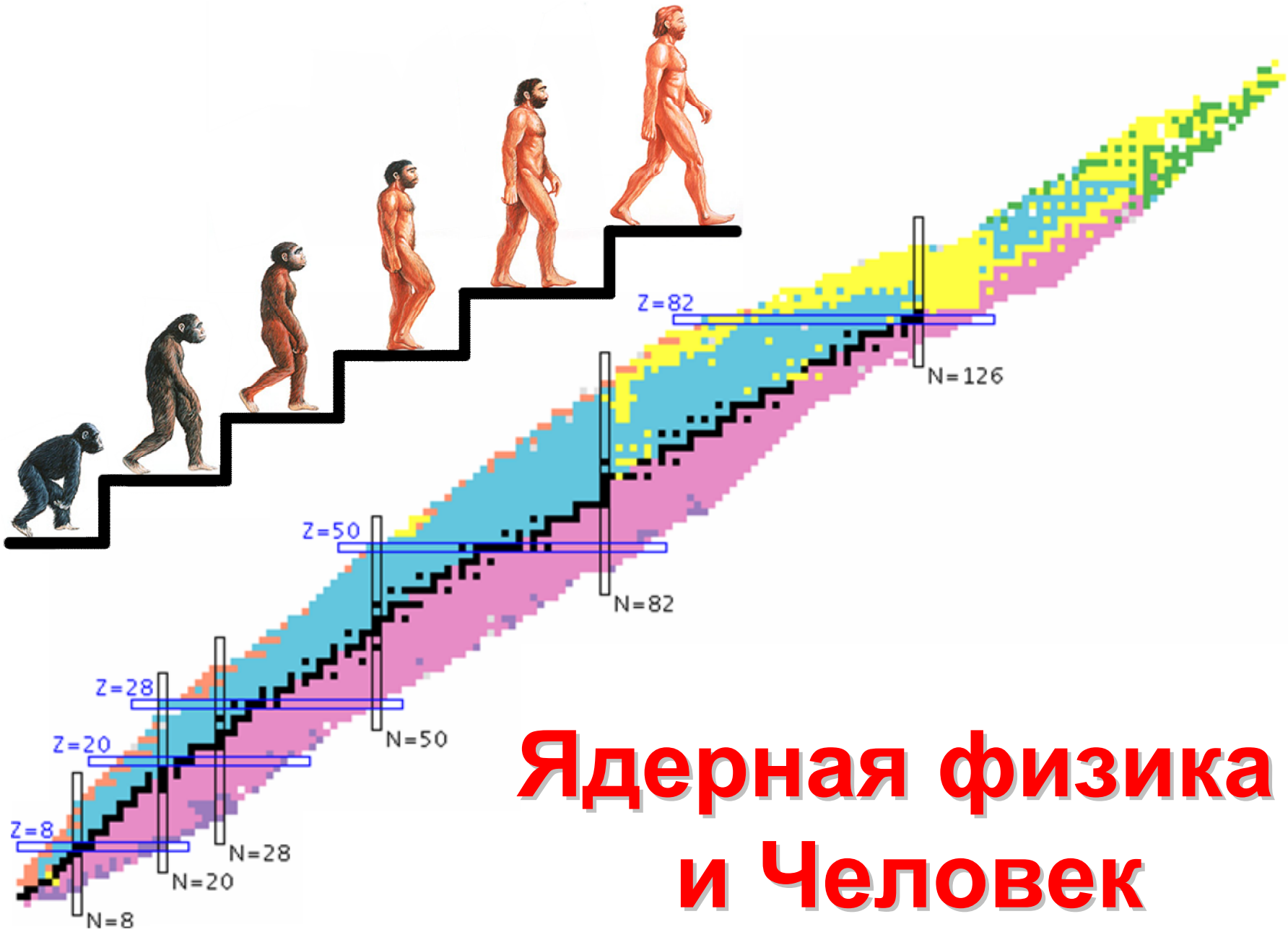


Ядерная физика и Человек

ЯДЕРНЫЕ РЕАКТОРЫ НА ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНАХ

Деление ядер. История

1934 г. — Э. Ферми, облучая уран тепловыми нейтронами, обнаружил среди продуктов реакции радиоактивные ядра.

1939 г. — О. Ган и Ф. Штрассман обнаружили среди продуктов реакций барий (Z = 56).

Л. Мейтнер и О. Фриш впервые объявили, что под действием нейтронов происходило деление урана на сравнимые по массе осколки.

Н. Бор и Дж. Уилер дали количественную интерпретацию деления ядра, введя параметр деления.

Я. Френкель развил капельную теорию деления ядер медленными нейтронами.

Л. Сцилард, Э. Вигнер, Э. Ферми, Дж. Уилер, Ф.Жолио-Кюри, Я.Зельдович, Ю.Харитон обосновали возможность протекания в уране цепной ядерной реакции деления.

1934 г. – Л. Сцилард выдвинул идею цепной ядерной реакции.

1940 г. — Г. Флеров и К. Петржак открыли явление спонтанного деления ядер U.

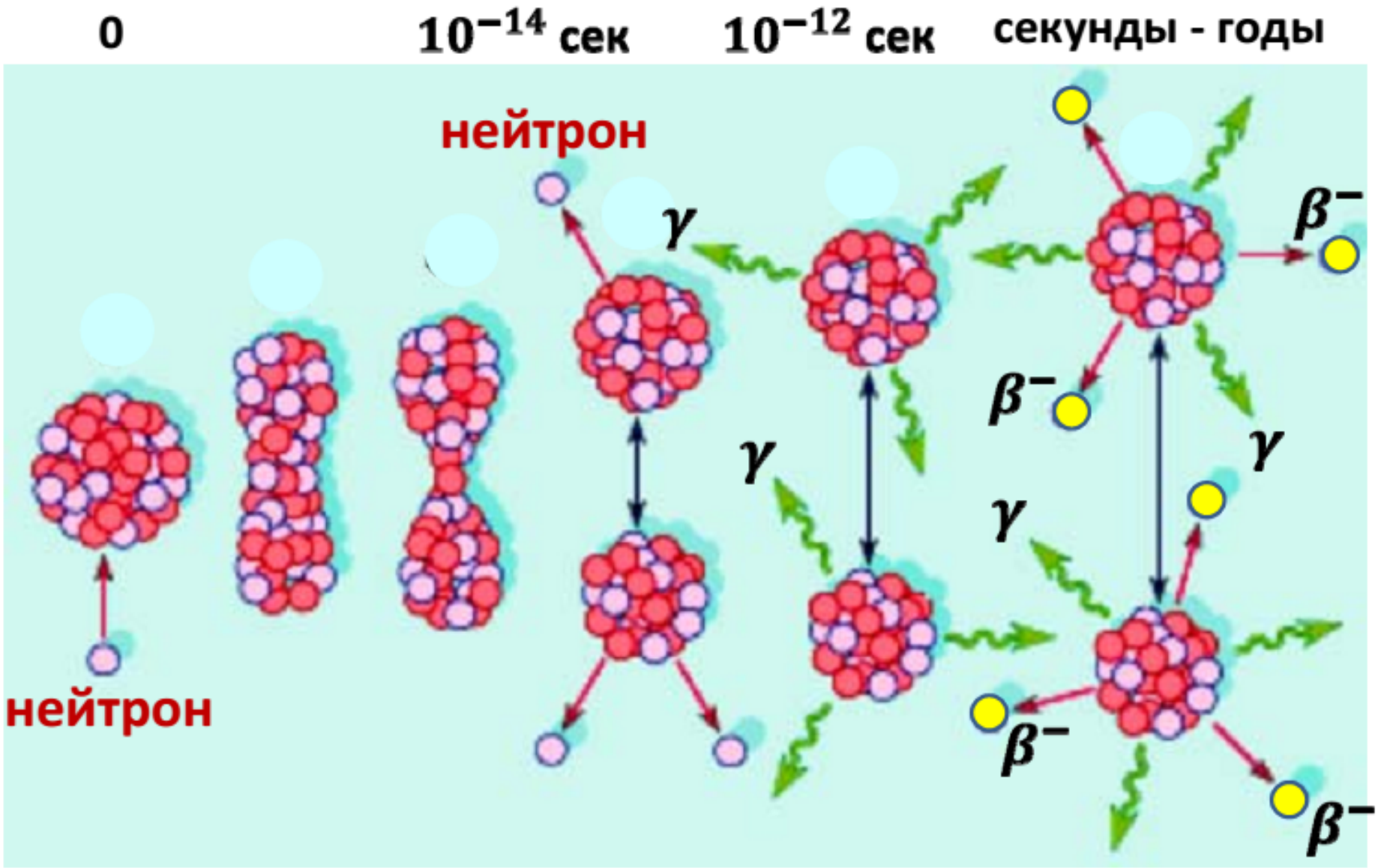
1942 г. – Э. Ферми. Первый ядерный реактор.

1946 г. – И. Курчатов. Реактор СССР.

