



*Национальный исследовательский ядерный
университет «МФИ»*

Институт ядерной физики и технологий

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

А.И. Болоздыня

Введение в ядерную физику

Лекция №6

Деление ядер

Лекция №6

Деление ядер



- 1. История открытия деления атомного ядра**
- 2. Капельная модель ядра**
- 3. Цепная реакция деления**
- 4. Использование энергии деления ядер**
- 5. Настоящее и будущее атомной энергетики**

1. История открытия деления атомного ядра



Enrico Fermi
(1901-1954) **Н.п. 1938**

«for his demonstrations of the existence of new radioactive elements produced by neutron irradiation, and for his related discovery of nuclear reactions brought about by slow neutrons»

В начале 30-х годов 20-го века **Энрико Ферми** с коллегами в Риме изучал возможность получения *трансурановых элементов* путем облучения *урана нейтронами*. В 1934 году они пришли к заключению, что им удалось создать новые элементы, содержащие 93 и 94 протона, которые были названы *ausonium* и *hesperium*.

Однако немецкий химик **Ида Ноддак** в том же 1934 года напечатала статью, аргументируя, что они скорее всего наблюдали распад ядра урана на несколько фрагментов.

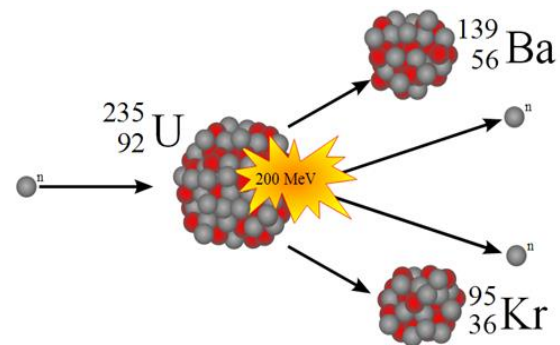
В 1938 году немецкие учёные **Отто Ган** и **Фриц Штрассман** повторили опыты Ферми и *химическим путём* показали, что в этих реакциях возникают ядра **бария** с массой почти вдвое меньшей, чем у урана.

Лиза Мейтнер и **Отто Фриш** объяснили этот результат распадом ядра урана на примерно две равные части (два осколка), а Фриш назвал это явление по аналогии с биологическим явлением «бинарным делением ядра» или просто **делением ядра**.

Впоследствии в продуктах деления урана-235 было обнаружено около **300 (!) изотопов** различных элементов: от $Z=30$ (цинк) до $Z=64$ (гадолиний).

Спонтанное деление тяжёлых атомных ядер было открыто в 1940 году советскими физиками **Г. Флеровым** и **К. Петржаком**.

В 1945 году Шведская королевская академия наук присудила **Отто Гану** **Нобелевскую премию по химии** «за открытие расщепления тяжёлых атомных ядер».



Здание бывшего института химии Общества кайзера Вильгельма в Берлине, ныне институт химии, отделение биохимии Свободного университета Берлина

Лиза Мейтнер и Отто Ган за работой в Институте кайзера Вильгельма в Берлине

Спонтанное деление

Ядро	Период полураспада, лет	Вероятность спонтанного деления	Выход нейтронов на 1 деление	Поток нейтронов, $\text{г}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$
^{235}U	$7,04 \cdot 10^8$	$2,0 \cdot 10^{-9}$	1,86	$3,0 \cdot 10^{-4}$
^{238}U	$4,47 \cdot 10^9$	$5,4 \cdot 10^{-7}$	2,07	0,0136
^{239}Pu	$2,41 \cdot 10^4$	$4,4 \cdot 10^{-12}$	2,16	$2,2 \cdot 10^{-2}$
^{240}Pu	6569	$5,0 \cdot 10^{-8}$	2,21	920
^{250}Cm	8300	0,80	3,3	$2,1 \cdot 10^{10}$
^{252}Cf	2,638	$3,09 \cdot 10^{-2}$	3,73	$2,3 \cdot 10^{12}$

Научное открытие "**Спонтанное деление ядер урана**".

Формула открытия: "Экспериментально обнаружено спонтанное – без возбуждения какими-либо частицами – деление ядра естественного урана на две части. Это новый вид радиоактивности, при котором первоначальное ядро превращается в два ядра, разлетающиеся с кинетической энергией около 160 МэВ".

Авторы: Г. Н. Флеров, К. А. Петржак.

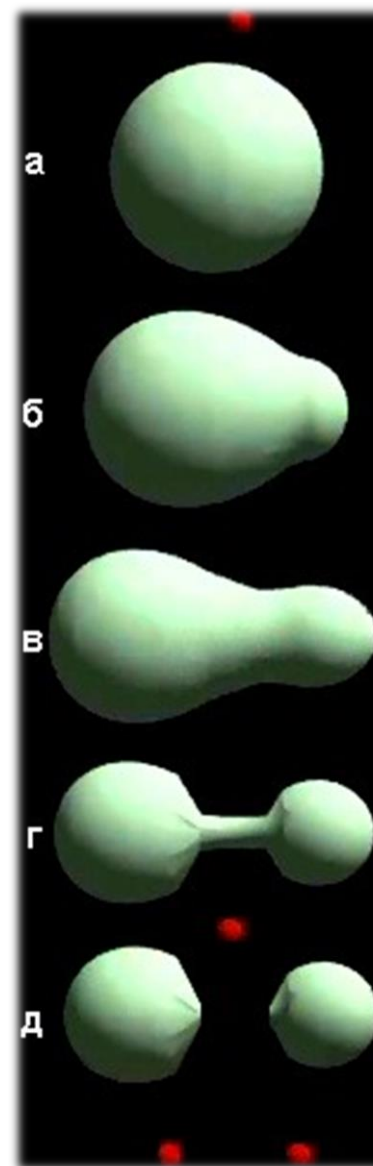
Номер и дата приоритета: № 33 от 14 июня 1940 г.

2. Капельная модель ядра

В 1939 г. *Н. Бор и Дж. Уилер* и независимо от них *Я. Френкель* предложили модель деления ядер, основанную на представлении о ядре как о капле заряженной жидкости.

При делении одного ядра ^{235}U тепловыми нейтронами освобождается энергия около 200 МэВ

Кинетическая энергия осколков	~167 МэВ
Мгновенные нейтроны деления	~5 МэВ
Электроны бета-распада	~5 МэВ
Антинейтрино бета-распада	~10 МэВ
Мгновенные гамма-кванты	~7 МэВ
Гамма-излучение продуктов деления	~6 МэВ
Итого	~200 МэВ



В рамках капельной модели ядра энергия связи нуклонов в ядре описывается полуэмпирической формулой *Вайцзеккера* (*Carl Friedrich von Weizsäcker*)

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

$$a_{об} = 15.75 \text{ МэВ}, \quad a_{кул} = 0,71 \text{ МэВ},$$

$$a_{нов} = 17,8 \text{ МэВ}, \quad a_{сим} = 23,7 \text{ МэВ},$$

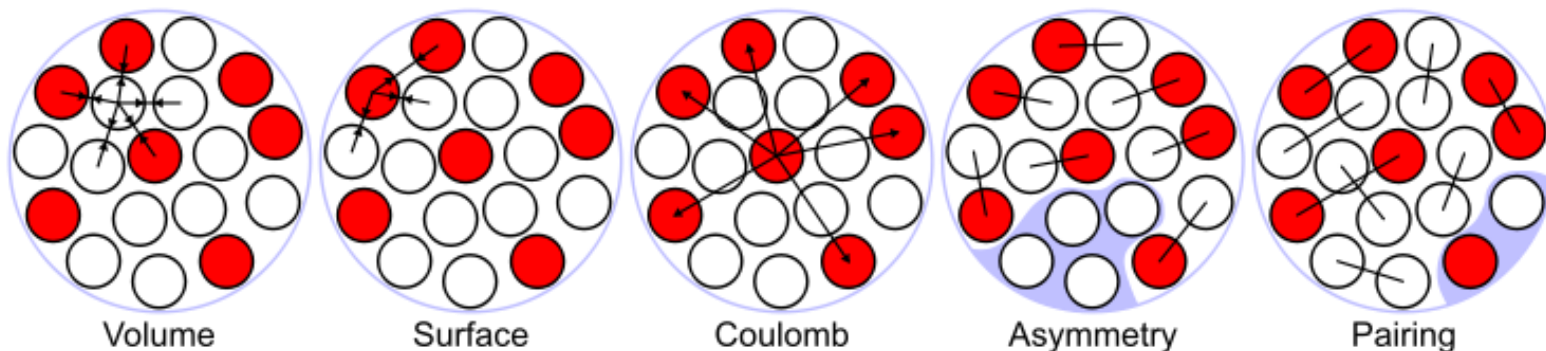
$$\delta = \begin{cases} +|\delta| & \text{— для чётно – чётных ядер} \\ 0 & \text{— для ядер с нечётным } A \\ -|\delta| & \text{— для нечётно – нечётных ядер} \end{cases}$$

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

$$\chi = 12$$



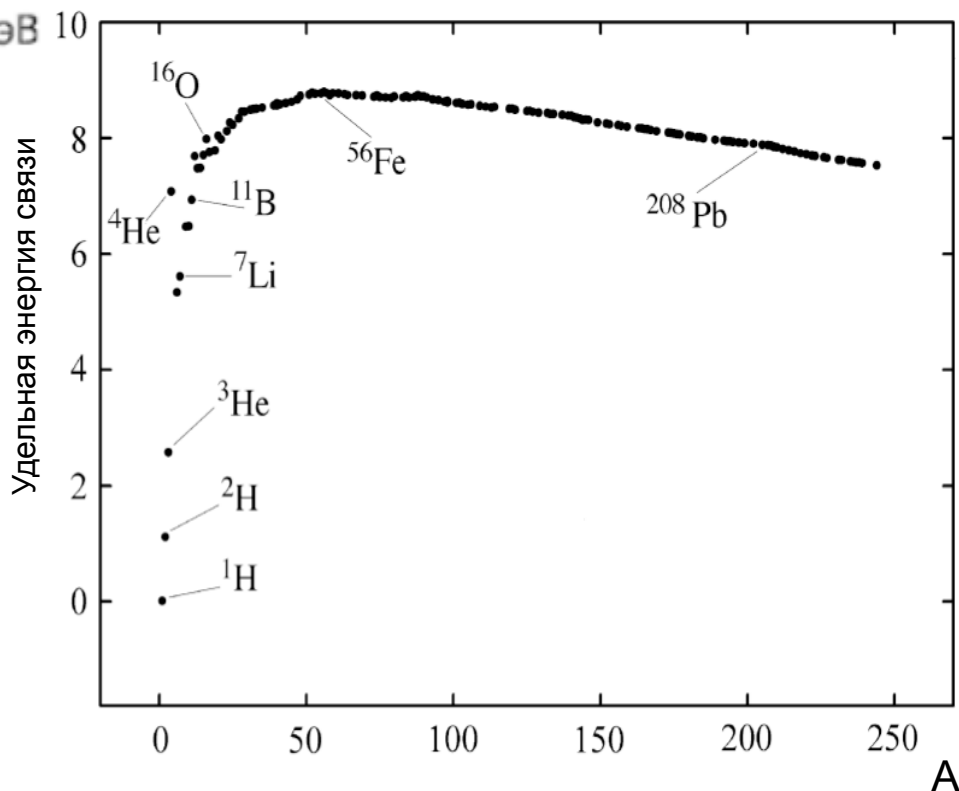
Карл Фридрих фон Вайцзеккер
(1912-2007)



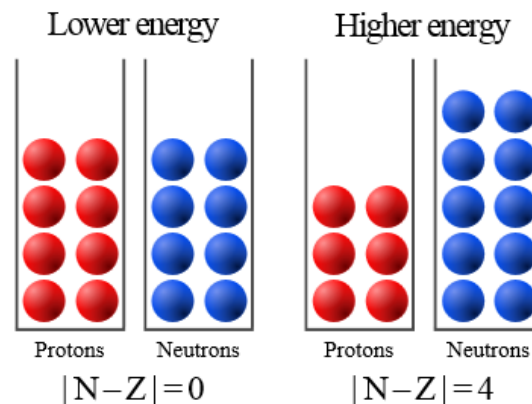
$$E_{\text{св}}(Z, A) = [Zm_p + Nm_n - M(Z, A)]c^2.$$

