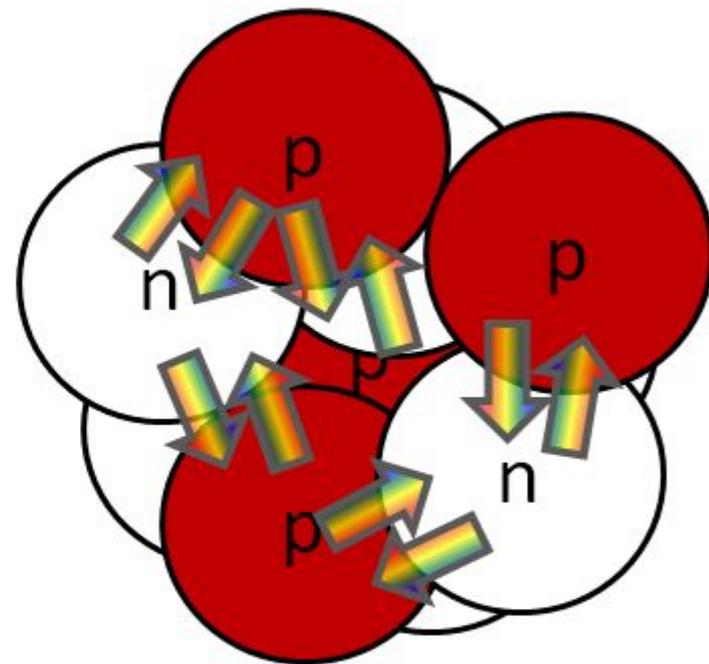
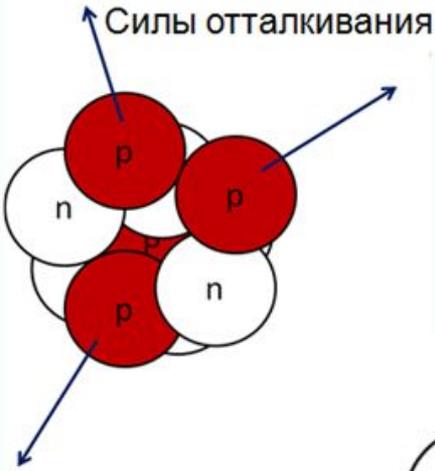


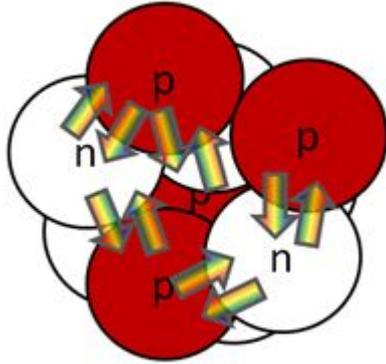
Тема

ЭНЕРГИЯ СВЯЗИ, ДЕФЕКТ
МАССЫ, ЯДЕРНЫЕ СИЛЫ

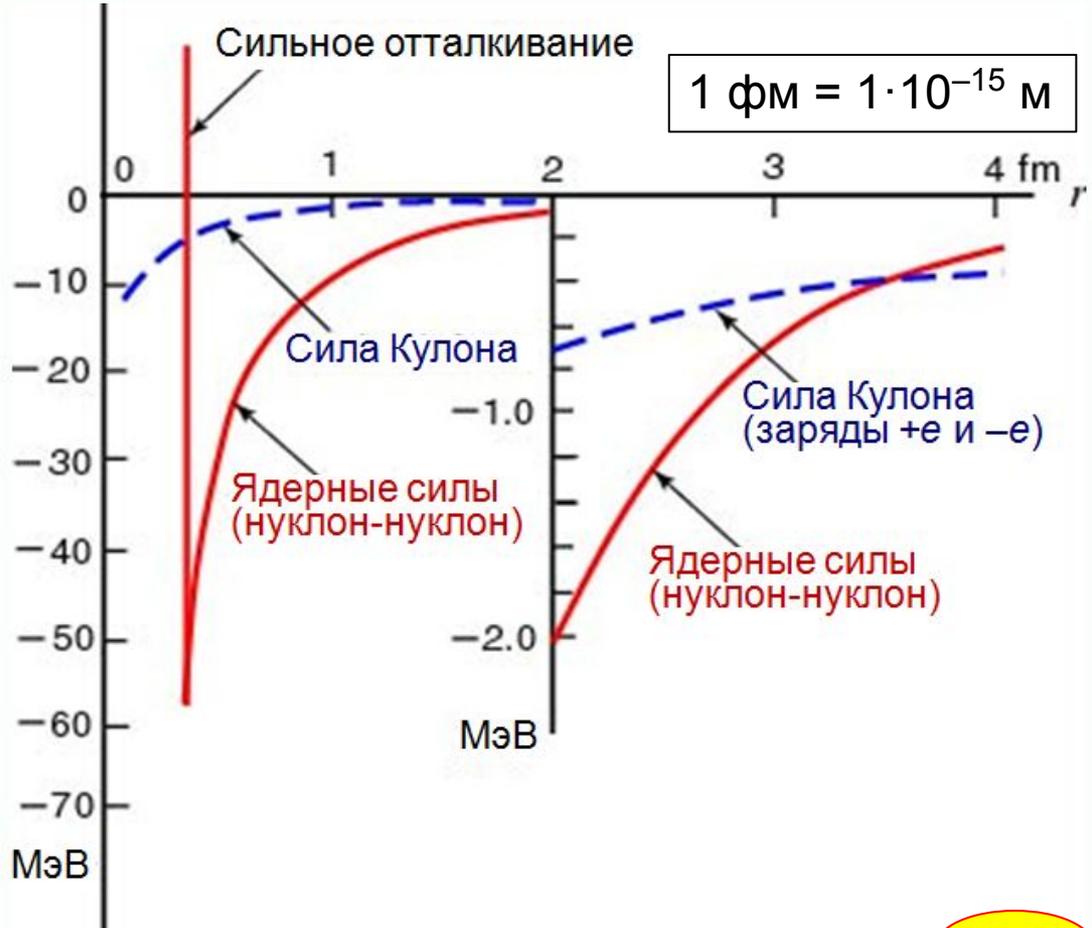




- Между протонами внутри ядра действуют силы электростатического отталкивания.
- Однако наряду с ними в ядре существуют значительно бóльшие силы притяжения – **ядерные силы.**



- Они действуют между протоном и протоном, протоном и нейтроном, нейтроном и нейтроном, а радиус их действия примерно равен среднему расстоянию между нуклонами (не более 10^{-15} м или 1 ферми).



- Ядерные силы – **короткодействующие**, и вдали от ядра их нет.
- Благодаря внутриядерным взаимодействиям, **энергия ядра меньше**, чем энергия свободных нуклонов, из которых ядро состоит, а масса ядра меньше суммы масс нуклонов.
- В соответствии с соотношением Эйнштейна **$E = mc^2$** это означает, что **масса ядра всегда меньше суммы масс всех нуклонов его составляющих**. Так как значение c^2 очень велико, даже небольшое уменьшение массы эквивалентно потере очень большого количества энергии
- **Дефект массы (Δ)** – это разность между суммой масс разрозненных нуклонов и массой связанной системы (ядра), выраженной в а. е. м. Так как в таблицах приводятся **массы атомов** (а не ядер), то дефект массы (с точностью до энергии связи электронов) обычно определяют по формуле

$$\Delta = ZM_{\text{H}} + NM_{\text{n}} - M_{\text{атома}}$$

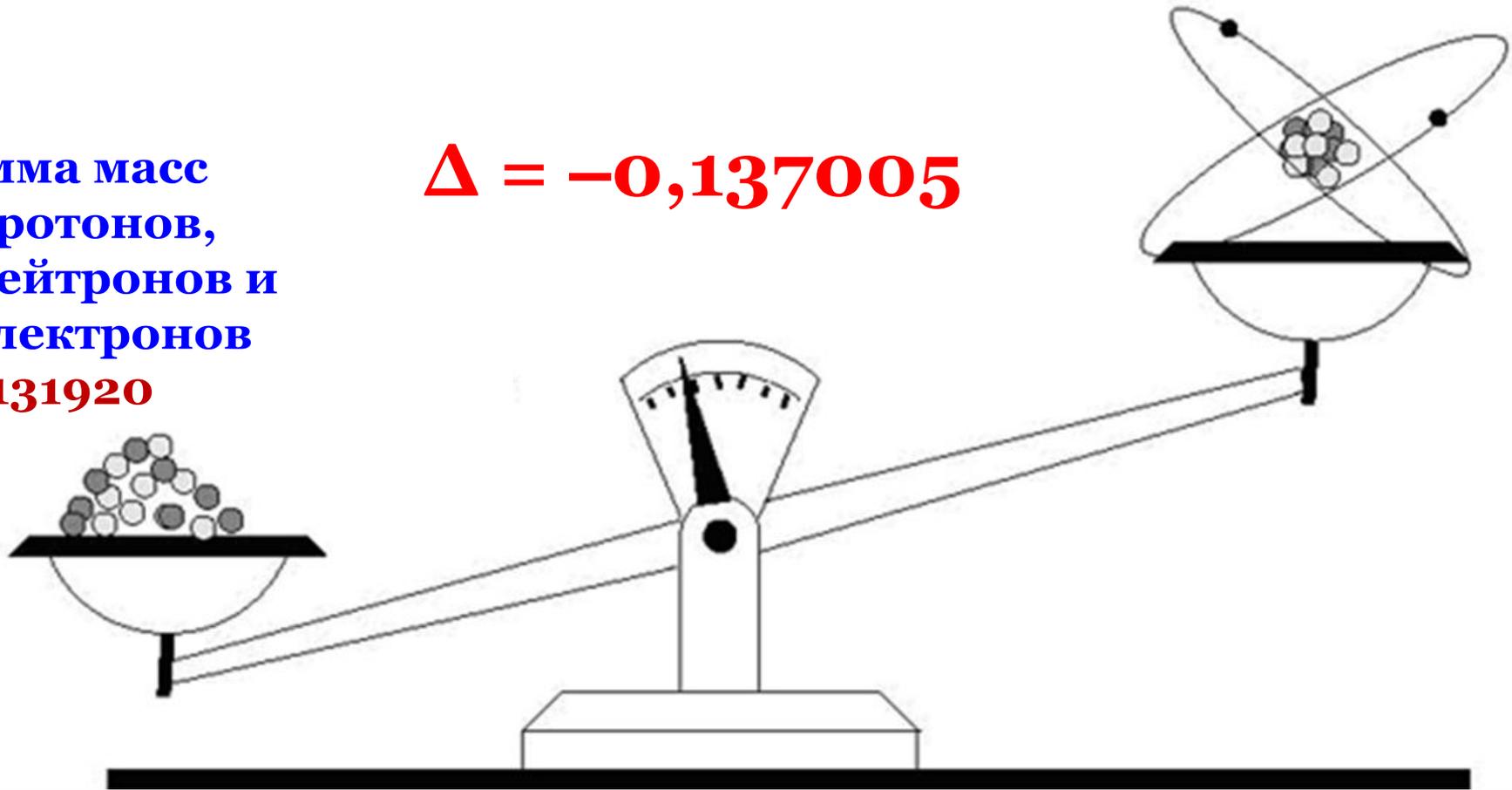
где M_{H} – масса атома водорода

Частица	Масса, а. е. м.	МэВ
Протон	1,007276	938,27
Нейтрон	1,008665	939,57
Электрон	0,000549	0,511

Измеренная масса
атома кислорода-16
15,994915

Сумма масс
8 протонов,
8 нейтронов и
8 электронов
16,131920

$$\Delta = -0,137005$$



ЗАДАЧА. Рассчитайте энергетический эквивалент атомной единицы массы в Дж.