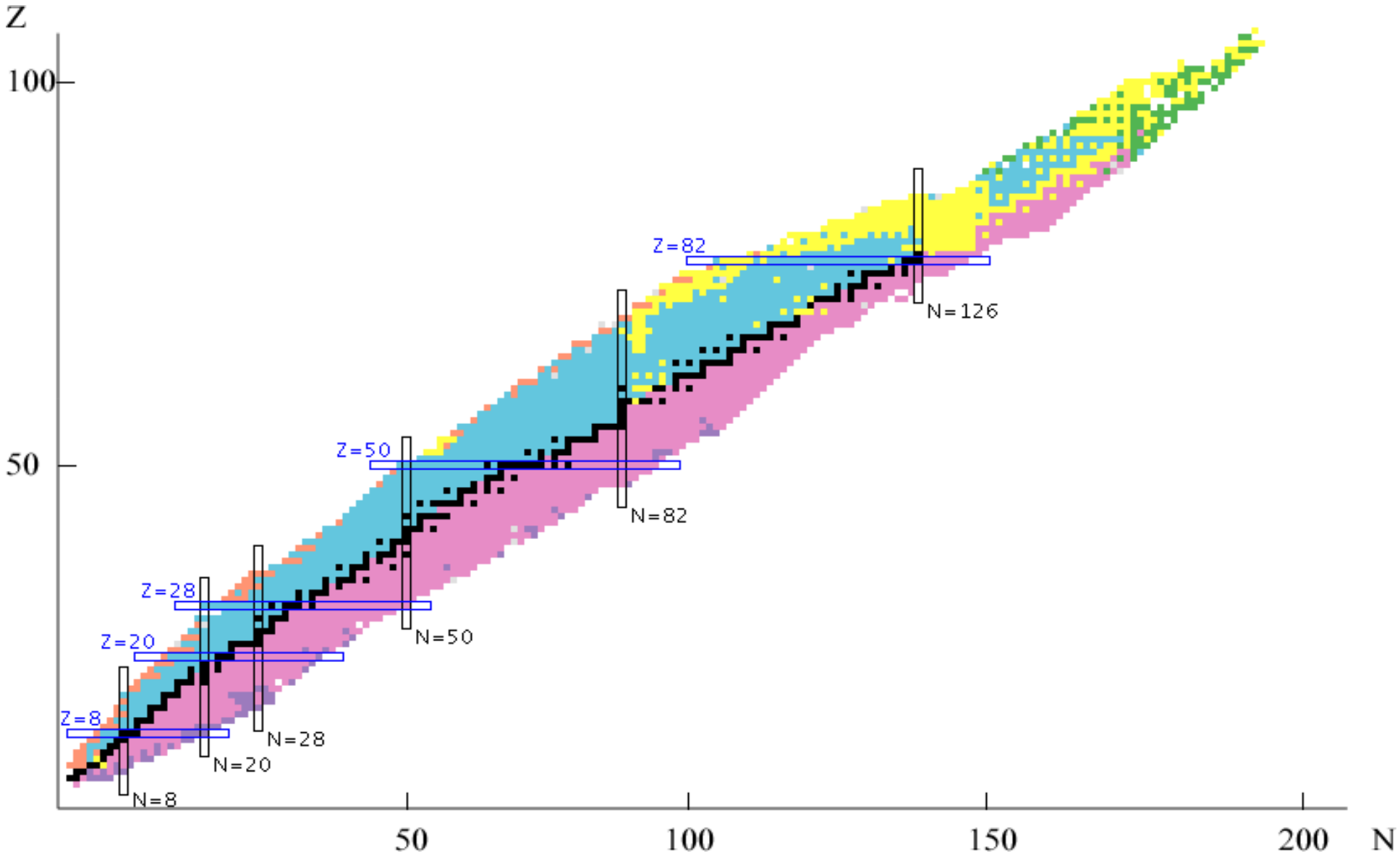
1945 г. – Ядерный взрыв. Хиросима. Нагасаки.

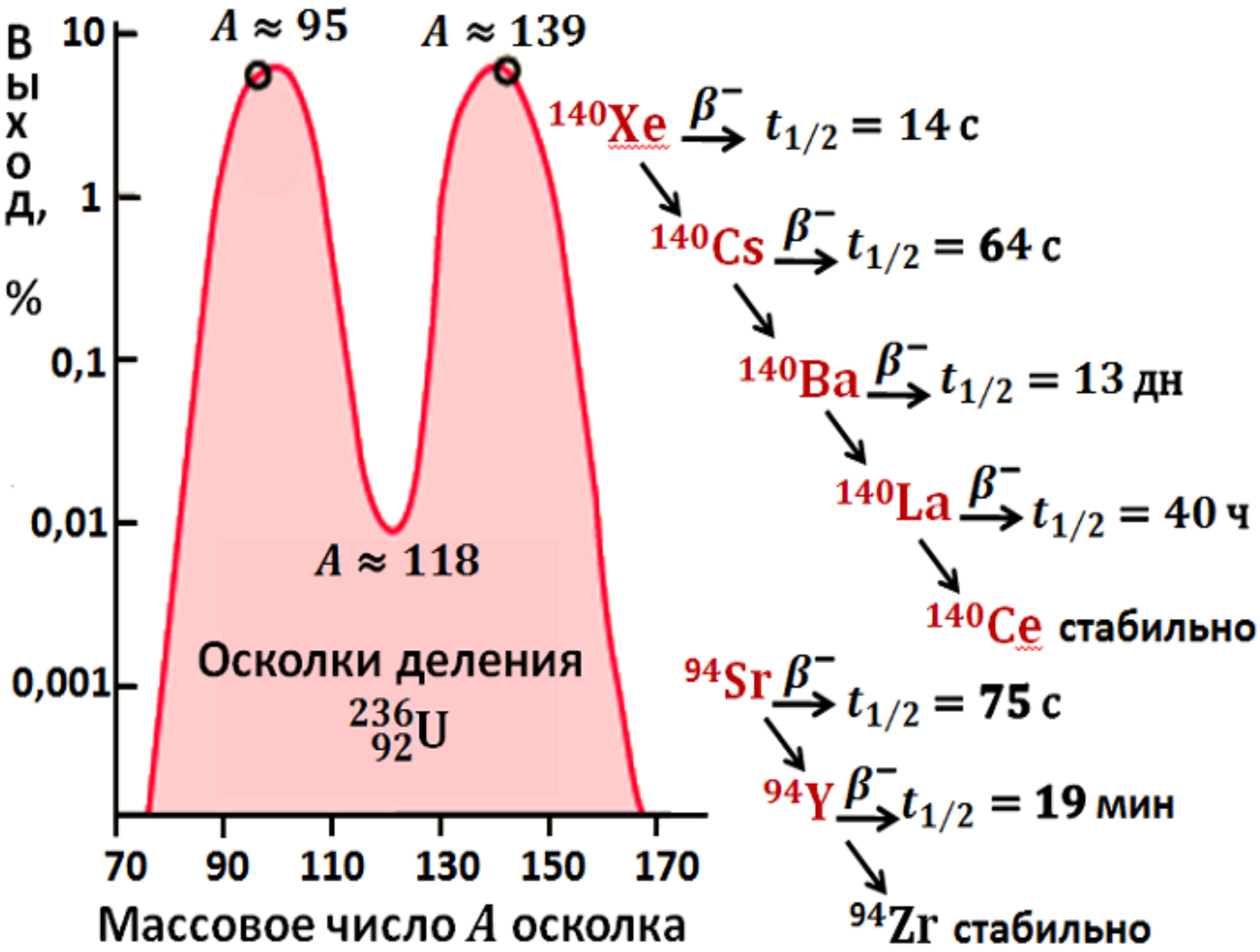
1954 г. – Первая атомная электростанция. Обнинск.

Деление ядра



N-Z диаграмма атомных ядер




Выход, %
10
1
0,1
0,01
0,001
$A \approx 95$
$A \approx 139$
$A \approx 118$
Осколки деления
$^{236}_{92}U$
70
90
110
130
150
170
Массовое число A осколка
$^{140}Xe \xrightarrow{\beta^-} t_{1/2} = 14$ с
$^{140}Cs \xrightarrow{\beta^-} t_{1/2} = 64$ с
$^{140}Ba \xrightarrow{\beta^-} t_{1/2} = 13$ дн
$^{140}La \xrightarrow{\beta^-} t_{1/2} = 40$ ч
^{140}Ce стабильно
$^{94}Sr \xrightarrow{\beta^-} t_{1/2} = 75$ с
$^{94}Y \xrightarrow{\beta^-} t_{1/2} = 19$ мин
^{94}Zr стабильно

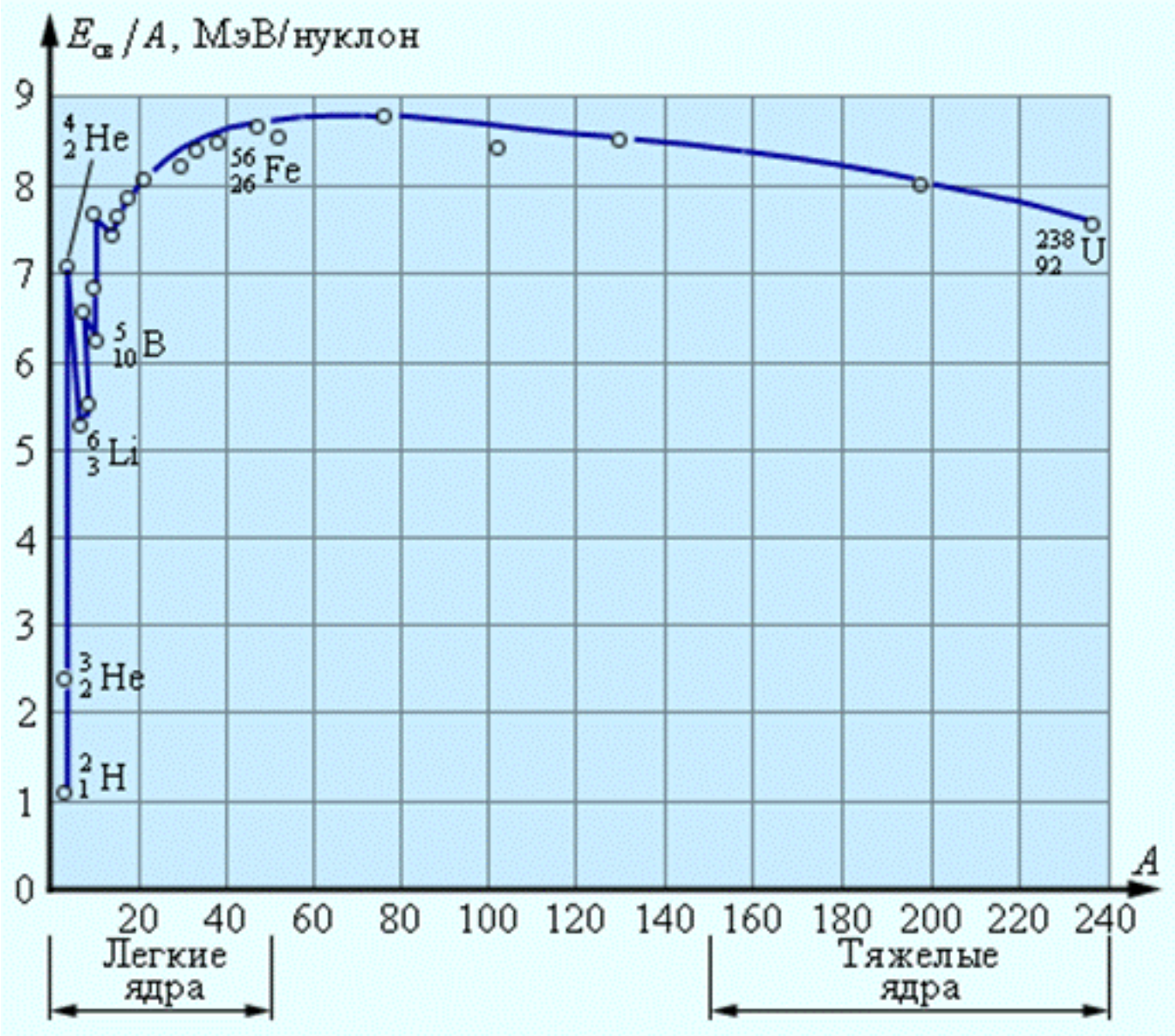
Энергия связи ядра W(A,Z)

