)},$$

где $s_p = \frac{1}{2}$ называется **спиновым квантовым числом протона**.

Протон – это фермион (подчиняется принципу Паули).

Протон имеет **магнитный момент**: $M_p = 1,3 M_{\text{Б.ЯД}}$, где ядерный магнетон Бора равен

$$M_{\text{Б.ЯД}} = \frac{e\hbar}{2m_p c}.$$

Нейтроном называется нуклон, не имеющий заряда (нейтральный – отсюда и название).

Его символ «n». У нейтрона нет электрического заряда $Q_n = 0$.

Количество нейтронов в ядре

$$N = A - Z.$$

Масса нейтрона чуть больше массы протона $m_n = m_p + 2,5m_e$.

Нейтрон – это тоже фермион (подчиняется принципу Паули), т.к. его спиновое квантовое число $s_n = 1/2$.

Нейтрон имеет магнитный момент, несмотря на то, что он не заряжен.

$$M_n = -1,91 M_{\text{Б.ЯД}}.$$

Отношение магнитных моментов нуклонов очень близко к отношению целых чисел:

$$\left| \frac{M_p}{M_n} \right| = \frac{2}{3}.$$

Характеристики ядра в целом

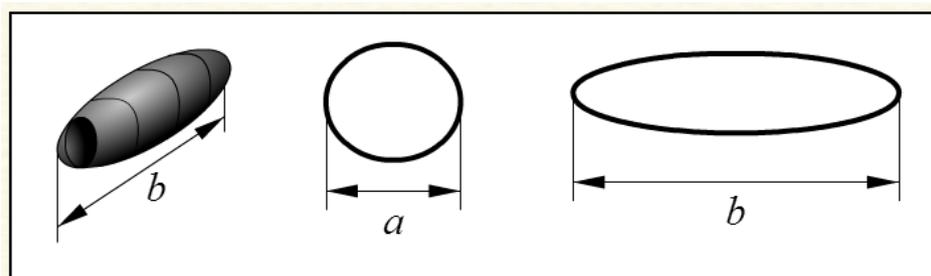


Рис. 1. Форма ядра близка к сферической (точнее, эллипсоид вращения).

$$\frac{b}{a} \leq 1,2; \frac{b}{a} - 1 \leq 0,2.$$

Несферичность ядра определяется отклонением b/a от 1, которое для всех известных ядер не превышает 20 %.

Средний размер ядра 10^{-15} м. Эмпирическая формула для радиуса ядра, которая выполняется с достаточной точностью $R = 1,3\sqrt[3]{A} \cdot 10^{-15}$ м.

Такая зависимость является следствием того, что ядро состоит из частиц, которые плотно упакованы, то есть расположены **вплотную**.

Плотность ядра практически однородна вплоть до его границ, то есть вещество заполняет ядро без «пустот». В этом ядро коренным образом отличается от атома, у которого центральная часть (ядро) имеет плотность в 10^{18} раз больше, чем плотность остальной части атома (электронных облаков).

Любое ядро имеет электрический заряд (положительный и кратный элементарному заряду $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл).

$Q_{\text{яд}} = Z \cdot e$, где Z – зарядовое число ядра (количество протонов в данном ядре).

Ядро имеет **спин** $\vec{S}_{\text{яд}}$ и **магнитный момент** $\vec{M}_{\text{яд}}$.

Модуль спина ядра квантован:

$$|\vec{S}| = \hbar\sqrt{S(S+1)},$$

где S – спиновое квантовое число ядра.

Проекция спина ядра на выделенную ось также квантуется.

Количество протонов Z в ядре может принимать любое целочисленное значение, максимальная граница которого пока не установлена. Количество протонов равно количеству электронов в атоме и, следовательно, определяет порядковый номер элемента в таблице Менделеева и химические свойства данного элемента.

При фиксированном количестве протонов возможное количество нейтронов N в ядре не может быть любым! **Количество нейтронов** у

легких ядер примерно равно количеству протонов, а у самых тяжелых – примерно на 60 % больше. Только у одного элемента – водорода – в ядре отсутствуют нейтроны.

Изотопами данного элемента называются вещества, ядра которых имеют одно и то же количество протонов, но разное количество нейтронов.

Изотоп водорода, ядро которого содержит один нейтрон, называется **дейтерием**, а его ядро – дейтоном. Изотоп водорода, ядро которого содержит два нейтрона, называется **тритием**, а его ядро – тритоном.

