

(В.Ф. Ежов)

ОТ НЕЙТРОНА ДО РЕАКТОРА

НОБЕЛЕВСКАЯ ПРЕМИЯ ПО ФИЗИКЕ (1938 Г.)

«ЗА ДЕМОНСТРАЦИЮ СУЩЕСТВОВАНИЯ НОВЫХ РАДИОАКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, СОЗДАННЫХ ОБЛУЧЕНИЕМ НЕЙТРОНОВ, И ЗА СВЯЗАННОЕ С ЭТИМ ОТКРЫТИЕ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ, ВЫЗВАННЫХ МЕДЛЕННЫМИ НЕЙТРОНАМИ»



Энрико Ферми

(Enrico Fermi 1901 – 1954)

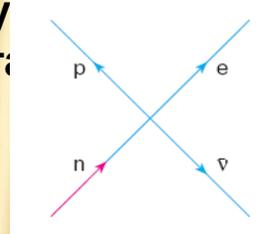
-
- ✘ В 1926 г. им была разработана новая разновидность статистической механики, подсказанная принципами запрета Вольфганга Паули. Она позволяла успешно описывать поведение электронов, а позднее была применена к протонам и нейтронам. Статистика Ф. позволила лучше понять электропроводность металлов и привела к построению более эффективной модели атома.

Итало-американский физик Энрико Ферми родился в Риме. Он был младшим из трех детей железнодорожного служащего Альберте Ферми и урожденной Иды де Гаттис, учительницы. Еще в детстве Ф. обнаружил большие способности к математике и физике. Его выдающиеся познания в этих науках, приобретенные в основном в результате самообразования, позволили ему получить в 1918 г. стипендию и поступить в Высшую нормальную школу при Пизанском университете. Уже через четыре года, в 1922 г., Ф. получил докторскую степень по физике с отличием за работу по экспериментальному исследованию рентгеновских лучей. По возвращении в Рим Ф. получил от итальянского правительства стипендию, позволившую ему продолжать изучение современной физики в Германии, у Макса Борна, возглавлявшего в то время отделение теоретической физики Геттингенского университета, и в Голландии, у Пауля Эренфеста в Лейденском университете.



Знаменитая «группа Ферми» (1934 г.)

В 1933 г. он предложил теорию бета-распада, позволившую объяснить, каким образом ядро спонтанно испускает электроны и роль нейтрино-частиц, лишенных электрического заряда и не поддававшихся тогда экспериментальному обнаружению. Существование таких частиц было постулировано Паули, а название придумано Ф. (Нейтрино было экспериментально обнаружено в 1956 г.). Теория бета-распада Ф. затрагивала новый тип сил, получивших название слабого взаимодействия. Такие силы действуют между нейтронами и протонами в ядре и обуславливают бета-распад. Статья Ф. о бета-распаде была отвергнута из-за своей новизны английским журналом «Nature», но опубликована в итальянском и немецком журналах.



$$M = \frac{G_F}{\sqrt{2}} j_\alpha^H \cdot j_\alpha^L,$$

где j_α^H и j_α^L – адронный и лептонный токи соответственно,

$$j_\alpha^H = \bar{p} \Gamma_\alpha^H n, \quad j_\alpha^L = \bar{\nu} \Gamma_\alpha^L \nu,$$

Об искусственной радиоактивности Энрико Ферми (1901—1954) узнал сразу же, весной 1934 года, как только супруги Жолио-Кюри опубликовали свои результаты. Ферми решил повторить опыты Жолио-Кюри, но пошел совершенно иным путем, применив в качестве бомбардирующих частиц нейтроны. «Нейтронные пушки» Ферми представляли собой маленькие стеклянные **радон-бериллиевые ампулы** длиной несколько сантиметров.

В 1-ом сообщении, от 25 марта 1934 года, Ферми сообщил, что бомбардируя алюминий и фтор, получил изотопы натрия и азота, испускающие электроны (а не позитроны, как у Жолио-Кюри). Метод нейтронной бомбардировки оказался очень эффективным, и Ферми писал, что эта высокая эффективность в осуществлении расщепления «вполне компенсирует слабость существующих нейтронных источников по сравнению с источниками альфа-частиц и протонов».

С помощью своей «нейтронной пушки» Ферми подверг бомбардировке фтор, алюминий, кремний, фосфор, хлор, железо, кобальт, серебро и йод. Все эти элементы активировались, и во многих случаях Ферми мог указать химическую природу образовавшегося радиоактивного элемента. Ему удалось этим методом активировать 47 из 68 изученных элементов.

22 октября 1934 года Ферми сделал фундаментальное открытие. Поместив между источником нейтронов и активируемым серебряным цилиндром парафиновый клин, Ферми заметил, что клин не уменьшает активность серебра, а наоборот – увеличивает ее. Ферми сделал вывод, что этот эффект, по-видимому, обусловлен наличием водорода в парафине, и решил проверить, как будет влиять на активность большое количество водородсодержащих элементов. Проведя опыт сначала с парафином, потом с водой, Ферми констатировал увеличение активности в сотни раз. опыты Ферми обнаружили огромную эффективность медленных нейтронов.

Когда в Физическом институте Римского университета в середине 1934 года молодой Ферми начал бомбардировать уран нейтронами, он, конечно, исходил только из существования ^{238}U (с помощью масс-спектрографа Астона в то время не удавалось найти другие изотопы урана, кроме ^{238}U).

Если бы, как полагал Ферми, удалось внедрить в ядро еще один нейтрон, то по уравнению



образовался бы радиоактивный изотоп с массовым числом 239 и - в случае его дальнейшего бета-распада - элемент с зарядом ядра 93:



Такого вещества на Земле еще не было! Воодушевлению итальянцев не было границ, когда с первым же опытом пришла удача: облученный уран оказался сильно радиоактивным и, как предполагалось, испускал бета-лучи. Исследования показали, что продукты радиоактивного распада не идентичны с соседними элементами урана, такими, как протактиний, торий, актиний, радий. Исходя из этого, новый вид радиоактивных атомов должен был принадлежать элементам, находящимся по другую сторону урана - трансуранам!

По мнению Ферми, особенно правомерным было приписать образовавшийся радиоактивный осадок с периодом полураспада 13 мин новому, 93-му, элементу.

1	1																2					18														
	H																					He														
	1A	2A											3A	4A	5A	6A	7A	8A																		
	(1)	(2)											(13)	(14)	(15)	(16)	(17)	(18)																		
2	3	4											5	6	7	8	9	10																		
	Li	Be											B	C	N	O	F	Ne																		
3	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36										
	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	Ar	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr										
4	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54
	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
5	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	
	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
6	55	56	57	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	
	Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	Fr	Ra	Ac	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	—	—	—	—	—	—	—		
7	87	88	89	104	105	106	107	108	109	110	111	112	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
	Fr	Ra	Ac	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		

- Main group metals
- Transition metals
- Metalloids
- Nonmetals, noble gases

A label of A denotes main group elements...

...and a label of B denotes transition elements, the system used most commonly at present in the United States.

The new international system is to number the groups from 1 to 18.

Lanthanides
Actinides

58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

Periods are horizontal rows of elements.

Groups are vertical columns of elements. Some groups have common names: Group 1A - alkali metals, Group 2A - alkaline earth metals, Group 7A - halogens, Group 8A - noble gases.



Вокруг открытия 93-го элемента грозил опять возникнуть спор о приоритете. Ибо в июле 1934 года чешский инженер Коблик сообщил что он выделил этот элемент из урановой смолки Иоахимсталя и уже определил его относительную атомную массу: 240. В честь своей родины Кублик назвал его богемий. Это известие было распространено газетами по всему свету.

Ida Noddack-Tacke
1896 - 1978

конечно,

Открытие элемента 93, заявленное с двух сторон, было, сенсацией.

Однако Ида Ноддак не разделяла всеобщего воодушевления. Госпожа Ноддак сохранила критическую точку зрения на такие "открытия". Она сообщила, что богемий является не чем иным, как смесью соединений ванадия и вольфрама. Не может быть и речи о новом элементе.

Ида Ноддак-Такке – немецкий физикохимик. Родилась в Лакхаузене. Окончила Высшую техническую школу в Берлине (1919). В 1921-1923 гг. работала химиком в концерне "Сименс" в Берлине. В 1935-1941 гг. – в Институте физической химии Фрейбургского университета, в 1941-1956 гг. – в Страсбургском университете, с 1956 г. – в Государственном исследовательском институте геохимии в Бамберге.

Основные исследования посвящены геохимии редких и рассеянных элементов. Совместно с мужем Вальтером Ноддаком открыла (1925-1928) новый химический элемент – рений.

было бы ошибочным делать заключение о существовании элемента 93 только на том основании, что не были обнаружены в качестве возможных продуктов элементы, соседние с ураном!

Конечно, в уже известных ядерных превращениях всякий раз возникали изотопы либо того же, либо соседнего элемента. Однако это не всегда может быть так. Можно с тем же успехом принять,- делала Ноддак логичный вывод,- что при таких, ранее не известных, разрушениях ядра - с помощью нейтронов - могут в значительной мере происходить другие ядерные реакции, не те, которые... наблюдались до сих пор.

Думается, что при обстреле тяжелых ядер нейтронами эти ядра развалятся на несколько больших частей, которые как раз могут быть изотопами известных элементов, но не соседних с облученными".

Рассуждения Иды Ноддак должны были бы, как искра в стоге сена, перенестись к физикам-атомщикам. Однако "ученые мужи" остались равнодушными. *"То, что не может быть, физически не должно быть"*.

Смелое предположение Иды Ноддак, высказанное в 1934 году, согласно которому ядро урана могло самым настоящим образом распастись не было признано.

Спрошенный позднее Отто Хан довольно мрачно заявил, что он в то время даже не рисковал цитировать гипотезу Ноддак, казавшуюся абсурдной, ибо опасался за свою репутацию ученого.

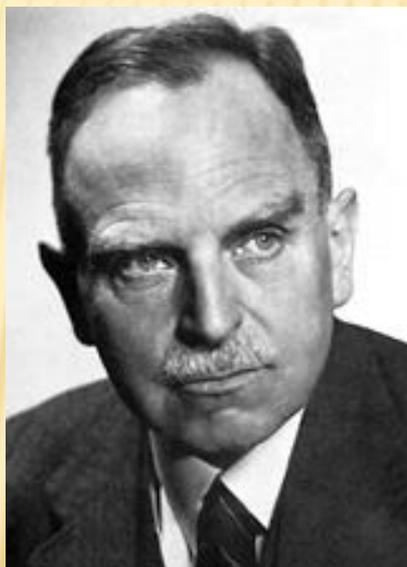
Только совместные усилия физиков и химиков могли дать

О ЧЕМ МОЛЧИТ ИСТОРИЯ

- ✘ Предложенное Ноддак решение было опубликовано ей в центральном немецком журнале прикладной химии [I. Noddack *Angewandte Chemie*, 47 (1934) 653], и уже в следующем году появился перевод этой статьи в русском журнале [Ида Ноддак, *Успехи Химии*, 4 (1935) 66], что говорит о признании важности её краткой статьи.
- ✘ Весьма вероятно, что именно с такой целью выделить гипотезу Иды Ноддак было предпринято в 1938 году 59-ти летним немецким радиохимиком Отто Ганом с образцом урана, облученного нейтронами, было проведено специальное исследование поиска радиоизлучения от легких ядер. Вместе со своим ассистентом Фрицем Штрассманом они обнаружили радиоактивный барий.
- ✘ Умолчав об идее, явно подсказанной им публикацией И.Ноддак в известном немецком журнале, авторы получили широкую известность в мировой науке, а О.Ган в 1944 году получил нобелевскую премию по химии.
- ✘ Пионерский же вклад в эту проблему Иды Ноддак, начавшийся с весьма проницательной критики ошибочности вывода самого Э. Ферми и завершившийся важнейшим предсказанием о расщеплении ядра урана, оказался несправедливо забыт и не отражен ни в одном из физических справочников. Этот факт в истории науки остается необъясним никакими чисто научными соображениями.

НОБЕЛЕВСКАЯ ПРЕМИЯ ПО ХИМИИ (1944 Г.)

«ЗА ОТКРЫТИЕ РАСЩЕПЛЕНИЯ ТЯЖЁЛЫХ
АТОМНЫХ ЯДЕР»



Отто Ган
(Otto Hahn, 1879—1968)

ОТТО ГАН

- ✦ В 1920-х годах Отто Ган разработал метод применения радиоизотопов в химии, включая выращивание кристаллов и использование меченых атомов в химических реакциях и создал тем самым новую область химии — прикладную радиохимию, которая использует радиоэлементы для решения проблем общей и физической химии. В 1936 году вышла его книга с названием «*Applied Radiochemistry*», которая стала Библией для радиохимиков.

