



*Национальный исследовательский ядерный
университет «МИФИ»*

Институт ядерной физики и технологий

*Лаборатория экспериментальной ядерной физики
<http://enpl.mephi.ru/>*

А.И. Болоздыня

Экспериментальная ядерная физика

Лекция №2

Статические свойства атомных ядер

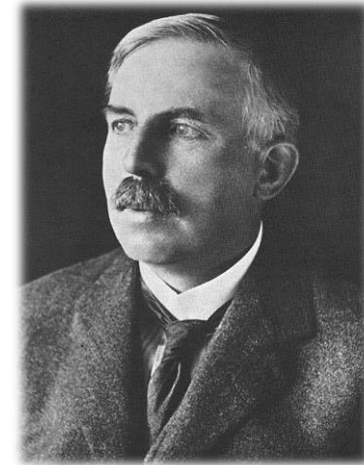
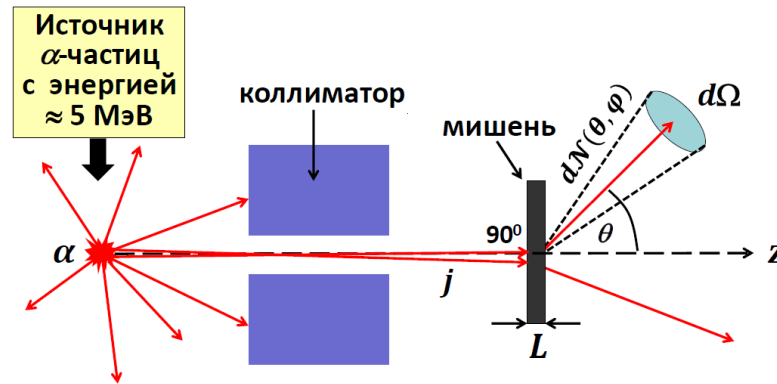
Лекция №2

Статические свойства атомных ядер

- 1. Открытие ядра у атома**
- 2. Состав ядра**
- 3. Размеры и форма**
- 4. Энергия связи**
- 5. Ядерный спин**
- 6. Магнитный момент**
- 7. Квадрупольный электрический момент**
- 8. Статистика**
- 9. Чётность**

1. Открытие ядра у атома

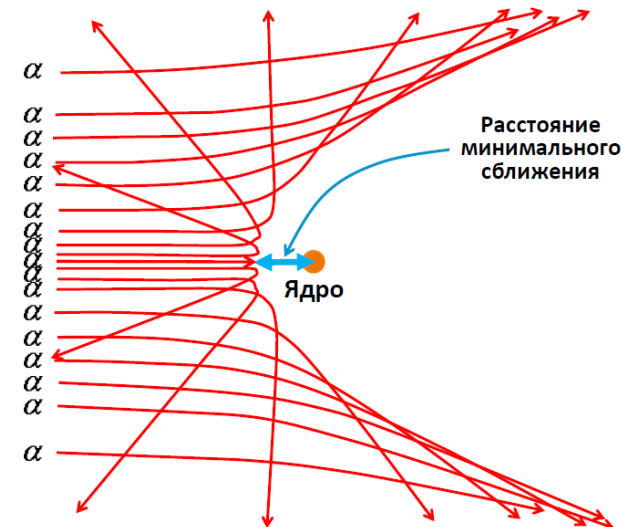
Атомное ядро открыто в **1911 г.**
Эрнстом Резерфордом
в лаборатории Манчестерского
университета (Англия)
в результате анализа опытов
Гейгера и **Марсдена**
по рассеянию α -частиц
на тонких золотых
и платиновых фольгах,
начатых в **1909 г.**



Э. Резерфорд
(1871-1937)

КЛЮЧЕВЫЕ ЭТАПЫ В ПОЗНАНИИ СТРОЕНИЯ ЯДРА

- 1909 г.** – Опыты **Гейгера** и **Марсдена** (опыт Резерфорда), **Англия**,
- 1911 г.** – Открытие ядра атома (**Резерфорд**, **Англия**),
- 1932 г.** – Открытие нейтрона (**Чэдвик**, **Англия**),
- 1932 г.** – Протон-нейтронная модель ядра, **Майорана**, **Италия**, **Д.Д. Иваненко**, **СССР**, **Гейзенберг**, **Германия**,
- 1964 г.** – Кварковое строение протона и нейтрона, **Гелл-Манн**, **Цвейг**, **США**.

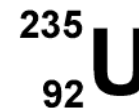


2. Состав ядра

Атомные ядра *условно* принято делить на стабильные и радиоактивные. Условность состоит в том что, в сущности, все ядра подвергаются радиоактивному распаду, но с различной скоростью

Физические величины, характеризующие свойства атомных ядер, можно разделить на статические и динамические.

Статические параметры относятся к определенному, обычно невозбужденному состоянию ядра;



Динамические проявляются при возбуждениях, распадах ядер и ядерных реакциях.

Статические параметры обычно называют свойствами стабильных ядер. В действительности статические свойства присущи не только стабильным, но и радиоактивным ядрам и ядрам в возбужденном состоянии.

Основные статические свойства ядер

$$M(Z, A) = Zm_p + Nm_n - E_{св}(Z, A)/c^2$$

Основными характеристиками стабильного ядра являются:

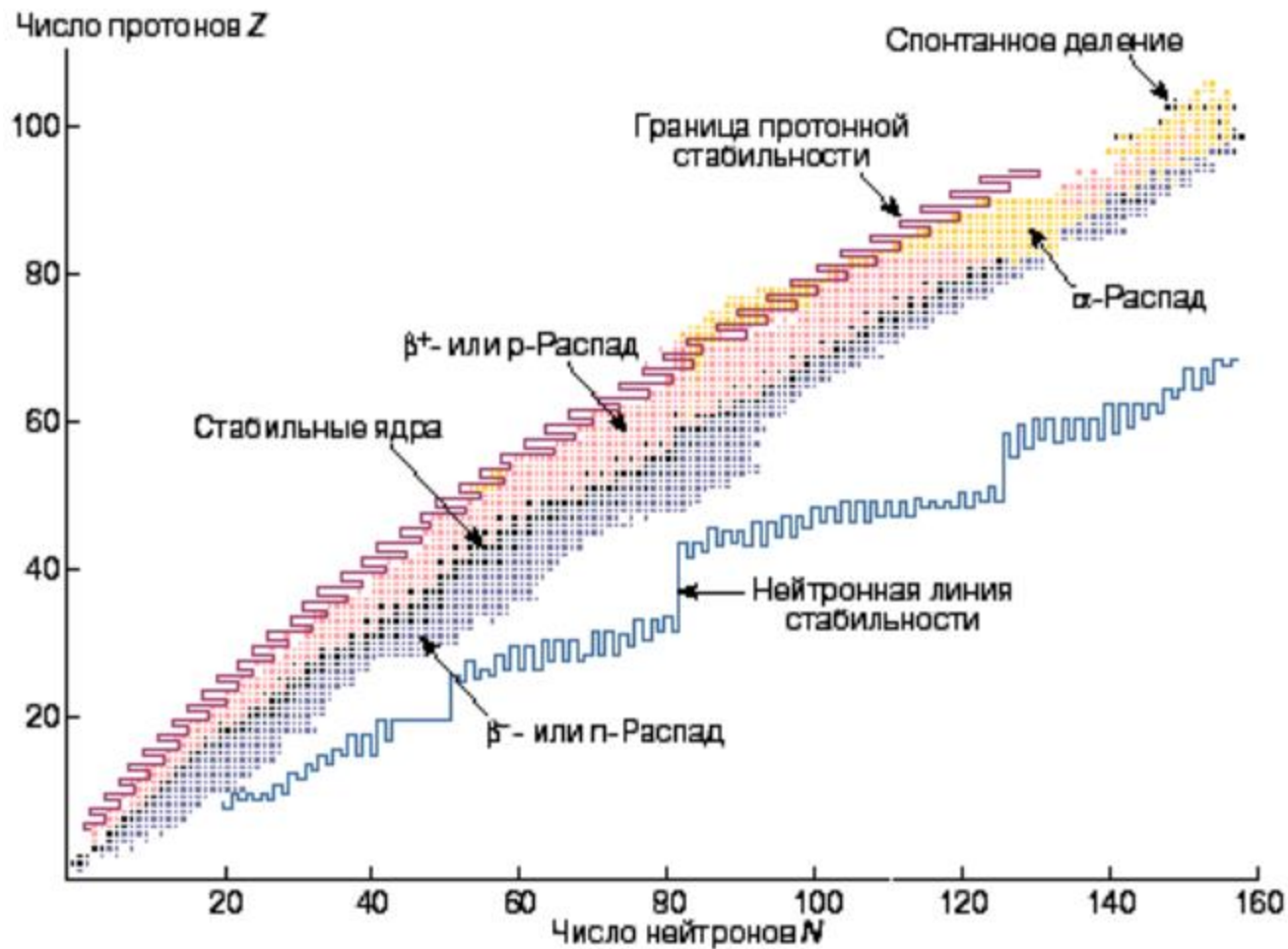
- Массовое число -
- Электрический заряд -
- Масса -
- Энергия связи -
- Радиус -
- Спин -
- Магнитный момент -
- Квадрольный электрический момент -
- Изотопический спин -
- Четность волновой функции -
- Спектр возбужденных состояний -