Магические числа протонов и нейтронов

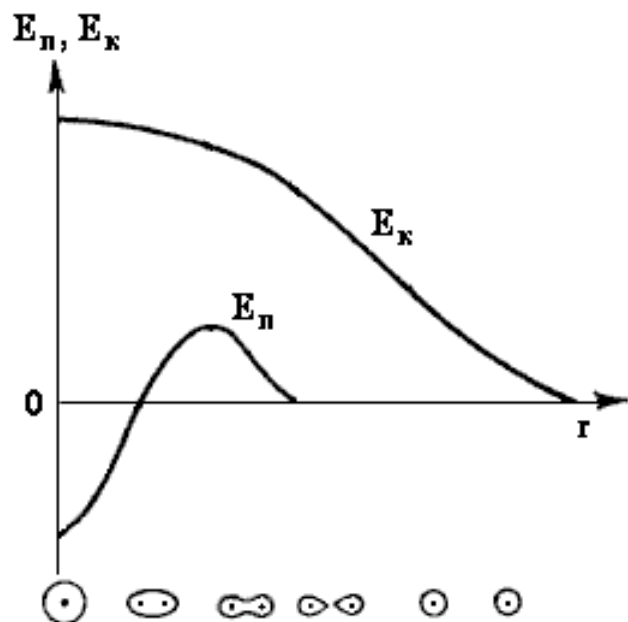
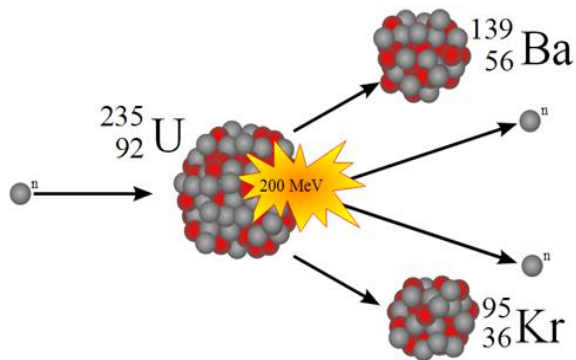
n	2, 8, 20, 28, 50, 82, 126, 184
p	2, 8, 20, 28, 50, 82, 114



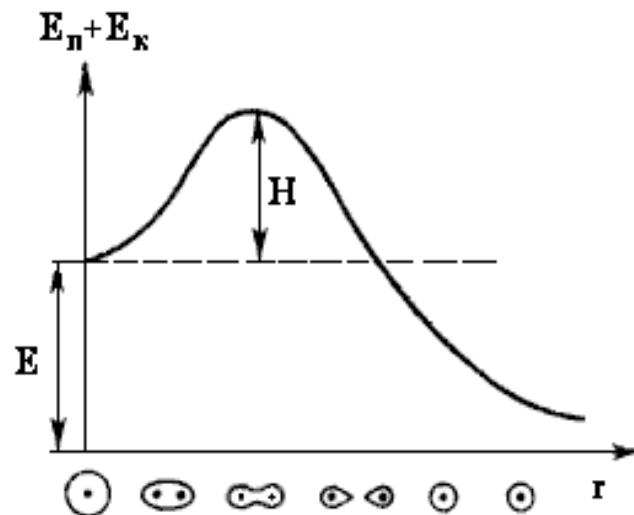
$A = 16$



Модель описывает: энергию связи ядра, ядерные реакции при низких энергиях, идущие через составное ядро Бора, реакции деления ядер.

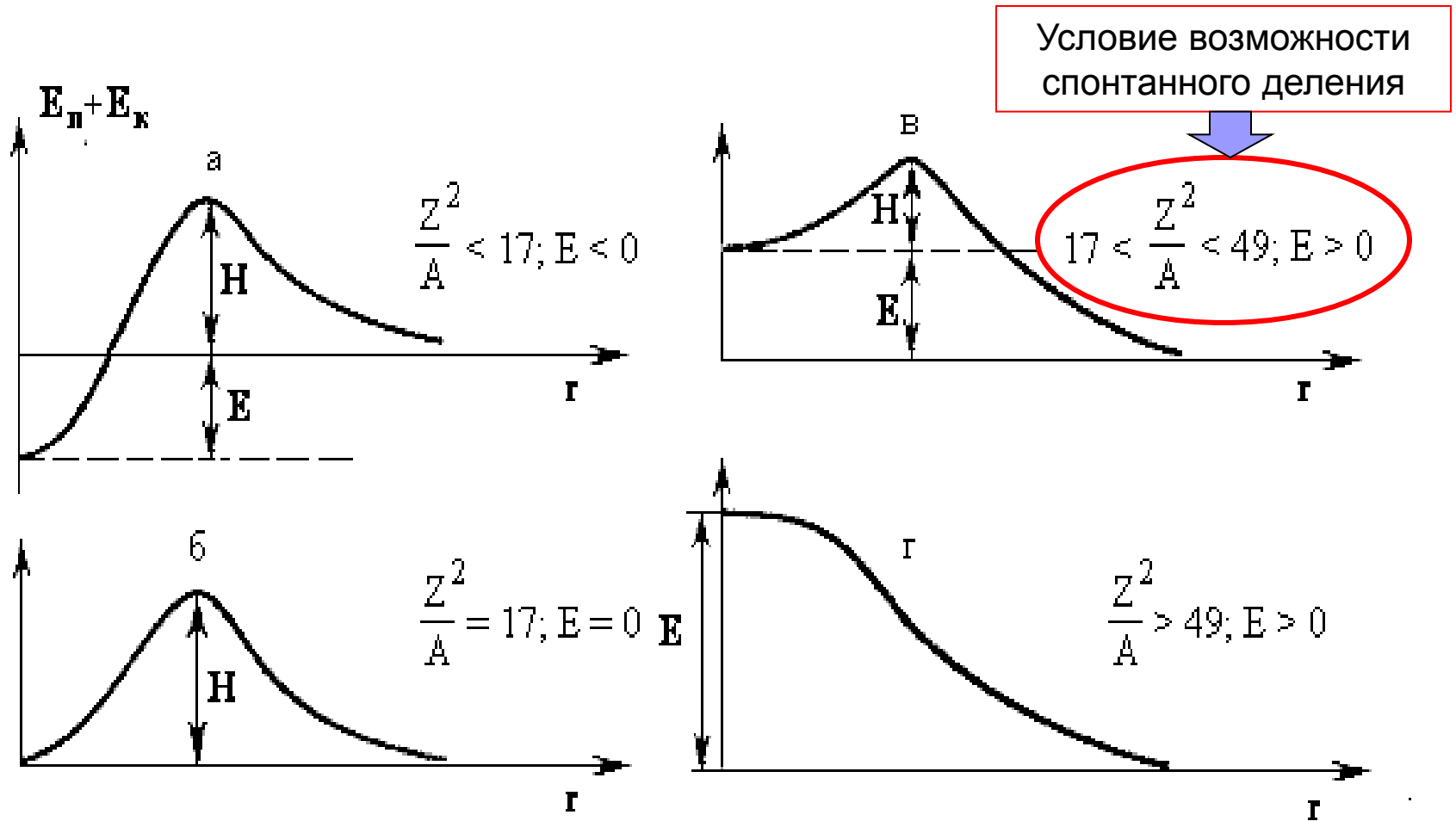


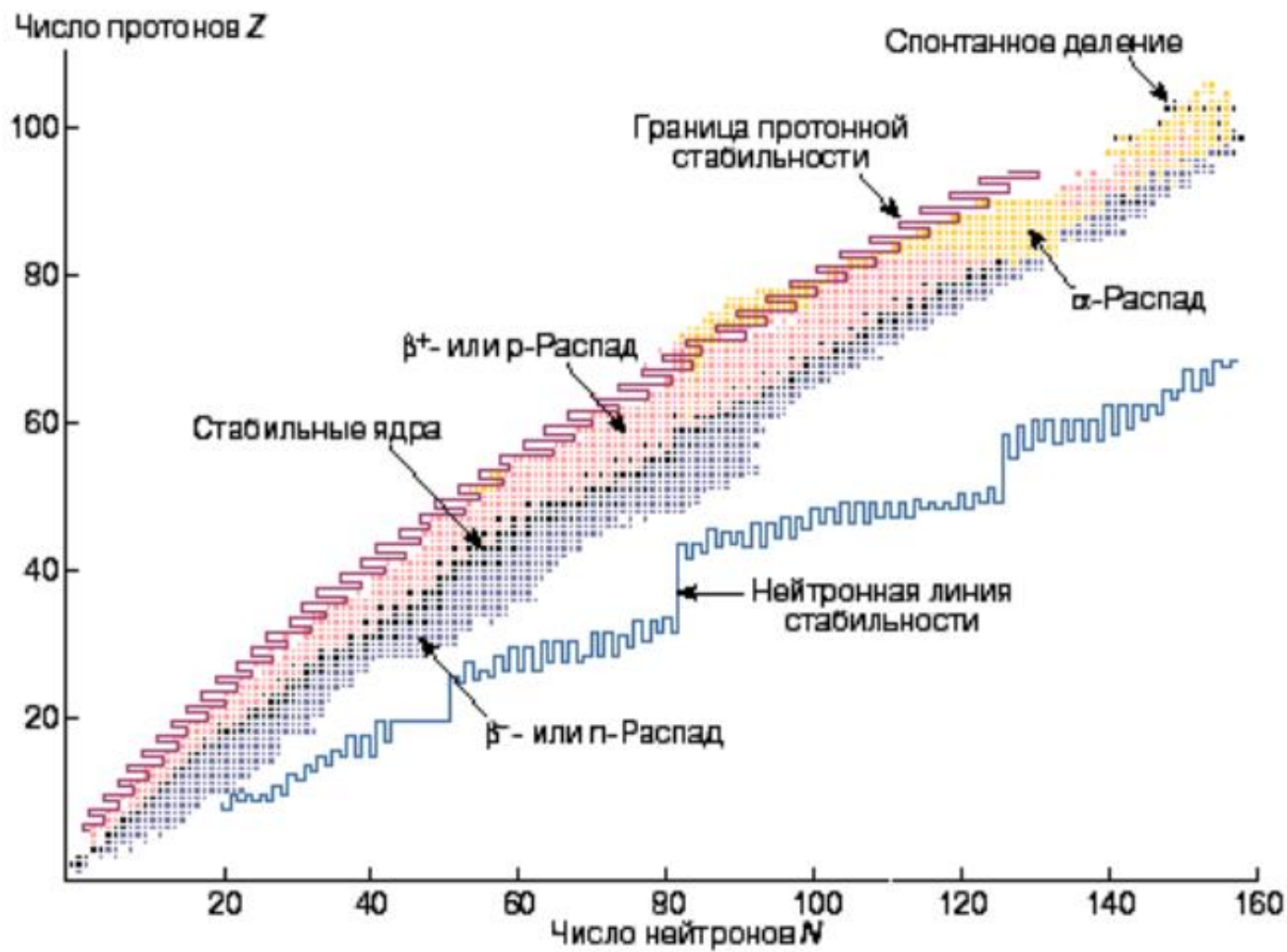
Изменение поверхностной и Кулоновской энергий ядра в процессе деления ядра

