

Учреждение образования

«Международный государственный экологический университет им.  
А.Д. Сахарова»

Факультет мониторинга окружающей среды

# ФИЗИКА ЯДРА И ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Статические свойства атомных ядер.  
Ядерные модели

Специальность **1-31 04 05**  
**Медицинская физика 4**  
**2020 - 2021**

# Атомные ядра

- Атомные ядра условно принято делить на *стабильные* и *радиоактивные*. Условность такого деления состоит в том, что все ядра подвергаются радиоактивному распаду, но с различной скоростью.
- Стабильными называют ядра, распадающиеся достаточно медленно в условиях поставленных задач. Обычно принято считать ядра стабильными, если со времени образования видимой части Вселенной, т.е. со времени образования химических элементов, распалась ничтожная часть их.
- Ядра, распадающиеся более быстро, считаются радиоактивными.

# Статические свойства ядер

- величины, характеризующие состав ядра (атомный, или *порядковый номер*  $Z$ , называемый также *электрическим зарядом ядра*, и *массовое число* или *барионный заряд*  $A$ );
- величины, описывающие размеры и форму ядер: *радиус ядра*  $R$  и *несферичность*  $\delta R/R$ ;
- механические величины: *энергия связи*  $E_{\text{св}}$ , *спин* (собственный момент импульса)  $S$  и *четность*  $P$ ;

# Статические свойства ядер (оконч.)

- величины, характеризующие электромагнитные свойства ядра:
  - среднеквадратичный электрический радиус  $R_{эл}$ ,
  - дипольный магнитный момент  $p^{(m)}$ ,
  - электрический квадрупольный момент  $Q_{ij}$  (но не дипольный электрический и не квадрупольный магнитный моменты);
- статистика (Бозе – Эйнштейна или Ферми – Дирака), которой подчиняются те или иные ядра;
- изобарический спин  $T$ .

# Атомные ядра

Радиоактивные ядра дополнительно характеризуются:

типом радиоактивного превращения ( $\alpha$ -распад,  $\beta$ -распад, спонтанное деление и др.),  
периодом полураспада  $T_{1/2}$ ,  
энергетическими параметрами испускаемых частиц и др.

Полная информация о ядре включает:

структуру и характеристики всех возможных энергетических состояний ядра;  
способы и вероятности перехода ядра из одного состояния в другое;  
сечения и характер взаимодействия ядра с другими ядрами и частицами.

# Электрический и барионный заряд ядер



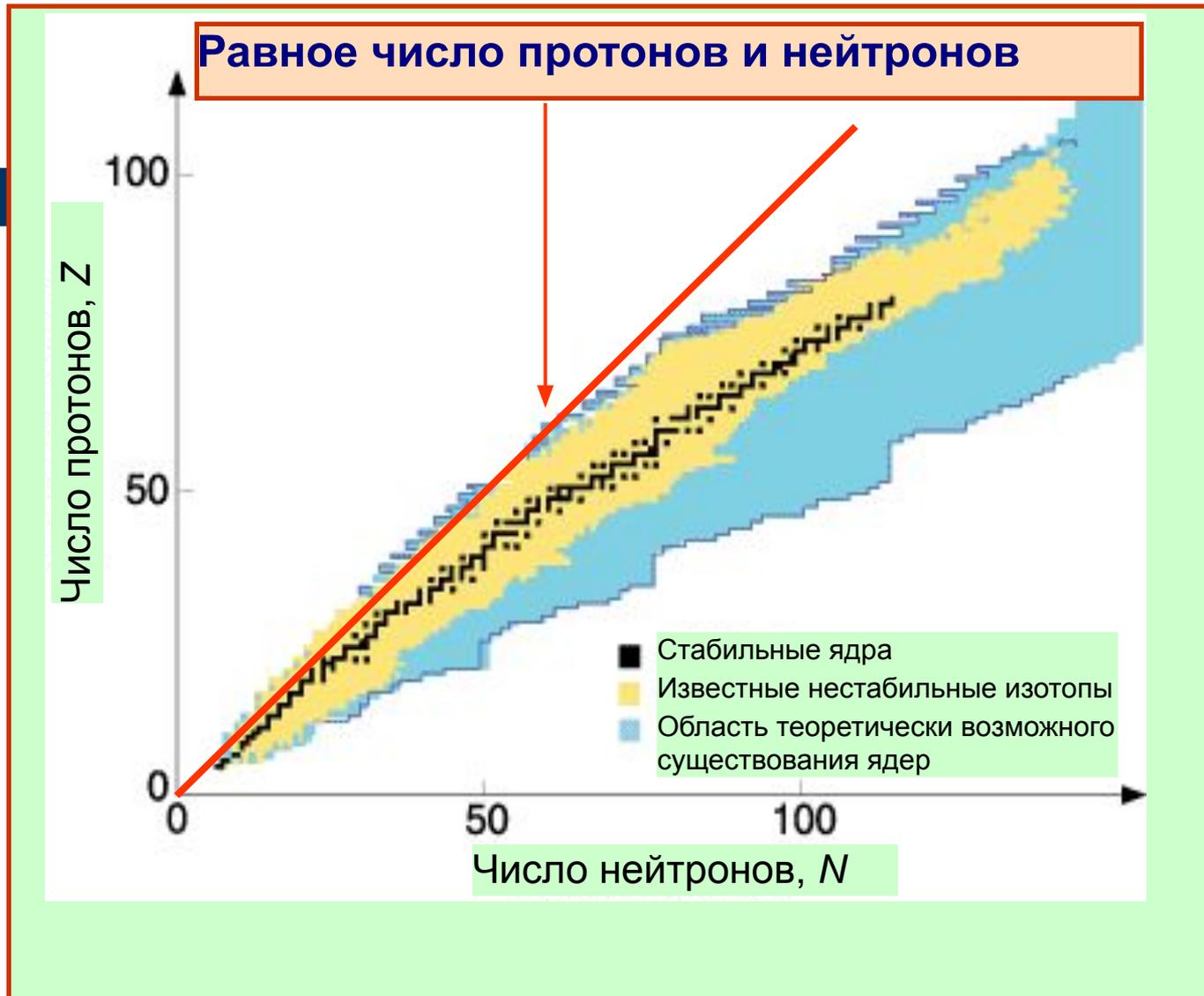
# Электрический заряд

- Измеряется в единицах элементарного заряда
- Сохраняется при всех видах взаимодействий
- Варьируется в пределах от  $Z = 1$  (протон) до  $Z = 118$  (наименование не установлено)
- При  $Z > 83$  ядра, как правило, не стабильны (сильно кулоновское отталкивание протонов друг от друга)
- Радиоактивными также оказываются все ядра с порядковыми номерами  $Z = 43$  (Tc) и  $Z = 61$  (Pm)

