

Гомельский государственный университет
имени Франциска Скорины

Физический факультет,
кафедра теоретической физики

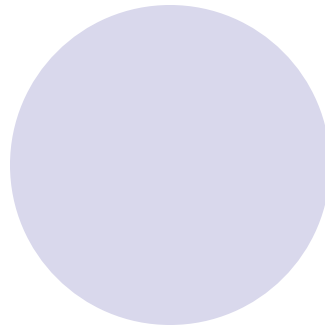
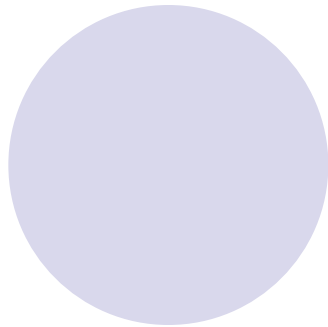
*Физика атомного ядра
и элементарных частиц:*

Физические величины, характеризующие состав ядер.

Состав ядер

Составитель: Андреев Виктор Васильевич,
канд. физ-мат. наук, доцент

Лекции по ядерной физике.



1. Физические величины, характеризующие состав ядер. Состав ядер.

Статические характеристики:

1. Величины характеризующие состав ядра.

Атомный номер Z .

Массовое число A .

2. Величины характеризующие размер и форму ядер.

Радиус ядра R .

Несферичность ядра $\delta R/R$.

Характеристики ядер

Статические характеристики:

3. Энергия связи $E_{св.}$ и масса покоя M .
4. Спин ядра J и Р-чётность.
5. Величины, связанные электромагнитными свойствами ядер.

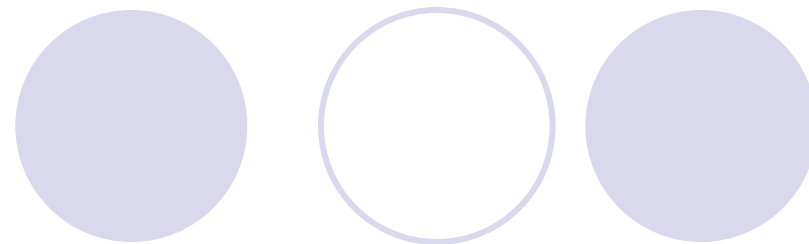
Среднеквадратичный электрический радиус $R_{эл.}$

Дипольный магнитный момент.

Электрический квадрупольный момент.

6. Статистика ядер.
7. Изотопический спин (изоспин).

Состав ядра.



Ядра состоят из протонов (p) и нейтронов (n).

Масса покоя:

протона (M_p) = 938.3 МэВ = $1.67265 \cdot 10^{-24}$ г.

нейтрона (M_n) = 939.6 МэВ = $1.67495 \cdot 10^{-24}$ г.

Протон имеет электрический заряд **+e** (e-заряд электрона).

Нейтрон имеет электрический заряд **0**.

Число протонов в ядре - атомный номер Z.

Поскольку атом электрически нейтрален, то число протонов равно числу электронов, расположенных в оболочках.

Общее число протонов и нейтронов – массовое число A.

$A = Z + N$, где N- число нейтронов.

Обозначаются ядра следующим образом:

${}_Z X^A$ или ${}^A_Z X$,

X- химический символ атома, в состав которого входит ядро.

Ядра с одинаковыми Z и разными A - изотопы.

Ядра с одинаковыми A и разными Z - изобары.

Ядра с одинаковыми N и разными $Z(A)$ - изотоны.

Атом определённого изотопа - носит название нуклид.

Различные изотопы, как правило, по физическим и химическим свойствам, мало отличаются (*исключение составляет водород*), поэтому разделение на изотопы является технически сложной задачей.