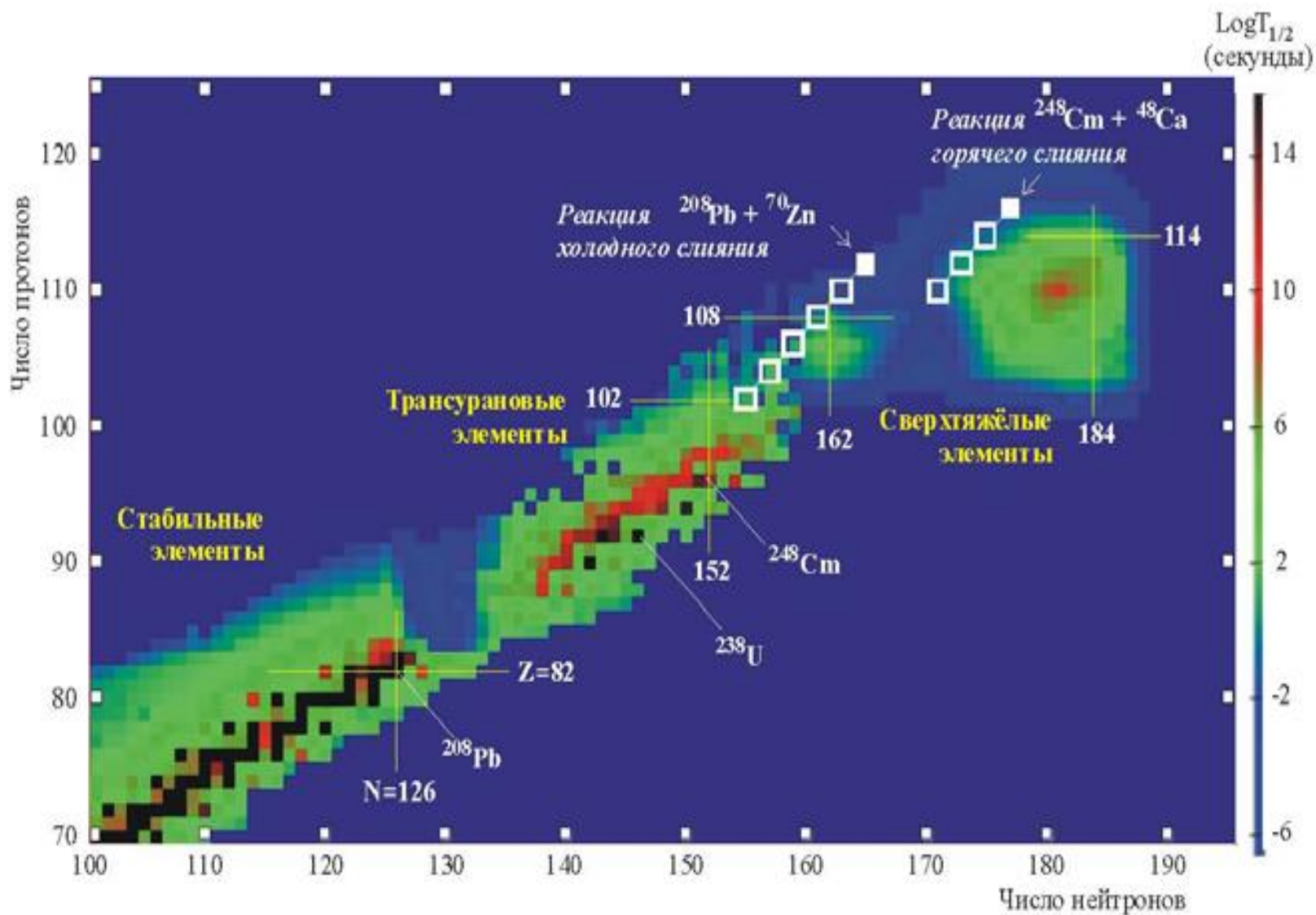


Изменение суммарной поверхностной и Кулоновской энергии в процессе деления ядра

Зависимость формы, высоты потенциального барьера H и энергии деления E от величины *параметра делимости* Z^2/A







Карта тяжелых нуклидов.

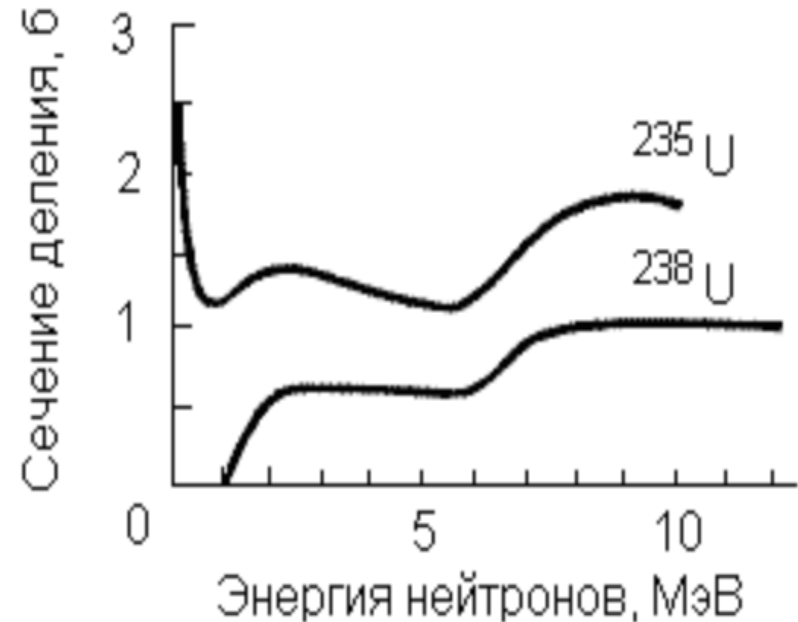
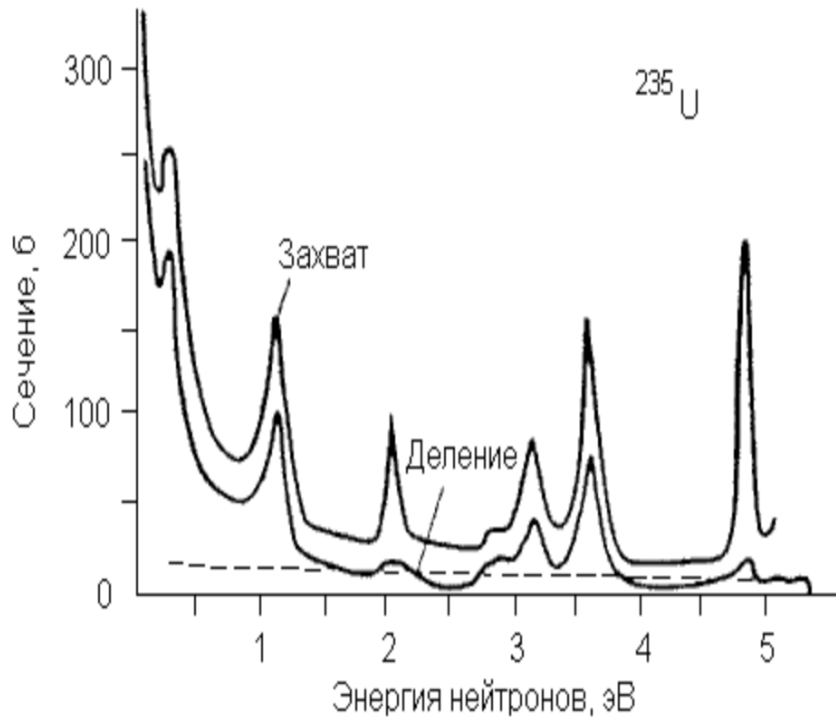
«Острова стабильности» следующие за «полуостровом трансурановых элементов» — предсказания микроскопической теории ядра.

Деление изотопов урана ^{238}U и ^{235}U нейтронами

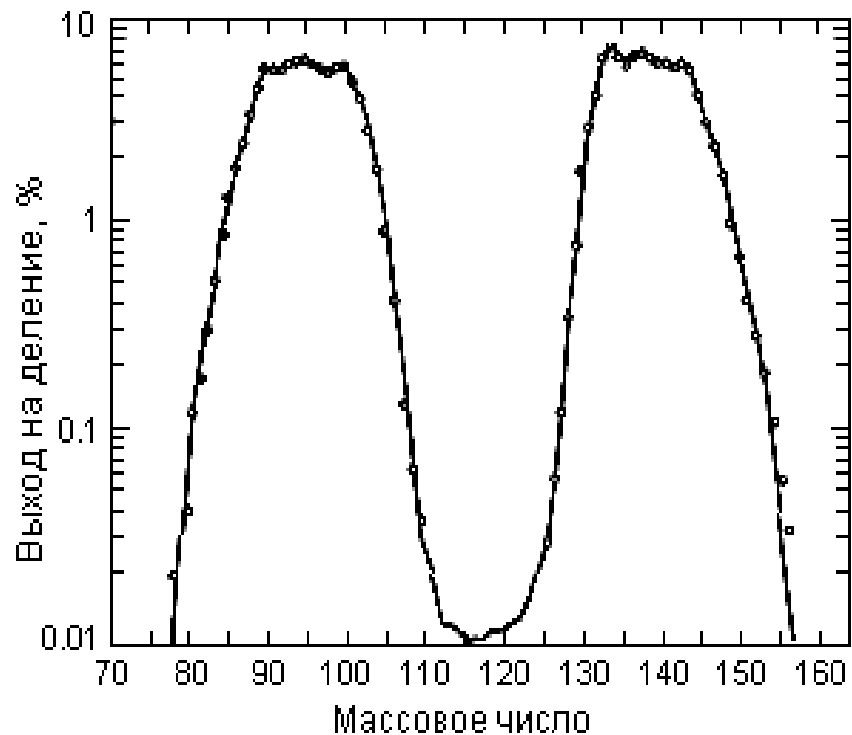
Природный уран содержит 99.3% изотопа ^{238}U и 0.7% изотопа ^{235}U .

^{238}U делится нейтронами с энергией $E_n > 1$ МэВ.

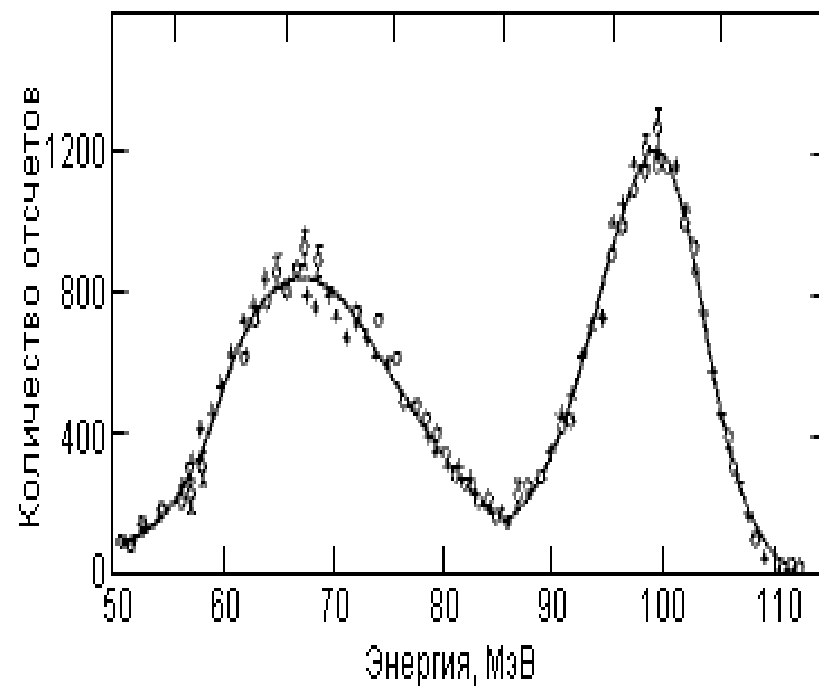
^{235}U делится под действием нейтронов любой энергии и, что **особенно важно** – *эффективно делится тепловыми нейтронами*.



Массовое распределение осколков деления ^{235}U тепловыми нейтронами



Распределение по энергии осколков деления ^{235}U тепловыми нейтронами



3. Цепная реакция деления

Концепция химической цепной реакции впервые была предложена немецким химиком *Максом Боденштейном в 1913 году* для химических взрывов. За разработку теории химических цепных реакций *Н.Н.Семёнов* был удостоен Нобелевской премии по химии вместе с Сирилом Хиншелвудом в *1956* году .



Концепция *ядерной цепной реакции* была предложена Лео Сцилардом (*Szilard*) 12 сентября 1933 года.

В 1939 года Л.Сцилард и Э.Ферми открыли размножение нейтронов в уране.

Понимая важность открытия, Сцилард написал письмо президенту США Ф.Д. Рузвельту, которое подписал А. Эйнштейн. В письме выражалась озабоченность, что нацисты в Германии могут создать атомную бомбу.

