

Институт Естественных Наук и Экологии

"УТВЕРЖДАЮ"
Ректор ИНЕСНЭК

----- С.Т.Беляев

"-----" августа 2003 г.

ПРОГРАММА

по курсу

ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

для студентов 4 курса (I семестр)

Лекции 42 часа

Практические (семинарские) занятия 22 часа

ВСЕГО ЧАСОВ 64

Самостоятельная работа 2 часа в неделю

Программу составил: д.ф.м.н. Павличенков Игорь Михайлович

ГРАФИК СДАЧИ ЗАДАНИЙ.

Задание I: 1 октября

Задание II: 30 октября

Задание III: 27 ноября

Задание IV: 25 декабря

1. Свойства атомных ядер.

- 1.1. Заряд ядра и методы его определения. Закон Мозели. Протон-нейтронное строение ядра. Изотопы, изобары и изотоны. ([1] §1; [2] §36; [3] §§223–225, 237, 296 – 297)
- 1.2. Масса ядра и способы её определения. Метод Томсона, масс-спектрографы и масс-спектрометры. Разделение изотопов. Энергия связи и устойчивость ядер относительно радиоактивных распадов. Дефект масс и упаковочный коэффициент. ([1] §2; [2] §§13 – 21; [3] §244)
- 1.3. Радиус ядра. Различные способы измерения радиуса: μ -мезоатомы, рассеяние электронов и нейтронов. Плотность ядерного вещества и ее распределение внутри ядра. Капельная модель ядра. Полуэмпирическая формула Вайцекера для масс и энергий связи. Развитие капельной модели. ([1] §§2, 3; [3] §§242, 245)
- 1.4. Квантовые характеристики ядра: спин и четность. Магнитный дипольный и электрический квадрупольный моменты ядра и способы их определения. Измерение магнитного момента нейтрона. ([1] §§4–6; [2] §§238 – 240; [3] §241; [4] стр. 55–56, 83–84, 87–88)

2. Строение ядер.

- 2.1. Ядерные силы и их природа. Спиновая зависимость ядерных сил. Тензорные и обменные силы. Изотопическая инвариантность ядерных сил. Обобщенный принцип Паули. Структура дейтрона. ([1] §§68–72; [3] §§247 – 250; [4] стр. 5–44)
- 2.2. Модель ядерных оболочек. Экспериментальные и теоретические предпосылки модели. Концепция самосогласованного поля атомов и ядер. Спин-орбитальное взаимодействие. Реалистический ядерный потенциал и заполнение его уровней нуклонами. Спин, чётность, магнитный и квадрупольный моменты основных состояний ядер в модели независимых частиц. Структура легких ядер. Тяжелые ядра. ([1] §§13 – 14; [4] стр. 45–69)
- 2.3. Возбуждённые состояния ядер: одночастичные и коллективные степени свободы. Деформированные ядра. Ядерная спектроскопия. ([1] §15; [4] стр. 70–88)

3. Радиоактивность.

- 3.1. История открытия радиоактивности. Типы радиоактивных превращений. Естественная и искусственная радиоактивность. Радиоактивные семейства. Закон радиоактивного распада и его статистический характер. Теория последовательных превращений. Единицы радиоактивности. Тепловой эффект. ([1] §8; [3] §§271 – 277)
- 3.2. Альфа-распад и его характеристики. Пробег α -частиц в веществе. Закон Гейгера-Нэттола. Энергетика альфа-распада. Теория альфа-распада. Альфа-частичная модель ядра. ([1] §9; [3] §§278, 284 – 285)