# Барионный заряд

- Принимает целочисленные значения от  $A=1$  (протон, нейтрон) до 294 (?)
- Сохраняется при всех видах взаимодействий
- Не существует стабильных ядер при  $A = 5, 8$  и при  $A \geq 210$ .
  - (Например, радиоактивные ядра при  $A = 5$  являются настолько коротко-живущими, что их не рассматривают вообще, а ядер с массовым числом  $A = 8$  всего несколько:  ${}^8\text{He}$ ,  ${}^8\text{Li}$ ,  ${}^8\text{B}$ , а  ${}^8\text{Be}$  сразу распадается на 2  $\alpha$ -частицы)

# Протонно-нейтронная диаграмма



# Четность $Z$ и $N$

- Среди стабильных изотопов больше всего четно-четных (четное  $Z$ , четное  $N$ )
- меньше всего нечетно-нечетных (нечетные  $Z$  и  $N$ ) ядер. Последних известно всего четыре:  $D$ ,  ${}^6_3\text{Li}$ ,  ${}^{10}_5\text{B}$ ,  ${}^{14}_7\text{N}$
- Исключение: ядро бериллия-8 нестабильно и быстро распадается на две альфа-частицы.
- Не существует и ядра – связанного состояния двух протонов. Для связи протонов в ядре обязательно нужны нейтроны.

# Стабильные изотопы

- Рекордсменом по числу изотопов является олово, которое обладает десятью стабильными изотопами:



- Есть элементы, обладающие только одним стабильным изотопом, например, Be, Na, Al.

# 4 новые элементы

- В 2011 г. были добавлены 114 и 116 элементы.
- Открыты несколько лет назад. Относятся к сверхтяжелым элементам.
- проводилась экспертная проверка. Новые элементы с  $Z=113, 115, 117$  и  $118$  пока не имеют названий и внесены в 2016г. в таблицу Менделеева.
- Первооткрывателями элементов с  $Z = 115, 117$  и  $118$  признаны международная исследовательская группа из российских и американских ученых.
- Эксперты признали первооткрывателями 113 элемента японских ученых.
- 7 раздел таблицы Менделеева заполнен.

# Современная таблица Менделеева

		Group																			
		I		II												III	IV	V	VI	VII	VIII
Period	1	1 H																	2 He		
	2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne		
	3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar		
	4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr		
	5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe		
	6	55 Cs	56 Ba	* La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn		
	7	87 Fr	88 Ra	** Ac	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Uut	114 Fl	115 Uup	116 Lv	117 Uus	118 Uuo		
	8	119 Uun																			
* Lanthanides		57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu					
** Actinides		89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr					

# Энергия связи



# Определение энергии связи

- *Энергией связи ядра называется минимальная энергия, необходимая для разделения его на отдельные нуклоны.*
- Энергией связи протона (нейтрона, альфа-частицы и пр.) в ядре называется минимальная энергия, необходимая для отделения протона (нейтрона, альфа-частицы и пр.)

# Расчет энергии связи ядра



- Эта реакция всегда будет эндознергетической, так как частица P должна обладать некоторой кинетической энергией относительно ядра, чтобы отделить друг от друга составляющие его нуклоны.
- Тогда за энергию связи ядра можно было бы взять минимально возможную кинетическую энергию частицы P, при которой произойдет разделение ядра на нуклоны.

# Расчет энергии связи ядра (продолжение)

- Кинетическая энергия зависит от выбора системы отсчета. В системе отчета, связанной с ядром, кинетическая энергия частицы  $P$  будет минимальна, если его нуклоны и сама налетающая частица  $P$  после реакции останутся неподвижными в этой системе отсчета.

$$E_P = - Q$$

- Тогда она будет равна по величине энергии реакции.

# Расчет энергии связи ядра (окончание)

- В любой другой системе отсчета в силу закона сохранения энергии и положительности кинетической энергии минимальная энергия, затраченная на разделение ядра на нуклоны, будет *больше* энергии реакции (1), взятой со знаком минус. Т.о., энергия связи ядра рассчитывается по формуле

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

- Если массы протона, нейтрона и ядра выражены в а.е.м., то

$$c^2 = 931,494028 \text{ МэВ}$$

# Важно!

- Так как энергия реакции не зависит от выбора системы отсчета и определяется только составом исходных частиц и конечных продуктов реакции, то энергия связи ядра является характеристикой, *не зависящей от выбора системы отсчета. Она точно определяется формулой*

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

# Энергия связи протона или нейтрона в ядре

- Энергия связи протона в ядре может быть рассчитана по формуле

$$(p|Z,A) = [m_p + M(Z-1, A-1) - M(Z,A)]c^2 = E_{CB}(Z,A) - E_{CB}(Z-1, A-1)$$

- Энергия связи нейтрона в ядре

$$(n|Z,A) = [m_n + M(Z, A-1) - M(Z,A)]c^2 = E_{CB}(Z,A) - E_{CB}(Z, A-1)$$

# Энергия связи альфа-частицы в ядре

$$\begin{aligned} E_{\text{св}}(\alpha|Z,A) &= \\ &= [M(2,4) + M(Z-2,A-4) - M(Z,A)]c^2 = \\ &= E_{\text{св}}(Z,A) - E_{\text{св}}(Z-2,A-4) - E_{\text{св}}(\alpha) \end{aligned}$$

# Расчет энергии связи по табличным данным дефектов масс

- По табличным данным для дефектов масс, выраженных в кэВ, удобно определять энергию связи ядра