Самым необычным свойством ядер является наличие **неустойчивых** ядер, которые самопроизвольно превращаются в другие ядра и элементарные частицы.

Стабильными (устойчивыми) называются ядра, которые могут существовать бесконечно долго, не превращаясь в другие. У некоторых веществ имеется несколько стабильных изотопов, у которых наблюдается отличие на 1–10 нейтронов. Были обнаружены также и **нестабильные ядра**, которые, как и стабильные, могут иметь изотопы. К настоящему времени известно около 300 устойчивых изотопов и свыше 1000 неустойчивых.

Модели ядер

Наиболее теоретически разработанными моделями ядер являются капельная и оболочечная модели.

В **капельной модели** ядро моделируется, как капля жидкости, частицы которой (нуклоны) участвуют в ядерном взаимодействии (вне контакта нуклонов между ними действуют силы притяжения, при контакте и сжатии – отталкивания). Нуклоны несжимаемы, расположены почти вплотную, но обладают подвижностью. Эту модель мы не будем рассматривать.

Согласно **оболочечной модели** ядра каждый нуклон ядра движется колебательно в общем поле ядерных сил, создаваемом всеми нуклонами ядра. Усредненный потенциал этого поля можно аппроксимировать потенциалом трехмерного осциллятора.

Решение уравнения Шредингера дает доступные квантовые состояния колебательного движения, которое определяется как суперпозиция трех независимых одномерных колебаний по осям x , y и z , имеющих энергию

$$E_{xn} = \hbar\omega \left(n_x + \frac{1}{2} \right), E_{yn} = \hbar\omega \left(n_y + \frac{1}{2} \right), E_{zn} = \hbar\omega \left(n_z + \frac{1}{2} \right),$$

где $n_{x,y,z}$ – целые числа, принимающие значения 0, 1, 2, ..., есть квантовые числа для каждого одномерного колебания вдоль соответствующей оси декартовой системы координат.

Произвольно движущийся нуклон имеет энергию, равную сумме этих энергий, которая квантована с помощью квантового числа n :

$$E_n = \hbar\omega \left(n + \frac{3}{2} \right),$$

где целое число $n = n_x + n_y + n_z = 0, 1, 2, 3, \dots$ является квантовым числом, определяющим энергию движения нуклона.

Таким образом, тройка целых чисел n_x, n_y, n_z совместно с $m_s = \pm \frac{1}{2}$ (магнитное спиновое квантовое число нуклона) дают четверку чисел, полностью определяющую *состояние* нуклона в ядре.

Количество доступных состояний с фиксированным квантовым числом n можно вычислить по формуле

$$K_n = (n + 1)(n + 2).$$

По аналогии с атомом, совокупность доступных состояний с фиксированным числом n , принято называть *оболочкой*.

Подоболочкой можно называть совокупность состояний, имеющих данную тройку чисел n_x, n_y, n_z . Любая подоболочка имеет 2 доступных квантовых состояния, отличающихся магнитным спиновым квантовым числом (+1/2 и -1/2).

Первая оболочка ($n = 0$) имеет 2 доступных состояния (0, 0, 0, 1/2) и (0, 0, 0, -1/2) и одну подоболочку и (0, 0, 0, ±1/2);
 вторая ($n = 1$) имеет 6 доступных состояний и 3 подоболочки (1, 0, 0, ±1/2), (0, 1, 0, ±1/2), (0, 0, 1, ±1/2);
 третья ($n = 2$) имеет 12 доступных состояний и 6 подоболочек (2, 0, 0, ±1/2), (0, 2, 0, ±1/2), (0, 0, 2, ±1/2), (1, 1, 0, ±1/2), (1, 0, 1, ±1/2) и (0, 1, 1, ±1/2).

Совокупность протонов и совокупность нейтронов в ядре являются самостоятельными квантовыми системами, поэтому доступные

квантовые состояния заполняются нуклонами по отдельности: отдельно протонами, отдельно нейтронами. При этом выполняются известные основные принципы:

- **принцип минимальности энергии**, то есть сначала заполняются самые нижние уровни энергии (квантовые состояния с минимальной энергией), затем – расположенные выше;
- **принцип Паули**: в одной квантовой системе в одном квантовом состоянии может находиться не более одной частицы с полуцелым спином.