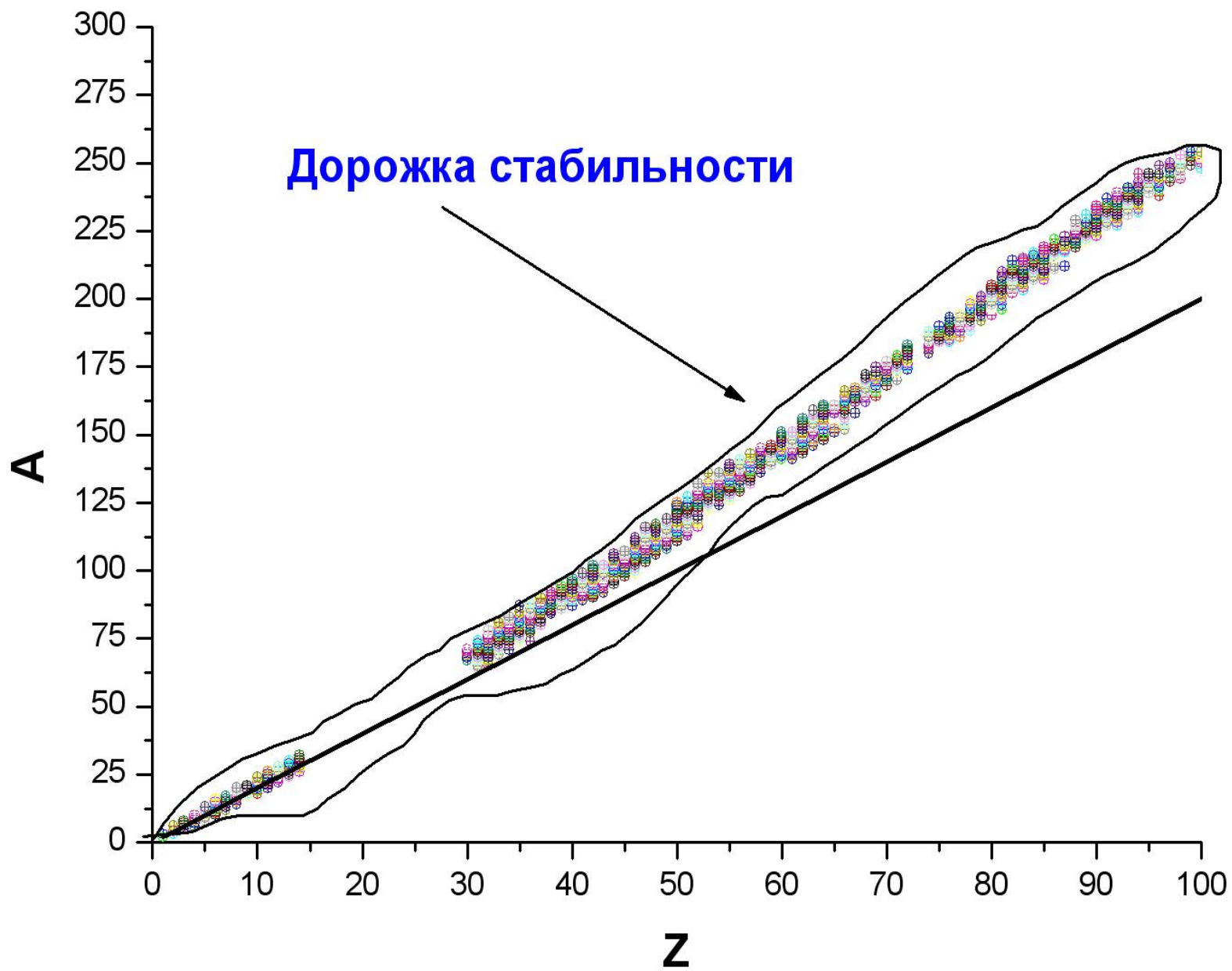
2. Электрический и барионный заряды ядер (дорожка стабильности ядер).

Тесно связаны с A и Z зарядовые характеристики: электрический заряд ядра, который, как легко видеть, равен $Z |e|$.

Из опыта, известно, что частицам можно также приписать барионный заряд, который, как и электрический сохраняется в ядерных реакциях.

