

Лекция №4

СТАТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АТОМНЫХ ЯДЕР

Масса ядра и Энергия связи

Статические свойства атомных ядер

Основные статические свойства ядер

Масса частиц в связанном состоянии:

$M_{\text{я}}$ Массу ядра образуют массы нуклонов. Однако суммарная масса нуклонов больше массы ядра.

Этот факт объясняется тем что нуклоны находятся в связанном состоянии. Возникновение связанного состояния возможно только под действием сил притяжения. При взаимодействии в поле сил частиц возможно рождение третьей частицы. Если такая частица образуется и испускается во внешнее пространство, то на это затрачивается часть энергии взаимодействующих частиц и они уже не могут покинуть область взаимодействия. При этом и образуется связанное состояние, устойчивость которого обеспечивается минимумом энергии – энергией связи.

Потеря энергии ΔE есть потеря массы Δm .

Статические свойства атомных ядер

Основные статические свойства ядер

Дефект массы:

Массы нуклидов измерены с большой точностью методами масс-спектрометрии и ядерных реакций.

Массы частиц в углеродной шкале масс (а.е.м.):

Нейтрон	1,008665
Протон	1,007276
Электрон	0,00054858
Нуклид H^1	1,007825
Нуклид C^{12}	12,000000

$$6m_n + 6M(H^1) = 6 \cdot 1,008665 + 6 \cdot 1,007825 = 12,098940$$

Разница суммы масс частиц находящихся в свободном и связанном состояниях называется **дефектом массы - Δm** .

Статические свойства атомных ядер

Основные статические свойства ядер

Энергия связи:

$$\Delta m = [Zm_p + (A - Z)m_n - M_{\text{я}}(A, Z)]$$

$$\Delta m = [Zm(H^1) + (A - Z)m_n - M_{\text{ам}}(A, Z)]$$

Величина равная разности $M_{\text{ам}}(A, Z) - A$

называется **избытком массы** - $\Delta = M_{\text{ам}}(A, Z) - A$

Если использовать избыток массы, то можно записать

$$\Delta m = [Z\Delta H^1 + (A - Z)\Delta_n - \Delta_{\text{ам}}(A, Z)]$$

Энергия эквивалентная **дефекту массы**, называется **энергией связи**.

$$\Delta E = [Z\Delta H^1 + (A - Z)\Delta_n - \Delta_{\text{ам}}(A, Z)] \cdot c^2.$$

Статические свойства атомных ядер

Основные статические свойства ядер

Энергия связи:

С одной стороны:

Энергия связи представляет собой величину энергии, которую нужно затратить, чтобы разделить данное ядро на все составляющие его нуклоны.

С другой:

Энергия связи есть та энергия которая испускается во внешнее пространство при образовании ядра из нуклонов.

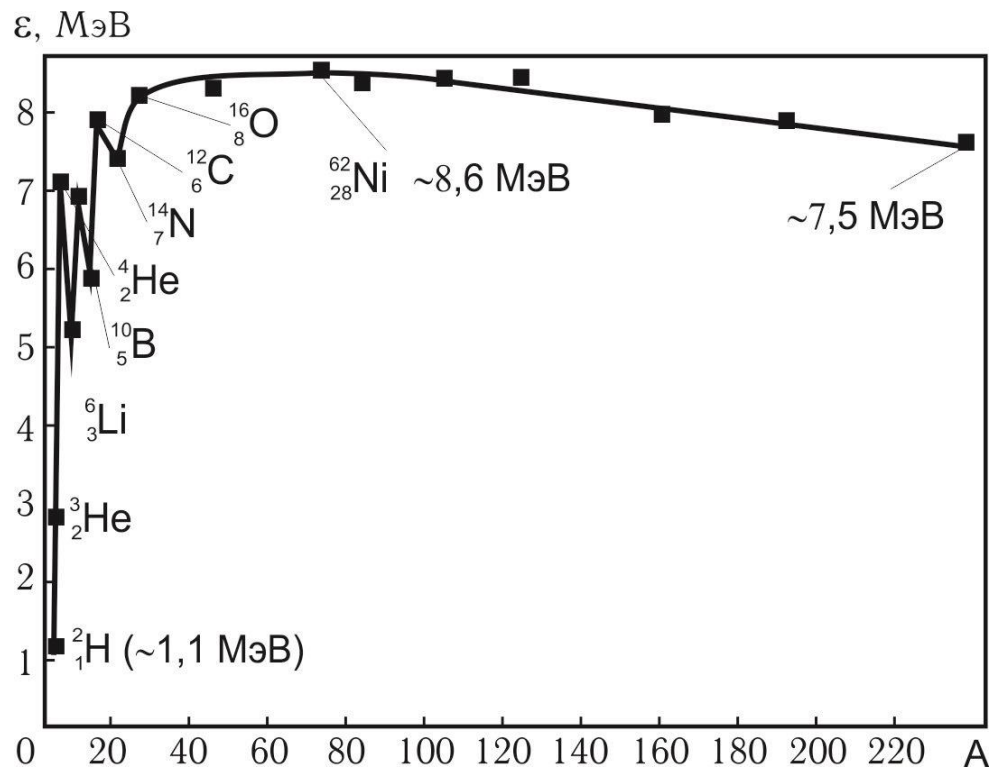
Большая энергия связи ядер обеспечивает их особую прочность и обязана мощным силам притяжения действующим между нуклонами.

Статические свойства атомных ядер

Основные статические свойства ядер

Особенности энергии связи:

В настоящее время определены дефекты масс и энергии связи всех известных нуклидов. Одной из важнейших особенностей энергии связи является ее пропорциональность количеству нуклонов. Т.е. примерное постоянство энергии связи приходящейся на один нуклон. Исключение составляют самые легкие ядра, для которых энергия связи сильно зависит от их протон-нейтронного состава.