Энергия связи ядра W(A,Z) – минимальная энергия, которую необходимо затратить для того, чтобы разделить атомное ядро на отдельные составляющие его нейтроны и протоны.

$$M(A,Z)c^2 + W(A,Z) =$$

$$= Z \cdot m_p c^2 + (A - Z) m_n c^2$$

Удельная энергия связи ядра



$$\varepsilon = W / A$$

$$Q_f = 238(8.45 - 7.6) \approx 200\,\text{МэВ}$$

Энергия деления

Продукты распада	Энергия деления, МэВ
Кинетическая энергия осколков	167
Мгновенные нейтроны	5
Электроны β-распада	5
Антинейтрино β-распада	10
Мгновенное γ-излучение	7
γ-излучение продуктов распада	6
Полная энергия деления	200

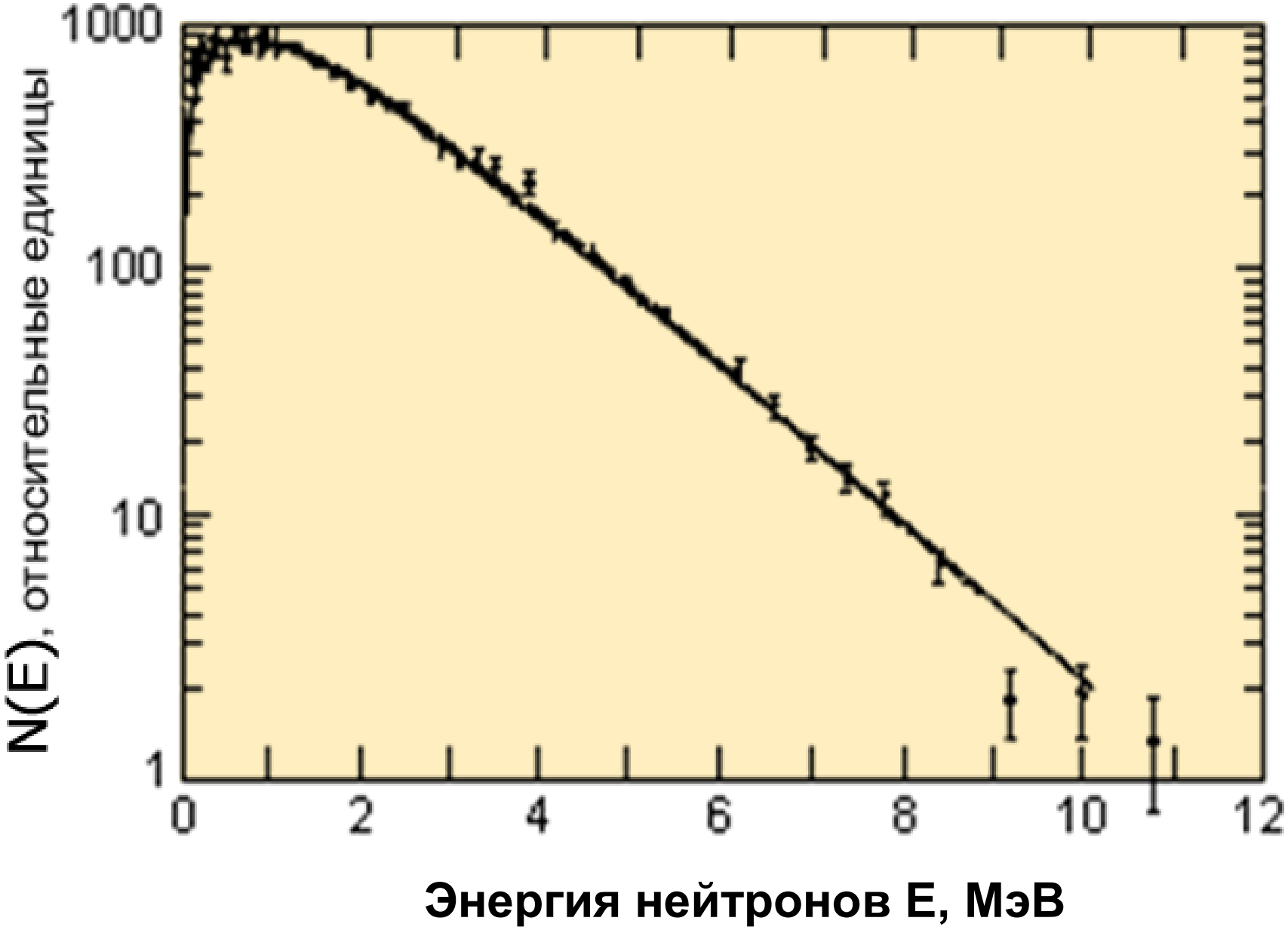
Изотопы U

^{235}U 0,72% $T_{1/2} = 7,0 \cdot 10^{8}$ лет, α-распад

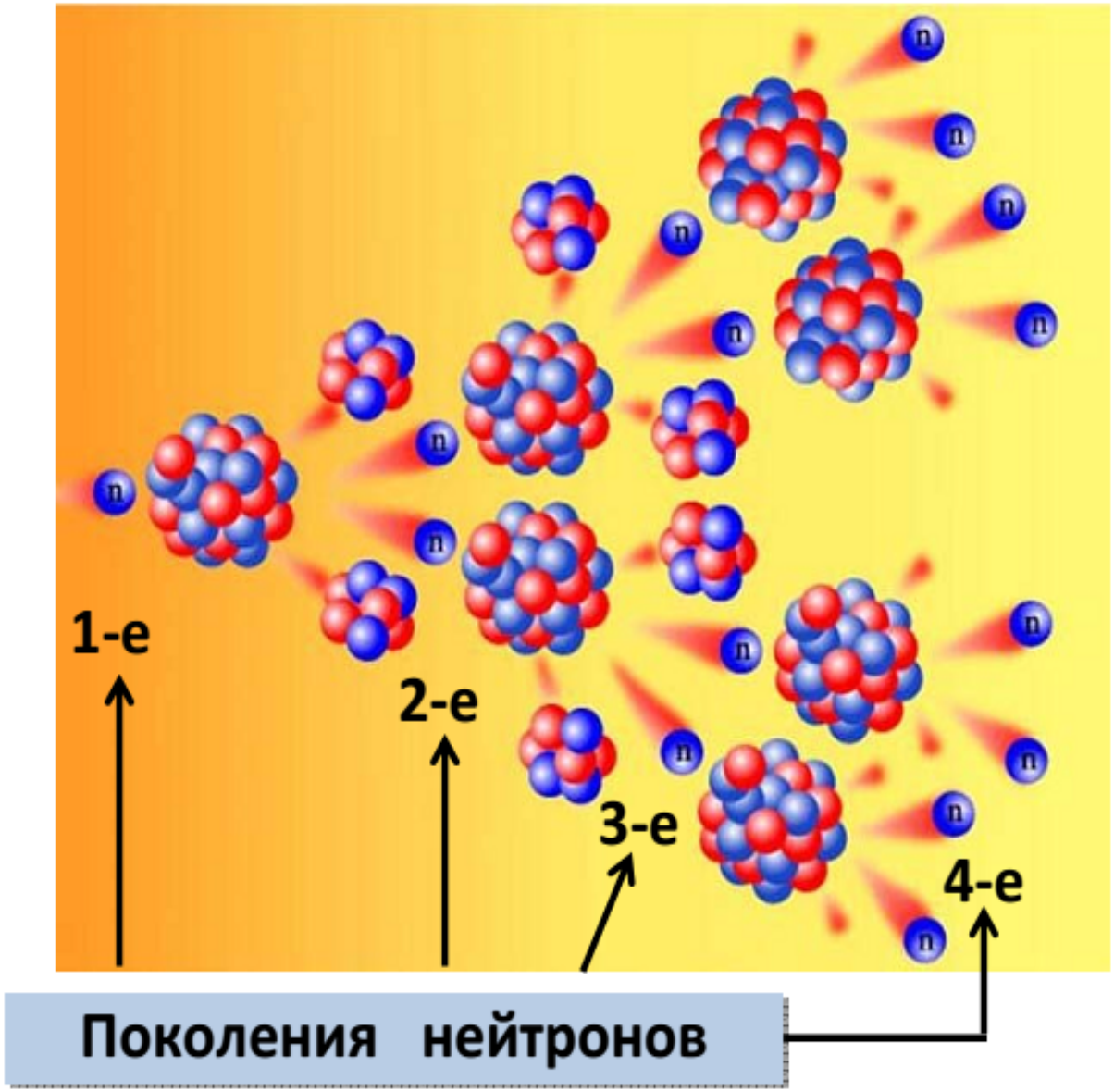
^{238}U 99,28% $T_{1/2} = 4,5 \cdot 10^{9}$ лет, α-распад

Энергия присоединения нейтрона	Барьер деления
^{235}U 6.5 МэВ	^{236}U 6.0 МэВ
^{238}U 6.0 МэВ	^{239}U 7.0 МэВ