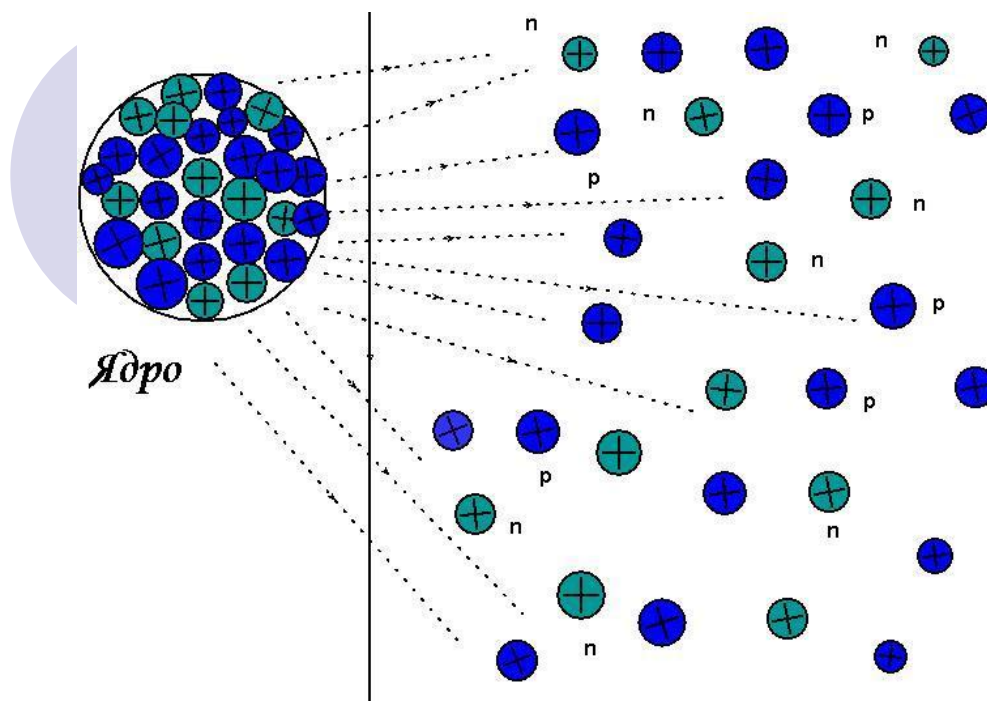
Барионный заряд целочисленный, так
протону и нейтрону присваивается
барионный заряд **+1**. Тогда, число **A** задает
барионный заряд ядра.

Атомные ядра могут существовать достаточно
долго по сравнению с характерным атомным временем
 $t \sim 10^{-22} - 10^{-24}$ с лишь при определённых **A** и **Z**. Если
рассмотреть, стабильные (по сравнению с t) ядра, то на
диаграмме **Z-A** (**Z-N**) они образуют линию, так
называемую дорожку стабильности.



3. Энергия связи ядра.

Энергией связи ядра - называется энергия необходимая для полного расщепления ядра на отдельные протоны и нейтроны. Знание энергий связи ядер позволяет рассчитывать различные расщепления ядер. Обозначим энергию связи ядра с заданными Z и A как $E_{св.}(Z,A)$.



Энергия связи таким образом имеет вид:

$$E_{\text{св.}}(Z, A) = Z E_0(p) + (A - Z) E_0(n) - E_0(Z, A),$$

где $E_0(p)$ - энергия покоя протона,

$E_0(n)$ - энергия покоя нейтрона,

$E_0(Z, A)$ - энергия покоя ядра с заданными Z и A .

Если вспомнить, что

$E_0 = M_{Z, A} c^2$, где $M_{Z, A}$ - масса ядра,

$E_p = m_p c^2$, где m_p - масса протона,

$E_n = m_n c^2$, где m_n - масса нейтрона,

то

$$E_{\text{св.}}(Z, A) = [Z m_p + (A - Z) m_n - M_{Z, A}] c^2$$

т.е. зная m_p , m_n , $M_{Z, A}$ можно определить энергию связи.

Современные масс-спектрометры позволяют измерять разность масс $\sim 10^{-7}$ атомных единиц массы. (а.е.м.)

1а.е.м. = 1/12 часть массы атома углерода = 913.5 МэВ.

Иногда вводят число Δ называемое дефектом массы ядра, которое выражается в а.е.м.

$$\Delta_{Z,A} = \frac{M_{Z,A}}{1/12 M_{C^{12}}} - A * 1 \text{ а.е.м.}$$

Полезной характеристикой, позволяющей анализировать особенности сильных взаимодействий является *удельная энергия связи*:

$$\varepsilon_{Z,A} = \frac{E_{св}(Z, A)}{A}$$

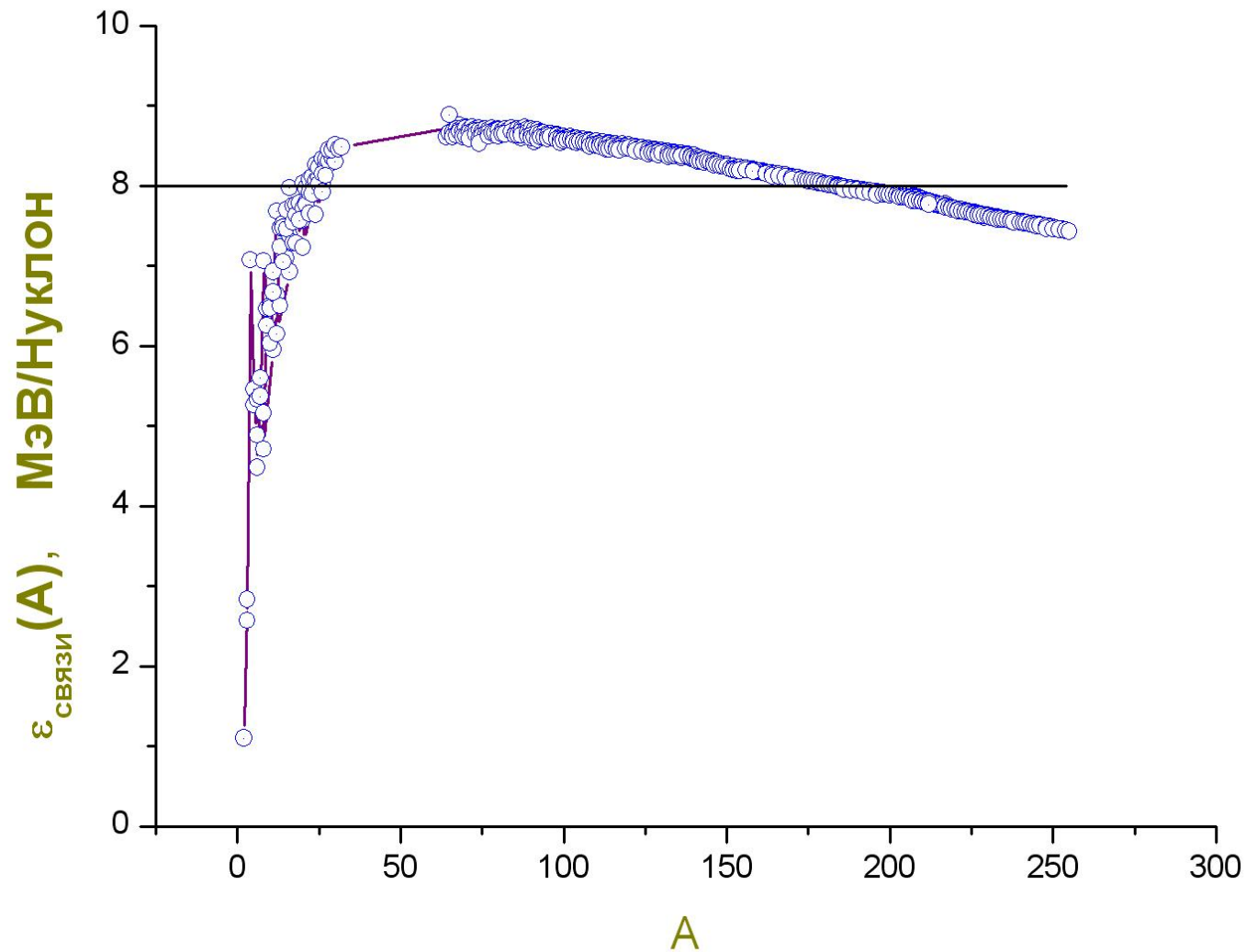
$\varepsilon_{Z,A}$ - энергия приходящаяся на один нуклон.

4. Полуэмпирическая формула для энергии связи ядра. Принцип насыщения ядерных сил.

Анализ экспериментальных энергий связи дает большую и интересную информацию о свойствах ядер.

Для извлечения этой информации рассмотрим приведенную на рисунке кривую зависимости удельной энергии связи от массового числа для стабильных ядер.

Известна экспериментальная зависимость $\epsilon_{\text{св}}$ от A .



В экспериментальной зависимости $E_{св}$ от A и от Z можно подметить следующие закономерности:

Если отбросить самые легкие ядра, то в грубом, в нулевом приближении удельная энергия связи постоянна и равна примерно 8 МэВ на нуклон т.е.

$$\varepsilon_{св.} = \text{const}$$

Приближенная **независимость** удельной энергии связи от числа нуклонов свидетельствует о **свойстве насыщения ядерных сил**.