Зависимость удельной энергии связи от массового числа

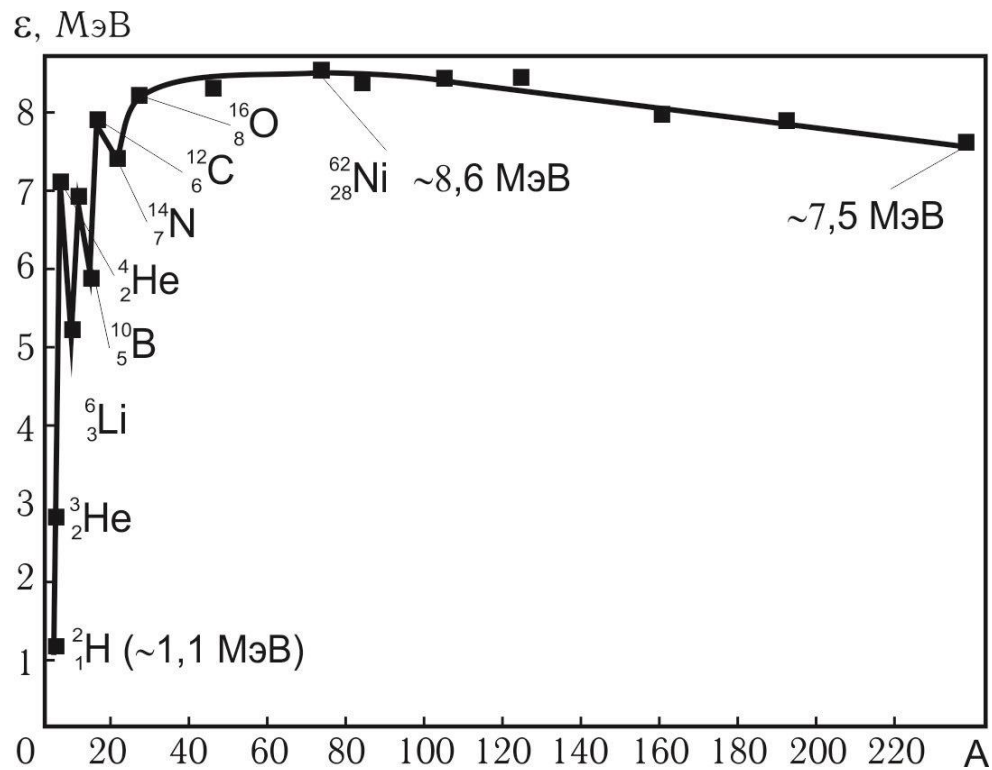
Статические свойства атомных ядер

Основные статические свойства ядер

Особенности энергии связи:

Такой характер поведения энергии связи указывает на наличие у ядерных сил насыщения, т.е. на способность одного нуклона в ядре взаимодействовать лишь с ограниченным числом соседних нуклонов. Если бы ядерные силы не обладали насыщением то энергия взаимодействия нуклонов была бы пропорциональна

$A(A-1)$, т.е. A^2 , а средняя энергия связи возрастала бы с ростом A



Зависимость удельной энергии связи от массового числа

Статические свойства атомных ядер

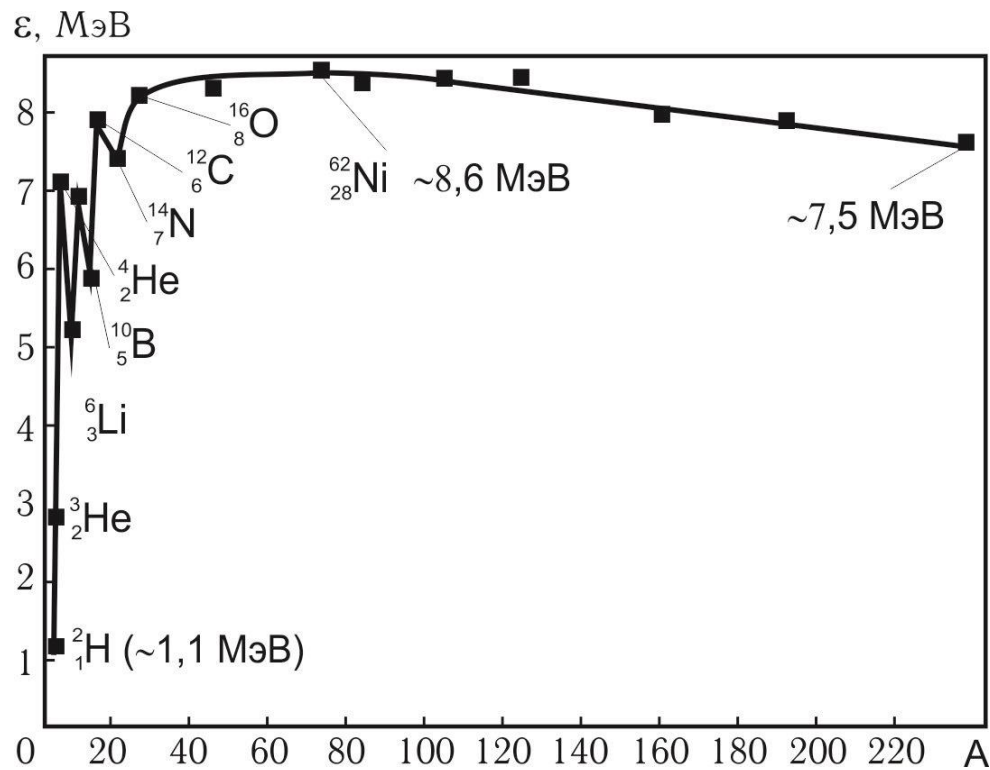
Основные статические свойства ядер

Особенности энергии связи:

Энергия связи одного присоединяемого к ядру или отделяемого от него нуклона может изменяться в больших пределах. Она зависит прежде всего от четности имеющих в ядре протонов или нейтронов.

Это **эффект парности**: особенно прочно в ядре связаны пары протонов и пары нейтронов.

Разница в энергиях связи парного и непарного нуклона составляет 1-3 МэВ.