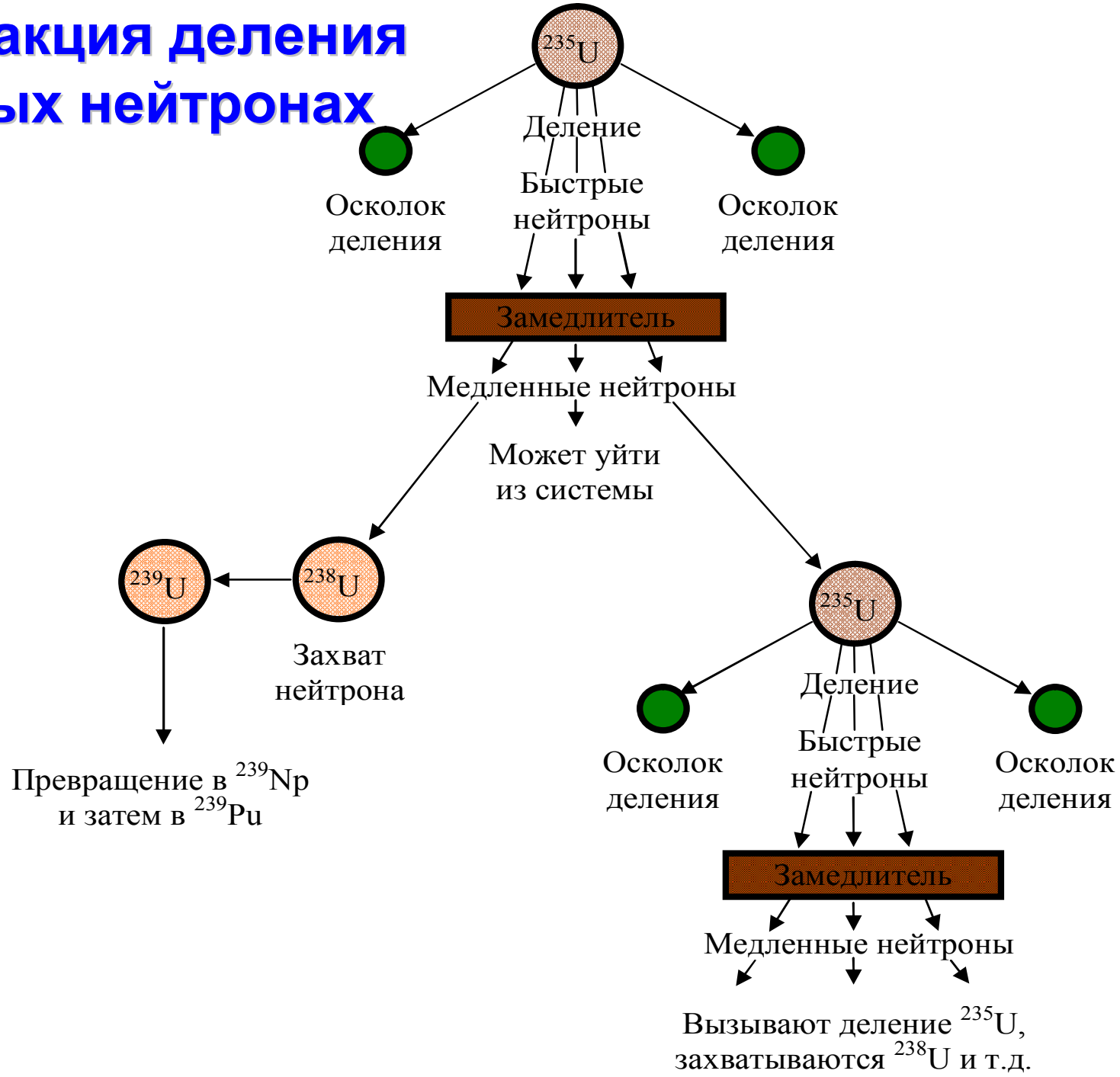
Спектр нейтронов деления



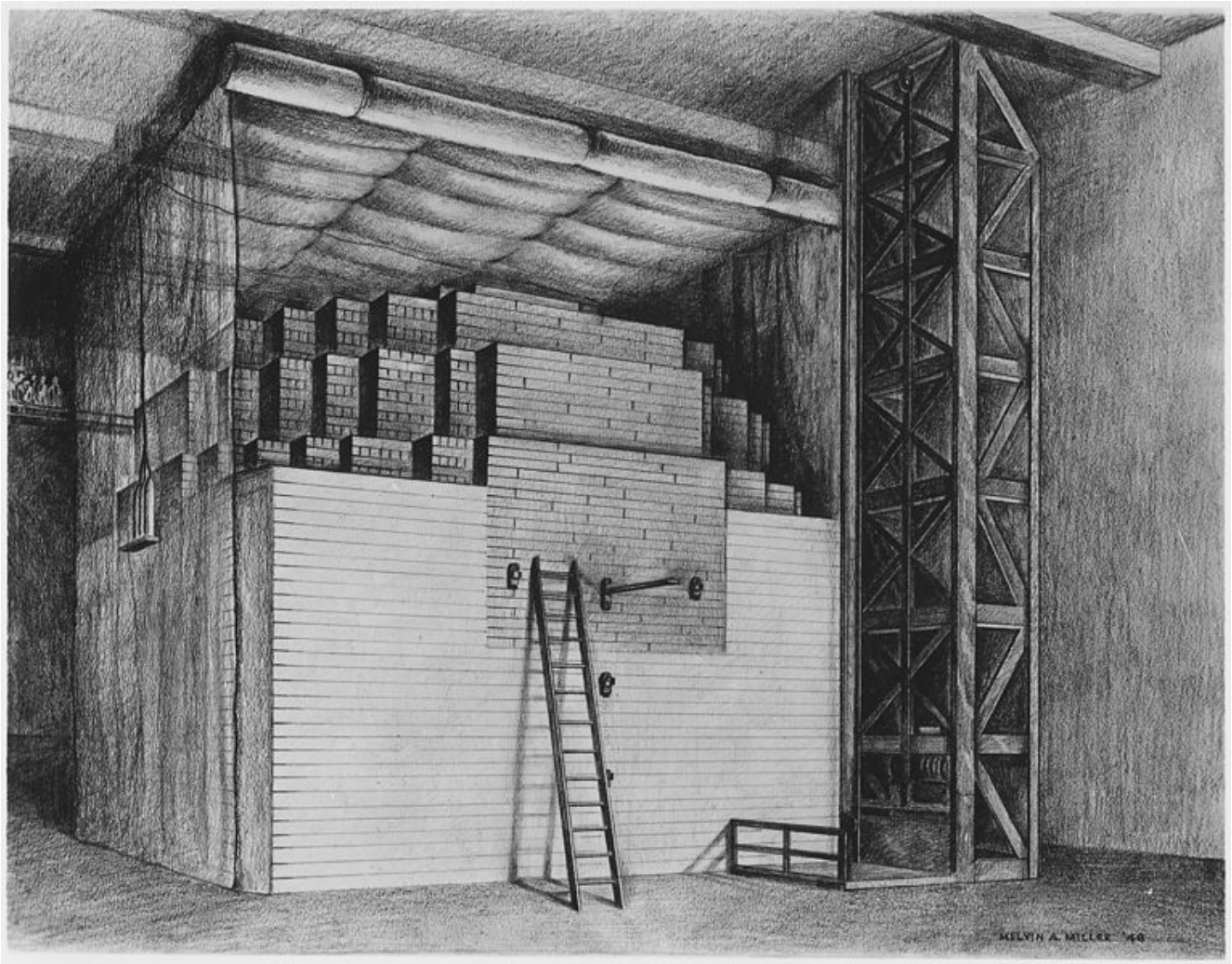
Цепная реакция деления

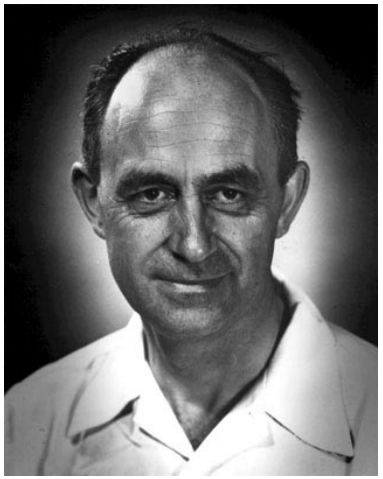


Цепная реакция деления на тепловых нейтронах



Чикагская Поленница – первый ядерный реактор, когда-либо созданный человечеством

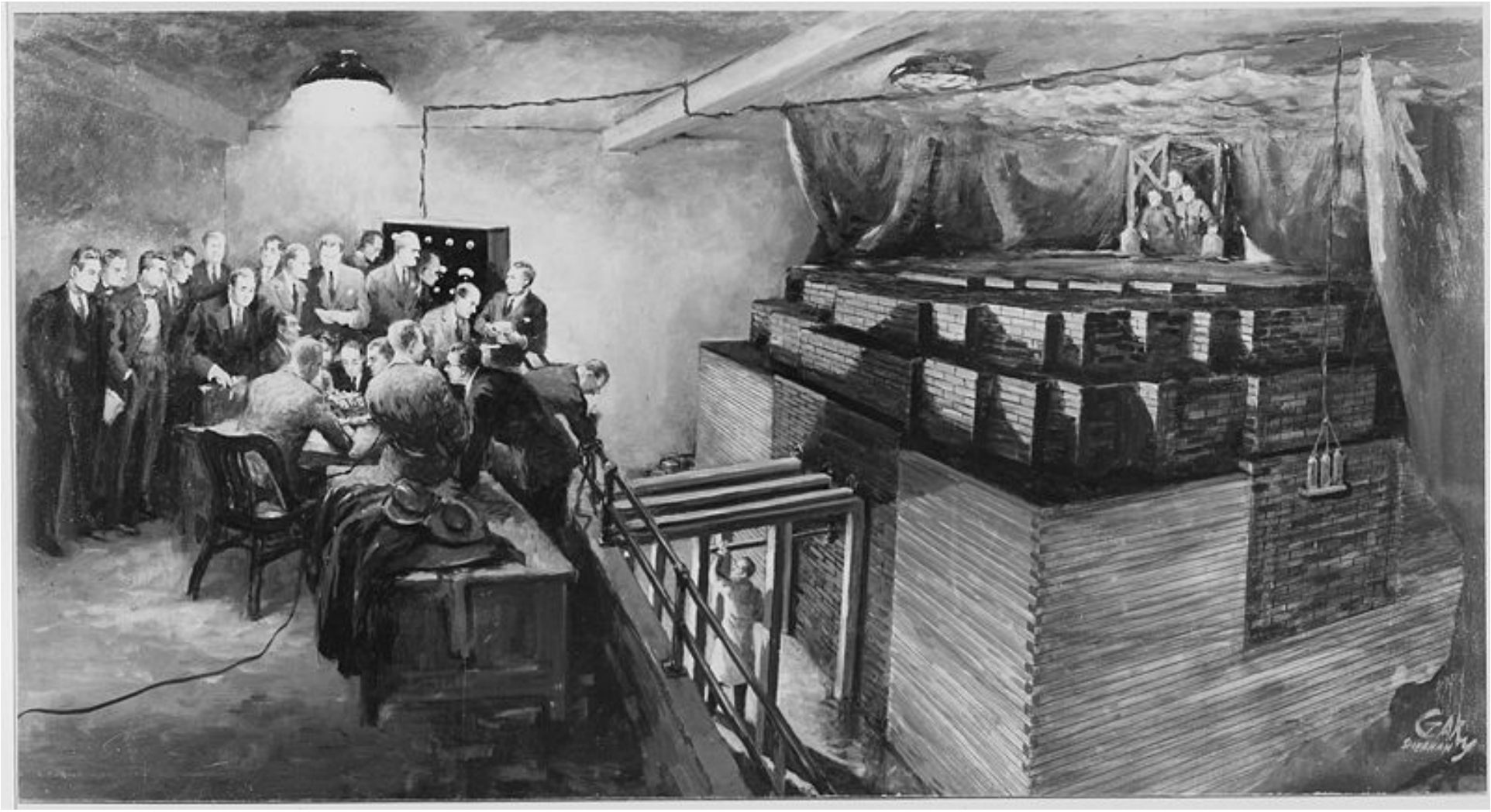




Энрико Ферми

стадион Универстета Чикаго

2 декабря 1942 г. состоялся первый удачный опыт по достижению надкритического состояния с развитием самоподдерживающейся цепной ядерной реакции