РЕШЕНИЕ. В соответствии с соотношением Эйнштейна связь между массой и энергией: $E = mc^2$ энергетический эквивалент а. е. м.

$$1 \text{ а. е. м.} = \frac{0,001 (\text{кг/моль}) \cdot (3 \cdot 10^8 (\text{м/с}))^2}{6,022 \cdot 10^{23}} = 1,49 \cdot 10^{-10} \text{ Дж}$$

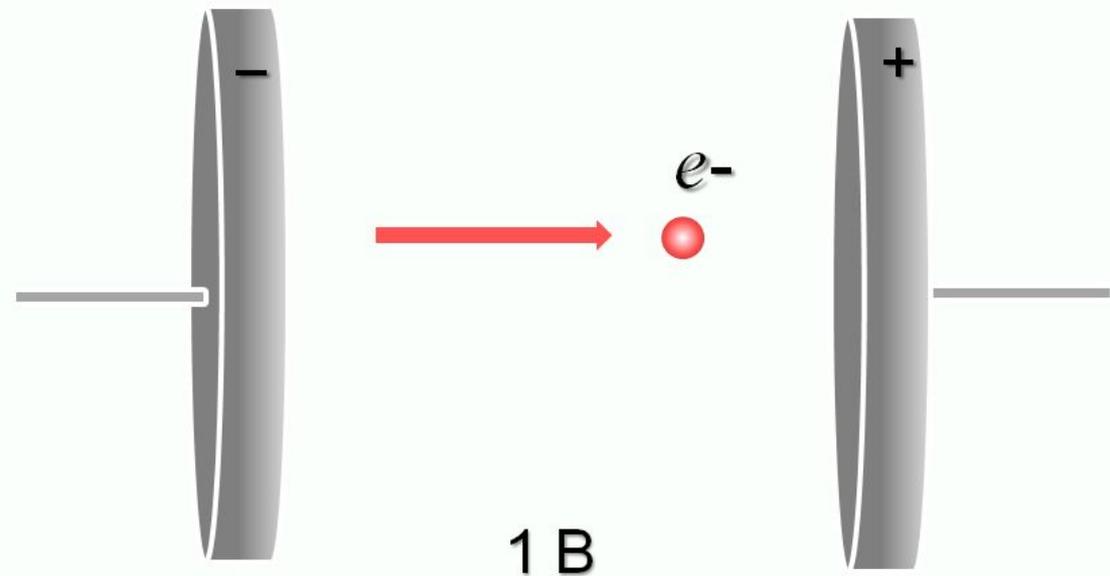
Большое это значение или маленькое?

ПРИМЕР. Вряд ли нас впечатлит сообщение, что муравей может тащить груз массой 500 мг. Однако, если к этой ошеломляющей новости добавить, что масса самого труженика 10 мг, и груз превышает его вес в 50 раз, тогда мы восхитимся необыкновенной силой насекомого.



- Хотя молярные значения привычны для химиков, тем не менее в микромире удобнее пользоваться **относительными** величинами, приходящимися на одну частицу, атом или молекулу.
- Это не только относительные единицы массы (а. е. м.), заряда (элементарный заряд), но и энергии – **электрон-вольт** (эВ).

Электрон-вольт – это энергия, которую приобретает электрон, проходя разность потенциалов в 1 вольт



Численное соотношение между эВ и Дж такое же, как между элементарным зарядом и Кл.

$$1 \text{ эВ} \approx 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$$

Или в пересчете на 1 моль частиц

$$1 \text{ эВ} \approx 96500 \text{ Дж/моль}$$

Отсюда следует, что энергетический эквивалент атомной единицы массы

$$1 \text{ а. е. м.} \approx 1,49 \cdot 10^{-10} / 1,602 \cdot 10^{-19} \approx 931,49 \text{ МэВ}$$

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ЭКВИВАЛЕНТ ДЕФЕКТА МАССЫ ЯДРА

Энергия связи ядра:

$$\Delta W = \Delta m c^2$$

Энергия связи, приходящаяся на один нуклон, называется

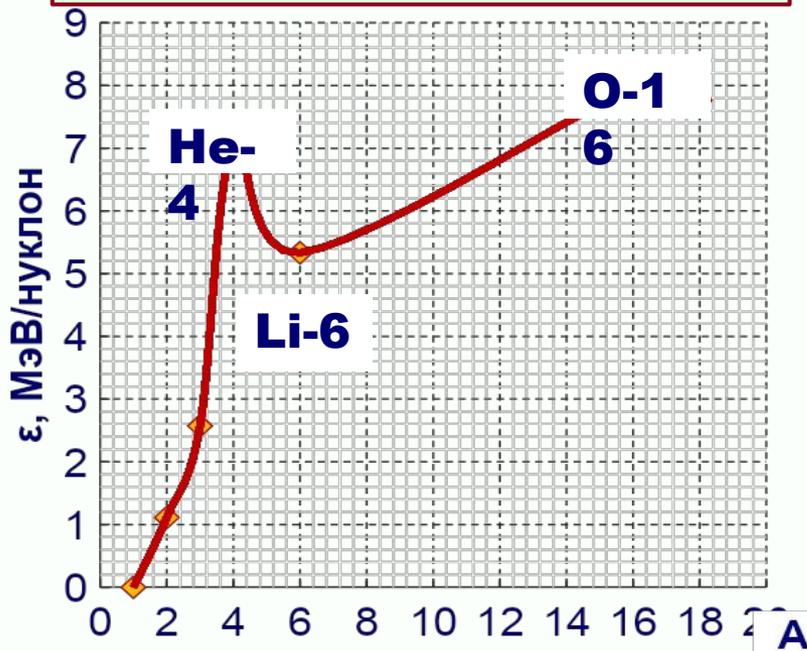
удельной энергией связи нуклонов в ядре:

$$\varepsilon = \Delta W / A$$

и является мерой устойчивости ядер (плотности упаковки)

Нуклид	m	Δm	ΔW , МэВ	ε
H	1,007825	0	0,00	0,00
D	2,014102	0,002388	2,22	1,11
He-3	3,016029	0,008286	7,72	2,57
He-4	4,002603	0,030377	28,30	7,07
Li-6	6,015123	0,034347	31,99	5,33
N-15	15,000109	0,123986	115,49	7,70
O-16	15,994915	0,137005	127,62	7,98
O-17	16,999132	0,141453	131,76	7,75
O-18	17,999160	0,150090	139,81	7,77

$$1 \text{ а. е. м.} = 931,49 \text{ МэВ}$$

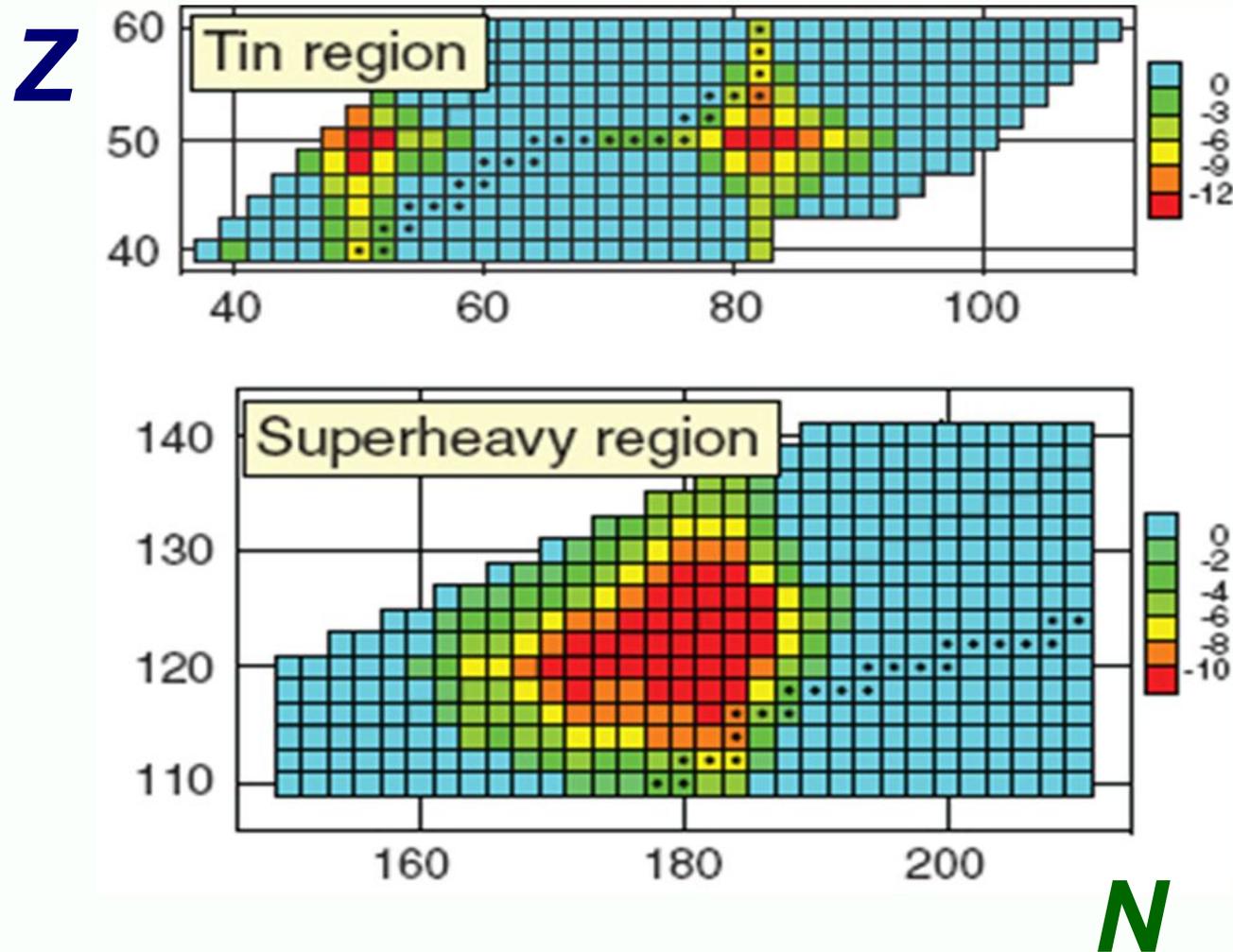


<http://atom.kaeri.re.kr/>

Магические ядра содержат так называемые магические числа протонов или нейтронов и отличаются повышенной удельной энергией связи

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

Известны дважды магические ядра: ${}^4\text{He}$, ${}^{16}\text{O}$, ${}^{40}\text{Ca}$, ${}^{48}\text{Ca}$, ${}^{208}\text{Pb}$.
Такие плотноупакованные ядра отличаются повышенной устойчивостью.