Зависимость удельной энергии связи от массового числа

Статические свойства атомных ядер

Основные статические свойства ядер

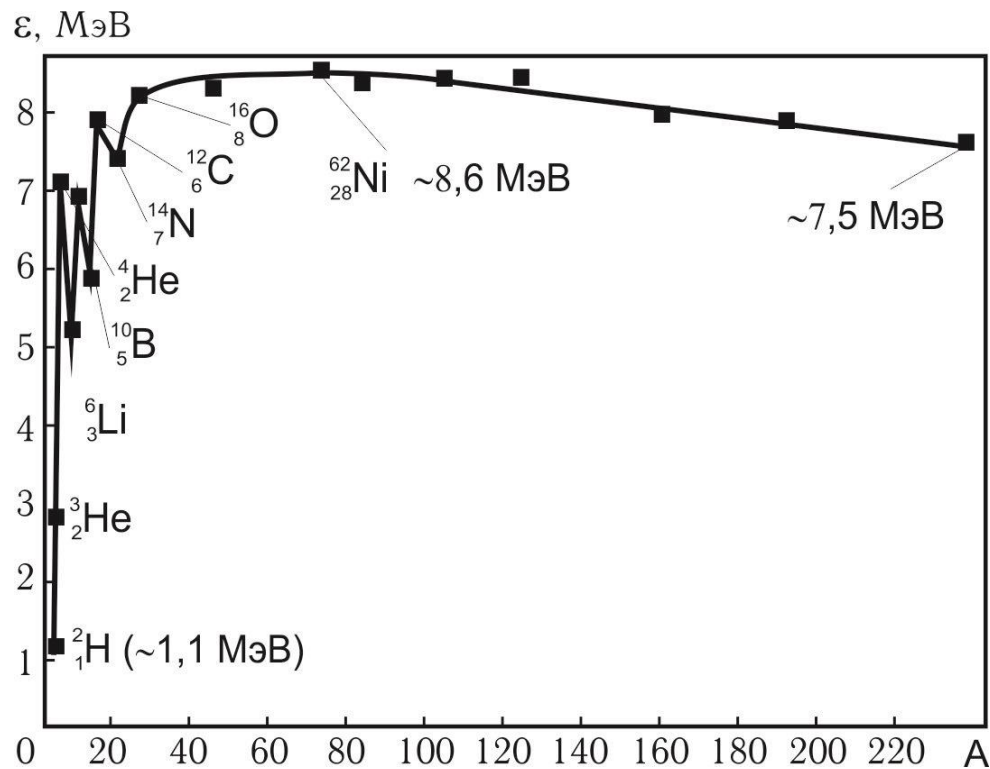
Особенности энергии связи:

Эффект парности существенно влияет на энергию связи ядра в целом.

Наибольшие энергии связи характерны для четно-четных ядер. Энергии связи несколько ниже если состав ядра четно-нечетный или нечетно-четный.

Еще меньшая энергия связи у нечетно-нечетных ядер.

Характер максимумов и минимумов на графике показывает именно это.



Зависимость удельной энергии связи от массового числа

Статические свойства атомных ядер

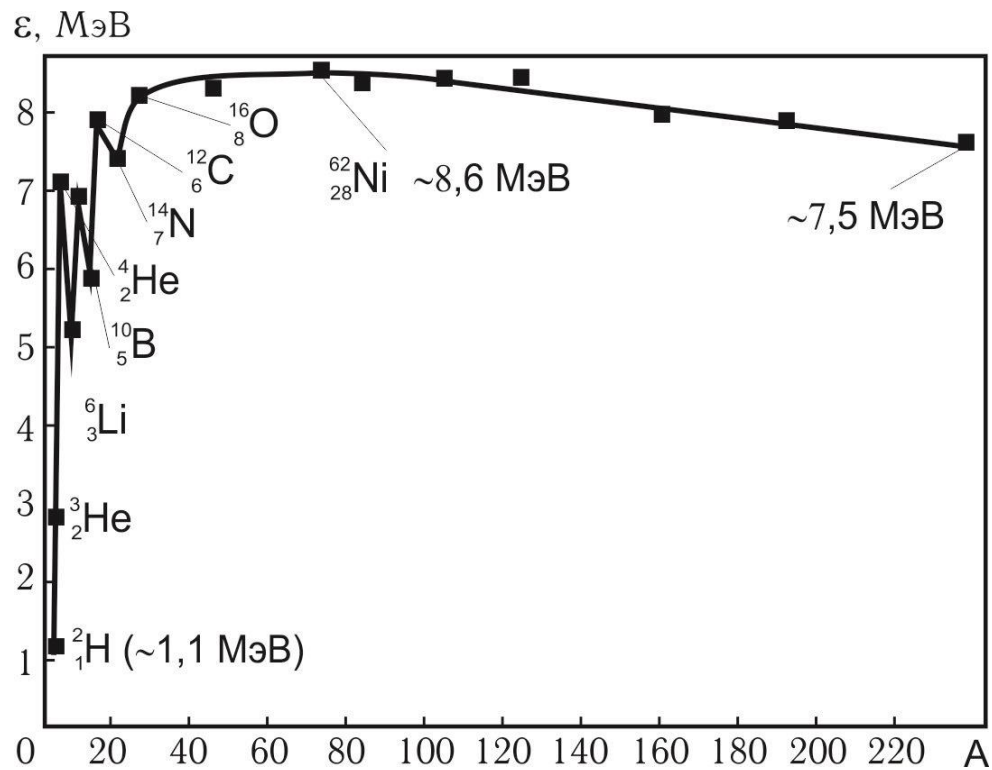
Основные статические свойства ядер

Особенности энергии связи:

Следствием повышенной устойчивости **ч-ч** ядер является их преимущественная распространенность в природе. Среди стабильных ядер почти две третьих имеют **ч-ч** состав.

ч-ч	161
ч-н	54
н-ч	50
н-н	4

Стабильных **н-н** нуклида всего 4:
H², Li⁶, B¹⁰, N¹⁴



Зависимость удельной энергии связи от массового числа

Статические свойства атомных ядер

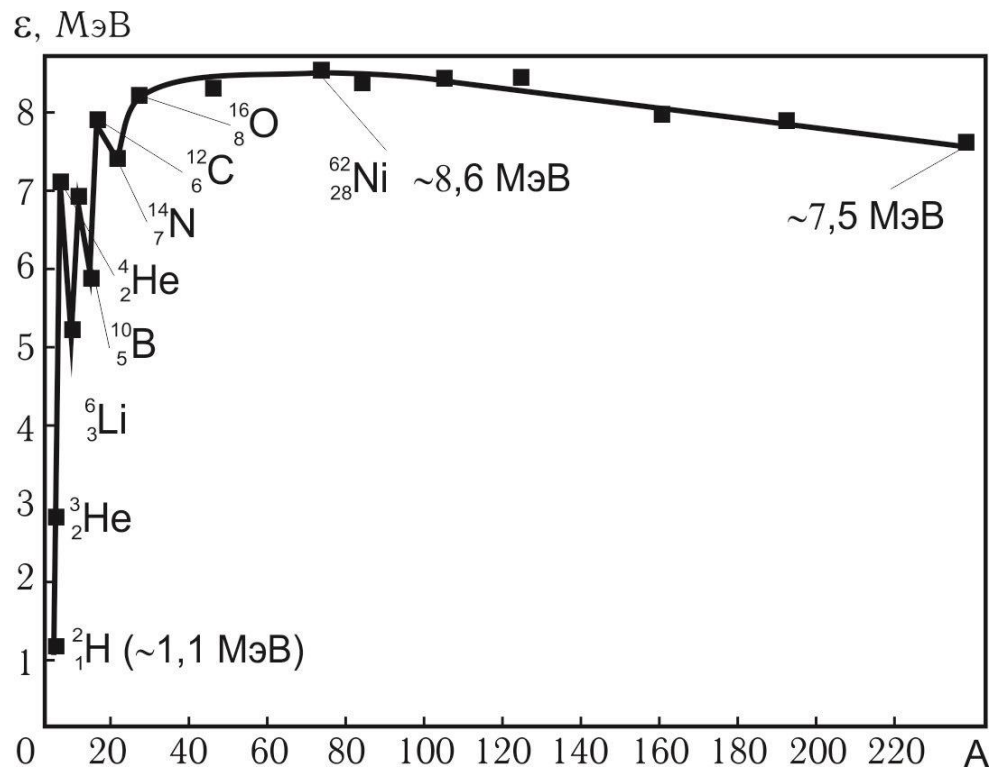
Основные статические свойства ядер

Особенности энергии связи:

Если энергия связи присоединяемого к ядру нейтрона или протона отрицательна, то поглощение таким ядром нуклона **невозможно**.

Вместе с тем третий протон или нейтрон приобретает положительную энергию связи, если нуклонов другого сорта также три.

Таким образом протон-нейтронный состав ядер не является **произвольным**.



Зависимость удельной энергии связи от массового числа

Статические свойства атомных ядер

Основные статические свойства ядер

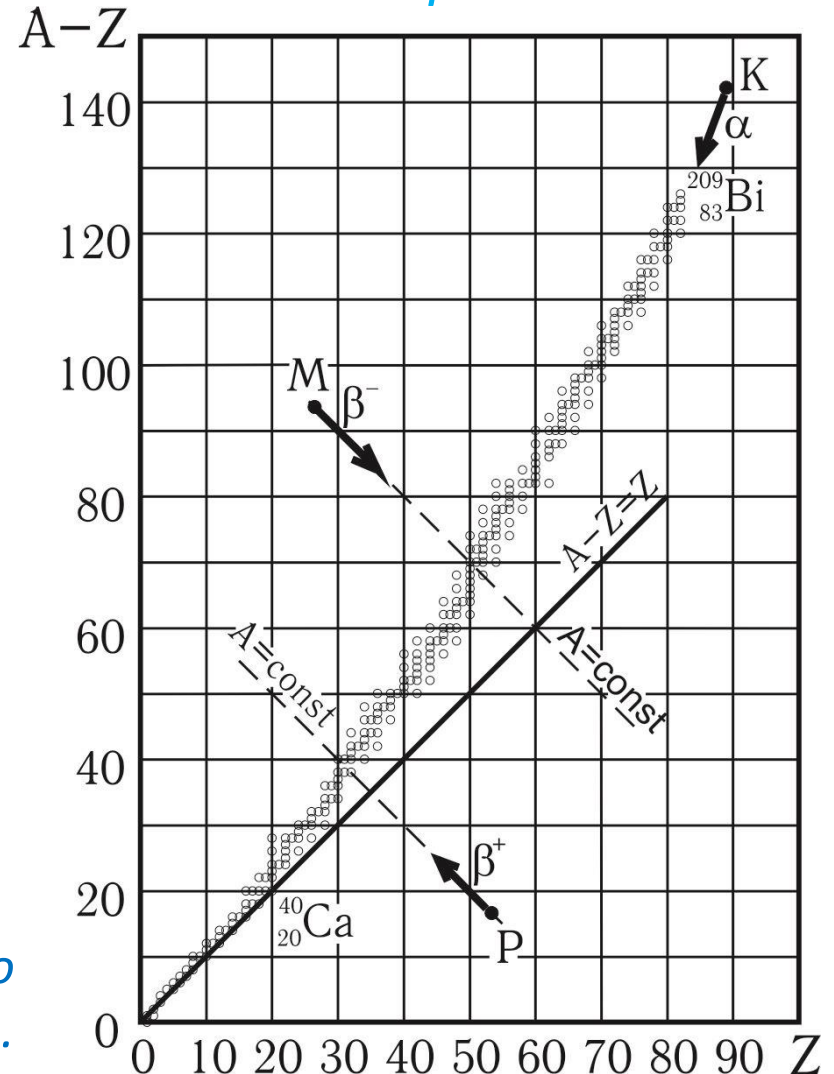
Основное правило:

Из всевозможных протон-нейтронных комбинаций к стабильным состояниям приводят очень немногие. У легких ядер наблюдается примерное равенство числа протонов и нейтронов. Ядерные силы образуют наиболее устойчивые ядра в случае:

$$Z = (A - Z),$$

это и есть **основное правило** определяющее устойчивость ядер.

Диаграмма протон-нейтронного состава стабильных ядер.