В СССР аналогичное письмо Сталину в 1942 году написал будущий академик лейтенант Г.Н.Флёрв

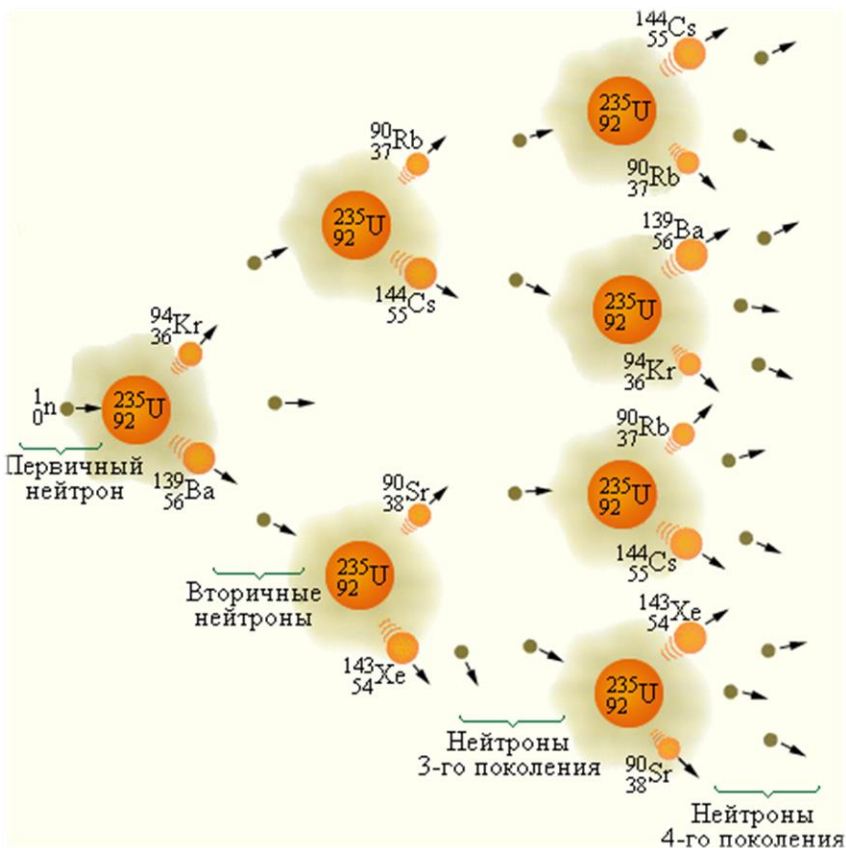


Схема цепной ядерной реакции деления на U-235 в среде с замедлителем

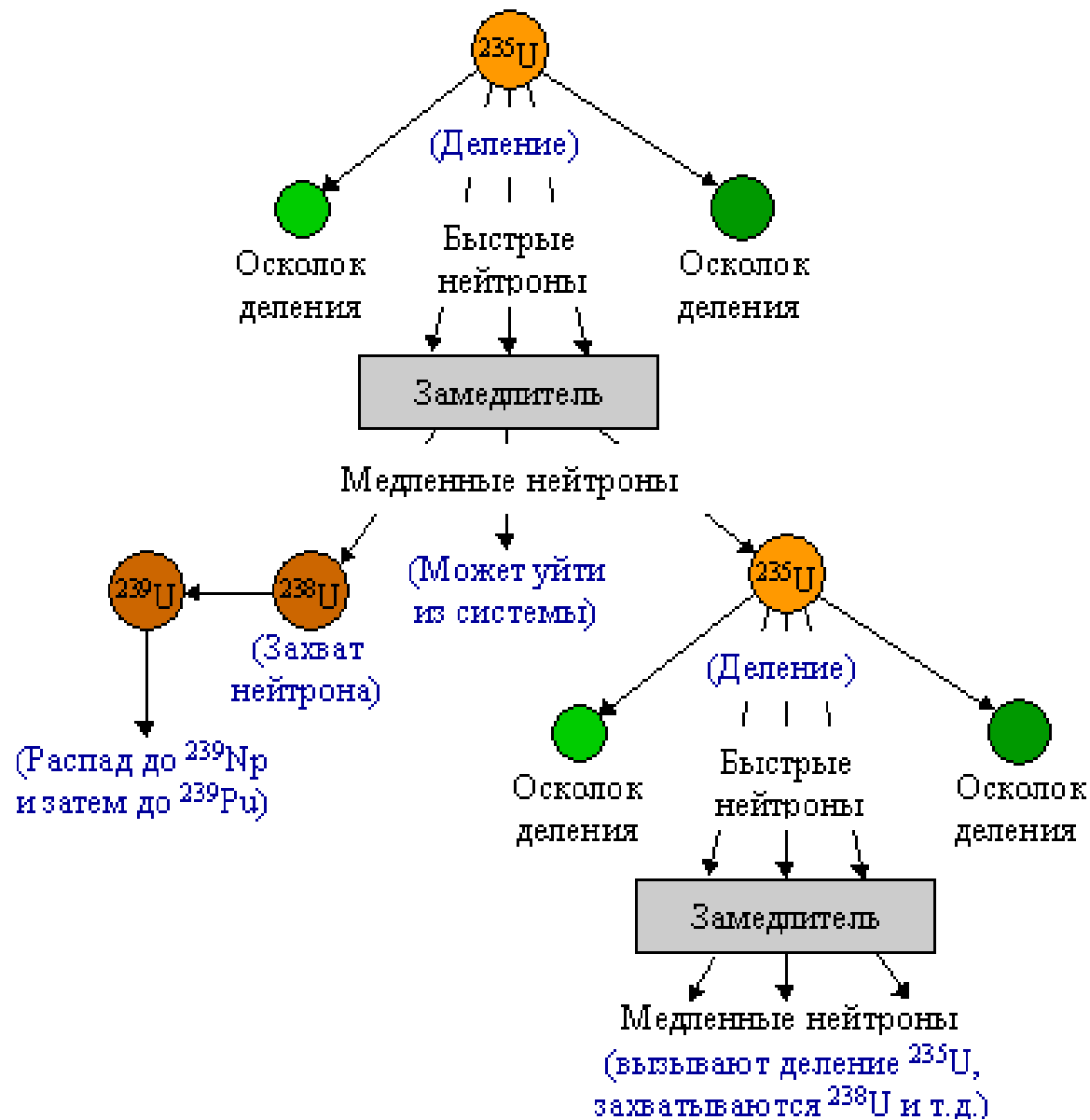
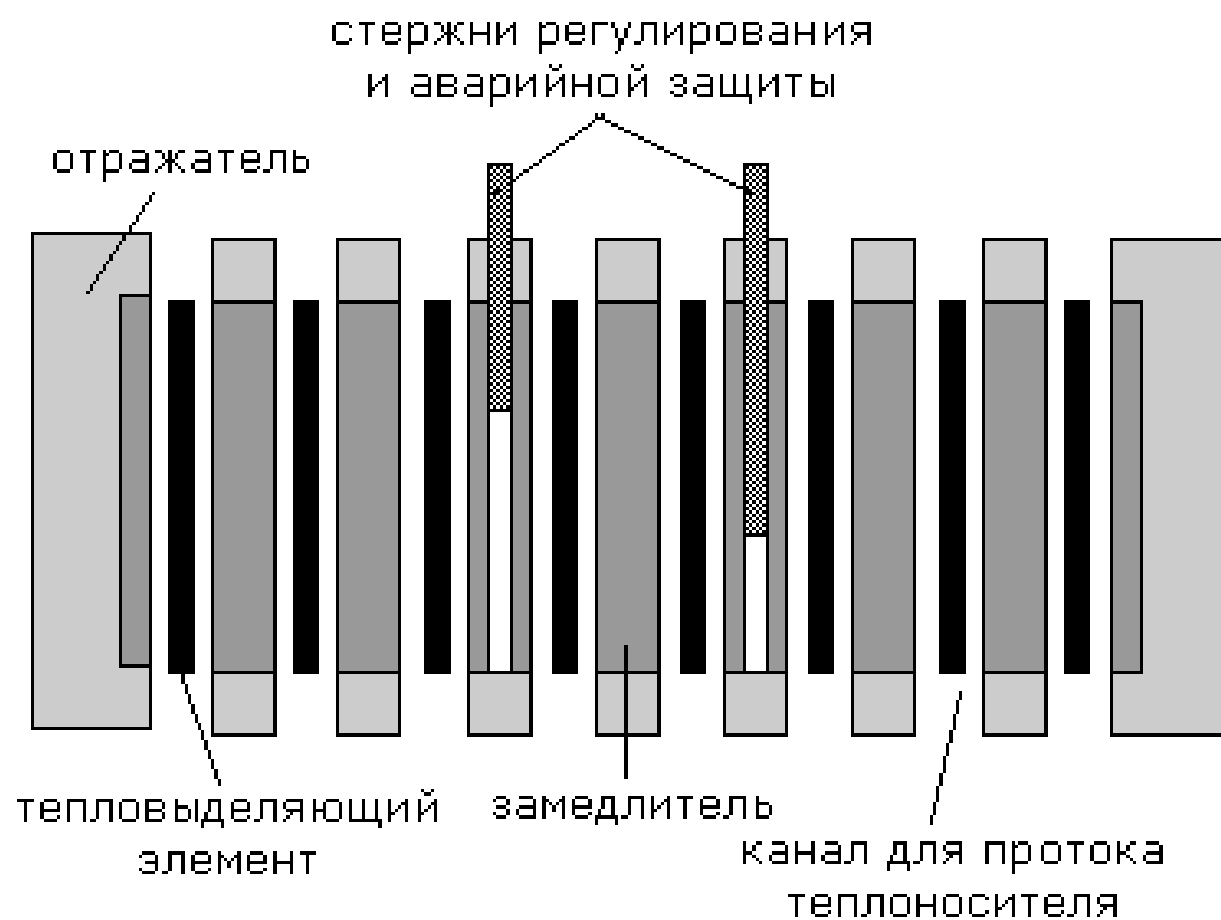


Схема гетерогенного теплового реактора

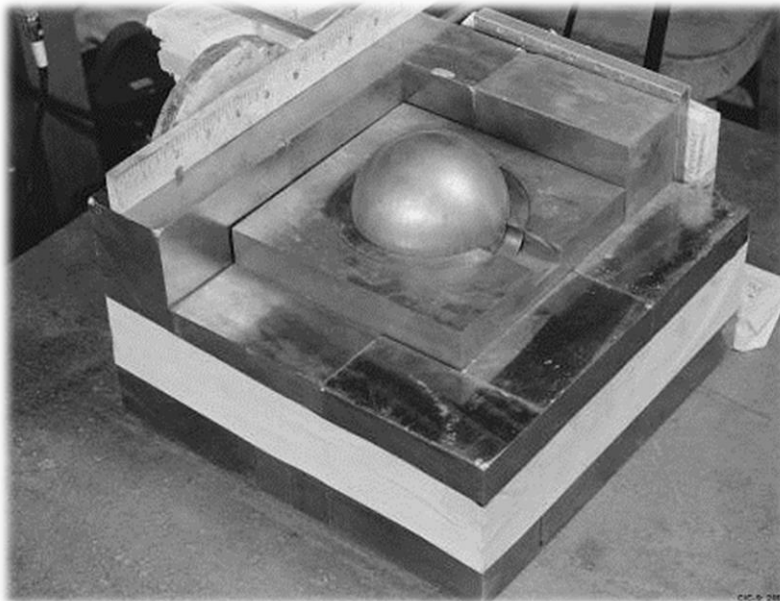


Критическая масса — минимальная масса делящегося вещества, необходимая для начала самоподдерживающейся цепной реакции деления.

Коэффициент размножения нейтронов в таком количестве вещества больше единицы или равен единице. Размеры, соответствующие критической массе, также называют критическими.

*Наименьшей критической массой обладают растворы солей чистых делящихся нуклидов в воде с водяным отражателем нейтронов. Для ^{235}U критическая масса такого раствора равна 0,8 кг, для ^{239}Pu — 0,5 кг, для некоторых солей ^{251}Cf — **10 г**.*

Образец с минимальной критической массой имеет форму шара.



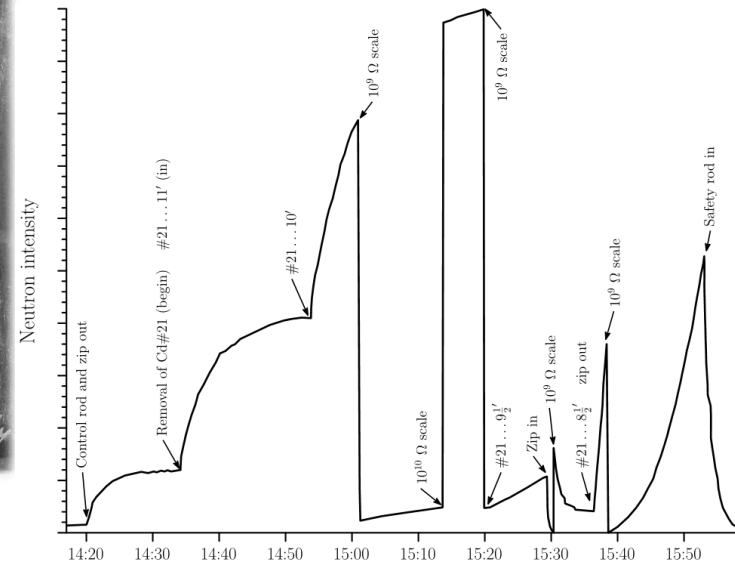
Плутониевый шар, окружённый отражающими нейтроны блоками из карбида вольфрама (реконструкция прибора 1945 года для определения критической массы плутония)

4. Использование энергии деления ядер

Первый ядерный реактор был построен и запущен **в декабре 1942** года в Чикаго (США) под руководством **Э. Ферми** в рамках работ, позднее ставших основой Манхэттенского проекта (формальное осуществление Манхэттенского проекта началось 17 сентября 1943 года).