- 3.3. Бета-распад и его разновидности: β^- -распад, β^+ -распад и K -захват. Бета-спектры и гипотеза нейтрино. Экспериментальное доказательство существования нейтрино. Солнечные и космические нейтрино. Нейтринные осцилляции. Понятие о теории бета-распада. Несохранение четности при бета-распаде: опыт Ву. Бета-распад нейтрона. Электрослабое взаимодействие. ([1] §10; [3] §§286 – 292)
- 3.4. Гамма-излучение ядер. Мультипольное излучение. Правила отбора по спину и четности для гамма-переходов. Вероятности электрических и магнитных мультипольных переходов. Ядерная изомерия. Внутренняя конверсия γ -лучей. Оже электроны. ([1] §11; [2] §§129 – 130; [3] §§293 – 295)
- 3.5. Взаимодействие радиоактивного излучения с веществом. Формула Бора для ионизационных потерь тяжелой заряженной частицы. Ионизационные потери электронов. Взаимодействие гамма-излучения с веществом: эффект Комптона, фотоэффект, образование пар. ([1] §§18–21, 23; [3] §§278 – 283)
- 3.6. Действие радиации на живые организмы. Биологическая эффективность радиации. Мутации под действием радиоактивного излучения.
4. Ядерные реакции.
- 4.1. Законы сохранения заряда, барионного числа, энергии, импульса, момента количества движения, четности и изоспина в ядерных реакциях. ([1] §§25 – 30; [3] §§258 – 261)
- 4.2. Взаимодействие нейтронов с ядрами. Источники нейтронов. Типы ядерных реакций с нейтронами. Упругое и неупругое рассеяние нейтронов. ([1] §§32 – 33; [3] §§266, 298)
- 4.3. Взаимодействие нейтронов с веществом. Замедление нейтронов. Тепловые, медленные, холодные и ультрахолодные нейтроны. ([1] §§34; [3] §§296 – 297, 300, 302)
- 4.4. Ядерные реакции с медленными и тепловыми нейтронами. Составное ядро. Формулы Брейта-Вигнера. Нейтронная спектроскопия. ([1] §§35, 36; [3] §§263 – 265, 301; [4] стр. 90–97)
- 4.5. Рассеяние быстрых нейтронов на ядрах. Дифракционное рассеяние. Оптическая модель ядерных взаимодействий. ([1] §§37 – 38; [4] стр. 98–111)
- 4.6. Ядерные реакции под действием заряженных частиц. Кулоновский барьер. Надбарьерные и подбарьерные реакции с заряженными частицами. Ускорители заряженных частиц. Реакции под действием протонов и α -частиц. Реакции с тяжелыми ионами. Искусственная радиоактивность. ([1] §§52 – 54; [3] §§267 – 268)
- 4.7. Термоядерные реакции. Проблема управляемого термоядерного синтеза. Источники энергии звезд. ([1] §§65 – 66; [3] §314; [5])

4.8. Распространенность химических элементов. Нуклеосинтез в горячей Вселенной и в догалактических массивных звездных объектах. Четыре эпохи ядерного горения в звездах. Синтез тяжелых элементов: понятие о s - и r -процессах. ([6])

5. Деление ядер.

5.1. Наблюдение процесса деления при захвате нейтрона ядром урана и тория. Осколки деления. Нейтроны деления. Спонтанное деление. Элементарная теория деления. Трансурановые элементы. ([1] §§40 – 42; [3] §§303 – 310)

5.2. Ядерная цепная реакция. Современный ядерный реактор. Атомная энергетика. ([1] §§43, 45; [3] §§311 – 313)

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. К. Н. Мухин, *Введение в ядерную физику*, Атомиздат, М., 1974.
2. Э. В. Шпольский, *Атомная физика*, том 1, Физматгиз, М., 1963.
3. Э. В. Шпольский, *Атомная физика*, том 2, Физматгиз, М., 1963.
4. Л. Д. Ландау, Я. А. Смородинский, *Лекции по теории атомного ядра*, Гос. из-во технико-теоретической литературы, М., 1965.
5. Ю. М. Широков, Н. П. Юдин, *Ядерная физика*, М., "Наука 1980.
6. Р. Киппенхан, *100 миллиардов солнц: Рождение, жизнь и смерть звезд*. Пер. с нем., М., "Мир 1990.
7. Я.М. Крамаровский, В.П. Чечев, *Синтез элементов во Вселенной*, Энергоатомиздат, М., 1974.
8. С. В. Скачков, Л. В. Константинов, Р.П. Строганова, Л.Н. Юрова, Э.П. Топоркова, *Сборник задач по ядерной физике*, Гос. из-во технико-теоретической литературы, М., 1958.
7. *Физические величины. Справочник.*, Энергоатомиздат, М., 1991.