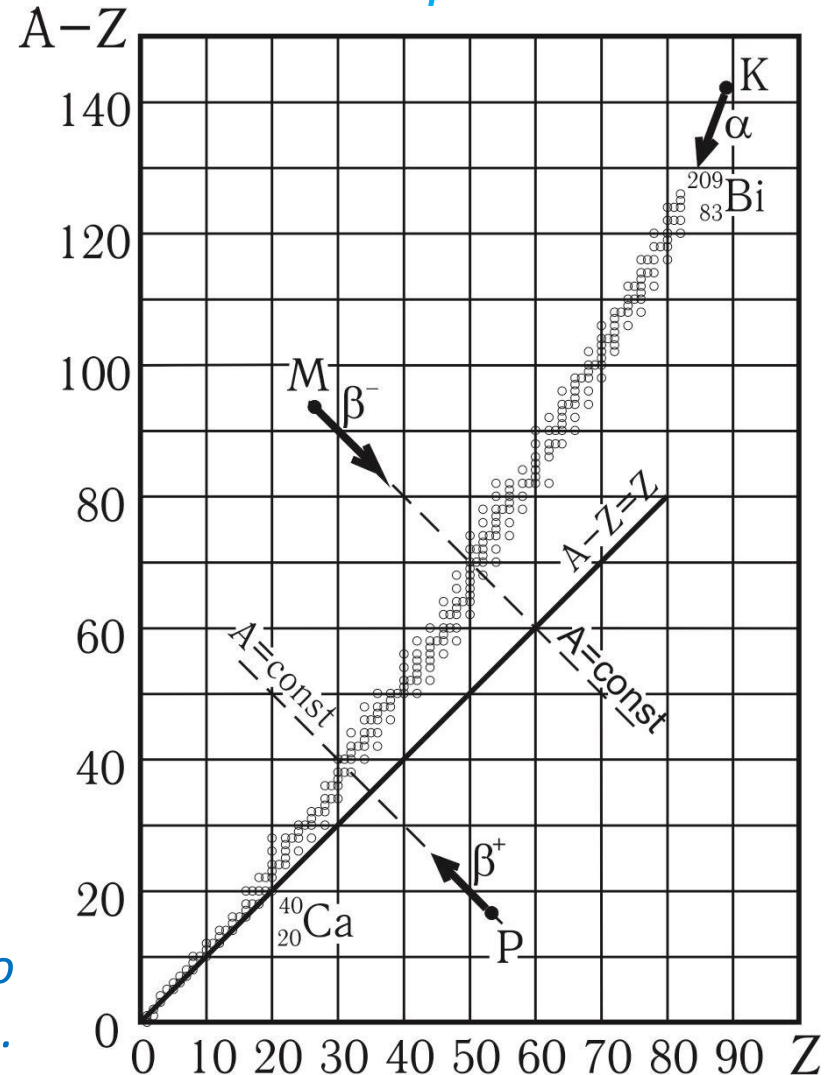
Статические свойства атомных ядер

Основные статические свойства ядер

Основное правило:

Последним стабильным ядром с равным количеством нейтронов и протонов является ядро Ca^{40} . При $A > 40$ в стабильных ядрах наблюдается увеличение количества нейтронов. У самых тяжелых ядер число нейтронов в **1,5** раза больше количества протонов. Это объясняется влиянием кулоновского отталкивания многих протонов в малом объеме ядра, энергия которого растет пропорционально Z^2 .

Диаграмма протон-нейтронного состава стабильных ядер.



Статические свойства атомных ядер

Основные статические свойства ядер

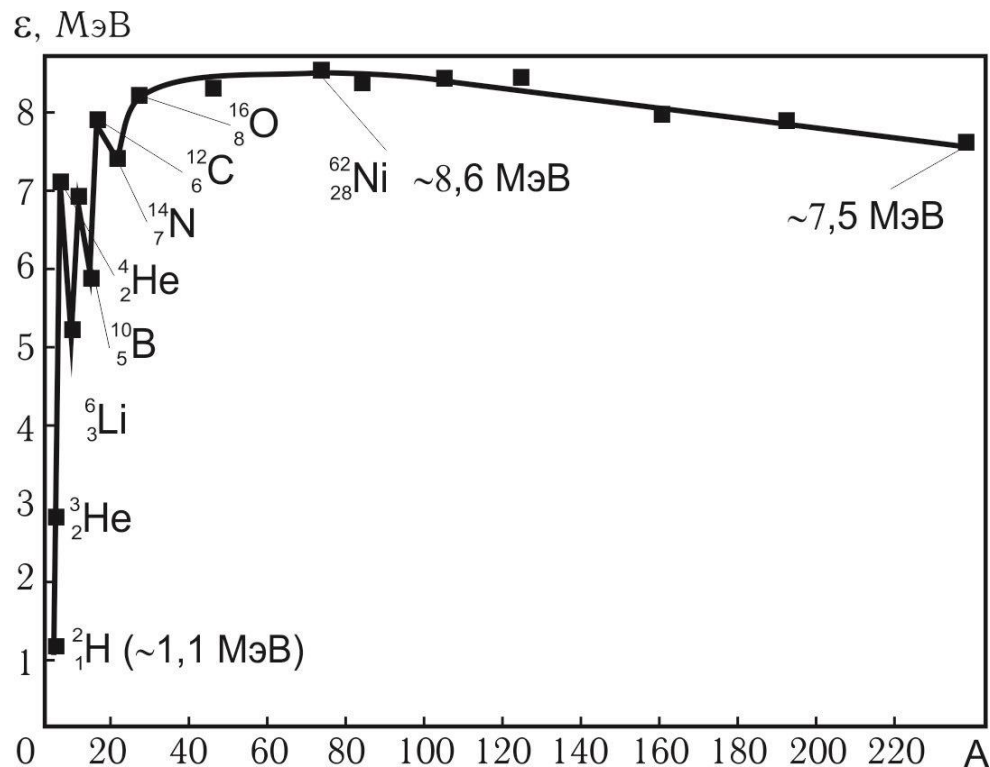
Особенности энергии связи:

Разрушительное влияние кулоновских сил приводит к снижению удельной энергии связи у ядер с $A > 62$, и соответственно к отклонению от основного правила.

Состав ядер стабильных нуклидов с $A > 40$ определяют две тенденции:

- насыщение ядерных сил;
- влияние кулоновских сил.

У тяжелых ядер энергия связи 2 протонов и 2 нейтронов становится меньше энергии связи ядра He^4 .