Chicago Pile-1, CP-1 : 200 W



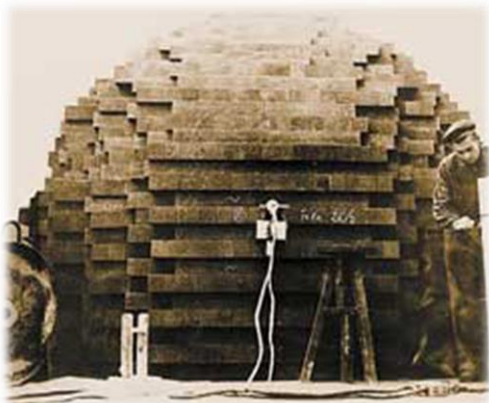


Институт атомной энергии (ИАЭ) имени И. В. Курчатова (Лаборатория № 2 АН СССР)

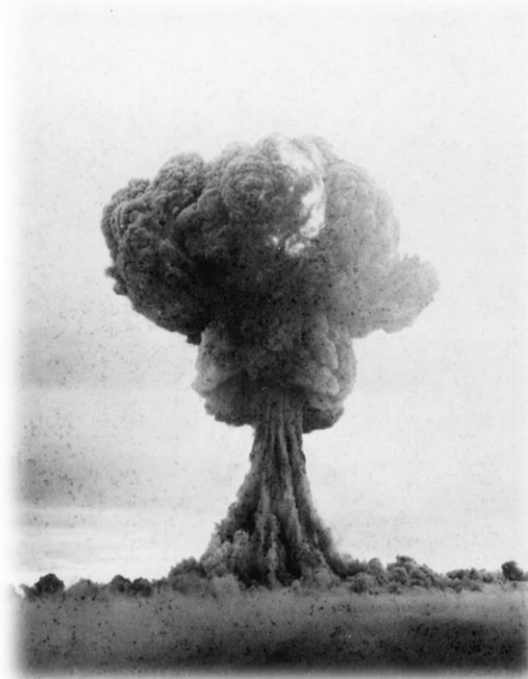
В нашей стране первый реактор был построен в 1946 году под руководством **И. В. Курчатова**.

В первой атомной лаборатории СССР работало 10 человек:

1. А.И. Алиханов
2. М.О. Корнфельд
3. Л.Н. Неменов
4. П.Я. Глазунов
5. **С.Я. Никитин**
6. Г.Я. Щепкин
7. Г.Н. Флёров
8. П.Е. Спивак
9. **М.С. Козодаев**
10. В.П. Джелепов



Первый реактор в Евразии **Ф-1** запущен 25 декабря 1946 года в Лаборатории №2 АН СССР. Тепловая мощность 20 Вт.



Взрыв атомной бомбы **РДС-1**. 29 августа 1949 г. Мощность ~20 кт.



22 ноября 1942 года подписано Постановление № 1871—872с Совета Народных Комиссаров (СНК) СССР об образовании Московского механического института боеприпасов (ММИБ).

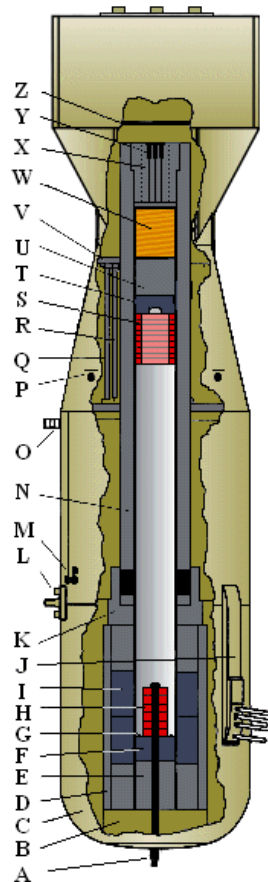
В 1946 году в ММИБ был создан секретный **инженерно-физический факультет** с целью подготовки кадров для отечественной ядерной промышленности и науки.



Первое здание МИФИ в Москве



Военное применения атомной энергии



Cross-section drawing of Y-1852 Little Boy showing major mechanical component placement. Drawing is shown to scale. Numbers in () indicate quantity of identical components. Not shown are the APS-13 radar units, clock box with pullout wires, baro switches and tubing, batteries, and electrical wiring. (John Coster-Mullen)

- Z) Armor Plate
- Y) Mark XV electric gun primers (3)
- X) Gun breech with removable inner plug
- W) Cordite powder bags (4)
- V) Gun tube reinforcing sleeve
- U) Projectile steel back
- T) Projectile Tungsten-Carbide disk
- S) U-235 projectile rings (9)
- R) Alignment rod (3)
- Q) Armored tube containing primer wiring (3)
- P) Baro ports (8)
- O) Electrical plugs (3)
- N) 6.5" bore gun tube
- M) Safing/arming plugs (3)
- L) Lift lug
- K) Target case gun tube adapter
- J) Yagi antenna assembly (4)
- I) Four-section 13" diameter Tungsten-Carbide tamper cylinder sleeve
- H) U-235 target rings (6)
- G) Polonium-Beryllium initiators (4)
- F) Tungsten-Carbide tamper plug
- E) Impact absorbing anvil
- D) K-46 steel target liner sleeve
- C) Target case forging
- B) 15" diameter steel nose plug forging
- A) Front nose locknut attached to 1" diameter main steel rod holding target components

"Atom Bombs: The Top Secret Inside Story of Little Boy and Fat Man," 2003, p 112.
John Coster-Mullen drawing used with permission

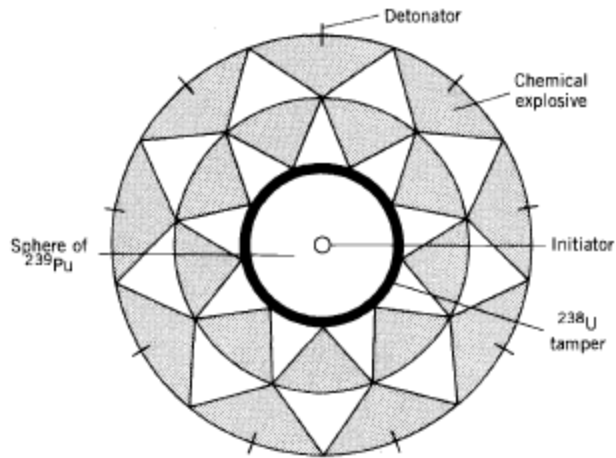
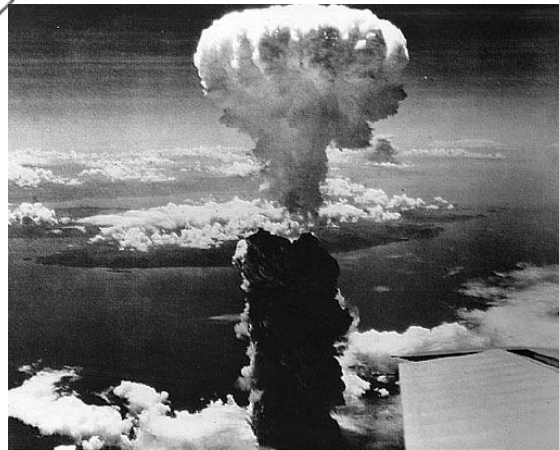
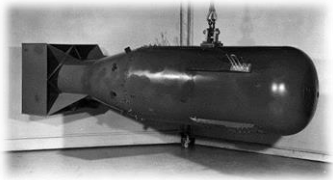
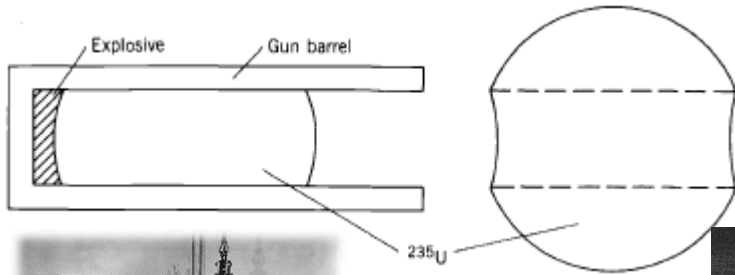
В рамках Манхэттенского проекта были созданы три атомные бомбы: плутониевая *Gadget* (взорвана 16 июля 1945 года при первом ядерном испытании), урановая *Little Boy* (сброшена на Хиросиму 6 августа 1945 года и плутониевая *Fat Man* (сброшена на Нагасаки 9 августа 1945 года).



Размер плазменного шара ~200 м после 0.016 сек.
Мощность 21 кт тротила.

rapidly into the center of the sphere, and the assembly goes supercritical. The bomb that was dropped on Hiroshima, Japan, in 1945 was of this type. The energy release was about 10^{14} J, or equivalent to a conventional bomb containing about 20 kilotons of TNT.

Hiroshima on Monday, August 6, 1945



material into a supercritical state. The first nuclear explosive, tested near Alamogordo, New Mexico, in 1945 and the one later dropped on Nagasaki, Japan, were of this type. The yields of these weapons were, like the ^{235}U bomb, in the range of 20 kilotons of TNT equivalent.



Fat Man
Nagasaki Atomic Bomb:

18-48 kilotons

August 9, 1945 11:02am JSP



Хиросима:

Убито более 20,000 солдат и 70,000–146,000 гражданских лиц

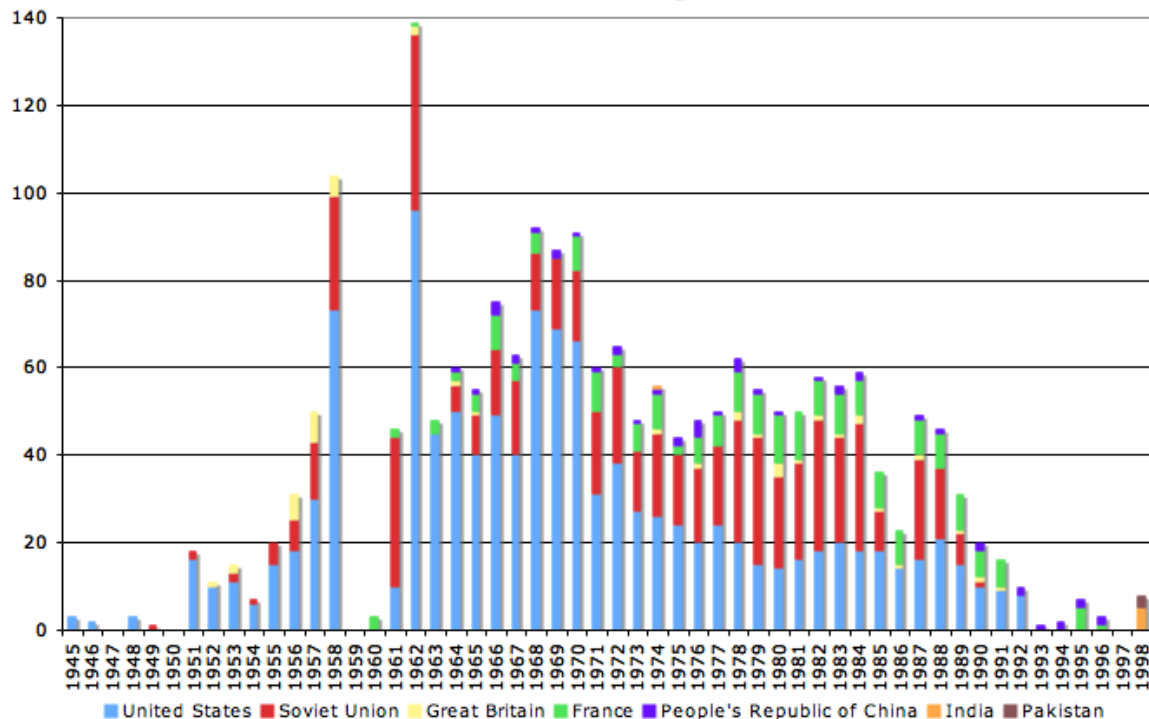
Нагасаки:

Общее число убитых 39,000–80,000

Итого: убито от 129 до 246 тысячи человек



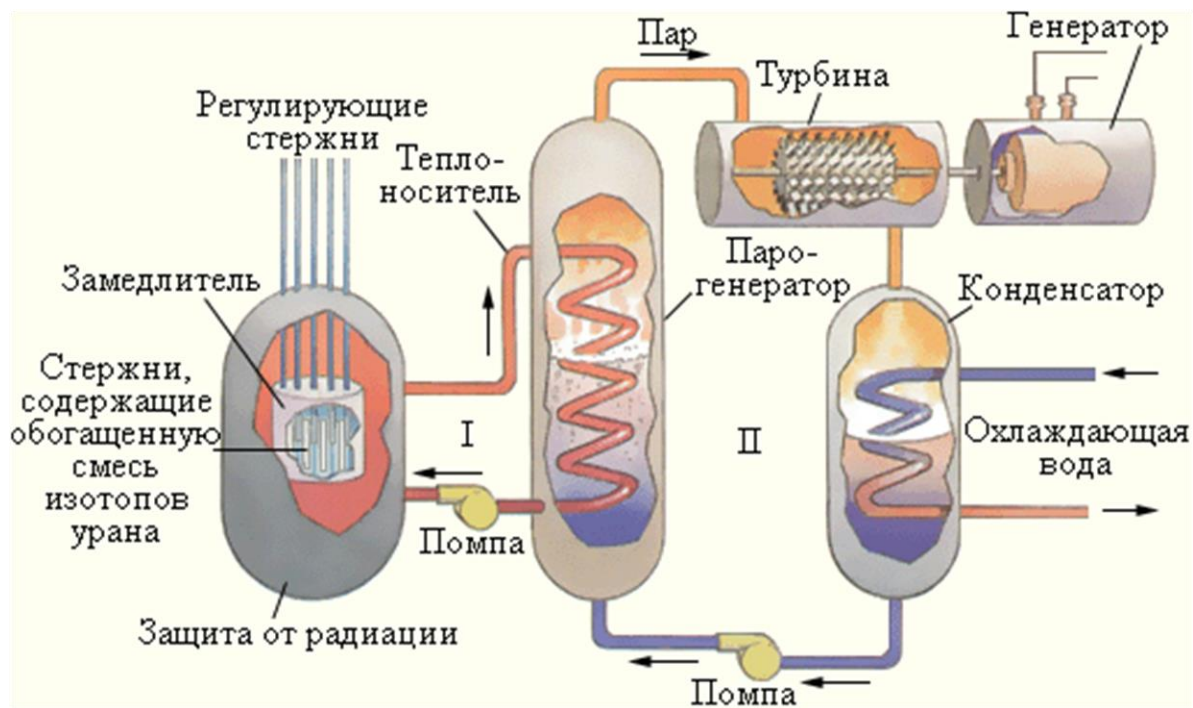
Worldwide nuclear testing, 1945-1998



	Дата	Мощность (Мт)	Размещение заряда	Страна	Место испытания	Испытание
1	30.10.1961	58	Бомба	СССР	Полигон Новая Земля	Царь-бомба
2	24.12.1962	24.2	Бомба	СССР	Полигон Новая Земля	Испытание № 219
3	05.08.1962	21.1	Бомба	СССР	Полигон Новая Земля	Испытание № 147
4	27.09.1962	20	Бомба	СССР	Полигон Новая Земля	Испытание № 174
5	25.09.1962	19.1	Бомба	СССР	Полигон Новая Земля	Испытание № 173
6	28.02.1954	15	Площадка	США	Атолл Бикини	Кастл Браво
7	04.05.1954	13.5	Баржа	США	Атолл Бикини	Кастл Янки <small>русск. (англ.)</small>
8	23.10.1961	12.5	Бомба	СССР	Полигон Новая Земля	Испытание № 123
9	26.03.1954	11	Баржа	США	Атолл Бикини	Кастл Ромео <small>русск. (англ.)</small>
10	31.10.1952	10.4	Площадка	США	Атолл Эниветок	Айви Майк
11	25.08.1962	10	Бомба	СССР	Полигон Новая Земля	Испытание № 159
12	19.09.1962	10	Бомба	СССР	Полигон Новая Земля	Испытание № 168

ядерные испытания, мощность взрыва которых составила 10 мегатонн ТНТ и более

Атомная энергетика



Ядерная реакция протекает в активной зоне реактора, которая заполнена замедлителем и пронизана стержнями, содержащими обогащенную смесь изотопов урана с повышенным содержанием U-235 (до 3 %). В активную зону вводятся стержни, содержащие кадмий или бор, которые интенсивно поглощают нейтроны и позволяют регулировать интенсивность цепной реакции.

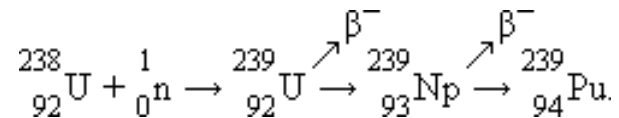


Первая АЭС запущена 27 июня 1954 г. в посёлке Обнинское Калужской области в Физико-энергетическом институте имени А. И. Лейпунского (Лаборатория «В») с уран-графитовым каналным реактором с водяным теплоносителем: **AM1** («Атом Мирный») мощностью 5 МВт.

Реакторы на быстрых нейтронах

РБН использует для поддержания ядерной реакции нейтроны с энергией $>10^5$ эВ. В качестве основного топлива используется ^{238}U

Отражатель нейтронов для реакторов на быстрых нейтронах (БР) изготавливают из тяжёлых материалов: ^{238}U , ^{232}Th . Они возвращают в активную зону нейтроны с энергиями выше 0,1 МэВ. Более холодные нейтроны захватываются ядрами ^{238}U , ^{232}Th и расходуются на получение ядер ^{239}Pu и ^{233}U .



Ядерным горючим БР является обогащённая смесь, содержащая не менее 15 % изотопа ^{235}U .

Мощность реактора регулируется сборками с *подвижным поглощающим элементом из природного урана или тория*. В небольших реакторах на быстрых нейтронах более эффективен как регулятор *подвижный отражатель*: ходом цепной реакции управляют, изменяя утечку нейтронов. Если слой отражателя удалять из реактора, то утечка нейтронов увеличивается, вследствие чего тормозится развитие цепного процесса, и наоборот. Наиболее эффективны подвижные слои отражателя на границе с активной зоной.

Коэффициент воспроизводства «бридерных» реакторов достигает **1,5**, т. е. на 1 кг ^{238}U получается до 1,5 кг ^{239}Pu .

Теплоноситель – как правило, металл. В настоящее время в России функционируют быстрые реакторы с *натриевым теплоносителем* БН-600 на 3-м блоке и БН-800 (запущен 10.12.2015) на 4-м блоке Белоярской АЭС + серия реакторов для подводных лодок.

Считается, что при использовании реакторов-размножителей запасов урана для производства энергии человечеству хватит не менее, чем на 6000 лет.



Энрико Ферми
(1901-1954)



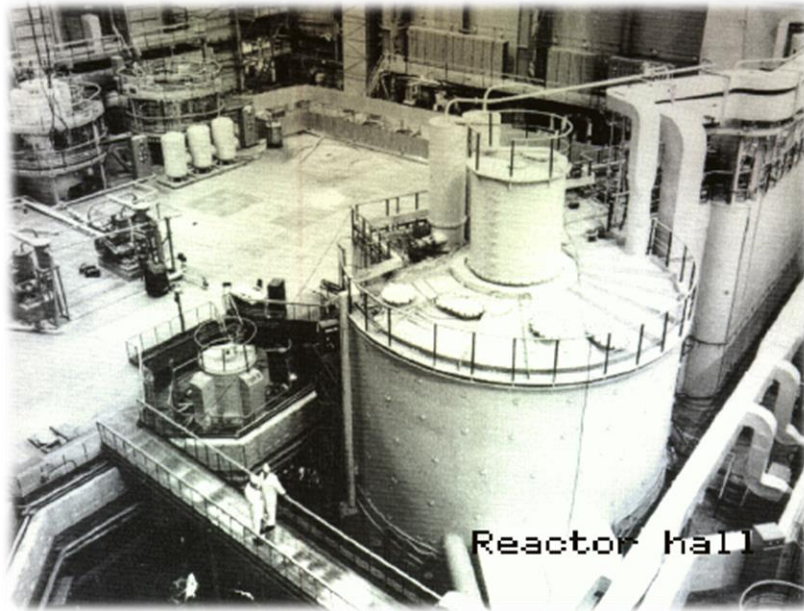
Александр Ильич Лейпунский
(1903-1972)

Идею РБН впервые высказал *Э. Ферми в 1942 г.* Первые два реактора на быстрых нейтронах появились в США: сначала был собран стенд «Клементина» (работал с 1946-го по 1952 г. в Лос-Аламосе), а в 1951 году — EBR-1 (experimental breeder reactor). В 70-х годах при президенте Картере США отказались от строительства бридеров.

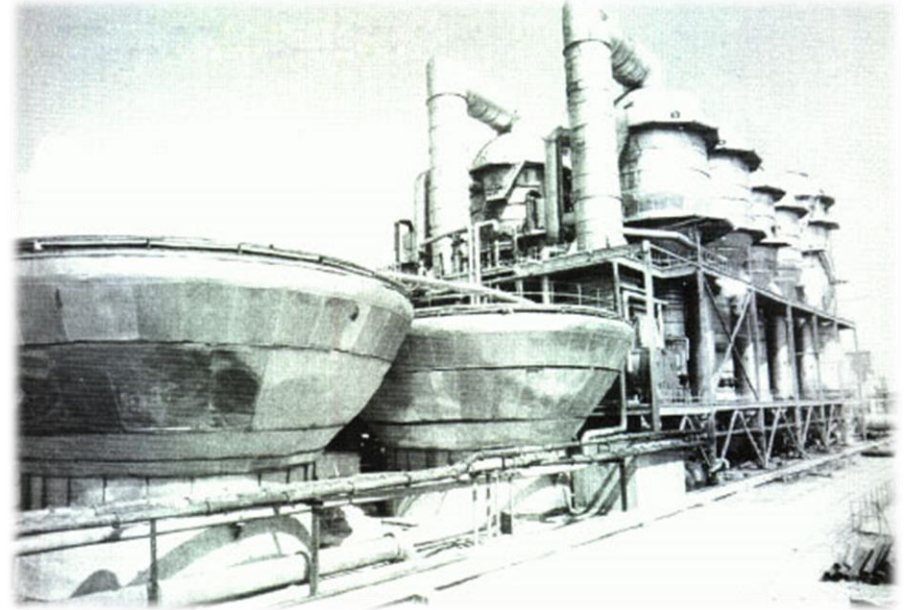
Независимо от Ферми идею расширенного воспроизводства ядерного топлива в РБН в 40-х годах выдвинул и обосновал *А. Лейпунский*, воплотивший её в серии экспериментальных устройств. Первый советский экспериментальный стенд нулевой мощности БР-1 был пущен в Обнинском ФЭИ в 1956 г. Там же двумя годами позже запустили исследовательский реактор БР-2 с ртутным теплоносителем. В 1954-1955 годах реакторы ZEUS и ZEPHYR были опробованы в Великобритании. Быстрый французский реактор RAPSODIE заработал в 1967, а японский JOYO – в 1977 году. В Германии установка с быстрым реактором SNR-300 была построена в 1985 году, но так до сих пор и не запущена. Причина – сложность работы с металлическими теплоносителями.

В настоящее время *Россия – практически единственная страна, где интенсивно развивается технология РБН.* В Индии ведётся строительство демонстрационного быстрого натриевого реактора PFBR-500 мощностью 500 МВт (эл.).

Реактор БН-350 в Актау (Шевченко), Казахстан



Опреснители на основе БН-350

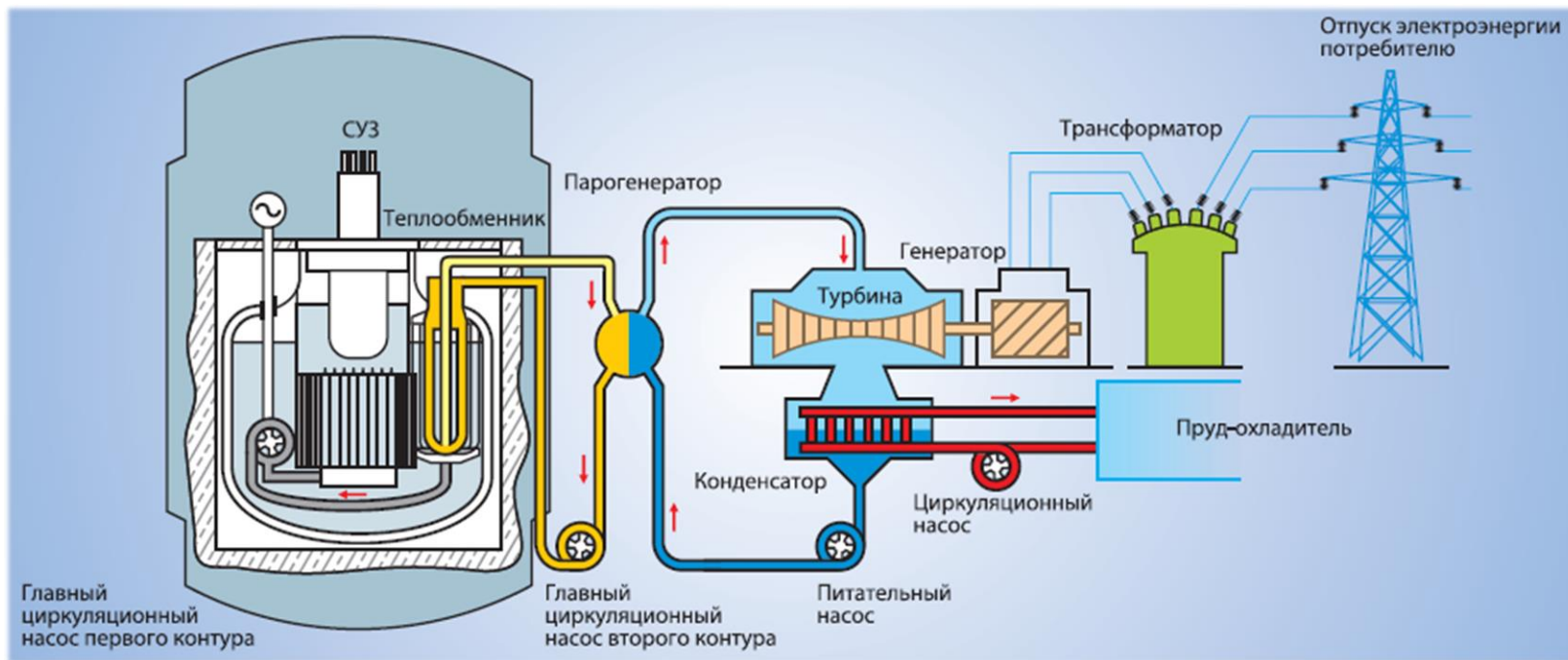


Отражатель реакторов на БН изготавливают из тяжёлых материалов: ^{238}U , ^{232}Th . Они возвращают в активную зону быстрые нейтроны с энергиями выше 0,1 МэВ. Более холодные нейтроны, захваченные ядрами ^{238}U , ^{232}Th , расходятся на получение делящихся ядер ^{239}Pu и ^{233}U .