Обнинск 1954

Активная зона Диаметр = 1.5 м Высота = 1.7 м

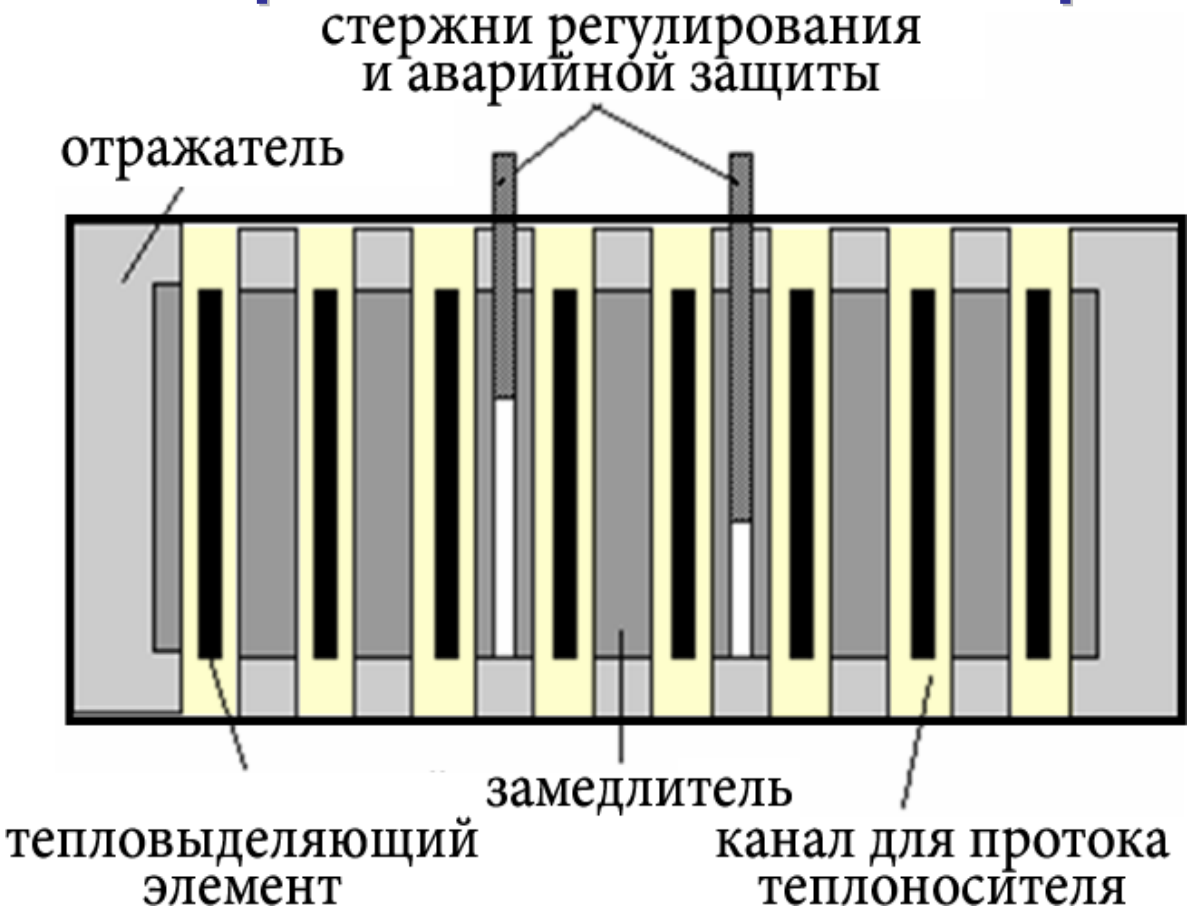
Графитовый замедлитель

Горючее 130 твелов 550 кг обогащенного ^{235}U - 5%

Мощность реактора 5 Мвт

$$1.5 \cdot 10^{17} \quad \frac{\text{делений}}{c}$$

Схема гетерогенного теплового реактора



Основной частью реактора является активная зона, в которой происходит реакция деления и выделяется энергия. В гетерогенных тепловых реакторах активная зона состоит из замедлителя, в котором помещаются кассеты, в которых находится делящееся вещество. Т.к. энергия выделяется в этих кассетах, их обычно называют твелами — тепловыделяющими элементами. Расстояние между твелами не должно превышать суммарную длину замедления и диффузии нейтронов. Активная зона реактора обычно окружается отражателем. Для управления реактором в активной зоне располагаются стержни регулирования мощности реактора и аварийной защиты.

Ядерный реактор на тепловых нейтронах

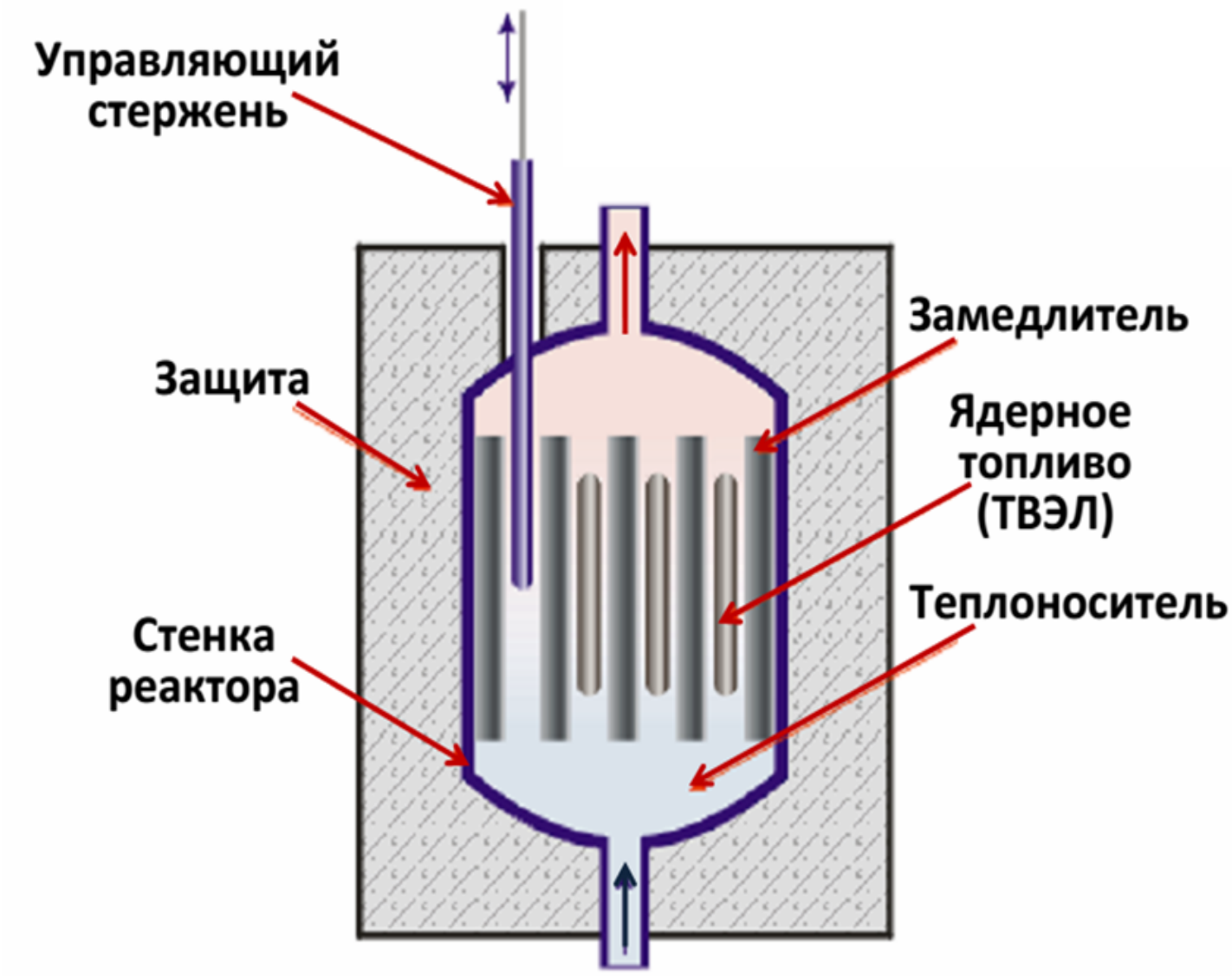
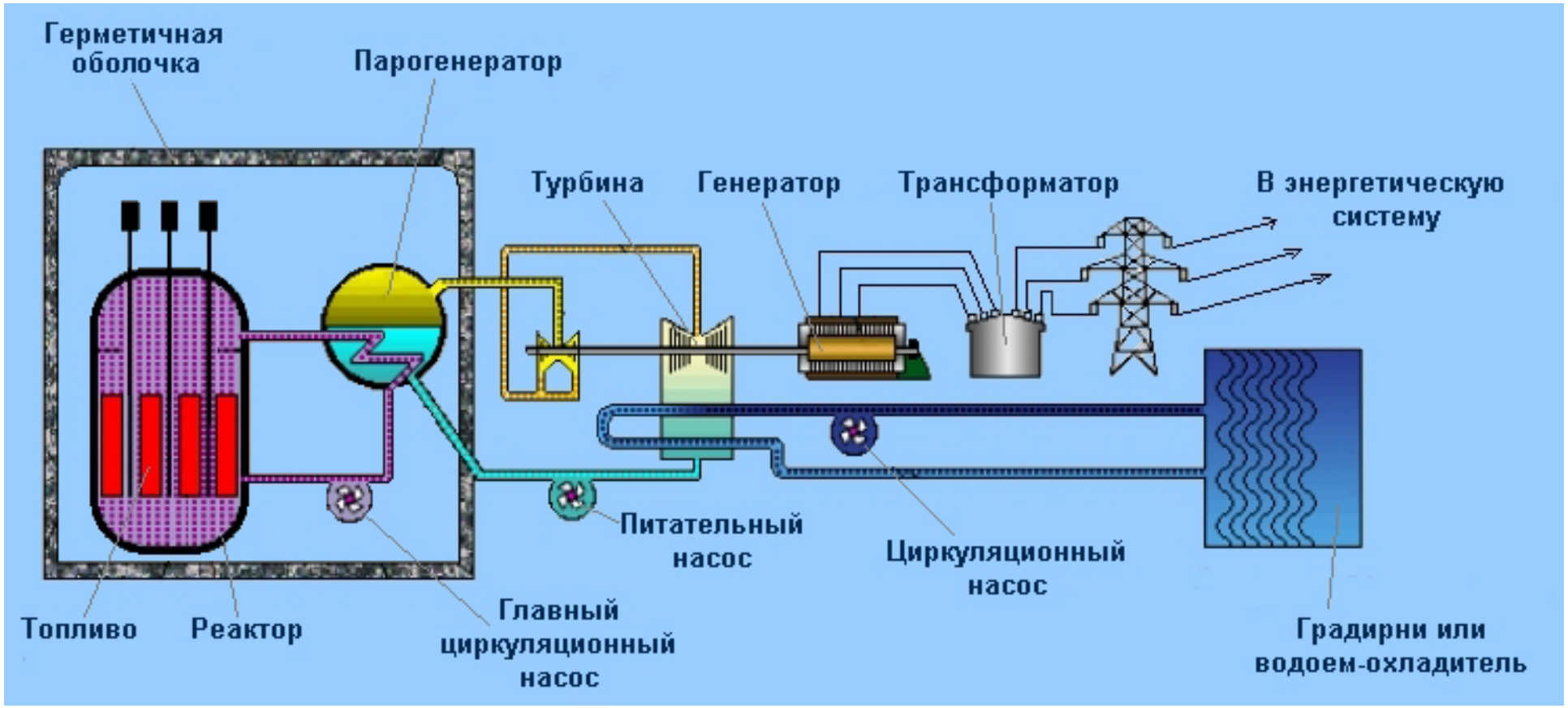


