

Дисциплина «Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии»
для специальности «Теплоэнергетика»

Дисциплина «Проектирование и эксплуатация установок возобновляемой
энергетики»

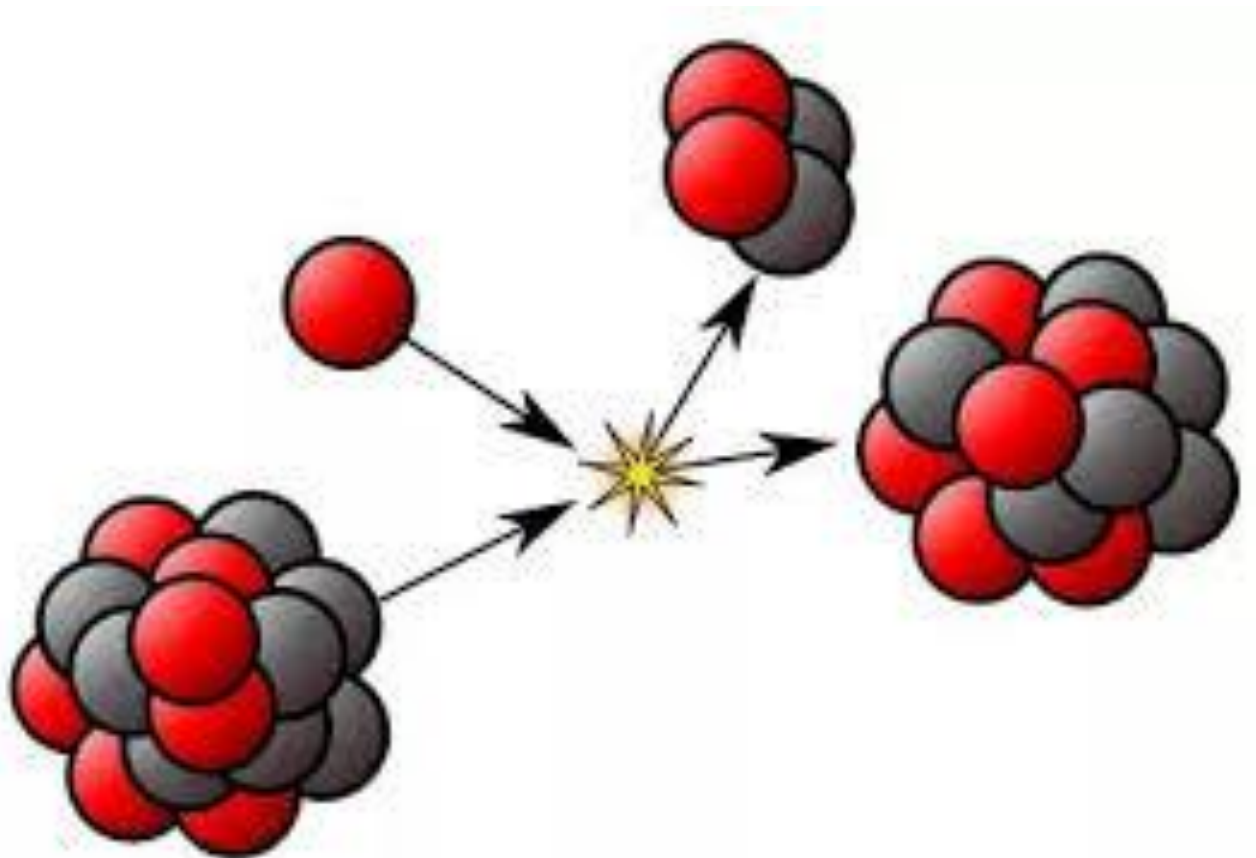
для специальности «Электроэнергетика»

Факультет энергетики, автоматики и телекоммуникации
Кафедра «Энергетические системы»

Калытка Валерий Александрович

Доктор PhD; ассоциированный профессор (доцент); доцент кафедры
«Энергетические системы»

Лекция №8. Ядерный распад. Ядерная энергетика



Лекция № 8. Ядерный распад. Ядерная энергетика

Цель лекции состоит в ознакомлении с физическими и технологическими принципами работы устройств ядерной энергетики (реакторами)

Видеоролики:

1. Ядерные реакции
(19 минут 27 секунд)

<https://www.youtube.com/watch?v=71VAAt25p7vg>

2. Ядерный реактор. Ядерная энергетика. Экологические проблемы работы атомных электростанций
(16 минут 11 секунд)

<https://www.youtube.com/watch?v=LQYzfeBHFhY>

3. Ядерная энергия в мирных целях, 1984
(16 минут 6 секунд)

<https://www.youtube.com/watch?v=4BV7D69SrII>

Радиоактивный распад

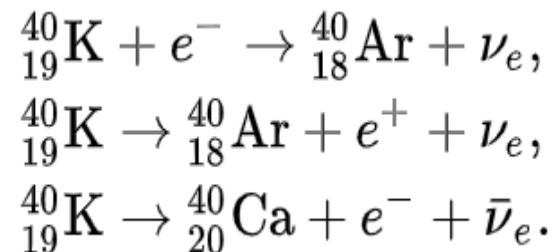
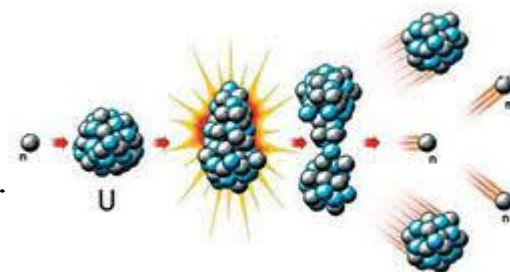
- Радиоактивный распад (от лат. *radius* «луч» и *āctīvus* «действительный», через фр. *radioactif*, букв. — «радиоактивность») — спонтанное изменение состава (заряда Z , массового числа A) или внутреннего строения нестабильных атомных ядер путём испускания элементарных частиц, гамма-квантов и/или ядерных фрагментов. Процесс радиоактивного распада также называют радиоактивностью, а соответствующие нуклиды — радиоактивными (радионуклидами). Радиоактивными называют также вещества, содержащие радиоактивные ядра.

Теория

- Естественная радиоактивность — самопроизвольный распад атомных ядер, встречающихся в природе.
- Искусственная радиоактивность — самопроизвольный распад атомных ядер, полученных искусственным путём через соответствующие ядерные реакции.
- Ядро, испытывающее радиоактивный распад, и ядро, возникающее в результате этого распада, называют соответственно материнским и дочерним ядрами.
Изменение массового числа и заряда дочернего ядра по отношению к материнскому описывается правилом смещения Содди.
- Распад, сопровождающийся испусканием альфа-частиц, называли альфа-распадом; распад, сопровождающийся испусканием бета-частиц, был назван бета-распадом (в настоящее время известно, что существуют типы бета-распада без испускания бета-частиц, однако бета-распад всегда сопровождается испусканием нейтрино или антинейтрино). Термин «гамма-распад» применяется редко; испускание ядром гамма-квантов называют обычно изомерным переходом. Гамма-излучение часто сопровождает другие типы распада, когда в результате первого этапа распада возникает дочернее ядро в возбуждённом состоянии, затем испытывающее переход в основное состояние с испусканием гамма-квантов.

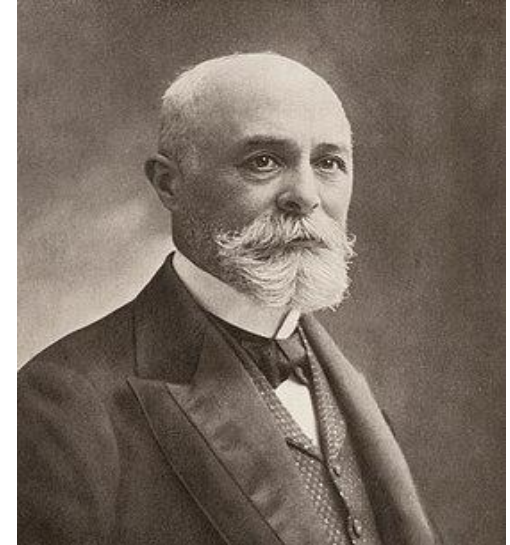
Теория

Некоторые изотопы могут испытывать одновременно два или более видов распада. Например, висмут-212 распадается с вероятностью 64 % в таллий-208 (посредством альфа-распада) и с вероятностью 36 % в полоний-212 (посредством бета-распада). Образовавшееся в результате радиоактивного распада дочернее ядро иногда оказывается также радиоактивным и через некоторое время тоже распадается. Процесс радиоактивного распада будет происходить до тех пор, пока не появится стабильное, то есть нерадиоактивное ядро. Последовательность таких распадов называется цепочкой распадов, а последовательность возникающих при этом нуклидов называется радиоактивным рядом. В частности, для радиоактивных рядов, начинающихся с урана-238, урана-235 и тория-232, конечными (стабильными) нуклидами являются соответственно свинец-206, свинец-207 и свинец-208.



История открытия

- Радиоактивность была открыта в 1896 году французским физиком А. Беккерелем. Он занимался исследованием связи люминесценции и недавно открытых рентгеновских лучей.
- Беккерелю пришла в голову мысль: не сопровождается ли всякая люминесценция рентгеновскими лучами? Для проверки своей догадки он взял несколько соединений, в том числе одну из солей урана, фосфоресцирующую жёлто-зелёным светом. Осветив её солнечным светом, он завернул соль в чёрную бумагу и положил в тёмном шкафу на фотопластинку, тоже завернутую в чёрную бумагу. Через некоторое время, проявив пластинку, Беккерель действительно увидел изображение куска соли. Но люминесцентное излучение не могло пройти через чёрную бумагу, и только рентгеновские лучи могли в этих условиях засветить пластинку. Беккерель повторил опыт несколько раз и с одинаковым успехом.



Закон радиоактивного распада

Закон радиоактивного распада — закон, открытый Фредериком Содди и Эрнестом Резерфордом экспериментальным путём и сформулированный в 1903 году. Современная формулировка закона:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N,$$

что означает, что число распадов за интервал времени t в произвольном веществе пропорционально числу N имеющихся в образце радиоактивных атомов данного типа.

Этот закон считается основным законом радиоактивности, из него было извлечено несколько важных следствий, среди которых формулировки характеристик распада — среднее время жизни атома и период полураспада.

Закон радиоактивного распада



Закон радиоактивного распада

- Слабые изменения константы распада в лабораторных условиях обнаружены лишь для электронного захвата — доступные в лаборатории температуры и давления, а также изменение химического состава способны несколько изменять плотность электронного облака в окружении ядра, что приводит к изменению скорости распада на доли процента. Однако в достаточно жёстких условиях (высокая ионизация атома, высокая плотность электронов, высокий химический потенциал нейтрино, сильные магнитные поля), труднодостижимых в лаборатории, но реализующихся, например, в ядрах звёзд, другие типы распадов тоже могут изменять свою вероятность.
- Постоянство константы радиоактивного распада позволяет измерять возраст различных природных и искусственных объектов по результатам измерения концентрации входящих в их состав радиоактивных ядер и концентрации накопленных продуктов распада. Разработан ряд методов радиоизотопного датирования, позволяющих измерять возраст объектов в диапазоне от единиц до миллиардов лет; среди них наиболее известны радиоуглеродный метод, уран-свинцовый метод, уран-гелиевый метод, калий-аргоновый метод и др.

Ядерная энергетика

- Ядерная энергетика (Атомная энергетика) — отрасль энергетики, занимающаяся производством электрической и тепловой энергии путём преобразования ядерной энергии.
- Обычно для получения ядерной энергии используют цепную ядерную реакцию деления ядер плутония-239 или урана-235. Ядра делятся при попадании в них нейтрона, при этом получаются новые нейтроны и осколки деления. Нейтроны деления и осколки деления обладают большой кинетической энергией. В результате столкновений осколков с другими атомами эта кинетическая энергия быстро преобразуется в тепло.
- Хотя в любой области энергетики первичным источником является ядерная энергия (например, энергия солнечных ядерных реакций в гидроэлектростанциях, солнечных электростанциях и электростанциях, работающих на органическом топливе, энергия радиоактивного распада в геотермальных электростанциях), к ядерной энергетике относится лишь использование управляемых реакций в ядерных реакторах.
- Ядерная энергия производится в атомных электрических станциях, используется на атомных ледоколах, атомных подводных лодках; Россия осуществляет программу создания и испытания ядерного ракетного двигателя, США прекратили программу по созданию ядерного двигателя для космических кораблей, кроме того, предпринимались попытки создать ядерный двигатель для самолётов (атомолётов) и «атомных» танков.

Технология

- Ядерная энергетика основана на использовании ядерного топлива, совокупность промышленных процессов которого составляют топливный ядерный цикл. Хотя существуют различные типы топливных циклов, зависящие как от типа реактора, так и от характеристик конечной стадии цикла, в целом у него существуют общие этапы
- В ходе эксплуатации в процессах технического обслуживания удаляются образующиеся низкорadioактивные отходы. С окончанием срока службы производится вывод из эксплуатации самого реактора, демонтаж сопровождается дезактивацией и удалением в отходы деталей реактора
- Ядерный реактор — устройство, предназначенное для организации управляемой самоподдерживающейся цепной реакции деления, которая всегда сопровождается выделением энергии.
- Первый ядерный реактор построен и запущен в декабре 1942 года в США под руководством Э. Ферми. Первым реактором, построенным за пределами США, стал ZEEP, запущенный в Канаде 5 сентября 1945 года. В Европе первым ядерным реактором стала установка Ф-1, заработавшая 25 декабря 1946 года в Москве под руководством И. В. Курчатова. К 1978 году в мире работало уже около сотни ядерных реакторов различных типов.

