

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины»
Факультет физики и информационных технологий

Лекция 1

Предмет физики ядра

по дисциплине «Физика ядра и элементарных частиц»
раздел 1 «Физика атомного ядра»

2022

- 1. Масштабы микромира.**
- 2. Релятивистские и квантовые свойства частиц.**
- 3. Естественная система единиц в ядерной физике.**

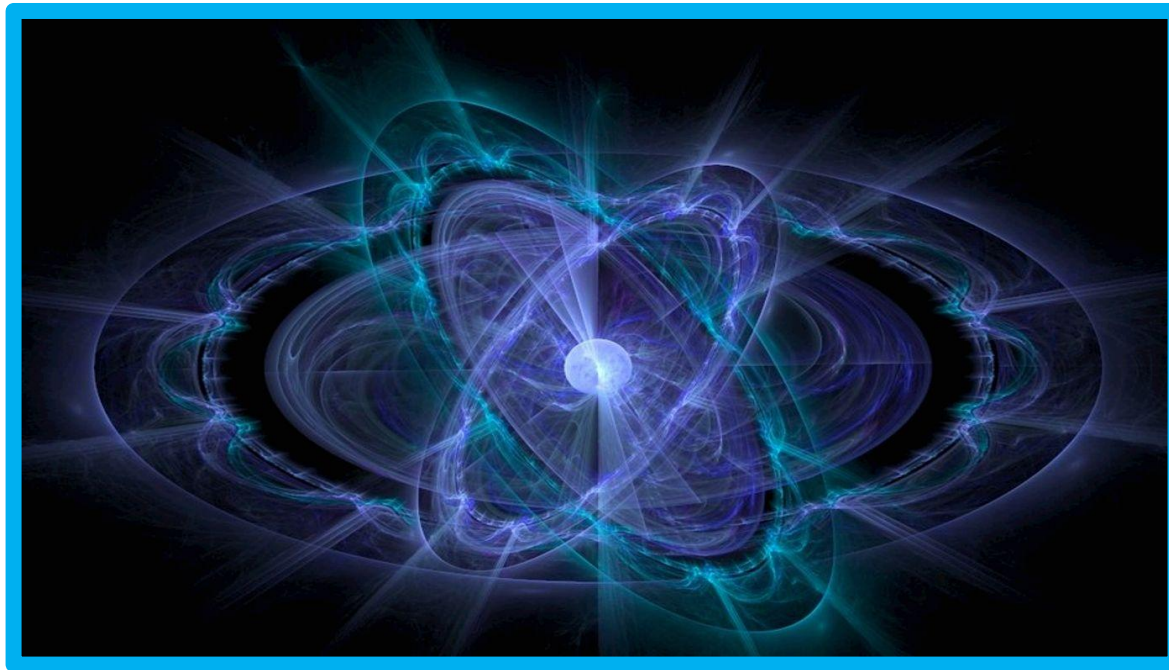
ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА –
наука о строении,
свойствах и
превращениях атомного ядра.



1. Масштабы микромира.

Во всей области масштабов физики ядра вещество встречается только в двух формах:

в форме **атомных ядер** и
в форме **элементарных частиц**.



Расстояние. Основной единицей измерения расстояния в ядерной физике является сантиметр, кроме него часто используется внесистемная единица – ферми: $1 \text{ Фм} = 10^{-13} \text{ см}$. Это радиус действия сил между протоном и нейтроном, а также элементарными частицами. Удобна она тем, что по порядку величины близка к размерам атомных ядер, т.е. является характерным расстоянием в ядерной физике.

Время. Характерное время в ядерной физике – время пролета микрочастицы, определенной энергии сквозь другую микрочастицу для ядер (средние энергия) составляет $\tau_{\text{яд}} \sim 10^{-22} \text{ с}$, а при высоких энергиях, когда скорость частицы близка к скорости света, т.е. для элементарных частиц это время составляет $\tau_{\text{эл}} \sim 10^{-24} \text{ с}$. Поэтому π^0 -мезон, имеющий среднее время жизни $\tau_{\pi} \sim 10^{-16} \text{ с}$, является долгоживущей частицей с точки зрения масштабов микромира. В ядерной физике приходится иметь дело с различными по порядку временами, так, например, среднее время жизни нейтрона в свободном состоянии $\tau_n \sim 10^3 \text{ с}$, а время жизни ядра урана – $\tau_U \sim 10^9 \text{ лет}$.

Энергия. Для энергий в ядерной физике используется только одна внесистемная единица – электронвольт: $1\text{эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж. 1эВ – это энергия, которую приобретает электрон, проходя через разность потенциалов в 1В. Энергия порядка 1эВ характерна для атомной физики, а для ядерной физики используются производные единицы: $1\text{кэВ} = 10^3$ эВ, $1\text{МэВ} = 10^6$ эВ, $1\text{ГэВ} = 10^9$ эВ, $1\text{ТэВ} = 10^{12}$ эВ. Для атомных ядер наиболее характерны энергии порядка 1МэВ.