Свойство насыщения ядерных сил состоит в том, что каждый нуклон может взаимодействовать только с несколькими соседними нуклонами.

Если бы насыщения не было, т. е. нуклон мог бы взаимодействовать одновременно со всеми нуклонами, то энергия связи росла бы с ростом A не линейно, а квадратично, так как A нуклонов ядра можно объединить в пары $A(A-1)/2$ способами. В отношении приближенного постоянства удельной энергии связи ядро похоже на жидкость или твердое тело.

Свойство насыщения ядерных сил приводит к приблизительно постоянству плотности ядер. Постоянство плотности означает, что размеры ядра приблизительно пропорциональны $A^{1/3}$:

$$R_{\text{ядра}} = r_0 A^{1/3}$$

где константа $r_0 = 1,1 - 1,3$ Ферми.

Спадание кривой удельной энергии связи при малых A можно объяснить ролью **поверхностных эффектов**.

Нуклоны, находящиеся на поверхности ядра, не полностью используют свои связи, что приводит к возникновению поверхностного натяжения, уменьшающего удельную энергию на величину, пропорциональную площади поверхности, т. е. $E_{\text{св.}}(Z, A) \sim S_{\text{поверхности}} \sim R^2 \sim A^{1/3}$.

Уменьшение удельной энергии связи при переходе к тяжелым ядрам объясняется электростатическим отталкиванием протонов.

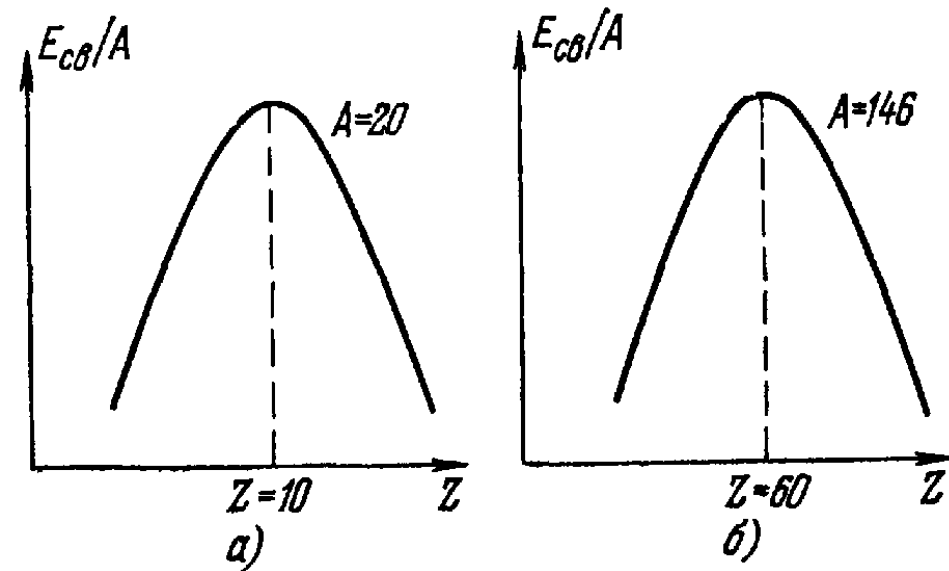
Кулоновская энергия пропорциональна квадрату числа протонов Z (кулоновские силы не обладают свойством насыщения) и обратно пропорциональна размерам ядра $\sim 1/R \sim 1/A^{1/3}$.

Таким образом, вклад кулоновской энергии отталкивания протонов пропорционален:

$$E_{\text{св.}}(Z, A) = \frac{Z^2}{A^{1/3}}$$

Вклад кулоновских эффектов в удельную энергию связи возрастает при переходе к более тяжелым ядрам.

Считается установленным, что при отсутствии кулоновских сил максимум находился бы при **$Z=A/2$** для всех ядер, т.е. что ядерные силы действуют наиболее интенсивно при равном числе протонов и нейтронов в ядре т.е. энергия связи должна иметь максимум при **$Z=A/2$** для изобар (см. рисунок).



Зависимость удельной энергии связи от Z при постоянном A

Этот факт обусловлен квантовомеханическим принципом Паули а также тем, что энергия взаимодействия нейтронов с протонами в среднем больше, чем энергия взаимодействия одинаковых частиц.

