

ЗАСТОСУВАННЯ ЕНЕРГІЇ ДІЛЕННЯ

В. Ю. Денисов

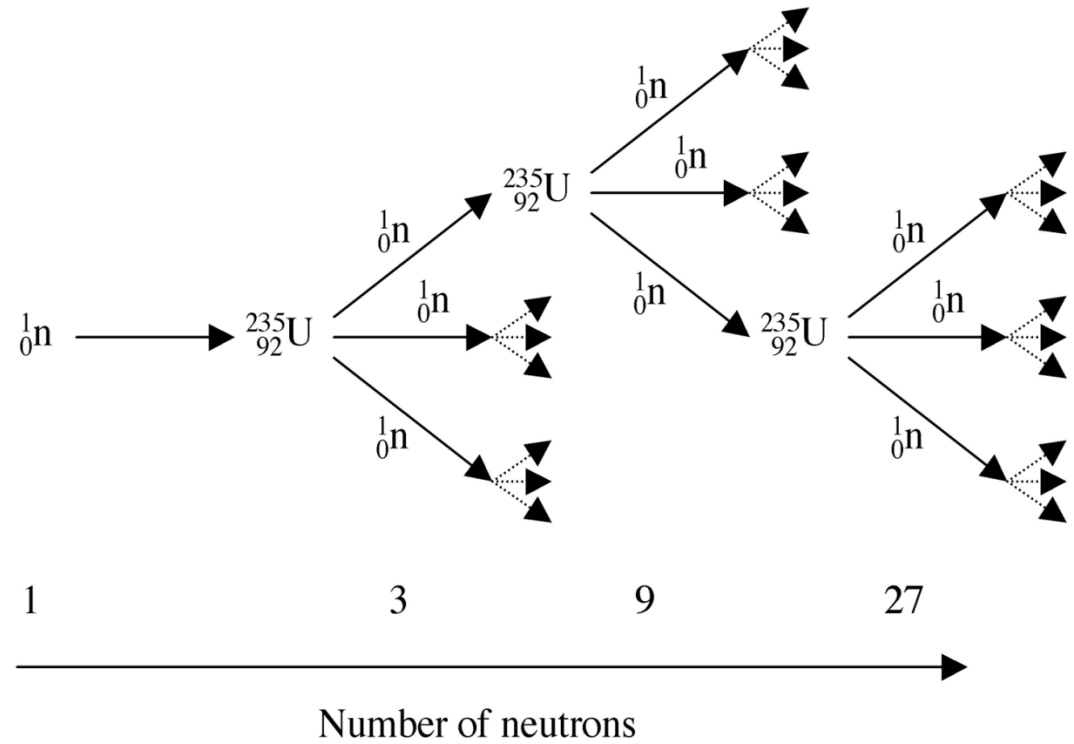
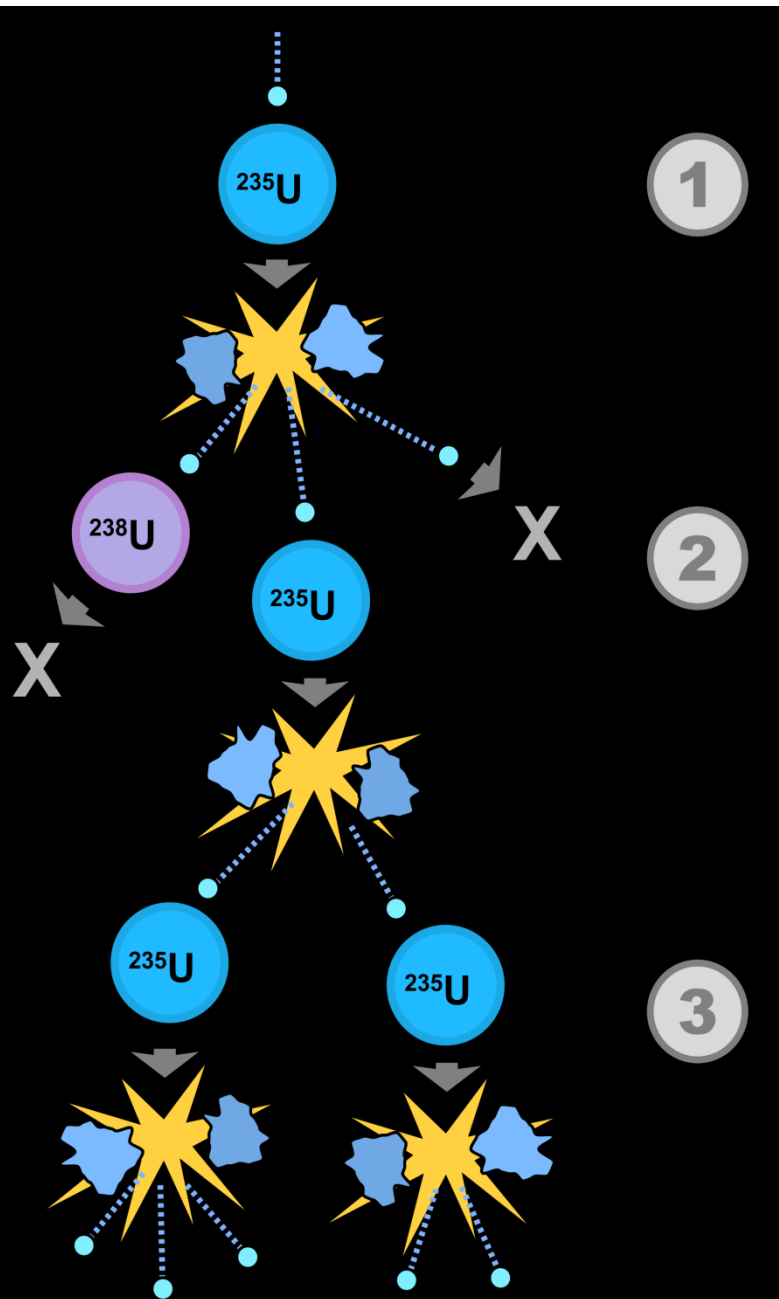
Інститут ядерних досліджень

Національна академія наук України

Київський НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ім. ТАРАСА ШЕВЧЕНКО

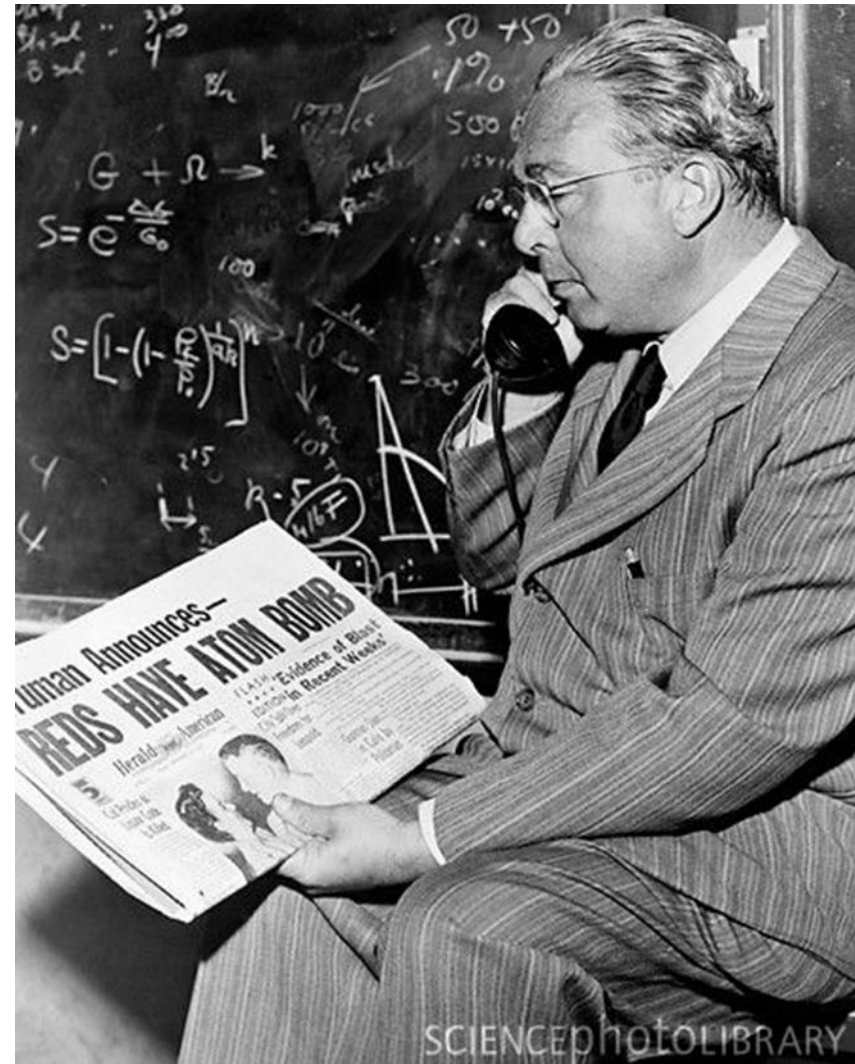
Ланцюгова реакція



Хоча атом був розщеплений і енергія вивільнена, поділ ядер ще не був відкритий. Однак Сілард задумав ідею ядерної ланцюгової реакції (аналогічної хімічній ланцюговій реакції), використовуючи нещодавно відкриті нейтрони.

Ідея не використовувала механізм ядерного поділу, який тоді ще не був відомий, але Сілард зрозумів, що якщо нейтрони можуть ініціювати будь-яку енергетичну ядерну реакцію, таку, що відбулася в літії, і їх можна виробляти та сама реакція, енергія може бути отримана з невеликим входом, оскільки реакція буде самопідтримується.

Протягом 1936 року він отримав британському Адміралтейству патент на ланцюгову реакцію для забезпечення його секретності (GB 630726).



Leo Szillard

February 11, 1898 – May 30, 1964

Напевно, неможливо сказати, хто саме винайшов атомну бомбу. Після відкриття реакції поділу ядра урану з подальшим випромінюванням декількох вторинних нейтронів, фізикам у багатьох лабораторіях світу стало ясно, що в урані можлива ланцюгова реакція з виділенням величезної кількості енергії. Але факт залишається фактом - в СРСР в 1940 році харківські вчені, співробітники УФТІ, офіційно подали заявки на винахід цієї бомби і отримали авторські свідоцтва. Отже, формально вони і є винахідниками.