Подоболочка заполнена, если в ней находится 2 нуклона. Все сказанное относится как к протонам, так и к нейтронам, входящим в состав ядра.

Ядра с заполненными протонными подоболочками содержат четное количество протонов и будут иметь повышенную устойчивость и, следовательно, больше изотопов, чем ядра с нечетным количеством протонов. В лабораторной работе вы убедитесь в этом на опыте.

Для элемента, у которого 2 протона (гелий), первая оболочка полностью заполнена протонами (а остальные пусты).

Для элемента, у которого 8 протонов (кислород), заполнены первая (2 состояния) и вторая (6 состояний) оболочки.

Для элемента, имеющего 20 протонов (кальций), заполнены протонами первая, вторая и третья оболочки (12 состояний).

Ядра данных химических элементов обладают особой устойчивостью, количество протонов в них называют **«магическими числами»**, а сами ядра называют «магическими». Химические элементы с магическими ядрами имеют особенно большое количество изотопов.

Дважды магическими называют ядра, у которых и количество протонов и количество нейтронов равно магическому числу. У них полностью заполнены оболочки, как для протонов, так и для нейтронов.

Экспериментальные **значения магических чисел** образуют следующий ряд: 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126 ...

В упрощенной модели магическими являются числа 2, 8, 20, 40, 70 и 112. Число 28 не предсказывается в упрощенной модели ядра, но получается в уточненной модели. Последующие числа хотя и отличаются, но довольно близки к экспериментальным значениям.

Дважды магическими ядрами обладают гелий ${}^4_2\text{He}$, кислород ${}^{16}_8\text{O}$, кальций ${}^{40}_{20}\text{Ca}$ и свинец ${}^{208}_{82}\text{Pb}$.

Методика и порядок измерений

Выберите раздел «Квантовая физика» и модель «Энергия связи ядер».

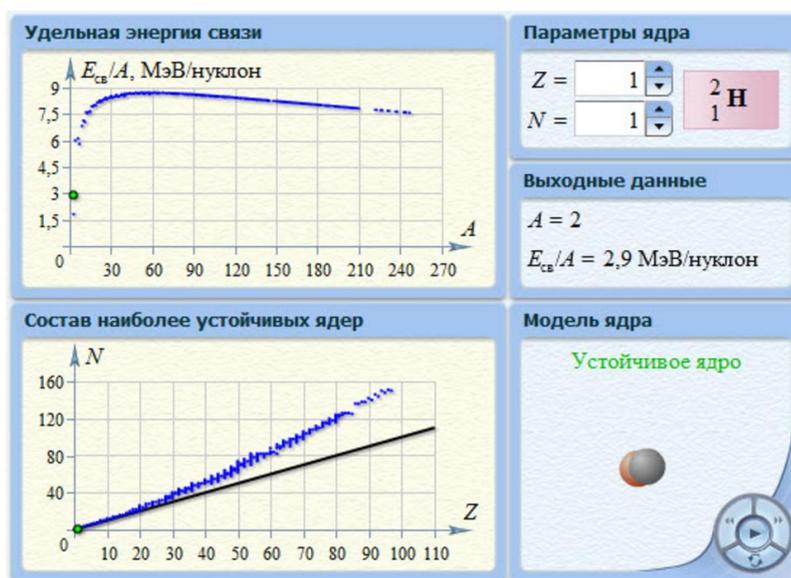


Рис. 2. Модель для исследования устойчивости ядер.

На рис. 2 представлено изображение экрана компьютера, на котором даны результаты экспериментальных исследований устойчивости ядер и удельной энергии связи нуклонов в ядре в зависимости от состава ядра.

В окне «Состав наиболее устойчивых ядер» на графике представлена совокупность точек, соответствующих составу ядер (Z и N) всех химических элементов, встречающихся в природе. Фиксируя количество протонов Z , входящих в состав ядра, мы задаем химические свойства вещества, состоящего из атомов с такими ядрами. Изменяя количество нейтронов N при фиксированном количестве протонов, получаем изотопы данного химического элемента. Ядра полученного изотопа могут быть как стабильными, так и нестабильными. Это свойство ядер можно наблюдать на изображении, помещенном в правом нижнем углу модели. Каждый стабильный изотоп при наведении маркера мыши изображается в виде зеленой точки на графике $N(Z)$. Нестабильный изотоп имеет красный цвет соответствующей точки на этом графике.