A
Z
M
 ΔE
R
I
 μ
G
T
P
E_i



- * Z - число протонов в ядре
- * N - число нейтронов в ядре
- * N+Z=A - массовое число

Карта изотопов



* *Изотопы* -
одинаковый
заряд

* *Изотоны* -
одинаковое
число
нейтронов

* *Изобары* -
одинаковое
массовое
число

ИЗОТОПЫ (Ca, Z=20)

| | | | | | | | | | |
|----|---|------------------------------------|---|-------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|--|
| 20 | 39Ca 859.6 M S e: 100.00% | 40Ca >3.0E+21 Y 96.94% 2e | 41Ca 1.02E+5 Y e: 100.00% | 42Ca STABLE 0.647% | 43Ca STABLE 0.135% | 44Ca STABLE 2.09% | 45Ca 162.61 D β-: 100.00% | 46Ca >0.28E+16 Y 0.004% 2β- | 47Ca 4.536 D β-: 100.00% |
| | 38K 7.636 M e: 100.00% | 39K STABLE 93.2581% | 40K 1.248E+9 Y 0.0117% β-: 89.28% e: 10.72% | 41K STABLE 6.7302% | 42K 12.321 H β-: 100.00% | 43K 22.3 H β-: 100.00% | 44K 22.13 M β-: 100.00% | 45K 17.81 M β-: 100.00% | 46K 105 S β-: 100.00% |
| 18 | 37Ar 34.95 D e: 100.00% | 38Ar STABLE 0.0632% | 39Ar 2.69 Y β-: 100.00% | 40Ar STABLE 99.6003% | 41Ar 1.9.61 M β-: 100.00% | 42Ar 32.9 Y β-: 100.00% | 43Ar 5.37 M β-: 100.00% | 44Ar 11.87 M β-: 100.00% | 45Ar 21.48 S β-: 100.00% |
| | 36Cl 3.01E+5 Y β-: 98.10% e: 1.90% | 37Cl STABLE 24.23% | 38Cl 37.24 M β-: 100.00% | 39Cl 50.2 M β-: 100.00% | 40Cl 1.35 M β-: 100.00% | 41Cl 33.4 S β-: 100.00% | 42Cl 6.8 S β-: 100.00% | 43Cl 3.13 S β-: 100.00% | 44Cl 0.56 S β-: 100.00% β-n < 8.00% |
| 16 | 35S 87.51 D β-: 100.00% | 36S STABLE 0.02% | 37S 5.05 M β-: 100.00% | 38S 170.3 M β-: 100.00% | 39S 1.5 S β-: 100.00% | 40S 8.8 S β-: 100.00% | 41S 1.99 S β-: 100.00% β-n | 42S 1.013 S β-: 100.00% | 43S 0.28 S β-: 100.00% β-n: 40.00% |
| | 19 | | 21 | | 23 | | 25 | | 27 |

ИЗОТНЫ (N=20)

ИЗОБАРЫ (A=40)

Основные характеристики нуклонов:

Протон 1_1p

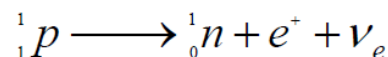
Заряд, равен заряду электрона - $e = \begin{cases} 4,803 \cdot 10^{-10} \text{ СГСЭ} \\ 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \end{cases}$

Масса - $m_p = 1836,1m_e = \begin{cases} 1,6726 \cdot 10^{-24} \text{ г} \\ 1,007276 \text{ а.е.м.} \\ 938,28 \text{ МэВ} \end{cases}$

Спин - $s = \frac{1}{2}$

Магнитный момент - $\mu_p = +2.79\mu_j$

Протон – частица **стабильная**: Но! Внутри ядра за счет энергии передаваемой протону другими нуклонами возможен



Нейтрон 1_0n

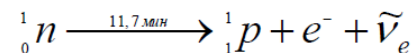
Заряд, равен нулю

Масса - $m_n = 1838,6m_e = 1,008665 \text{ а.е.м.}$

Спин - $s = \frac{1}{2}$

Магнитный момент - $\mu_n = -1,91\mu_j$ *Заряд равен нулю!*

В свободном состоянии нейтрон является нестабильным



Измерение масс ядер

Международная единица массы (а.е.м.) равняется 1/12 массы атома ^{12}C .
 $1 \text{ а.е.м.} = 1.66043 \cdot 10^{-24} \text{ г} = 931.481 \text{ МэВ} = 1 \text{ D (дальтон)}$.

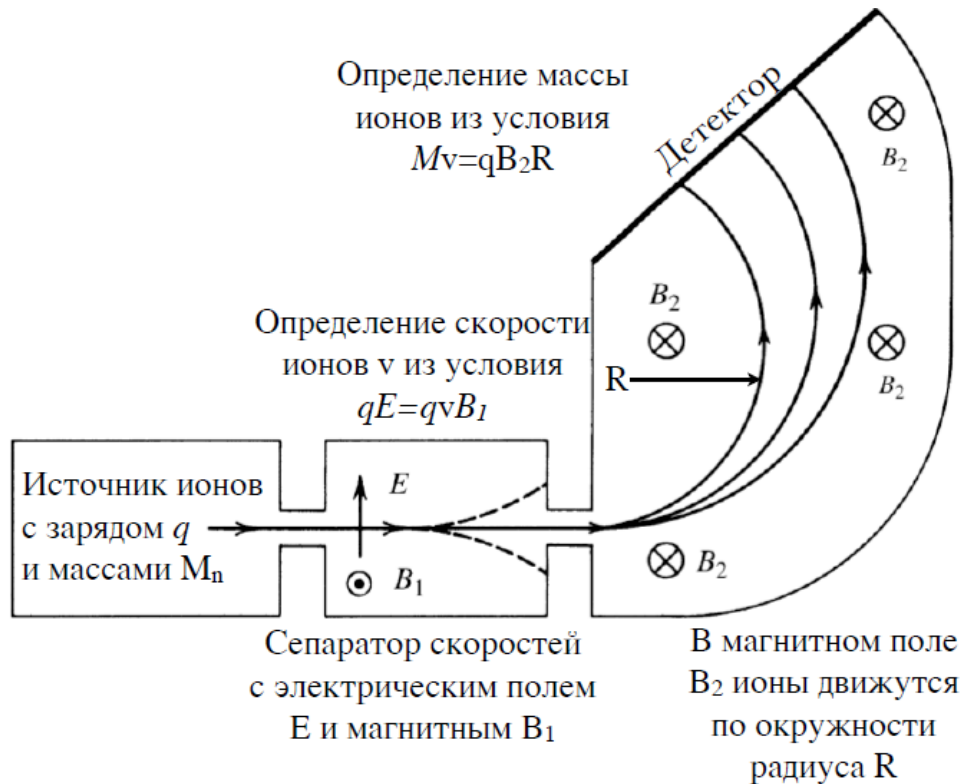


Схема масс-спектрометра



TRITON Plus

$$M = qB_2R/v = qB_1B_2R/E$$

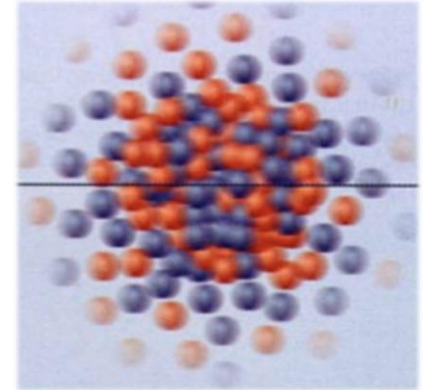
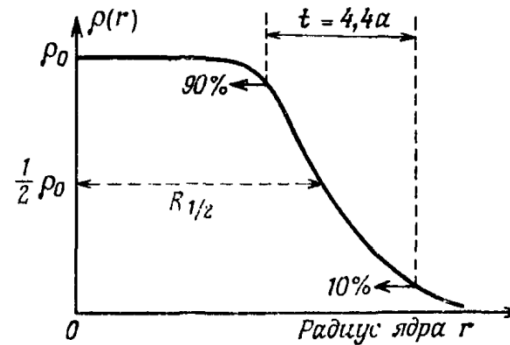
$$\Delta M/M = 10^{-8} - 10^{-7}$$