Дуже довго їх імена були захищені в спецховищах, але зараз вони стали відомі. Це керівник лабораторії ударних напруг Українського фізико-технічного інституту 37-річний Фрідріх Ланге і наукові співробітники цього ж інституту 28-річний Володимир Шпінель і 26-річний Віктор Маслов.

Влітку 1940 року Маслов в своїй статті стверджував, що використання внутрішньоядерної енергії «... в значній мірі стає технічною проблемою». Вірніше, з його точки зору, проблем було кілька, а головні з них дві: як напрацювати необхідну кількість ізотопу урану-235, з якого можна зробити бомбу, і як зібрати критичну масу цього ізотопу. Був ще фінансове питання - як отримати гроші на дорогі дослідження? (До речі сказати, про плутонієву бомбу першим в світі заговорив теж співробітник УФТІ Фріц Хоутерманс, правда, вже після депортації зі Спінки, а перший проект зі створення водневої бомби був запропонований в 1950 році сержантом Радянської Армії Олегом Лаврентьевим, який і по цю пору працює в ХФТІ.)

Більше читайте тут: «Лабораторія №1. Ядерна фізика в Україні» - так називається книга доктора фізико-математичних наук, професора Юрія Ранюка,
http://gazeta.zn.ua/SCIENCE/fizika_s_grifom_rovershenno_sekretno.html

Изотоп	0,025 эВ				1 МэВ			
	σ_f барн	σ_c барн	ν	η	σ_f барн	σ_c барн	ν	η
^{239}Pu	740	290	2,9	2,1	2	0,1	3	3
^{233}U	530	60	2,5	2,3	2	0,1	2,5	2,5
^{235}U	580	110	2,5	2,1	1,3	0,1	2,5	2,5
^{238}U	0	2,7	0	0	0,5	0,15	-	-
Природный уран	3,9	3,5	2,5	1,3	0,01	0,15	2,5	0,2

Чи не Кожне Захоплення нейтрона ядром виробляти до поділу ядра. Деяк часть нейтронів ядра захоплюють по Реакції (n, γ) без будь-якого поділу. Перетин такого процесу σ_c . Тому число нейтронів η , що йдуть на розподіл, менше ν і визначається відношенням поперечного перерізу процесу поділу σ_f до загального поперечним перерізом $\sigma_f + \sigma_c$

Изотоп	Уран-235		Уран-233		Плутоний-239	
	1 МэВ	0,025 эВ	1 МэВ	0,025 эВ	1 МэВ	0,025 эВ
Энергия нейтрона	1 МэВ	0,025 эВ	1 МэВ	0,025 эВ	1 МэВ	0,025 эВ
Полное сечение	6,6 \pm 0,1	695 \pm 10	6,2 \pm 0,3	600 \pm 10	7,3 \pm 0,2	1005 \pm 5
Сечение деления	1,25 \pm 0,05	581 \pm 6	1,85 \pm 0,10	526 \pm 4	1,8 \pm 0,1	751 \pm 10
Доля ядер, не участвующих в делении	0,077 \pm 0,002	0,174 \pm 0,01	0,057 \pm 0,003	0,098 \pm 0,004	0,08 \pm 0,1	0,37 \pm 0,03
Число нейтронов, испускаемых в одном акте деления	2,6 \pm 0,1	2,43 \pm 0,03	2,65 \pm 0,1	2,50 \pm 0,03	3,03 \pm 0,1	2,84 \pm 0,06
Число нейтронов на один поглощенный нейтрон	2,41 \pm 0,1	2,07 \pm 0,02	2,51 \pm 0,1	2,28 \pm 0,02	2,8	2,07 \pm 0,04
Доля запаздывающих нейтронов, %	(0,64 \pm 0,03)	(0,65 \pm 0,02)	(0,26 \pm 0,02)	0,26 \pm 0,01	0,21 \pm 0,0 1	0,22 \pm 0,01
Энергия деления, МэВ	200		197		207	

Все сечения приведены в барнах (10^{-28}м^2).

Для визначення критичної маси можна використовувати рівняння дифузії нейтронів:

$$\frac{dy}{dt} = D \Delta y + \beta y,$$

де y - концентрація нейтронів, $\beta > 0$ - константа швидкості реакції розмноження нейтронів, D - коефіцієнт дифузії нейтронів.

Зробивши заміну $y = z \exp(\beta t)$, отримаємо для кулі

$$\frac{dz}{dt} = D \Delta z = D \frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} r^2 \frac{d}{dr} z.$$

Рішення цього рівняння для кулі радіуса R має вигляд

$$z(r,t) = \frac{1}{r} \sum_{k=1}^{\infty} A_k \sin\left[\left(\frac{\pi k}{R}\right) r\right] \exp(-(\pi k/R)^2 D t),$$

$$y(r,t) = \frac{1}{r} \sum_{k=1}^{\infty} A_k \sin\left[\left(\frac{\pi k}{R}\right) r\right] \exp(\beta t - (\pi k/R)^2 D t).$$

Ланцюгова реакція піде при $\beta - (\pi k/R)^2 D > 0$. Звідси $R = (\pi k D / \beta)^{1/2}$ і критична маса дорівнює

$$M = \rho \frac{4\pi R^3}{3}.$$

Критична маса без відбивача

$^{233}\text{U} = 15$ кг

$^{235}\text{U} = 45$ кг

$^{239}\text{Pu} = 8$ кг

$^{251}\text{Cf} = 1.94$ кг

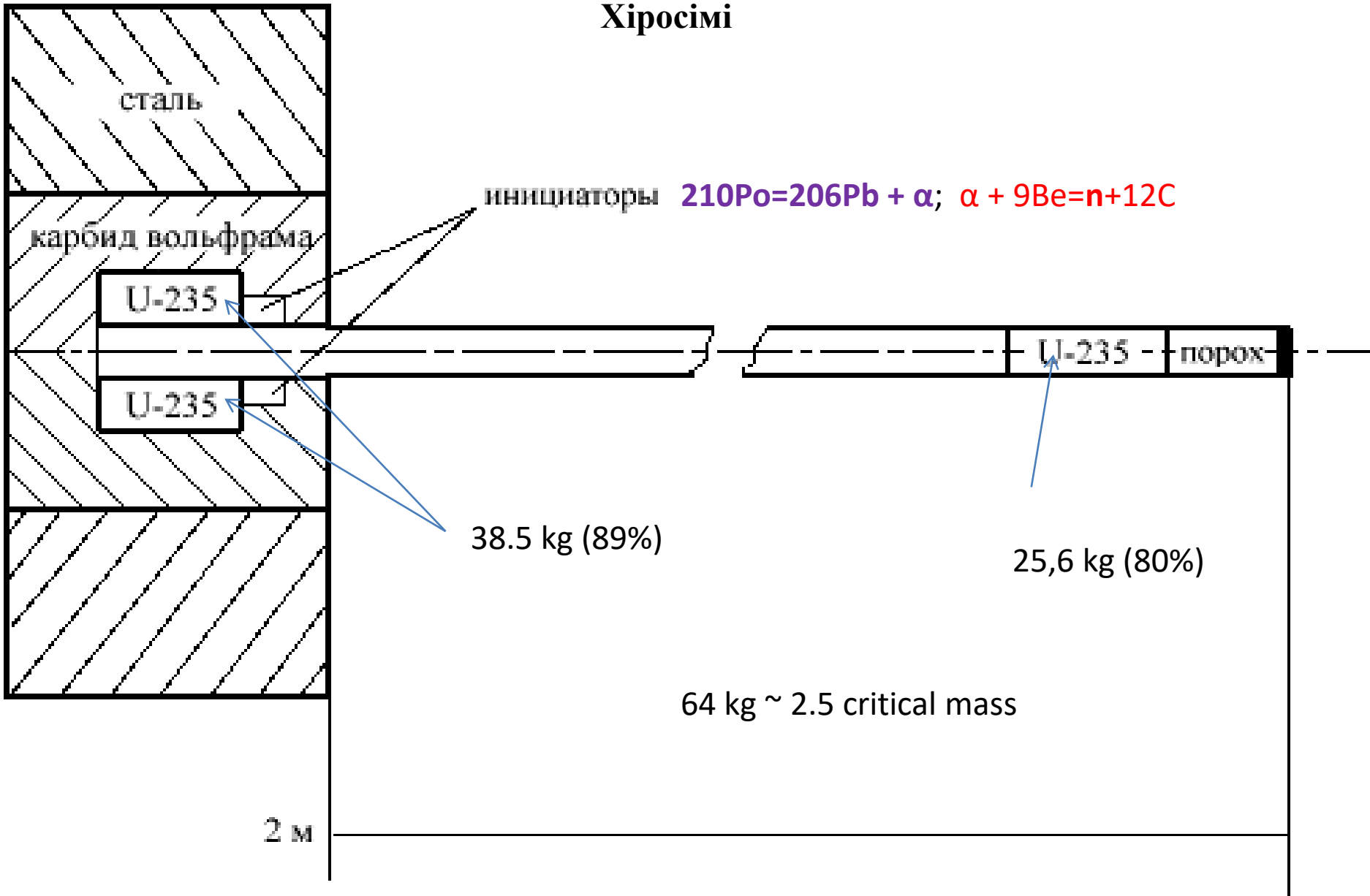
Критична маса з берилієвим або водним відбивачами

$^{235}\text{U} = 8,9$ кг или $21,8$ кг

Critical Mass for Fissionable Isotopes

Fissionable Isotope	Critical Mass (kg)	Half Life (years)	Neutron Generation (# / sec-kg)	Power Generation (Watts / kg)
Protactinium-231	162	3.28×10^4	nil	1.3
Thorium-232	Infinite	1.41×10^{10}	nil	nil
Uranium-233	~ 8	1.59×10^5	1.23	0.281
Uranium-235	47.9	7.0×10^8	0.364	6×10^{-5}
Uranium-238	Infinite	4.5×10^9	0.11	8×10^{-6}
Neptunium-237	59	2.14×10^6	0.139	0.021
Plutonium-238	10	88	2.67×10^6	560
Plutonium-239	10.2	2.41×10^4	21.8	2.0
Plutonium-240	36.8	6.54×10^3	1.03×10^6	7.0
Plutonium-241	12.9	14.7	49.3	6.4
Plutonium-242	89	3.76×10^5	1.73×10^6	0.12
Americium-241	57	433	1540	115
Americium-242	9 - 18	-	-	-
Americium-243	155	7.38×10^3	900	6.4
Curium-244	28	18.1	1.1×10^{10}	2.8×10^3
Curium-245	13	8.5×10^3	1.47×10^5	5.7
Curium-246	84	4.7×10^3	9×10^9	10
Curium-247	7	1.55×10^7	-	-
Berkelium-247	10	1.4×10^3	nil	36
Californium-251	9	898	nil	56