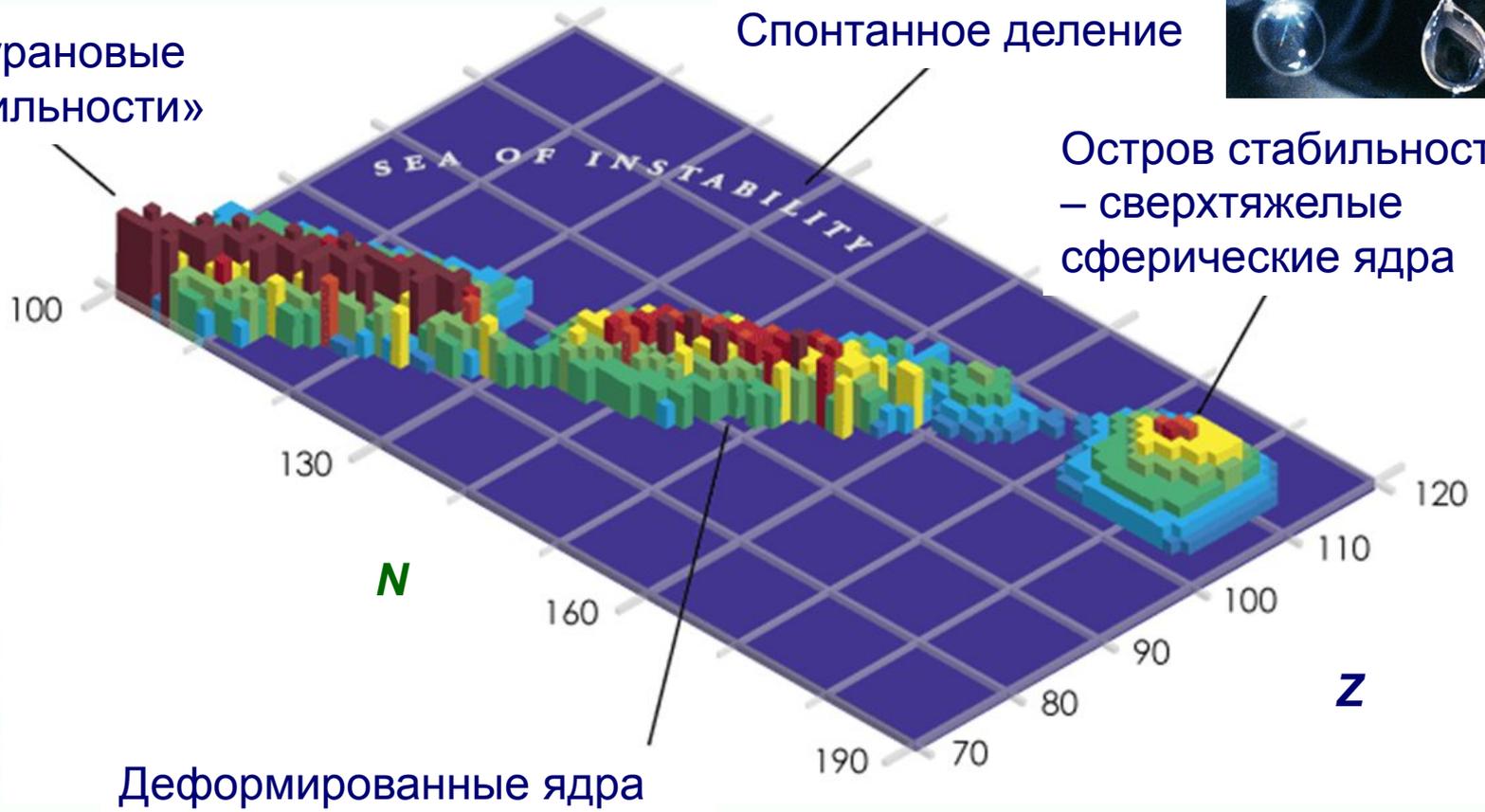


Точками указаны нуклиды, устойчивые по отношению к β -распаду

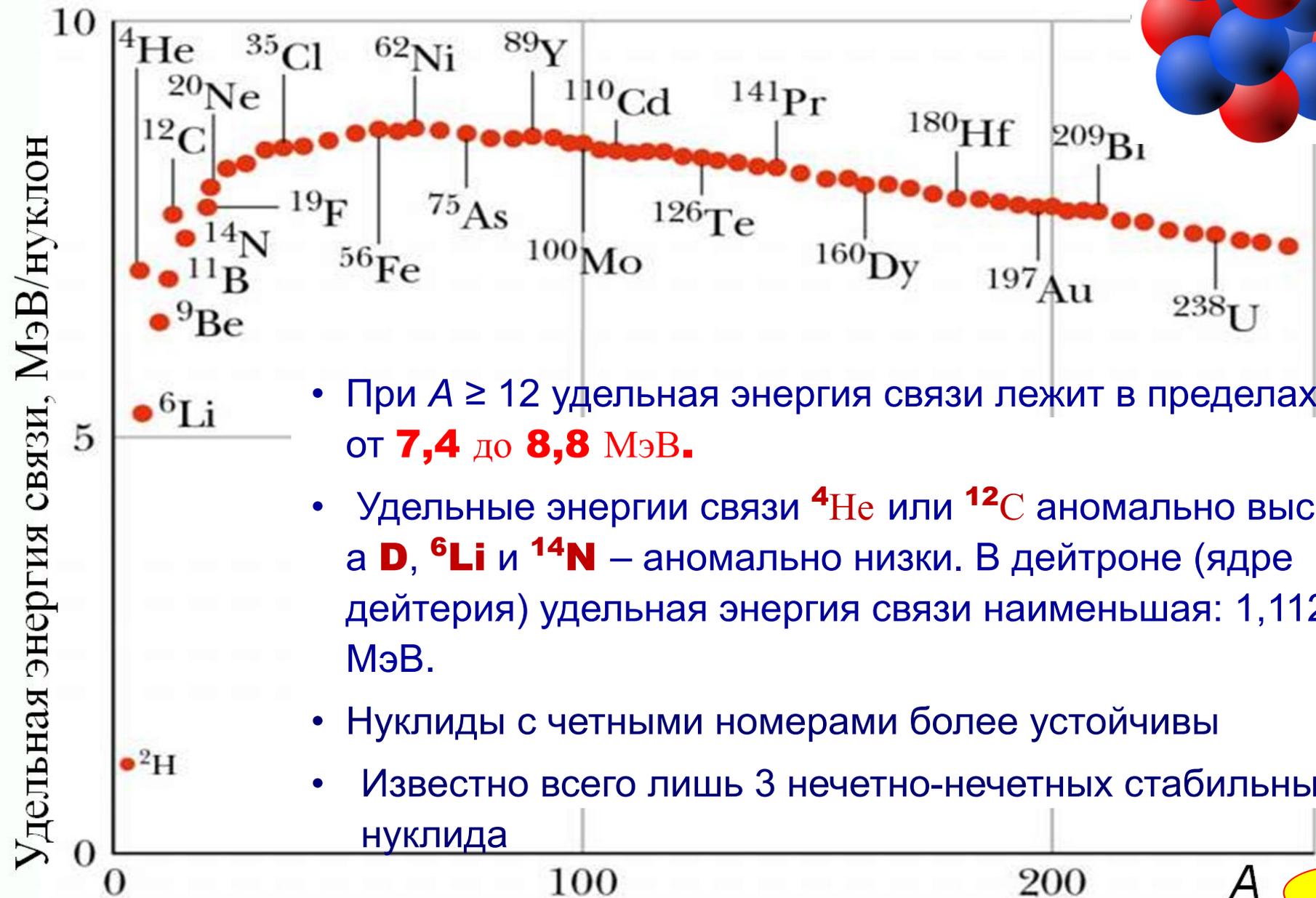
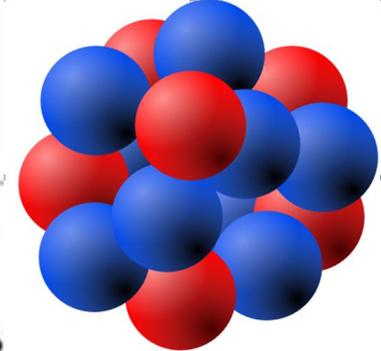


Спонтанное деление

Остров стабильности
– сверхтяжелые
сферические ядра



Удельная энергия связи



- При $A \geq 12$ удельная энергия связи лежит в пределах от **7,4** до **8,8** МэВ.
- Удельные энергии связи ${}^4\text{He}$ или ${}^{12}\text{C}$ аномально высоки, а ${}^2\text{H}$, ${}^6\text{Li}$ и ${}^{14}\text{N}$ – аномально низки. В дейтроне (ядре дейтерия) удельная энергия связи наименьшая: 1,112 МэВ.
- Нуклиды с четными номерами более устойчивы
- Известно всего лишь 3 нечетно-нечетных стабильных нуклида

Наибольшее значение (т. н. **железный максимум**) приходится на область массовых чисел $A \approx 60$ (железо, кобальт, никель). Это «плотнупакованные ядра»

ЗАДАЧА. Определить дефект массы (Δm , а. е. м.), полную энергию связи ядра (ΔW , МэВ) и удельную энергию связи ε для ^{56}Fe .
Масса атома 55,934942 а. е. м.

Частица	Масса, а. е. м.
Нейтрон	1,008665
Атом H	1,007825

РЕШЕНИЕ.

$$\Delta m = 26 \cdot 1,007825 + 30 \cdot 1,008665 - 55,934942 = 0,528458$$

$$\Delta W = 0,528458 \cdot 931,49 = 492,25 \text{ МэВ}; \quad \varepsilon = 492,25 / 56 = 8,79 \text{ МэВ/нуклон}$$

ЗАДАЧА. Определить дефект массы (Δm , а. е. м.), полную энергию связи ядра (ΔW , МэВ) и удельную энергию связи ε для дейтерия. Масса атома D 2,014102 а. е. м.

РЕШЕНИЕ.

$$\Delta m = 1 \cdot 1,007825 + 1 \cdot 1,008665 - 2,014102 = 0,002388$$

$$\Delta W = 0,002388 \cdot 931,49 = 2,224 \text{ МэВ}; \quad \varepsilon = 2,224 / 2 = 1,11 \text{ МэВ/нуклон}$$

ЗАДАЧА. 1) Какую минимальную работу (в МэВ) надо совершить, чтобы «расташить» ядро кислорода ^{16}O на отдельные протоны и нейтроны?

Масса атома ^{16}O 15,994915,

Масса нейтрона 1,008665,

Масса атома водорода 1,007825

1 а. е. м. = 931,49 МэВ.

2) Какую минимальную работу надо совершить, чтобы расташить на атомы молекулу кислорода $^{16}\text{O}_2$?

$E_{\text{св}}(\text{O}_2) = 497$ кДж/моль

Сравните полученные значения

ЗАДАЧА. 1) Какую минимальную работу (в МэВ) надо совершить, чтобы «расташить» ядро кислорода ^{16}O на отдельные протоны и нейтроны?

Масса атома ^{16}O 15,994915,

Масса нейтрона 1,008665,

Масса атома водорода 1,007825

1 а. е. м. = 931,49 МэВ.

2) Какую минимальную работу надо совершить, чтобы расташить на атомы молекулу кислорода $^{16}\text{O}_2$?

$E_{\text{св}}(\text{O}_2) = 497$ кДж/моль

Сравните полученные значения

РЕШЕНИЕ. Энергию связи в ядре атома кислорода-16 можно взять в готовом виде из таблицы $\Delta W = 127,62$ МэВ на слайде №7

Или добросовестно пересчитать:

$$\Delta W = \Delta m \cdot 931,49 = (8 \cdot 1,007825 + 8 \cdot 1,008665 - 15,994915) \cdot 931,49 \approx \underline{\underline{128 \text{ МэВ}}}$$

Что в пересчете на 1 моль составляет величину работы A :

$$A \approx 128 \cdot 10^6 \cdot 96500 \approx \underline{\underline{1,24 \cdot 10^{13} \text{ Дж/моль}}}$$

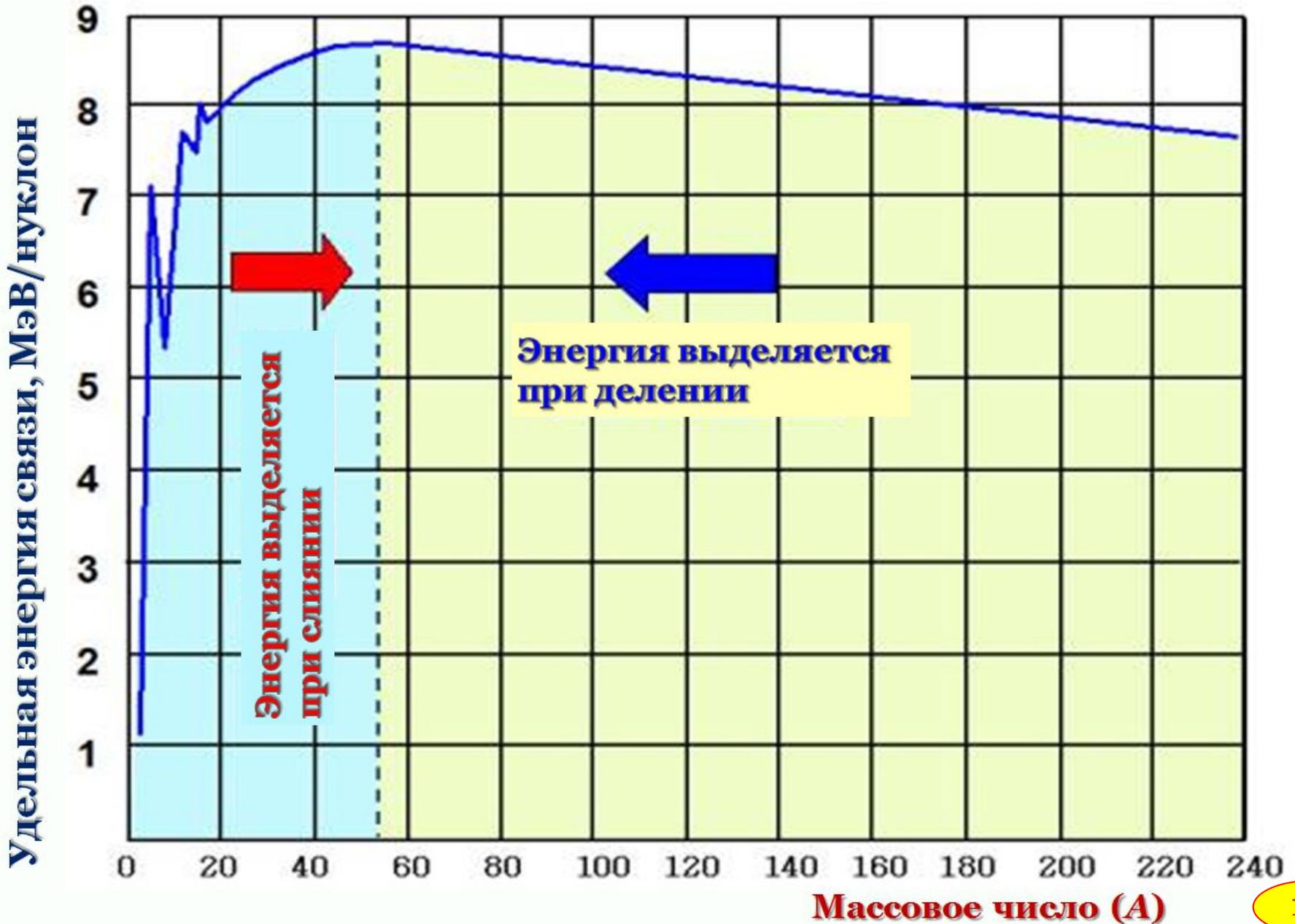
Работа по разрушению 1 моля молекул кислорода равна

$$A = E_{\text{св}}(\text{O}_2) = 497 \text{ кДж/моль} = \underline{\underline{4,97 \cdot 10^5 \text{ Дж/моль}}}$$