$$E_{\text{св}}(Z,A) = [Z\Delta_p + (A - Z)\Delta_n - \Delta(Z,A)] \text{ кэВ}$$

где

$$\Delta_p = 6777,985 \text{ кэВ}, \Delta_n = 8071,318 \text{ кэВ}$$

# Величины, связанные с энергией связи ядра

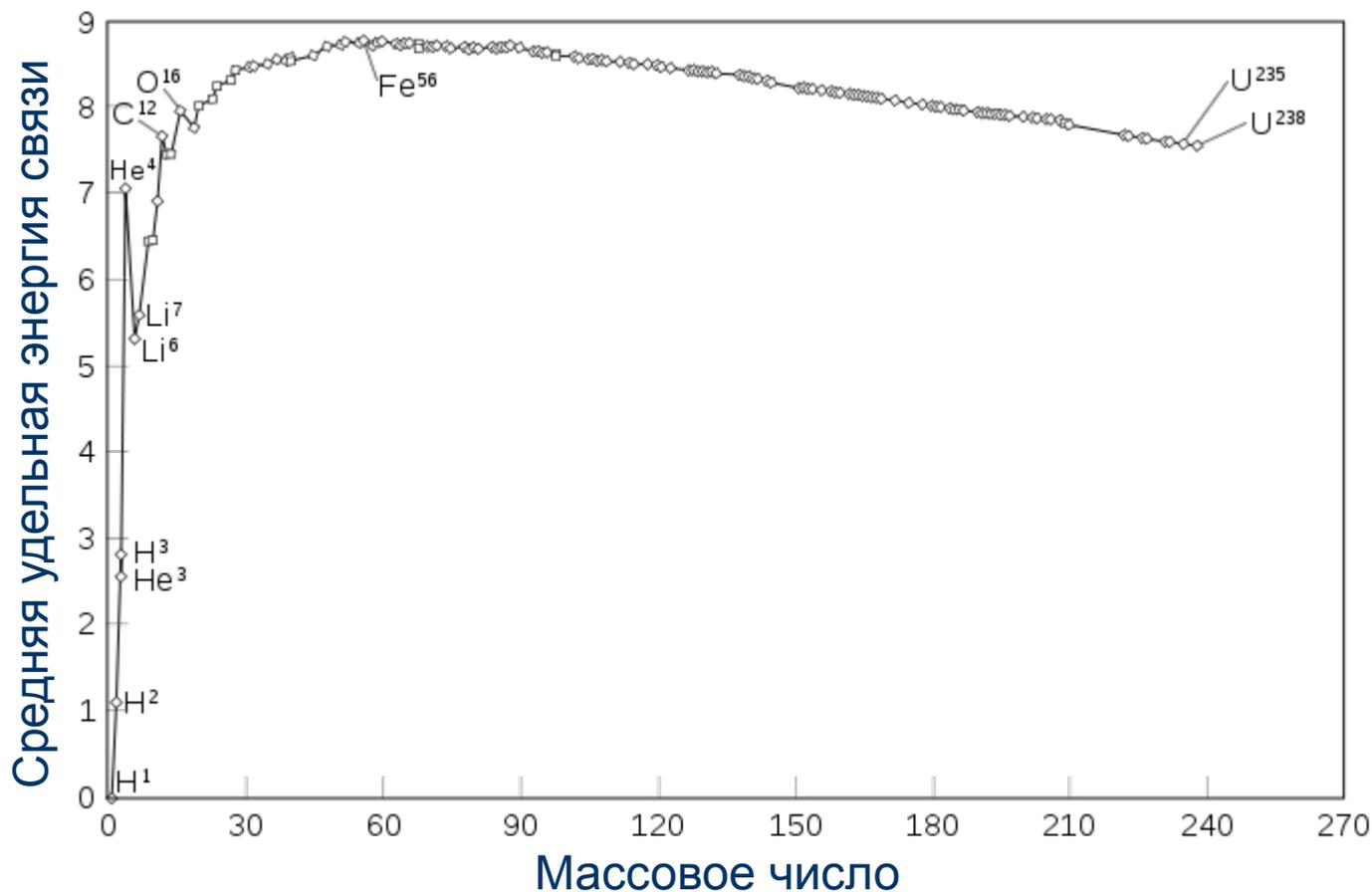
- Удельная энергия связи

$$\varepsilon_{\text{св}} = \frac{E_{\text{св}}}{A}$$

- Упаковочный коэффициент

$$f(Z, A) = \frac{\Delta(Z, A)}{A}$$

# Зависимость удельной энергии связи от массового числа



# Удельная энергия связи

Существенное отличие удельной энергии связи, приходящейся на магические ядра, от энергии связи соседних нуклидов связано с тем, что в магических ядрах протонные или (и) нейтронные оболочки полностью заполнены (ср. с заполнением электронных оболочек в атомах инертных газов).

Поэтому для этих ядер энергия отделения протона или (и) нейтрона существенно выше, чем у ядер, имеющих соседние значения массового числа. Магические ядра являются наиболее устойчивыми, и из-за этого наблюдается их большая распространенность во Вселенной.

# Определение дефекта массы

<http://www.astronet.ru/db/msg/1189382>

- **Дефект массы** - разность между массой связанной системы взаимодействующих тел и суммой их масс в свободном состоянии. Д. м. ( $\Delta M$ ) определяется энергией связи системы ( $\Delta \epsilon = \Delta M c^2$ ).
- В масс-спектропии дефектом масс называют разность между массой атома, измеренной в атомных единицах массы, и массовым числом.

## Определение дефекта массы

([http://ru.wikipedia.org/wiki/Дефект массы](http://ru.wikipedia.org/wiki/Дефект_массы))

- **Дефе́кт ма́ссы.** В связи с различием в российской и зарубежной номенклатуре понятие дефекта масс не является однозначно определенным.

## Определение дефекта массы

([http://ru.wikipedia.org/wiki/Дефект массы](http://ru.wikipedia.org/wiki/Дефект_массы))

- *Российская (Советская номенклатура):*
- **Дефе́кт ма́ссы** — разность между массой покоя атомного ядра данного изотопа, выраженной в атомных единицах массы, и массовым числом данного изотопа.
- В современной науке для обозначения этой разницы пользуются термином **избыток массы** (англ. *mass excess*). Как правило, *избыток массы* выражается в кэВ.

## Определение дефекта массы

([http://ru.wikipedia.org/wiki/Дефект массы](http://ru.wikipedia.org/wiki/Дефект_массы))

- *Зарубежная номенклатура:*
- **Дефе́кт ма́ссы** (англ. *mass defect*) — разность между суммой масс покоя нуклонов, составляющих ядро данного нуклида, и массой покоя атомного ядра этого нуклида, выраженная в атомных единицах массы.

$$\Delta m = [Z m_p + N m_n] - m_{nucl}$$

# Назовем так:

- Дефект массы

$$\Delta = \frac{M(Z, A)}{M(6,12)/12} - A$$

- Сегодня эта величина по-английски – mass excess (избыток?)
- «Дефицит массы»

$$\Delta m = \frac{E_{\text{св}}(Z, A)}{c^2}$$

# Связь между дефицитом и дефектом массы

Если величину  $\Delta m$  выразить в а.е.м., то

$$\Delta(Z,A) = [Z\Delta_p + (A - Z)\Delta_n - \Delta m] \text{ а.е.м}$$

(3)

где  $\Delta_p$  и  $\Delta_n$  – дефекты массы протона и нейтрона, соответственно,

вычисленные по формуле (3).

$$\Delta_p = 0,00727646677 \text{ а.е.м.},$$

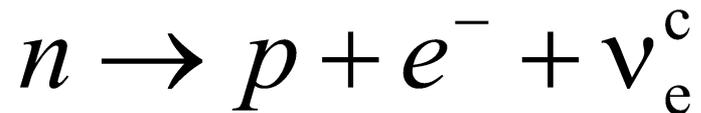
$$\Delta_n = 0,00866491597 \text{ а.е.м}$$

# Связь между дефицитом и дефектом массы (продолж.)

- Согласно соотношению Эйнштейна, энергия связи пропорциональна дефекту массы:
- $E = \Delta m c^2$
- где  $\Delta m$  — дефект массы и  $c$  — скорость света в вакууме.
- Дефект массы характеризует устойчивость ядра.
- Дефект массы, отнесённый к одному нуклону, называется упаковочным множителем.