Схема атомної бомби, що використовується в Хіросімі

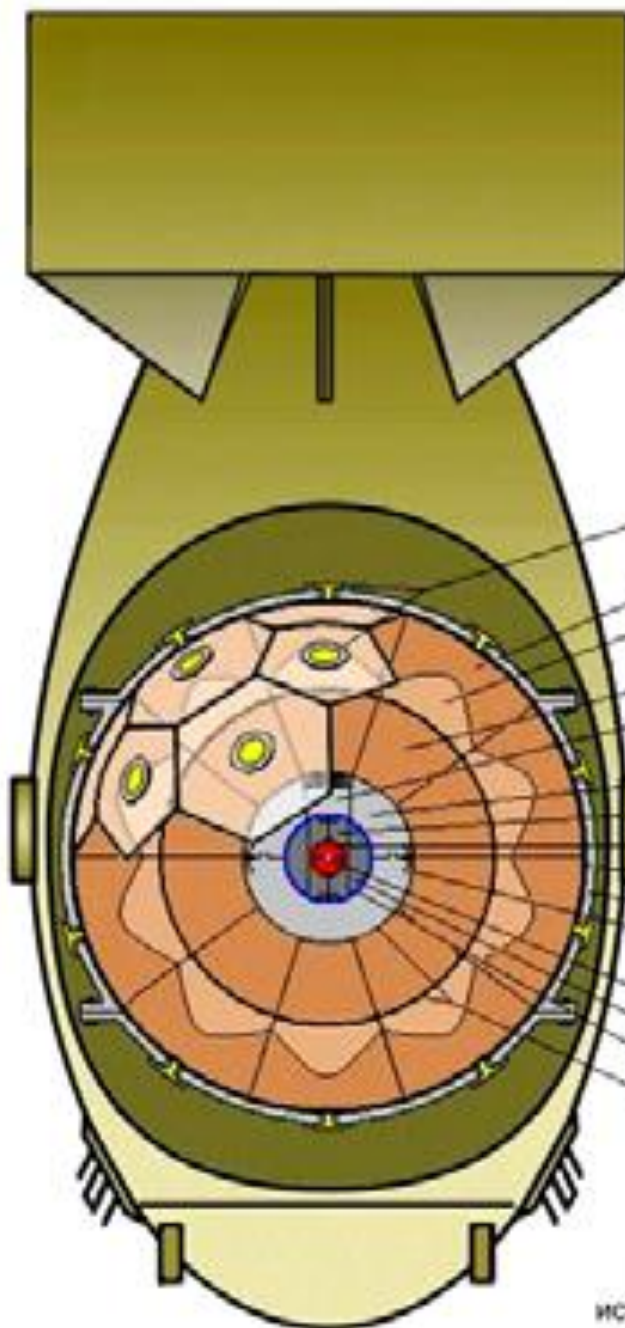


общая схема Little Boy

Схема атомної бомби, що використовується в Нагасакі

Імплозивного схема
заряду бомби

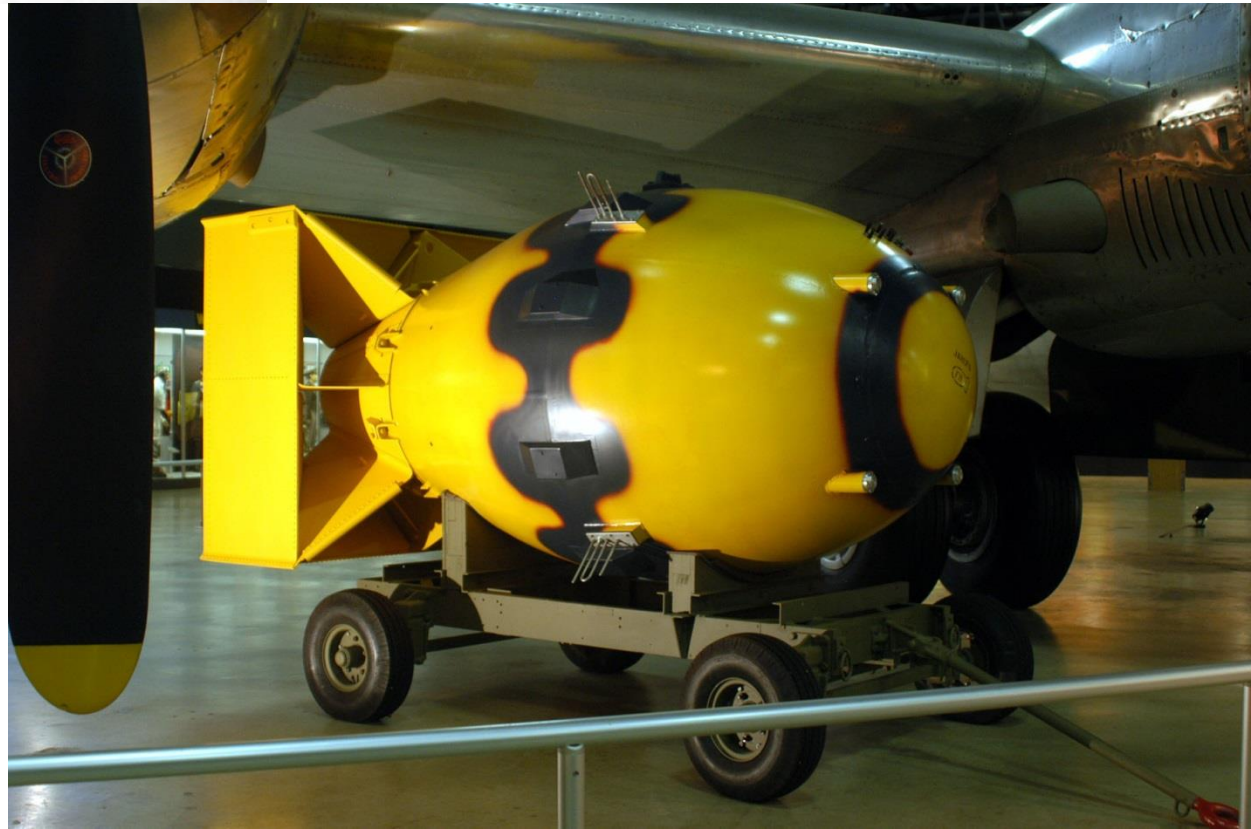
Під час вибуху
хімічної вибухівки
9,6 см плутонієвий
куля стискувався в
2.5 рази
спрацьовував
берилієвий ініціатор
(джерело
нейтронів).
Це призводило до
запалювання
некерованої
ланцюгової ядерної
реакції.