ОФИЦИАЛЬНАЯ ВЕРСИЯ



Отто Ган и Лиза Мейтнер в лаборатории. 1913 год

Лиза Мейтнер (Lise Meitner, 1878 – 1968) первой осознала возможность расщепления ядра (реально предсказанного Ноддак). Первые эксперименты немецкого химика Отто Гана (Otto Hahn, 1879 – 1968) по ядерному делению в 1938-39 гг. были спланированы им совместно с Мейтнер (сам Ган не верил в возможность ядерного деления).

В 1939 г. Мейтнер совместно со своим племянником Отто Фришем дала физическое объяснение экспериментам Гана и назвала процесс «ядерным делением».

В 1945 г. Нобелевская премия по химии (за 1944 г.) за открытие деления тяжелых ядер досталась одному Гану.

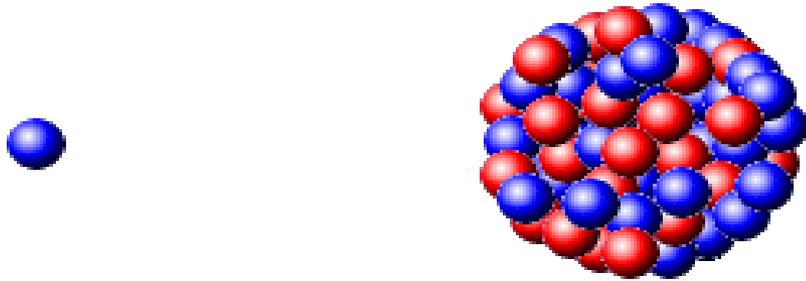
В конце войны в 1945 году Ган был арестован спецподразделением АЛСОС. Его интернировали вместе с другими девятью немецкими физиками, в том числе Максом фон Лауэ, В. К. Гейзенбергом и К. Ф. фон Вайцзеккером в английский Фарм-Холл, неподалёку от Кембриджа. Там немецкие учёные узнали о ядерных бомбардировках Хиросимы и Нагасаки. Отто Ган был на грани отчаянья: из-за своего открытия расщепления ядра он чувствовал себя ответственным за смерть и страдания

1 H																	2 He
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Sr	38 Y	39 Zr	40 Nb	41 Mo	42 Tc	43 Ru	44 Rh	45 Pd	46 Ag	47 Cd	48 In	49 Sn	50 Sb	51 Te	52 I	53 Xe	54 Rn
55 Cs	56 Ba	57 La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	89 Ac	104 Unq	105 Unp	106 Unh	107 Uns	108 Uno	109 Une	110 Unn								

58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr



FISSION



The Vision of Leo Szilard

- Leo Szilard
(Hungarian,
1898-1964)



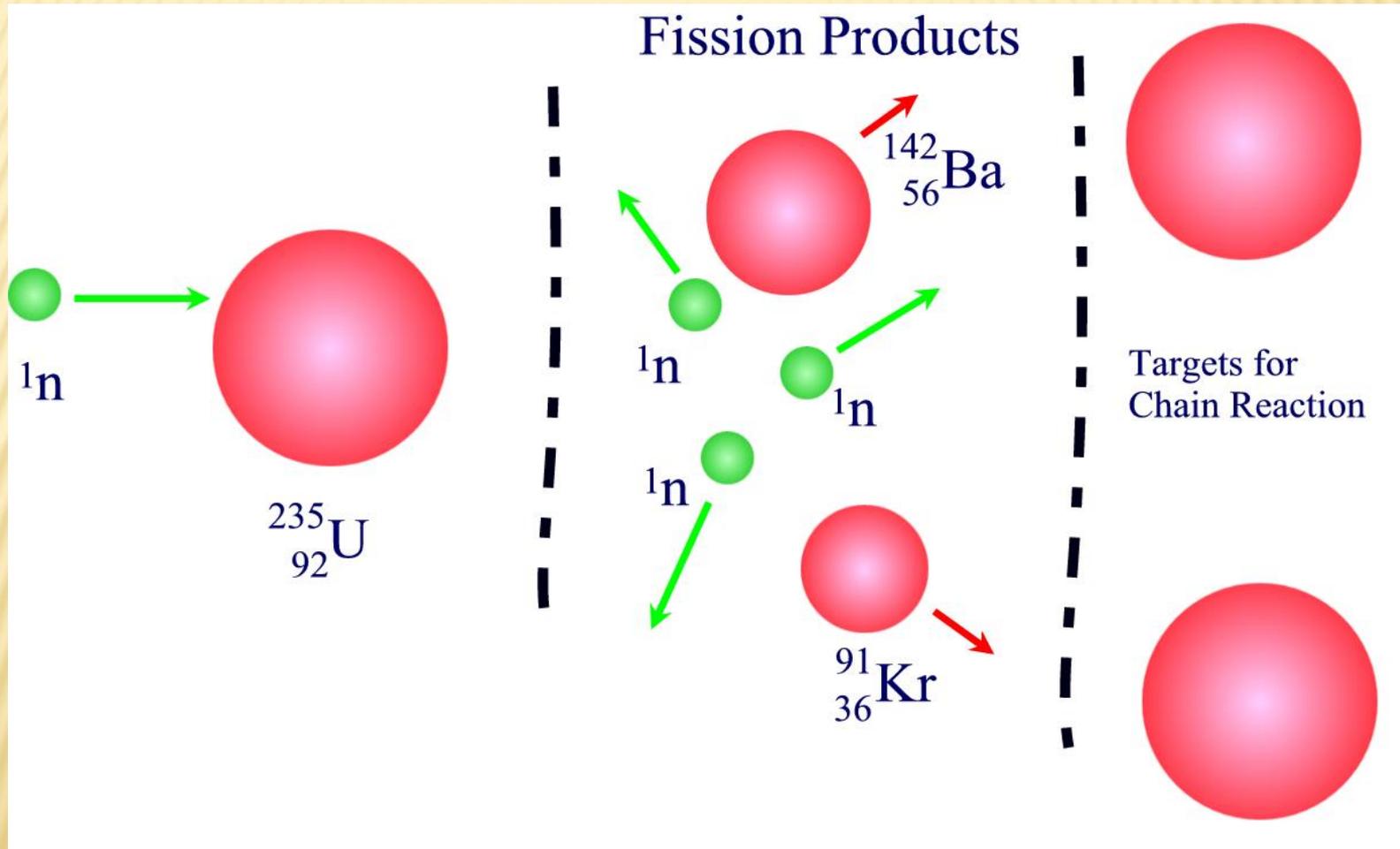
- On September 12, 1933, Szilard – an exile from Hitler’s Germany – is getting waiting for the light to change before crossing a street in London....conceives the idea of a neutron chain reaction.

“As the light changed to green and I crossed the street, it suddenly occurred to me that if we could find an element which is split by neutrons and which would emit two neutrons when it absorbs one neutron, such an element, if assembled in sufficiently large mass could sustain a nuclear chain reaction...

- “...In certain circumstances, it might be possible to set up a nuclear chain reaction, liberate energy on an industrial scale, and construct atomic bombs.”

- “If the thickness is larger than the critical value...I can produce an explosion.”
 - Szilard’s July 4, 1934 patent application which contains general descriptions of key features such as *critical mass, chain reaction, etc.*

NUCLEAR ENERGY - FISSION

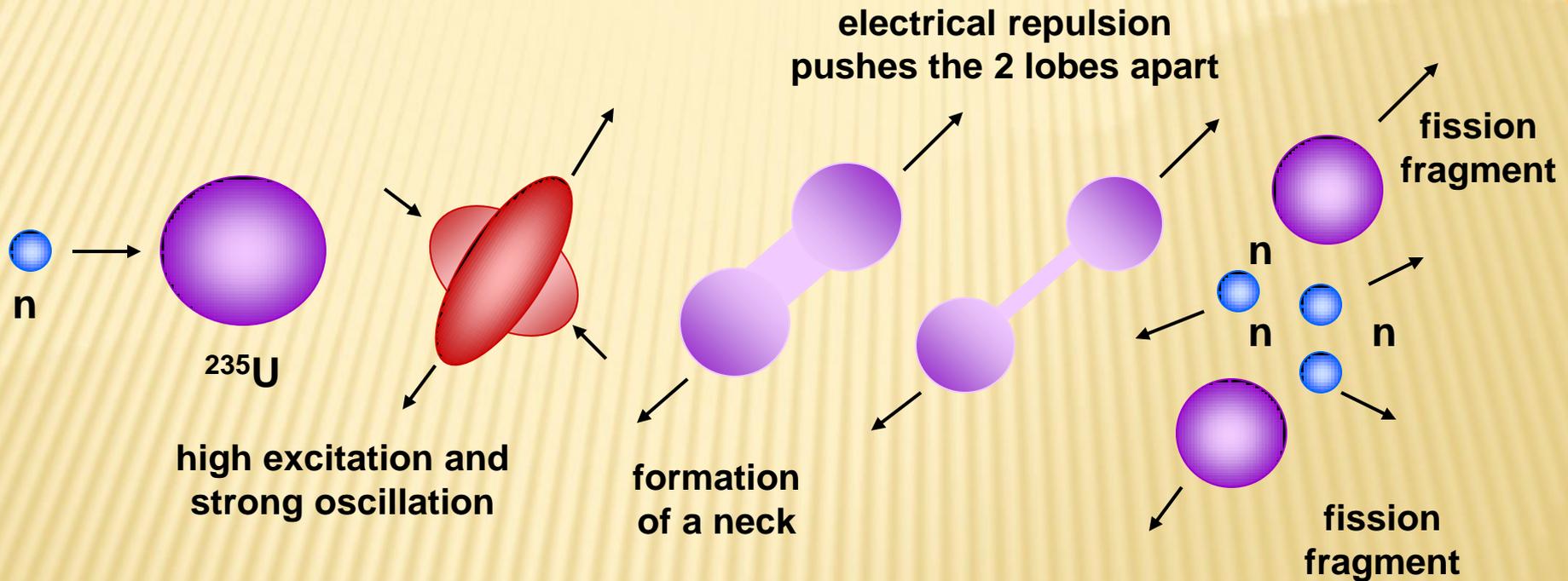


+ about 200 MeV energy

A-2 Induced Fission – 2

Liquid-drop picture

Fission can be qualitatively understood on the basis of the liquid-drop model



Note: fission liberates about 200 MeV per atom!

ЦЕПНАЯ РЕАКЦИЯ

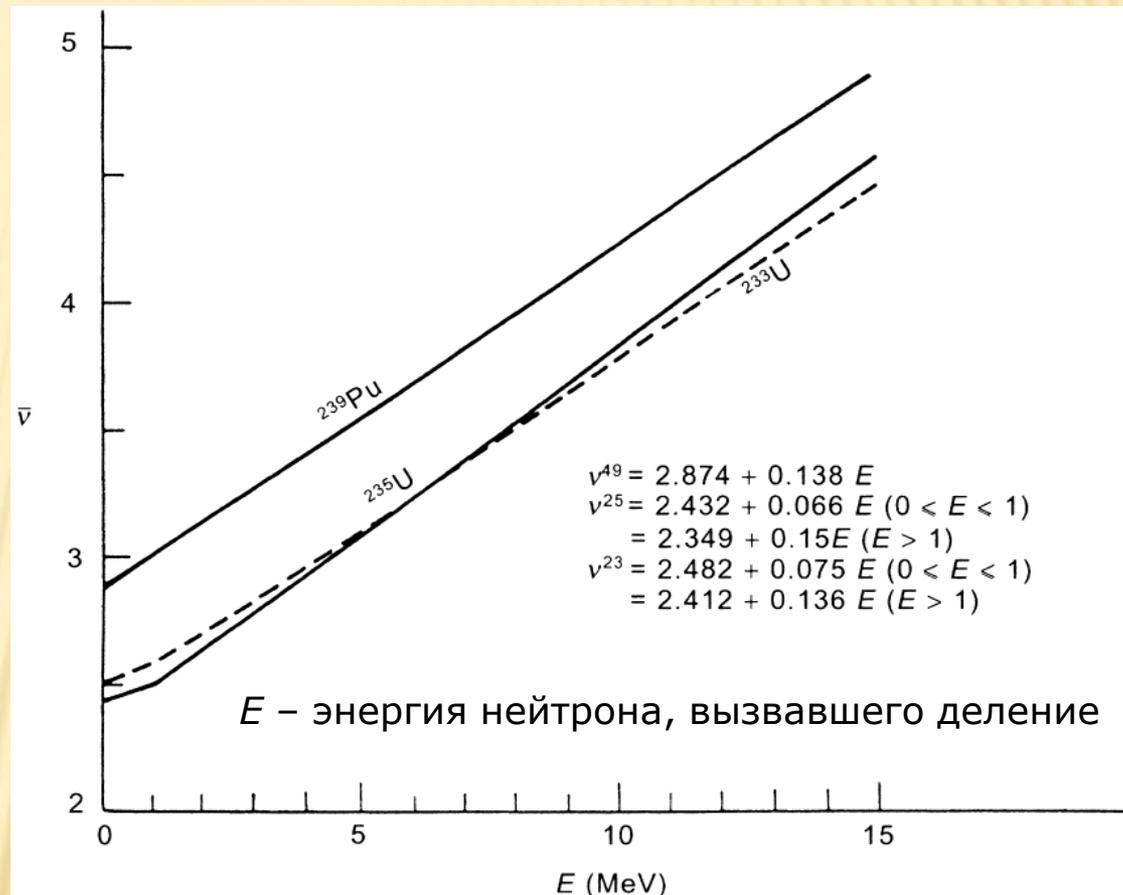
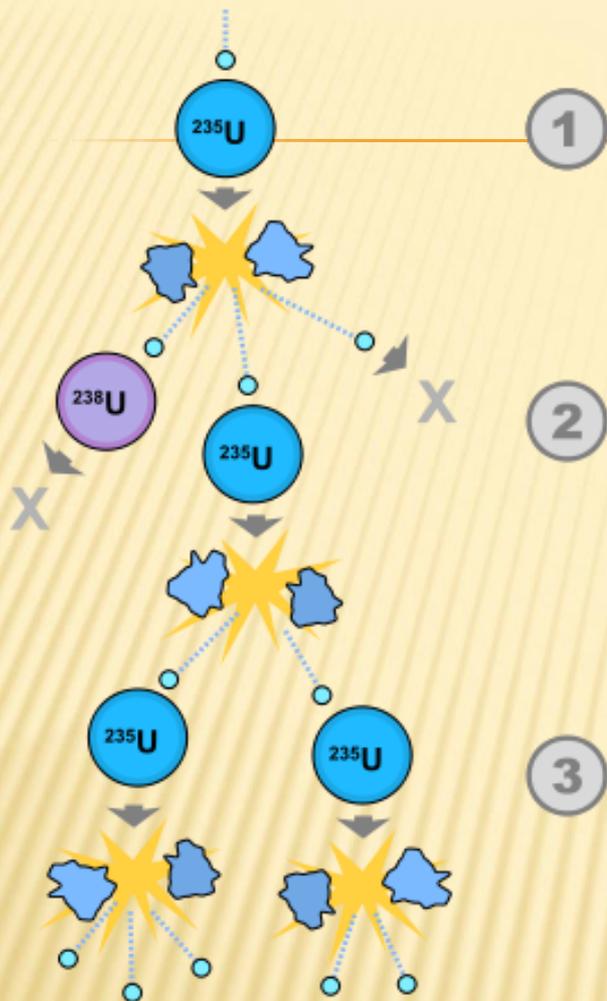