Зависимость удельной энергии связи от массового числа

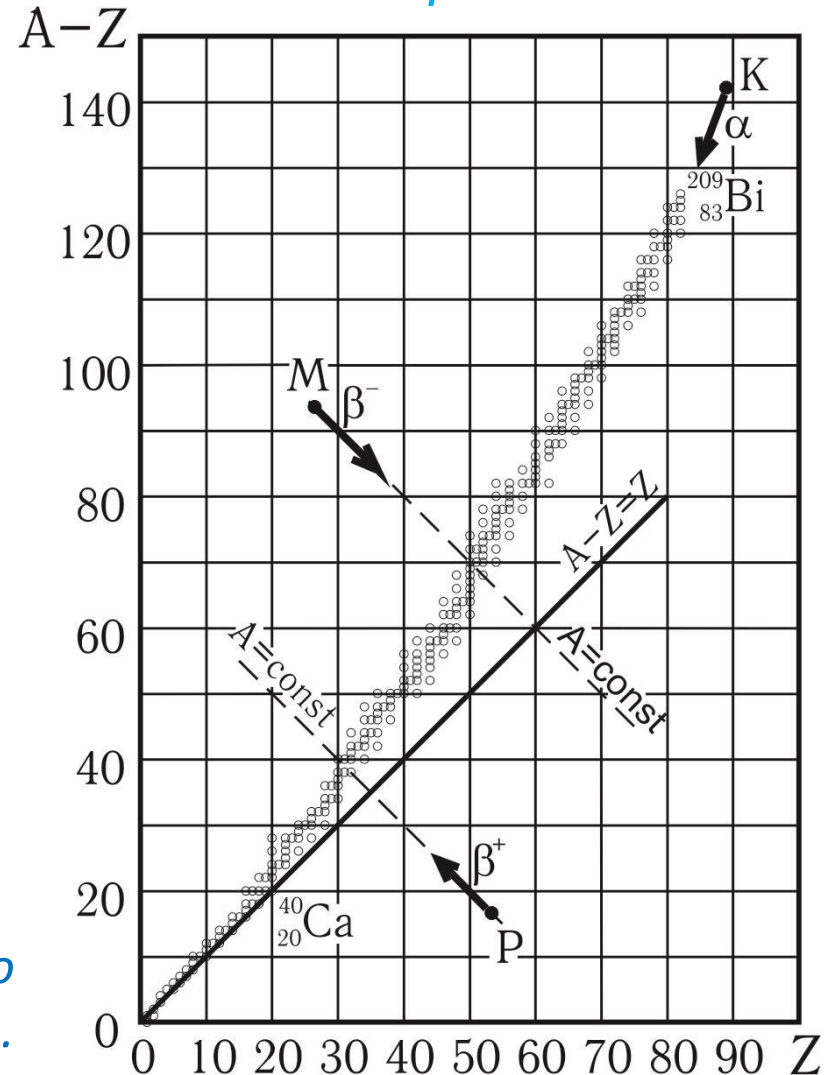
Статические свойства атомных ядер

Основные статические свойства ядер

Основное правило:

Последним стабильным ядром является ядро нуклида Bi^{209} ($Z=83$). Все более тяжелые ядра оказываются неустойчивыми по отношению к альфа-распаду. Существование в природе 92-х элементов обусловлено наличием трех долгоживущих нуклидов: Th^{232} , U^{235} , U^{238} , период полураспада которых сопоставим с геологическим возрастом Земли. Нуклиды с $Z=83-91$ существуют как продукты распада указанных трех.

Диаграмма протон-нейтронного состава стабильных ядер.



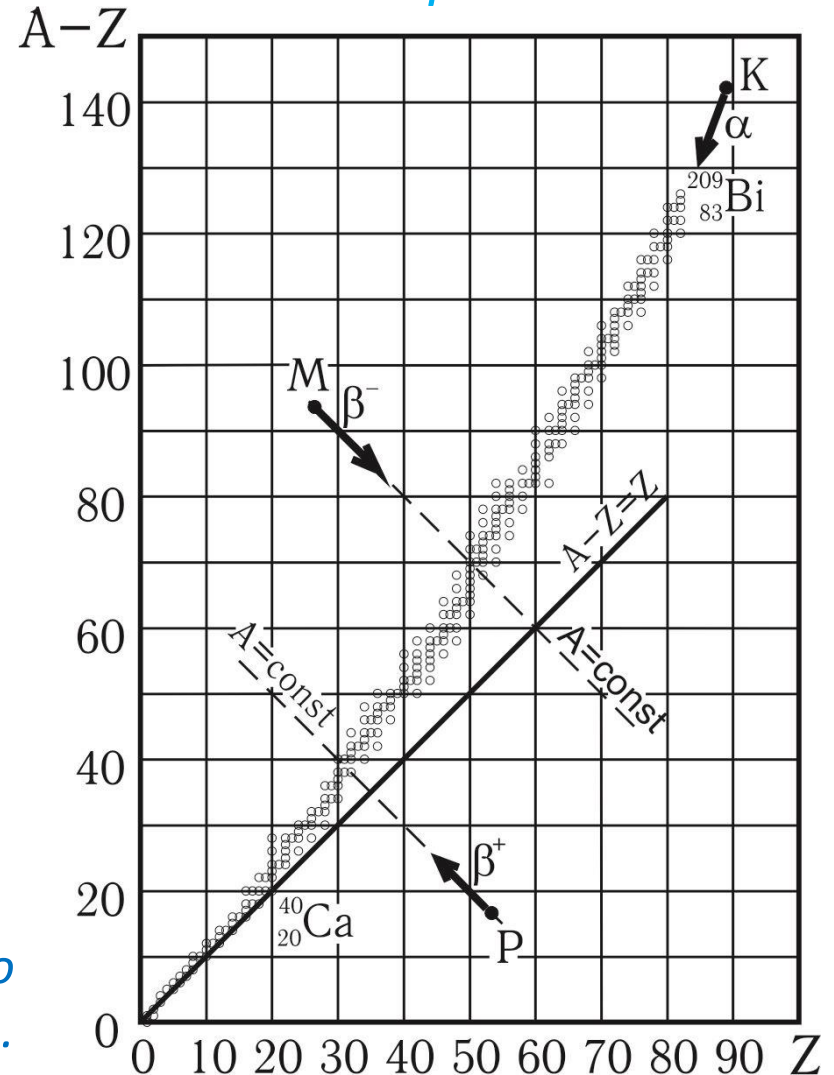
Статические свойства атомных ядер

Основные статические свойства ядер

Устойчивость изобаров:

Поскольку существует механизм изменяющий n - n состав ядер при сохранении A (β -распад), следует ожидать, что при данном A существует только один стабильный изобар как наиболее устойчивый, а все остальные β -активны. Так оно и есть в случае n - n или n - n состава ядра (A нечетное). Отклонение числа протонов или нейтронов от некоторого оптимального приводит к снижению энергии связи.

Диаграмма протон-нейтронного состава стабильных ядер.



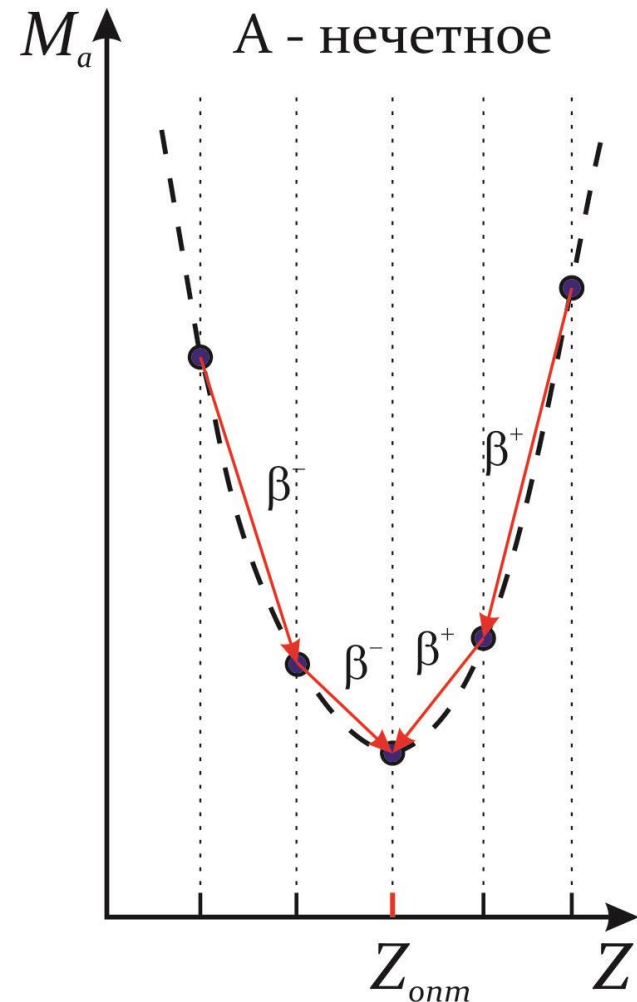
Статические свойства атомных ядер

Основные статические свойства ядер

Устойчивость изобаров:

Если существует механизм перехода в состояние с меньшей массой (большей энергией связи), то такой процесс всегда происходит самопроизвольно с выделением энергии. Ядро с избытком нейтронов претерпевает β^- - распад, пока не достигнет оптимального протон-нейтронного состава. Ядро с избытком протонов претерпевает β^+ - распад.