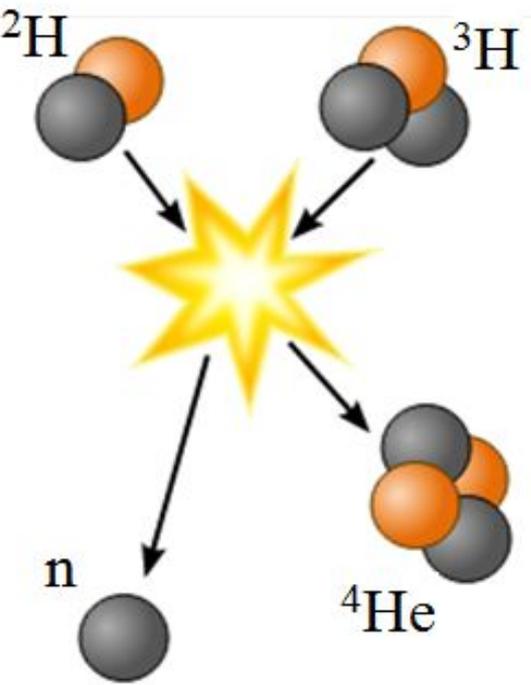
Или в пересчете на одну молекулу

$$A \approx 4,97 \cdot 10^5 / 96500 \approx \underline{\underline{5,2 \text{ эВ}}}$$

Удельная энергия связи



- Для "поджигания" реакции синтеза необходимо нагреть вещество до сверхвысоких температур, чтобы кинетическая энергия движения оказалась достаточной для преодоления кулоновского отталкивания. Поэтому ядерные реакции синтеза получили названия **термоядерных реакций**.
- Так, **самая низкотемпературная** дейтерий-тритиевая реакция начинается при температуре "всего лишь" **100 млн К**

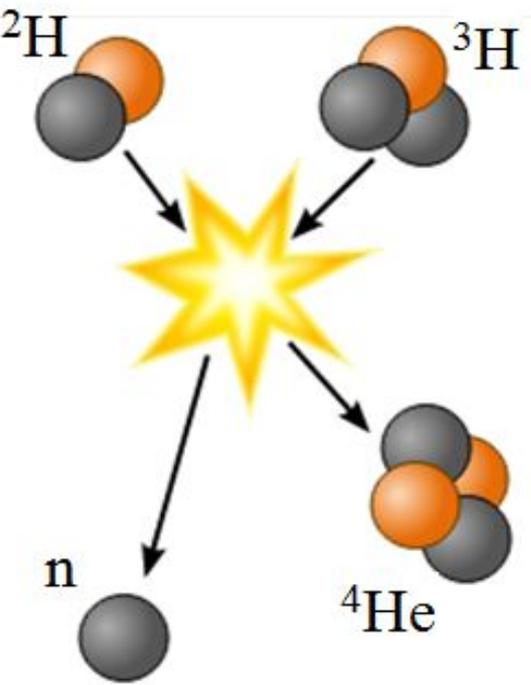


«Потеря» массы составляет **0,018883 а.е.м.** или **17,6 МэВ**

Недостатком является то, что львиную долю энергии (14,1 МэВ) уносит нейтрон.

Потоки нейтронов принадлежат к сильно проникающему излучению, и создают в установках наведенную радиацию.

- Для "поджигания" реакции синтеза необходимо нагреть вещество до сверхвысоких температур, чтобы кинетическая энергия движения оказалась достаточной для преодоления кулоновского отталкивания. Поэтому ядерные реакции синтеза получили названия **термоядерных реакций**.
- Так, **самая низкотемпературная** дейтерий-тритиевая реакция начинается при температуре "всего лишь" **100 млн К**

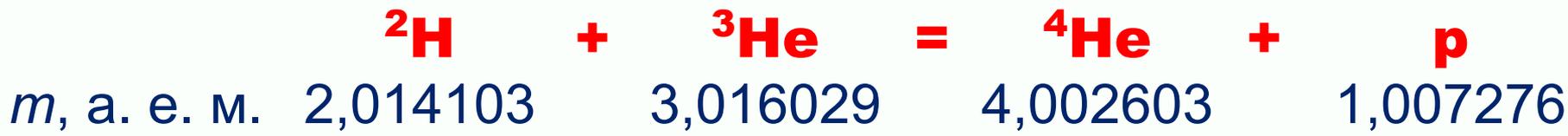


«Потеря» массы составляет **0,018883 а. е. м.** или **17,6 МэВ**.

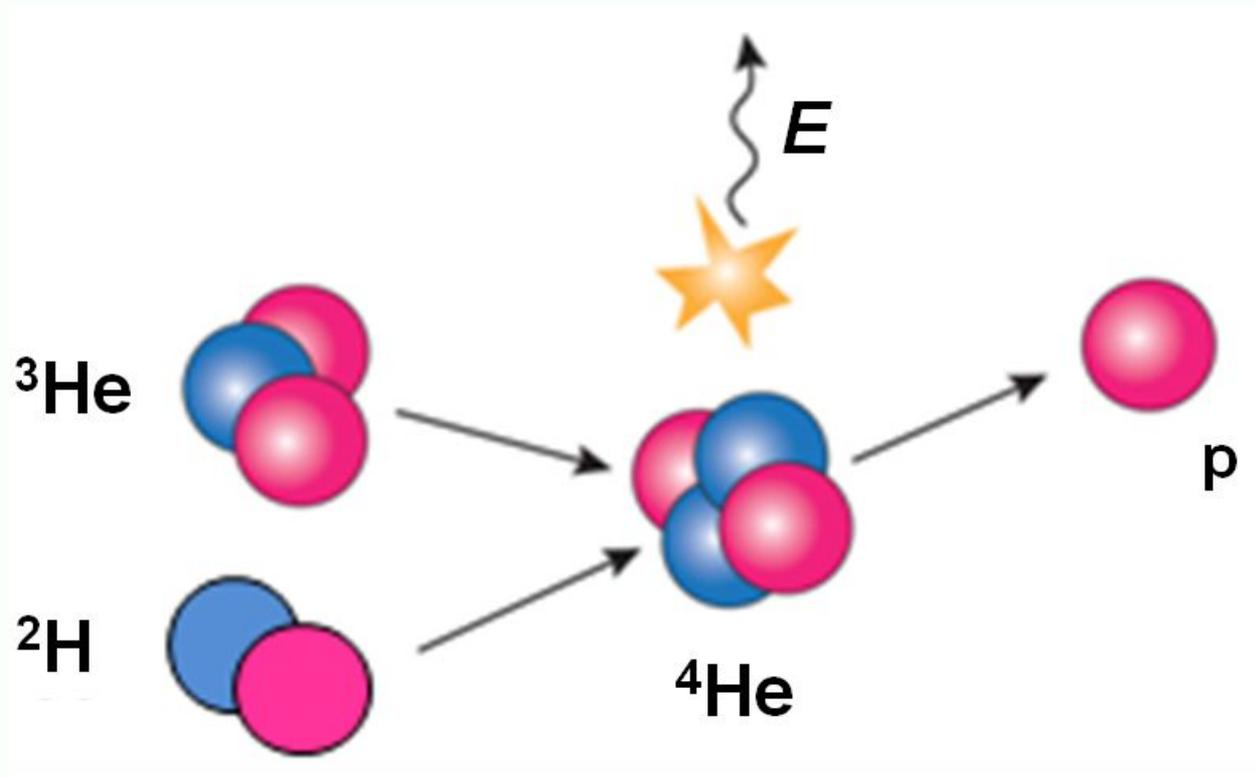
Недостатком является то, что львиную долю энергии (**14,1 МэВ**) уносит нейтрон.

Потоки нейтронов принадлежат к сильно проникающему излучению, и создают в установках наведенную радиацию.

Избавиться от нейтронов, а также от связанных с ними проблем, позволяет другая термоядерная реакция – между дейтерием и гелием-3:

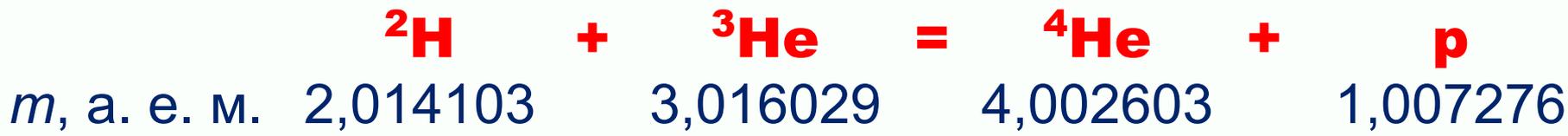


- В этой реакции "потеря" массы составляет ???

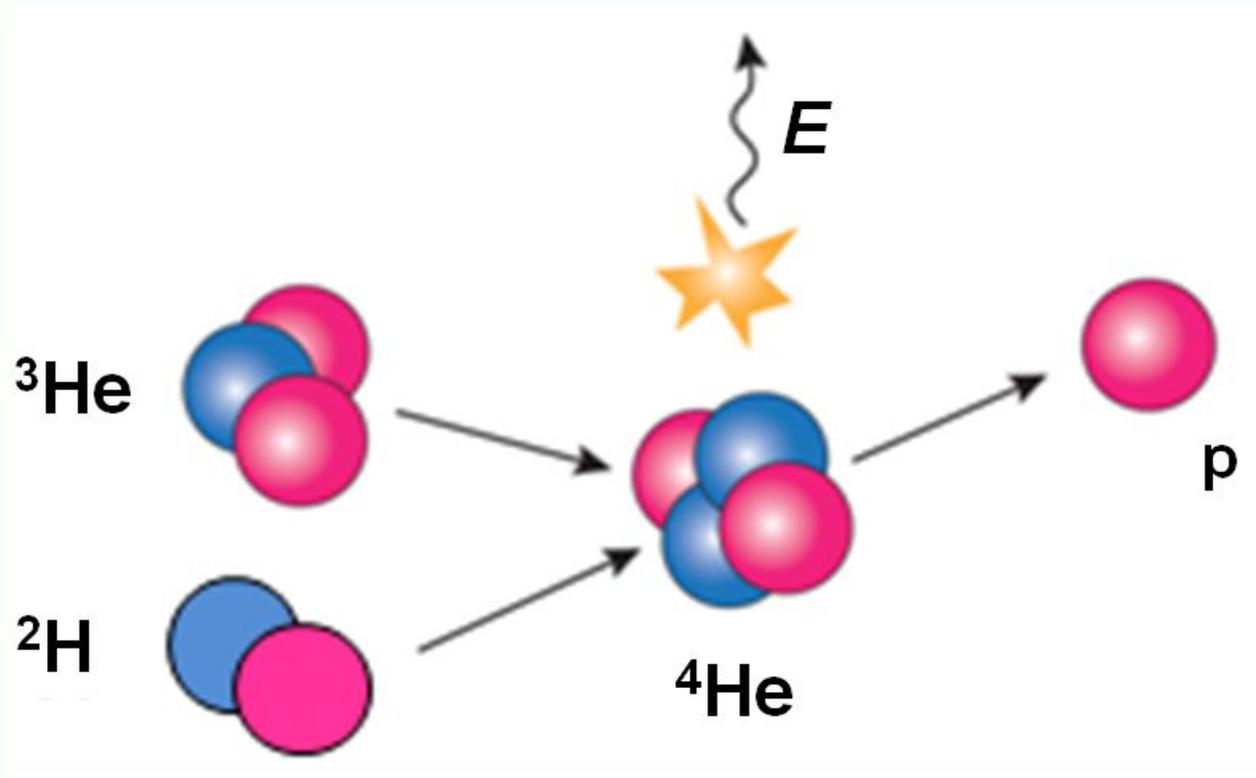


- В продуктах реакции нет ничего радиоактивного, но для инициирования этой реакции требуется температура в **10** раз больше

Избавиться от нейтронов, а также от связанных с ними проблем, позволяет другая термоядерная реакция – между дейтерием и гелием-3:

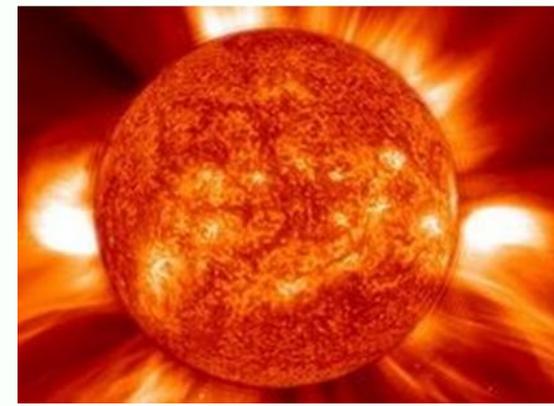


- В этой реакции "потеря" массы составляет **0,020253 а. е. м.** или **18,4 МэВ.**

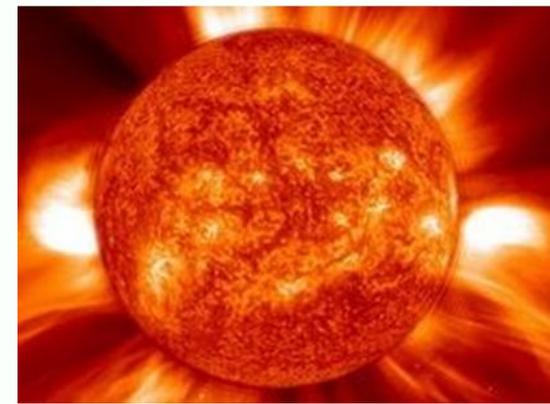


- В продуктах реакции нет ничего радиоактивного, но для инициирования этой реакции требуется температура в **10 раз больше**

ЗАДАЧА. С единицы площади поверхности Солнца
ежесекундно испускается энергия $W = 74 \text{ МДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$.
На сколько уменьшается масса Солнца за год?
Диаметр Солнца $D = 1,39 \cdot 10^6 \text{ км}$



ЗАДАЧА. С единицы площади поверхности Солнца
ежесекундно испускается энергия $W = 74 \text{ МДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$.
На сколько уменьшается масса Солнца за год?
Диаметр Солнца $D = 1,39 \cdot 10^6 \text{ км}$



РЕШЕНИЕ.