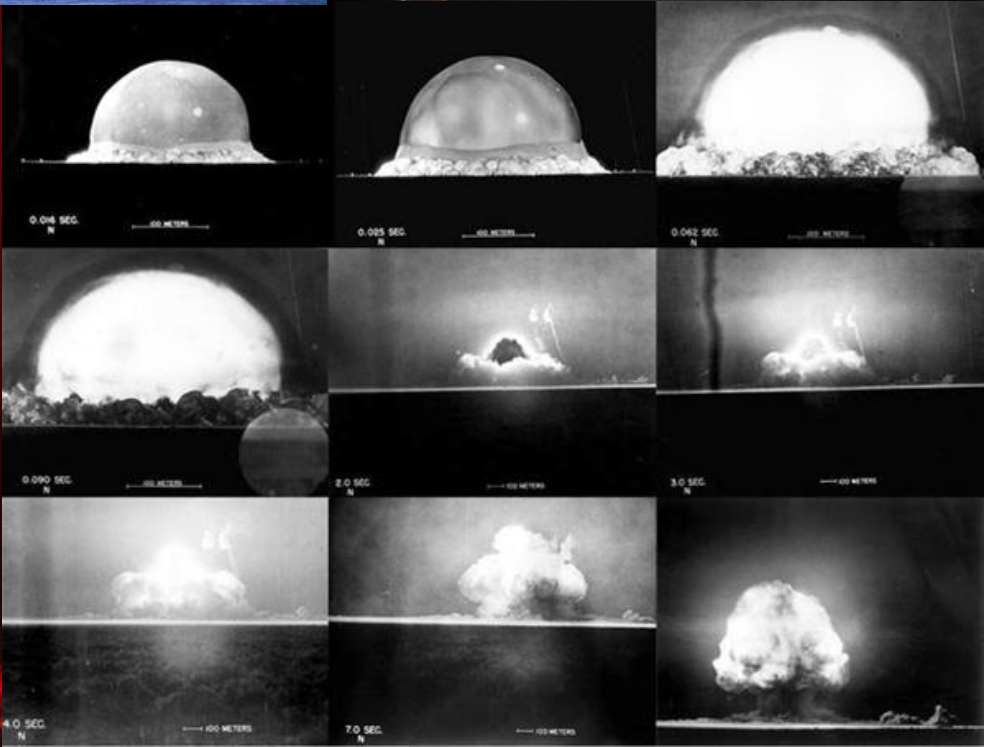


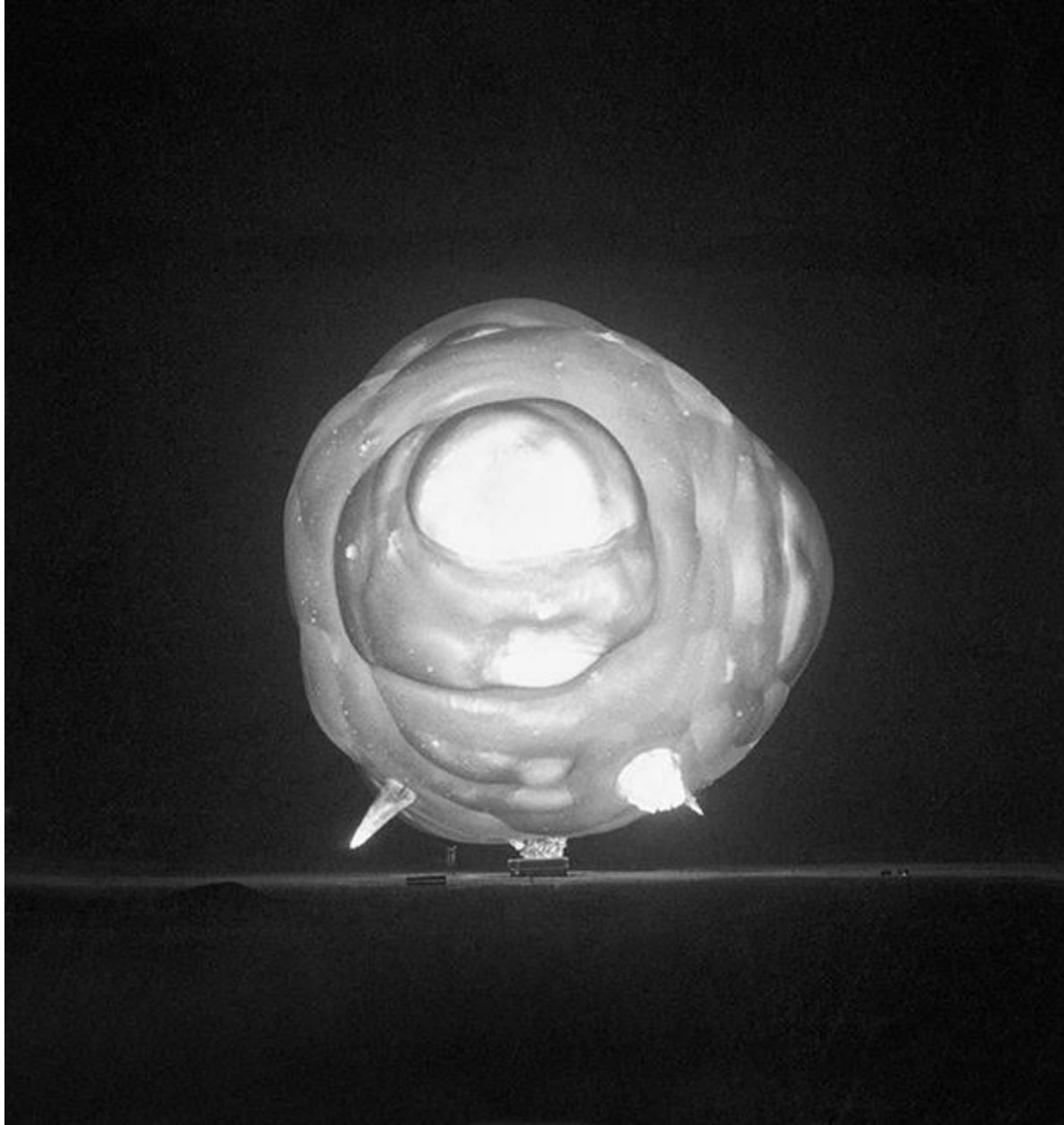
Разрез детонирующей сферы изделия Y-1561 («Толстяк»), показывающий расположение деталей. Номера в скобках - количество одинаковых деталей. Чертеж дан в масштабе.

- A) Детонаторы 1773EBW в латунных гнездах (32 шт.)
- B) Внеш. линза из компаунда В (32 шт.)
- C) Коническая часть внешней линзы из баратола (32 шт.)
- D) Внутр. линза из компаунда В (32 шт.)
- E) Резьбовой люк в верхней полусфере алюминиевого толкателя
- F) Полусферы алюмин. толкателя (2 шт.)
- G) Двойная вставка из U-238
- H) Полусферы из Pu-239 (2 шт.)
- I) Уплотнительная футеровка
- J) Дюралюминиевая сфера из 7 деталей
- K) Алюминиевые стаканы для соединения полусфер толкателя (4 шт.)
- L) Полоний-бериллиевый инициатор
- M) Сферический тампер из U-238
- N) Корпус из пластика с содержанием бора
- O) Мягкая герметизирующая прокладка между внешними и внутренними сферами

Источник: Д. Костер-Муллен.
«Атомные бомбы. Совершенно секретная
история о «Малыше» и «Толстяке», 2003 г. С. 140







A snapshot of a ground-based nuclear explosion (14 kilotons) at a range in Nevada, made one millisecond after detonation with an exposure of three microseconds. The surface temperature of the fireball at this point was more than 20,000 degrees, and the expansion speed was tens of kilometers per second.

V.I.P-зрители, освещенные вспышкой взрыва при детонации заряда мощностью 81 килотонн на атолле Эниветок.



Сельские школьники тренируются в применении защитных мер «пригнись и накройся» на фоне реального взрыва атомной бомбы. Фотография сделана в городе Индиан Спрингс (штат Невада), расположенном в 40 километрах от эпицентра взрыва авиабомбы мощностью 31 килотонна.

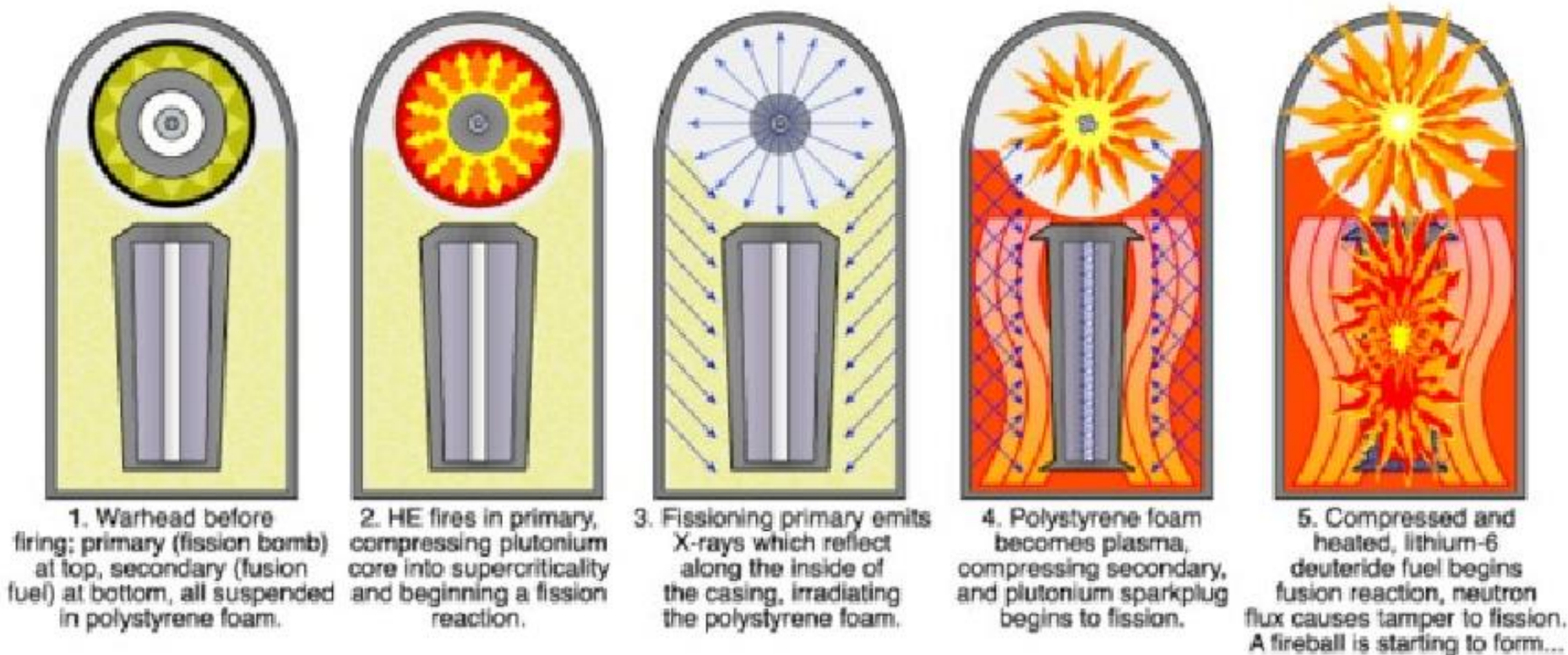


Атомная культура Лас-Вегаса. Фотографы снимают атомный взрыв со скалы News Nob. Атомный полигон, штат Невада, 24 июня 1957 года.

Воднева бомба

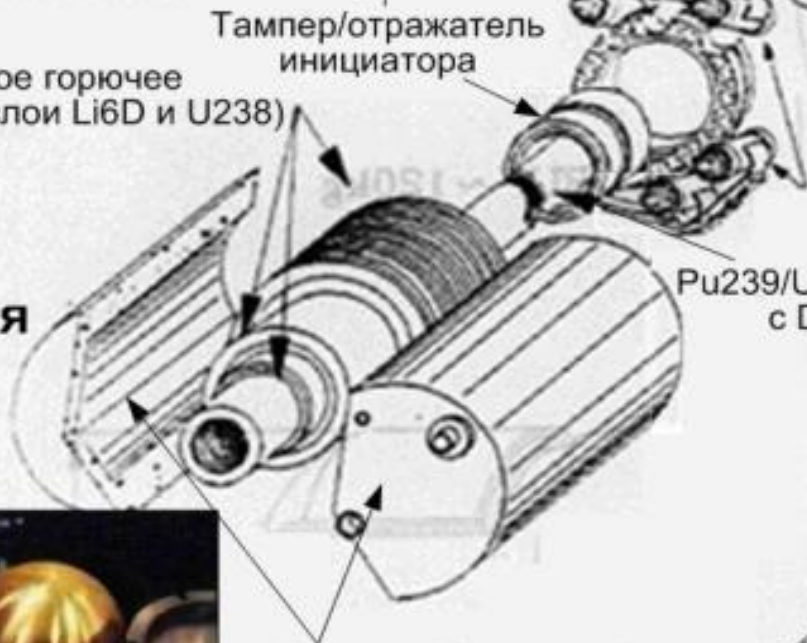


Дизайн водневої бомби запропонований Теллером та Уламом



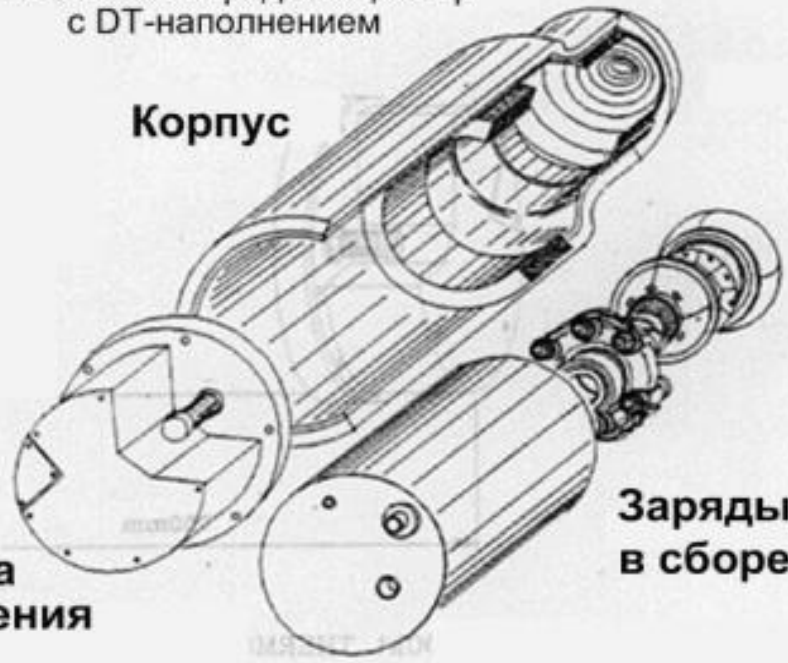


Ядерная ступень



Термоядерная ступень

Корпус



Система поджига и
нейтронного
инициирования

Первая ступень с
плутониевым
зарядом

Вторая,
термоядерная
ступень

Термоядерная бомба
Mk15 mod3,
США, 1955 год,
вес 3,5 т,
мощность 3,8 Мт,
размеры $\varnothing 0,9 \times 3,5$ м