Fig. 1.10 Average number of neutrons emitted per fission.



КРИТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ

Для конечной среды (активной зоны) коэффициент размножения $k = k_0 w$, где w учитывает утечку нейтронов за пределы среды. Очевидно, что в силу утечки $k < k_0$. Поглощение нейтронов в активной зоне $\sim l^3$, где l – эффективный линейный размер зоны, а утечка $\sim l^2$. Таким образом, $w \sim l^3/l^2 = l$.

Значение k определяет течение цепной реакции:

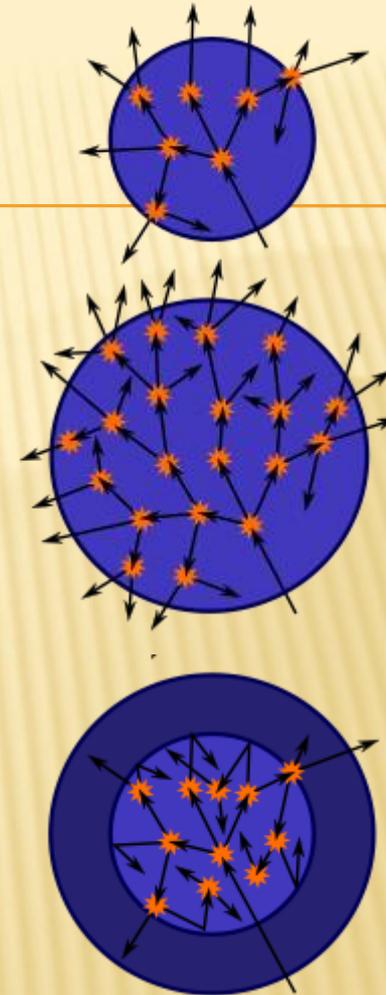
- $k < 1$ (*докритическая масса*): Система не может поддерживать цепную реакцию, т.е. последняя затухает со временем. На каждое индуцированное в системе деление за все время приходится в среднем $1/(1-k)$ делений.
- $k = 1$ (*критическая масса*): Каждое деление вызывает еще одно деление в следующем поколении и т.д. (Ядерные реакторы работают в режиме $k=1$).
- $k > 1$ (*сверхкритическая масса*): Каждое деление вызывает еще k делений в следующем поколении. (Атомная бомба «работает» в режиме $k > 1$).

Критическая масса $M_{кр}$ связана с *критической длиной*: $M_{кр} \sim l_{кр}^x$, где x зависит от формы образца и лежит в пределе от 2 до 3.

АЛЬБЕДО НЕЙТРОНОВ.

Интересным свойством нейтронов является их способность отражаться от различных веществ. Это отражение не когерентное, а диффузное. Его механизм таков. Нейтрон, попадая в среду, испытывает беспорядочные столкновения с ядрами и после ряда столкновений может вылететь обратно. Вероятность такого вылета носит название *альbedo* нейтронов для данной среды.

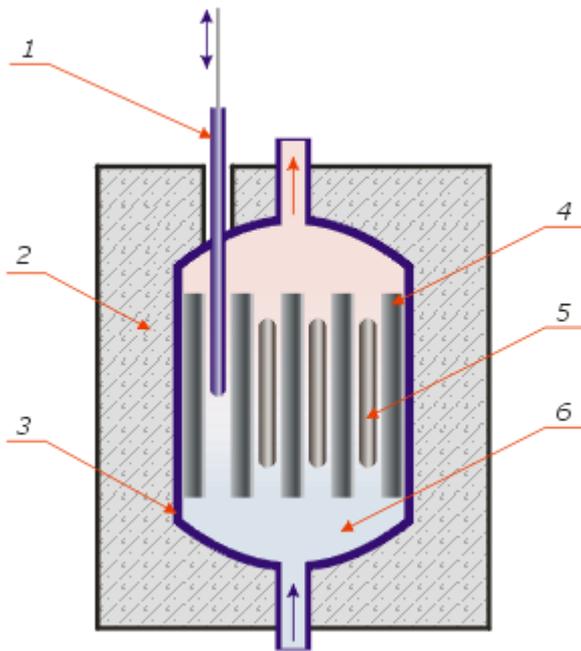
Isotope	Critical Mass	Diameter
<u>protactinium-231</u>	750±180 kg	45±3 cm
<u>uranium-233</u>	15 kg	11 cm
<u>uranium-235</u>	52 kg	17 cm
<u>neptunium-236</u>	7 kg	8.7 cm
<u>neptunium-237</u>	60 kg	18 cm
<u>plutonium-238</u>	9.04–10.07 kg	9.5-9.9 cm
<u>plutonium-239</u>	10 kg	9.9 cm
<u>plutonium-240</u>	40 kg	15 cm
<u>plutonium-241</u>	12 kg	10.5 cm
plutonium-242	75–100 kg	19-21 cm
<u>americium-241</u>	55–77 kg	20-23 cm
<u>americium-242m</u>	9–14 kg	11-13 cm
<u>americium-243</u>	180–280 kg	30-35 cm
<u>curium-243</u>	7.34–10 kg	10-11 cm
<u>curium-244</u>	(13.5)–30 kg	(12.4)–16 cm
curium-245	9.41–12.3 kg	11-12 cm
curium-246	39–70.1 kg	18-21 cm
curium-247	6.94–7.06 kg	9.9 cm
<u>californium-249</u>	6 kg	9 cm
californium-251	5 kg	8.5 cm



Наверху: Докритическая.
В середине: Критическая.
Внизу: Докритическая масса, окруженная отражателем.

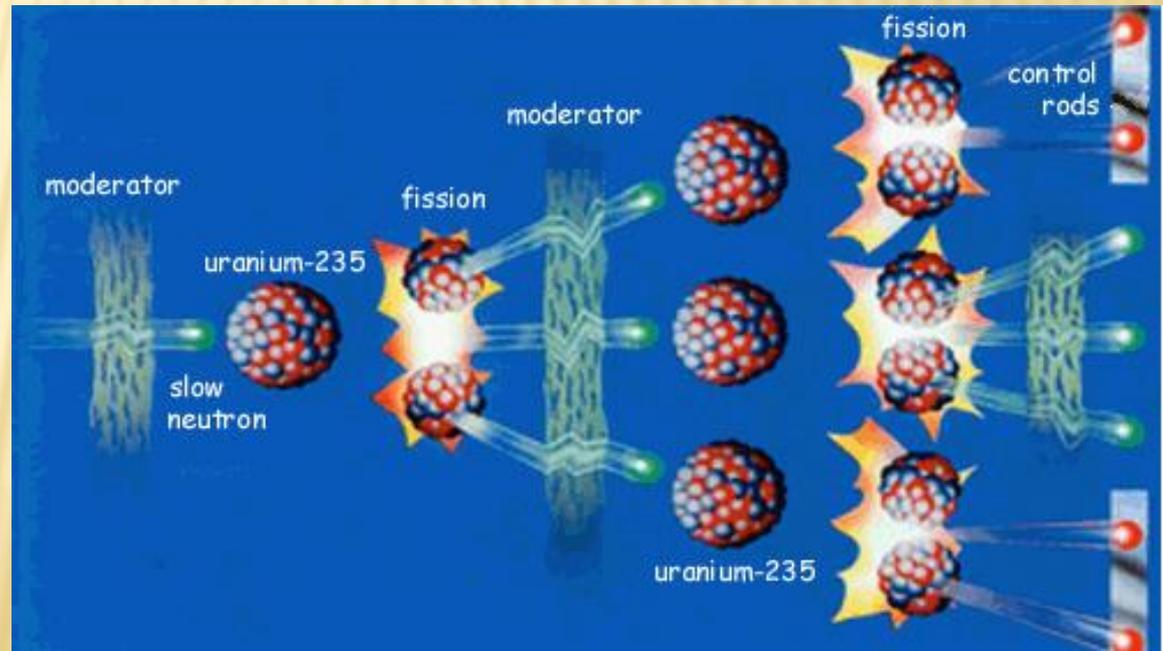
ЯДЕРНЫЙ РЕАКТОР

Для начала цепной реакции обычно достаточно нейтронов, рождаемых при спонтанном делении ядер урана. Возможно также использование внешнего источника нейтронов для запуска реактора, например, смеси Ra и Be, ^{252}Cf или других веществ.



Схематическое устройство гетерогенного реактора на тепловых нейтронах

- 1 — управляющий стержень;
- 2 — биологическая защита;
- 3 — тепловая защита;
- 4 — замедлитель;
- 5 — ядерное топливо;
- 6 — теплоноситель.



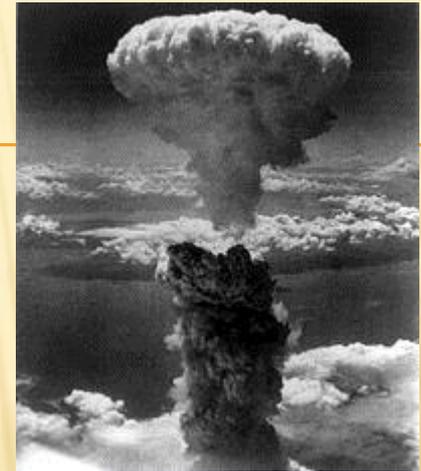
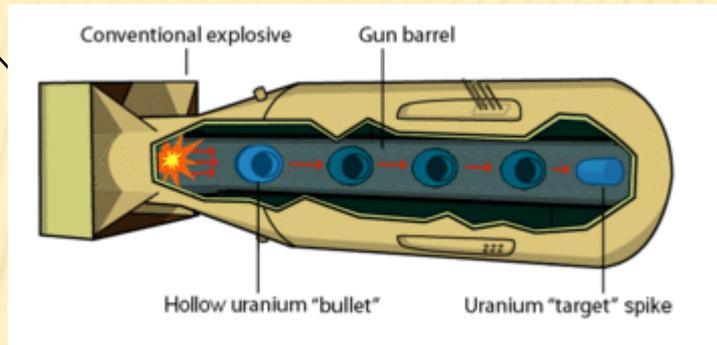
АТОМНАЯ БОМБА



Little Boy

Ядерный взрыв,
если $k > 1 + \mu!$

«Пушечная» схема

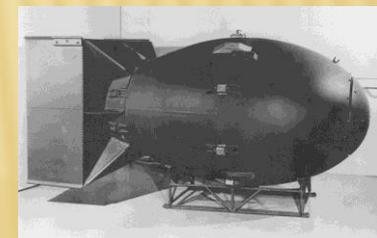
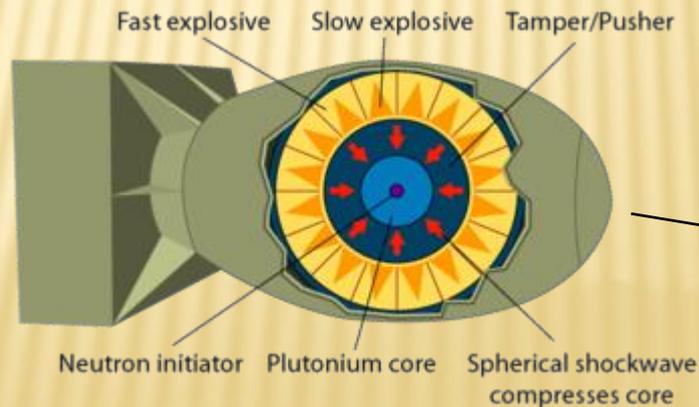


The mushroom cloud of the atomic bombing of Nagasaki, Japan, 1945, rose some 18 kilometers above the hypocenter



Хиросима после ядерного взрыва

Взрывная имплозия



Fat Man

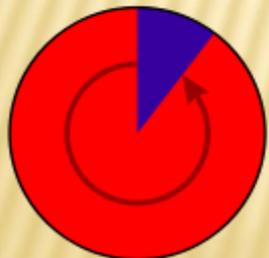
ЯДЕРНОЕ ТОПЛИВО



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

Ядра, делящиеся нейтронами любых энергий, называют ядерным горючим.