# Смысл дефектов масс протона и нейтрона

- Нейтрон имеет большую массу, чем протон, поэтому ему энергетически выгодно распадаться. В свободном состоянии нейтрон распадается на протон, электрон и электронное антинейтрино:



Энергия реакции  $Q = + 0,782 \text{ МэВ}$

# Смысл дефектов масс протона и нейтрона (продолжение)

- В некоторых ядрах с избытком нейтронов нейтроны также нестабильны, претерпевая превращение. Благодаря этому имеет место явление  **$\beta^-$ -радиоактивности**.
- Из определения энергии связи ядра эта возможность не видна. Поэтому дефект массы имеет более глубокий физический смысл, который связан не только с взаимодействием нуклонов в ядре, но несет в себе информацию о различных особенностях взаимодействия составляющих их кварков при избытке нуклонов того или иного вида.

## Смысл дефектов масс протона и нейтрона (продолжение)

- В частности, он может быть и отрицателен для ядер с избытком протонов. Эти ядра, как правило, оказываются,  $\beta^+$ -радиоактивными. С определенной долей условности можно считать, что в них происходит  $\beta^+$ -распад протона



Энергия реакции отрицательна и составляет  $Q = -1,804$  МэВ.

## Смысл дефектов масс протона и нейтрона (окончание)

- Чтобы покрыть этот дефицит энергии, протон должен был бы получить дополнительную энергию в результате взаимодействия с другими частицами ядра. По-видимому, только в ядрах протон может претерпевать позитронный распад.
- Существует гипотеза, принадлежащая А. Д. Сахарову, о том, что среднее время жизни протона в свободном состоянии составляет порядка  $10^{30}$  лет.

# Масс-спектрометр (1)

- Для определения массы атома применяются *масс-спектрометры*. Принцип действия масс-спектрометра заключается в сравнении характеристик движения частиц с разными массами, но одинаковыми электрическими зарядами при прохождении их через электрическое и магнитное поля. Частицы с разными массами движутся по разным траекториям, сравнение которых и позволяет оценить различие в массах. Атомы являются нейтральными системами, поэтому, для того чтобы воздействовать на движение атомов электрическими и магнитными полями их предварительно ионизируют.
- Масс-спектрометрия надежна при определении масс атомов, но она не годится для определения массы нейтральных частиц. Масса нейтральных частиц (например, нейтрона) может быть определена по энергетическому балансу одной из ядерных реакций с участием данной частицы.

# Масс-спектрометр (2)

- Прибор для разделения ионизованных молекул и атомов по их массам, основанный на воздействии магнитного и электрических полей на пучки ионов, летящих в вакууме.
- Состоит из ионного источника (1), масс-анализатора, где происходит разделение ионов по массам, точнее по величине отношения массы иона  $m$  к его заряду  $e$  (2), приемника ионов, где ионный ток преобразуется в электрический сигнал, усиливается и регистрируется (3).
- При любом способе регистрации спектр масс ионов представляет собой зависимость ионного тока  $I$  от массы  $m$ .

# Масс-спектрометр (4)

- **Прибор представляет собой откачанный до высокой степени разрежения сосуд, помещенный в магнитное поле, линии которого перпендикулярны к плоскости чертежа. Заряженные частицы испускаются источником 1.**
- **Простейшим источником является электрический разряд в газе. Разряд сопровождается интенсивной ионизацией газа. При положительной разности потенциалов между диафрагмой 2 и щелью источника из разряда будут «отсасываться» электроны и отрицательные ионы, при отрицательной разности потенциалов – положительные ионы.**
- **Заполняя источник различными газами или парами, можно получить ионы различных элементов.**