ЗАДАНИЕ I

- 1.1. При замене золотой фольги серебряной в опытах по упругому рассеянию α -частиц тонкими фольгами толщиной 10^{-4} см число зарегистрированных α -частиц уменьшается в 2,8 раза. Определить заряд ядра серебра, если порядковый номер золота 79.

- 1.2. Ионы C^{12+} с энергией 20 кэВ проходят цилиндрический конденсатор масс-спектрографа Бейнбриджа по центральной орбите. Определить разность потенциалов между электродами конденсатора, если радиус орбиты равен 25,4 см, а ширина зазора 1,9 см.
- 1.3. Используя формулу Вайцекера, предсказать устойчивые по отношению к β^+ - и β^- -распаду элементы с атомными весами 20, 40, 80, 120 и 200. Результат сравнить с экспериментом.
- 1.4. Пользуясь формулой Вайцекера, найти условие, при котором деление четно-четного ядра на два четно-четных осколка с отношением масс 2:3 является энергетически выгодным.
- 1.5. Считая, что разность энергий связи пар зеркальных ядер ^{15}N , ^{15}O и ^{29}Si , ^{29}P определяется только различной энергией кулоновского отталкивания протонов, определить радиусы этих ядер и сравнить их с вычисленными по формуле $R = 1,2 \cdot A^{1/3}$ фм.
- 1.6. Оценить плотность и число нуклонов в единице объема ядерного вещества, полагая радиус ядра равным $R = 1,2 \cdot A^{1/3}$ фм. Найти среднее расстояние между нуклонами в ядре и долю объема ядра, занятого нуклонами.
- 1.7. Определить спин ядра ^{111}Cd , если в переходе $^3S_1 \rightarrow ^3P_0$ уровень 3P_0 не обнаруживает сверхтонкого расщепления, а уровень 3S_1 расщепляется на два подуровня. Нарисовать схему уровней сверхтонкого расщепления.
- 1.8. Каждый из двух подуровней терма $^2S_{1/2}$ в сильном магнитном поле порядка 1000 э расщепляется на четыре компоненты для ^{23}Na и на восемь компонент для ^{133}Cs . Определить спины этих ядер.

ЗАДАНИЕ II

- 2.1. Ядерные силы характеризуются радиусом действия $r_0 \approx 2$ фм и потенциалом нуклон-нуклонного взаимодействия $V_0 \approx 40$ МэВ. Найти характерные значения потенциалов кулоновского взаимодействия двух протонов и магнитного взаимодействия спиновых магнитных моментов двух нуклонов на расстоянии r_0 . Сравнить эти величины с V_0 .
- 2.2. Каково значение изотопического спина системы T , состоящей из протона и нейтрона в состоянии с определенными значениями спина S и углового момента относительного движения $L = 0, 1, 2, 3, 4$. Написать изотопическую часть волновой функции дейтрона.
- 2.3. В модели оболочек определить спин, магнитный момент и гиромагнитное отношение для ядра, содержащего сверх заполненных оболочек один нуклон (протон или нейтрон) или имеющего одну дырку в заполненной оболочке. Применить полученный результат к основным состояниям ядер: 3H ,

${}^3\text{He}$, ${}^{11}\text{B}$, ${}^{13}\text{C}$, ${}^{15}\text{N}$, ${}^{17}\text{O}$, ${}^{29}\text{Si}$. При решении задачи воспользоваться схемой одночастичных уровней оболочечной модели.