Мощность реактора регулируется сборками с подвижным поглощающим элементом (ПЭЛ) со стержнями из природного урана или тория. В небольших реакторах на быстрых нейтронах более эффективен как регулятор подвижный отражатель: ходом цепной реакции управляют, изменяя утечку нейтронов.

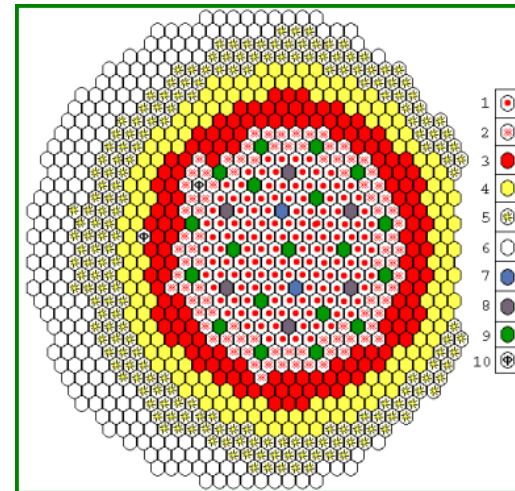
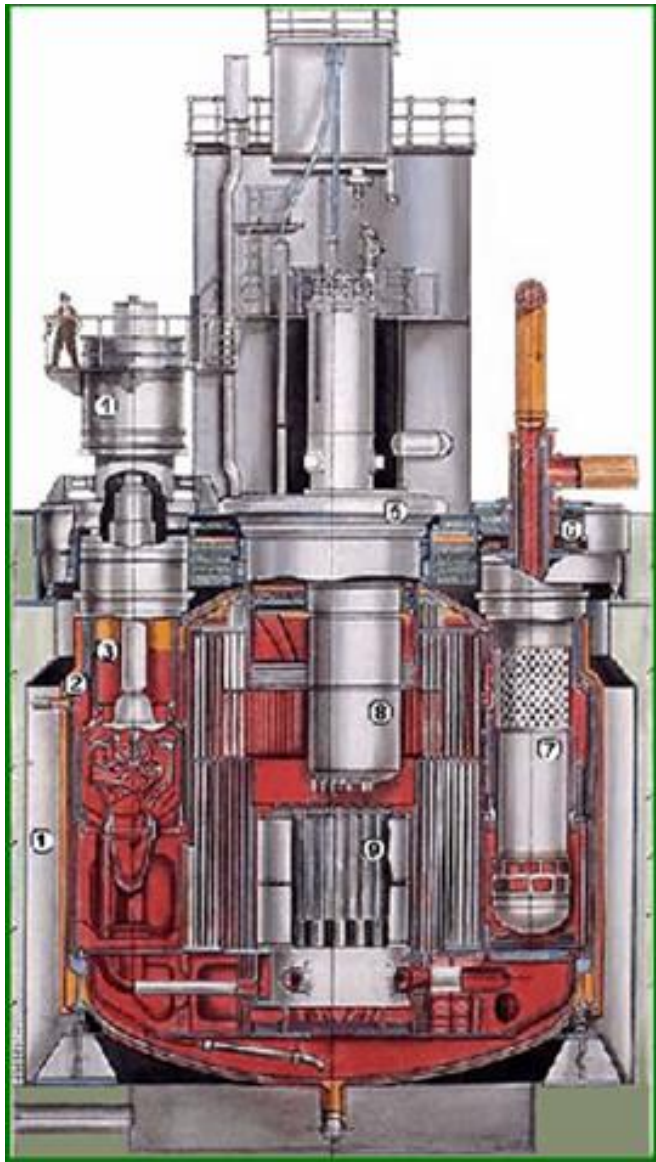
Сечение деления в быстрой области энергий не превышает 2 барн. Поэтому для осуществления цепной реакции на быстрых нейтронах необходима высокая концентрация делящегося вещества в активной зоне.

Схема ядерного энергоблока с реактором на быстрых нейтронах БН-600 (Белоярская АЭС)



Конструкция реактора БН-600

1 - Шахта; 2 - Корпус; 3 - Главный циркуляционный насос 1 контура; 4 - Электродвигатель насоса; 5 - Большая поворотная пробка; 6 - Радиационная защита; 7 - Теплообменник "натрий-натрий"; 8 - Центральная поворотная колонна с механизмами СУЗ; 9 - Активная зона.



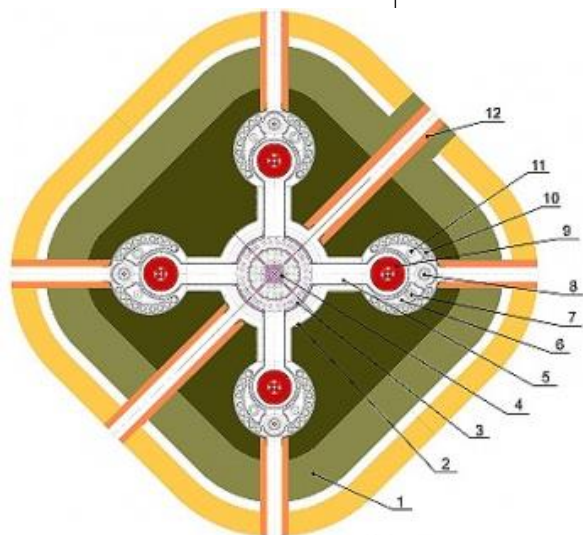
Картограмма загрузки реактора БН-600: 1 - ТВС активной зоны с малым обогащением топлива ураном-235; 2 - ТВС активной зоны со средним обогащением; 3 - ТВС активной зоны с большим обогащением; 4 - ТВС внутренней зоны производства; 5 - ТВС внешней зоны производства; 6 - Хранилище отработавших сборок; 7 - Стержни автоматического регулирования; 8 - Стержни аварийной защиты; 9 - Компенсирующие стержни; 10 - Фотонейтронный источник.

Основные параметры энергоблока БН-800

Тепловая мощность, МВт	2100
Электрическая мощность, МВт	800
Температура, °С первого контура второго контура	547/354 505/310
Расход теплоносителя по первому и второму контурам, т/ч	3000

Основные параметры проектируемого энергоблока БН-1200

Параметр	Значение
Тепловая мощность реактора, МВт	2800
Средняя температура натрия первого контура на входе/выходе активной зоны, °С	410/550
Температура натрия второго контура (нерадиоактивный) на входе/выходе парогенератора, °С	527/355
Температура острого пара, °С	510

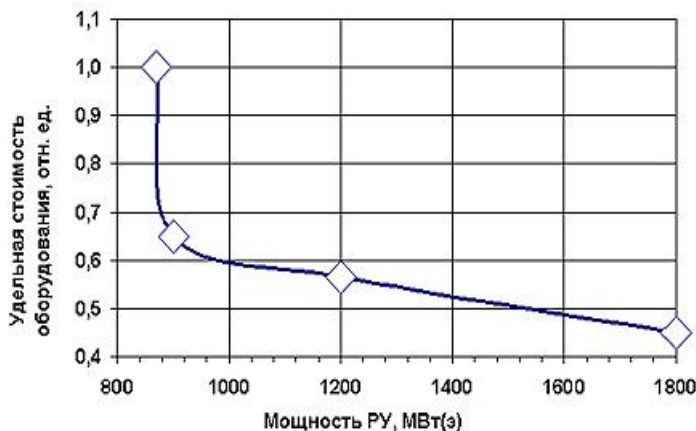


- | | |
|--------------------------------|---|
| 1 — шахта реактора; | 7 — фильтр механический; |
| 2 — блок водорода; | 8 — главный циркуляционный насос; |
| 3 — корзин активационной зоны; | 9 — аэрозольсепаратор; |
| 4 — активная зона; | 10 — канал нормального и аварийного расходоизмерения; |
| 5 — трубопровод коллектора; | 11 — массообменник; |
| 6 — блок ПГ-ГЦФ; | 12 — штурба перегрузки |

Рисунок 2 Поперечный разрез реактора БРЕСТ-ОД-300

БРЕСТ —

разрабатывающийся в настоящее время в России проект реакторов на быстрых нейтронах со свинцовым теплоносителем, двухконтурной схемой отвода тепла к турбине и закритическими параметрами пара.



Проект «Прорыв»

Проект «Прорыв» объединяет технологии реакторов на быстрых нейтронах и замкнутого ядерного топливного цикла.

Пять блоков БН-1200 должны быть построены в 2025, 2028, 2030, 2033 и 2035 годах. Согласно схеме территориального планирования РФ в области энергетики до 2030 года, один блок с БН-1200 планируется разместить на Белоярской АЭС и еще два — на будущей Южно-Уральской АЭС.

Энергоблоки с реакторами на быстрых нейтронах могут существенно расширить топливную базу атомной энергетики и минимизировать радиоактивные отходы за счет организации замкнутого ядерно-топливного цикла.

Завод по производству смешанного оксидного уран-плутониевого МОКС-топлива для усовершенствованных коммерческих реакторов на быстрых нейтронах, которые будут использоваться в атомной энергетике будущего, планируется построить в РФ до 2025 года.



Атомный флот



Первая в мире атомная подводная лодка USS «Nautilus» (SSN-571) **17 января 1955 года** отправила в эфир историческое сообщение: «Underway on nuclear power». При водоизмещении «Наутилуса» около 4000 т энергетическая установка суммарной мощностью 9860 кВт обеспечивала мощность 13 800 л.с. и скорость более 20 узлов. Дальность плавания в подводном положении составляла 25 тысяч миль при расходе 450 г ^{235}U в месяц



Первый атомный ледокол «Ленин»:
12 сентября 1959 года ходовые испытания
Водоизмещение 16 000 т
Мощность 32,4 МВт (44 тыс.л.с.)
Скорость до 19,6 узлов
Автономность 12 месяцев