Баллоны с
дейтерием и
тритием

Левитирующее
плутониевое ядро

Линзы из
взрывчатки

Детонаторы

Рентгеновский
защитный экран

Пластиковая пена

Корпус из урана

Заряд дейтерида
лития

Урановый или
плутониевый запал

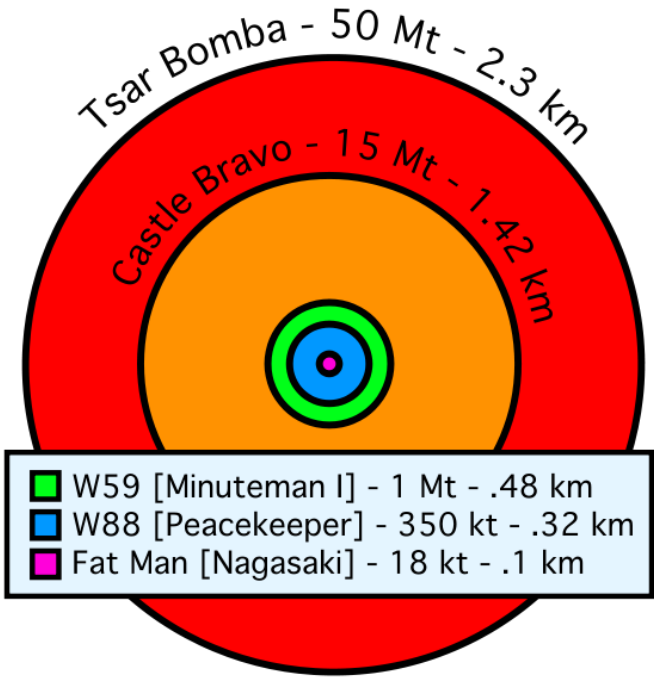




Цар бомба:

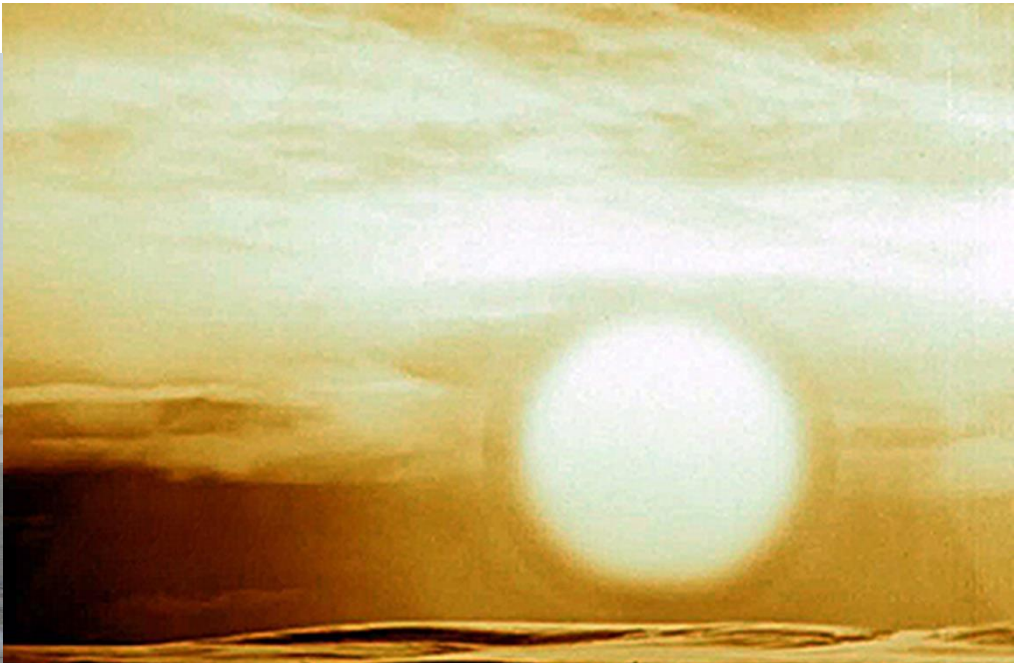
3-х ступінчаста бомба

- Вибух атомної бомби (реакція поділу)
- Вибух водневої бомби (реакція злиття)
- Вибух оболонки з 238U (реакція поділу під дією швидких нейтронів)



50Mt Explosion

Fireball size

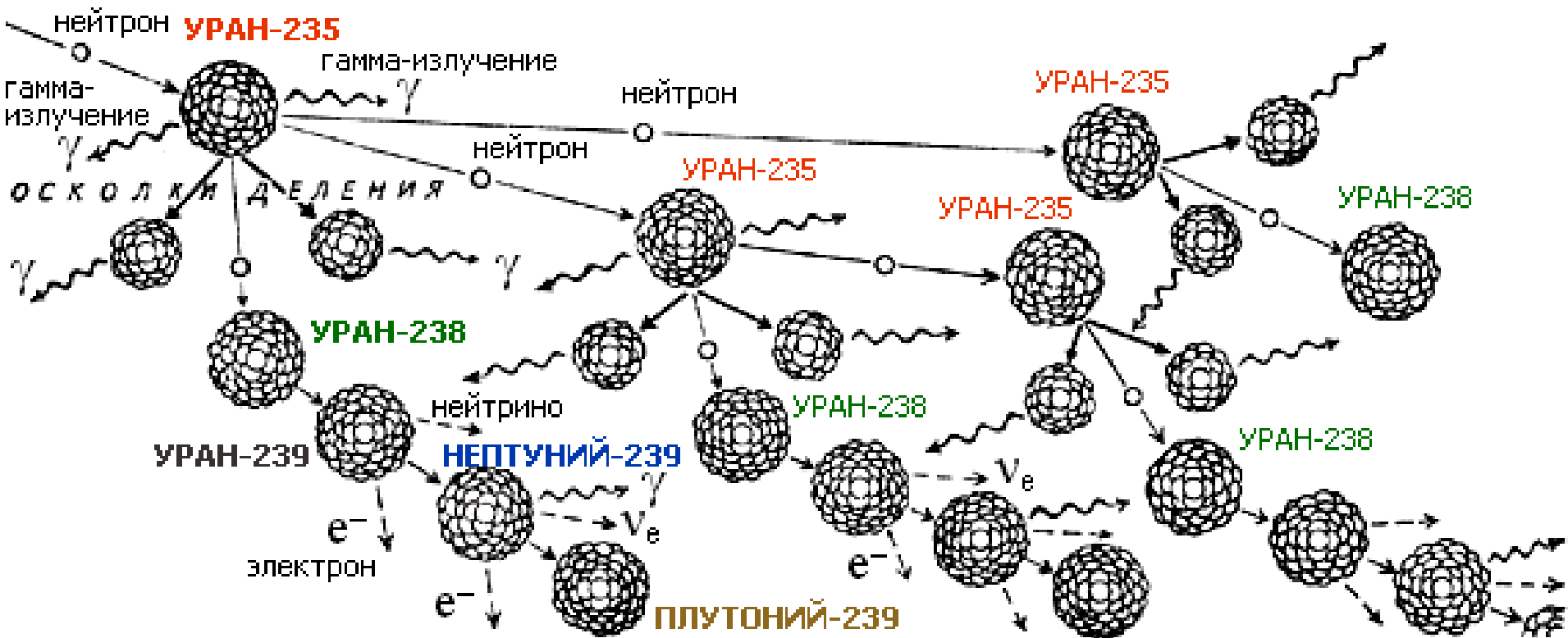


Вибух АН602 Цар бомби за класифікацією був низьким повітряним вибухом надвеликої потужності.

Результати його вражали:

- Вогненна куля вибуху досяг радіуса приблизно 4,6 кілометра. Теоретично він міг би вирости до поверхні землі, однак цьому перешкодила відображена ударна хвиля, що підім'яла і відкинула куля від землі.
- Випромінювання потенційно могло викликати опіки третього ступеня на відстані до 100 кілометрів.
- Іонізація атмосфери стала причиною перешкод радіозв'язку навіть в сотнях кілометрів від полігону протягом близько 40 хвилин.
- Ударна хвиля, що виникла в результаті вибуху, три рази обігнула земну кулю.
- Свідки відчули удар і змогли описати вибух на відстані тисячі кілометрів від його центру.
- Ядерний гриб вибуху піднявся на висоту 67 кілометрів; діаметр його двох'ярусної «капелюшки» досяг (у верхнього ярусу) 95 кілометрів.
- Звукова хвиля, породжена вибухом, докотилася до острова Діксон на відстані близько 800 кілометрів.

Production of ^{239}Pu in nuclear reactor



Oklo - natural nuclear fission reactor



The uranium isotopes found at Oklo strongly resemble those in the spent nuclear fuel generated by today's nuclear power plants.

Природний реактор ядерного поділу – це родовище урану, де аналіз співвідношень ізотопів показав, що відбулися самопідтримувані ядерні ланцюгові реакції.