3. Размеры и форма ядра

У ядра отсутствует четкая граница

Распределение плотности задается распределением Ферми:

$$\rho(r) = \frac{\rho_0}{1 + e^{(r-R)/a}}$$

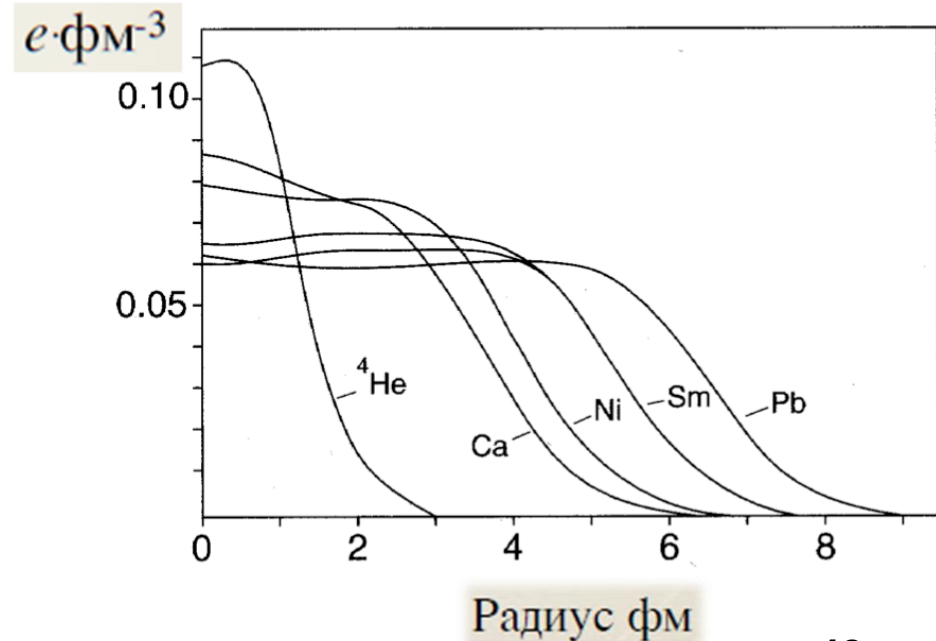


Параметр a связан толщиной поверхности t выражением
 $t = (4 \cdot \ln 3) a$

Среднеквадратичный радиус

$$\langle r^2 \rangle^{1/2} = r_0 A^{1/3}$$

A - число нуклонов, $r_0 \sim 1$ фм



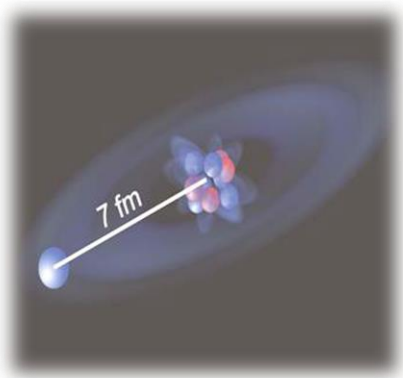
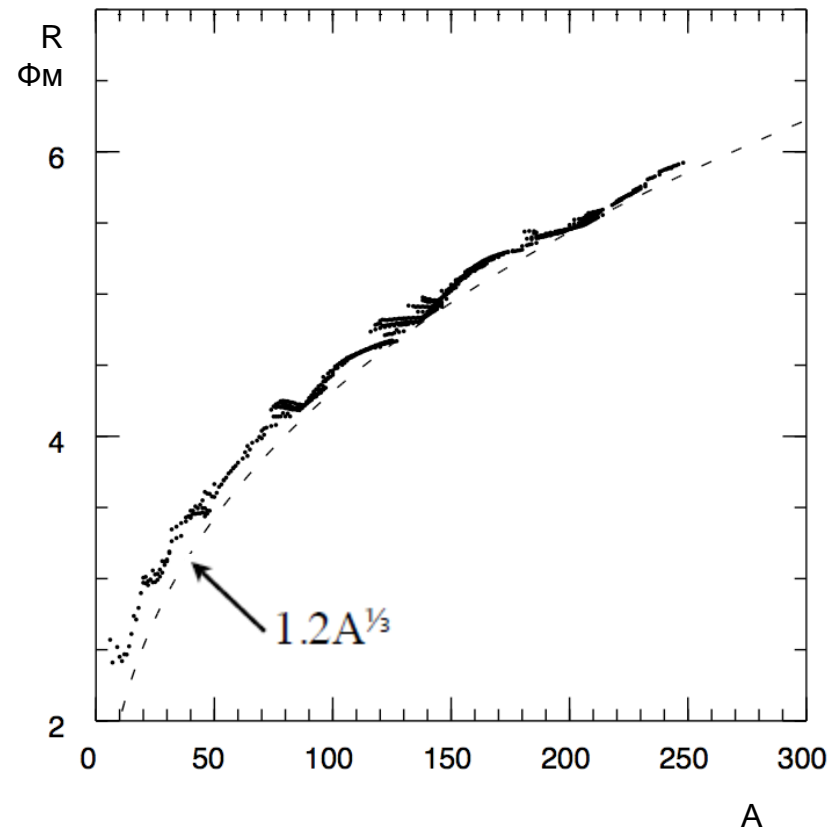
Радиусы атомных ядер

Радиус ядра приближённо может быть описан формулой

$$R = (1.2A^{1/3} - 0.5) \text{ ФМ}$$

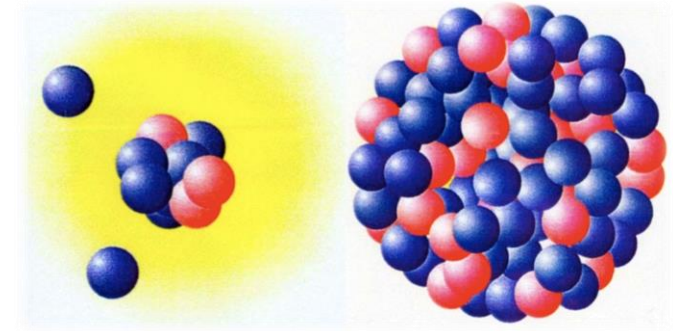
Для ядер, с $A > 20$, радиус с точностью не хуже 20%

$$R \approx 1.2A^{1/3}$$



^{11}Be

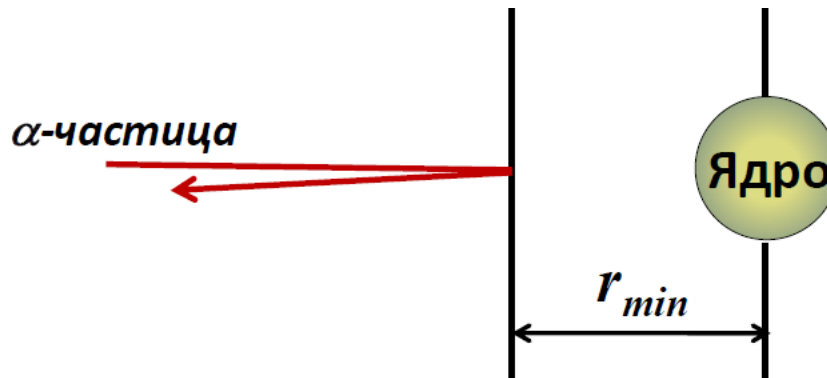
Ядерное гало – один или два слабо связанных нуклона, находящихся на большом расстоянии от кора



^{11}Li

^{208}Pb

Что о размере ядра мог сказать Резерфорд?