- 1) Площадь поверхности Солнца: $S = \pi D^2 = 3,14 \cdot (1,39 \cdot 10^9)^2 = 6,07 \cdot 10^{18} \text{ (м}^2\text{)}$
- 2) Энергия, испускаемая Солнцем за год:
 $E = W \cdot t = 6,07 \cdot 10^{18} \cdot 74 \cdot 10^6 \cdot 3600 \cdot 24 \cdot 365 = 1,42 \cdot 10^{34} \text{ (Дж)}$
- 3) Дефект массы: $\Delta m = E/c^2 = 1,425 \cdot 10^{34} / (3 \cdot 10^8)^2 \approx 1,57 \cdot 10^{17} \text{ (кг)}$

ОЦЕНИМ ЭНЕРГИЮ ДЕЛЕНИЯ ^{235}U :



m , а. е. м. 235,043930 1,008665 93,934140 138,908841 1,008665

Дефект массы равен ???

0,183619 а. е. м. или

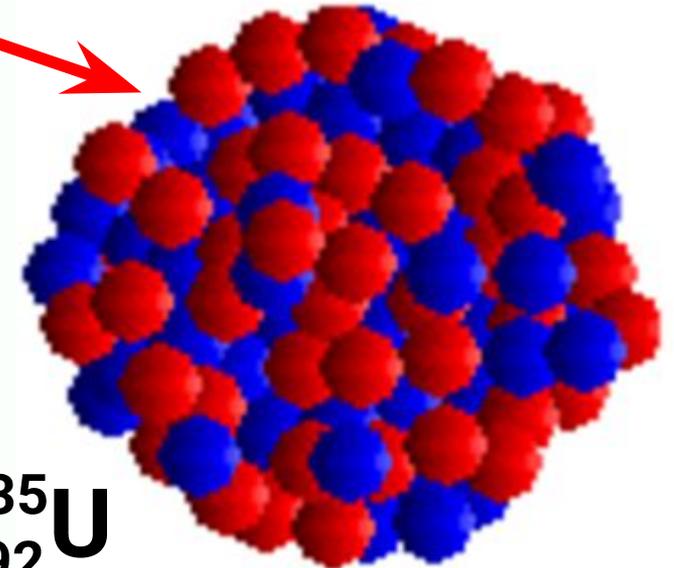
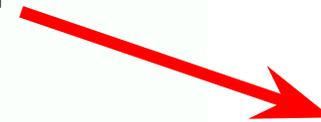
171 МэВ, с учётом

тепловыделения β -активных

осколочных радионуклидов

около 200 МэВ.

^1_0n



$^{235}_{92}\text{U}$

ОЦЕНИМ ЭНЕРГИЮ ДЕЛЕНИЯ ^{235}U :



m , а. е. м. 235,043930 1,008665 93,934140 138,908841 1,008665

Дефект массы равен

0,183619 а. е. м. или **171** МэВ,

с учётом тепловыделения β -

активных осколочных

радионуклидов — около

210 МэВ.

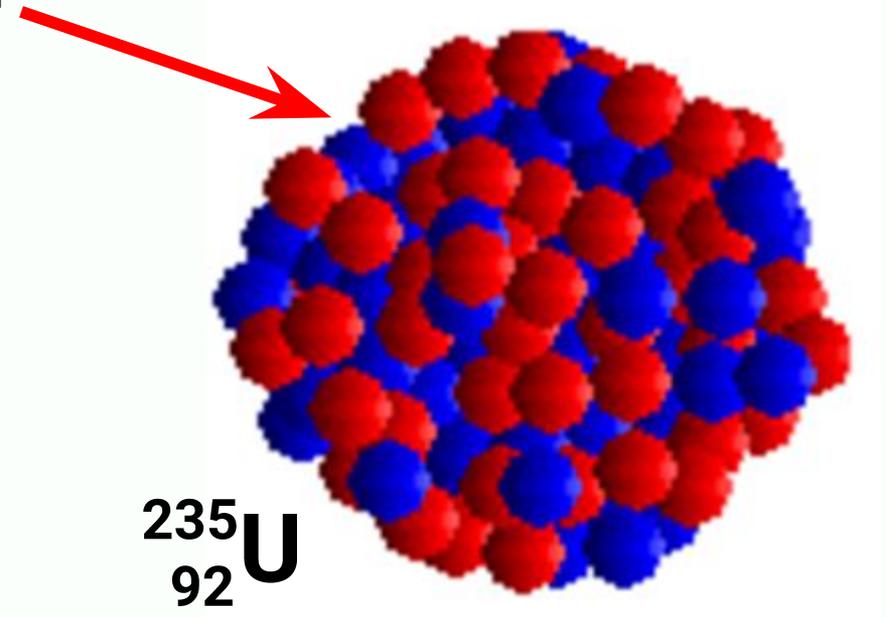
Считается, что в тепло

превращается **200** МэВ

(5 % энергии уносится с

антинейтрино)

^1_0n



ЗАДАЧА. Сколько граммов урана-235 расщепляется за сутки работы атомной электростанции, электрическая мощность которой 10^9 Вт (1 ГВт)? Дефект массы при делении ядра урана равен 0,225 а. е. м. КПД преобразования тепловой энергии в электрическую на АЭС составляет 30 %.

ЗАДАЧА. Сколько граммов урана-235 расщепляется за сутки работы атомной электростанции, электрическая мощность которой 10^9 Вт (1 ГВт)? Дефект массы при делении ядра урана равен 0,225 а. е. м. КПД преобразования тепловой энергии в электрическую на АЭС составляет 30 %.

РЕШЕНИЕ.

1) Найдем общую мощность АЭС (т. н. тепловую мощность).

$$W = E_{\text{эл}} / \text{КПД} = 10^9 / 0,3 = 3,3 \cdot 10^9 \text{ (Вт)}$$

2) Энергия, вырабатываемая за сутки:

$$E_{\text{сут}} = 3,3 \cdot 10^9 \cdot 24 \cdot 3600 = \mathbf{2,85 \cdot 10^{14} \text{ (Дж/сут)}}$$

3) Энергия, выделяемая при делении 1 моля ядер урана-235:

$$E_{\text{дел}} = 0,225 \cdot 10^{-3} \text{ (кг)} \cdot (3 \cdot 10^8 \text{ м/с})^2 = \mathbf{2,03 \cdot 10^{13} \text{ (Дж/моль)}}$$

4) Количество вещества, делящегося в сутки

$$\nu = E_{\text{сут}} / E_{\text{дел}} = 2,85 \cdot 10^{14} / 2,03 \cdot 10^{13} = 14,0 \text{ (моль)}$$

$$m(\text{U-235}) = 14,0 \cdot 235 = 3300 \text{ (г)} = \mathbf{\underline{3,3 \text{ кг}}}$$

ЗАДАЧА. Какое количество воды, взятой при 0°C можно перевести в пар, если использовать все тепло, выделяющееся при образовании из протонов и нейтронов 0,2 г гелия? Результат представьте в тоннах (т) и округлите до целого числа.

Удельная теплота парообразования $r = 2,3 \cdot 10^6$ Дж/кг,

удельная теплоемкость воды $c_{\text{уд}} = 4190$ Дж/(кг·К),

масса атома ${}^4\text{He}$ 4,002603;

масса нейтрона 1,008665,

масса атома водорода 1,007825.

ЗАДАЧА. Какое количество воды, взятой при 0°C можно перевести в пар, если использовать все тепло, выделяющееся при образовании из протонов и нейтронов 0,2 г гелия? Результат представьте в тоннах (т) и округлите до целого числа.

Удельная теплота парообразования $r = 2,3 \cdot 10^6$ Дж/кг,

удельная теплоемкость воды $c_{\text{уд}} = 4190$ Дж/(кг·К),

Масса атома ${}^4\text{He}$ 4,002603;

масса нейтрона 1,008665,

масса атома водорода 1,007825.

РЕШЕНИЕ.

$$\Delta m = 2 \cdot 1,007825 + 2 \cdot 1,008665 - 4,002603 = 0,030377 \text{ (а. е. м.)}$$

Или $\Delta M = 0,030377$ г/моль.

ЗАДАЧА. Какое количество воды, взятой при 0°C можно перевести в пар, если использовать все тепло, выделяющееся при образовании из протонов и нейтронов 0,2 г гелия? Результат представьте в тоннах (т) и округлите до целого числа.

Удельная теплота парообразования $r = 2,3 \cdot 10^6$ Дж/кг,

удельная теплоемкость воды $c_{\text{уд}} = 4190$ Дж/(кг·К),

Масса атома ${}^4\text{He}$ 4,002603;

масса нейтрона 1,008665,

масса атома водорода 1,007825.

РЕШЕНИЕ.

$$\Delta m = 2 \cdot 1,007825 + 2 \cdot 1,008665 - 4,002603 = 0,030377 \text{ (а. е. м.)}$$

Или $\Delta M = 0,030377$ г/моль.

$$\nu(\text{He}) = 0,2/4 = 0,05 \text{ (моль)}.$$

$$\text{Дефект массы на } 0,05 \text{ моль He: } 0,05 \cdot 0,030377 = 3,0377 \cdot 10^{-3} \text{ г} = 1,519 \cdot 10^{-6} \text{ кг}$$

ЗАДАЧА. Какое количество воды, взятой при 0°C можно перевести в пар, если использовать все тепло, выделяющееся при образовании из протонов и нейтронов 0,2 г гелия? Результат представьте в тоннах (т) и округлите до целого числа.

Удельная теплота парообразования $r = 2,3 \cdot 10^6$ Дж/кг,

удельная теплоемкость воды $c_{\text{уд}} = 4190$ Дж/(кг·К),

Масса атома ${}^4\text{He}$ 4,002603;

масса нейтрона 1,008665,

масса атома водорода 1,007825.

РЕШЕНИЕ.

$$\Delta m = 2 \cdot 1,007825 + 2 \cdot 1,008665 - 4,002603 = 0,030377 \text{ (а. е. м.)}$$

Или $\Delta M = 0,030377$ г/моль.

$$\nu(\text{He}) = 0,2/4 = 0,05 \text{ (моль)}.$$

Дефект массы на 0,05 моль He: $0,05 \cdot 0,030377 = 3,0377 \cdot 10^{-3}$ г = $1,519 \cdot 10^{-6}$ кг

$$E = mc^2 = 1,519 \cdot 10^{-6} \cdot (3 \cdot 10^8)^2 = 1,367 \cdot 10^{11} \text{ (Дж)}$$

Энергия должна пойти на нагревание воды и ее испарение:

$$E = m(c_{\text{уд}} \cdot \Delta T + r);$$

ЗАДАЧА. Какое количество воды, взятой при 0°C можно перевести в пар, если использовать все тепло, выделяющееся при образовании из протонов и нейтронов 0,2 г гелия? Результат представьте в тоннах (т) и округлите до целого числа.

Удельная теплота парообразования $r = 2,3 \cdot 10^6$ Дж/кг,

удельная теплоемкость воды $c_{\text{уд}} = 4190$ Дж/(кг·К),

Масса атома ${}^4\text{He}$ 4,002603;

масса нейтрона 1,008665,

масса атома водорода 1,007825.