Ядерный распад. Ядерная энергетика

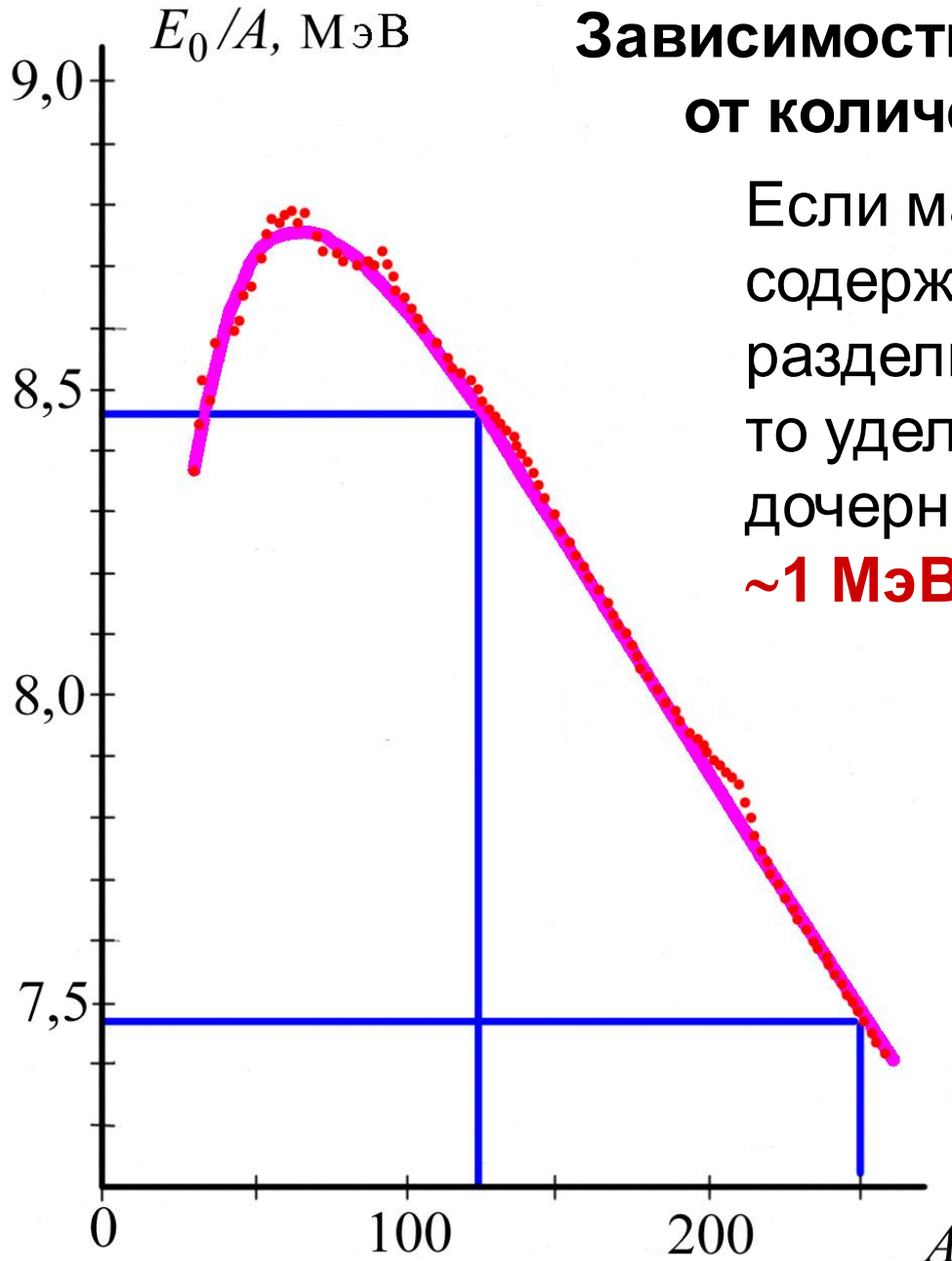
- Существуют разные типы реакторов, основные отличия в них обусловлены используемым топливом и теплоносителем, применяемым для поддержания нужной температуры активной зоны, и замедлителем, используемым для снижения скорости нейтронов, которые выделяются в результате распада ядер, для поддержания нужной скорости цепной реакции.
 - Наиболее распространенным типом является легководный реактор, использующий в качестве топлива обогащённый уран, в нём в качестве и теплоносителя, и замедлителя используется обычная вода, т. н. «лёгкая». У него есть две основные разновидности:
- кипящий реактор, где пар, вращающий турбины, образуется непосредственно в активной зоне
 - водо-водяной энергетический реактор, где пар образуется в контуре, связанном с активной зоной теплообменниками и парогенераторами.
- Газоохлаждаемый ядерный реактор с графитовым замедлителем получил широкое распространение благодаря возможности эффективно вырабатывать оружейный плутоний и возможности использовать необогащённый уран.
 - В тяжеловодном реакторе в качестве и теплоносителя, и замедлителя используется тяжёлая вода, а топливом является необогащённый уран, используется в основном в Канаде, имеющей собственные месторождения урановых руд.

Экономическое значение

- 2010 году ядерная энергия обеспечивала 12,9 % от производства электроэнергии и 5,7 % от всей потребляемой человечеством энергии, по данным Международного энергетического агентства (IEA). Ядерный сектор энергетики наиболее значителен в промышленно развитых странах, где недостаточно природных энергоресурсов — во Франции, Украине, в Бельгии, Финляндии, Швеции, Болгарии и Швейцарии. Эти страны производят от 20 до 76 % (во Франции) электроэнергии на АЭС.
- В 2013 году мировое производство ядерной энергии выросло впервые с 2010 года — по сравнению с 2012 годом произошёл рост на 0,5 % — до 6,55 млрд МВт ч (562,9 млн тонн нефтяного эквивалента). Наибольшее потребление энергии атомных станций в 2013 году составило в США — 187,9 млн тонн нефтяного эквивалента. В России потребление составило 39,1 млн тонн нефтяного эквивалента, в Китае — 25 млн тонн нефтяного эквивалента, в Индии — 7,5 млн тонн.

Лекция №8. Ядерный распад. Ядерная энергетика

Зависимость удельной энергии связи от количества нуклонов в ядре



Если массивное ядро, содержащее **~250 нуклонов** разделится примерно пополам, то удельная энергии связи дочерних ядер увеличится на **~1 МэВ**

Следовательно, потенциальная энергия ядер уменьшается, а **кинетическая энергия продуктов деления возрастает.**

Следовательно, при делении **одного** массивного ядра выделяется более **200 МэВ** энергии !

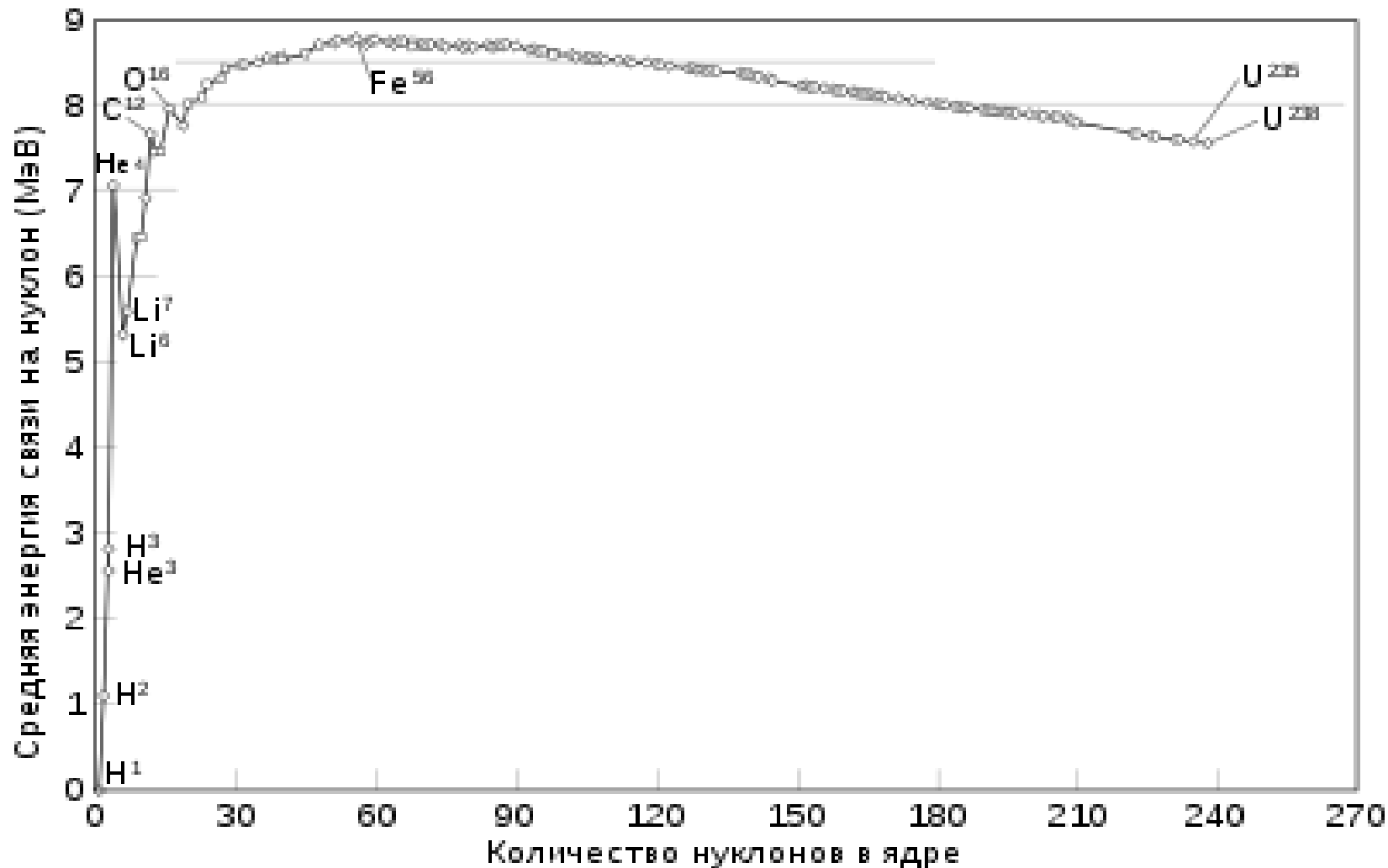
При делении **1 моля** делящегося вещества должно высвободиться **$\sim 2 \cdot 10^{13}$ Дж !!!**

Масса моля природного урана – около **0,24 кг.**

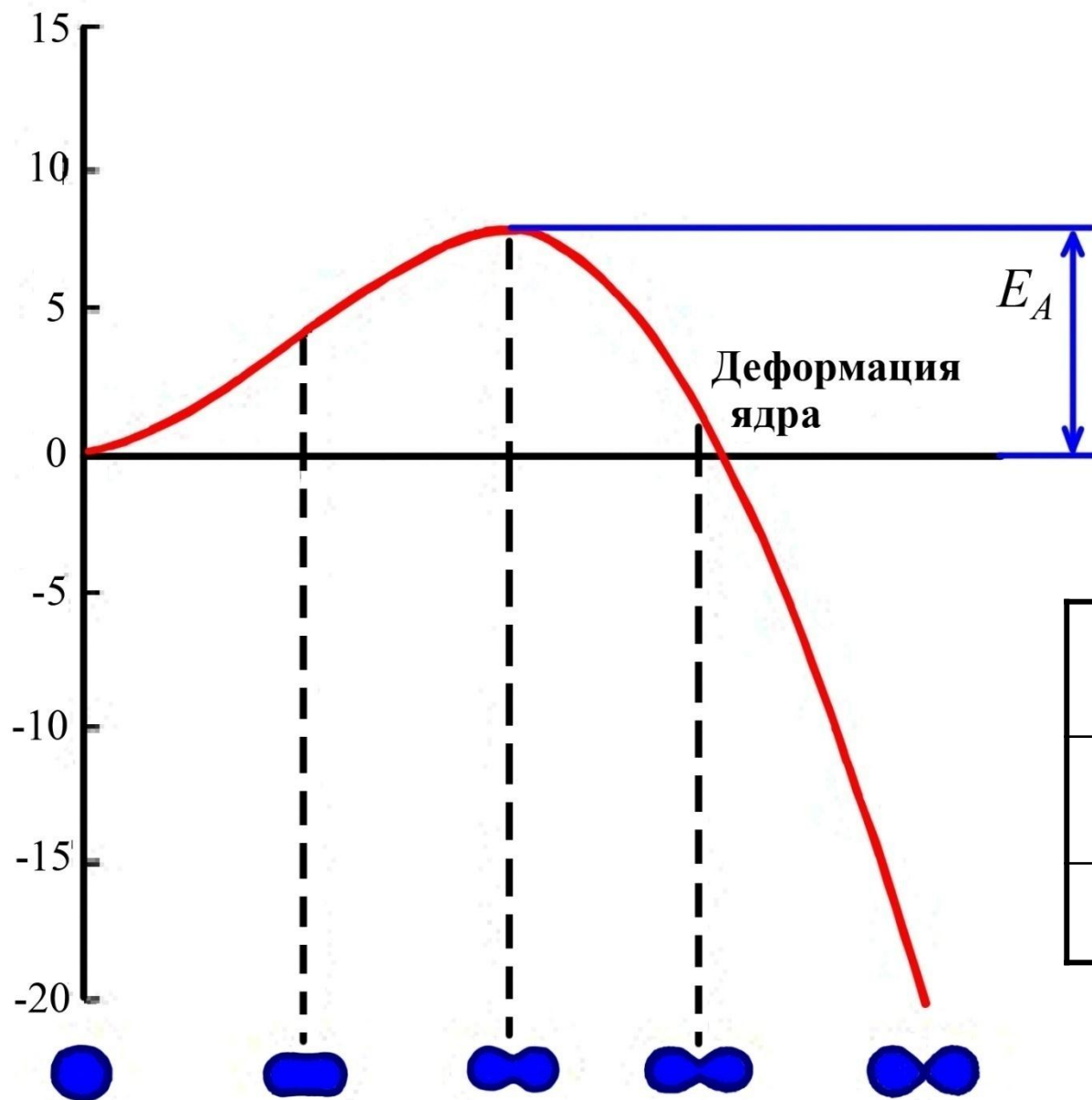
Для сравнения **удельная теплота сгорания q :**

Вещество	q (МДж/кг)
Дрова	10,2
Каменный уголь	22
Природный газ	31,8
Нефть	41

Атомные ядра состоят из двух типов нуклонов — протонов и нейтронов. Их удерживает вместе так называемое сильное взаимодействие. При этом энергия связи каждого нуклона с другими зависит от общего количества нуклонов в ядре, как показано на графике. Из графика видно, что у лёгких ядер с увеличением количества нуклонов энергия связи растёт, а у тяжёлых падает. Если добавлять нуклоны в лёгкие ядра или удалять нуклоны из тяжёлых атомов, то эта разница в энергии связи будет выделяться в виде разницы между затратами на осуществление реакции и кинетической энергией высвобождающихся частиц. Кинетическая энергия (энергия движения) частиц переходит в тепловое движение атомов после соударения частиц с атомами. Таким образом ядерная энергия проявляется в виде нагрева.



