

Министерство образования и науки РФ
ГОУ ВПО Тульский государственный
педагогический университет имени Л. Н. Толстого

Ю. Ф. Головнёв

А. А. Тен

Краткий курс лекций по
ФИЗИКЕ АТОМНОГО ЯДРА

Тула

Издательство ТГПУ им. Л.Н.Толстого

Тула – 2011

Содержание

Глава 1. Свойства атомных ядер.....	13
§1. Состав атома.	13
§2. Классификация нуклидов по Z и A	20
§3. Энергия связи для ядра.	23
§4. Удельная энергия связи ядра.....	27
§5. Размер ядра атома.....	30
Глава 2. Ядерные модели и ядерные силы.....	35
§6. Ядерные модели.	35
§7. Энергия ядра (полуэмпирическая формула).....	39
§8. Ядерные силы.	42
Глава 3. Радиоактивные превращения.	57
§9. Радиоактивность.....	57
§10. Радиоактивные ряды.	61
§11. Альфа-распад.	64
§12. Бета-распад.....	69
§13. Гамма-излучение ядер.....	73
Глава 4. Ядерные реакции и ядерная энергетика.	76
§14. Ядерные реакции.	76
§15. Механизмы ядерных реакций.....	77
§16. Механизм деления тяжёлых ядер.	80
§17. Механизм реакции синтеза лёгких ядер.....	91
Задачи для закрепления	95
Список литературы	100

Предисловие

Главная цель учебного пособия — познакомить студентов прежде всего с основными идеями и методами физики ядра. Основное внимание обращено на разъяснение смысла физических законов и на сознательное применение их при решении не сложных задач. Несмотря на небольшой объём, пособие представляет собой достаточно серьёзное руководство по физике атомного ядра, обеспечивающее подготовку, достаточную для успешного усвоения заключительного курса теоретической физики и дальнейшего преподавания этих разделов в школах и колледжах различного профиля.

Это пособие предназначается для любого студента, изучавшего курсы общей физики и знакомого с математическим аппаратом высшей алгебры, аналитической геометрии и математического анализа в объёме программы педагогических вузов.

Особой задачей было естественное введение в курс физики атомного ядра идей квантовой физики, специальной теории относительности и элементов квантовой статистики. С одной стороны, мысль написать новое учебное пособие по физике атомного ядра для студентов педагогического университета связана с тем, что таких курсов на сегодняшний день нет, а с другой стороны, под влиянием того возросшего интереса к науке об атомном ядре и практического

применения её результатов, который теперь существует в средней и высшей школе.

Концепция пособия и его план оказали большое влияние на окончательную разработку материала курса. План раскрывает в деталях темы и их соотношение, которые должны быть преподнесены будущим учителям физики средней школы.

Введение

Ядерная физика и физика элементарных частиц являются наиболее глубокими, в смысле проникновения в структуру материи, разделами физической науки. Для определения их места в современной физике нужно классифицировать физические явления и процессы.

Формирование классической физики к началу XX века завершилось, но и выявилась ограниченность области её применения: она оказалась способной описывать только сравнительно медленные движения макроскопических тел. Это привело к мысли, что в классификации физических процессов могут служить характерные для них масштабы, энергии и скорости, а также и типы взаимодействий, которые вызывают протекание этих процессов. И каждому физическому явлению должны сопоставляться свои фундаментальные константы, в соответствии с масштабом и скоростью (большими и малыми), а также взаимодействием: гравитационным, электромагнитным, сильным или слабым. Если скорость частицы сравнима со скоростью света $v \sim c$, то процессы будут относиться к релятивистским. Их изучает релятивистская физика, которая базируется на теории относительности. В частности, в ньютоновской механике рассматриваются малые скорости материальных тел, т.е. $v \ll c$. Тогда фундаментальной константой, соответствующей данному классификационному признаку, является скорость света в вакууме $c \cong 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$.

Физические явления систематизируются и по характерным для них масштабам или типичным расстояниям между исследуемыми объектами. Например, когда для характерного масштаба вводят оценку $h \geq 100$ млн. св. лет, то он соответствует мегамиру, а область физики называют космологией. Предметом исследований макрофизики являются окружающие нас тела.