РЕШЕНИЕ.

$$\Delta m = 2 \cdot 1,007825 + 2 \cdot 1,008665 - 4,002603 = 0,030377 \text{ (а. е. м.)}$$

Или $\Delta M = 0,030377$ г/моль.

$$\nu(\text{He}) = 0,2/4 = 0,05 \text{ (моль)}.$$

Дефект массы на 0,05 моль He: $0,05 \cdot 0,030377 = 3,0377 \cdot 10^{-3}$ г = $1,519 \cdot 10^{-6}$ кг

$$E = mc^2 = 1,519 \cdot 10^{-6} \cdot (3 \cdot 10^8)^2 = 1,367 \cdot 10^{11} \text{ (Дж)}$$

Энергия должна пойти на нагревание воды и ее испарение:

$$E = m(c_{\text{уд}} \cdot \Delta T + r);$$

$$1,367 \cdot 10^{11} = m(4190 \cdot 100 + 2,3 \cdot 10^6);$$

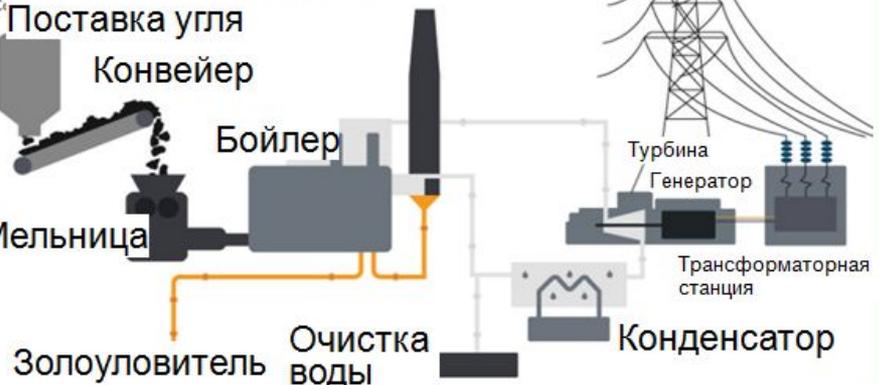
$$m = 50275 \text{ кг} \approx \underline{\underline{50 \text{ т}}}$$

Сравним энерговыделение в химических и ядерных реакциях:

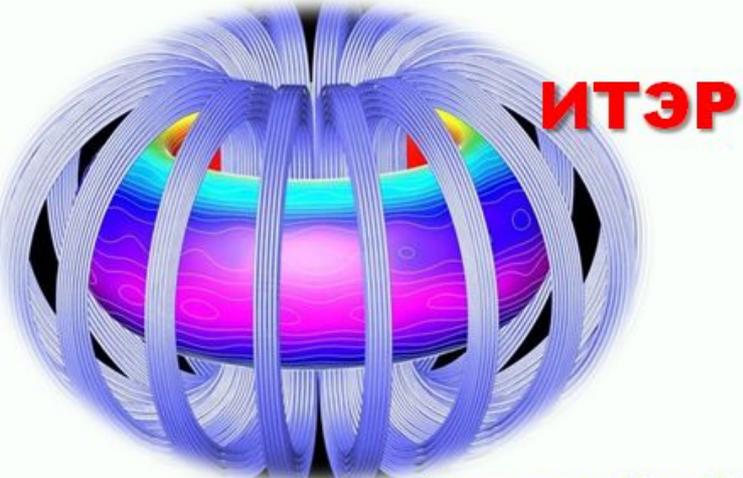


+ 150 тыс. т угля на складе

100 ваг/сут

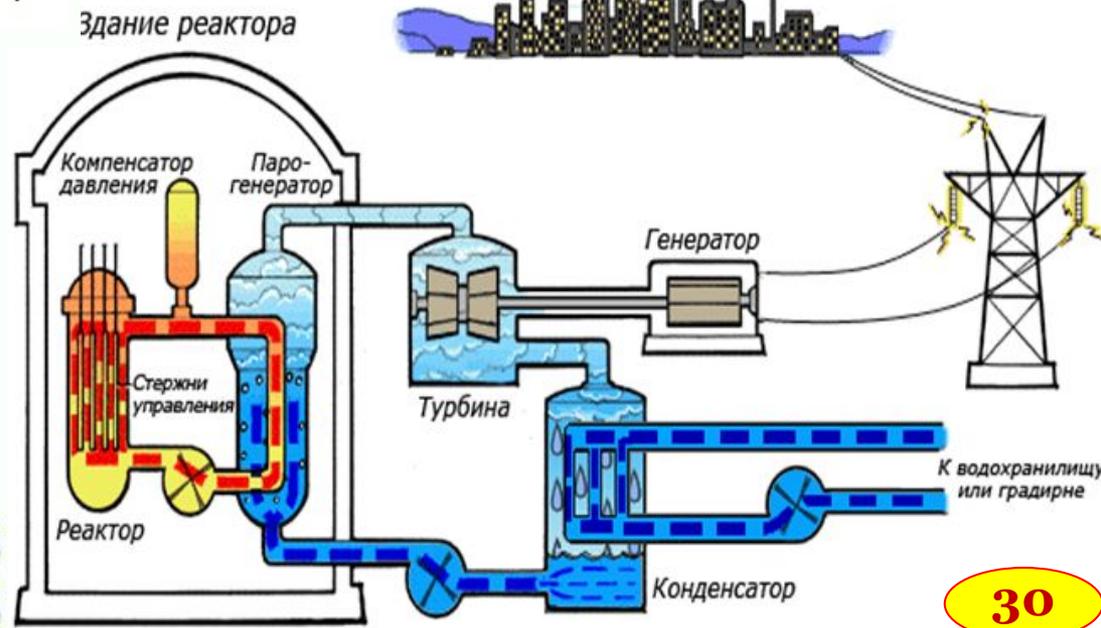


ТОПЛИВО	Q, Дж/г	K
Уголь	$30 \cdot 10^3$	1
Нефть	$44 \cdot 10^3$	1,5
Газ (метан)	$50 \cdot 10^3$	1,7
Водород	$141 \cdot 10^3$	4,7
Деление ^{235}U	$82 \cdot 10^9$	3 млн
Синтез ядер	$350 \cdot 10^9$	12 млн

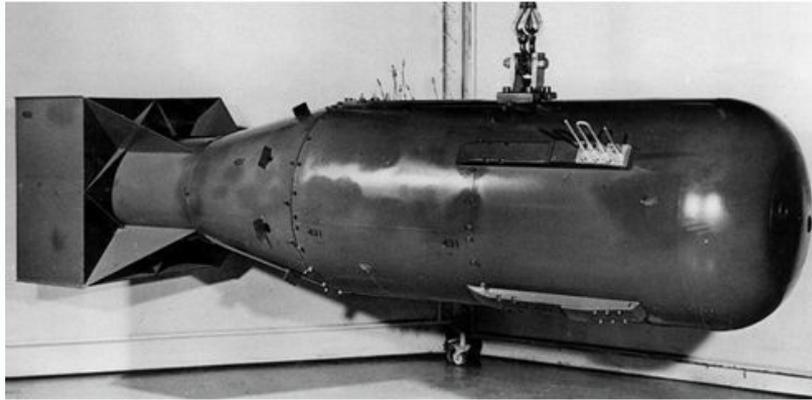


ИТЭР

План: 5 млрд € к 2016
Пересмотрен: 19 млрд € к 2025



16.07.1945 – атомная бомба “Gadget”
(20 кт ТНТ, Аламогордо, США, ^{239}Pu) ▶



16 мс после детонации



**Троитиловый эквивалент
≈ 4200 Дж/г-ТНТ**

06.08.1945 – Little boy (Малыш)
(64 кг ^{235}U , 13 кт ТНТ)



08.08.1945 – Fat man (Толстяк)
(6,2 кг ^{239}Pu , 21 кт ТНТ)

Зачем в снарядах пушечного («Малыш») и имплозивного типов («Толстяк») химическая взрывчатка?

ЗАДАЧА. Рассчитайте, какая масса урана-235 выгорела при взрыве бомбы Малыш (Little boy), какое количество массы превратилось в энергию и КПД (если так можно выразиться) взрыва.

Мощность Little boy	13 кт ТНТ
Тротиловый эквивалент:	1 г ТНТ \approx 4200 Дж
Энергия одного деления	210 МэВ
Масса урана-235	64 кг

РЕШЕНИЕ. Найдем «пропавшую» массу урана (дефект массы). Для этого выделившуюся энергию пересчитаем в массу

$$\Delta m = \frac{E}{c^2} = \frac{13 \cdot 10^9 (\text{г}) \cdot 4200 (\text{Дж/г})}{(3 \cdot 10^8 \text{ м/с})^2} \cong 6 \cdot 10^{-4} (\text{кг}) \cong 600 \text{ мг}$$

РЕШЕНИЕ. Найдем «пропавшую» массу урана (дефект массы). Для этого выделившуюся энергию пересчитаем в массу

$$\Delta m = \frac{E}{c^2} = \frac{13 \cdot 10^9 (\text{г}) \cdot 4200 (\text{Дж/г})}{(3 \cdot 10^8 \text{ м/с})^2} \cong 6 \cdot 10^{-4} (\text{кг}) \cong 600 \text{ мг}$$

Для определения количества ядер поделившегося урана-235 необходимо энергию взрыва поделить на энергию одного деления. Затем определить количество вещества и его массу

$$m(\text{U}) = \frac{N_{\text{делений}} \cdot 235}{N_{\text{А}}} = \frac{E_{\text{взрыва}} \cdot 235}{E_{\text{деления}} \cdot N_{\text{А}}} = \frac{13 \cdot 10^9 (\text{г}) \cdot 4200 (\text{Дж/г}) \cdot 235 (\text{г/моль})}{210 \cdot 10^6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} (\text{Дж/эВ}) \cdot 6,02 \cdot 10^{23} (\text{моль}^{-1})} \cong 630 \text{ г}$$

РЕШЕНИЕ. Найдем «пропавшую» массу урана (дефект массы). Для этого выделившуюся энергию пересчитаем в массу

$$\Delta m = \frac{E}{c^2} = \frac{13 \cdot 10^9 (\text{г}) \cdot 4200 (\text{Дж/г})}{(3 \cdot 10^8 \text{ м/с})^2} \cong 6 \cdot 10^{-4} (\text{кг}) \cong 600 \text{ мг}$$

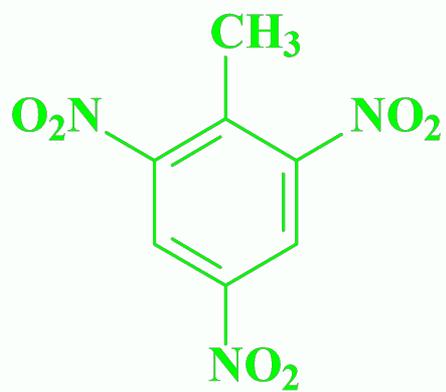
Для определения количества ядер поделившегося урана-235 необходимо энергию взрыва поделить на энергию одного деления. Затем определить количество вещества и его массу

$$m(\text{U}) = \frac{N_{\text{делений}} \cdot 235}{N_{\text{А}}} = \frac{E_{\text{взрыва}} \cdot 235}{E_{\text{деления}} \cdot N_{\text{А}}} = \frac{13 \cdot 10^9 (\text{г}) \cdot 4200 (\text{Дж/г}) \cdot 235 (\text{г/моль})}{210 \cdot 10^6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} (\text{Дж/эВ}) \cdot 6,02 \cdot 10^{23} (\text{моль}^{-1})} \cong 630 \text{ г}$$

Рассчитаем, какая доля урана-235 поделилась

$$\omega(\text{U}) = \frac{630}{64000} \cdot 100\% \cong 1\%$$

Очевидно, остальные 99 % высокообогащенного урана разметало в атмосфере наряду с продуктами деления



При взрыве 1 г TNT
выделяется энергия
 $4,2 \cdot 10^3$ Дж

При делении 1 г **^{235}U** выделяется энергия
 $8,2 \cdot 10^{10}$ Дж



Энергии химического и ядерного превращений
отличаются в **20** млн раз!!!

- Атомные бомбы были использованы во время войны лишь однажды в 1945 г. когда были уничтожены японские города – Хиросима и Нагасаки.
- Япония в это время фактически потерпела поражение в войне, но еще не капитулировала.
- Число погибших и масштабы разрушений были столь ужасными, что во всех последующих конфликтах сражающиеся стороны воздерживались от применения ядерного оружия

ЗАДАЧА. Объясните, почему удельная теплота сгорания ТНТ (тринитротолуола) 16 кДж/г существенно больше удельного энергосодержания при взрыве – около 4,2 кДж/г? Предположите, какие продукты образуются в результате взрыва

Вещество	$\text{H}_2\text{O}_{(г)}$	CO	CO_2
Q, кДж/моль	281,8	110,5	393,5

ЗАДАЧА. Объясните, почему удельная теплота сгорания ТНТ (тринитротолуола) 16 кДж/г существенно больше удельного энерговыделения при взрыве – около 4,2 кДж/г? Предположите, какие продукты образуются в результате взрыва

Вещество	H ₂ O _(г)	CO	CO ₂
Q, кДж/моль	281,8	110,5	393,5

РЕШЕНИЕ.