Энергия, МэВ



Для деления
массивного
ядра требуется
энергия
активации E_A

Ядро	E_A (МэВ)
U^{235}	6,5
U^{238}	7,0

Вероятность **спонтанного деления** даже массивных ядер очень мала (из-за большой толщины потенциального барьера).

Ядро	Период спонтанного полураспада $T_{1/2}$ (лет)
U^{235}	$7,04 \cdot 10^8$
U^{238}	$4,47 \cdot 10^9$

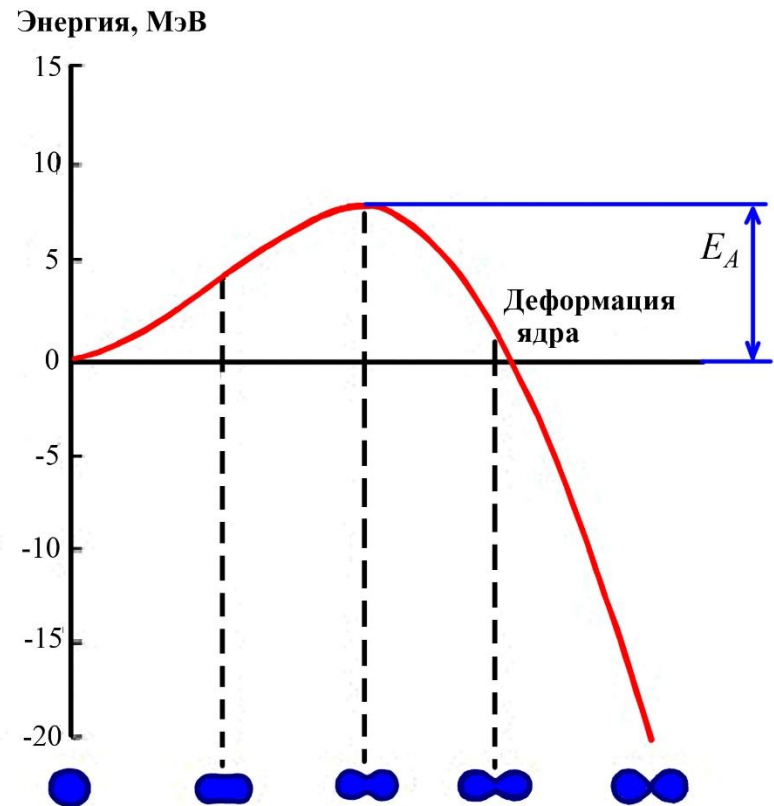
Вероятность деления в 1 сек.

$$\lambda = \ln(2) / T_{1/2}$$

Сечение реакции деления ядра после поглощения нейтрона (n, f) сравнима с сечением реакций упругого рассеяния (n, n) и радиационного захвата (n, γ) .

Следовательно, вероятность деления ядра, *инициированная нейтроном*, достаточно велика.

При поглощения нейтрона ядро получает **энергию возбуждения E^*** , равную **энергии связи** нейтрона в ядре, т.е. порядка нескольких **МэВ**, которая может **превысить** энергию активации E_A деления ядра.



Природное ядерное горючее: **уран**.

Изотопный состав: $U^{238} \approx 99,3 \%$

$U^{235} \approx 0,7 \%$

Ядра изотопа U^{235} делятся нейтронами любой малой энергии, в. т.ч. **тепловыми**.

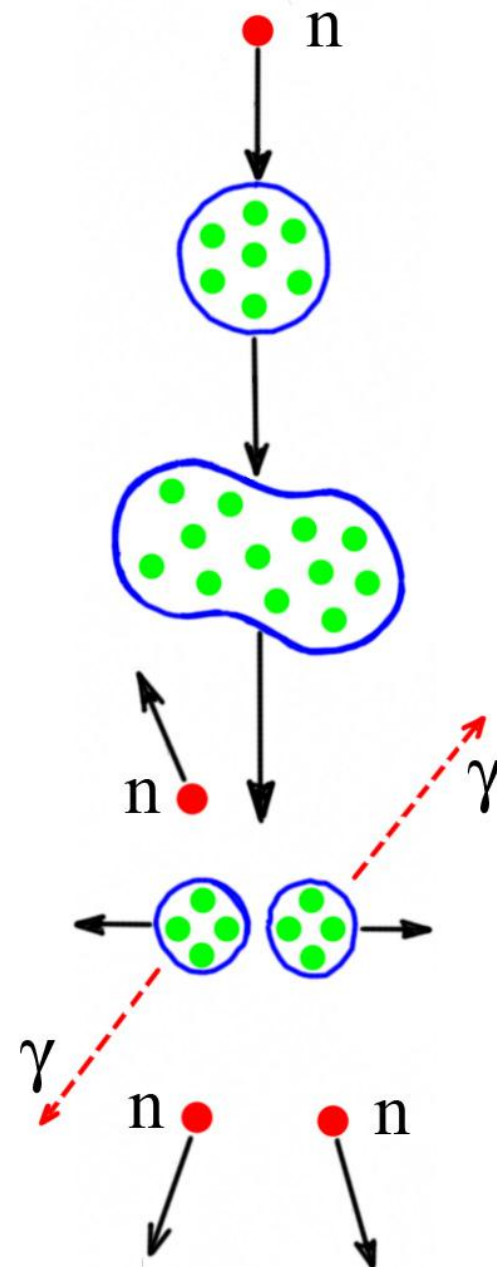
Ядра изотопа U^{238} делятся нейтронами с энергией больше **1 МэВ**, т.е. **быстрыми**.

Схема инициации нейтроном реакции деления массивного ядра.

Наиболее вероятным является деление на два **осколка** (дочерних ядра).

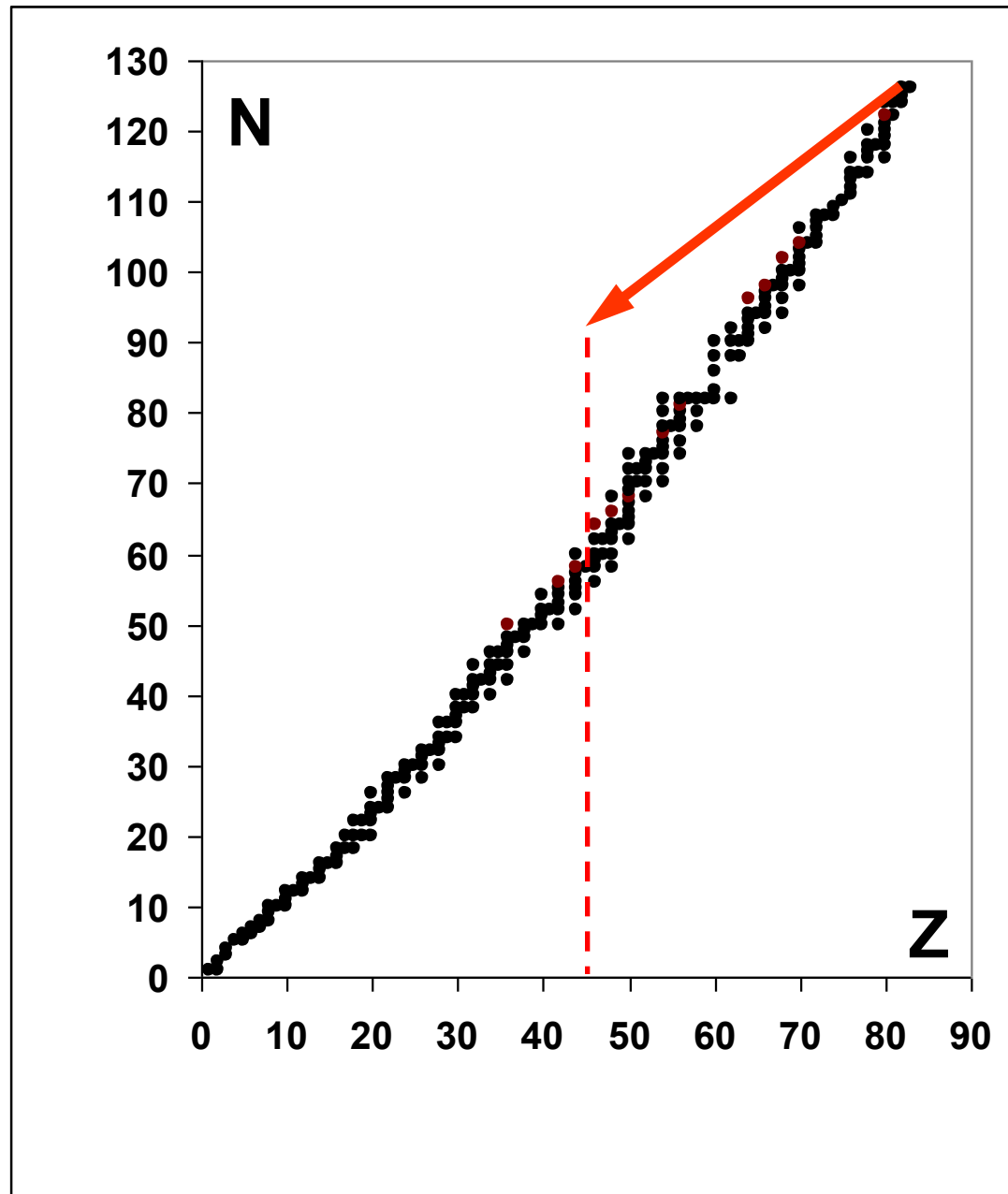
Осколки являются очень **нейтронноизбыточными** ядрами, поэтому деление сопровождается высвобождением **нейтронов**.

Ядра-осколки образуются в возбужденном состоянии и испускают **фотоны** гамма-диапазона.

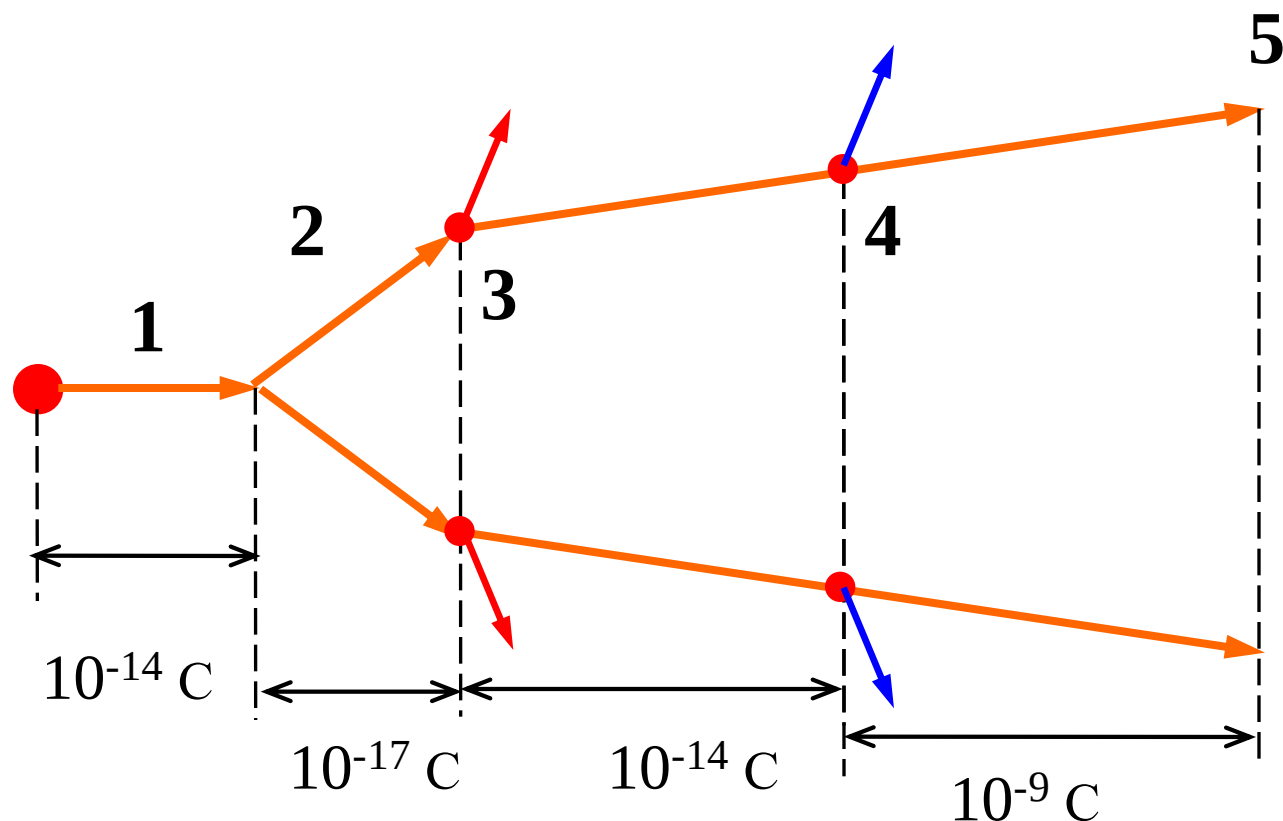


Протон-нейтронная диаграмма стабильных ядер

В результате **деления**
массивных ядер
образуются
нейтронноизбыточные
ядра.