Ядра, которые делятся только нейтронами с энергией выше некоторого порогового значения, называют сырьевым материалом, так как при захвате нейтрона пороговым ядром образуются ядра ядерного горючего.

Комбинация ядерного горючего и сырьевого материала называется *ядерным топливом*.

Ядерное топливо делится на два вида:

- Природное урановое, содержащее делящиеся ядра ^{235}U , а также сырьё ^{238}U , способное при захвате нейтрона образовывать плутоний ^{239}Pu ;
- Вторичное топливо, которое не встречается в природе, в том числе ^{239}Pu , получаемый из топлива первого вида, а также изотопы ^{233}U , образующиеся при захвате нейтронов ядрами тория ^{232}Th .

По химическому составу, ядерное топливо может быть:

- *Металлическим*, включая *сплавы*; *Оксидным* (например, UO_2); *Карбидным* (например, PuC_{1-x}); *Нитридным*; *Смешанным* ($\text{PuO}_2 + \text{UO}_2$).

А вот два миллиарда лет тому назад, к примеру, проблема запасов урана была бы совсем не столь острой. Природный уран содержал тогда от 3 до 4 % урана-235 -- такой концентрации достаточно для пуска атомного реактора без предварительного обогащения.

Природа даже позволила себе шутку: в то время действительно существовал такой самопроизвольный реактор.

В Окло, в республике Габон, на западном побережье Африки, где сейчас ведутся разработки мощных месторождений урана, два миллиарда лет тому назад протекала доисторическая цепная реакция и замедлителем служила природная вода.

Реактор в Окло работал, по меньшей мере, 150 000 лет.

Oklo: Location





остатки окси урана видны как желтоватые горные породы

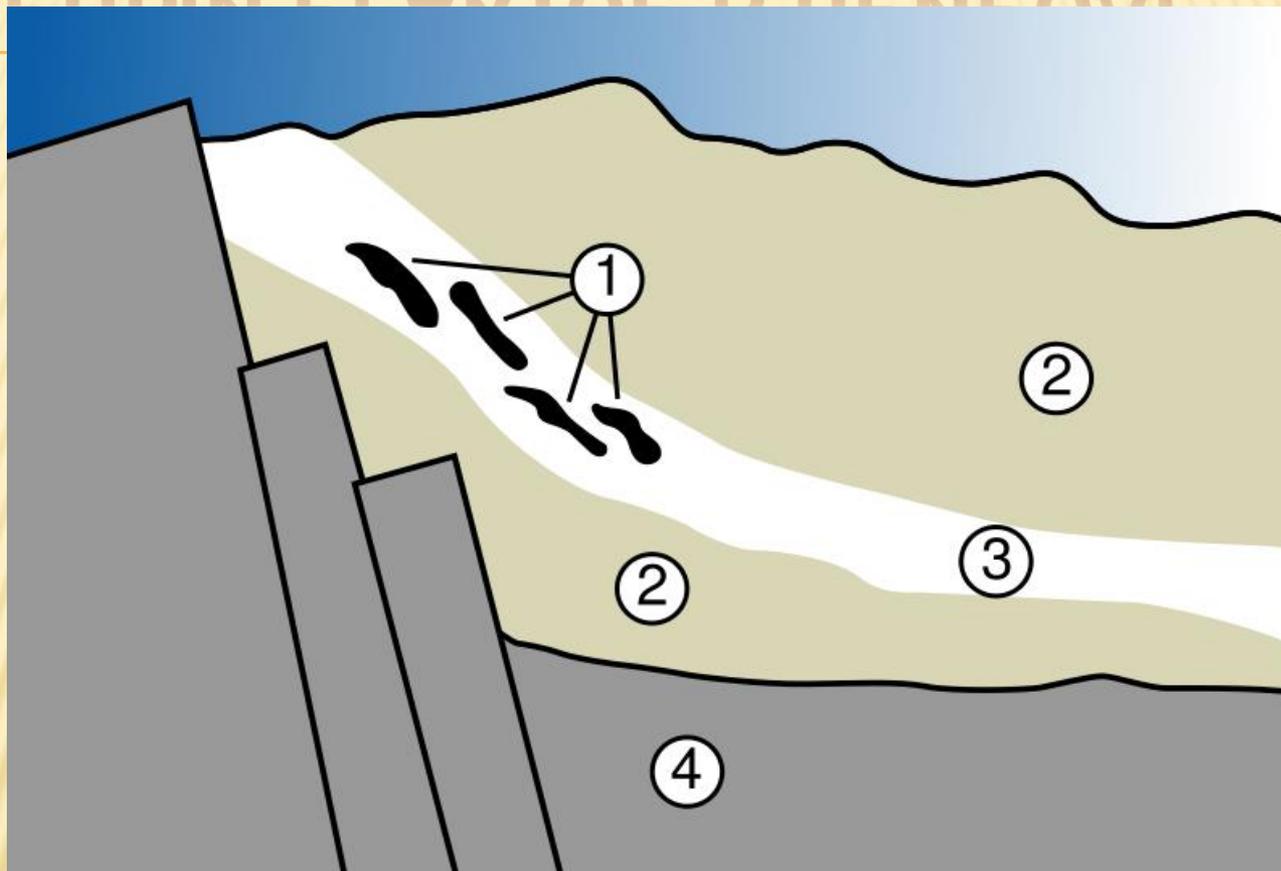
Толчком для научного расследования по делу "Окло" был странный результат анализа: уран из Окло содержит 0,7171 % урана-235 вместо обычных 0,7202 %. Недостающие 0,0031 % следует приписать выгоранию урана в естественном реакторе.

К такому выводу пришли только после исключения множества других источников ошибок. Значит, природа уже два миллиарда лет тому назад совершала то, чем человечество так гордится сегодня, а именно -- запуском самоподдерживающейся атомной цепной реакции с ураном!



Как же природе удалось создать условия для цепной ядерной реакции? Сначала в дельте древней реки образовался богатый урановый рудой слой песчаника, который покоился на крепком базальтовом ложе. После очередного землетрясения обычного в то буйное время базальтовый фундамент будущего реактора опустился на несколько километров, потянув за собой урановую жилу. Жила растрескалась, в трещины проникла грунтовая вода. Затем очередной катаклизм поднял всю "установку" до современного уровня.

ЯДЕРНЫЙ РЕАКТОР В ПРИРОДЕ



Геологические условия, сложившиеся 2 млрд. лет назад в районе Окло (Габон, Африка), способствовали реализации природного ядерного реактора:

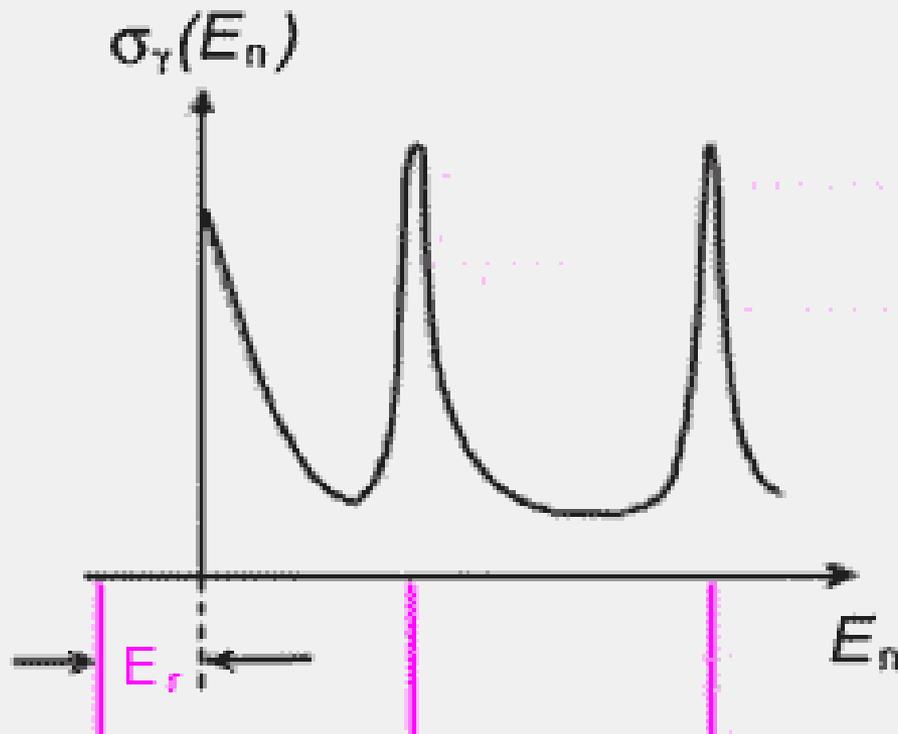
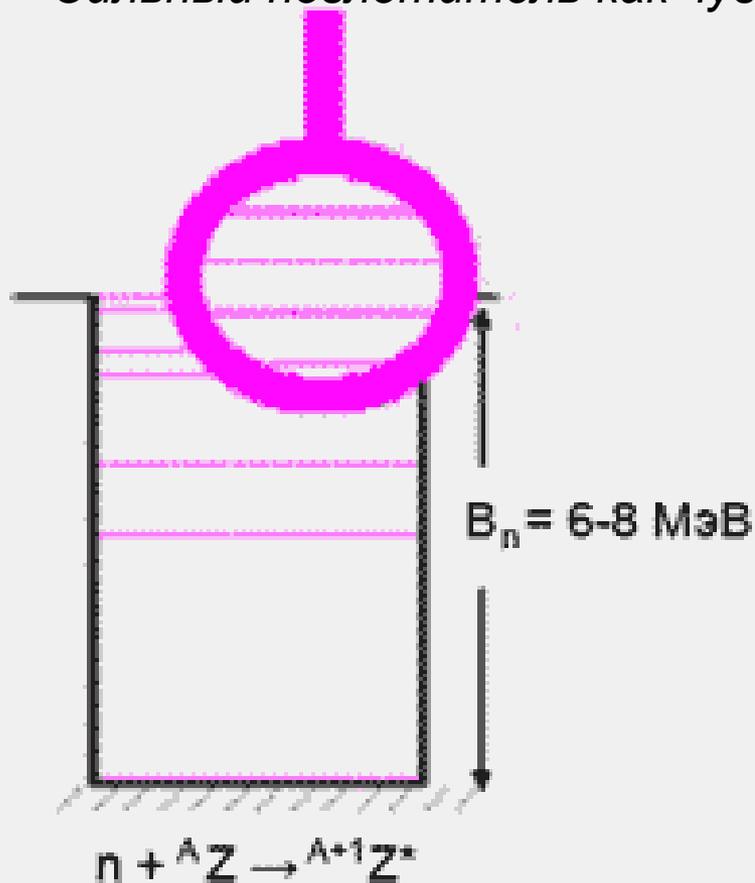
1. Активные зоны реактора; 2. Песчаник;

3. Урановая руда; 4. Гранит.

Высокая концентрация ^{235}U (~3%) на тот момент стимулировала цепную реакцию, а подземные воды послужили замедлителем нейтронов. Стабилизация мощности реактора: при разогреве вода выкипала, реакция тормозилась, а приток воды вновь её усиливал.

ПОСТОЯННЫ ЛИ КОНСТАНТЫ?

Сильный поглотитель как чувствительный детектор изменения α .