Схема работы АЭС

Деление 1 г урана-235 в течение суток даёт мощность в 1 МВт



Сырье для ядерного топливного цикла (ЯТЦ)

Западный ЯТЦ работает на закисьокиси урана U_3O_8

Российский ЯТЦ изначально строился на использовании в качестве сырья тетрафторида урана UF_4

Обогащение урана

Природный уран содержит 0,72% изотопа ^{235}U, который используется для получения энергии в реакторах на тепловых нейтронах.

Оптимизация работы реактора требует увеличения доли ^{235}U до 4-5% в топливе энергетических реакторов.

Для повышения содержания изотопа ^{235}U используют единственное газообразное соединение урана, гексафторид урана UF_6, который за счёт мельчайшей разности в весе изотопов (всего 3 нейтрона на каждую молекулу) разделяется в очень сложных обогащающих установках — **газовых центрифугах** и **газовых диффузорах**. В настоящее время около 35% обогащения делается на диффузорах, а 65% — на центрифугах.

Обогащение урана

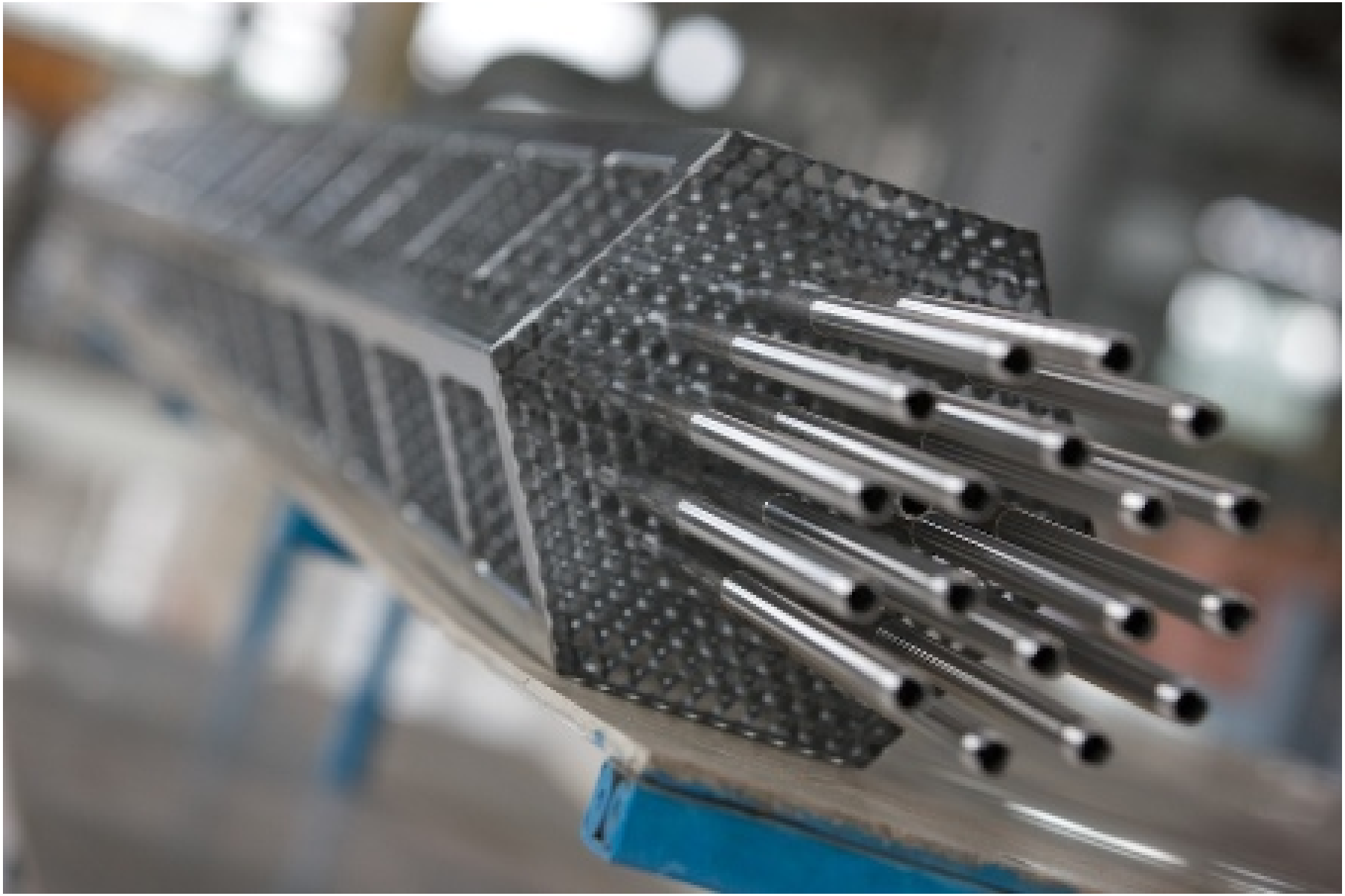
Газодиффузное обогащение является более чем в 20 раз энергозатратным, нежели обогащение на центрифугах.

В России (СССР) так исторически сложилось с конца 40-х годов, что обогащение урана производится на центрифугах, и эта технология является самой совершенной в мире.

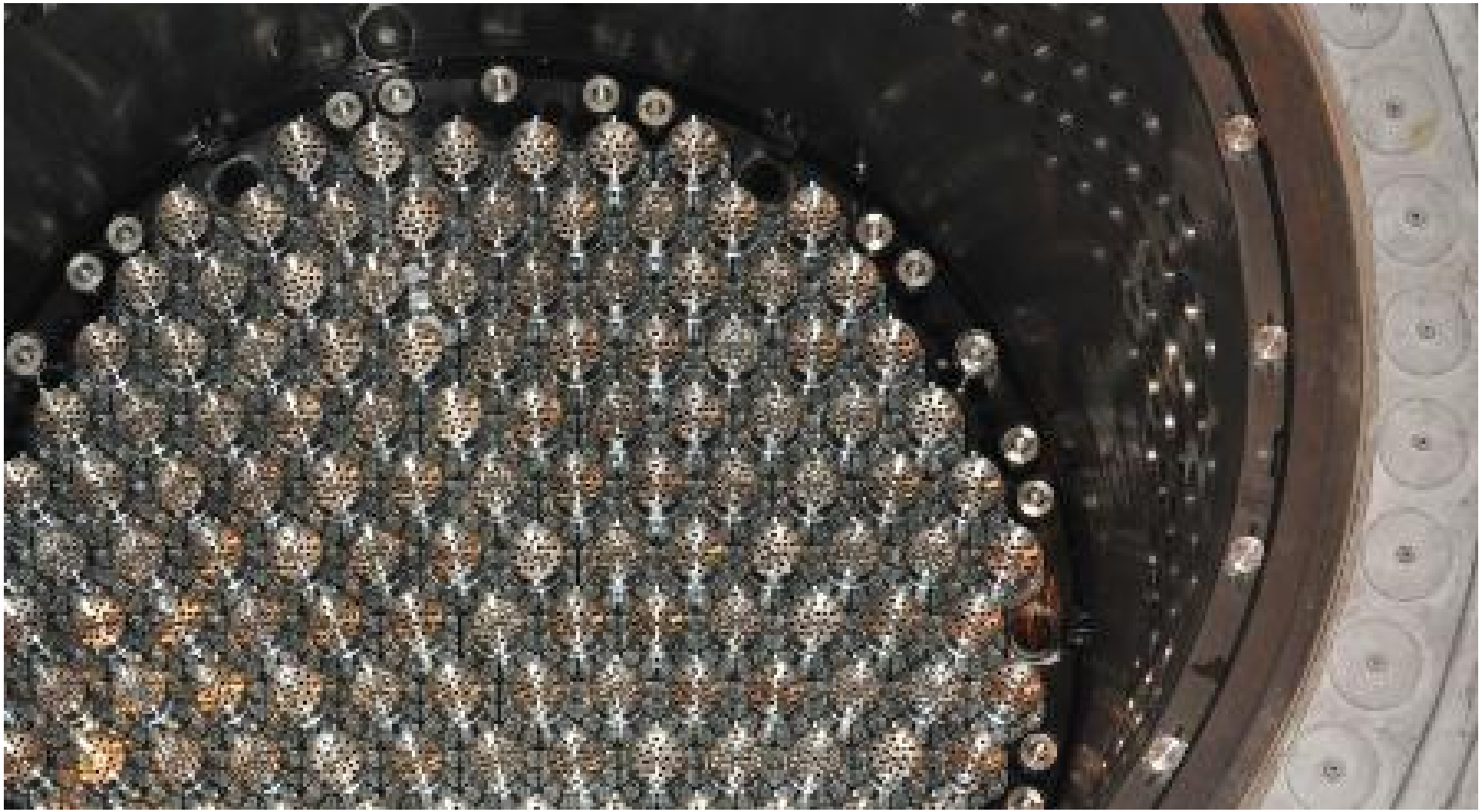
На долю России приходится **50% от мировых мощностей** по разделению изотопов, на долю США — **15%**, на долю Франции приходится **6%** мощностей, на объединённую долю Германии-Великобритании-Бельгии — ещё **26%** мощностей по обогащению.
Все остальные обогатители, включая Японию, **имеют не более 3%** от мировых мощностей по обогащению (2012 г.).