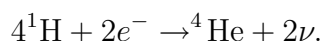
- 2.4. Вопреки простой схеме заполнения оболочек, спин ядра ${}^{19}\text{F}$ не равен $5/2$. Определить спин этого ядра, если его магнитный момент равен $2,79$ ядерного магнетона.
- 2.5. Полагая форму сверхдеформированного ядра ${}^{152}\text{Du}$ в виде эллипсоида вращения с полуосями $c > a$, определить отношение c/a , если измеренный квадрупольный момент $Q = 17,5 \cdot 10^{-24} \text{e} \cdot \text{см}^2$. Считать, что объём сверхдеформированного ядра равен объёму сферического с радиусом $R = 1,2 \cdot A^{1/3} \text{ фм}$. Вычислить момент инерции этого ядра, рассматривая его как однородное твердое тело, и определить энергию возбуждения первого вращательного состояния.
- 2.6. Для препарата ${}^{210}\text{Pb}$, находящегося в радиоактивном равновесии с продуктами распада и испускающего $5 \cdot 10^{13}$ β -частиц в секунду, вычислить весовые количества ${}^{210}\text{Pb}$, ${}^{210}\text{Bi}$ и ${}^{210}\text{Po}$. При решении задачи воспользоваться протон-нейтронной схемой радиоактивного семейства урана-238.
- 2.7. Найти разрешающую способность τ схемы двойных совпадений, если при облучении разделённых толстой свинцовой перегородкой счетчиков А и В двумя независимыми источниками гамма-лучей каждый из них даёт в минуту 3000 импульсов и число случайных совпадений за 10 часов равно 1000. Оценить погрешность в определении τ .
- 2.8. Найти среднее время жизни возбуждённого ядра ${}^{212}\text{Po}$ по отношению к испусканию длиннопробежной α -частицы с энергией $E_1 = 10,54 \text{ МэВ}$, зная среднее время жизни этого ядра по отношению к α -распаду из его основного состояния ($E_0 = 8,78 \text{ МэВ}$). Считать, что число ударов α -частицы о стенку потенциальной ямы одинаково в основном и возбужденном состояниях ядра.
- 2.9. Изотоп ${}^7\text{Be}$ превращается в результате K -захвата в ${}^7\text{Li}$, находящийся в основном состоянии. Определить энергию отдачи последнего, если энергия распада равна $0,87 \text{ МэВ}$.
- 2.10. При переходе ядра ${}^{214}\text{Pb}$ из возбужденного состояния в основное испускается электрон внутренней конверсии с кинетической энергией $36,7 \text{ кэВ}$. Найти импульс и энергию отдачи ядра свинца.
- 2.11. Изомерное ядро ${}^{69}\text{Zn}^*$ переходит в основное состояние, испуская γ -квант с энергией $0,436 \text{ МэВ}$. Вычислить кинетическую энергию ядра отдачи ${}^{69}\text{Zn}$ после испускания γ -кванта.

ЗАДАНИЕ III

- 3.1. Определить порог эндонергетической реакции ${}^3\text{H}(p,n){}^3\text{He}$.
- 3.2. Биологическое действие медленных нейтронов в значительной степени обусловлено ядерной реакцией ${}^{14}\text{N}(n,p){}^{14}\text{C}$, происходящей при облучении нейтронами живой ткани. Определить кинетические энергии протона и ядра отдачи в этой реакции.
- 3.3. Имеется возбужденное ядро A со спином 1 и положительной четностью. Энергетически разрешена реакция с испусканием α -частицы $A \rightarrow B + \alpha$. Возможна ли указанная реакция, если конечное ядро B имеет нулевой спин и положительную четность?
- 3.4. Найти правила отбора по изоспину в реакциях (p, α) и (d, α) .
- 3.5. Плоскопараллельная пластинка из элемента A толщиной q г/см² и площадью S облучается параллельным пучком тепловых нейтронов интенсивностью I нейтр/см²·сек, падающим по нормали к пластинке. В результате реакции захвата возникает радиоактивный изотоп с постоянной распада λ . Определить максимальное количество атомов нового изотопа, которое может накопиться за время облучения, если сечение активации тепловыми нейтронами равно σ . Найти закон нарастания числа атомов этого элемента во времени. Поглощением нейтронов в пластинке пренебречь.
- 3.6. Полное нейтронное эффективное сечение для ${}^{115}\text{In}$ в резонансе (при энергии нейтронов 1,44 эВ), равно 26400 бн. Определить среднее время жизни составного ядра по отношению к гамма-излучению, если $\Gamma_\gamma \gg \Gamma_n$, а $\Gamma_n = 10^{-3} \sqrt{E_n}$, где энергия нейтронов выражена в эВ. Спин основного состояния ${}^{115}\text{In}$ равен 9/2.
- 3.7. Изотоп ${}^{164}\text{Dy}$ используется в качестве детектора тепловых нейтронов. Считая, что поперечное сечение захвата нейтрона ядром этого изотопа подчиняется закону $1/v$ для всего нейтронного спектра, показать, что указанный метод позволяет измерять плотность тепловых нейтронов. Определить время облучения пластинки, по истечении которого её активность составит 75% активности при бесконечном облучении. Среднее время жизни ядра ${}^{165}\text{Dy}$ составляет 139 мин.
- 3.8. Интенсивность монохроматического пучка медленных нейтронов при прохождении через борный фильтр весом 5 г и площадью 4,3 см² уменьшается в 150 раз. Найти энергию нейтронов, если известно, что сечение поглощения медленных нейтронов бором подчиняется закону $1/v$.