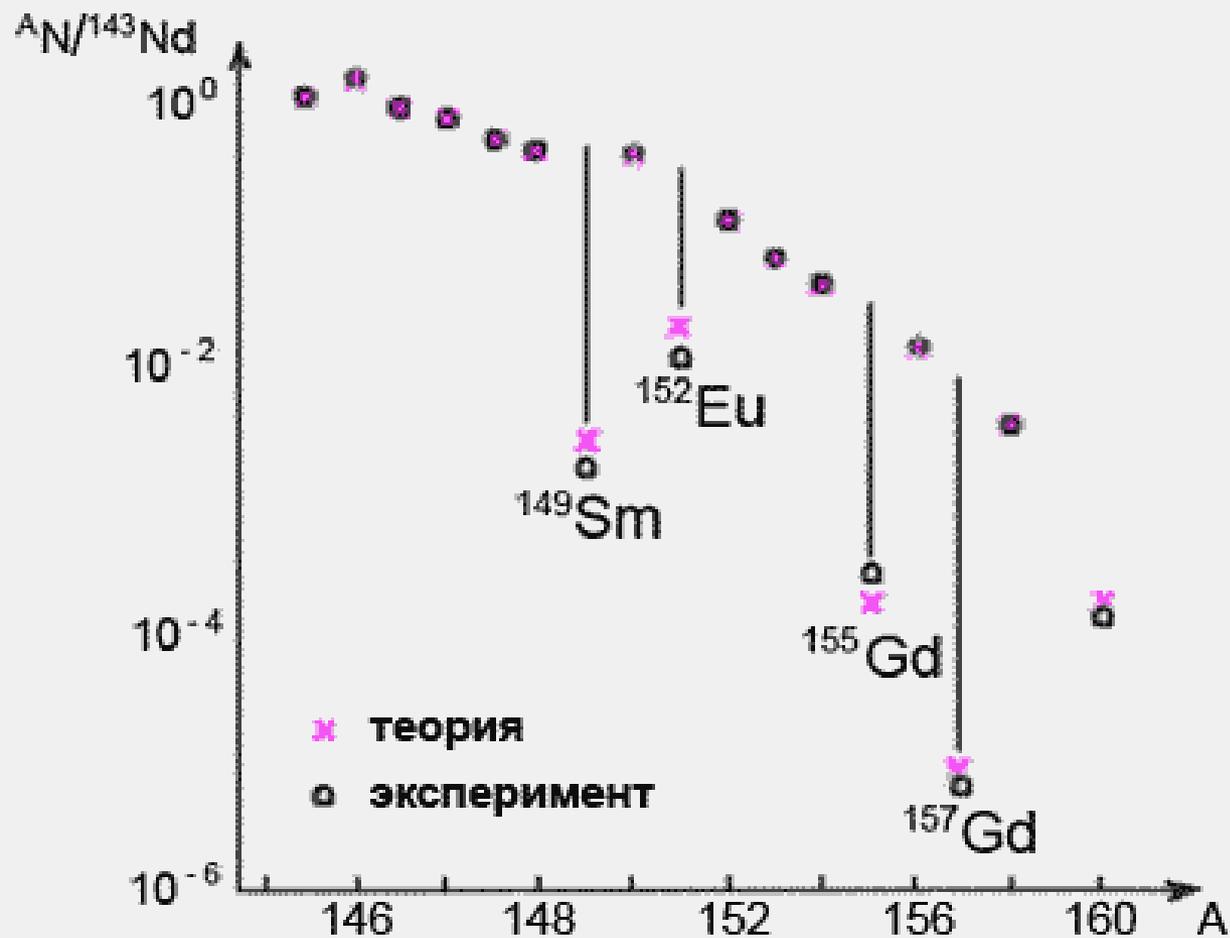
Слева — плотность уровней составного ядра ${}^{A+1}_Z^*$; $({}^{149}_{62}\text{Sm})$

справа — резонансы в сечении реакции $n + {}^A_Z \rightarrow {}^{A+1}_Z^*$.

Сечение захвата нейтрона ведёт себя как
где E_r — расстояние до резонанса, а Γ_γ — его ширина.

$$\sigma_\gamma(E_r) \sim (\Gamma_\gamma/E_r)^2,$$

При сдвиге E_r захват нейтронов сильно меняется.



Сравнение расчётных и измеренных концентраций тяжёлых осколков деления A_N относительно содержания ^{143}Nd для одной из проб реактора Окло

В области сильных поглотителей наблюдаются глубокие провалы. Расчёт этих провалов для современных значений сечений поглощения прекрасно согласуется с экспериментальными измерениями. Это означает, что все сильные поглотители были сильными и 2 млрд лет назад.

Если сечения и изменились, то менее чем на $\Gamma_\gamma / 2$:

$$\Delta E_r \leq \Gamma_\gamma / 2 = 0,05 \text{ эВ.}$$

Отсюда следует ограничение на среднюю скорость изменения электромагнитной константы α :

$$(d\alpha/dt)/\alpha \leq 3 \times 10^{-17} \text{ год}^{-1}.$$

Таблица 3. Ограничения на скорость изменения на основе данных о содержании $^{149}_{62}\text{Sm}$ в реакторе Окло (строки 1—5) и других результатов (6, 7)

Организация	Авторы, год	$\Delta E_r, \delta\alpha/\alpha, (d\delta\alpha/dt)/\alpha$	Зона, спектр, T_C
1. ЛИЯФ, Гатчина, СССР	Ю. Петров, 1976 г. [7]	$\Delta E_r \leq 0,05$ эВ $\delta\alpha/\alpha \leq 5 \times 10^{-8}$ $(d\delta\alpha/dt)/\alpha \leq 2,5 \times 10^{-17}$ год $^{-1}$	RZ2, максвелловский, $T_C = 300$ К
2. ЛИЯФ, Гатчина, СССР	А. Шляхтер, 1976 г. [10]	$\Delta E_r \leq 0,02$ эВ $\delta\alpha/\alpha \leq 1 \times 10^{-8}$ $(d\delta\alpha/dt)/\alpha \leq 0,5 \times 10^{-17}$ год $^{-1}$	RZ2, максвелловский, $T_C = 300$ К
3. Институт повышенных знаний, Принстон, США	Т. Дамур и Ф. Дайсон, 1996 г. [13]	$\Delta E_r \leq 0,09$ эВ $\delta\alpha/\alpha \leq 9 \times 10^{-8}$ $(d\delta\alpha/dt)/\alpha \leq 5,0 \times 10^{-17}$ год $^{-1}$	RZ2, максвелловский, $T_C = (450-1000)$ К
4. Университет Токио, Япония	Я. Фуджи и др., 2000 г. [14]	$\Delta E_r \leq 0,02$ эВ $\delta\alpha/\alpha \leq 2 \times 10^{-8}$ $(d\delta\alpha/dt)/\alpha \leq 1,0 \times 10^{-17}$ год $^{-1}$	RZ2, максвелловский, $T_C = (470-670)$ К
5. ПИЯФ, Гатчина, Россия	Ю. Петров и др., 2002—2004 гг. [9]	$\Delta E_r \leq 0,06$ эВ $\delta\alpha/\alpha \leq 6 \times 10^{-8}$ $(d\delta\alpha/dt)/\alpha \leq 3,0 \times 10^{-17}$ год $^{-1}$	RZ2, реакторный спектр, $T_C = (725 \pm 55)$ К
Космофизические и лабораторные данные			Метод
6. IUSAA, Пьун, Индия	Х. Чанд и др., 2004 г. [16]	$\delta\alpha/\alpha \leq (-60 \pm 60) \times 10^{-8}$ $(d\delta\alpha/dt)/\alpha \leq 12 \times 10^{-17}$ год $^{-1}$	Космофизический метод мультидублетов
7. Парижская обсерватория, Франция	С. Бизе и др., 2004 г.	$(d\delta\alpha/dt)/\alpha \leq (-5 \pm 53) \times 10^{-17}$ год $^{-1}$	Метод атомных фонтанов

КСЕНОНОВОЕ ОТРАВЛЕНИЕ (ЙОДНАЯ ЯМА)



В процессе деления ядер урана, во время работы ядерного реактора, среди прочих продуктов деления образуется радиоактивный изотоп йода ${}^{135}\text{I}$.

В результате β -распада с периодом полураспада 6,57 часа он превращается в изотоп ксенона ${}^{135}\text{Xe}$. (его период полураспада 9,14 часа).

Поглощённые им нейтроны, очевидно, не могут участвовать в цепной реакции деления урана, поэтому, присутствие ${}^{135}\text{Xe}$ снижает запас реактивности реактора.

В реакторе, работающем на большой мощности, убыль ${}^{135}\text{Xe}$ определяется его радиоактивным распадом и «выгоранием» в результате захвата нейтронов.

При снижении мощности реактора происходит накопление ^{135}Xe в топливных элементах («ксеноновое отравление»), которое ведет к падению скорости цепной реакции.

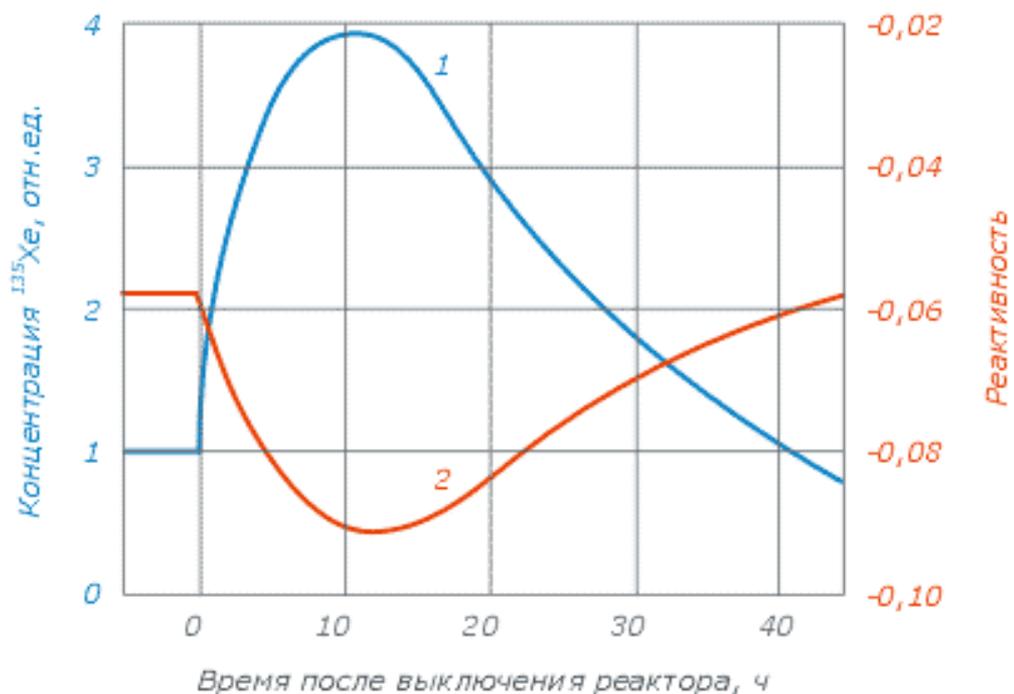


Рис. Зависимость концентрации ^{135}Xe (1) и реактивности (2) после выключения реактора. (До выключения реактора плотность потока нейтронов была $\phi=10^{18}$ нейтр./ $(\text{м}^2\cdot\text{с})$.)

ЧЕРНОБЫЛЬСКАЯ АВАРИЯ

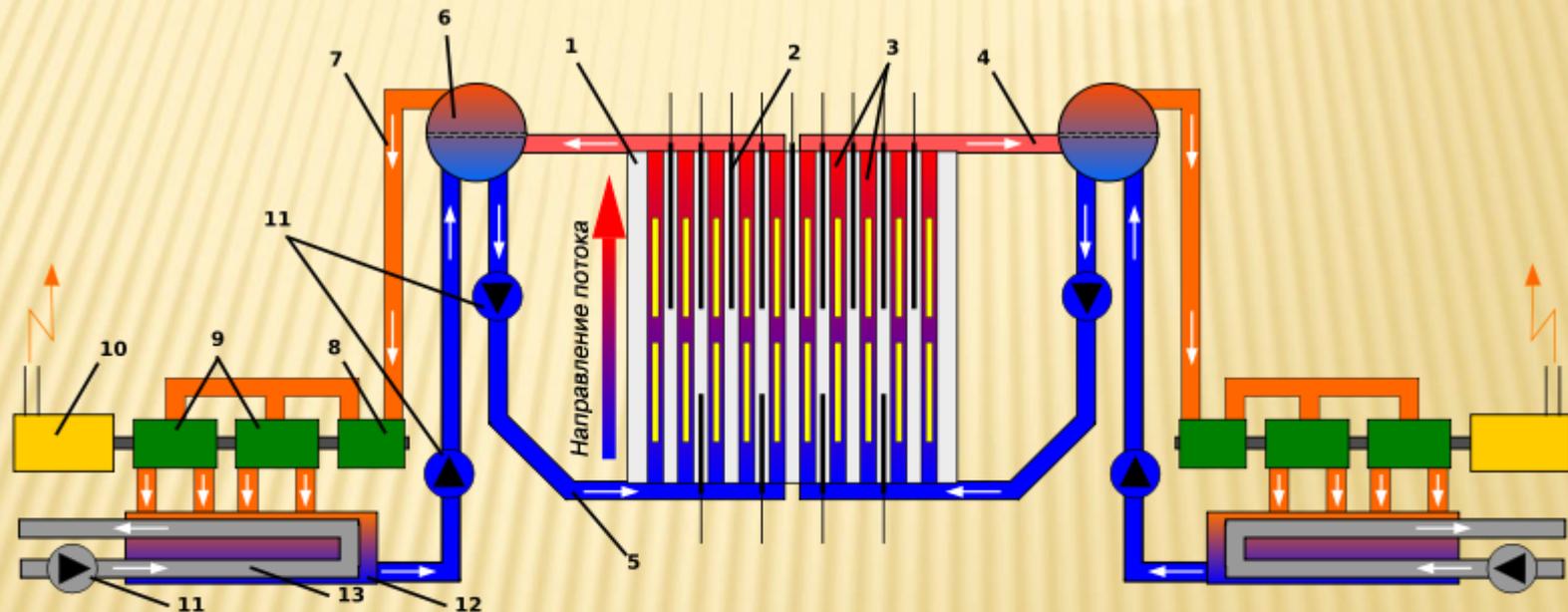
Ксеноновое отравление явилось одной из главных причин *Чернобыльской катастрофы*.