# Схема масс-спектрометра



# Принцип работы масс-спектрометра

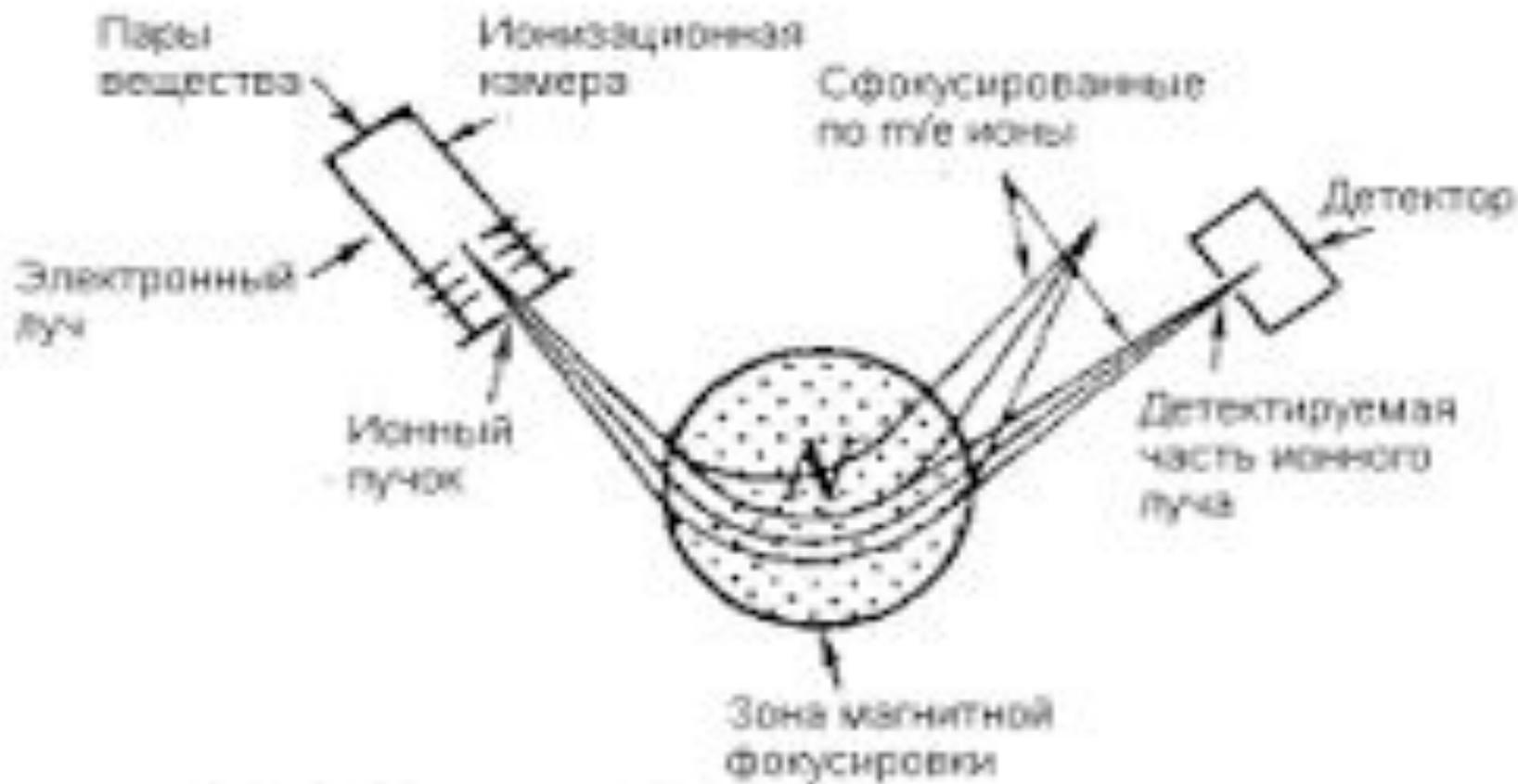


Рис. 1. Схема устройства и работы масс-спектрометра

# Масс-спектрометр (5)

- Для нахождения скорости используется то обстоятельство, что частица влетает в магнитное поле с кинетической энергией, полученной за счет работы электрического поля, равной  $qU$ :

$$E = mv^2/2 = q U$$

В камере на движущиеся ионы действует перпендикулярное (плоскости орбиты) однородное магнитное поле  $B$ . Под его действием ион начинает двигаться по окружности, радиус которой  $r$  может быть найден из условия равенства лоренцевой и центробежной сил:

$$q / m \cdot vB = v^2 / r$$

# Масс-спектрометр (6)

$$r = (mv) / (qB),$$
$$m = (r^2 B^2 q) / (2U),$$

- Подставляя в эту формулу известные значения  $q$ ,  $B$ ,  $U$  и полученный измерением радиус  $r$ , можем вычислить массу частиц, попавших в точку  $B$  пластинки.
- Если в пучке, испускаемом источником, содержатся частицы с различными отношениями заряда к массе, на фотопластинке получится несколько параллельных полосок. Самая близкая к щели полоска вызвана частицами, которые движутся по окружности наименьшего радиуса. Эти частицы обладают наибольшим отношением заряда к массе. Если заряды всех частиц в пучке одинаковы, то ближайшая к щели полоска соответствует частицам наименьшей массы.

# Масс-спектрометр (7)

- Масс-спектрометры постоянно совершенствуются.
- В современных масс-спектрометрах используется метод двойной фокусировки: по скоростям и направлениям. Благодаря этому разрешающая способность таких приборов очень высока  $\sim 1/10^6$ . Т.е., масса иона может быть измерена по отношению к массе другого иона с *точностью до  $10^{-6}$* .
- Развитие техники масс-спектрометрии позволило подтвердить высказанное Содди в 1910 г. предположение о том, что дробные атомные веса объясняются существованием изотопов. Астон и другие с помощью масс-спектрометров обследовали все элементы периодической системы и почти у всех нашли несколько изотопов.

# Электрический квадрупольный момент ядра (1)

- Электрический квадрупольный момент ядра – величина, характеризующая отклонение распределения электрического заряда в атомном ядре от сферически симметричного.
- Внутренний электрический квадрупольный момент ядра  $Q_0$  измеряется в системе координат ядра.
- Величина внешнего электрического квадрупольного момента ядер  $Q$  измеряется в лабораторной системе координат.
- Для аксиально-симметричного относительно оси  $z$  ядра электрическим квадрупольным моментом ядра называется величина, определяемая соотношением

$$Q_0 = \frac{1}{e} \int (3z^2 - r^2) \rho(\vec{r}) dv$$

- где  $\rho(r)$  - плотность заряда в точке  $r$  внутри ядра

# Электрический квадрупольный момент ядра (2)

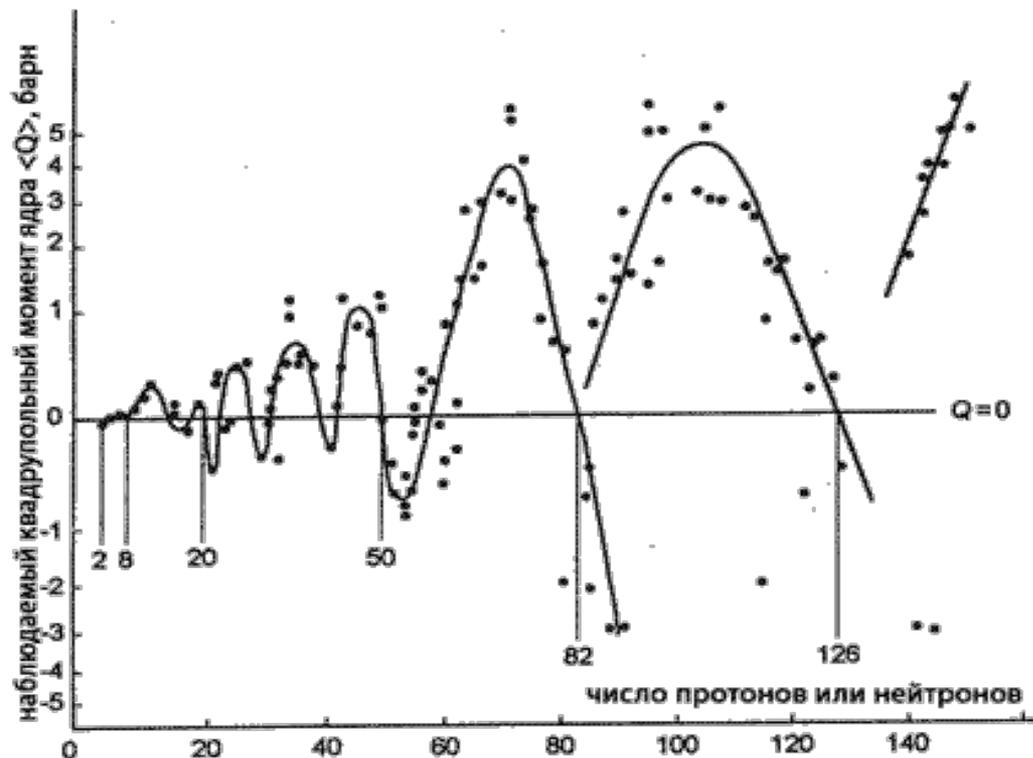
- $Q_0$  характеризует отличие распределения заряда ядра от сферически симметричного.
- Для сферически симметричного ядра  $Q_0 = 0$ . При  $Q_0 < 0$ , ядро является сплюснутым вдоль оси  $z$  эллипсоидом, при  $Q_0 > 0$  ядро - вытянутый вдоль оси  $z$  эллипсоид.
- Внешний электрический квадрупольный момент  $Q$  связан с внутренним электрическим квадрупольным моментом  $Q_0$  соотношением

$$Q = \frac{J(2J - 1)}{(J + 1)(2J + 3)} Q_0$$

- где  $J$  – спин ядра.