В случае, когда выполняется неравенство $R \leq 10^{-8}$ м для типичного размера молекулы, имеют дело с явлениями, относящимися к области микромира. Его исследует квантовая физика и он находится в масштабах от $10^{-8} \div 10^{-10}$ м. Это мир молекулярной и атомной физики. А вот область $10^{-15} \div 10^{-18}$ м соответствует физике высоких энергий, что характерно для ядерной физики и физике частиц низких энергий. Далее, с расстояний порядка 10^{-18} м начинается субмикромир. Кстати, макромир начинается с размера, примерно 10^{-7} м, но его верхняя граница не определяется чётко. При этом классификационному признаку соответствует единственная фундаментальная константа – постоянная Планка $h \cong 1,05 \cdot 10^{-34}$ Дж·с. Она косвенным образом связана с масштабом, определяющим границу между микро - и макромиром. В качестве фундаментальной константы, отделяющей макромир от мегамира, считается плотность ρ материи во Вселенной. Если её величина больше критического значения

$$\rho_{кр} = \frac{3H^2}{8\pi G} \approx 5 \cdot 10^{-27} \text{ кг/м}^3,$$

где G - гравитационная постоянная, а H – постоянная Хаббла, то на её роль претендует радиус Вселенной, которая в этом случае окажется замкнутой.

С одной стороны максимальными расстояниями можно считать величины порядка 10^{26} м (10 млрд. св. лет), которыми оперируют астрономы, а с другой, минимальные длины, доступные физике, равны по порядку величины 10^{-18} м, т.е. до такой глубины сегодня удаётся прощупать структуру частиц с помощью электронов, получаемых в ускорителях.

Характерные времена получают при делении характерных размеров на характерную скорость c . Так минимальное время получается примерно равным : 10^{-26} с, а время жизни наименее стабильных частиц, которое может быть зарегистрировано в лаборатории, составляет 10^{-24} с. Что касается максимального времени, то физики получили величину примерно : 10 млрд. лет $\approx 10^{18}$ с, которое соответствует возрасту Вселенной (10 – 15 млрд. лет).

На сегодня считается, что элементарных частиц около 400. Их основная особенность состоит в способности к взаимопревращению. Все многообразие превращений этих частиц управляется 4-мя типами фундаментальных взаимодействий.

Таблица 1.

№	Взаимодействие	Механизм	Интенсивность	Радиус R , м	Характерное время τ , с
1	Сильное	Обмен глюонами	$10^{-1} - 10^1$	$: 10^{-15}$	$: 10^{-23}$
2	Электромагнитное	Обмен фотонами	$\frac{1}{137}$	∞	$: 10^{-20}$
3	Слабое	Обмен промежуточными бозонами	$: 10^{-10}$	$: 10^{-18}$	$: 10^{-13}$
4	Гравитационное	Обмен гравитонами	$: 10^{-38}$	∞	?

1. Сильное взаимодействие свойственно адронам: протон, нейтрон и т.д. Проявление этого взаимодействия – ядерные силы.

2. Электромагнитное взаимодействие связано с электрически заряженными частицами и фотонами. Это взаимодействие наиболее изучено.

3. Слабое взаимодействие свойственно практически всем частицам и приводит к медленному распаду их, а также к другим медленно протекающим процессам, например, бета-распад атомных ядер.

4. Гравитационное взаимодействие универсально и в нём принимают участие все частицы.

Как следует из таблицы 1, все взаимодействия характеризуются 3-мя параметрами: радиусом, интенсивностью и временем. В таблице также показан механизм этих взаимодействий, который определяется элементарными актами, на которые разбивается процесс, вызванный взаимодействиями.

Интенсивность электромагнитного взаимодействия связывают с постоянной тонкой структуры:

$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c} \cong 1/137$$

Обычно считают, что интенсивность сильного взаимодействия равна по порядку величины единице. Это соответствует расчётам из теории сильного взаимодействия. Интенсивность слабого взаимодействия связывают с константой Ферми $G_F^2 \cong 1,43 \cdot 10^{-62} \text{ Дж} \cdot \text{м}^3$, что и даёт

$$\gamma = \frac{G_F^2}{\hbar c} \left(\frac{\hbar}{m_p c} \right)^{-4} \cong 1,0 \cdot 10^{-10}$$

Интенсивность гравитационного взаимодействия определяется безразмерной комбинацией

$$\delta = \frac{G m_p^2}{\hbar c} : 10^{-38},$$

где величина \sqrt{Gm} играет роль заряда. Это взаимодействие обычно не учитывают в мире элементарных частиц.