Уравнение взрыва ТНТ: $2C_7H_5N_3O_6 = 12CO + 2C + 5H_2 + 3N_2$ (1а)

или: $2C_7H_5N_3O_6 = 14C + 5H_2O + 3N_2$ (1б)

Уравнение горения ТНТ: $2C_7H_5N_3O_6 + 10,5O_2 = 14CO_2 + 5H_2O + 3N_2$ (2)

Теплота реакции (1а)

	$2C_7H_5N_3O_6$	=	$12CO$	+	$2C$	+	$5H_2$	+	$3N_2$
Q, кДж/моль	Q		110,5		0		0		0

$$\underline{Q_{1p} = 552,5 - Q}$$

Теплота реакции (2)

	$2C_7H_5N_3O_6$	+	$10,5O_2$	=	$14CO_2$	+	$5H_2O$	+	$3N_2$
Q, кДж/моль	Q		0		393,5		281,8		0

$$\underline{Q_{2p} = 6918 - Q}$$

Разность в теплотах реакций составляет 6365 кДж, или 3183 кДж/моль-ТНТ

Разность в удельных теплотах составляет $3183/227 = \underline{14 \text{ кДж/г-ТНТ}}$

Расчёты с использованием уравнения (2б) дают разность около

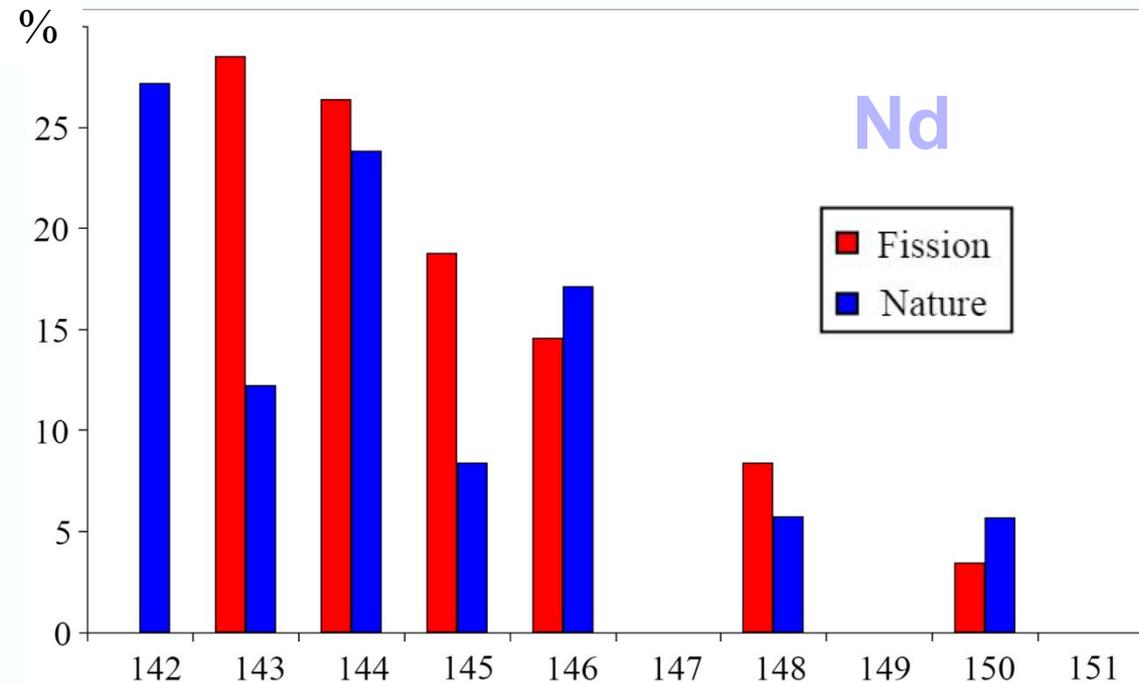
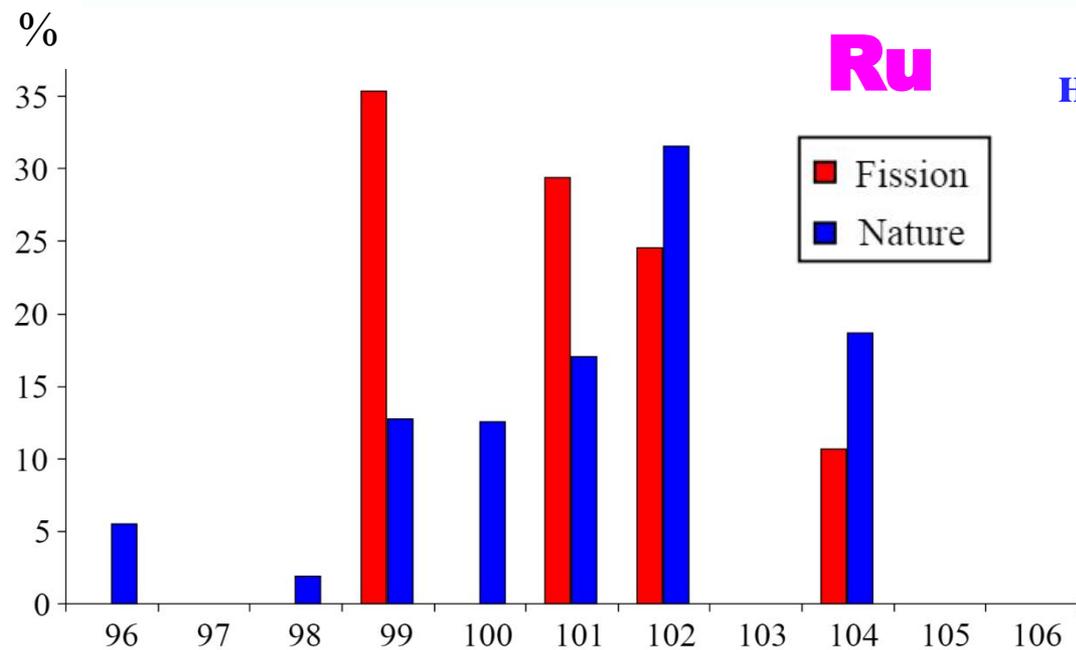
12 кДж/г-ТНТ, что ближе к данным задачи. Вероятно образуются продукты реакции (2б)

Природный ядерный

реактор

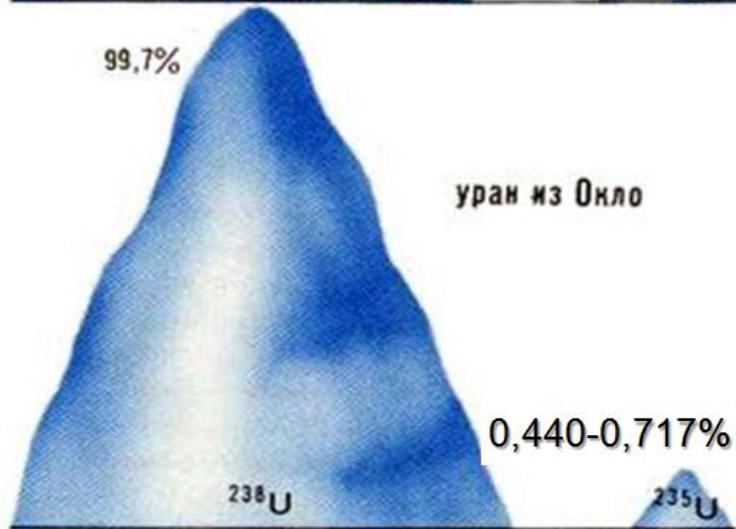
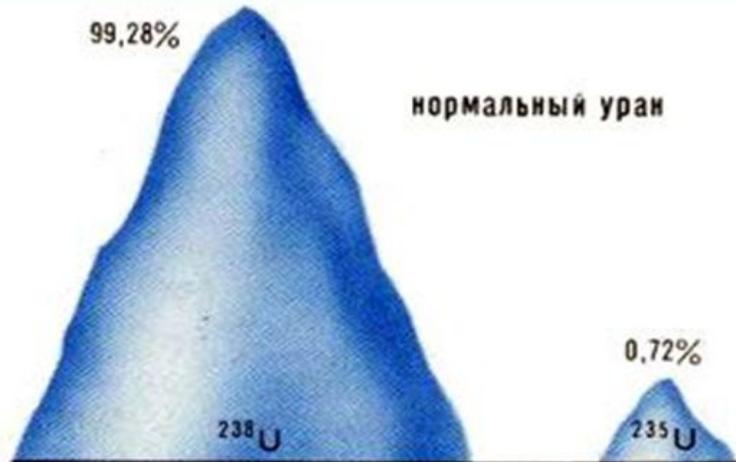
- В 1972 г. на урановой обогатительной фабрике (Франция) во время масс-спектрометрического анализа UF_6 из Окло (Габон) было обнаружено отклонение от нормы изотопного состава урана. Содержание ^{235}U составило **0,717%** вместо обычных **0,720%**.
- Так как все ядерные объекты подвергаются жёсткому контролю с целью недопущения нелегального использования делящихся материалов в военных целях, это расхождение требовало объяснения.
- Французский Комиссариат атомной энергетики (**CEA**) начал расследование. Серия измерений обнаружила значительные отклонения изотопного отношения $^{235}U/^{238}U$ в нескольких шахтах. В одной из шахт содержание ^{235}U составило **0,440 %**.
- Уменьшение концентрации изотопа ^{235}U является характерной чертой **отработавшего ядерного топлива**, так как именно этот изотоп является основным делящимся материалом уранового ядерного реактора.
- Были обнаружены также **аномалии в распределении изотопов неодима и рутения**.

Изотопный состав рутения и неодима в естественной среде и в урановом месторождении Окло

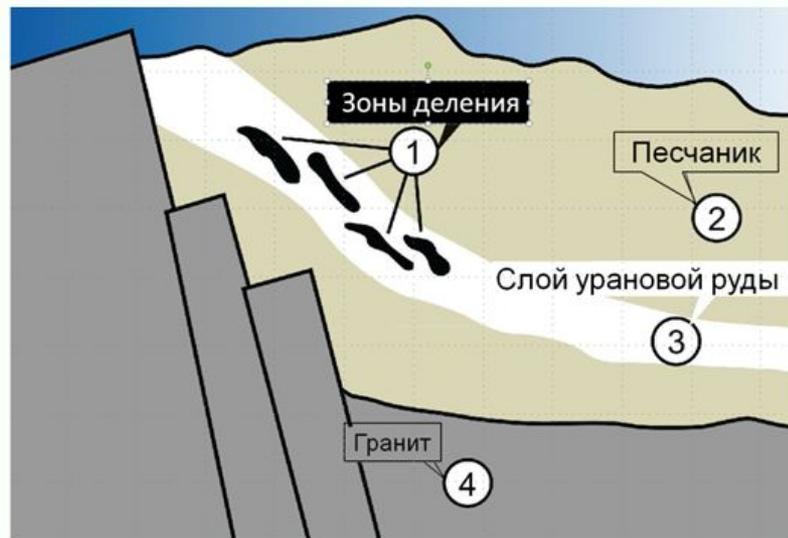


- Повышенное содержание ^{99}Ru и ^{101}Ru характерно для нуклидов **осколочного происхождения** (продуктов деления урана-235)
- 25 сентября 1972 года СЕА объявила об открытии **естественной самоподдерживающейся реакции ядерного деления.**
- Следы протекания таких реакций были обнаружены в общей сложности в **16** точках

Естественный ядерный реактор в теле уранового месторождения на юго-востоке Габона в западной Африке.



- Заработал реактор около 2 млрд лет назад.
- При спонтанном делении урана возникали нейтроны. Роль замедлителя исполняла вода, она просачивалась к урану и запускала ядерную реакцию.
- Затем закипала и испарялась, в результате чего цепная реакция на время приостанавливалась.
- На охлаждение реактора и накопление воды требовались примерно 2,5 ч, а длительность активного периода составляла ≈ 30 мин.
- То вспыхивая, то угасая, реактор с мощностью 100 кВт проработал $\approx 0,5$ млн лет
- Большинство нелетучих продуктов деления и актиноидов за прошедшие 2 млрд лет диффундировали лишь на см. Это позволило



е.

ВЫВОД

ы

- Реализация ядерных сил обуславливает пониженную потенциальную энергию связанной системы – ядра
- Масса атомного ядра меньше суммы масс нуклонов, его составляющих
- Разность между суммой масс разрозненных нуклонов и массой ядра называется дефектом массы.
- Дефект массы, выраженный в единицах энергии называется энергией связи ядра. $1 \text{ а. е. м.} \approx 931,49 \text{ МэВ}$
- Энергия связи, приходящаяся на один нуклон, называется удельной энергией связи. Она имеет наибольшее значение в области «железного максимума» (железо, кобальт, никель)
- Более легкие ядра потенциально неустойчивы по отношению к ядерным реакциям синтеза, а более тяжелые – по отношению к реакциям деления. В обоих случаях выделяется энергия.
- Энерговыделение в ядерных реакциях синтеза и деления на 6 порядков превышает тепловой эффект химических реакций

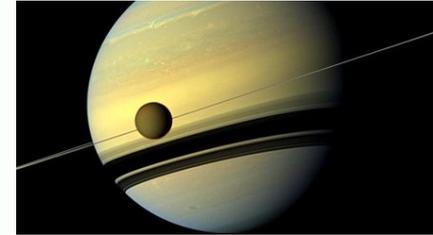
- В конце 2015 г. в мире насчитывалось **441** действующий ядерный энергетический реактор, общемировая генерирующая мощность АЭС составляла **383** ГВт (эл.).
- 5 реакторов были окончательно остановлены, 10 – подключены к энергосетям – наивысший показатель с 1990 г. – и начато строительство 8 новых реакторов.
- Из всех 68 строящихся реакторов 45 находились в Азии, там же размещались 39 из 45 реакторов, которые были подключены к энергосетям после 2005 г.
- Ядерно-энергетическими мощностями располагают **30** стран, такое же число стран изучают возможность включения ядерной энергетики в национальную структуру энергопроизводства.
- По прогнозам, выполненным Агентством в 2015 г., к 2030 г. мощность ядерной энергетики при низком сценарии возрастет примерно на 2 % и при высоком сценарии – на 70 %
- Благодаря исключению выбросов почти **2** млрд т CO₂ ежегодно, ядерная энергетика непосредственно способствует достижению целей устойчивого развития общества.
- Объемы отработавшего ядерного топлива, находящегося на хранении, достигли примерно **266** кт ТМ, при этом темпы его накопления составляют около **7** кт ТМ/год. Переработка ОЯТ коммерческих реакторов по-прежнему осуществлялась на 10 установках в пяти

ЗАДАЧА. «Кассини» – межпланетная автоматическая станция была запущена в октябре 1997 г. Для исследования колец Сатурна и доставки аппарата «Гюйгенс» на Титан.