# Электрический квадрупольный момент (3)

- измеряется в барнах ( $1 \text{ б} = 10^{-24} \text{ см}^2$ ).
- Наблюдаемые
- квадрупольные
- моменты ядер  $\langle Q \rangle$ .



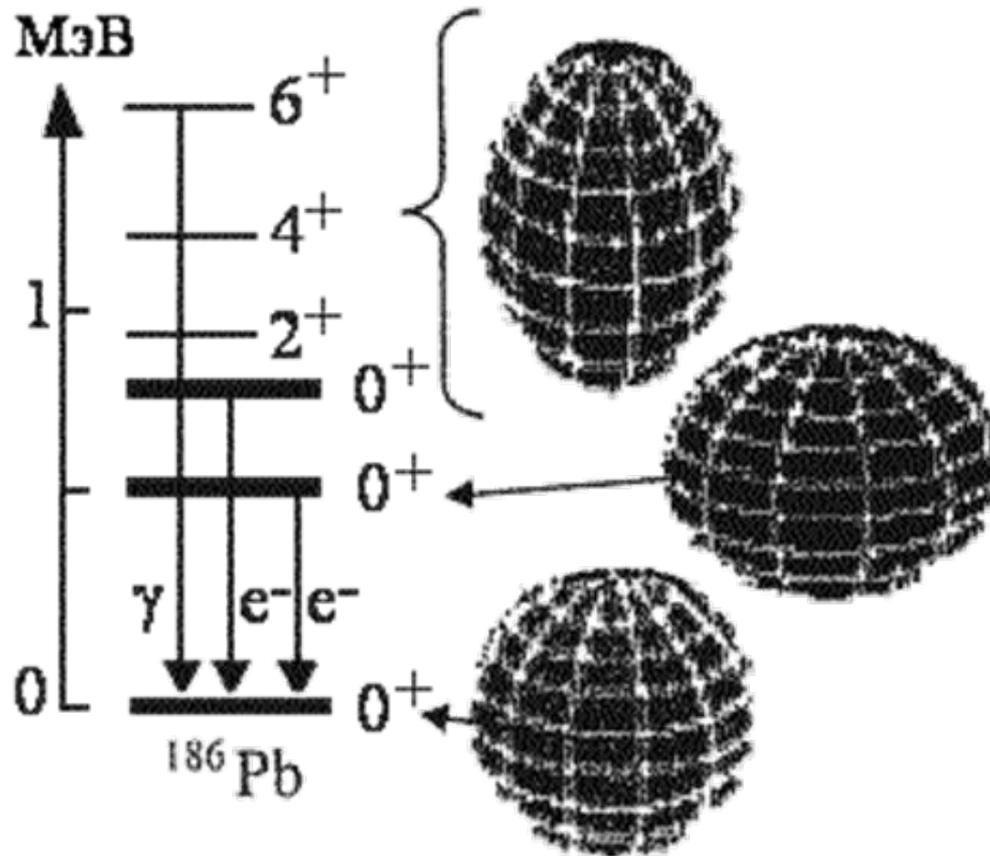
# Наблюдаются следующие закономерности:

- Равенство нулю квадрупольных моментов магических ядер ( $Z, N = 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126$ ). Таким образом, эти ядра сферические или близки к ним.
- Квадрупольные моменты растут при отходе от магических ядер, достигая наибольших значений в середине между магическими числами.
- Большие величины квадрупольных моментов характерны для вытянутых ядер ( $Q > 0$ ). Число вытянутых ядер больше, чем сплюснутых.

# Электрический квадрупольный момент ядра (4)

- Представленные на рис. 1 квадрупольные моменты относятся к ядрам, находящимся в основных состояниях.
- В возбужденных состояниях ядра его электрический квадрупольный и магнитный моменты могут иметь другие значения.
- На рис. 2 показана форма ядра  $^{186}\text{Pb}$  в различных состояниях

# Форма ядра $^{186}\text{Pb}$ в различных состояниях



# Собственный квадрупольный момент однородно заряженного эллипсоида

- описывается соотношением

$$Q = \frac{2}{5} Z (b^2 - a^2),$$

- где  $b$  и  $a$  – соответственно большая и малая полуоси эллипсоида.
- Если для оценки степени отклонения формы ядра от сферической ввести **параметр деформации**  $\beta$  и средний радиус ядра  $\bar{R}$ , определяемые соотношениями

$$\beta = \frac{b - a}{\frac{1}{2}(b + a)} = \frac{1}{2} \frac{b^2 - a^2}{\bar{R}^2}, \quad \bar{R} = \frac{1}{2}(b + a),$$

# ТО МОЖНО ПОЛУЧИТЬ ВЕЛИЧИНУ КВАДРУПОЛЬНОГО МОМЕНТА ЯДРА

$$Q = \frac{2}{5} Z(b^2 - a^2) = \frac{4}{5} Z\bar{R}^2\beta.$$

Обычно для ядер  $\beta < 0.6$ .

# Магнитный дипольный момент ядра

- Атомное ядро, являясь системой движущихся зарядов (токов), обладает магнитным моментом, который имеет орбитальную и спиновую составляющие:

$$\vec{\mu}_x = \frac{\mu_N}{\hbar} \sum_{\alpha=1}^A (g_L^{\alpha} \vec{L}_{\alpha} + g_s^{\alpha} \vec{S}_{\alpha})$$

- где спиновые и орбитальные гиромангнитные факторы ( $g$ -факторы) нуклонов имеют следующие значения:

- 

- $g_S^p = 5.586, \quad g_S^n = -3.826, \quad g_L^p = 1, \quad g_L^n = 0,$

# Гиромагнитный фактор

- $g_{\text{я}}$  для ядра определяется соотношением:

$$\vec{\mu}_{\text{я}} = g_{\text{я}} \vec{J}$$

- где  $J$  – спин ядра.



# Формула Вайцзекера

$$E_{\text{св}} \approx C_1 A - C_2 A^{2/3} - C_3 \frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}} - C_4 \frac{(A-2Z)^2}{A} + C_5 \frac{\delta}{A^{3/4}}$$

$$\delta = \begin{cases} +1, & \text{для чётно-чётных ядер;} \\ 0, & \text{для чётно-нечётных ядер;} \\ -1, & \text{для нечётно-нечётных ядер.} \end{cases}$$

$$C_1 = 15,75 \text{ МэВ}, C_2 = 17,8 \text{ МэВ}, \\ C_3 = 0,71 \text{ МэВ}, C_4 = 23,7 \text{ МэВ}, C_5 = 33,57 \text{ МэВ}$$

(Н.А. Bethe, С.Ф. von Weizsäcker)

# *Капельная модель строения ядра*

- Первой моделью ядра была **капельная** модель описывающая взаимодействие нуклонов в ядре, по аналогии с взаимодействием молекул в капле жидкости (Н. Бор, Дж. Уиллер, Я. Френкель).
- Эту модель предложил в 1936 Н. Бор, чтобы объяснить большие времена жизни возбужденных ядер тяжёлых элементов, образующихся при захвате медленных нейтронов. Времена жизни оказались в миллион раз больше времени, необходимого нейтрону, чтобы пересечь ядро ( $10^{-22}$  с). Это свидетельствует о том, что возбужденное ядро представляет собой некую систему («составное ядро»), время существования которой намного больше времени ее образования.
- Бор высказал предположение, что ядерная реакция протекает в две стадии.