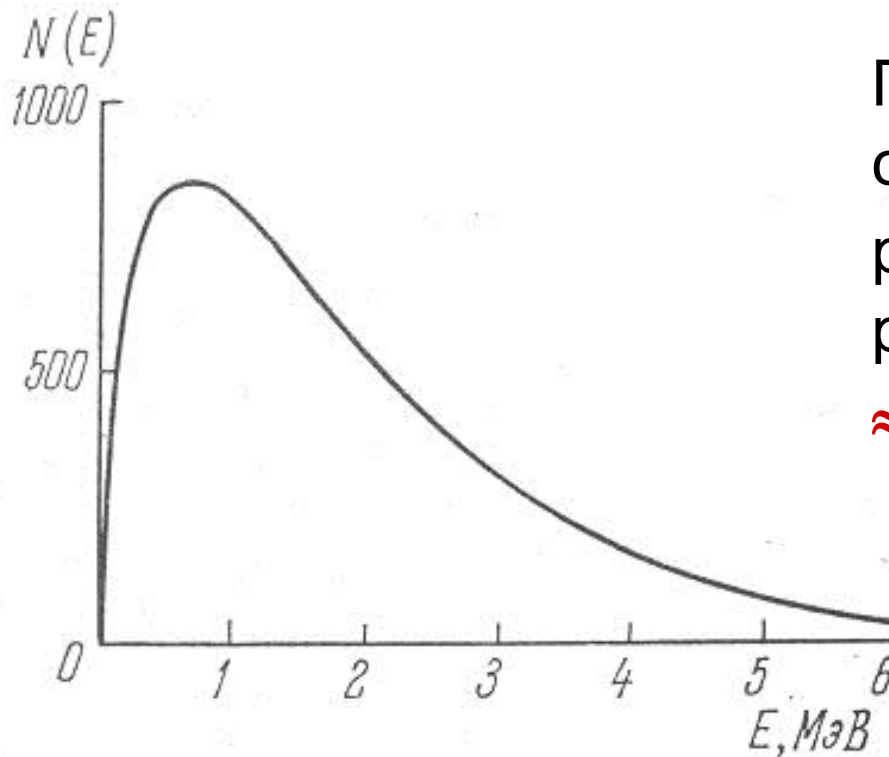
Временная схема деления ядра на два осколка



- 1** – формирование составного ядра; **2** – разлет осколков;
- 3** – начало испускания «мгновенных» нейтронов;
- 4** – начало испускания «мгновенных» гамма-фотонов;
- 5** – нейтрализация и термализация осколков.

Спектр «мгновенных» нейтронов описывается распределением Максвелла.

$$\frac{dn}{dE} = Nn_0 \sqrt{E} \exp\left(-\frac{E}{k_B T}\right)$$



При делении ядра **U^{235}** средняя энергия нейтронов равна $\approx$ **2 МэВ**, максимум распределения при энергии $\approx$ **0,7 МэВ**.

Осколки после испускания «мгновенных» нейтронов остаются **нейтронно-избыточными**, поэтому претерпевают **бета-минус**-процессы.



Дочерние ядра (осколки) образуются, как правило, в возбужденном состоянии. Возбуждение снимается испусканием **запаздывающих гамма-фотонов** и **нейтронов**.

Распределение энергии деления ядра

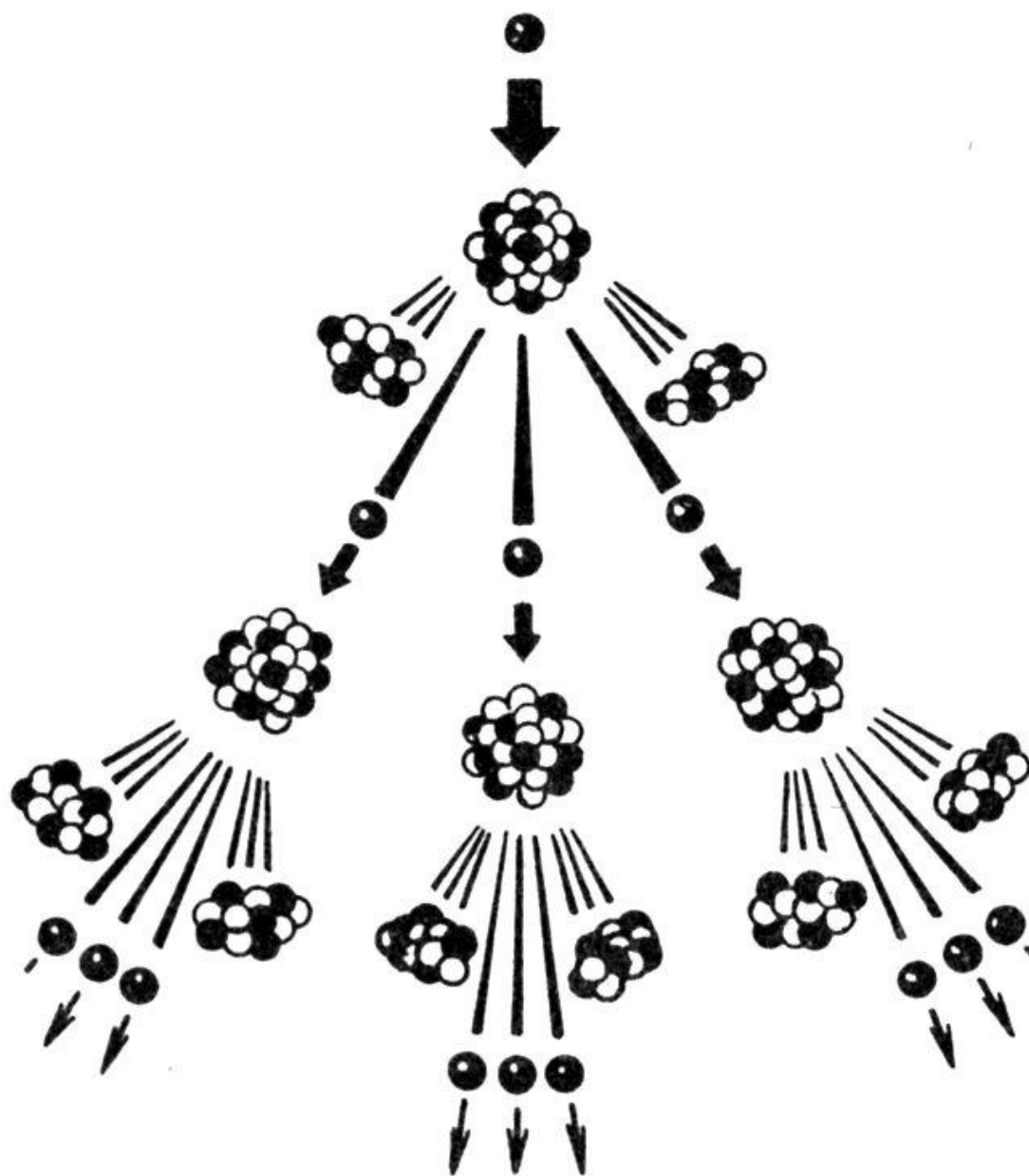
Пример: U^{235}

Продукт	Энергия (МэВ)
Осколки деления	166
«Мгновенные» нейтроны	4,9
«Мгновенные» гамма-фотоны	7,2
Бета-электроны	9,0
Антинейтрино	100
Запаздывающие гамма-фотоны	7,2

Необходимые условия получения макроскопического количества ядерной энергии деления

- 1. Превращение части внутренней (потенциальной) энергии ядра в кинетическую энергию продуктов реакции (осколков ядер).**
- 2. Высвобождение свободных нейтронов, которые совершают деления других ядер.**

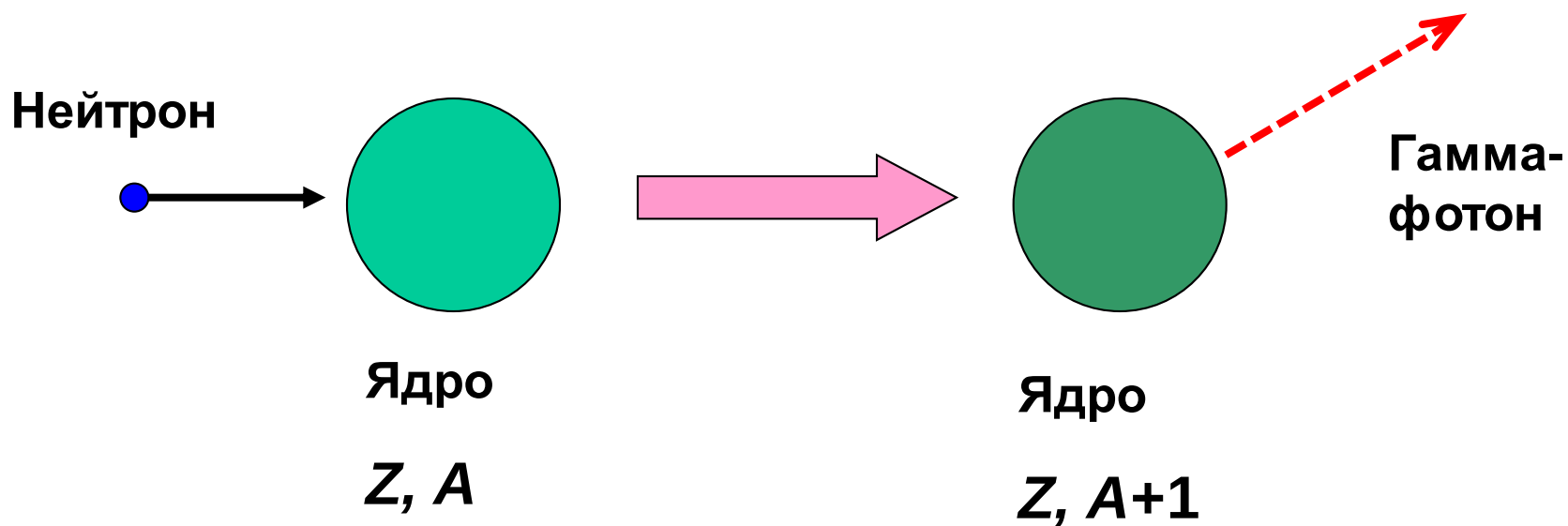
Таким образом такая реакция должна быть **экзоэнергетической** и **самоподдерживающейся** (цепной).



Качественная
картина
развития
цепной реакции
деления.

Коэффициент
размножения
нейтронов = 3

Цепной реакции *препятствует* поглощение нейтронов с испусканием гамма-фотонов (**радиационный захват**)



Для развития цепной реакции деления необходимо, чтобы средний **коэффициент размножения нейтронов** *превышал* единицу.

$$k = \nu \frac{\sigma_{nf}}{\sigma_{nf} + \sigma_{n\gamma}} (1 - P_{\rightarrow})$$

ν – среднее число нейтронов, образующихся при делении ядра;

σ_{nf} – сечение деления ядра при поглощении нейтрона;

$\sigma_{n\gamma}$ – сечение радиационного захвата нейтрона;

$P_{\rightarrow}$ – вероятность выхода из зоны реакции.

Первый нейтрон для инициации цепной реакции может возникнуть в результате **спонтанного деления**.

Цепная реакция начинается, если масса урана превышает **критическую**. Тогда коэффициент размножения нейтронов ***k* превышает** единицу.