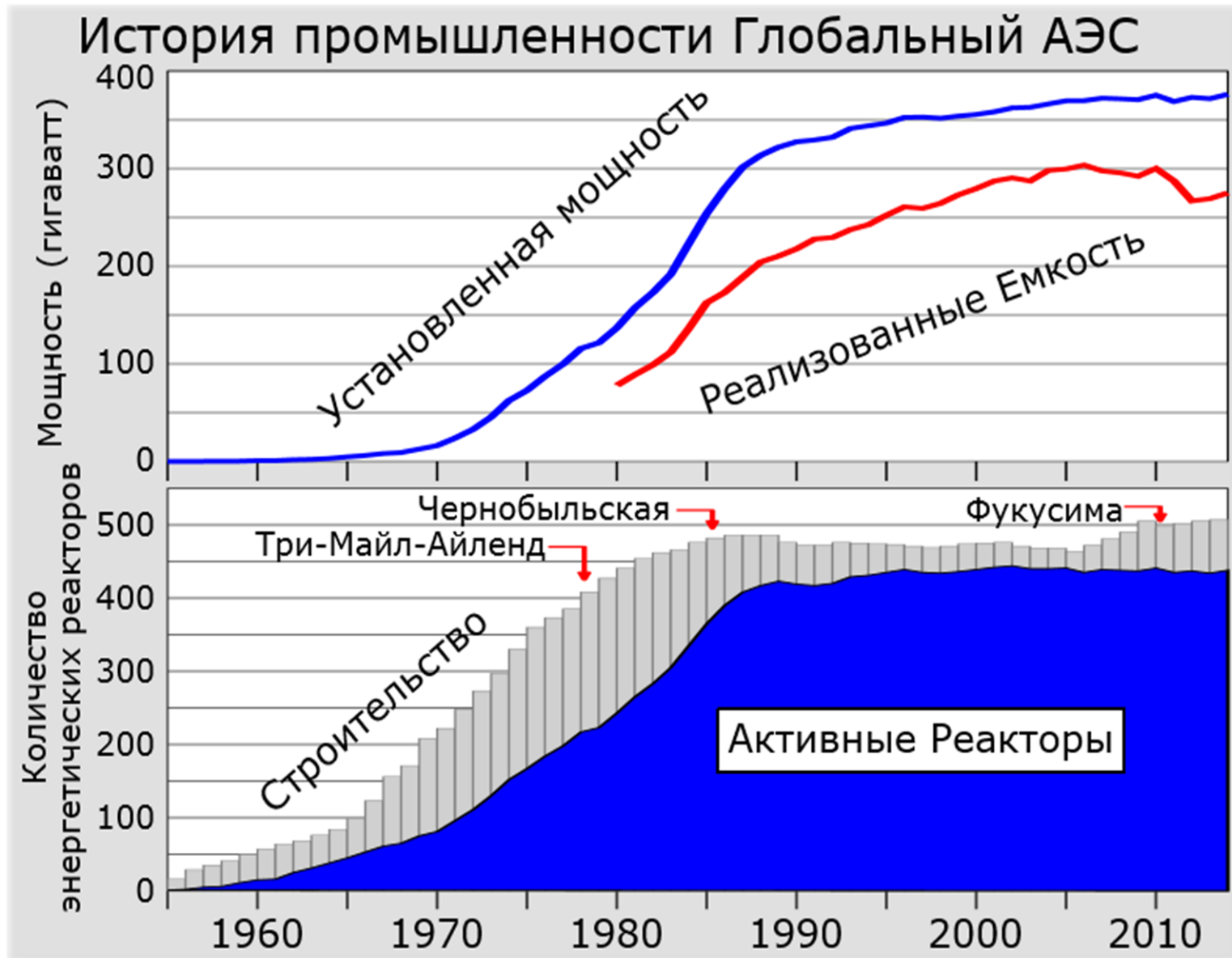
Все 10 существовавших в мире атомных ледоколов (хотя один из них на самом деле является не ледоколом, а атомным лихтеровозом с ледокольным носом) были спроектированы в СССР и России.



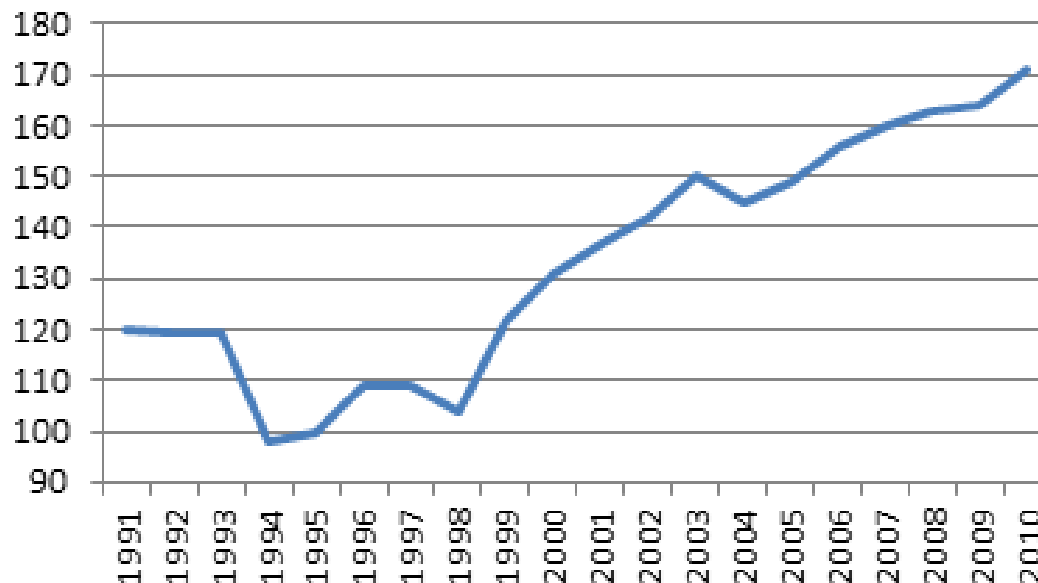
Сравнение классов российских ледоколов

Характеристики	Ленин ^[3]	Арктика ^[4]	Таймыр ^[4]	ЛК-60Я ^[4]	ЛК-110Я ^[5]
Длина наибольшая / по КВЛ, м	134,0 / 124,0	148,0 / 136,0	150,0 / 140,6	172,2 / 160,0	206,0 / 193,6
Ширина наибольшая / по КВЛ, м	27,6	30,0 / 28,0	29,2 / 28,0	33,0 / 32,0	40,0 / 38,0
Высота борта, м	16,1	17,2	15,2	15,2	20,3
Осадка по КВЛ / минимальная, м	10,5	11,0	8,1	10,5/8,55	13,0/11,0
Водоизмещение по КВЛ/по минимальной осадке, т	16000	23460	19600	33600/24800	55600
Число и мощность турбин, кВт	4 по 8085	2 по 27580	2 по 18400	2 по 35400	
Число гребных винтов	3	3	3	3	3
Число и мощность реакторов, кВт	3 по 90000 (2 по 159000 после модернизации)	2 по 171000	1 по 171000	2 по 175000	
Мощность на валах, кВт	32400	49000	32500	60000	110000
Скорость на чистой воде, узлов	18	20,8	20,2	22	24
Лёдопроходимость, м		2,25	1,95	2,8-2,9	3,5
Экипаж, чел	243	130	89	74	127
Построено	1	6	2	0	0
В эксплуатации	0	4	2	0	0

5. Настоящее и будущее атомной энергетики



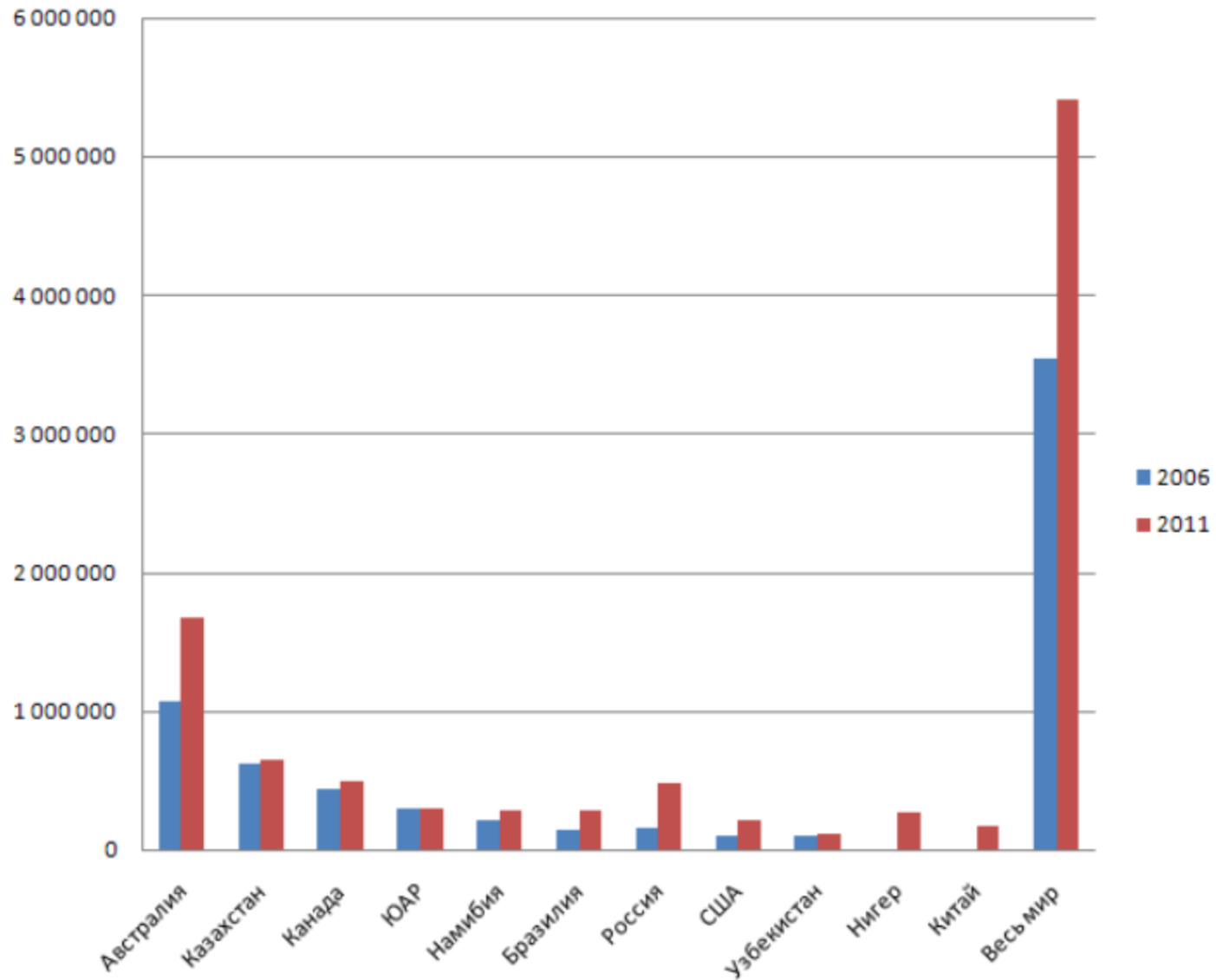
Выработка электроэнергии на российских АЭС, млрд кВт*ч



Мировыми лидерами в производстве ядерной электроэнергии являются:

США - 836,63 млрд кВт·ч/год,	104 реактора,	20% электроэнергии
Франция - 439,74 млрд кВт·ч/год	58	76,9%
Япония - 263,83 млрд кВт·ч/год	48	
Россия - 177,39 млрд кВт·ч/год	34	18,6%
Ю.Корея - 149,2 млрд кВт·ч/год	23	30,4%
Германия - 140,53 млрд кВт·ч/год	9	16%
Всего с мире - 2410 млрд кВт·ч/год	439	2,6%

Мировые запасы урана, тонн



Вопросы безопасности атомной энергетики

Разрушение 26 апреля 1986 года четвёртого энергоблока *Чернобыльской атомной электростанции*, расположенной на территории Украинской ССР



Расположение Чернобыльской АЭС на карте европейской части СССР



В течение первых трёх месяцев после аварии погиб **31 человек**; отдалённые последствия облучения, стали причиной гибели от **60 до 80 человек**. 134 человека перенесли лучевую болезнь. Более **115 тыс. человек** были эвакуированы из 30-км зоны. 600 тыс. человек участвовали в ликвидации последствий аварии.



Fukushima Daiichi nuclear disaster

16 March 2011



The plant comprised six separate boiling water reactors originally designed by General Electric (GE) and maintained by the Tokyo Electric Power Company (TEPCO).

300,000 people who evacuated the area, approximately **1,600 deaths** related to the evacuation conditions, such as living in temporary housing and hospital closures have occurred as of August 2013, a number comparable to the 1,599 deaths directly caused by the earthquake and tsunami in the Fukushima Prefecture in 2011.

Вместо Заключения:

Несмотря на применение ядерного оружия в Хиросиме и Нагасаки, несмотря на длительные испытания ядерных зарядов в воздухе, несмотря на аварии на ядерных электростанциях и предприятиях ядерного цикла, несмотря на возможные отдалённые последствия воздействия излучений на живые организмы, вред, нанесённый человечеству ядерными излучениями, неизмеримо меньше вреда, нанесённого другими высокотехнологическими источниками опасности.

Только за 1 год и только в автомобильных авариях человечество теряет во много раз больше жизней, за 100 лет работы с ядерными технологиями.

Опасность ядерных излучений удаётся удержать в узде, благодаря надёжным способам их регистрации и чёткому следованию правилам безопасности обращения с ними.



*«Открытие расщепления ядра Отто Ганом и Фрицем Штрассманом стало **началом новой эпохи в истории человечества**. Научное достижение, лежавшее в основе этого открытия, потому кажется мне столь необыкновенным, что оно было достигнуто чисто химическим путём, без всяческой теоретической наводки»*

Лиза Мейтнер

Источники информации

1. К.Н. Мухин. Экспериментальная ядерная физика. В 3-х тт. СПб.: Издательство «Лань», 2008. §§49-59
2. K.S. Krane. Introductory Nuclear Physics. John Wiley & Sons, 1988. §§13.1-13.9
<http://faculty.kfupm.edu.sa/PHYS/aanaqvi/Introductory-Nuclear-Physics-new-Krane.pdf>
3. И.Н. Бекман. Ядерная физика. http://profbeckman.narod.ru/RH0.files/23_3.pdf