Ядерное топливо

Сборка ТВЭЛ



Сборки в корпусе реактора

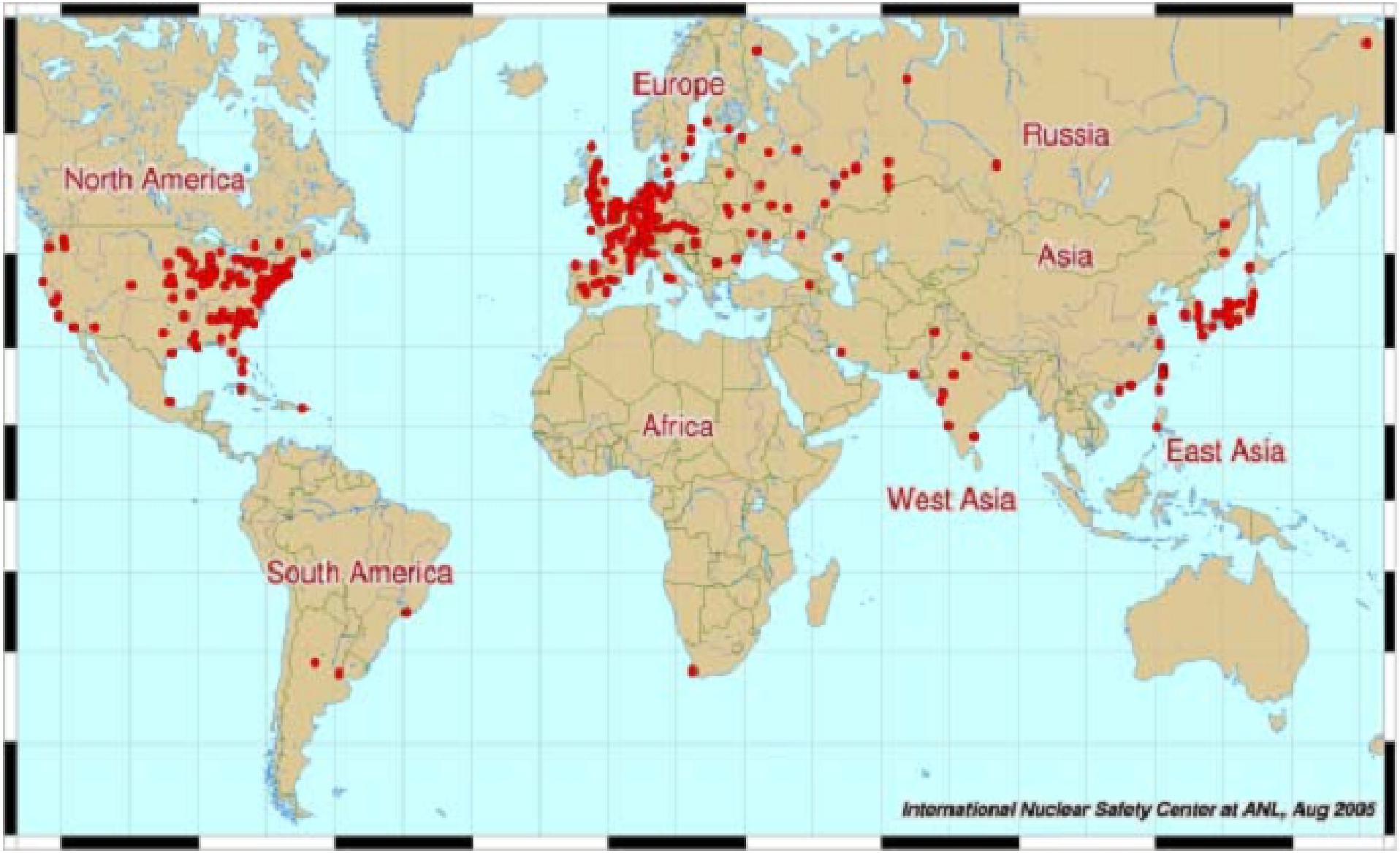


Корпус реактора ВВЭР

Машинный зал АЭС

Ростовская АЭС

Атомные реакторы



Доля атомной энергетики в мировой энергетике

Страна	Число АЭС	Мощность , МВт	Доля, %
США	104	95622	19,6
Франция	59	63113	74,1
Япония	54	44394	29,2
Германия	19	21072	28,4
Россия	30	20739	17,8
Канада	20	13602	15,1
Южная Корея	16	12990	35,5
Англия	32	12427	15,3
Украина	13	11358	48,1
Швеция	11	9401	38,1
Индия	14	2446	2,9

Ядерная энергетика мира

Действующие реакторы

Страны	Количество блоков	Совокупная электрическая мощность (нетто, МВт)
США	104	101 465
Франция	58	63 130
Япония	50	44 210
Россия	33	23 643
Республика Корея	23	20 671
Индия	20	4 391
Канада	18	12 604
Китай	16	11 814
Великобритания	16	9 246
Украина	15	13 101
Швеция	10	9 325
Германия	9	12 068
Испания	8	7 567
Бельгия	7	5 927
Чехия	6	3 766
Швейцария	5	3 263
Финляндия	4	2 736
Венгрия	4	1 889
Словакия	4	1 816
Пакистан	3	725
Аргентина	2	935
Бразилия	2	1 884
Болгария	2	1 906
Мексика	2	1 300
Румыния	2	1300
ЮАР	2	1 830
Армения	1	375
Иран	1	915
Нидерланды	1	482
Словения	1	688

Всего - 435 реакторов, которые производят 370 003 МВт электроэнергии

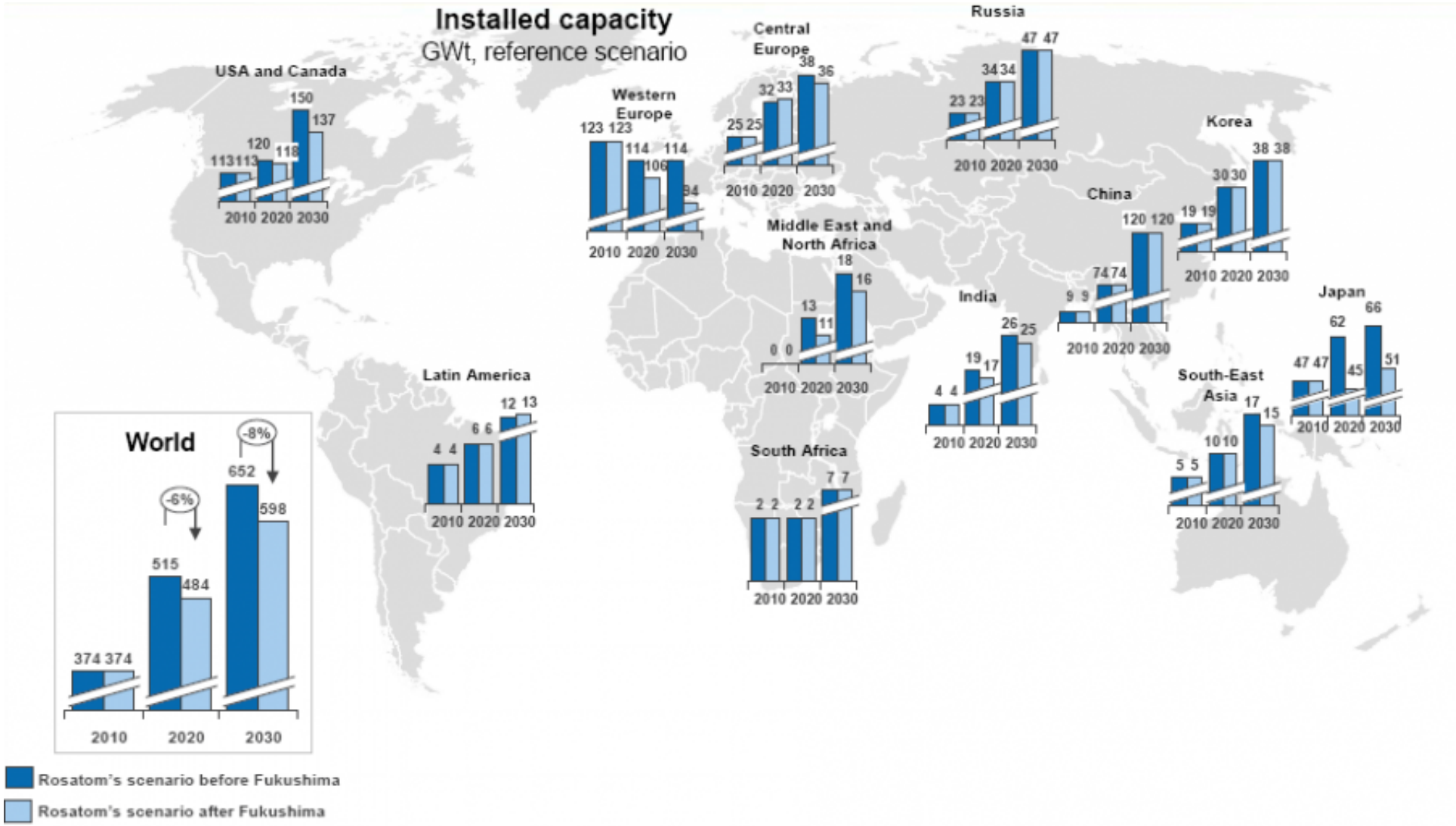
Строящиеся энергетические ядерные реакторы

Table 1: Nuclear Reactors "Under Construction" (as of 1 July 2012)