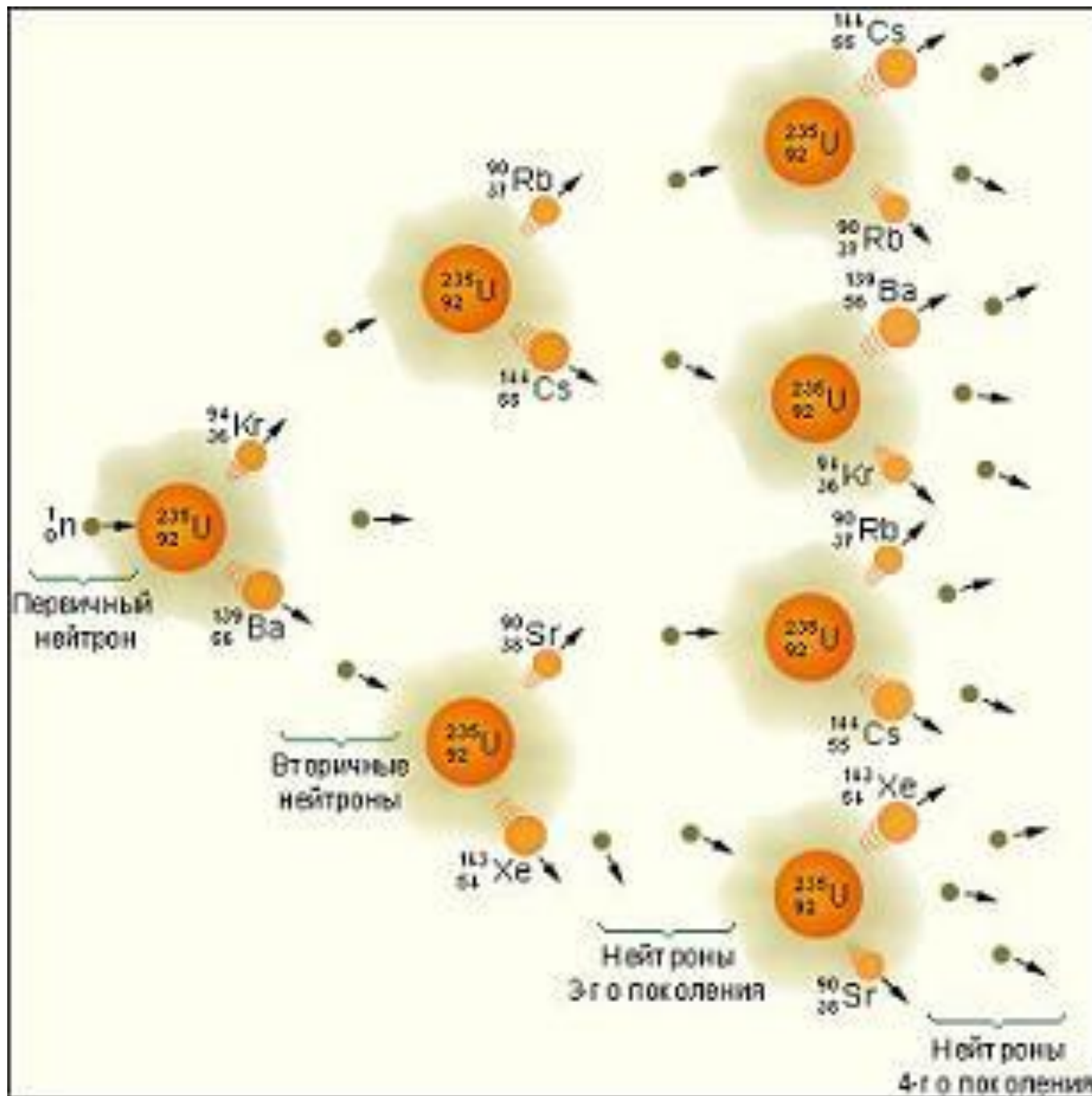


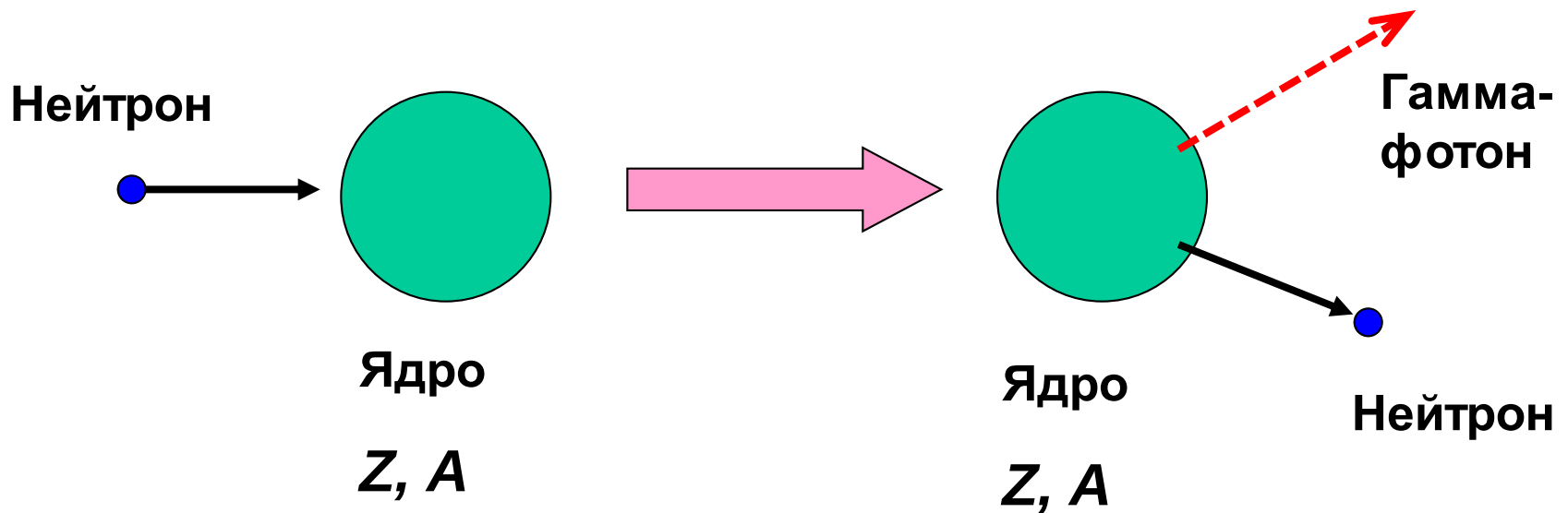
Схема развития цепной реакции деления на ядрах урана-235.

Среднее время формирования поколения

$\sim 10^{-8} \text{ с}$

Цепная реакция деления на изотопе U^{238} (т.е. на природном уране) невозможна.

Для этих ядер велико сечение неупругого рассеяния (n, n') .



После акта неупругого рассеяния **средняя энергия нейтронов** становится меньше **энергии активации** деления.

Изотоп U^{235} получается из природного урана трудоёмкой и дорогостоящей технологией.

Для получения ядерного горючего (т.е. вещества, в котором возможна цепная реакция деления) достаточно обогатить природный уран изотопом U^{235} до содержания в **несколько процентов**.

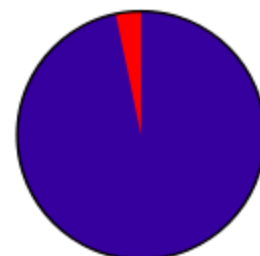
Эффективный метод обогащения – **газовое центрифугирование**.

Природный уран переводится в газообразный **гексафторид урана** UF_6 .

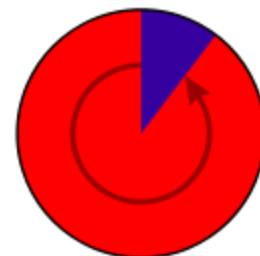
Быстрое вращение центрифуги постепенно отделяет более массивные частицы, т.е. ядра изотопа U^{238} .



Natural uranium
> 99.2% U-238
0.72% U-235

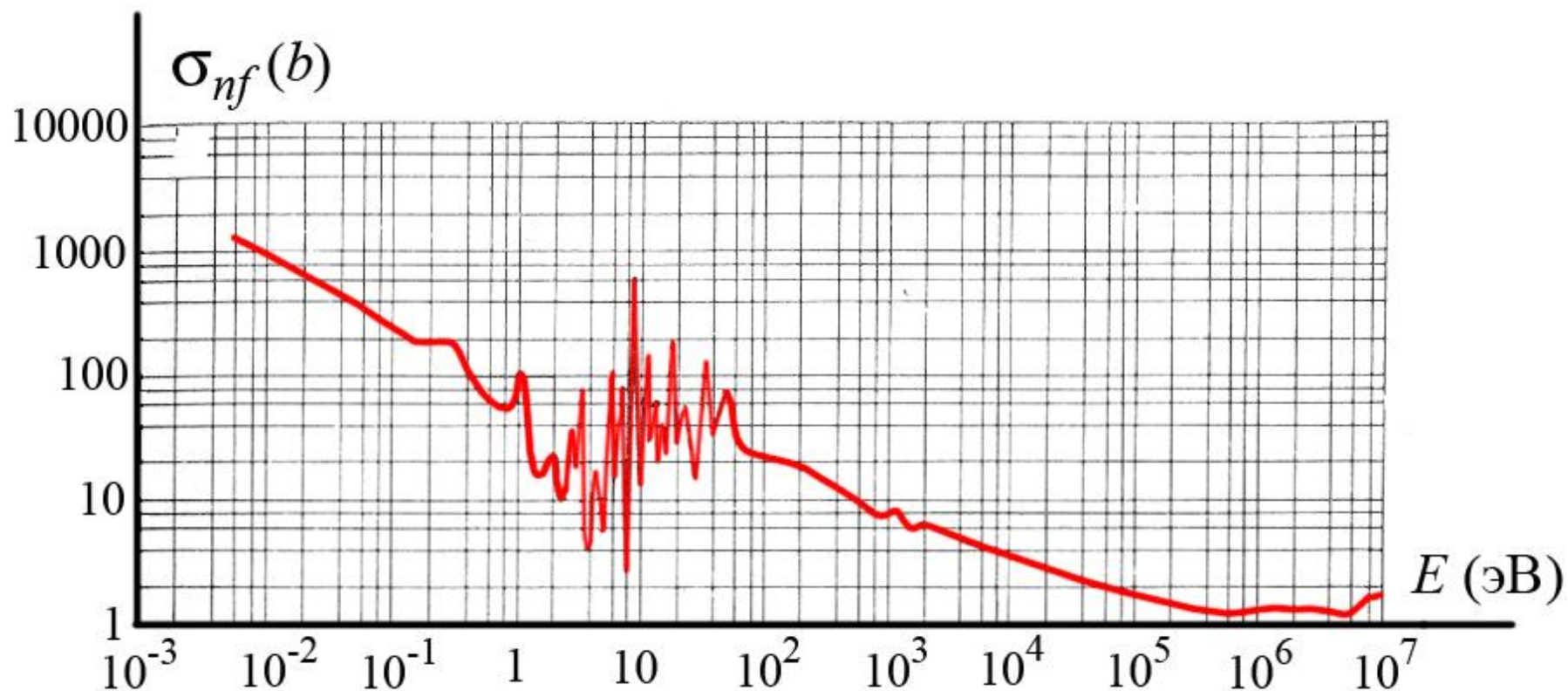


Low-enriched uranium
(reactor grade)
3-4% U-235



Highly enriched uranium
(weapons grade)
90% U-235

Сечение реакции деления σ_{nf} увеличивается с уменьшением энергии нейтронов.



Зависимость сечения реакции деления σ_{nf} от энергии нейтронов для ядер U^{235}

Для увеличения энерговыхода цепной реакции **активное вещество** (уран) перемежают с замедлителем.

Замедлитель – это вещество с малой атомной массой и малым сечением радиационного захвата $\sigma_{n\gamma}$.

Средняя энергия нейтрона после столкновения:

$$E_1 = E_0 \left(1 - \frac{2A}{(A+1)^2} \right)$$

E_0 – начальная энергия нейтрона, A – массовое число ядра.

При столкновении с **протоном** нейтрон теряет в среднем **половину** своей энергии, при столкновении с ядром **углерода** – **14%** энергии, с ядром **U²³⁸** – меньше **1%**.

Замедлитель должен иметь малое сечение
радиационного захвата $\sigma_{n\gamma}$.

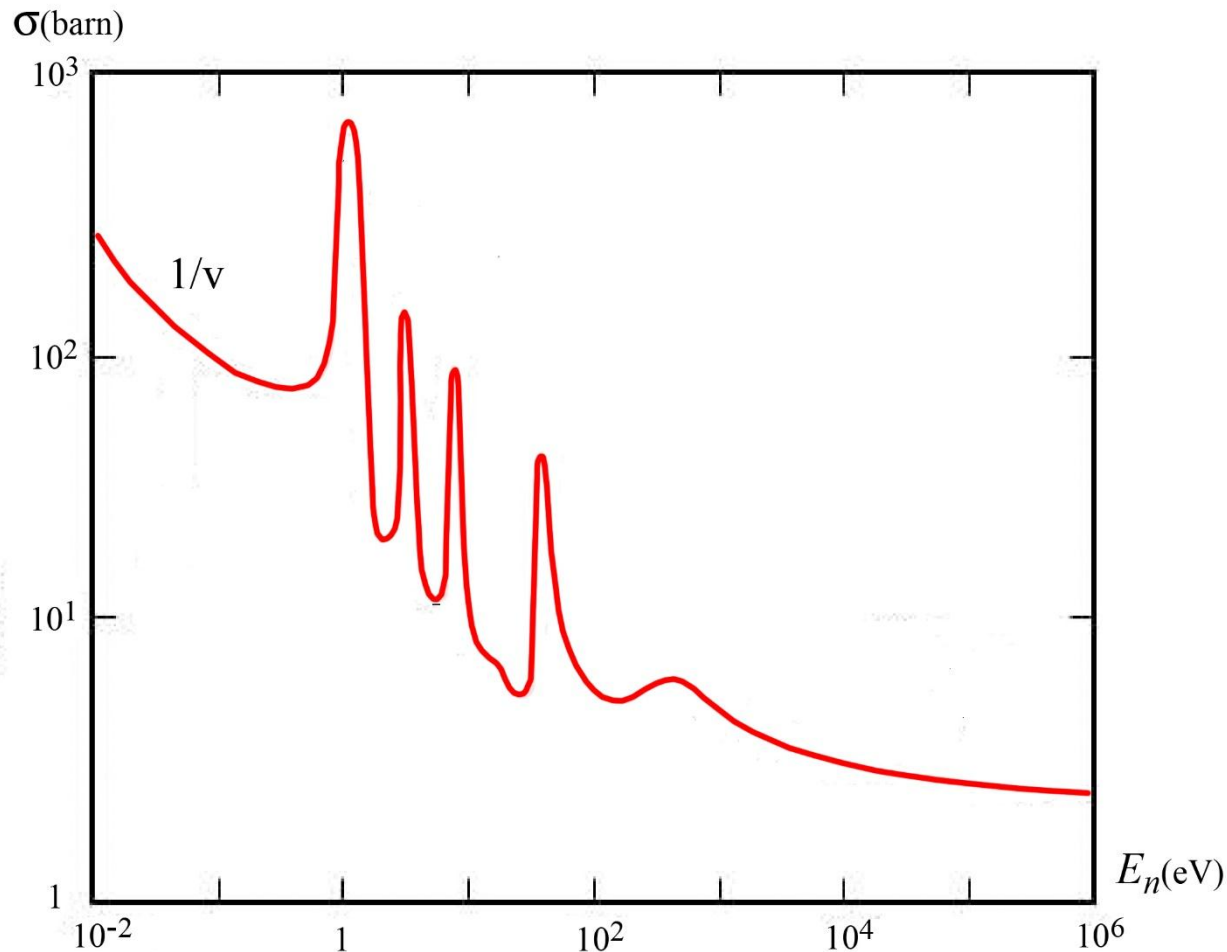
Эффективные замедлители – **графит, тяжелая вода**.

Сечение **радиационного захвата** тепловых нейтронов

Водород $\sigma_{n\gamma} \sim 300 \text{ мб}$

Дейтерий $\sigma_{n\gamma} \sim 0,5 \text{ мб}$

В конструкцию реактора включен поглотитель нейтронов, действие которого базируется на реакции **радиационного захвата**.