Рассеяние назад: $T_{\alpha} = V_{\text{кул}} = \frac{Z_{\alpha}Z_{\text{я}}e^2}{r_{min}}$

$$r_{min} = \frac{Z_{\alpha}Z_{\text{я}}e^2}{T_{\alpha}} = \frac{Z_{\alpha}Z_{\text{я}}}{T_{\alpha}} \cdot \frac{e^2}{\hbar c} \cdot \hbar c = \frac{2.79}{5 \text{ МэВ}} \cdot \frac{1}{137} \cdot 197 \text{ МэВ} \cdot \text{ФМ} \approx 46 \text{ ФМ}$$

Формула Резерфорда:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega}(\theta) = \left(\frac{ZZ'e^2}{4E} \right)^2 \frac{1}{\sin^4 \frac{\theta}{2}}$$


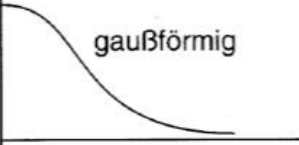


* Для учета спина электрона и релятивистских поправок используется формула Мотта

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right)_{\text{Mott}} = \left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right)_{\text{Rutherford}} \left(1 - \beta^2 \sin^2 \left(\frac{\theta}{2} \right) \right) \quad \beta = v/c$$

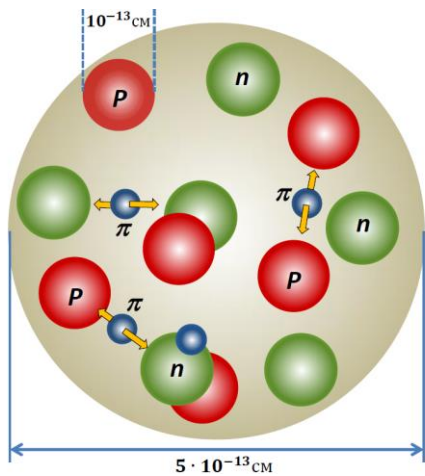
* В случае, если ядро обладает пространственной структурой, появляется добавочный множитель - формфактор $F(q^2)$

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right)_{\text{exp}} = \left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right)_{\text{Mott}} |F(\vec{q}^2)|^2$$

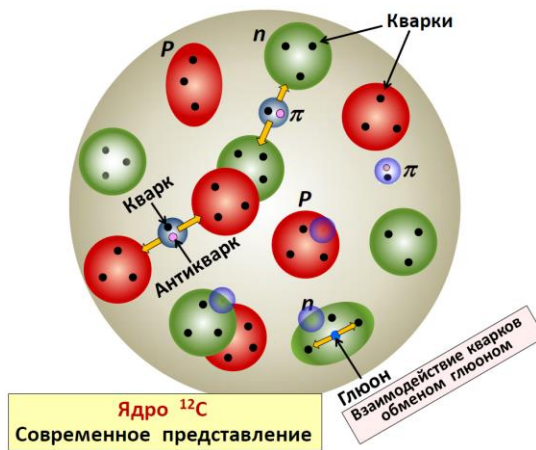
q - переданный ядру импульс

| $\rho(r)$ | $ F(q^2) $ | Beispiel |
|--|---|--------------------|
| punktförmig | konstant | Elektron |
|  | Dipol | Proton |
|  | gaußförmig | ${}^6\text{Li}$ |
| homogene Kugel |  | - |
| Kugel mit diffusem Rand |  | ${}^{40}\text{Ca}$ |

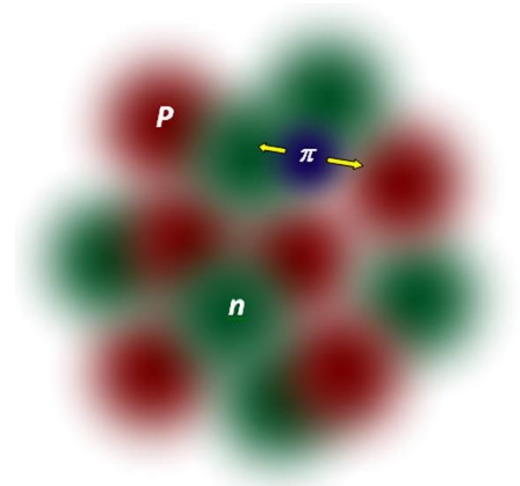
$r \rightarrow$ $|q| \rightarrow$



Модель Юкавы



Ядро ^{12}C
Современное представление

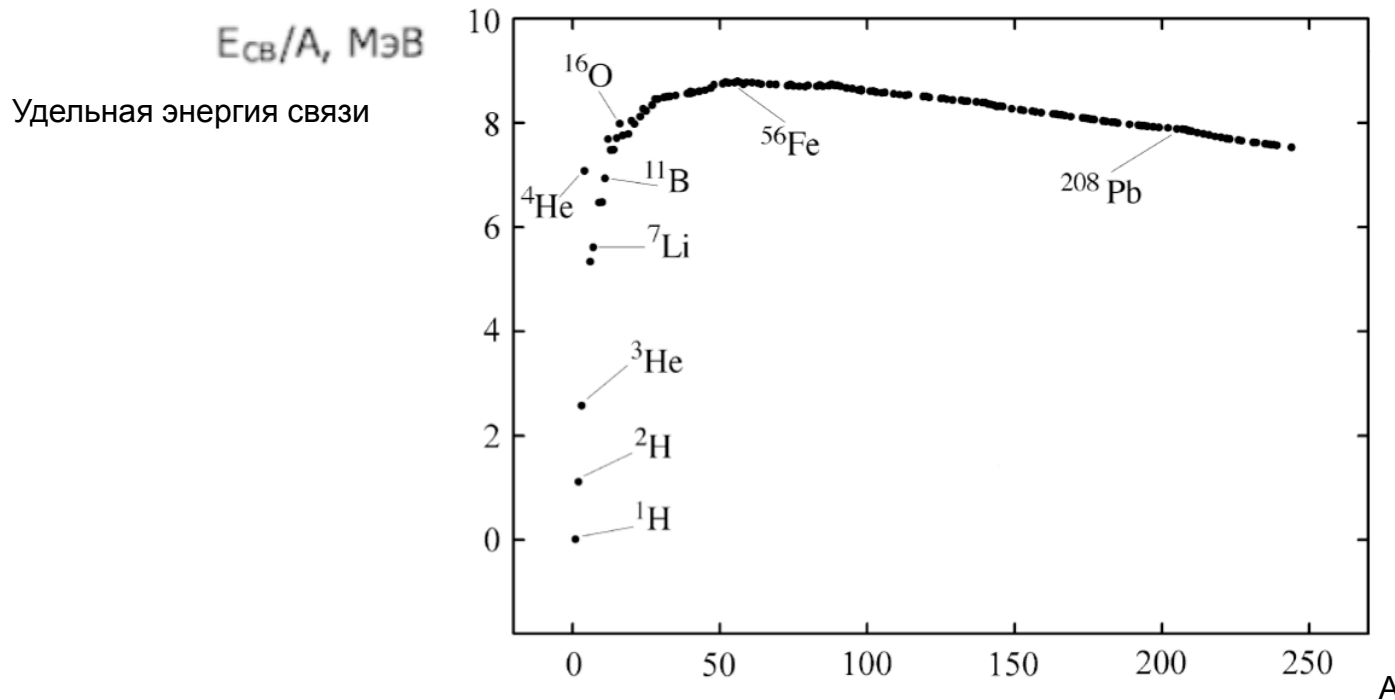


Художественная модель

Нуклоны
двигаются в ядре
хаотически
со средней скоростью
 $\sim 0,2 \text{ c}$

4. Энергия связи ядер

$$E_{\text{св}}(Z, A) = [Zm_p + Nm_n - M(Z, A)]c^2.$$



Строго говоря, масса ядра не равна сумме масс Z протонов и N нейтронов

Величина

$$\Delta M(Z, A) \equiv M(Z, A) - Z(M_p + m_e) - N M_n$$

называется **дефектом массы**

Энергия связи нуклонов в ядре описывается полуэмпирической формулой **Вайцзеккера** (Carl Friedrich von Weizsäcker)

$$E_{св} = a_{об} A - a_{нов} A^{2/3} - a_{кул} Z^2 A^{-1/3} - a_{сим} \frac{(A - 2Z)^2}{A} + \delta \cdot A^{-3/4}$$

$$a_{об} = 15.75 \text{ МэВ}, \quad a_{нов} = 17,8 \text{ МэВ}, \quad a_{кул} = 0,71 \text{ МэВ}, \quad a_{сим} = 23,7 \text{ МэВ},$$

$$\delta = \begin{cases} +|\delta| & \text{— для чётно-чётных ядер} \\ 0 & \text{— для ядер с нечётным } A \\ -|\delta| & \text{— для нечётно-нечётных ядер} \end{cases}$$