При исследованиях на данной компьютерной модели требуется определить количество стабильных изотопов для химических элементов, заданных для каждой бригады студентов.

Замечание: по графику, приведенному сверху на рис. 2, вы можете наблюдать, как зависит удельная энергия связи нуклонов в ядре E_{CB} от его состава (количества нуклонов A).

Таблица 1 (не перерисовывать). Исходные данные

Номер бригад	Количество протонов в ядре – Z												
	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
1 и 5	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
2 и 6	58	57	56	55	54	53	52	51	50	49	48	47	46
3 и 7	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58
4 и 8	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14

Таблица 2. Результаты измерений и расчетов (14 строк)

Бригада №													
Количество протонов в ядре Z	Количество нейтронов в ядре изотопа – N											Количество изотопов $N_{из}$	

Измерения

1. С помощью регулировки справа сверху установите количество протонов Z , заданное в строке для вашей бригады и первом столбце табл. 1.
2. Запишите значение Z в первом столбце табл. 2. С помощью второго регулятора справа сверху установите количество нейтронов N , равное количеству протонов Z .

3. Нажмите кнопку «Пуск». Если ядро неустойчиво, оно будет распадаться, и надо увеличить количество нейтронов на 1 и повторить действия по п. 3.
4. Если ядро устойчиво, оно не будет распадаться, и на экране красная точка станет зеленой. Запишите количество нейтронов N в табл. 2.
5. Увеличьте количество нейтронов на 1. Если ядро устойчиво, запишите количество нейтронов N в табл. 2.
6. Повторите п. 5 пока не получите подряд несколько неустойчивых ядер, а красная точка не удалится от синих точек на нижнем графике. Тогда измените количество протонов, как указано в табл. 2 для вашей бригады. Повторите действия, начиная с п. 2 и записывая результаты в следующей строке табл. 2.

Обработка результатов и оформление отчета

1. Подсчитайте количество изотопов для каждого химического элемента и внесите в соответствующий столбец табл. 2.
2. Сделайте вывод по количеству изотопов химических элементов в заданном диапазоне порядковых номеров. Объяснить причину такого количества.
3. Постройте график зависимости количества изотопов $N_{из}$ от количества протонов Z только для четных Z .
4. Сделайте вывод по форме графика $N_{из}(Z)$.
5. По положению максимума на графике оцените значение магического числа.
6. Сравните значение магического числа, полученное экспериментально, с теоретическим значением числа, расположенным в данном диапазоне изменения Z .
7. Сделайте вывод о количестве изотопов у веществ, ядра которых имеют нечетное количество протонов Z .

Вопросы и задания

1. Что называют ядром атома?
2. Что такое нуклон?
3. Что такое зарядовое число ядра и чему оно равно?
4. Что определяет порядковый номер химического элемента в таблице Менделеева?
5. В чем состоит главное отличие нейтрона от протона?
6. Какие характеристики нейтрона точно совпадают с аналогичными характеристиками протона?
7. Что можно сказать о количестве протонов и нейтронов в ядрах?
8. Что такое изотопы?
9. Назовите наиболее известные модели ядра атома.
10. Опишите особенности капельной модели ядра.

11. Опишите движение нуклона в ядре согласно оболочечной модели.
12. Запишите формулу энергии одномерного квантового осциллятора.
13. Запишите формулу энергии трехмерного квантового осциллятора.
14. Сколько квантовых чисел определяют доступное квантовое состояние нуклона в ядре? Назовите их и укажите их обозначения и числовые значения.
15. Какие свойства будут существенно разными у химических элементов, имеющих ядра с четным и нечетным количеством протонов?
16. Что такое магические ядра?
17. Что такое дважды магические ядра?
18. Напишите формулу для определения магических чисел.
19. Много или мало изотопов в среднем, как вы предполагаете, будут иметь химические элементы в заданном для вашей бригады диапазоне изменения Z и почему?
20. Как примерно должен выглядеть график $N_{из}(Z)$ с учетом значений Z для вашей бригады, приведенных в табл. 1?

Литература

1. Калашников Н. П., Смондырев М. А. Основы физики. ООО «Дрофа», 2006.
2. Трофимова Т. И. Курс физики. М.: Высшая школа, 2006.
3. Детлаф А. А., Яворский Б. М. Курс физики. М.: Высшая школа, 2000.
4. Савельев