Источником тепловой и электрической энергии является радиоизотопный электрический генератор (РИТЭГ), содержащий 33 кг ^{238}Pu (в виде диоксида плутония).

^{238}Pu распадается α -распадом с $T_{1/2} = 87,7$ лет. Энергия распада 5,593 МэВ.

В конце 2011 г. РИТЭГ был способен вырабатывать 628 Вт. Определите коэффициент преобразования энергии распада в электрическую (всю энергию распада считать тепловой).

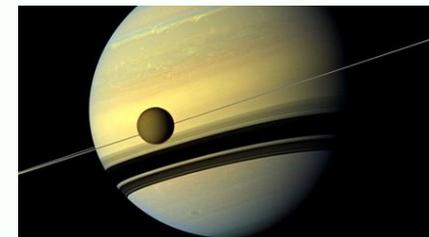
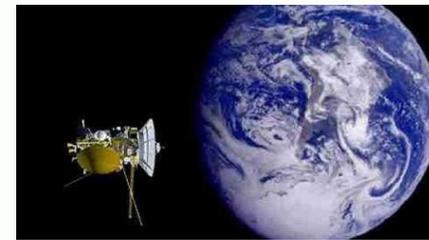


ЗАДАЧА. «Кассини» – межпланетная автоматическая станция была запущена в октябре 1997 г. Для исследования колец Сатурна и доставки аппарата «Гюйгенс» на Титан.

Источником тепловой и электрической энергии является радиоизотопный электрический генератор (РИТЭГ), содержащий 33 кг ^{238}Pu (в виде диоксида плутония).

^{238}Pu распадается α -распадом с $T_{1/2} = 87,7$ лет. Энергия распада 5,593 МэВ.

В конце 2011 г. РИТЭГ был способен вырабатывать 628 Вт. Определите коэффициент преобразования энергии распада в электрическую (всю энергию распада считать тепловой).



РЕШЕНИЕ. Найдем начальную активность РИТЭГа

$$A_0 = \lambda N_0 = \frac{\ln 2 \cdot m_0}{T_{1/2} \cdot M} N_A = \frac{0,693 \cdot 33000 \cdot 6,02 \cdot 10^{23}}{87,7 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600 \cdot 238} = 2,09 \cdot 10^{16} \text{ (Бк)}$$

Через 14 лет активность уменьшится до: $A_{14} = A_0 \cdot e^{-\frac{0,693 \cdot 14}{87,7}} = 1,87 \cdot 10^{16} \text{ (Бк)}$

Тепловыделение в 1 с $Q = A \cdot E_{\text{распада}} = 1,87 \cdot 10^{16} \cdot 5,593 \cdot 10^6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} = 16700 \text{ (Вт)}$

КПД = $628/16700 \cdot 100 \text{ \%} = \underline{\underline{3,8 \text{ \%}}}$

Топливные таблетки UO_2



Характеристики топливной таблетки (UO_2)

h	9-15 мм	$\varnothing_{\text{табл}}$	7,57 мм
$\varnothing_{\text{отв}}$	1,2 мм	$m(^{235}\text{U})$	0,30 г
6 ГДж (эл.) или 1,6 МВт-ч			

Что позволяет

непрерывно работать

➔ 3 года холодильнику

➔ 1 года ТВ LED

➔ 2 мес пылесосу

сберечь ресурсы:

■ 600 кг каменного угля

■ 400 м³ ПГ

■ 420 кг нефти

В энергоблок реактора ВВЭР-1000 загружается около 17 млн таблеток



ТВЭЛы



ТВС



ТВС квадрат

Калининская АЭС



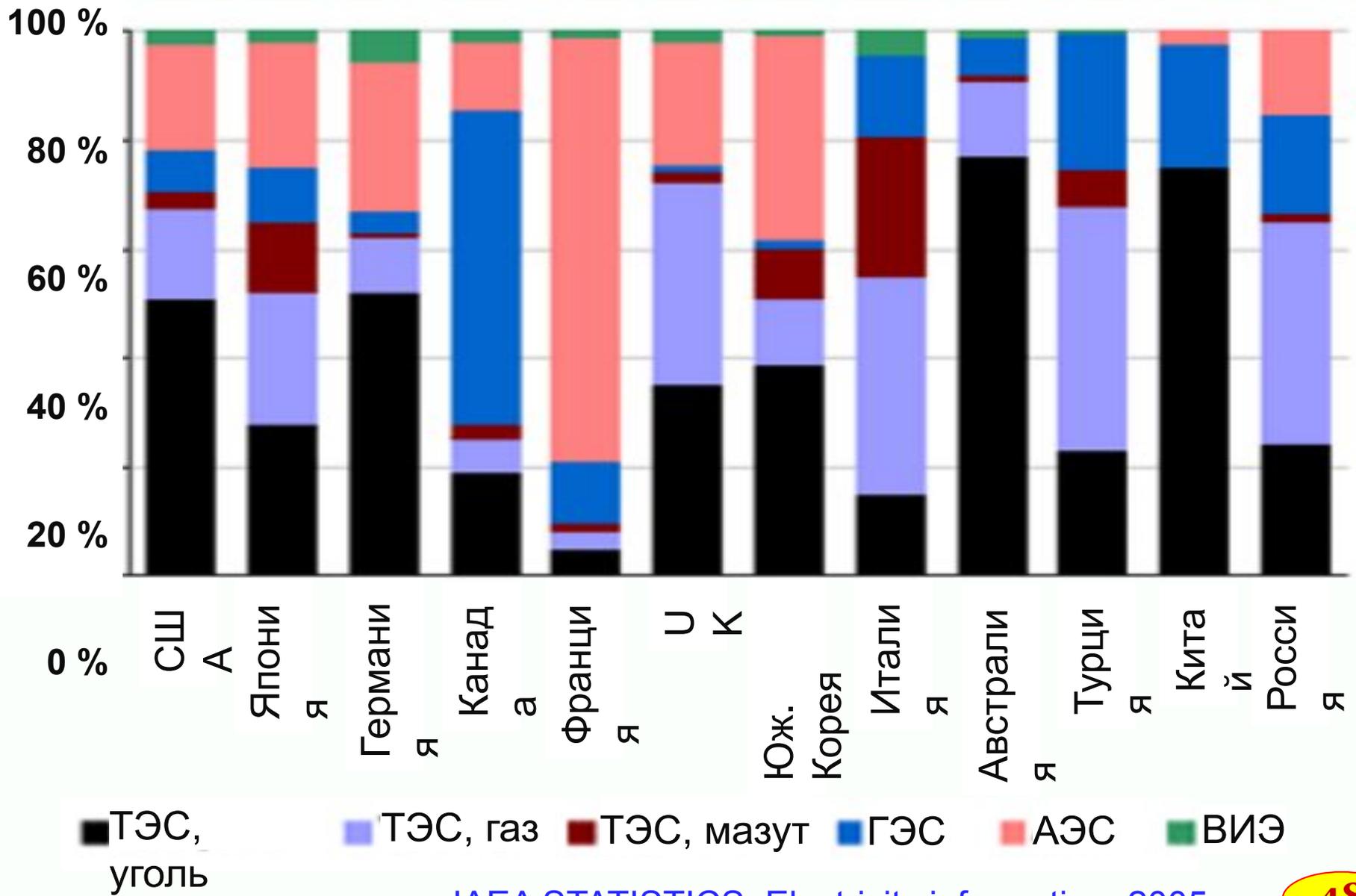
АЗ



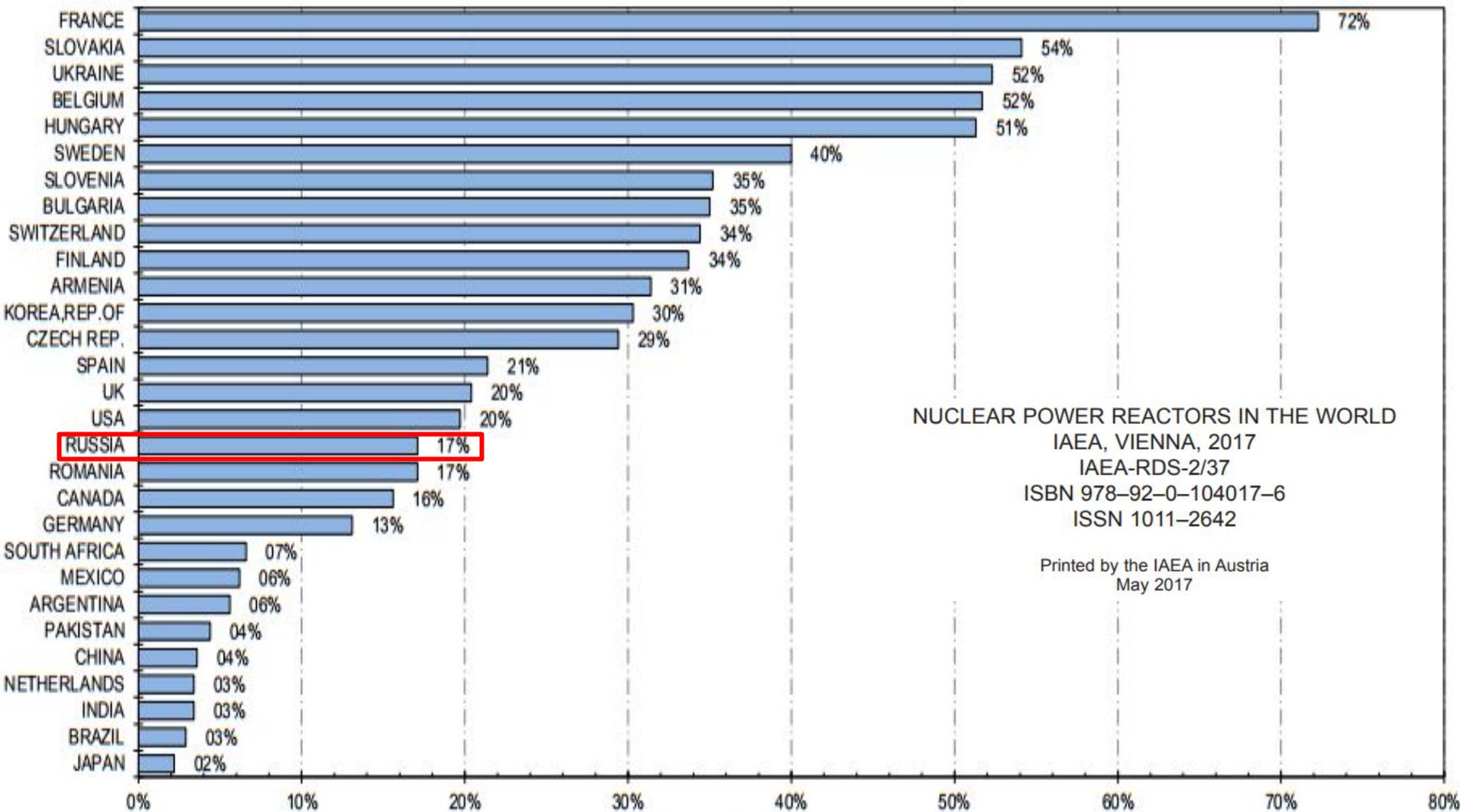
◀ Корпус реактора



ПРОБЛЕМА. Какие плюсы и минусы ядерной энергетики Вы находите? Не предаютесь ли Вы радиофобии? Или радиоэйфории?



Доля ядерной энерготики в электрогенерации (31 декабря 2016 г.)



Доля в Тайване и Китае 13,7 %

В Японии до катастрофы на Фукусима Дайичи 30 %



Правительство Италии
объявило о намерении
провести референдум
о возобновлении
ядерной
энергетики
(2010 г.)