Примерно в 1:24 26 апреля 1986 года на 4-м энергоблоке Чернобыльской АЭС произошёл взрыв, который полностью разрушил реактор.

СХЕМА ЭНЕРГБЛОКА АЭС С РЕАКТОРОМ ЧЕРНОБЫЛЬСКОГО ТИПА (РБМК)

РБМК (Реактор Большой Мощности Канальный) — двухцелевой канальный кипящий графито-водный ядерный реактор.



- | | |
|---------------------------------|-------------------------------------|
| 1 – Графитовый замедлитель | 8 – Турбина высокого давления |
| 2 – Стержни управления и защиты | 9 – Турбины низкого давления |
| 3 – Технологические каналы | 10 – Электроический генератор |
| 4 – Пар | 11 – Циркуляционные насосы |
| 5 – Вода | 12 – Охладитель (конденсатор) |
| 6 – Барабан-сепаратор | 13 – Вспомогательный водяной контур |
| 7 – Сухой пар | |

ХРОНОЛОГИЯ СОБЫТИЙ

(1) На 25 апреля 1986 года была запланирована остановка 4-го энергоблока Чернобыльской АЭС для очередного обслуживания и проверки проектного режима, предусматривающего использование инерции турбины генератора (т.н. «выбега») для питания систем реактора в случае потери внешнего электропитания.

(2) Испытания должны были проводиться на мощности 700 МВт, но из-за оплошности оператора при снижении мощности, она упала до величины менее 30 МВт. Было решено не поднимать мощность до запланированных 700 МВт, а ограничиться 200 МВт. При быстром снижении мощности, и последующей работе на уровне 30 — 200 МВт стало усиливаться отравление активной зоны реактора изотопом ксенона-135 (см. «[иодная яма](#)»). Для того, чтобы поднять мощность, из активной зоны была извлечена часть регулирующих стержней.

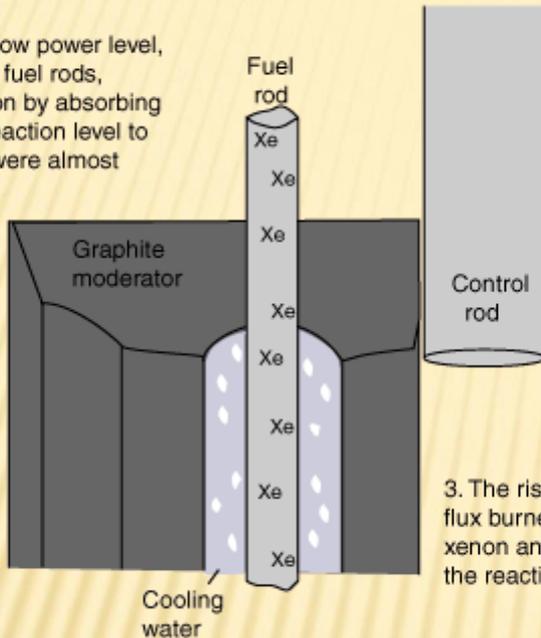
(3) После достижения 200 МВт были включены дополнительные насосы, которые должны были служить нагрузкой для генераторов во время эксперимента. Величина потока воды через активную зону на некоторое время превысила допустимое значение. В это время для поддержания мощности операторам пришлось ещё сильнее поднять стержни. При этом, оперативный запас [реактивности](#) оказался ниже разрешённой величины, но персонал реактора об этом не знал.

ПОСЛЕДНИЕ СТАДИИ

Critical Final Stages Leading to the Explosion

1. With the extremely low power level, xenon builds up in the fuel rods, "poisoning" the reaction by absorbing neutrons. To get the reaction level to rise, the control rods were almost completely withdrawn.

2. When the turbine was switched off to start the test, the number of feedwater pumps dropped from eight to four. Less pumping caused heating and steam voids in the cooling water. Absorbing fewer neutrons, these voids caused the reaction rate to rise rapidly.



5. Power surges to 100 times the normal operating power!!

4. Manual control rod insertion comes too late, because it displaces water and actually increases the reaction rate before it can begin to absorb neutrons.

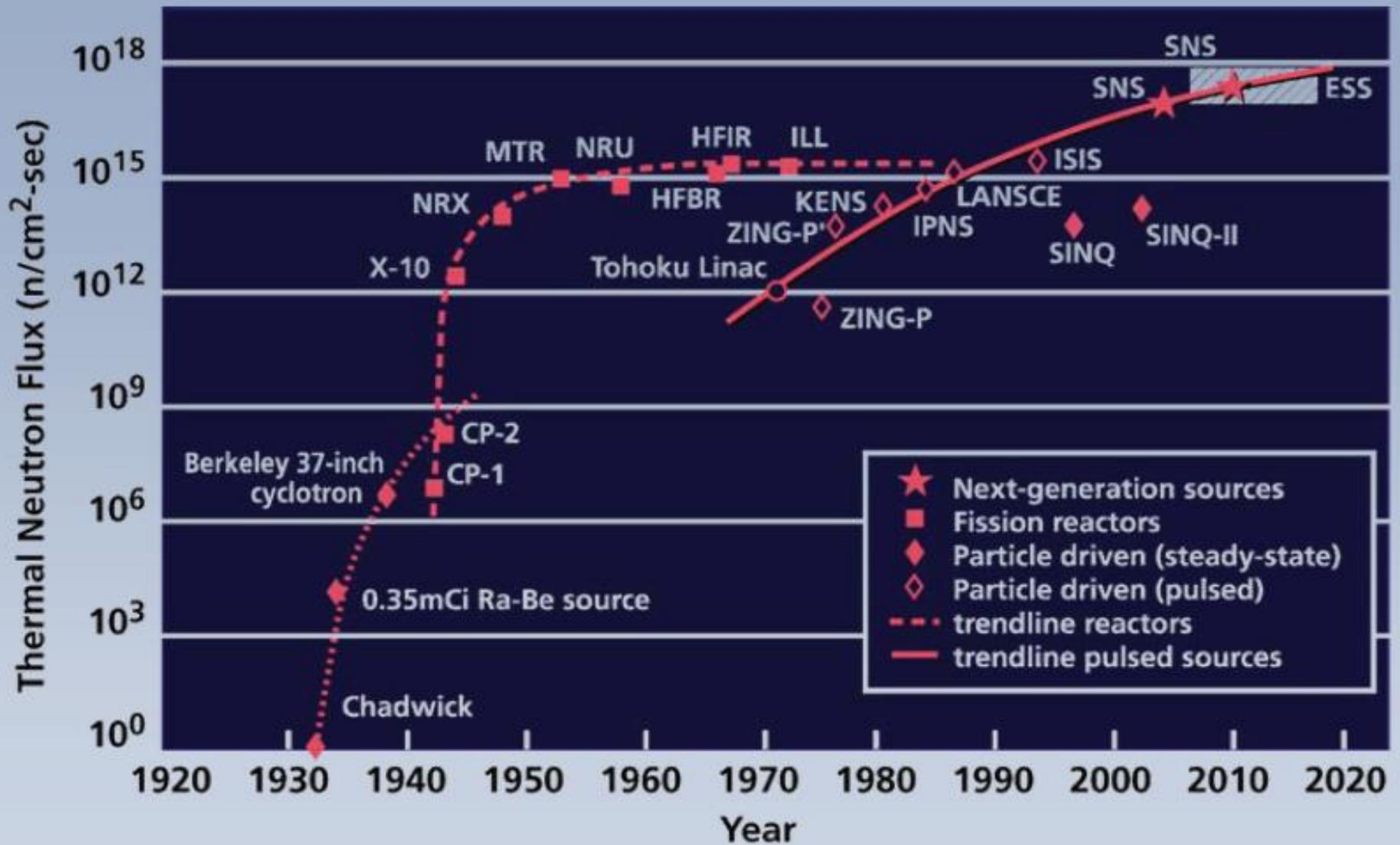
3. The rising neutron flux burned away the xenon and increased the reaction rate.

1-й взрыв был паровой;
2-й взрыв был либо химический,
либо паровой, либо ядерный (?)

В 1:23:04 начался эксперимент. В этот момент никаких сигналов о неисправностях или о нестабильном состоянии реактора не было. Из-за снижения оборотов насосов, подключённых к «выбегавшему» генератору и положительного **парового коэффициента реактивности** (из-за снижения теплопередачи) реактор испытывал тенденцию к увеличению мощности (вводилась положительная **реактивность**). В 1:23:40 оператор нажал кнопку аварийной защиты. Точная причина этого действия оператора неизвестна.

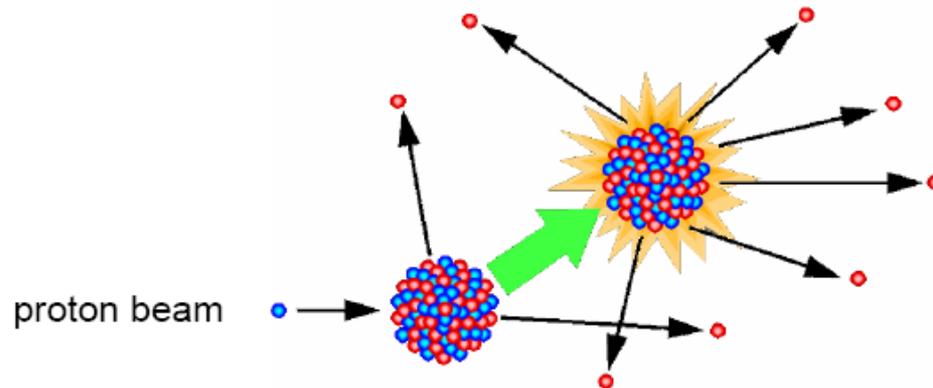
НЕЙТРОННЫЕ ИСТОЧНИКИ

Development of neutron science facilities



(Updated from *Neutron Scattering*, K. Skold and D. L. Price: eds., Academic Press, 1986)

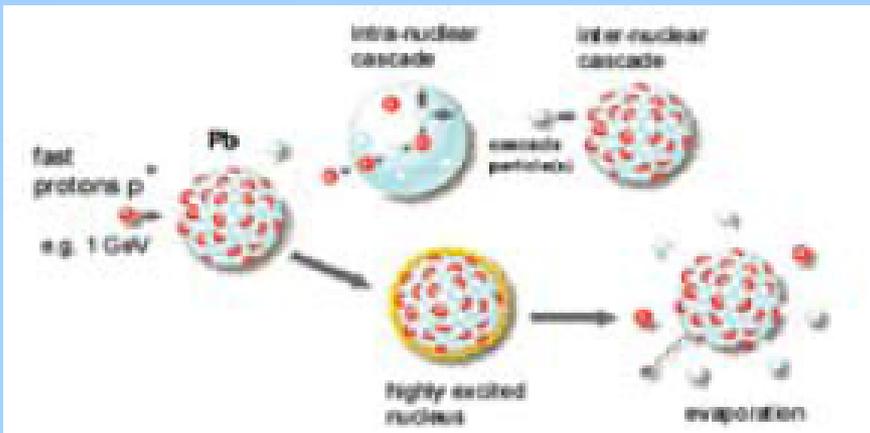
Spallation



Spallation

- no chain reaction
- pulsed operation
- 30 neutrons/proton

- Pulsed spallation source:
 - Advantages:
 - high peak flux
 - advantageous time structure for many applications
 - accelerator based – politics simpler than reactors
 - technology rapidly evolving
 - Disadvantages:
 - low time averaged flux
 - not all applications exploit time structure



(Picture from reference [1])

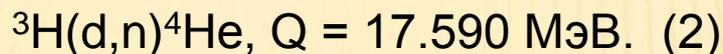
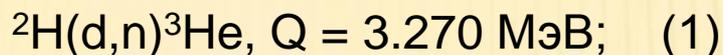
В *радиоизотопных (ампульных) источниках* используются нейтроны спонтанного деления (^{252}Cf) или реакции типа (α, n) и (γ, n) . Один миллиграмм ^{252}Cf испускает $2.28 \cdot 10^9$ нейтронов в секунду с энергией 1.5 МэВ.