Зависимость
сечения
радиационного
захвата ядер
кадмия от
энергии
нейтрона

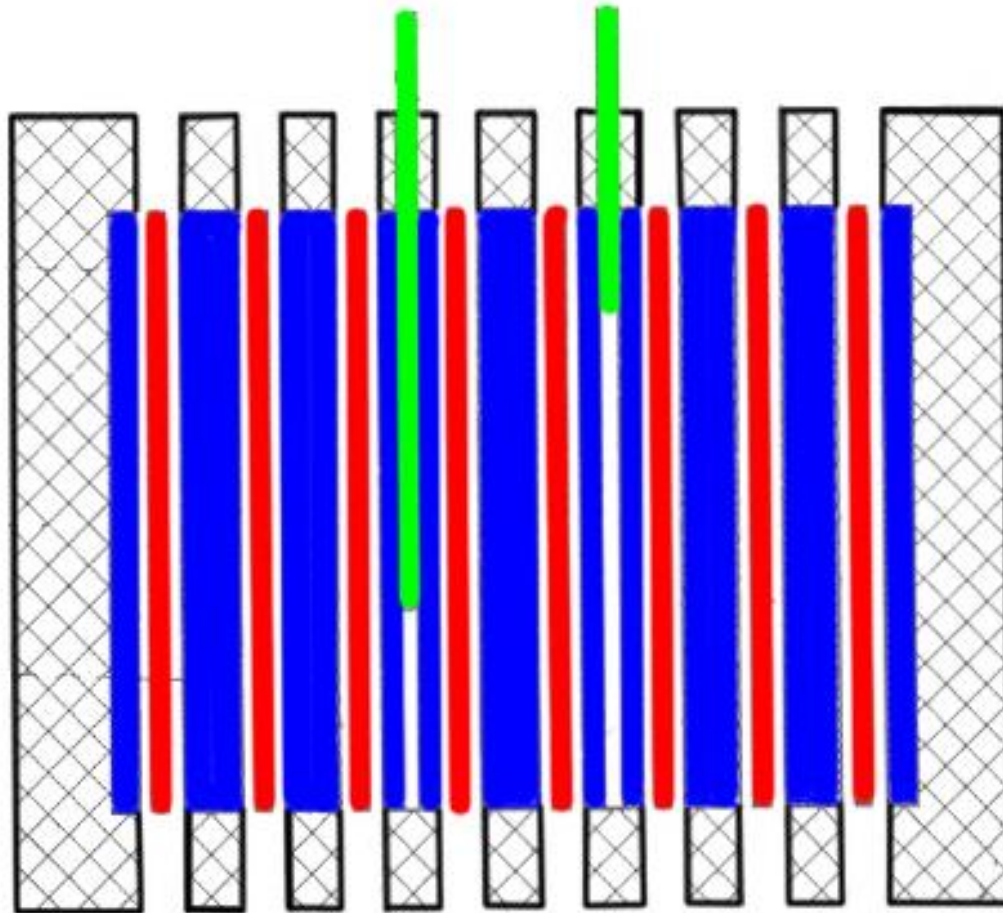
Стабильное течение цепной ядерной реакции обеспечивается регулировкой потока **запаздывающих нейтронов**.

Источник – нейтронноизбыточные **осколки деления** ядер

Среднее **время испускания** – десятки секунд.

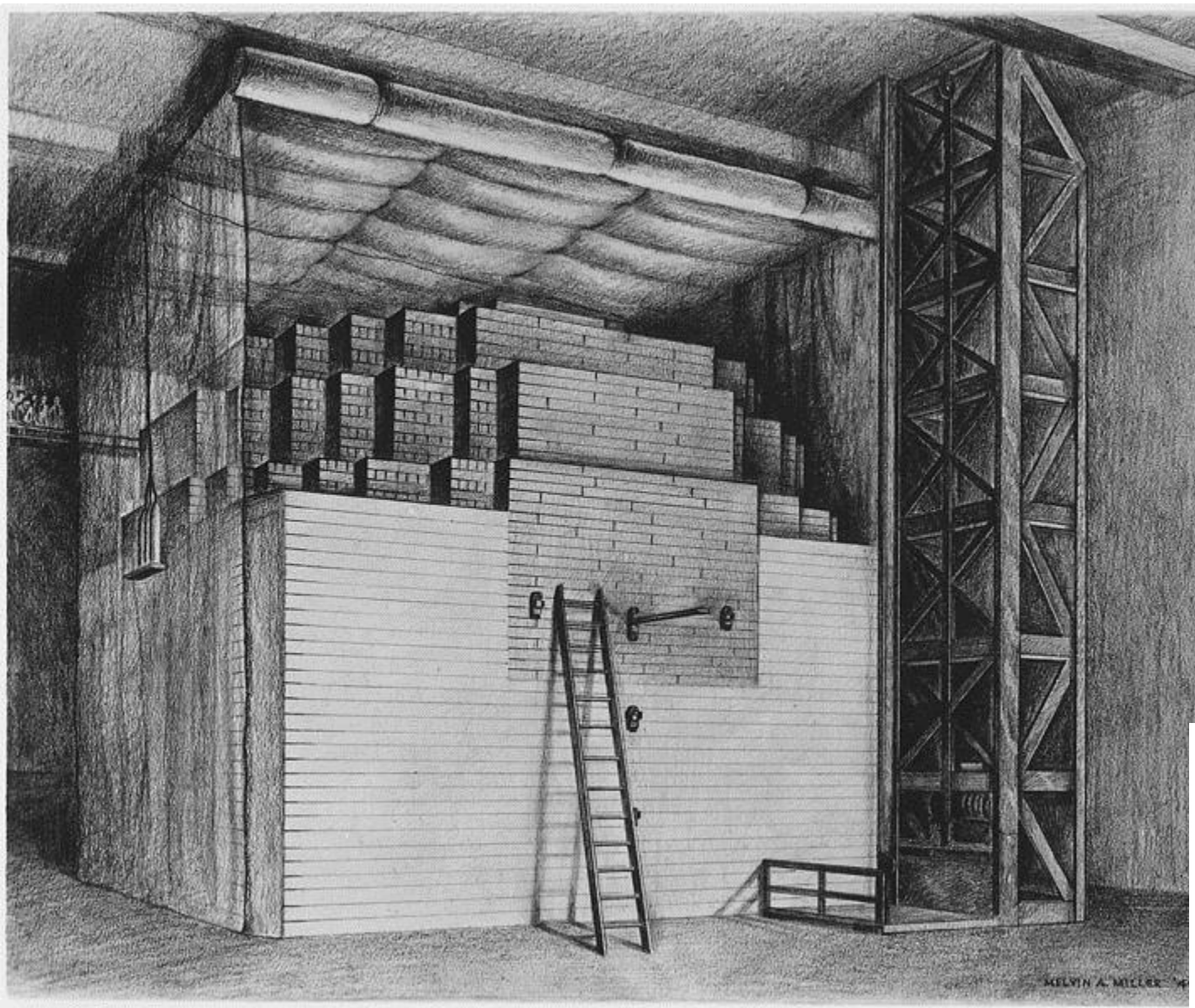
Доля запаздывающих нейтронов – **менее 0,1 %**.

Принципиальная схема активной зоны ядерного реактора на тепловых нейтронах.



Красный цвет – уран, синий – замедлитель, зеленый – поглотители, серый – отражатель.

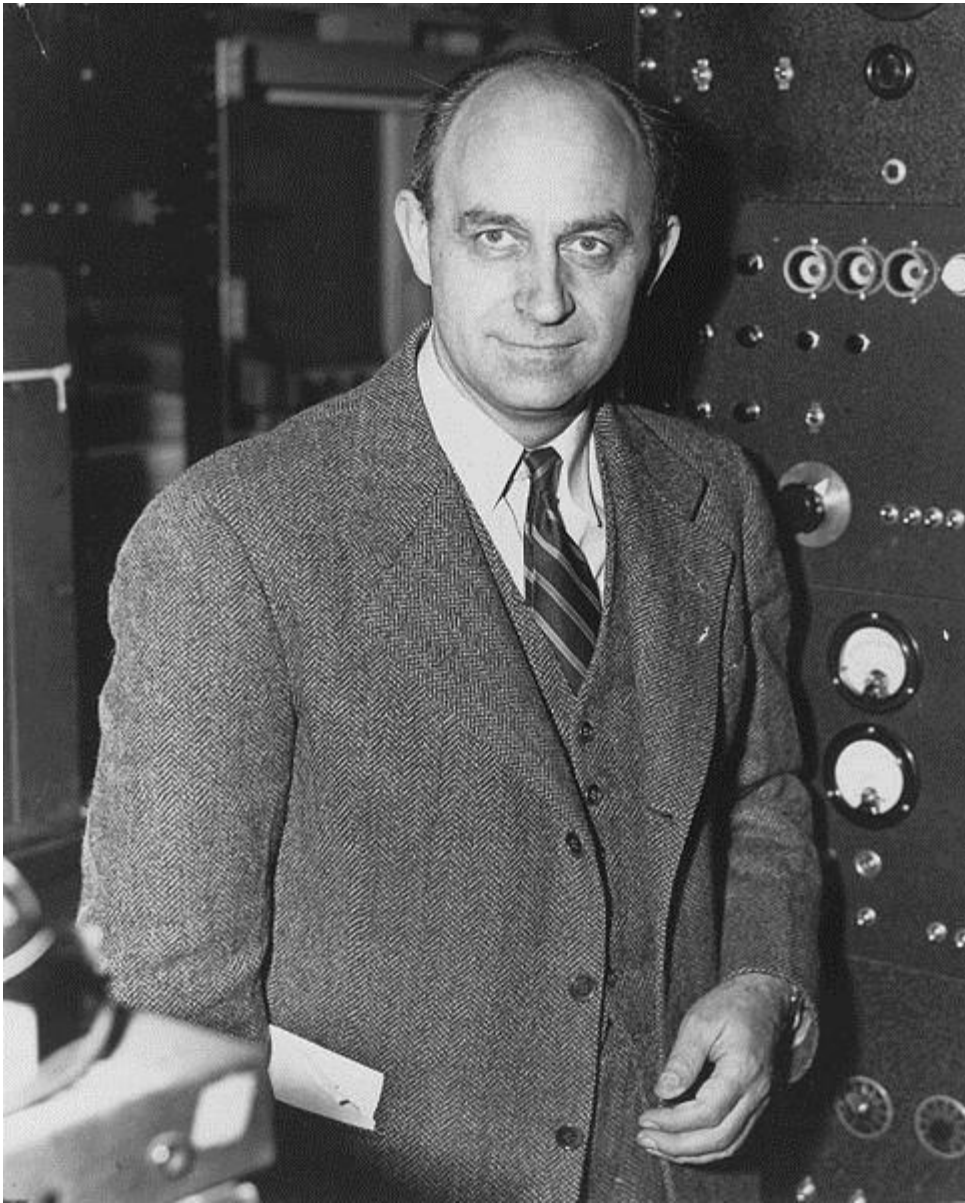
Первый урановый реактор. Чикаго, 1942 г.



Топливо —
оксид урана
(37 тонн) +
уран (6 тонн).

Замедлитель
— графит (350
тонн),

коэффициент
размножения
нейтронов
1,0006



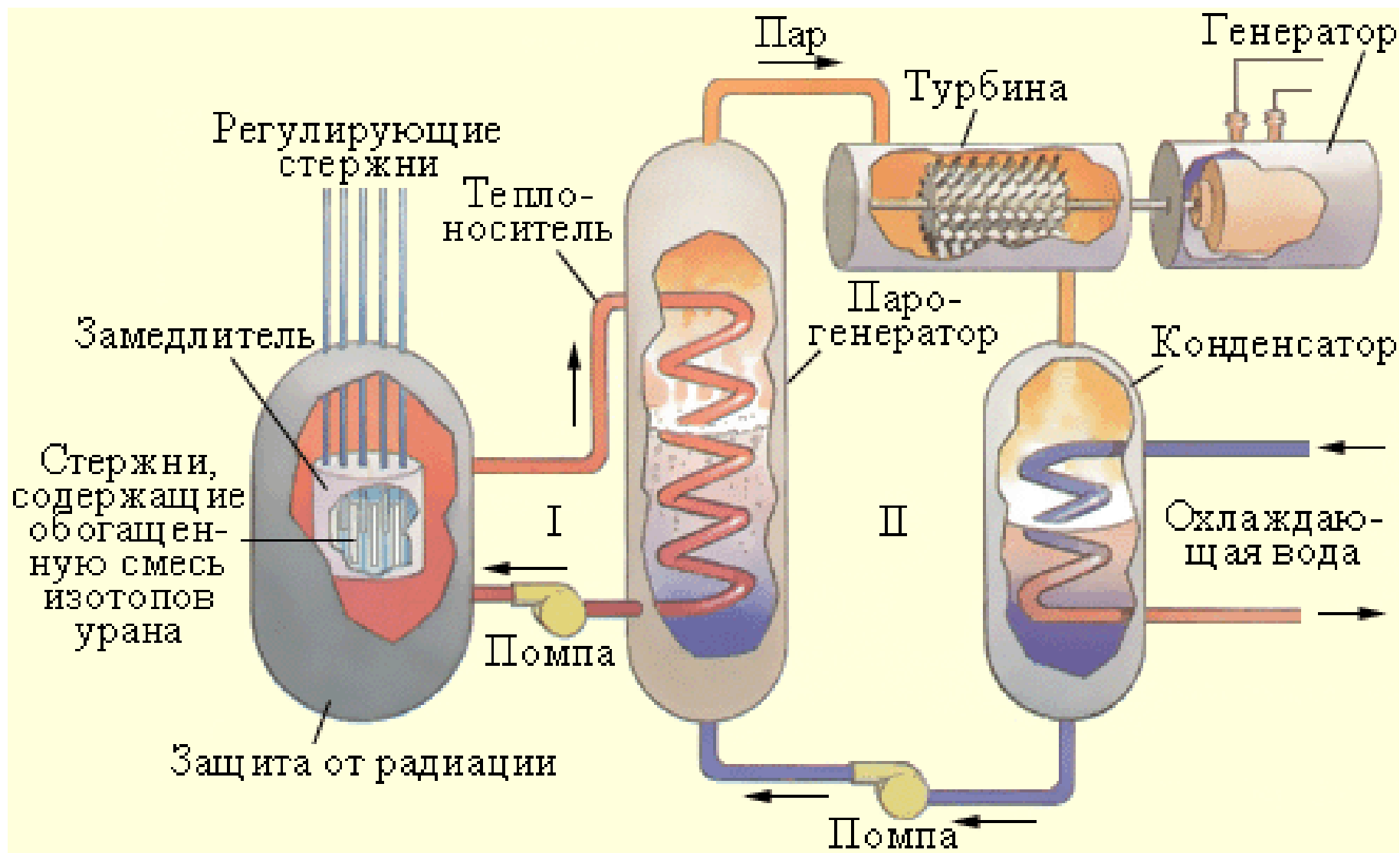
Энрико Ферми

1901 – 1954 гг.