# *Капельная модель строения ядра (2)*

- **Первая стадия:**
  - падающая частица входит в ядро-мишень, образуя «составное ядро», где в многочисленных столкновениях теряет свою первоначальную энергию, распределяя ее среди других нуклонов ядра. В результате ни у одной из частиц не оказывается энергии, необходимой для вылета из ядра.
- **Вторая стадия:**
  - распад составного ядра, происходит спустя некоторое время, когда энергия случайно сконцентрируется на одной из частиц или потеряется в виде гамма-излучения.
- **Считается, что вторая стадия не зависит от деталей механизма образования составного ядра. Вид распада определяется лишь игрой возможных вариантов.**

## *Капельная модель строения ядра(3)*

- Бор предложил рассмотреть поведение капли в качестве аналога. Между молекулами такой капли действуют силы, связывающие их друг с другом и препятствующие испарению, пока не будет подведено тепло извне. Появление еще одной молекулы, обладающей дополнительной кинетической энергией, приводит в результате ее статистического перераспределения к увеличению температуры капли как целого. Спустя некоторое время случайная концентрация энергии на какой-либо молекуле может привести к ее испарению.
- Теория Бора была детально разработана и позволила построить последовательную картину разнообразных ядерных реакций, в том числе реакций под действием нейтронов и заряженных частиц промежуточных энергий (вплоть до 100 МэВ).

# Капельная модель строения ядра(4)

- Полезными оказались введенные по аналогии понятия ядерной температуры, удельной теплоемкости и испарения частиц.
- Например, угловое распределение «испарившихся» частиц оказалось не зависящим от направления падающей частицы, т.е. изотропным, поскольку вся информация о первоначальном направлении теряется на стадии существования составного ядра.
- Капельная модель наилучшим образом описывает поведение возбужденных ядер. В этой модели атомное ядро рассматривается как сферическая капля несжимаемой заряженной жидкости радиуса  $R=r_0 A^{1/3}$ .
- Основанием для аналогии с жидкостью послужило то, что плотность ядерного вещества у всех ядер вблизи линии стабильности приблизительно одинакова, что говорит о его несжимаемости.

## Капельная модель строения ядра(5)

- Кроме того, с жидкостью ядерное вещество сближает и свойство насыщения ядерных сил (энергия связи ядер приблизительно пропорциональна массовому числу). При расчёте энергии связи ядра учитываются объемная, поверхностная и кулоновская энергии.
- Дополнительно учитываются выходящие за рамки чисто капельных представлений энергия симметрии и энергия спаривания.
- В рамках этой модели Вайцзеккер получил полуэмпирическую формулу для энергии связи ядра:

$$E_{\text{св}}(A, z) = a_1 A - a_2 A^{2/3} - a_3 Z^2/A^{1/3} - a_4 (A/2 - Z)^2/A + a_5 A^{-3/4}$$

## *Капельная модель строения ядра(5)*

- Первое слагаемое в энергии связи ядра, подобного жидкой капле, пропорционально массовому числу  $A$  и описывает примерное постоянство удельной энергии связи ядер.
- Второе слагаемое – поверхностная энергия ядра уменьшает полную энергию связи, так как нуклоны, находящиеся на поверхности имеют меньше связей, чем частицы внутри ядра. Это аналог поверхностного натяжения.
- Третье слагаемое в энергии связи обусловлено кулоновским взаимодействием протонов. В капельной модели предполагается, что электрический заряд протонов равномерно распределен внутри сферы радиуса  $R=r_0A^{1/3}$ .
- Четвертое слагаемое - энергия симметрии ядра отражает тенденцию к стабильности ядер с  $N=Z$ .
- Пятое слагаемое – энергия спаривания учитывает повышенную стабильность основных состояний ядер с четным числом протонов и/или нейтронов.

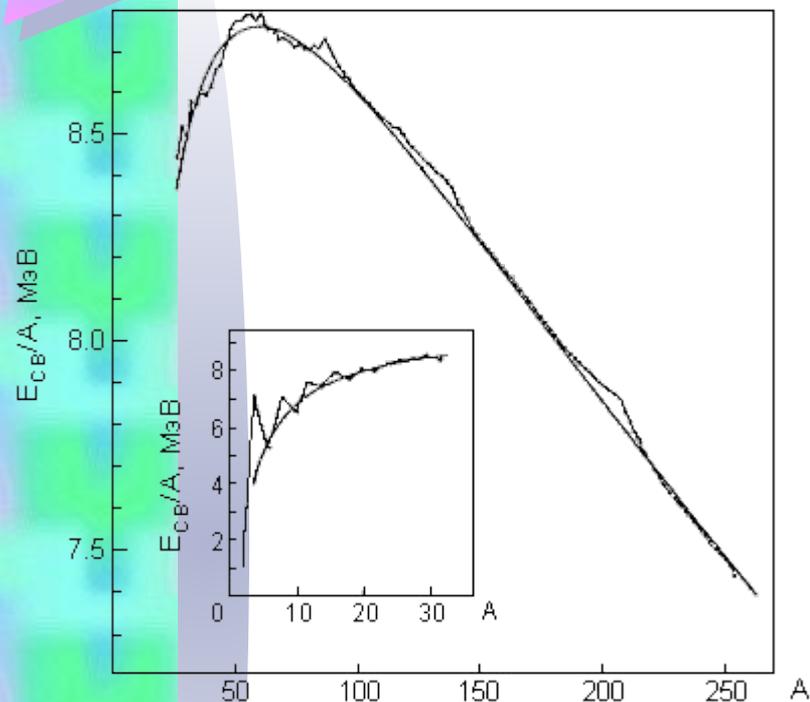
# Капельная модель строения ядра(6)

- Входящие в формулу коэффициенты  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$ ,  $a_4$  и  $a_5$  оцениваются из экспериментальных данных по энергиям связи ядер.
- $a_1 = 15.75$  МэВ;  $a_2 = 17.8$  МэВ;
- $a_3 = 0.71$  МэВ;  $a_4 = 94.8$  МэВ;
- $+34$  МэВ для четно-четных ядер
- $a_5 = 0$  МэВ для нечетных ядер
- $-34$  МэВ для нечетно-нечетных ядер
- В этой модели, основываясь на ядерных реакциях, связанных с выбрасыванием внутриядерных частиц, ядро сравнивают с каплей жидкости, состоящей из ассоциированных молекул, на которую оно похоже, по ряду свойств, а процесс распада возбужденного ядра - с «испарением» внутриядерных частиц из возбужденного ядра.