Нейтронный источник, использующий реакции (α, n) , должен содержать альфа-источник и легкий изотоп (Li, Be, B) на котором происходит реакция (α, n) . Использование легких изотопов связано с тем, что энергия альфа-частиц должна быть больше высоты кулоновского барьера. В противном случае сечение реакции будет сильно подавлено. Например, в Po/Be источнике используется смесь металлического порошка бериллия с небольшим количеством альфа-излучателя – полония. Нейтроны образуются в реакции $^9\text{Be}(\alpha, n)^{12}\text{C}$. В этом источнике получают нейтроны, обладающие практически сплошным спектром энергий от 0 до 13 МэВ.

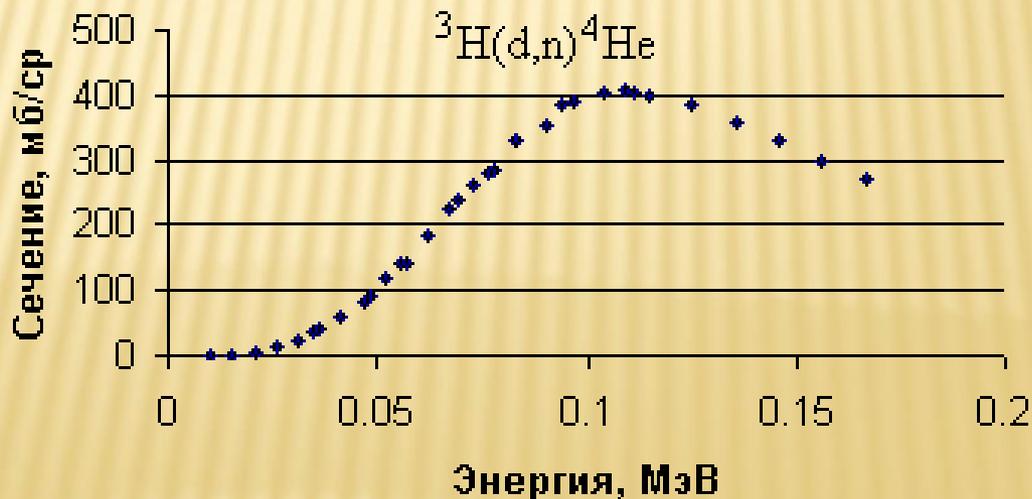
Источником нейтронов, основанным на фотоядерной реакции, является смесь радия и бериллия. В этом случае источник нейтронов представляет собой систему из двух запаянных ампул. Внутри ампулы с порошком бериллия помещается ампула с солями радия таким образом, что на бериллий действует только гамма-излучение, проходящее через стенки внутренней ампулы. Нейтроны образуются в реакции $^9\text{Be}(\gamma, n)^8\text{Be}$. Такой источник испускает монохроматические нейтроны с энергией 110 кэВ.

Интенсивность радиоизотопных источников 10^6 - 10^8 нейтронов/с, чувствительность (предел обнаружения) элементов $\sim 10^{-4}$ - $10^{-6}\%$.

Нейтронные генераторы это ускорители в которых нейтроны образуются в результате ядерных реакций на соответствующих мишенях. Чаще всего используются реакции



В результате этих реакций получаются нейтроны с энергиями ~ 2.5 МэВ и ~ 14.1 МэВ. Так как сечения этих реакций достаточно велики при небольших энергиях дейтронов, можно обойтись небольшими ускорителями. Максимум сечения реакции (2) при энергии $T_d \cong 120$ кэВ. Обычно используются каскадные генераторы. Типичный выход нейтронов у нейтронных генераторов $\sim 10^{10} \text{ с}^{-1}$. Использование быстрых нейтронов позволяет проводить анализ легких элементов (C, N, O), которые плохо активируются тепловыми нейтронами.

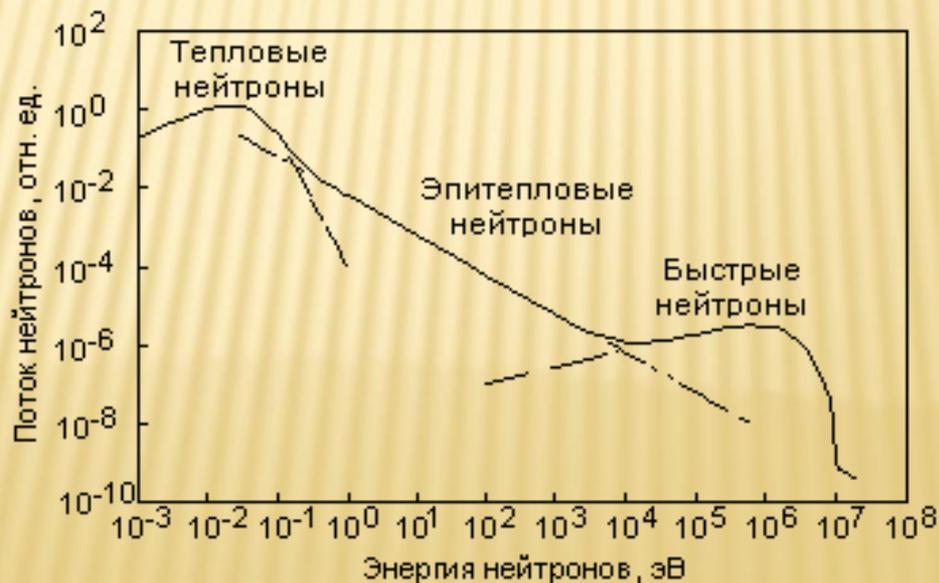


Ядерные реакторы являются мощными источниками нейтронов. В спектре нейтронов выделяют 3 компоненты - тепловые, эпитепловые (резонансные) и быстрые нейтроны

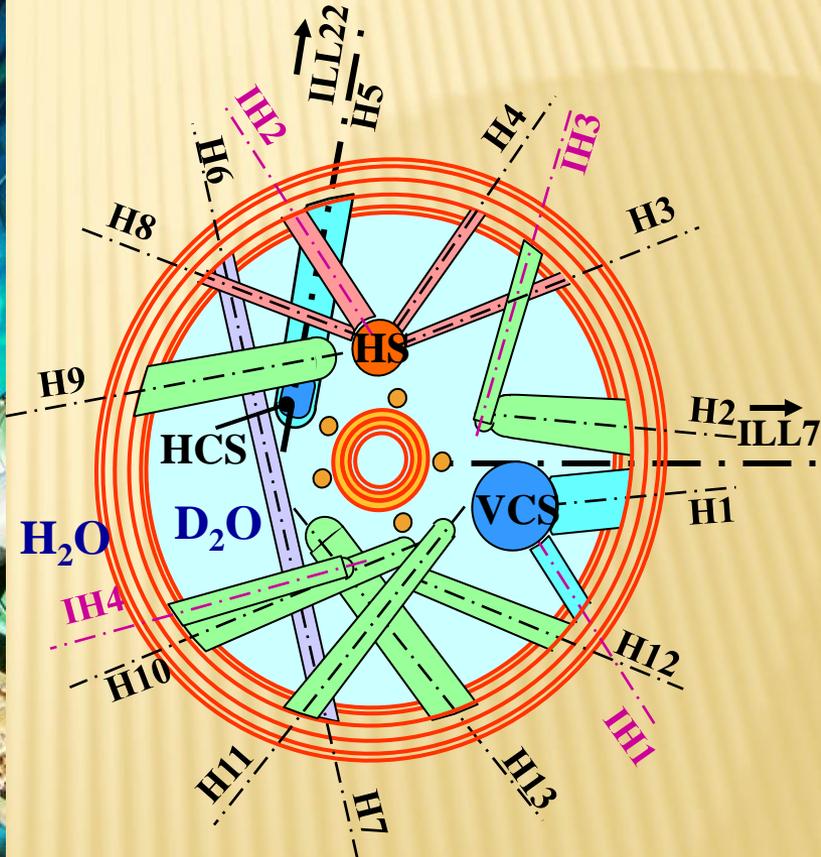
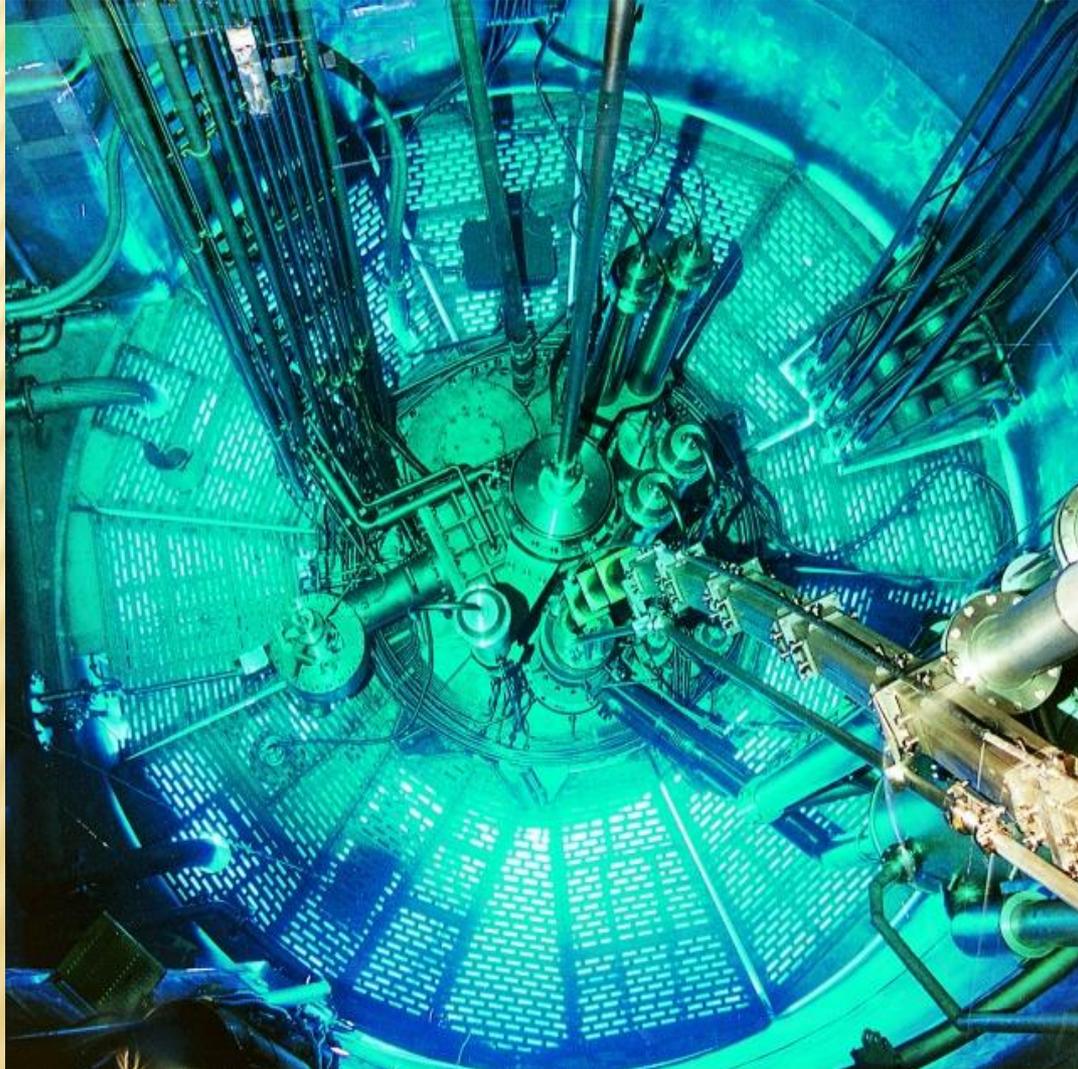
При облучении образцов как правило 90-95% нейтронного потока составляют тепловые нейтроны. Реактор мощностью 1 МВт обеспечивает нейтронный поток $\sim 10^{13}$ (см⁻²с⁻¹). Предел обнаружения большинства элементов при использовании таких потоков составляет 10^{-5} - $10^{-10}\%$.

Эпитепловые нейтроны имеют энергии в диапазоне от 0.5 эВ до ~ 0.5 МэВ. Их доля в реакторе $\sim 2\%$. Кадмиевая пластинка толщиной 1 мм поглощает все тепловые нейтроны, но пропускает эпитепловые и быстрые нейтроны. Как тепловые, так и эпитепловые нейтроны вызывают в мишени реакции (n, γ).