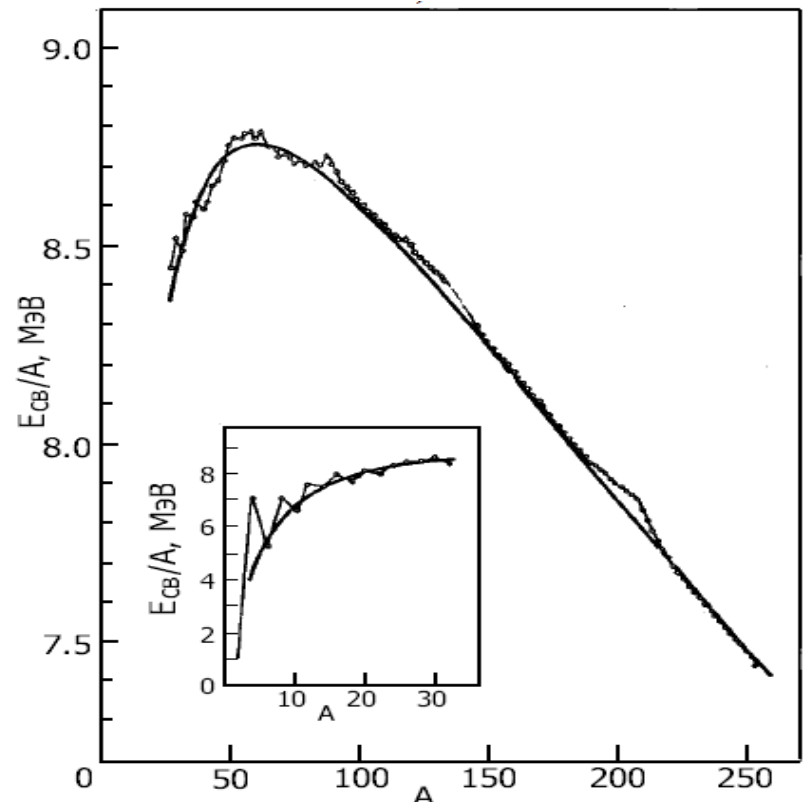
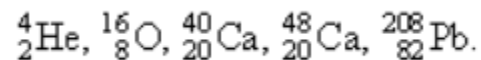
$$|\delta| = \chi A^{-1/3} \quad \chi = 12$$