ЗАДАНИЕ IV

- 4.1. Определить, при какой минимальной энергии можно ожидать дифракционные рассеяние быстрых нейтронов на ядрах ^{208}Pb .
- 4.2. Определить эффективное сечение образования составного ядра и полное сечение взаимодействия нейтронов с энергией 15 МэВ с ядрами ^{184}W .
- 4.3. При неупругом рассеянии протонов с энергией $1,42 \text{ МэВ}$ на ядрах ^{181}Ta наблюдалось испускание мягких γ -лучей с энергией порядка 140 кэВ , вызванное переходом ядра в основное состояние. Найденное из опыта сечение оказалось порядка миллибарна. Образуется ли составное ядро в этой реакции?
- 4.4. Генератор циклотрона работает с частотой 11 Мгц . Определить напряженность магнитного поля, необходимую для ускорения α -частиц, дейтронов и протонов. Какова энергия этих частиц в конце ускорения, если максимальный диаметр орбиты равен 100 см ? Изменением массы частицы с энергией пренебречь.
- 4.5. Для получения трансуранового элемента ^{246}Es в циклотроне с диаметром дуанта $1,5 \text{ м}$ и напряженностью магнитного поля 11800 э ускорялись шестизарядные ионы ^{14}N . Определить максимальную энергию ионов. Достаточно ли эта энергия для образования составного ядра при центральном ударе, если мишенью служило ядро ^{238}U ?
- 4.6. Оценить количество тепла в ккал , которое выделилось бы в реакции слияния всех ядер трития с ядрами водорода в 1 г смеси $^3\text{H} + ^1\text{H}$. Сравнить его с тем количеством тепла, которое выделится при полном делении 1 г ^{235}U , считая, что при делении одного ядра ^{235}U освобождается в среднем энергия 200 МэВ .
- 4.7. При облучении образца урана в постоянном потоке тепловых нейтронов происходит k делений в секунду. Найти закон нарастания во времени числа атомов радиоактивного изотопа L , получающегося непосредственно при делении, если его постоянная распада равна λ , а выход цепочки радиоактивных превращений, начинающейся с этого изотопа, составляет $a\%$.
- 4.8. Ядра ^{239}Pu наряду с α -распадом с периодом $T_\alpha = 2,41 \cdot 10^4 \text{ лет}$ испытывают спонтанное деление, относительно которого среднее время жизни ядра $\tau_f = 1,15 \cdot 10^{16} \text{ лет}$. Найти число ядер, претерпевших α -распад и спонтанное деление в 1 г чистого плутония за 1 час .
- 4.9. Источником энергии Солнца является цикл pp :



Выигрыш энергии составляет $26,7 \text{ МэВ}$, из которых в среднем $0,6 \text{ МэВ}$ приходится на нейтрино. Какой поток нейтрино падает на Землю, если

полная энергия, излучаемая Солнцем за 1 сек, равна $3,78 \cdot 10^{33}$ эрг, и на каждые 13 МэВ производимой Солнцем энергии приходится одно нейтрино? Какую энергию уносят нейтрино?

- 4.10. Вычислить мощность, уносимую антинейтрино из реактора современной атомной электростанции, имеющего мощность 3000 МВт. Оценить поток антинейтрино, допустив, что на одно деление приходится примерно пять β -распадов осколков. Средняя энергия антинейтрино на один акт деления равна приблизительно 11 МэВ. Какую часть энергии распада уносят антинейтрино? Сравнить эту величину с долей энергии, уносимой солнечными нейтрино (см. предыдущую задачу).