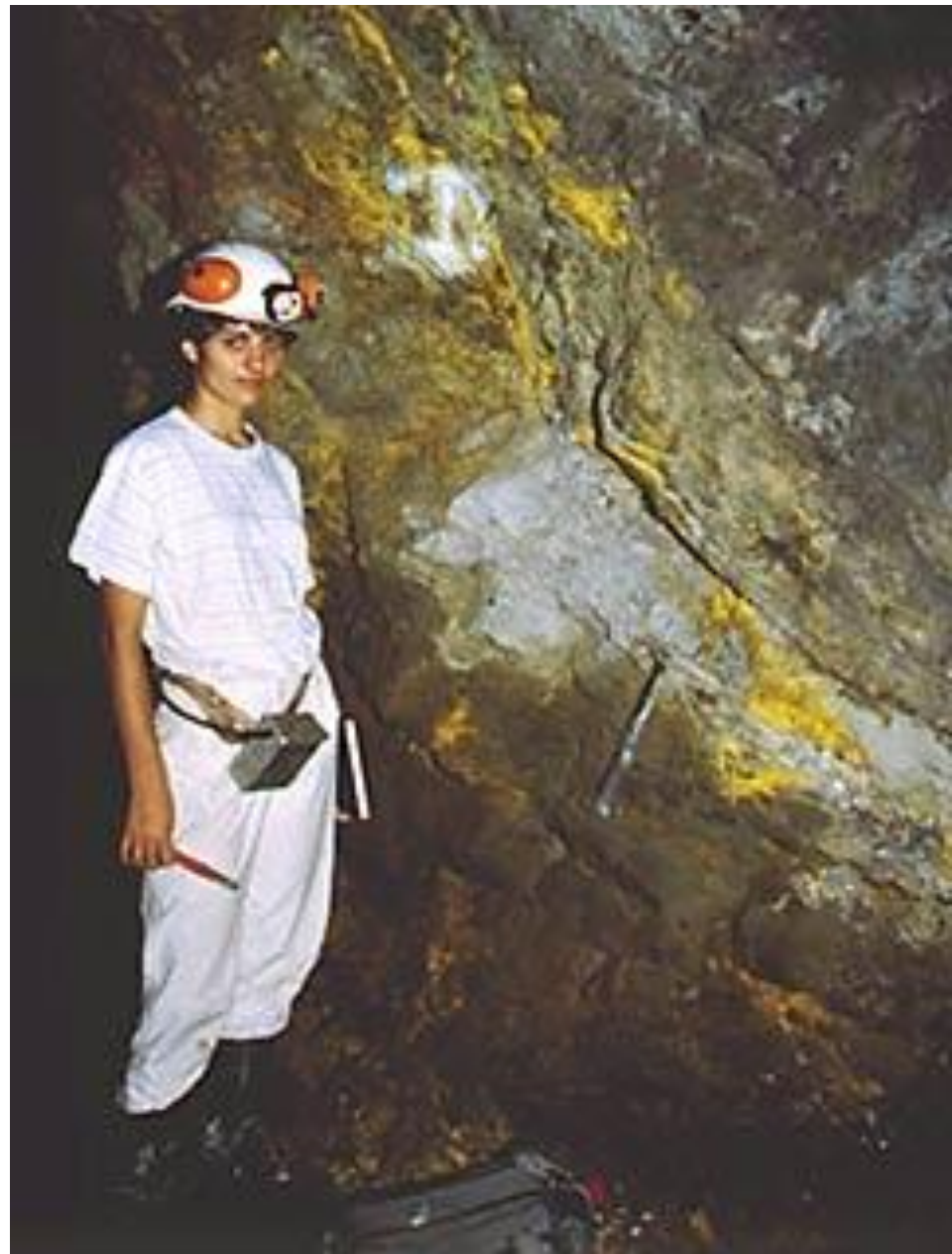
Існування цього явища було виявлено в 1972 році в Окло в Габоні, Африка, французьким фізиком Френсісом Перріном.

Умови існування природного ядерного реактора були передбачені в 1956 році Полом Кадзуо Курода.

Габон був французькою колонією. Французи виявили уран у віддаленому регіоні в 1956 р. Франція негайно відкрила шахти.



ОКЛО шахта



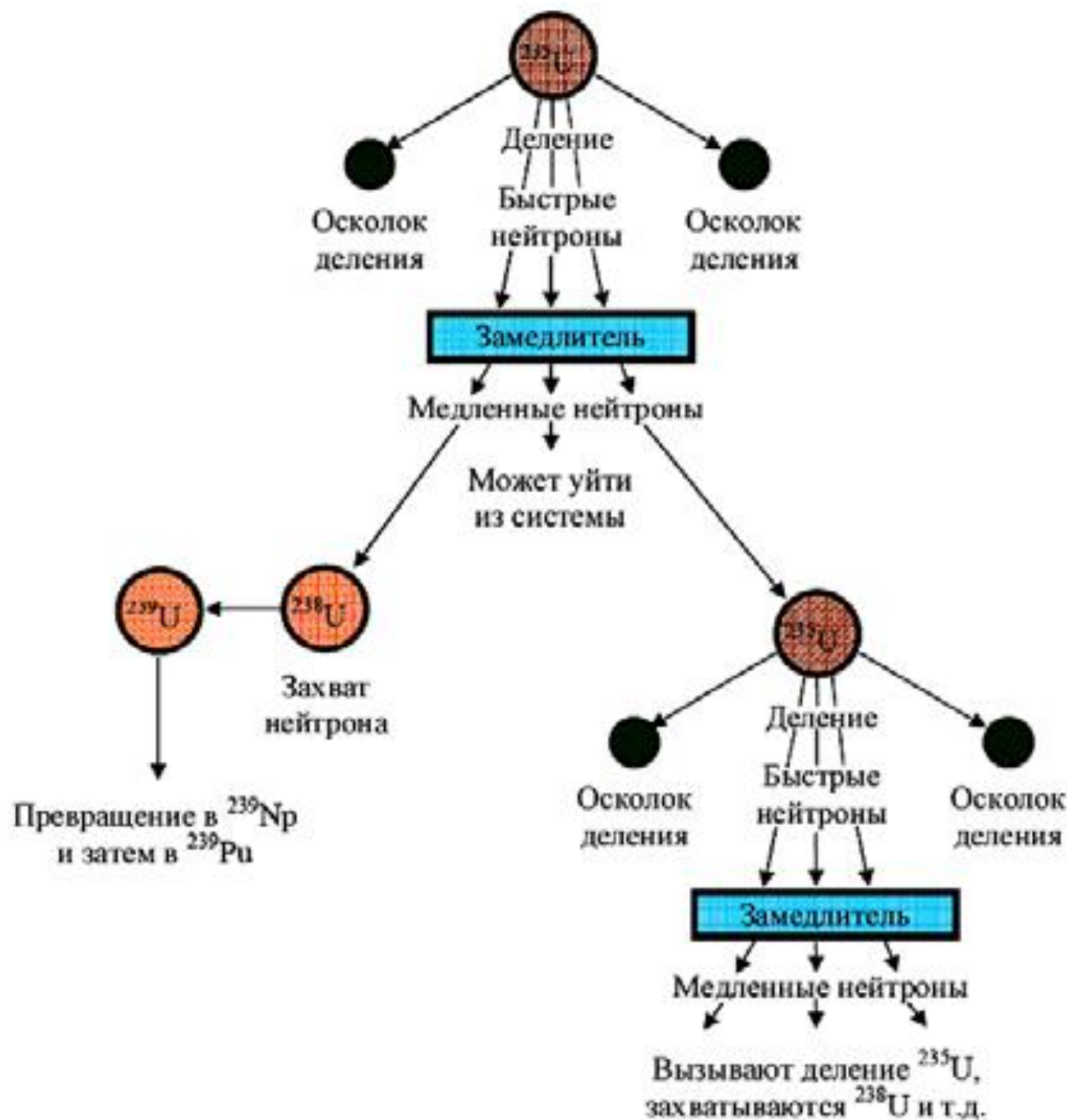
ОКЛО: Залишки оксиду урану видно у вигляді жовтуватої породи.

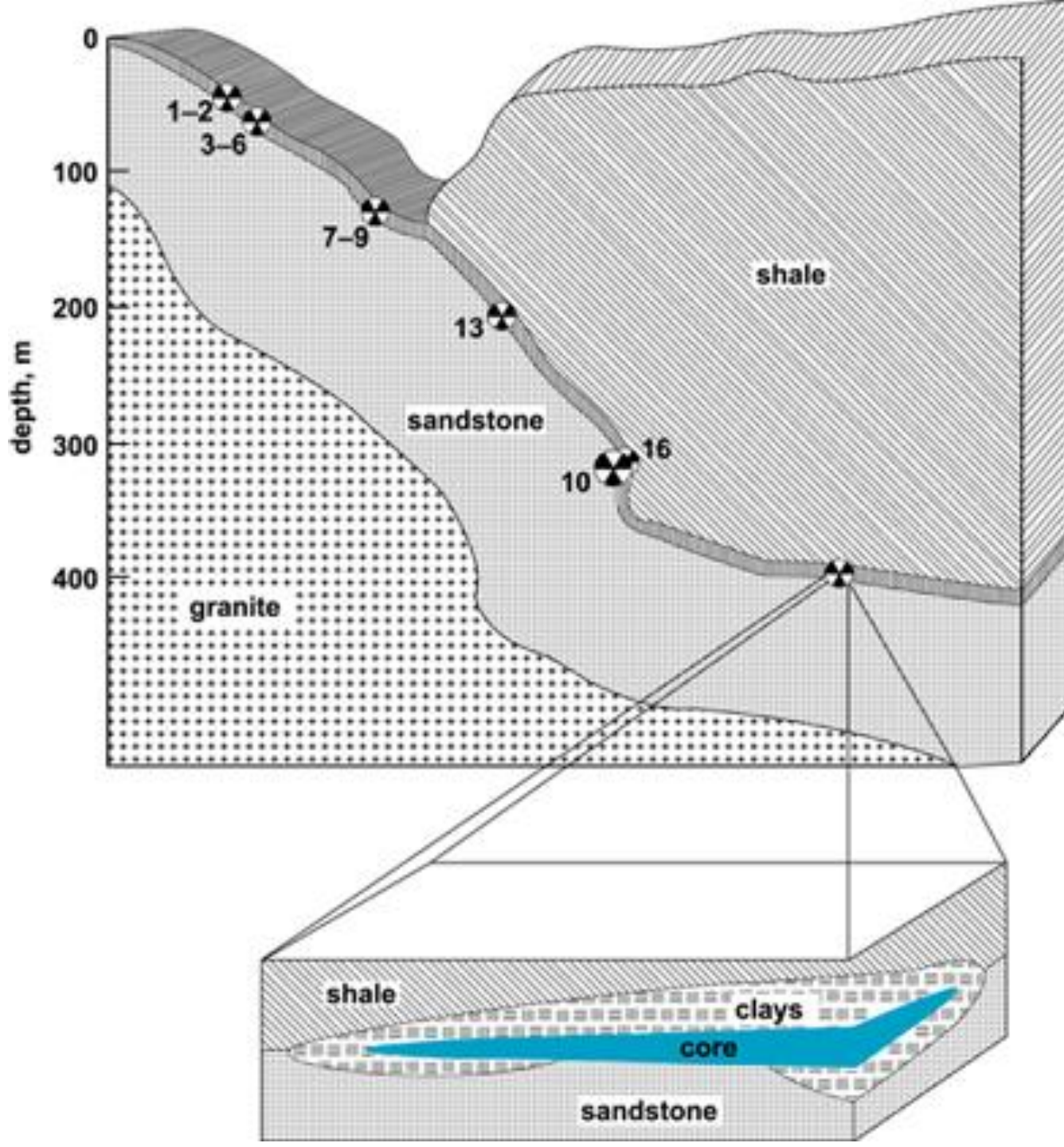
У травні 1972 року на збагачувальному урановому заводі в П'єрелатті у Франції проведено звичайну мас-спектрометрію, що порівнює зразки UF_6 з шахти Окло, розташованої в Габоні, Центральна Африка. Вона показала лише 0,717% у кількості ізотопу ^{235}U .