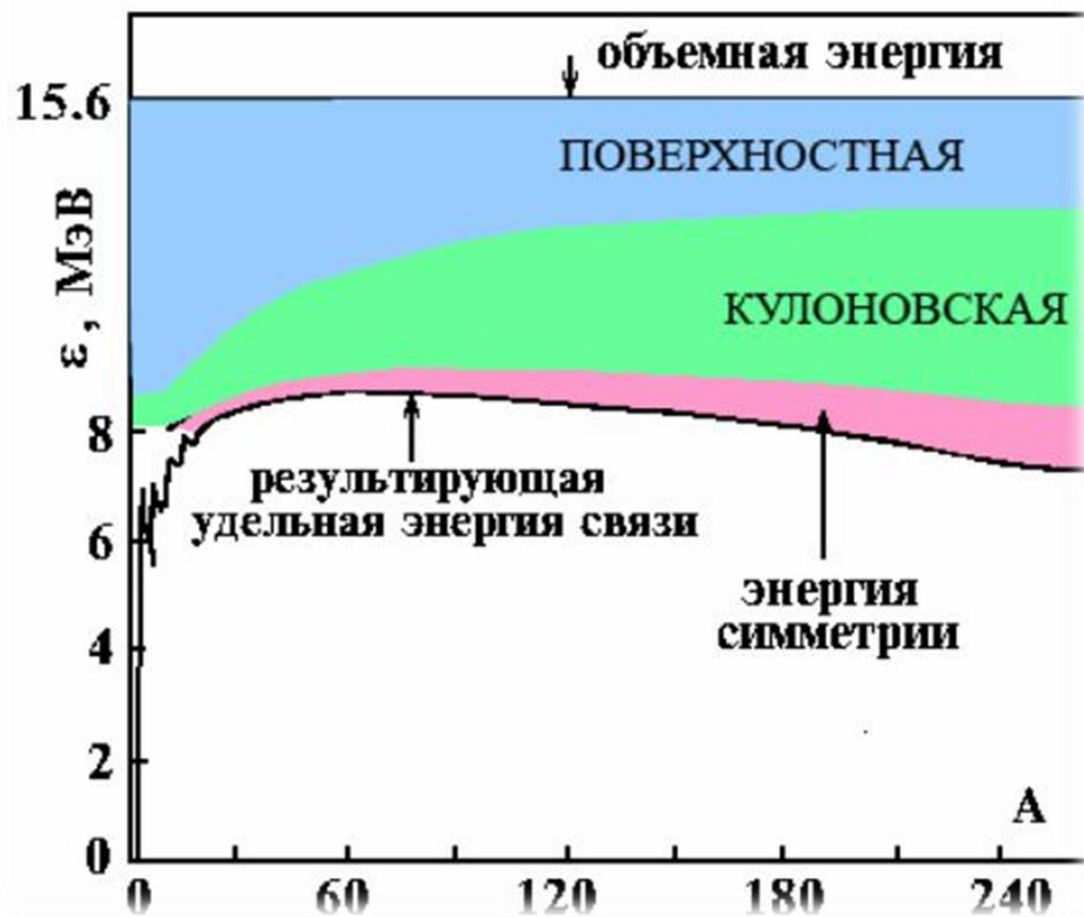
Магические ядра

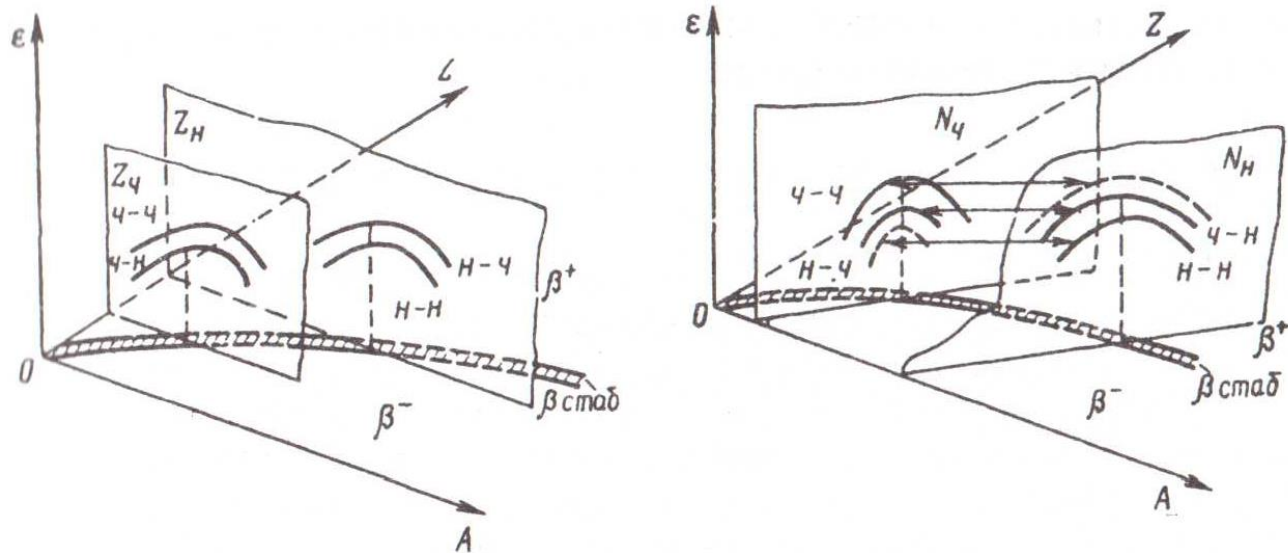
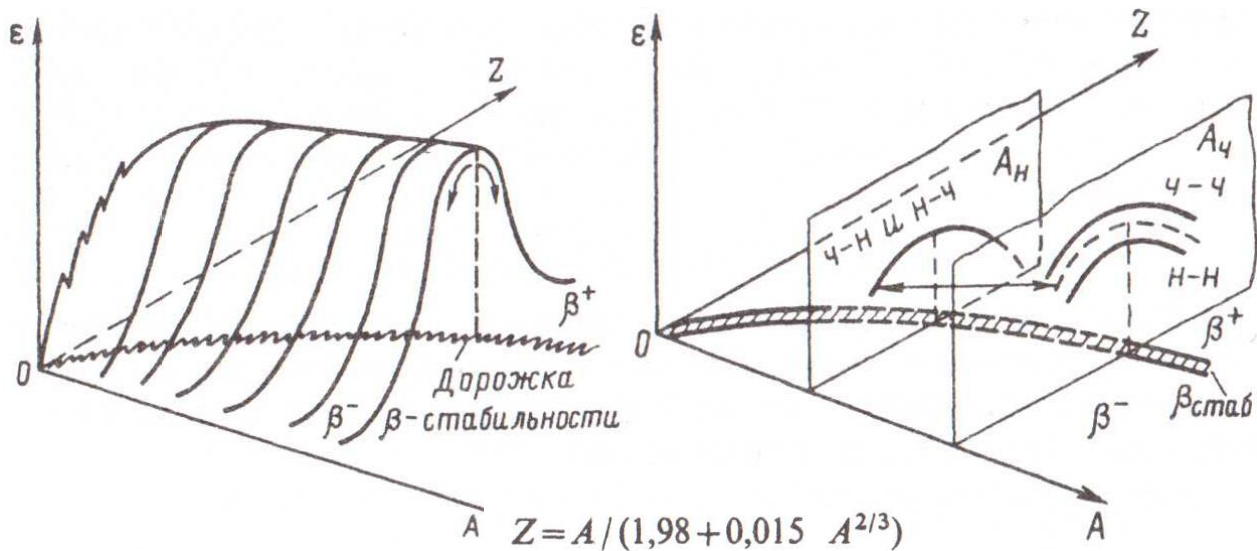
| | | | | | | | |
|---|---|---|----|----|----|----|-----|
| Z | 2 | 8 | 20 | 28 | 50 | 82 | |
| N | 2 | 8 | 20 | 28 | 50 | 82 | 126 |

??? Z = 110, 114, 120 и N = 184

Дважды магические ядра







в более точном приближении энергетическая поверхность является трехслойной поверхностью, на верхнем слое которой расположены значения ϵ для четно-четных (ч-ч) ядер, на среднем — для нечетно-четных (н-ч) и четно-нечетных (ч-н) и на нижнем — для нечетно-нечетных (н-н).

5. Ядерные спины

У микрочастицы, подчиняющейся квантовым законам, как и у классического тела, различают два типа угловых моментов:

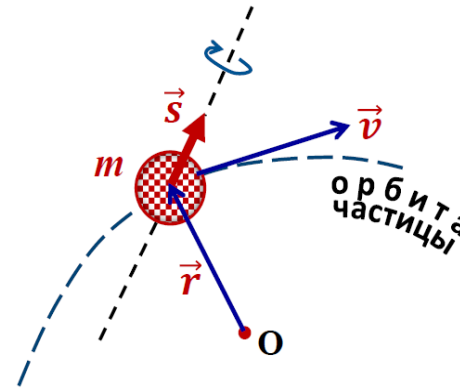
– **собственный угловой момент** \vec{s}

(в классическом случае это угловой момент, вызванный вращением тела вокруг собственной, т.е. проходящей через центр масс тела, оси),

и

– **орбитальный угловой момент** \vec{l} ,

связанный с движением частицы как целого по некоторой траектории (орбите).



\vec{s} – Спин частицы

$\vec{l} = m[\vec{r} \times \vec{v}]$
Орбитальный момент частицы

Спин – частицы её неотъемлемая и неизменная внутренняя характеристика (как заряд или масса)

$|s|$ может быть как целым, так и полуцелым

Спин нуклона $s = 1/2$, спин фотона $s = 1$.

фермионы

бозоны

l может принимать только целочисленные значения, включая нуль:

$$l = 0, 1, 2, 3, \dots, \infty.$$

Полным угловым моментом \vec{j} микрочастицы называют векторную сумму её орбитального и спинового моментов:

$$\vec{j} = \vec{l} + \vec{s}.$$

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

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

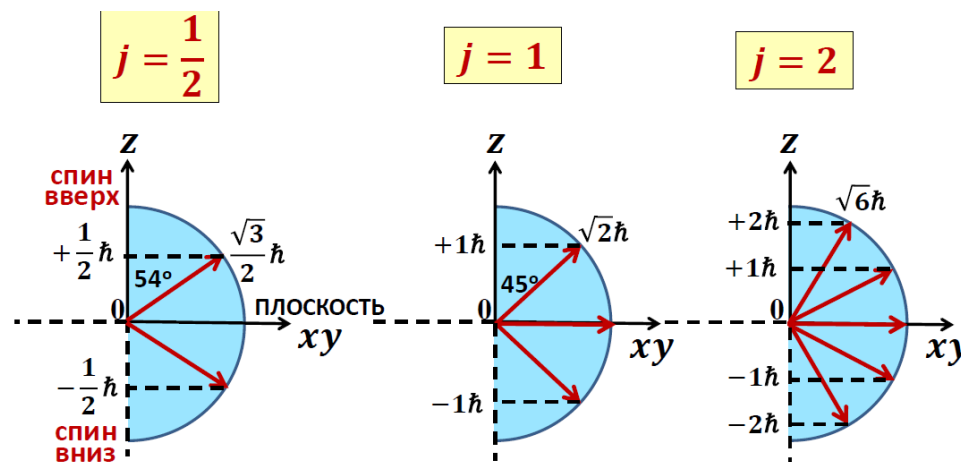
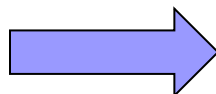
$$|\vec{l}| = \hbar \sqrt{l(l+1)}.$$

Спин ядра $\vec{J}_{\text{ядра}}$ это
 полный момент количества движения
 покоящегося ядра.

Он является результатом векторного сложения
 спинов \vec{s}_α нуклонов ядра
 и их орбитальных (угловых) моментов \vec{l}_α
 внутри ядра:

$$\vec{J}_{\text{ядра}} = \sum_{\alpha=1}^A (\vec{l}_\alpha + \vec{s}_\alpha)$$

Пространственное
 квантование



6. Магнитный момент

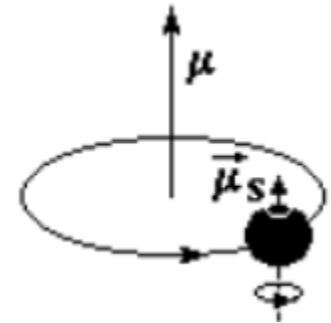
Согласно классической электродинамике при вращении частицы с зарядом ze и массой m и обладающей механическим моментом $\hbar\vec{L}$, возникает магнитный момент, пропорциональный механическому моменту $\frac{e\hbar}{2mc}[\vec{r} \times \vec{p}] = \frac{e\hbar}{2mc}\vec{L} = \vec{\mu}$. Таким образом, аналогом классического момента $\vec{\mu}$ является магнитный момент орбитального движения

$$\vec{\mu} = \frac{e\hbar}{2mc} \frac{\vec{L}}{\hbar},$$

где $e\hbar/2mc$ – магнетон. При наличии спина S у частицы и отсутствии

орбитального движения магнитный момент $\vec{\mu}_s = g \frac{e\hbar}{2mc} \frac{\vec{S}}{\hbar}$ или $\mu_s = g_s \mu_B$, где g_s – гиромагнитное отношение

Магнитный момент частицы может быть измерен по взаимодействию ее магнитного момента с внешним магнитным полем. Измерение магнитного момента дает возможность определить спин частицы.