Качественная зависимость массы изобаров от Z



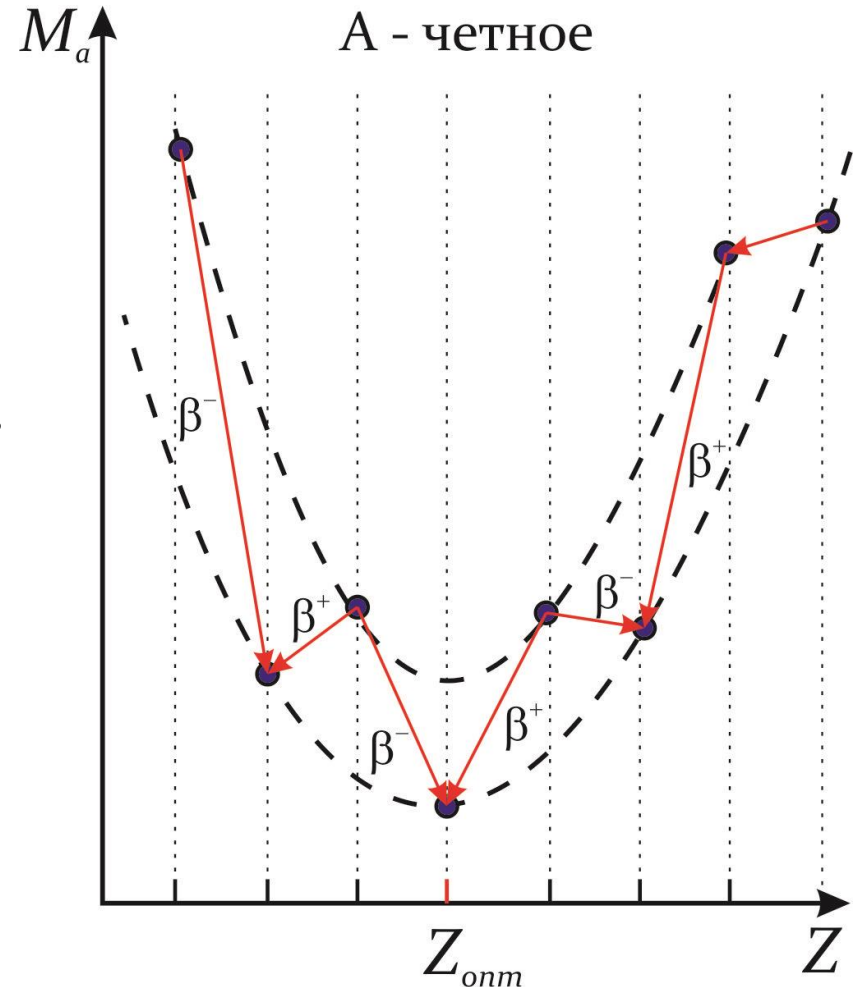
Статические свойства атомных ядер

Основные статические свойства ядер

Устойчивость изобаров:

Зависимость массы ядра с данным четным A от Z фактически описывается двумя функциями. Так как при β – распаде α -ядер образуются α - и наоборот. Поэтому возможно существование двух и даже трех стабильных изобаров с данным четным A . Из-за различия по Z на 2 единицы изобары с большей массой **могут** превратиться в изобар с меньшей массой только при **двойном** β – распаде, который маловероятен.

Качественная зависимость массы изобаров от Z



Статические свойства атомных ядер

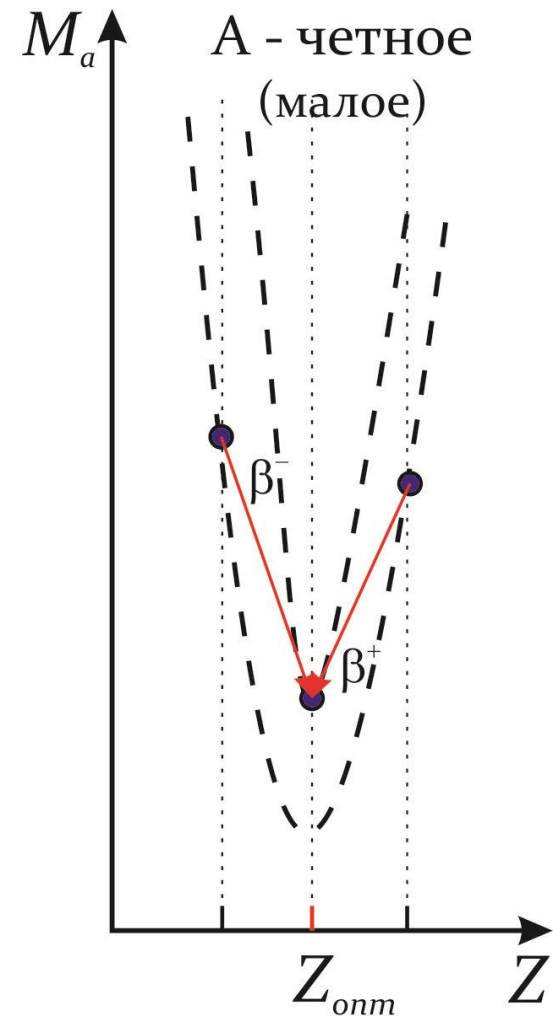
Основные статические свойства ядер

Устойчивость изобаров:

Среди **н-н** нуклидов известно только **4** стабильных. Все они легкие нуклиды с **одинаковым** числом нейтронов и протонов. При малом числе нуклонов энергия связи быстро (скачкообразно меняется) при изменении протон-нейтронного состава.