Зараз природний уран складається з трьох основних ізотопів, ^{238}U (концентрація = 99,2745%, $T_{1/2} = 4,47 * 10^9$ рік, α -розпад), ^{235}U (концентрація = 0,7200%, $T_{1/2} = 7,04 * 10^8$ рік, α -розпад) і ^{234}U (концентрація = 0,0055%, $T_{1/2} = 2,48 * 10^5$ рік, α -розпад). [Коли Земля народилася приблизно $4,5 * 10^9$ років тому, ^{238}U (концентрація = 70%), ^{235}U (концентрація = 30%).]

Недолік ^{235}U становив 200 кг !!! Ця розбіжність вимагала пояснень, оскільки всі об'єкти переробки урану повинні ретельно враховувати всі розщеплюються ізотопи, щоб гарантувати, що жоден з них не перенаправляється з метою озброєння.

Таким чином французький комісаріат à l'énergie atomique (CEA) розпочав розслідування.





It was found 17 zones, where the chain reaction takes place.

Родовище урану в Окло утворилося $2,1 \cdot 10^9$ років з концентрацією урану 0,5%.

$4,5 \cdot 10^9$ років тому, ^{238}U (достаток = 70%), ^{235}U (достаток = 30%)

$2,1 \cdot 10^9$ років тому, ^{238}U (достаток = 97%), ^{235}U (достаток = 3%)

Зараз ^{238}U (достаток = 99,23%), ^{235}U (достаток = 0,72%)

На родовищі Окло є частини надзвичайно досяжної концентрації уранової руди до 20-60%.

Розміри цих деталей складають 10-20 м довжини і 1 м товщини.

Коли вода потрапляє в ці частини, тоді ланцюгова реакція йде.

Коли вода випаровується, тоді ланцюгова реакція припиняється.

Отже, і розмір, і збагачення ^{235}U деталей з надзвичайно досяжною концентрацією уранової руди наближаються до таких, як для типових реакторних зон теплових нейтронів.

Завдяки ланцюговій реакції, яка відбувається приблизно $2 \cdot 10^9$ років тому, кількість ^{235}U стала меншою, ніж звичайна.

Підтвердження ланцюгової реакції пов'язане з високим впливом продуктів поділу Хе, Nd. Рівень ізотопів ОКЛО Хе, Nd сильно відхиляється від природних.

Abundances of Nd isotopes

Atomic mass of Nd	142	143, 144	145, 146	148	150
The nature, %	27.11	36.02	25.52	5.73	5.62
Fission 95% ^{235}U + 5% ^{238}U	0	54.78	33.65	8.28	3.29
OKLO	0	54.95	33.46	8.25	3.34

Ядерний реактор - це пристрій, в якому здійснюється керована ланцюгова ядерна реакція.

1942 - перший реактор в світі, Е. Фермі, Чикаго.

1945 - перший реактор за межами США, Канада

1946 - перший реактор в СРСР, І.В. Курчатов, Москва.

1954 - перша АЕС в світі, Обнінськ

1960 - перший реактор в УРСР, ВВР-М (10 МВт) ІЯД НАН України

1977 - 1996 - Чорнобильська АЕС (4 блоки) РВПК-1000

1980 - Рівненська АЕС (2 блоки) ВВЕР-440, (2 блоки) ВВЕР-1000

1982 - Південно-Українська АЕС (3 блоків) ВВЕР-1000

1984 - Запорізька АЕС (6 блоків) ВВЕР-1000

1987 - Хмельницька АЕС (2 блоки) ВВЕР-1000

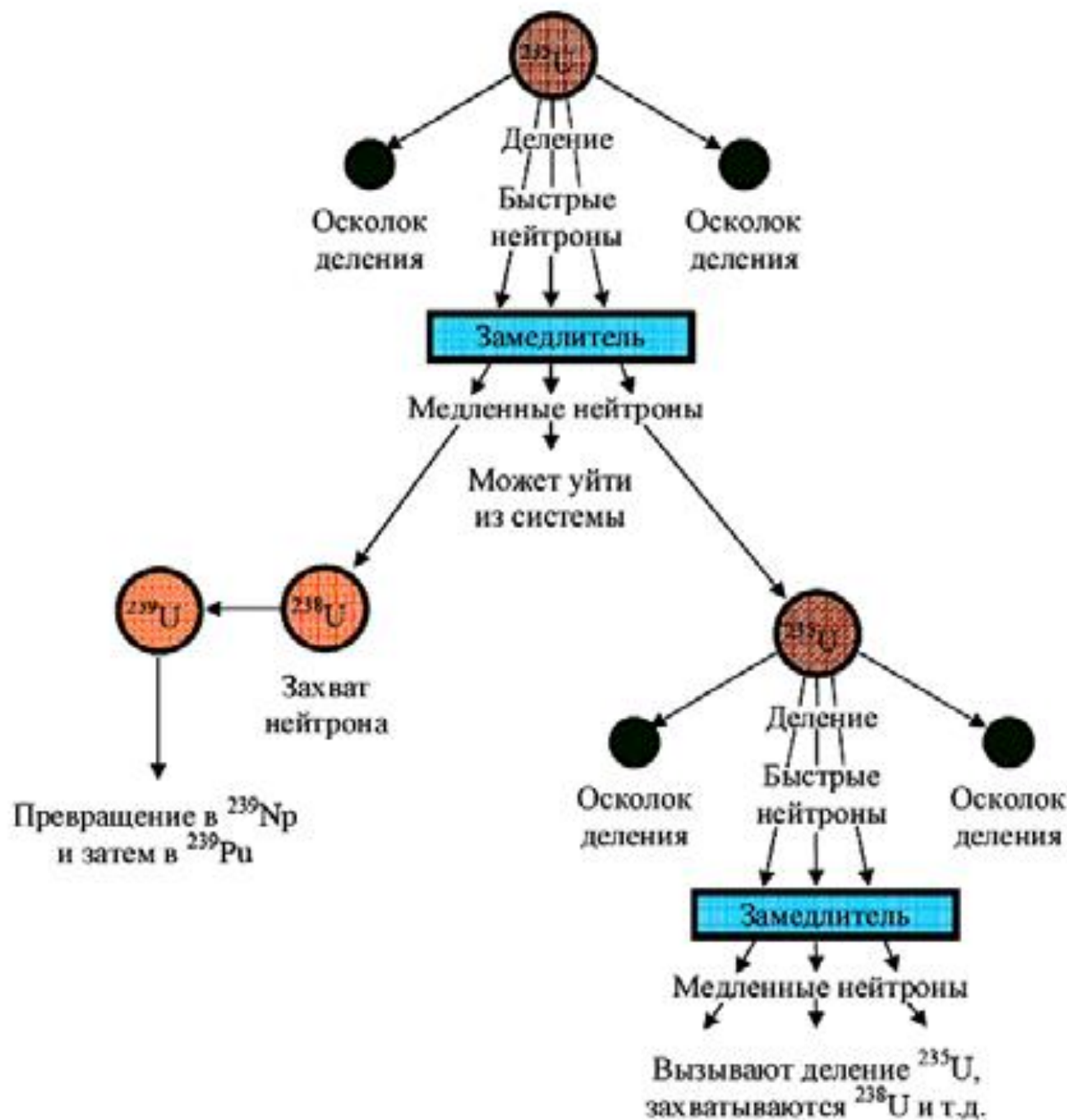
Частка виробництва електроенергії на АЕС України:

якщо в 1996 році вона була на рівні 43,8%, в 2000 р - 45,3%,

то в 2004 - 53,2%, 2005 - 52,3%, 2006у - 46,9%, 2007 - 47,5%, 2008 - 46,8%,

2009 - 47,9%, 2010 - 47,4%, 2015 - 56,5%, **2016 - 60%**, 2017 - 55,4 %,

2018 - 53%, 2019 – 53.9%, 2020 - 51,2%.



Класифікація реакторів за призначенням

- **Енергетичні реактори**, призначені для отримання електричної та теплової енергії. [Транспортні реактори, призначені для постачання енергією двигуни транспортних засобів (морські транспортні реактори, що застосовуються на підводних човнах і різних надводних судах, а також реактори, що застосовуються в космічній техніці.)]
- **Експериментальні реактори**, призначені для вивчення різних фізичних величин, значення яких необхідно для проектування і експлуатації ядерних реакторів.
- **Дослідницькі реактори**, в яких потоки нейтронів і гамма-квантів, що створюються в активній зоні, використовуються для досліджень в області ядерної фізики, фізики твердого тіла, радіаційної хімії, біології, для випробування матеріалів, призначених для роботи в інтенсивних нейтронних потоках (в т. ч. деталей ядерних реакторів), для виробництва ізотопів.
- **Промислові (збройові, ізотопні) реактори**, що використовуються для напрацювання ізотопів, що застосовуються в різних областях. Найбільш широко використовуються для виробництва ядерних збройових матеріалів, наприклад ^{239}Pu .