Орбитальный и спиновый магнитные моменты частицы с зарядом ze и массой m .

Спиновые
гироманнитные факторы
некоторых частиц

| Частица | g_s |
|----------|-------|
| Электрон | -2 |
| Позитрон | 2 |
| Протон | 5,58 |
| Нейтрон | -3,83 |

} в магнетонах
Бора μ_B

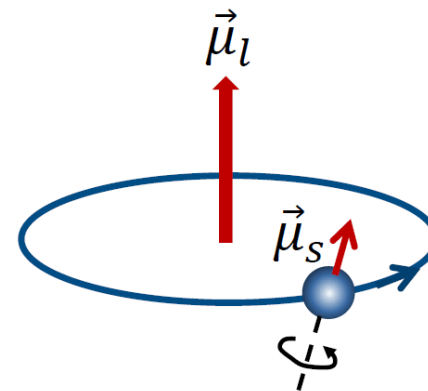
} в ядерных
магнетонах μ_N

$$\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e c} = 5,79 \cdot 10^{-15} \frac{\text{МэВ}}{\text{Гс}}$$

$$\mu_N = \frac{e\hbar}{2m_p c} = 3,15 \cdot 10^{-18} \frac{\text{МэВ}}{\text{Гс}}$$

$$\mu_p \approx 2.79 \mu_N$$

$$\mu_n \approx -1.91 \mu_N$$



орбитальный
магнетизм
 $\vec{\mu}_l^\alpha = g_l^\alpha \cdot \vec{l}_\alpha$

спиновый
магнетизм
 $\vec{\mu}_s^\alpha = g_s^\alpha \cdot \vec{l}_s$

g -спиновый
гироманнитный
множитель

Результирующий магнитный момент частицы,
совершающей движение:

$$\vec{\mu} = \vec{\mu}_s + \vec{\mu}_l$$

7. Квадрупольный электрический момент ядра

Квадрупольный электрический момент ядра характеризует отклонение распределения электрического заряда в ядре от сферически симметричного и может служить для изучения формы атомного ядра.

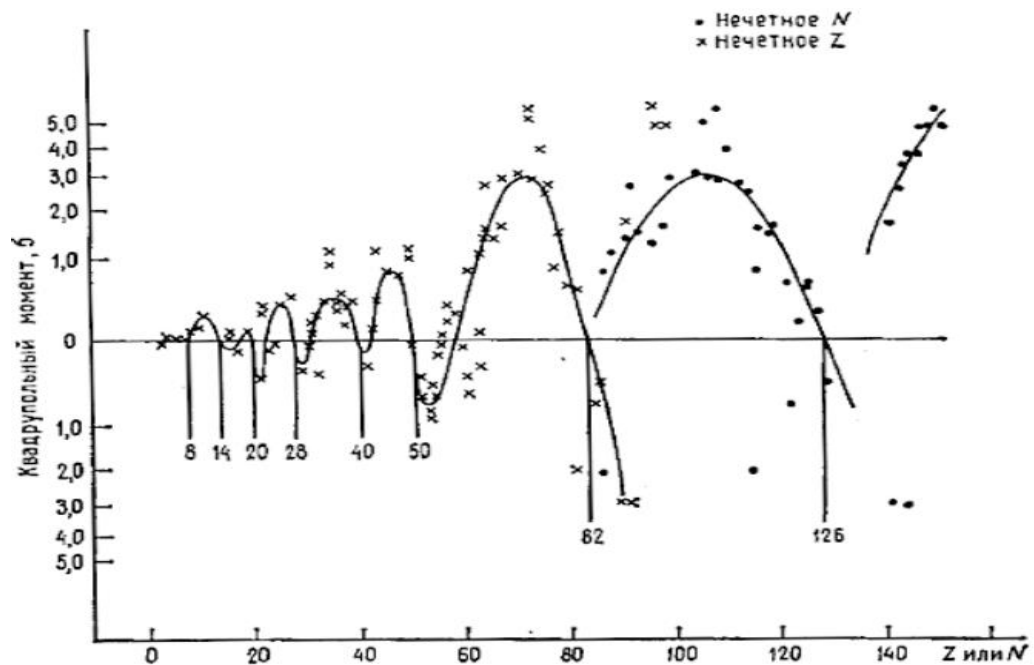
Квадрупольный электрический момент ядра является тензором и определяется соотношением

$$Q = Z \int r^2 \rho(r) (3 \cos^2 \theta - 1) d^3r,$$

где θ – полярный угол радиуса вектора относительно оси симметрии ядра, r – расстояние элемента заряда от начала координат.

Для сферически симметричного ядра $Q = 0$, вытянутое вдоль оси симметрии ядро имеет $Q > 0$, а сплюснутое – $Q < 0$.

На рис. 74 представлены экспериментальные данные о значениях квадрупольных электрических моментов для разных ядер.



Экспериментальные данные
Цифры на рисунке – магические числа

8. Статистика

В микромире частицы одного типа неразличимы,
т. е. имеет место

принцип тождественности частиц.

Перестановка двух одинаковых частиц
не меняет состояния системы.

Гамильтониан системы частиц инвариантен
к перестановке двух любых частиц одного типа.

Должна быть сохраняющаяся
физическая величина (квантовое число),
отвечающая этому преобразованию.

Бозоны: фотон (*спин 1*), пион и α -частица (*спин 0*),

Фермионы: протон, нейтрон, электрон (*спин 1/2*).

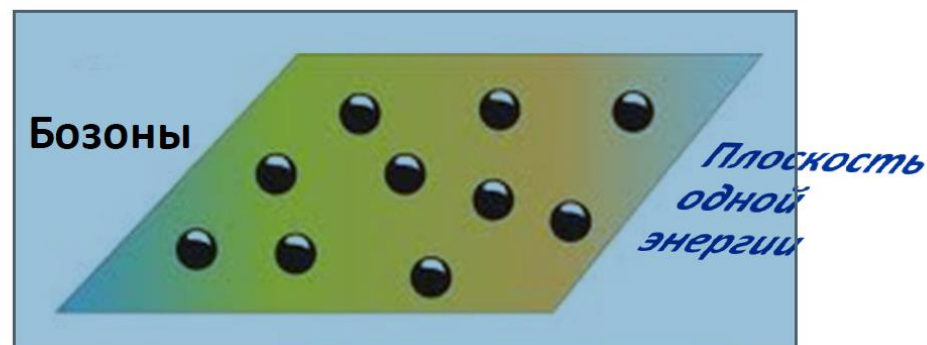
В системе тождественных фермионов в одном состоянии (с одинаковым набором квантовых чисел) может быть не более одной частицы

(**принцип запрета Паули**),

а в системе тождественных бозонов – сколько угодно.

Разнообразие химических элементов обусловлено тем, что электрон фермион.

Лазер существует потому что фотон – бозон.



Частицы с полуцелым спином (**фермионы**)
подчиняются *статистике Ферми-Дирака*
и *принципу запрета Паули*.

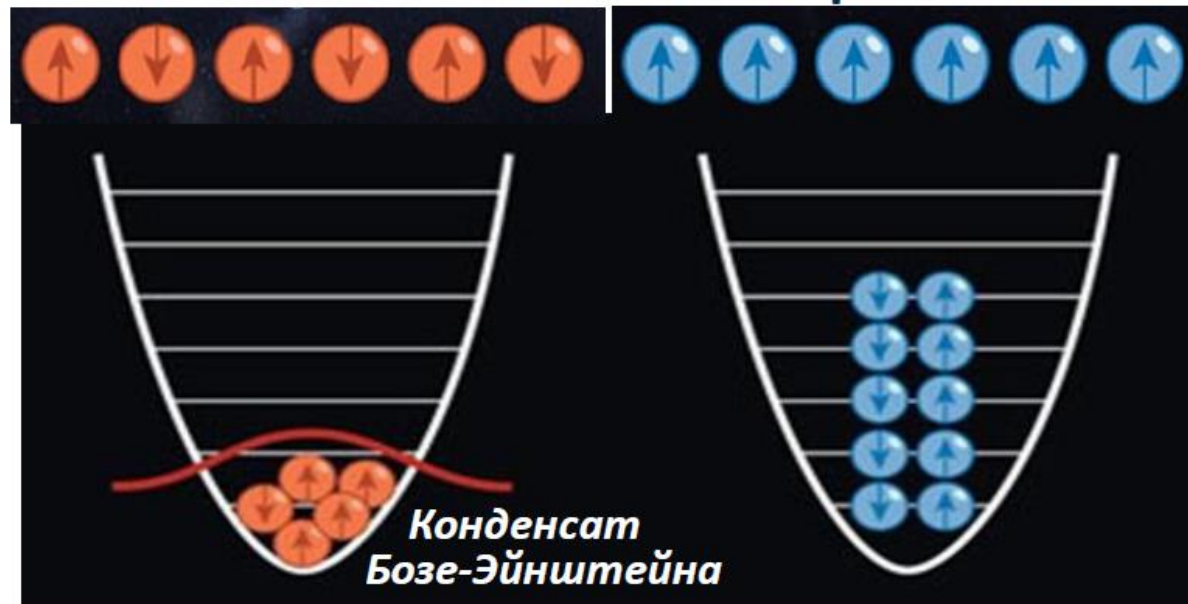
Частицы с целым спином (**бозоны**)
подчиняются *статистике Бозе-Эйнштейна*.