Великий физик –
теоретик и
экспериментатор.

Нобелевский лауреат
1938 г.

Принципиальная схема уранового реактора

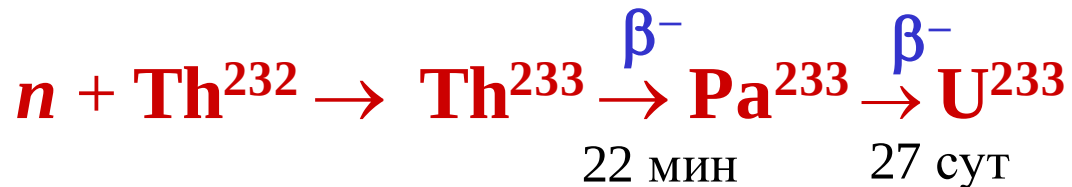
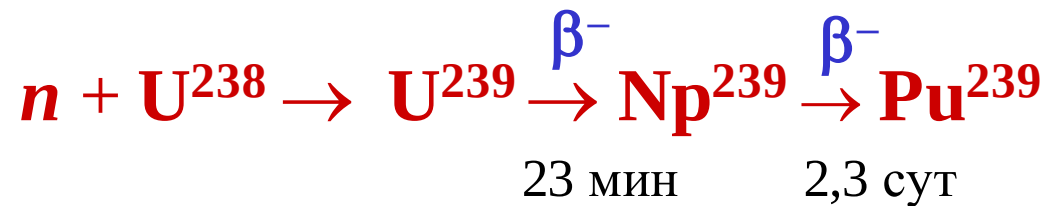




Сборка активной зоны ядерного реактора

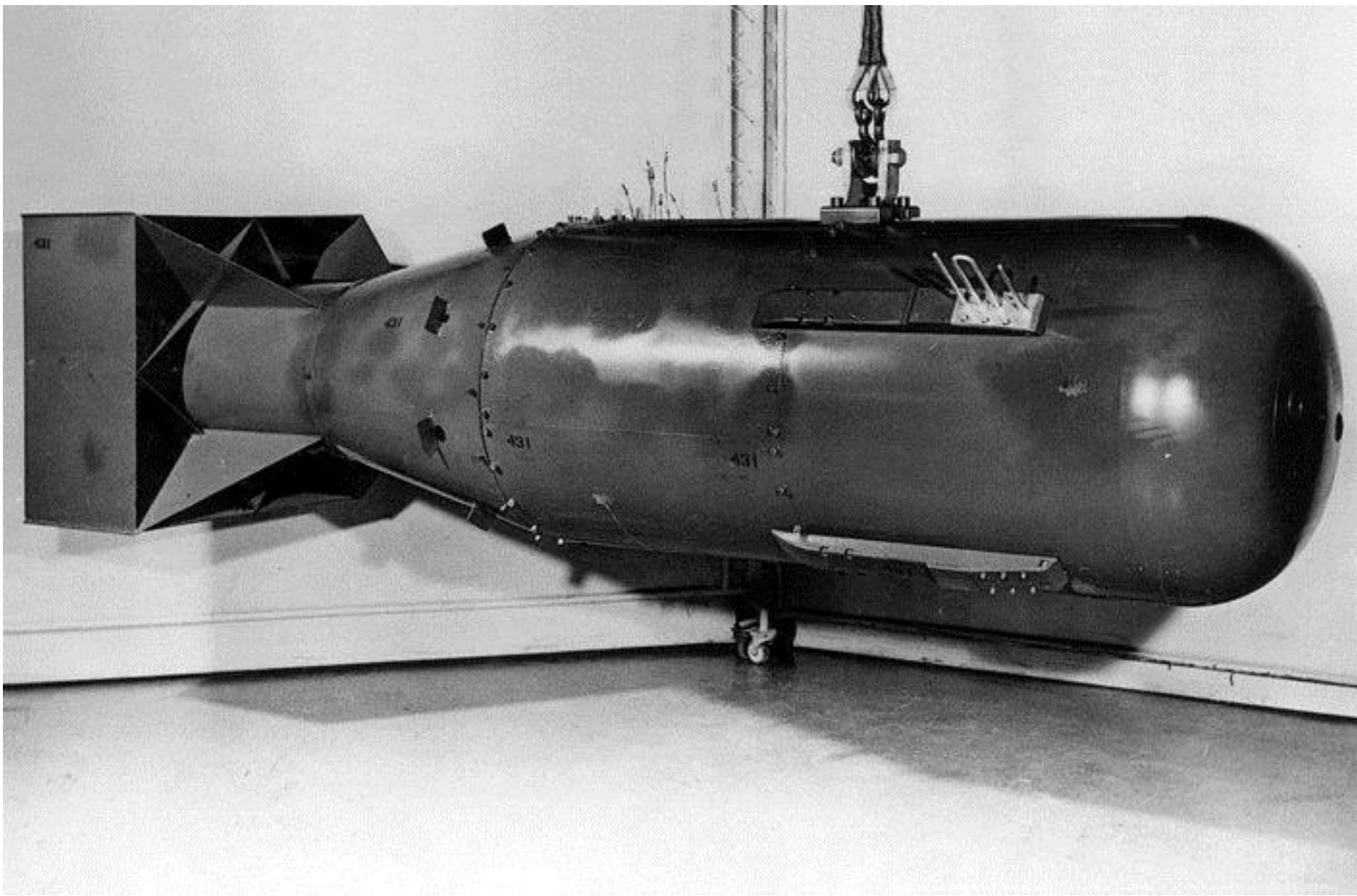
Веществами, в которых возможна цепная реакция деления ядер также являются изотопы **U²³³** и **Pu²³⁹**, которые не встречаются в природе.

Однако, они могут быть приготовлены в урановых реакторах с помощью нейтронных реакций:



«Тр́инити» — первое в мире испытание ядерного оружия.
16 июля 1945 года в штате Нью-Мексико (США).
Плутониевая бомба имплозивного типа, 21 килотонн ТНТ.



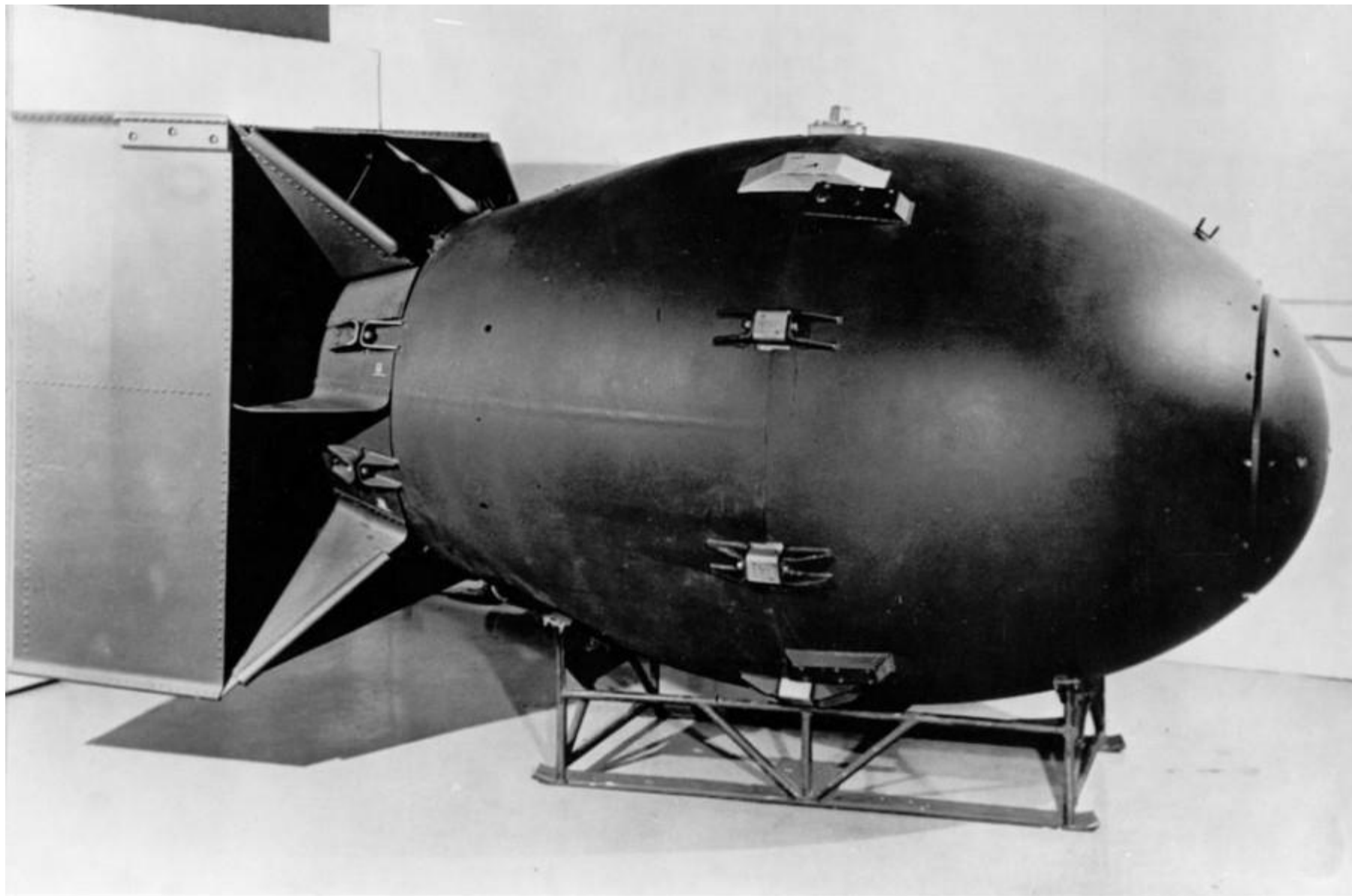


«Малыш» - урановая бомба пушечного типа

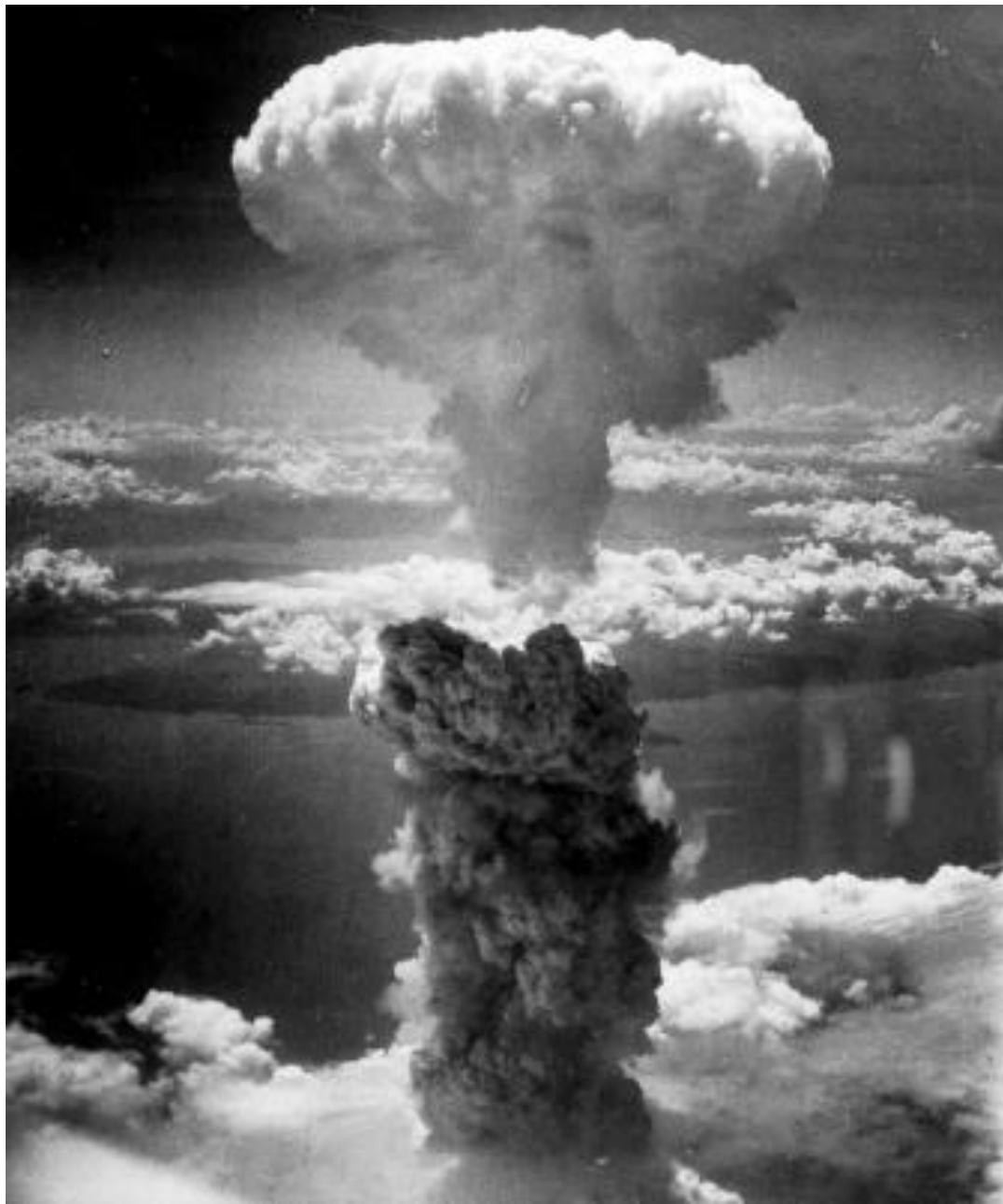
6 августа 1945 года. Хиросима. Около 15 килотонн ТНТ