Это является причиной **большой** стабильности легких **н-н** нуклидов в сравнении с **ч-ч**, состав которых грубо не соответствует основному правилу.

Качественная зависимость массы изобаров от Z



Статические свойства атомных ядер

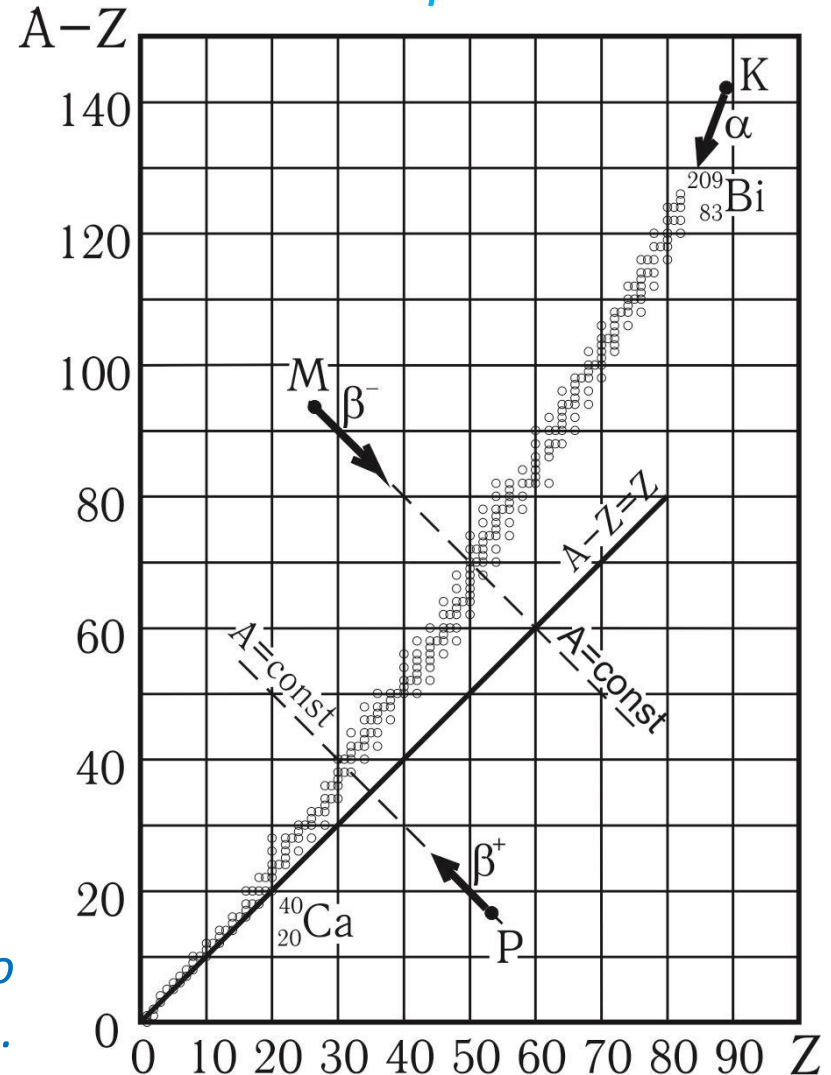
Основные статические свойства ядер

Области β – распадов:

Ядра имеющие избыток нейтронов по сравнению со стабильными, β^- – активны, а имеющие избыток протонов β^+ – активны.

Так как тяжелые ядра имеют в своем составе в 1,5 раза больше нейтронов, то при их делении образуются пересыщенные нейтронами ядра осколки. Следовательно продукты деления должны быть β^- -активными.

Диаграмма протон-нейтронного состава стабильных ядер.

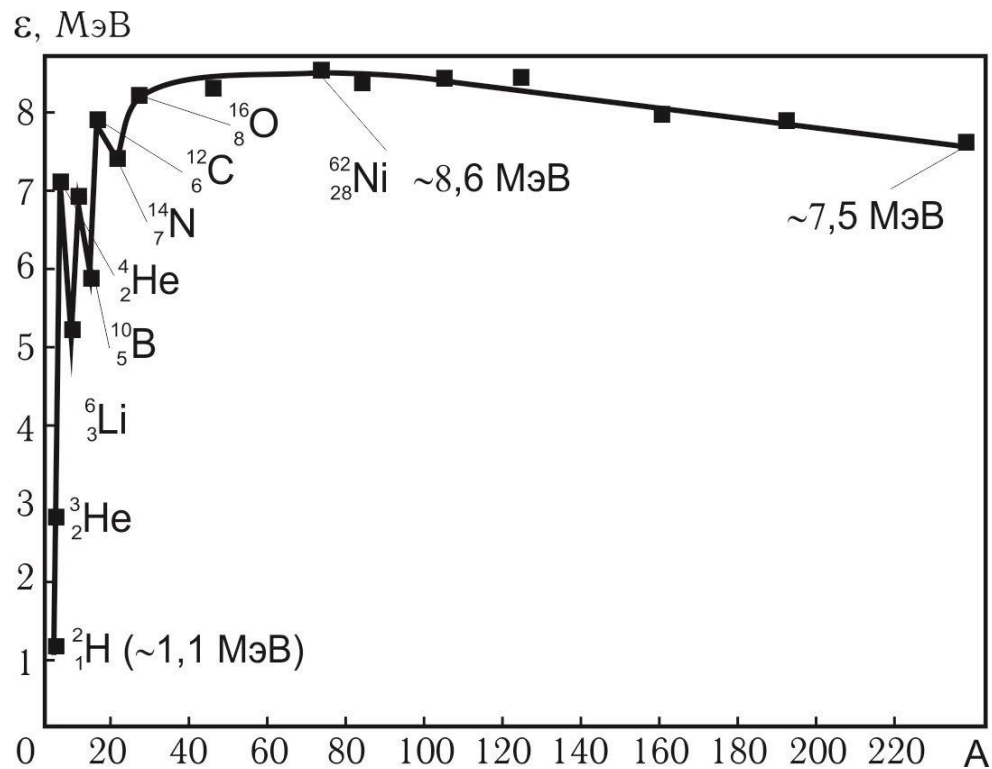


Статические свойства атомных ядер

Основные статические свойства ядер

Получение свободной энергии:

Рассмотрение зависимости удельной энергии связи от массового числа также указывает на возможные пути получения свободной энергии при ядерных превращениях. Энергия должна **высвободиться** при делении тяжелых (ядерный реактор) или синтезе легких ядер (термоядерный реактор). В результате этих процессов образуются ядра с **большей** удельной энергией связи.



Зависимость удельной энергии связи от массового числа