В потенциальной яме все бозоны могут занимать
один и тот же нижний энергетический уровень,
образуя *конденсат Бозе-Эйнштейна*.

Согласно *принципу Паули* два тождественных фермиона
(например, с однонаправленными спинами)
не могут занимать один и тот же энергетический уровень.

Бозоны

Фермионы



9. Чётность

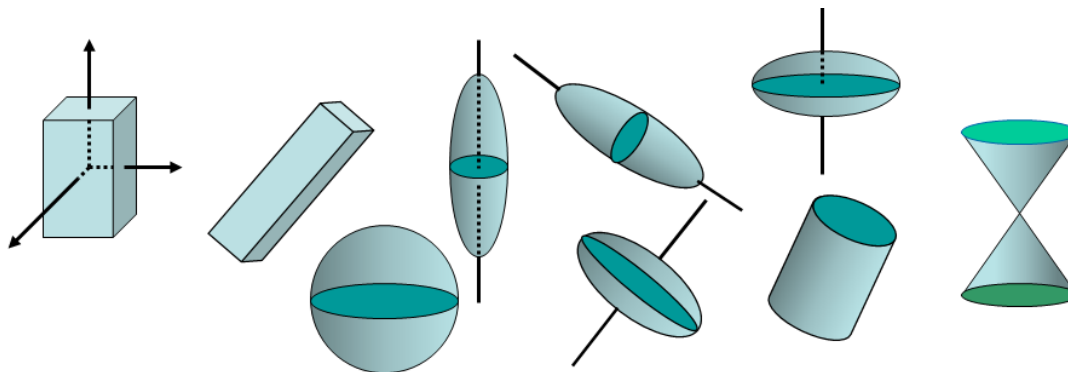
Квантовые системы с определённой чётностью инвариантны (не меняют своих свойств) при пространственной инверсии, т. е. «не чувствуют» этой инверсии.

Пространственная инверсия эквивалентна последовательному отражению системы от трёх взаимно перпендикулярных плоскостей.

Классическое тело, совмещающееся с самим собой при таком преобразовании, обладает **центром симметрии**.

Поэтому **квантовый объект с определённой чётностью имеет в качестве классического аналога тело с центром симметрии.**

То, что ядро (его волновая функция) имеет определённую чётность, означает существование у ядра центра симметрии.



Четность атомного ядра P как системы нуклонов определяется произведением четностей отдельных нуклонов P_i :

$$P = P_1 \cdot P_2 \cdot \dots \cdot P_A.$$

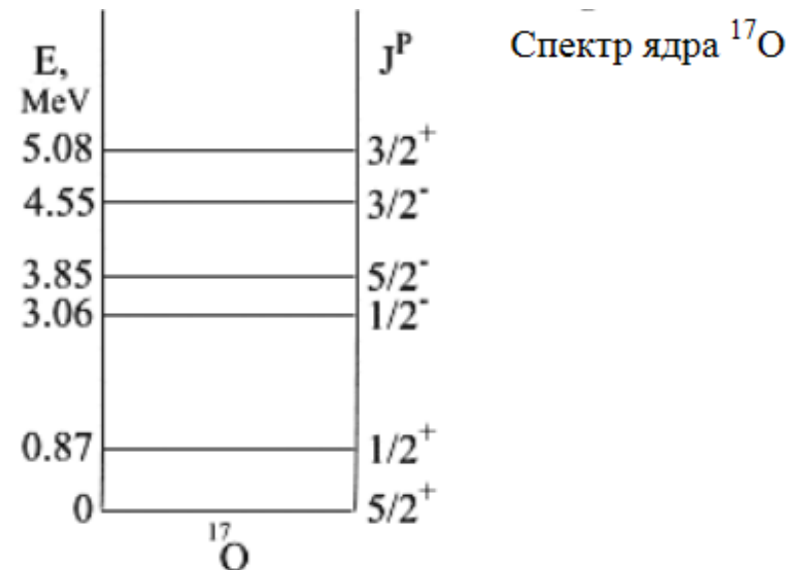
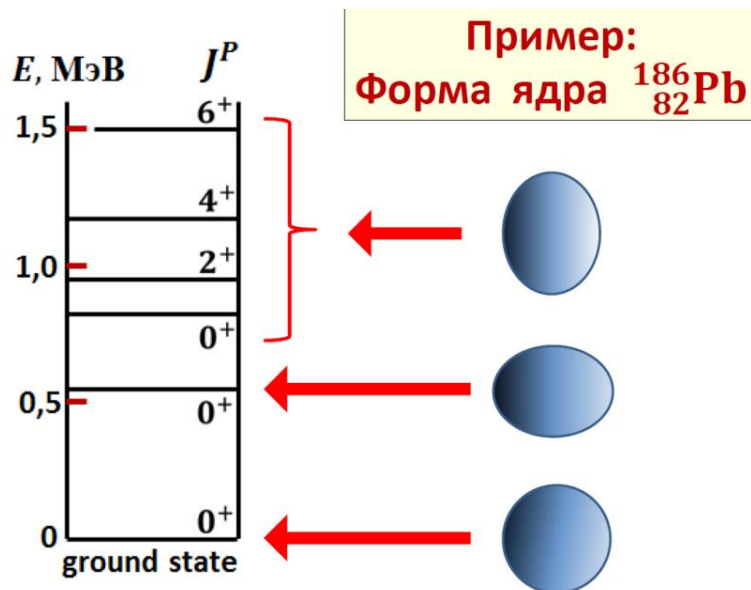
Четность P_i нуклона в сферически симметричном поле определяется орбитальным моментом l_i нуклона и его внутренней четностью π_i :

$$P_i = \pi_i \cdot (-1)^{l_i},$$

где π_i - внутренняя четность нуклона, по определению всегда равная значению $+1$.

Поэтому четность ядра в сферически симметричном состоянии определяется произведением орбитальных четностей $(-1)^{l_i}$ нуклонов в этом состоянии

$$P = (-1)^{\sum l_i}.$$



ВМЕСТО ЗАКЛЮЧЕНИЯ:

Все науки можно разделить на две группы – на физику и коллекционирование марок

Резерфорд

Источники информации

1. К.Н. Мухин. Экспериментальная ядерная физика. В 3-х тт. СПб.: Издательство «Лань», 2008. Т.1, стр.12-24
2. Широков Ю.М., Юдин Н.П. Ядерная физика. Изд. 2е. М.: Наука, 1980. Глава II. <http://review3d.ru/shirokov-yu-m-yudin-n-p-yadernaya-fizika-izd-2e>
3. Ю.В. Данейкин. Курс лекций по ядерной физике. Томский политех
http://portal.tpu.ru:7777/SHARED/d/DANEYKIN/study_work/Tab/%D0%9B%D0%B5%D0%BA%D1%86%D0%B8%D1%8F%20%E2%84%963.pdf
http://portal.tpu.ru:7777/SHARED/d/DANEYKIN/study_work/Tab/%D0%9B%D0%B5%D0%BA%D1%86%D0%B8%D1%8F%20%E2%84%965.pdf
4. K.S.Krane. Introductory Nuclear Physics. Wiley, 1988. Chapter 1;
<http://www.fulviofrisone.com/attachments/article/446/Krane%20-%20Introductory%20Nuclear%20Physics.pdf> .