Количество погибших - от 90 до 166 тысяч

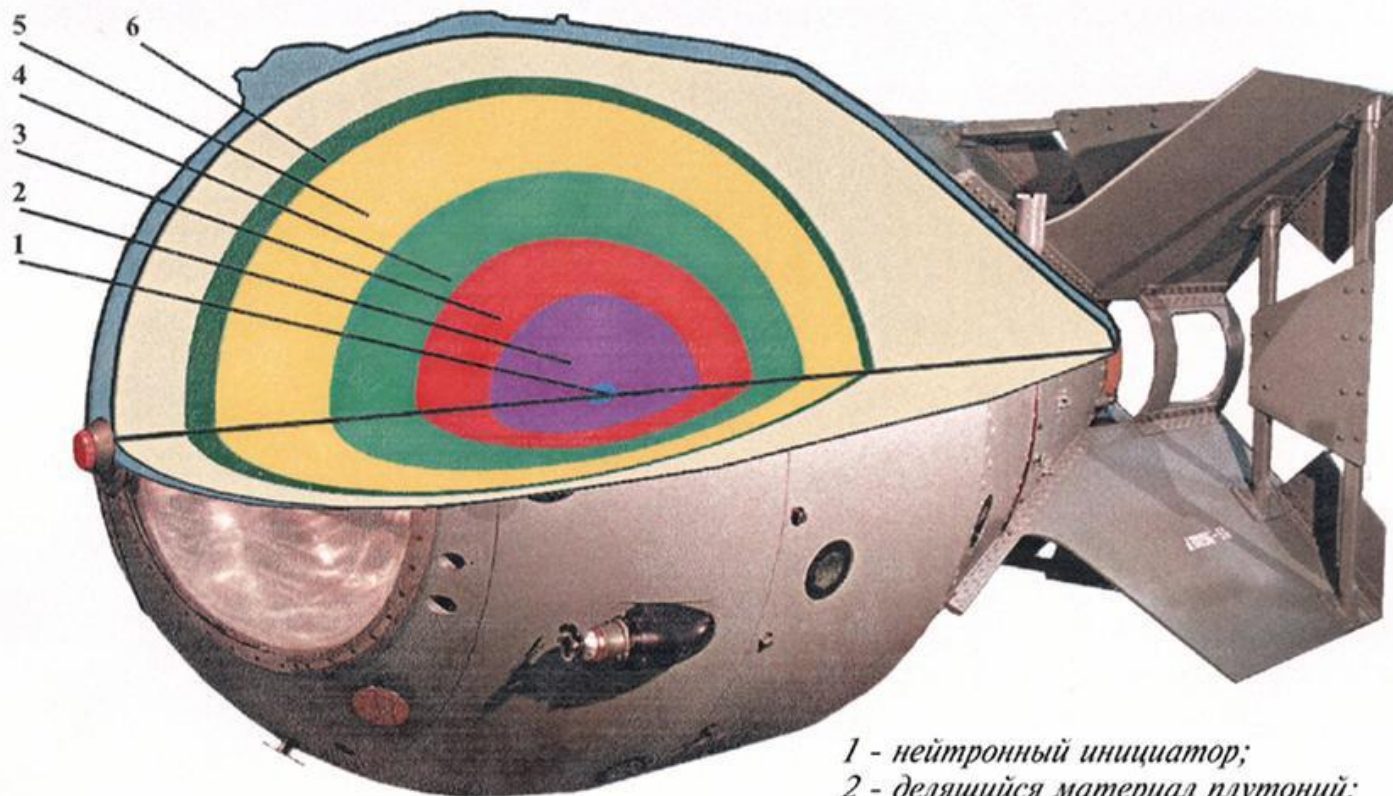


«Толстяк» - плутониевая бомба импловзивного типа,.



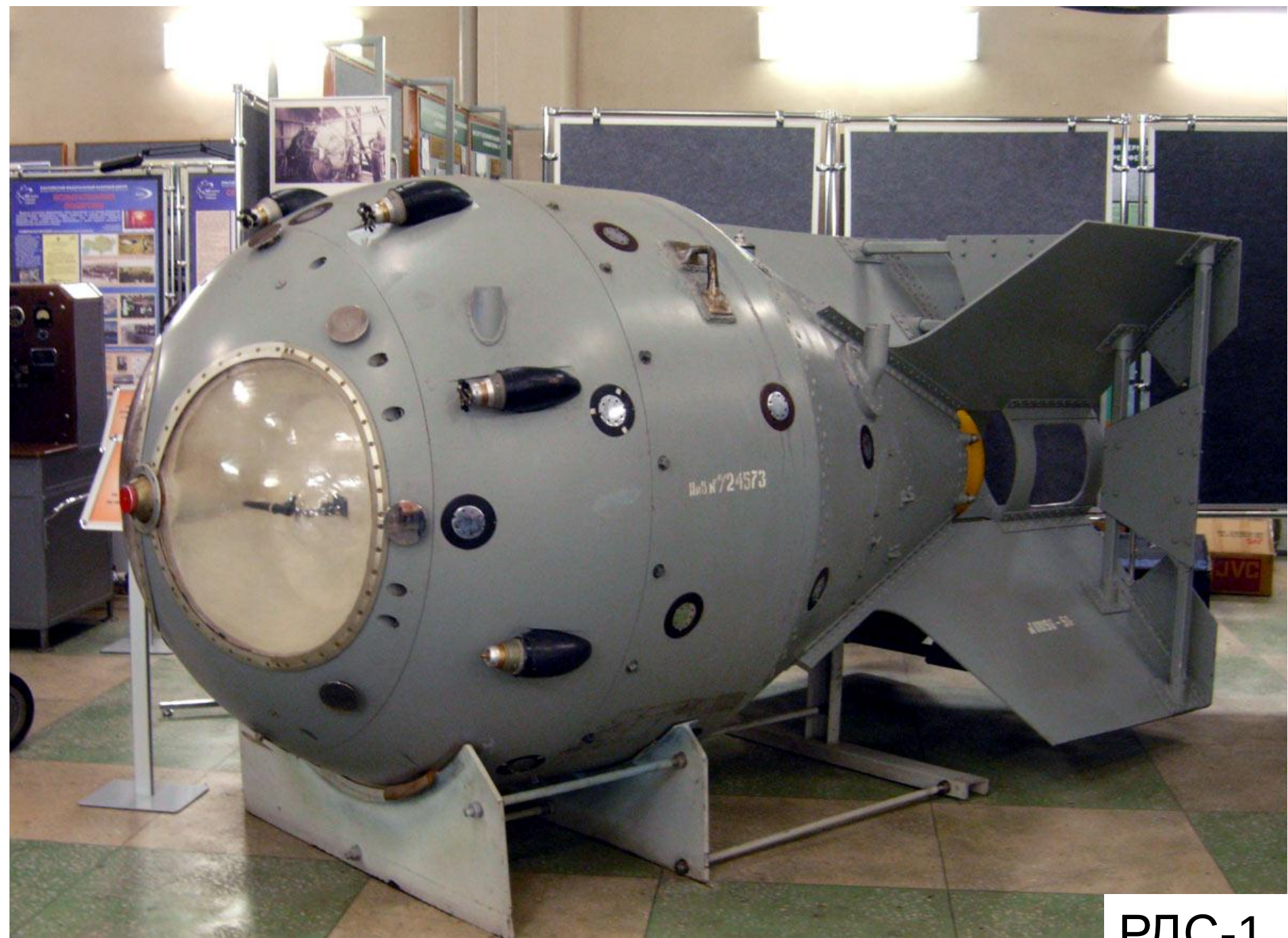
9 августа 1945,
Нагасаки.
21 килотонна ТНТ.
Количество
погибших от 60 до 80
тысяч.

СХЕМА ПЕРВОЙ СОВЕТСКОЙ АТОМНОЙ БОМБЫ

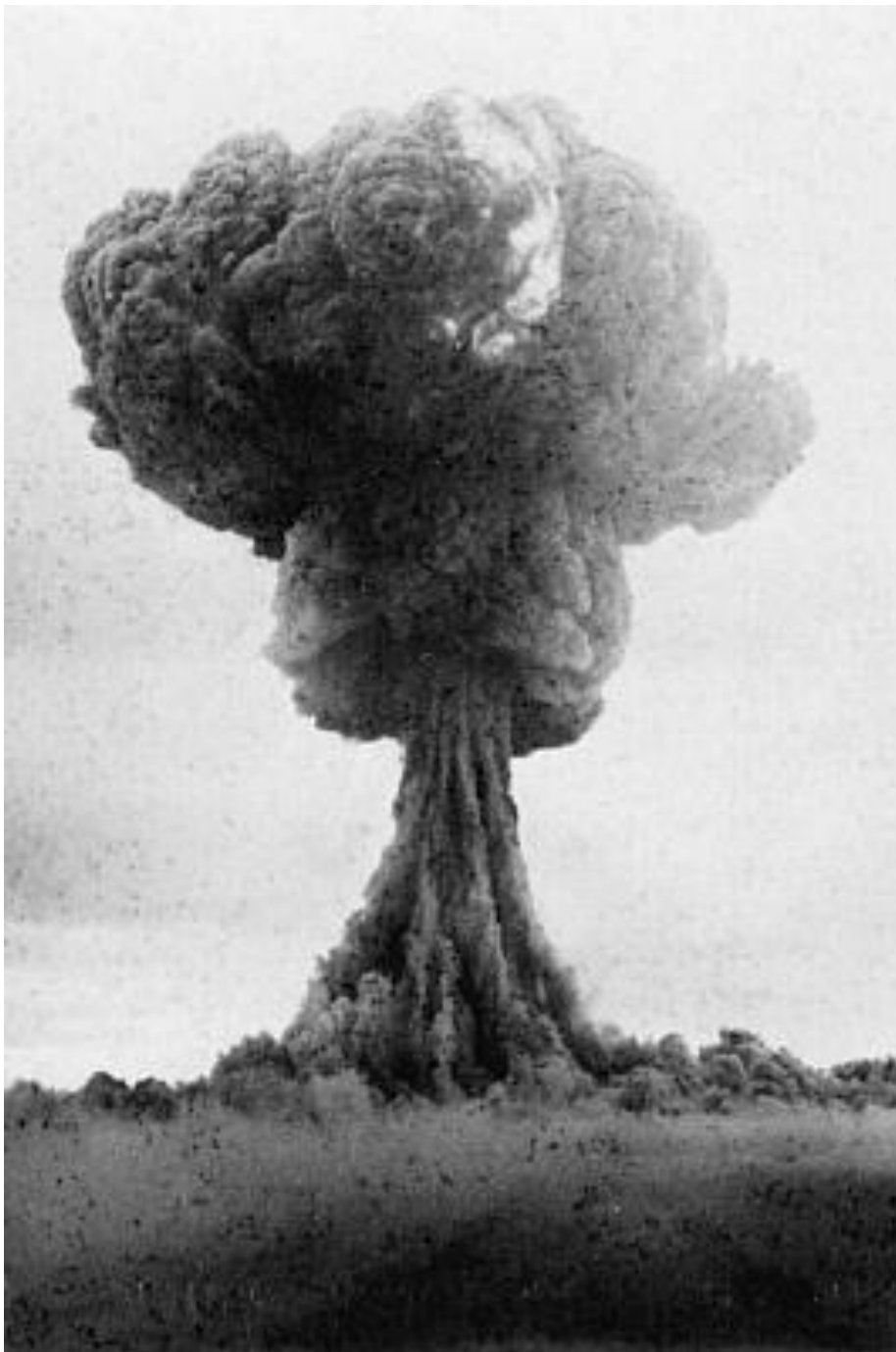


- 1 - нейтронный инициатор;
- 2 - делящийся материал плутоний;
- 3 - металлический уран-238;
- 4 - алюминий;
- 5 - взрывчатое вещество и фокусирующая система;
- 6 - дюралюминиевый корпус

РДС-1



РДС-1

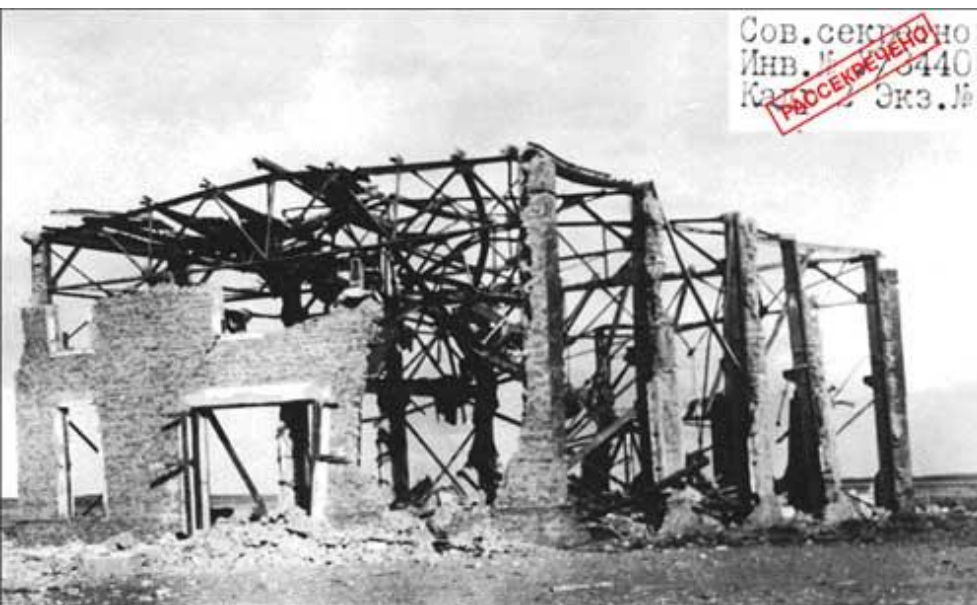


29 августа 1949 года.

Взрыв РДС-1.

Мощность более 20 килотонн
ТНТ.

37-метровая башня, на
которой была установлена
бомба, была уничтожена
полностью, на её месте
образовалась воронка
диаметром 3 м и глубиной
1,5 м, покрытая
оплавленным
стеклоподобным веществом.



Результаты взрыва РДС-1