Доля быстрых нейтронов (> 0.5 МэВ) в реакторе составляет $\sim 5\%$. Они вызывают реакции (n,p), (n,n') и (n,2n) и практически не вызывают реакции (n, γ).



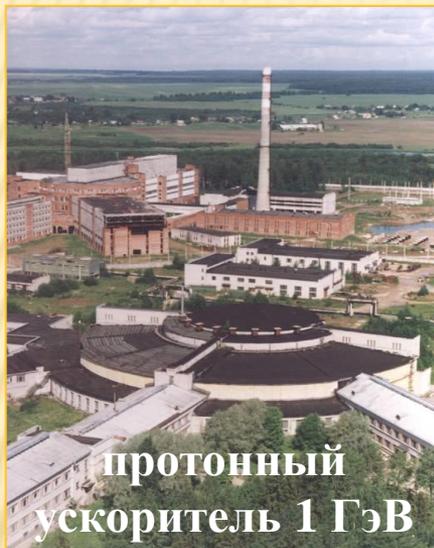
INSIDE THE ILL REACTOR



█ thermal	█ hot	— 1 m —
█ cold	█ IH inclined tube	

Энергии нейтронов, доступные в МЦНИ в Гатчине

Импульсный
нейтронный
источник ГНЕЙС



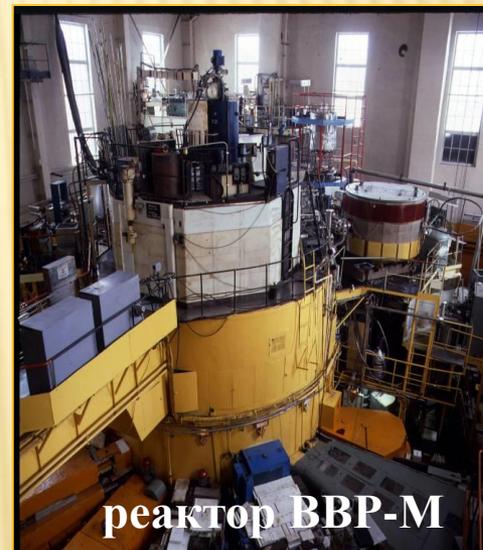
протонный
ускоритель 1 ГэВ

Высокопоточный
реактор ПИК



реактор ПИК

Источник
ультрахолодных
нейтронов ВВР-М



реактор ВВР-М



Впервые в мире в одном месте доступны нейтроны всех энергий

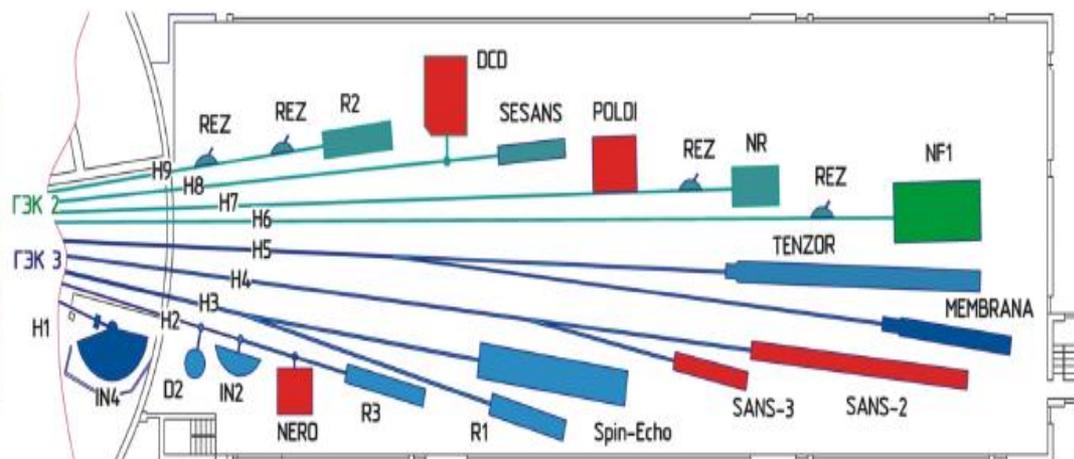
Общий вид НИРК ПИК





National Research Center "Kurchatov Institute" Konstantinov Petersburg Nuclear Physics Institute

Project of Neutron Guide Hall at Reactor PIK



IN2 – трехосный спектрометр поляризованных холодных нейтронов (показан прототип)



NERO – рефлектометр поляризованных нейтронов с анализом поляризации (GKSS)



SESANS – установка спин-эхо ультрамалогоуглового рассеяния



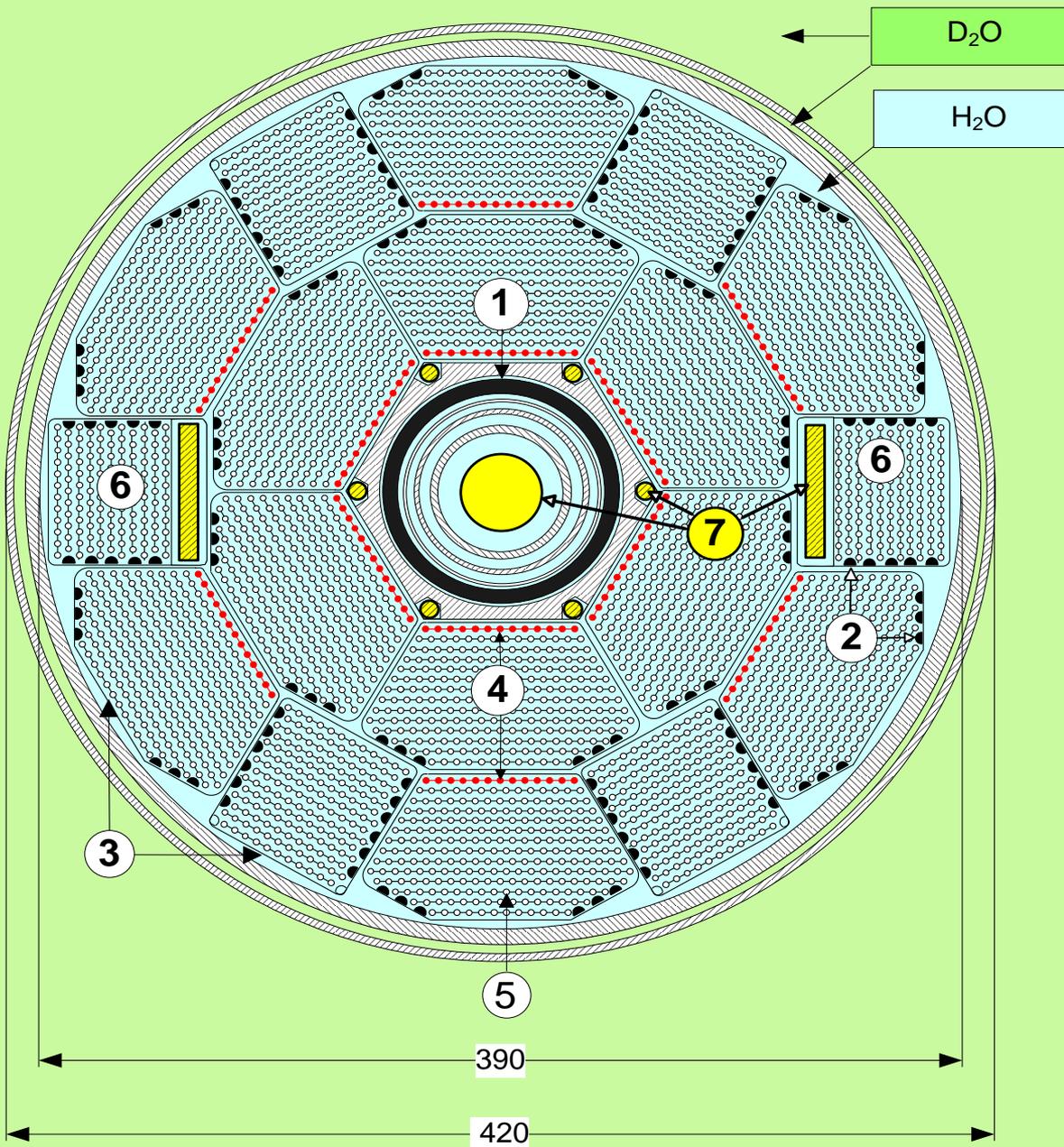
POLDI – дифрактометр (GKSS) с трехмерным анализом поляризации нейтронов



SANS-3 – малоглоулой дифрактометр поляризованных нейтронов (GKSS)



SANS-2 – малоглоулой дифрактометр поляризованных нейтронов (GKSS)



Активная зона

реактора ПИК:

1 – поглощающие
шторки из гафния,

2 – стержни
выгорающего
поглотителя
 $Gd_2O_3+ZrO_2$,

3 – циркониевые
чехлы ТВС,

4 – твэлы с
уменьшенным
содержанием
топлива

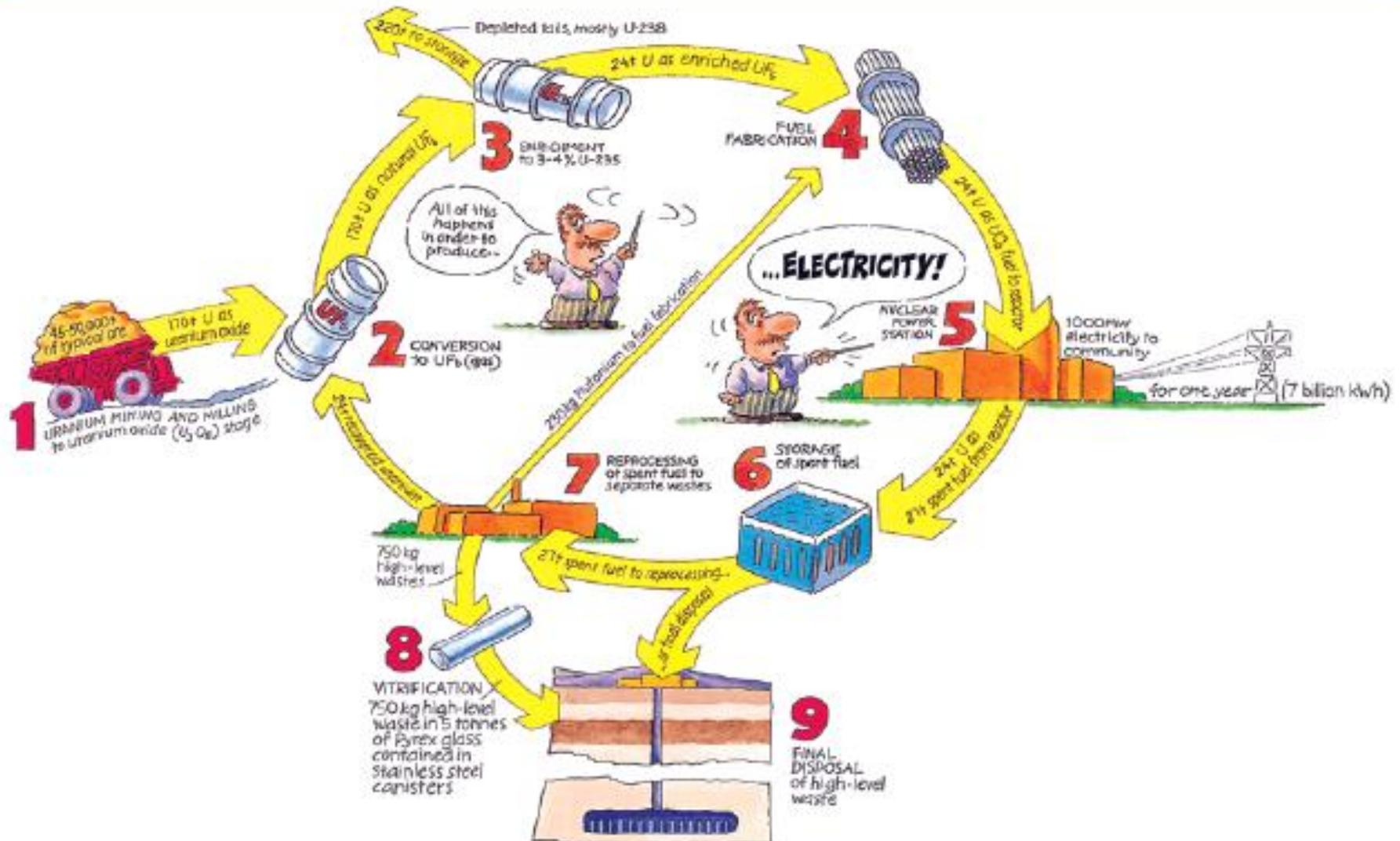
(0,48
номинального),

5 – твэлы с
номинальным
содержанием
топлива,

6 – ТВС с
образцами –
свидетелями
материала корпуса,

7 – облучаемые

Nuclear Fuel Cycle



РЕАКТОР ПИК