## *Капельная модель строения ядра(7)*

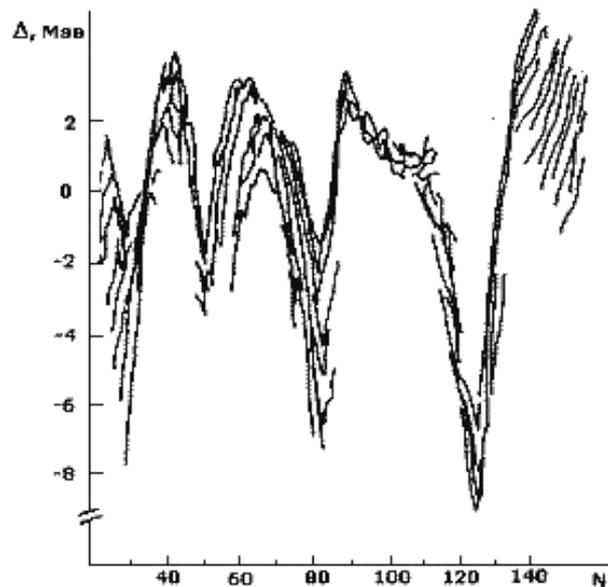
- Капельная модель оказалась особенно ценной при объяснении явления деления ядер, когда для развала ядра урана на две примерно равные части с большим выделением энергии достаточно поглощения одного медленного нейтрона. Электростатическое отталкивание протонов вызывает некоторую нестабильность ядра, которая обычно перекрывается за счет ядерных сил, обеспечивающих энергию связи.
- Но при повышении ядерной температуры сферической «капли» в ней могут возникнуть колебания, в результате которых капля деформируется в эллипсоид. Если деформация ядра будет продолжаться, то электростатическое отталкивание двух его положительно заряженных половин может возобладать, и тогда произойдет его деление.

# Капельная модель строения ядра(8)



Разность масс между экспериментальными значениями и предсказаниями формулы Вейцеккера для ядер с различным числом нейтронов

Зависимость удельной энергии связи от массового числа  $A$ . Экспериментальные данные показаны ломаной линией. Плавная кривая - результат вычислений по полуэмпирической формуле Вейцеккера



## *Капельная модель строения ядра(9)*

Отмеченная периодичность подобна периодичности свойств электронных оболочек атома и определяется магическими числами нейтронов и протонов:

<b>n</b>	<b>2, 8, 20, 28, 50, 82, 126, 184</b>
<b>p</b>	<b>2, 8, 20, 28, 50, 82, 114</b>

## *Оболочечная модель ядра (1)*

- Изучение ядерных реакций убедительно продемонстрировало существование энергетических уровней ядер. Эти уровни представляют собой состояния ядра с определенной энергией, которым приписаны определенные квантовые числа, как и энергетическим уровням атома.
- Оболочечная модель, предложенная Гепперт-Майер и Йенсоном в 1950 г., является более реалистичной. Считается, что каждый нуклон движется в усредненном поле остальных нуклонов ядра. В соответствии с этим имеются дискретные энергетические уровни, заполненные нуклонами с учетом принципа Паули.

# *Оболочечная модель ядра (2)*

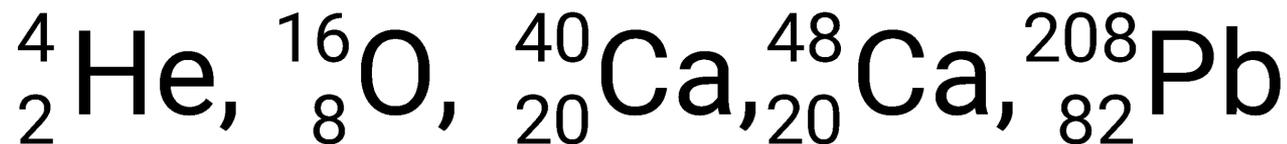
- Эти уровни группируются в оболочки, в каждой из которых может находиться определенное число нуклонов. Полностью заполненные оболочки образуют особо устойчивые структуры.
- Таковыми являются ядра, имеющие, в соответствии с опытом, число протонов, либо нейтронов (либо оба эти числа) 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126. Эти числа и соответствующие им ядра называют магическими.
- Кроме предсказания магических чисел, эта модель позволила объяснить спины основных и возбужденных состояний ядер, а также их магнитные моменты.

# Оболочечная модель ядра (3)

- В модели оболочек предполагается, что нуклоны движутся независимо друг от друга в сферически-симметричной потенциальной яме.
- Собственные состояния нуклона в такой яме находят, решая соответствующее уравнение Шредингера. Эти состояния характеризуются квантовыми числами, которые определяют физические величины, сохраняющиеся при движении в сферически-симметричном поле.
- В оболочечной модели спин ядра складывается из суммы спинов и орбитальных моментов отдельных нуклонов. Принцип Паули и специфика ядерного взаимодействия приводят к тому, что все четно-четные ядра имеют спин равный 0. Четность состояния определяется произведением внутренних четностей составляющих его частиц на четности волновых функций, описывающих их движение относительно общего центра инерции.

# Магические ядра

- Формула Вайцзеккера неприменима к очень легким ядрам, к которым относятся водород, тяжелый водород, гелий и некоторые другие. Она также дает довольно существенные отклонения значения для удельной энергии связи (до 1%) для ядер с  $A = 40-50, 90, 130, 210$ . Эти отклонения приходится на зоны т.н. *магических ядер*.
- Магическими называются ядра, у которых числа нейтронов или протонов равны одному из магических чисел 2, 8, 20, 28, 50, 82. Для нейтронов магическим еще является число 126 (для известных на сегодняшний день ядер такие значения порядкового номера еще не достигнуты). Ядра, у которых является магическим и число протонов, и число нейтронов, называются *дважды магическими*. Таких ядер пока известно всего пять:



# Магические ядра (оконч.)

Существенное отличие удельной энергии связи, приходящейся на магические ядра, от энергии связи соседних нуклидов связано с тем, что в магических ядрах протонные или (и) нейтронные оболочки полностью заполнены (ср. с заполнением электронных оболочек в атомах инертных газов).

Поэтому для этих ядер энергия отделения протона или (и) нейтрона существенно выше, чем у ядер, имеющих соседние значения массового числа. Магические ядра являются наиболее устойчивыми, и из-за этого наблюдается их большая распространенность во Вселенной.