Масса. В качестве единицы массы для ядер используются граммы, атомная единица массы (а.е.м.). Массы атомных ядер и элементарных частиц изменяются в следующих пределах:

$$m_{\text{яд}} \sim 10^{-24} \div 10^{-22} \text{ Г}, m_{\text{эл}} \sim 10^{-27} \div 10^{-23} \text{ Г}.$$

2. Релятивистские и квантовые свойства частиц.

Релятивистские свойства частиц проявляются при высоких энергиях и больших скоростях. Фундаментальная релятивистская константа – скорость света: $c=3 \cdot 10^{10}$ см/с. Для покоящейся изолированной физической системы (ядро, элементарная частица, ...):

$$E = mc^2, \quad (1.1)$$

где m – масса покоя (масса тела при нулевой скорости).

Для движущейся частицы:

$$E = \sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4}. \quad (1.2)$$

Если частица имеет нулевую массу, например γ -квант, то из (1.2) следует:

$$E = |\vec{p}|c, \quad (1.3)$$

т.е. такая частица может иметь только скорость, равную скорости света. Она не может покоиться.

Условия малости релятивистских эффектов: $v_{\text{нерел}} \ll c$ и $E_{\text{нерел}} \ll mc^2$.

Чем меньше частицы и расстояния между ними, тем резче проявляются *квантовые свойства*. Фундаментальная квантовая константа – постоянная Планка: $h = 2\pi\hbar$, $\hbar = 6,58 \cdot 10^{-22}$ МэВ · с.

Одно из основных свойств квантового мира – неразрывная связь между волнами и частицами (частице любого сорта соответствует волна де Бройля, каждой волне соответствует частица или группа частиц). Корпускулярно-волновой дуализм для частицы с энергией E и импульсом \vec{p} выражается соотношениями:

$$E = \hbar\omega, \quad \vec{p} = \hbar\vec{k}, \quad (1.4)$$

где ω – круговая частота, \vec{k} – волновой вектор, указывающий направление распространения волны $|\vec{k}| = \frac{2\pi}{\lambda}$, λ – длина волны.

Квантовая механика устанавливает количественные пределы применения классических понятий координаты и импульса:

$$\Delta x \Delta p \geq \hbar, \quad (1.5)$$

где Δx – неопределенность значения координаты, Δp – неопределенность значения импульса. Если одновременно (в одном определенном состоянии) измерять координату и импульс частицы, то ошибки измерения всегда будут удовлетворять неравенству (1.5). Аналогичное соотношение имеет место для энергии и времени:

$$\Delta t \Delta E \geq \hbar. \quad (1.6)$$

Неравенства (1.5) и (1.6) называются соотношениями неопределенностей Гейзенберга.

Формальные положения квантовой механики:

1. Состояние системы в квантовой механике задается комплексной волновой функцией $\Psi(\vec{r}, t)$, в отличие от \vec{p} и \vec{r} классической физики.

2. Уравнением движения системы является уравнение Шредингера:
 $\hat{H}\Psi = E\Psi$, где \hat{H} – оператор Гамильтона.

3. Каждой физической величине в квантовой механике ставится в соответствие линейный оператор, действующий на волновую функцию:

$$\hat{L}\Psi = \Psi'. \text{ Например: } \hat{r} = \vec{r}, \hat{p} = -i\hbar \frac{\partial}{\partial \vec{r}}, \hat{L} = \left[\hat{r}, \hat{p} \right] = -i\hbar \left[\vec{r}, \frac{\partial}{\partial \vec{r}} \right].$$

4. Правило вычисления среднего значения физической величины A в состоянии Ψ : $\langle A \rangle = \int \Psi^* \hat{A} \Psi dV dt$.

5. Физический смысл Ψ : $|\Psi(\vec{r}, t)|^2$ задает плотность вероятности найти частицу в момент времени t с координатой \vec{r} , а $|\Psi(\vec{r}, t)|^2 dV dt$ задает вероятность найти частицу в промежутке dt в объеме dV . Поскольку частица, вообще говоря, где то находится, то волновая функция должна удовлетворять условию нормировки: $\int |\Psi(\vec{r}, t)|^2 dV dt = 1$.

3. Естественная система единиц в ядерной физике.

В ядерной физике, имея дело со скоростями, сравнимыми со скоростью света, а также с малыми размерами и расстояниями, естественно выбрать квант света c в качестве единицы скорости, а за единицу углового импульса – квант действия \hbar . Такой выбор упрощает все формулы, поскольку $c/c = 1$, и в них следует положить $c = 1$ (аналогично с \hbar). При этом скорость становится безразмерной величиной, расстояние имеет размерность времени, масса имеет размерность энергии, элементарный заряд также безразмерная величина $e = 1$.

Итак, система единиц, в которой $c = \hbar = 1$ называется естественной. В ней размерности энергии, импульса и массы одинаковы и обратны совпадающим друг с другом размерностям времени и длины, в соответствии с формулами (1.1)–(1.5): $[E] = [\vec{p}] = [m] = [t]^{-1} \equiv [r]^{-1}$. Это значительно упрощает расчеты, ведь достаточно только задать $r^{-1} = 10^{13} \text{ см}^{-1} = 200 \text{ МэВ}$.