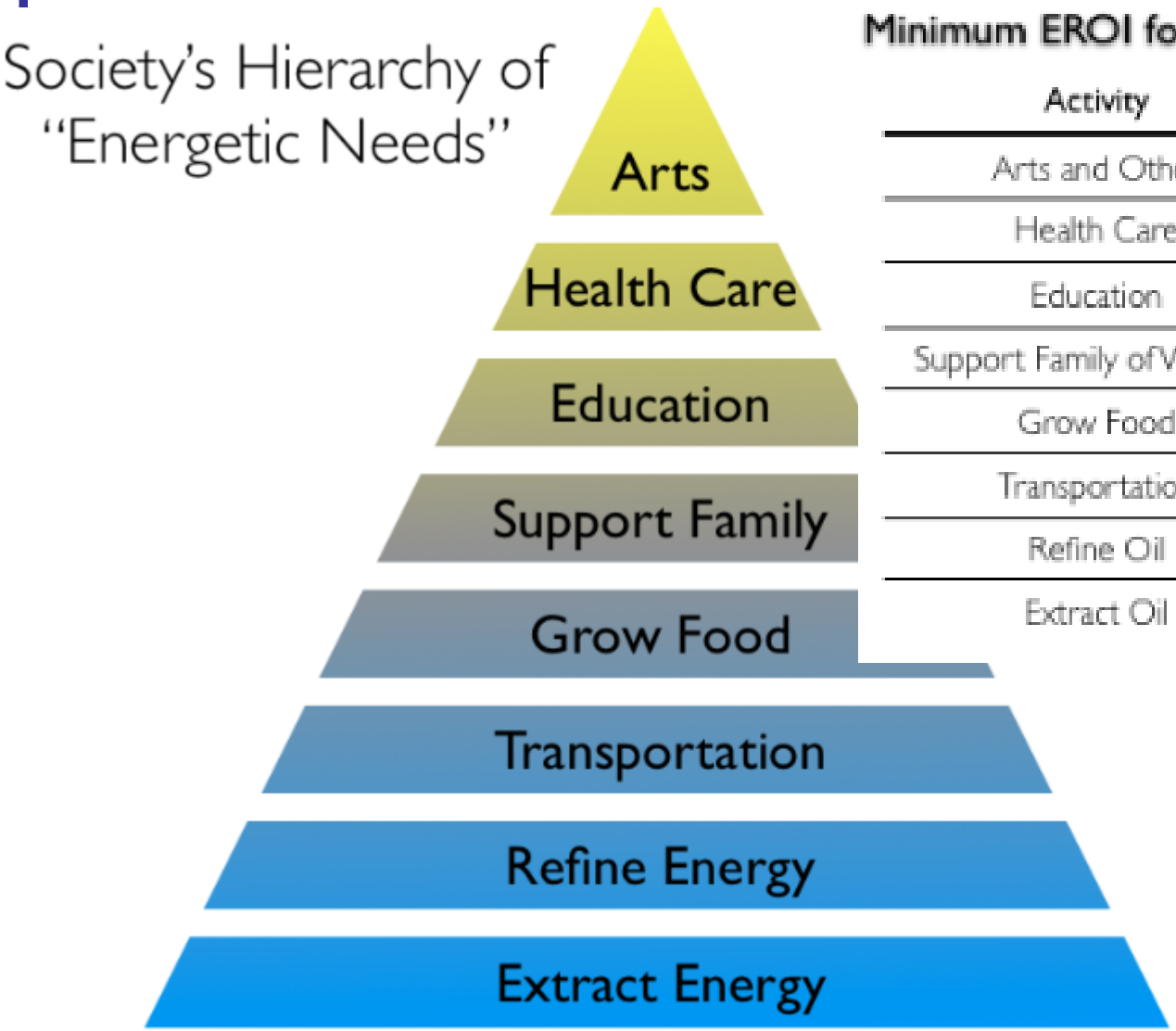
Country	Units	MWe (net)	Construction Start	Grid Connection
China	26	27,400	2007-2010	2012-2016
Russia	10	8,258	1983-2012	2013-2017
India	7	4,824	2002-2011	2013-2016
South Korea	3	3,640	2008-2009	2013-2014
Pakistan	2	630	2011	2016-2017
Slovakia	2	782	1985	2012-2013
Taiwan	2	2,600	1999	2016
Ukraine	2	1,900	1986-1987	2015-2016
Argentina	1	692	1981	2012
Brazil	1	1,245	2010	2018
Finland	1	1,600	2005	2014
France	1	1,600	2007	2016
USA	1	1,165	1972	2015
Total	59	56,336	1972-2012	2012-2018

Source : IAEA-PRIS, MSC, 2012

Планы строительства АЭС



EROEI (англ. energy returned on energy invested), или EROI (energy return on investment) — соотношение полученной энергии к затраченной, энергетическая рентабельность

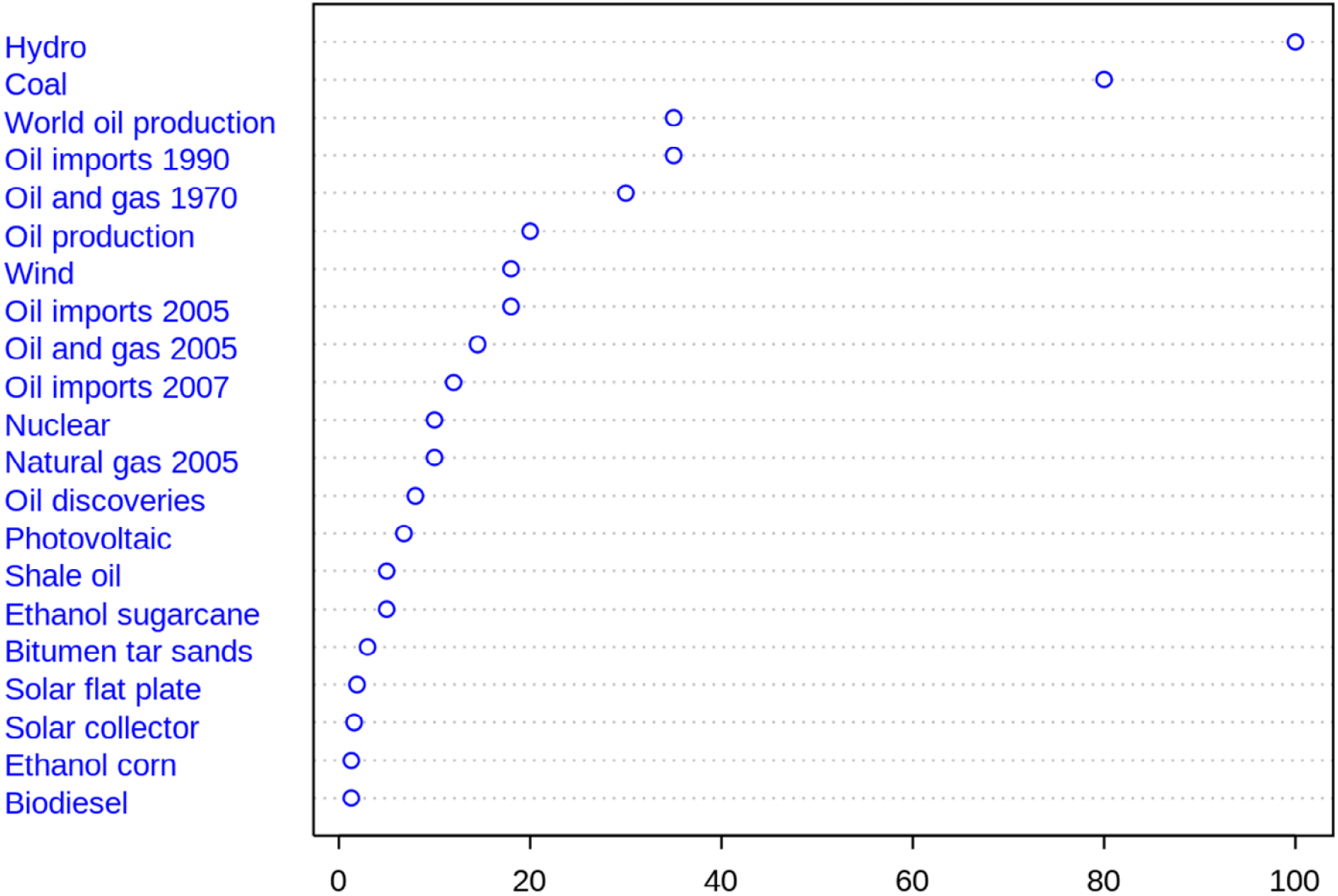


Minimum EROI for Conventional Sweet Crude Oil

Activity	Minimum EROI Required
Arts and Other	14 : 1
Health Care	12 : 1
Education	9 or 10 : 1
Support Family of Workers	7 or 8 : 1
Grow Food	5 : 1
Transportation	3 : 1
Refine Oil	1.2 : 1
Extract Oil	1.1 : 1

EROI - USA

Ratio of Energy Returned on Energy Invested - USA



Source: Murphy & Hall (2010) Ann NY Acad Sci 1185:102-118

Энергетическая рентабельность ядерных реакторов

Реакторы на тепловых нейтронах, использующие топливо с газодиффузным обогащением, имеют энергетическую рентабельность **~10**. Бесперспективны.

Реакторы на тепловых нейтронах, использующие топливо, обогащенное на современных центрифугах, и реакторы на быстрых нейтронах с воспроизводством горючего имеют энергетическую рентабельность **~50**. Это обеспечивает возможность для поддержания полной социальной структуры общества.

Атомная электрогенерация в России

Доля выработки электроэнергии атомными станциями в России составляет около **16%** всего производимого электричества. При этом в Европейской части страны доля атомной энергетики достигает **30%**, а на Северо-Западе – **37%**.

В соответствии с Энергетической стратегией России до 2030 г. и Генеральной схемой размещения объектов электроэнергетики России до 2020 г. с учетом перспективы до 2030 г. доля атомной генерации в энергобалансе страны должна возрасти до **21–22 %** к 2020 г.

В настоящее время ведутся работы по сооружению **10–ти** новых энергоблоков на ряде АЭС в России, а также ведется проектирование **8-ми** энергоблоков, на станциях, имеющих лицензии на их размещение. Идет разработка проектной документации Курской АЭС–2 и Смоленской АЭС–2 с реакторами ВВЭР–ТОИ (всего **4** реактора).

Строительство этих атомных станций планируется развернуть соответственно в 2015 и 2016 годах.

Спасибо за внимание!