Следовательно, для энергии связи должна быть симметрия $Z \rightarrow N$, $N \rightarrow Z$. При такой замене в $E_{св.}(Z, A)$ ничего не должно меняться. В итоге получим, что вклад симметричной энергии в энергию связи имеет вид:

$$E_{св.}(Z, A) = - \frac{(N - Z)^2}{A}$$

В ядрах также существует явление спаривания одинаковых нуклонов в ядре, при этом энергия связи возрастает приблизительно на 2-3 МэВ. Эта энергия называется энергией спаривания.

Количественно эффект спаривания учитывается так. Принимается, что для ядер с нечетным A (один неспаренный нуклон) влияние спаривания включено в объемную энергию. Для четно-четных (нуль неспаренных нуклонов) и нечётно-нечетных (два неспаренных нуклона) ядер вводится спаривательная поправка к энергии связи.

Эта поправка имеет вид

$$\delta E_{\text{св.}} = \begin{cases} \Delta = \frac{12}{A^{1/3}} \text{ МэВ,} & (\text{четно-четные ядра}), \\ -\Delta, & (\text{нечетно-нечетные ядра}) \end{cases}$$

В итоге получим полуэмпирическую формулу для энергии связи .

$$E_{\text{св}}(Z, A) = a_1 A - a_2 A^{2/3} - a_3 Z^2 A^{-1/3} - a_4 \frac{(A - 2Z)^2}{A} + \delta E_{\text{св}}$$

Эту формулу называют формулой Вейцзекера . Она была получена в рамках модели жидкой капли.

Какие силы обеспечивают существование такой системы, как атомное ядро ?

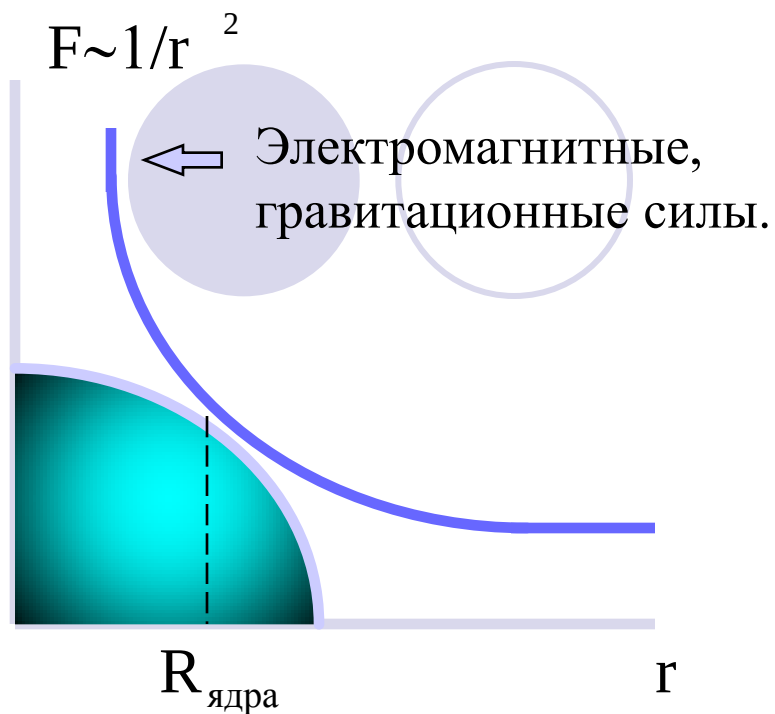
1. Электромагнитное взаимодействие.

2. Гравитационное взаимодействие.

Но радиус действия электромагнитных и гравитационных сил равен бесконечности: $F \sim 1/r^2$, r -расстояние между взаимодействующими частицами.

А радиус ядра $R \sim 10^{-13}$ см.

Следовательно, силы соединяющие протоны и нейтроны вместе, малы если $r > R_{\text{ядра}}$, и достаточно велики, если $r < R_{\text{ядра}}$. Т.е. они должны быть коротко действующими.



Следовательно в ядрах мы
имеем новый тип
взаимодействий.

Такие взаимодействия были названы **сначала ядерными**, но в дальнейшем и эти силы являются следствием **СИЛЬНЫХ взаимодействий**, и именно, за счёт них протоны и нейтроны могут соединяться между собой, образуя различные атомные ядра.

Протон и нейтрон одинаковы по отношению к сильным взаимодействиям, поэтому, часто в ядерной физике используется термин **нуклон**, означающий или протон или нейтрон, входящий в состав ядра.