Класифікація реакторів по спектру нейтронів

- на теплових нейтронах (0.025 eV)
- на швидких нейтронах.
- на проміжних нейтронах.
- змішаного спектра.

Діапазони розподілу енергії нейтронів:

Швидкі нейтрони мають кінетичну енергію, що перевищує 1 eV, 0,1 MeV або приблизно 1 MeV, залежно від визначення.

Повільні нейтрони мають кінетичну енергію менше або рівну 0,4 eV.

Епітермальні нейтрони мають енергію від 1 eV до 10 keV.

Гарячі нейтрони мають енергію близько 0,2 eV.

Теплові нейтрони мають енергію приблизно 0,025 eV.

Холодні нейтрони мають енергію від 5×10^{-5} eV до 0,025 eV.

Дуже холодні нейтрони мають енергію від 3×10^{-7} eV до 5×10^{-5} eV.

Ультрахолодні нейтрони мають енергію менше 3×10^{-7} eV.

Нейтрони в області континууму мають енергію від 0,01 MeV до 25 MeV.

Резонансні нейтрони мають енергію від 1 eV до 0,01 MeV.

Нейтрони з низькою енергією мають енергію менше 1 eV.

Класифікація реакторів за розміщенням палива

- гетерогенні: топливо розміщується дискретно, між топливом знаходиться сповільнювач.
- гомогенно: топливо та сповільнювач розподілені однородно.

Класифікація реакторів по виду палива

- ізомери урану 235, 238, 233
- ізомер плутонію 239, також ізомери 239-242Pu у вигляді суміші з 238U
- ізомер торія 232 (232Th) (за допомогою перетворення в 233U)

Класифікація реакторів за ступенем збагачення

- природний уран 235U (abundance = 0.7200%)
- слабо збагачений уран 235U (abundance <2-5%)
- високо збагачений уран 235U (abundance > 2-5%)

Класифікація реакторів за хімічним складом

- металевий U
- UO₂ (діоксид урану)
- UC (карбід урану)

Класифікація реакторів по виду теплоносія

- H₂O (вода, Водо-водяний реактор)
- Газ, (Графіто-газовий реактор)
- D₂O (важка вода, CANDU)

Класифікація реакторів за родом сповільнювача

- C (графіт, Графіто-газовий реактор, Графіто-водний реактор)
- H₂O (вода, легководних реактор, Водо-водяний реактор, ВВЕР)
- D₂O (важка вода, важководного ядерний реактор, CANDU)
- Be, BeO - Гідриди металів
- Без сповільнювача (Реактор на швидких нейтронах)

Класифікація реакторів по конструкції

- Корпусні
- Канальні

Класифікація реакторів за способом генерації пара

- Із зовнішнім парагенератором
- Киплячий реактор

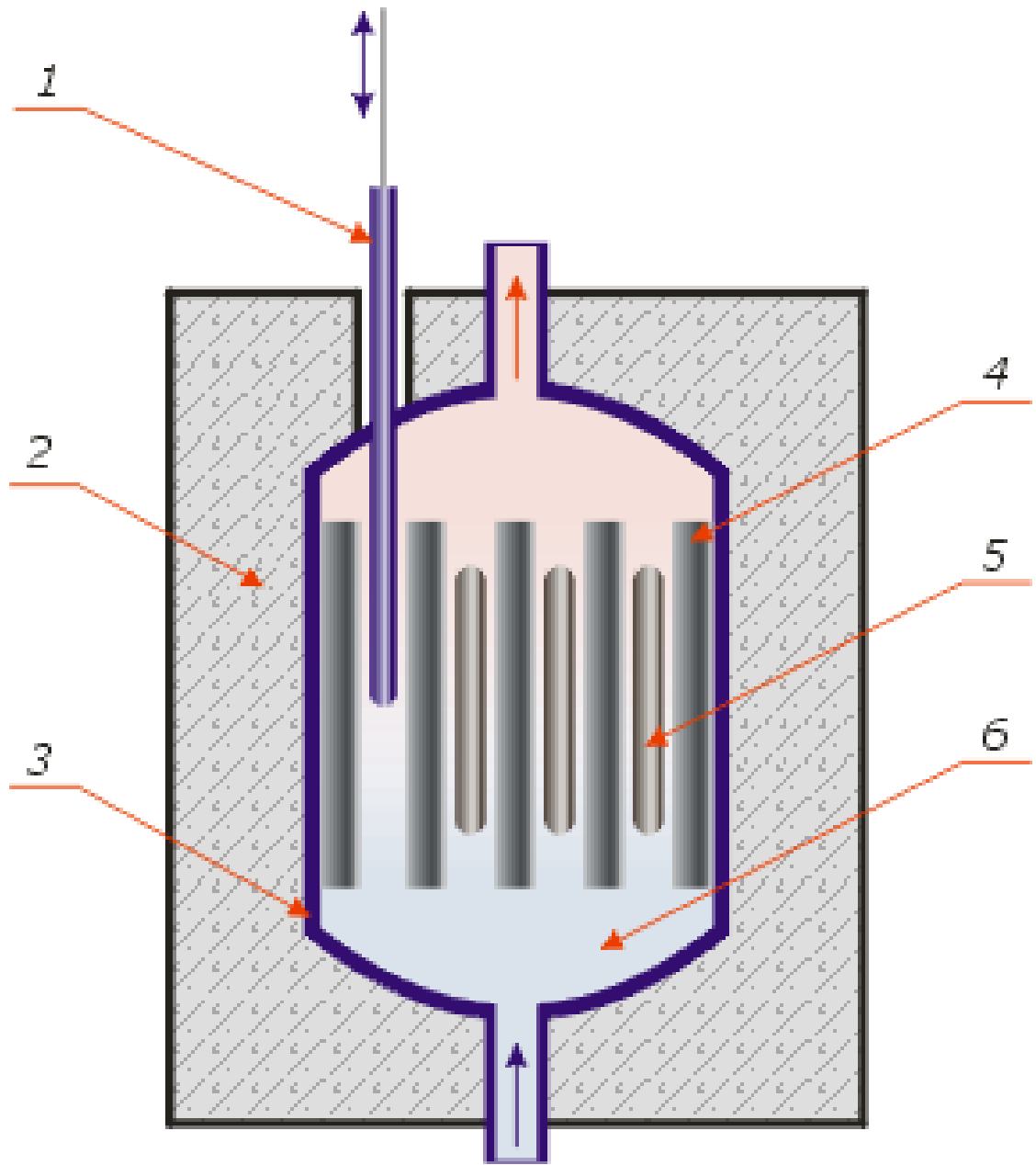


Схема гетерогенного реактора на теплових нейтронах

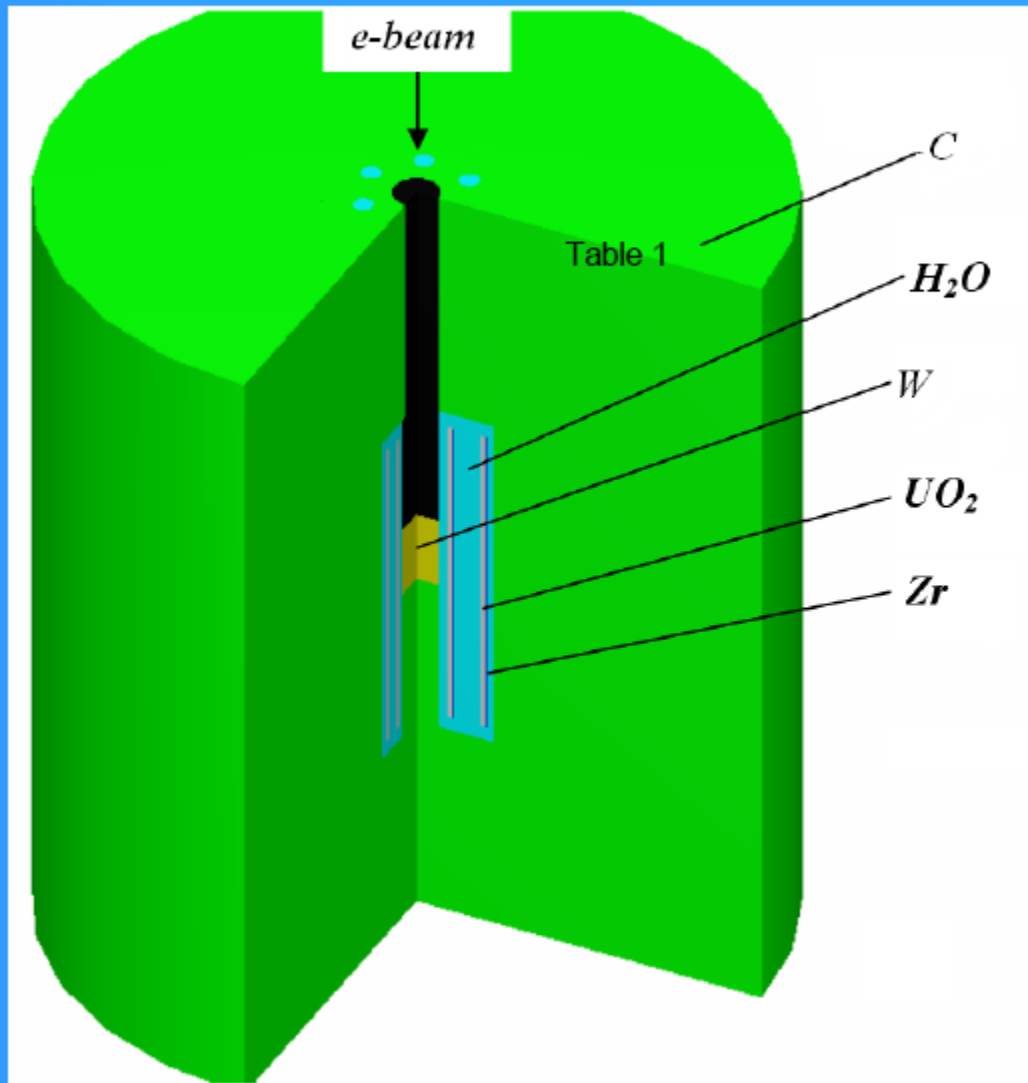
- 1 - керуючий стрижень;
- 2 - біологічний захист;
- 3 - теплоізоляція;
- 4 - сповільнювач;
- 5 - ядерне паливо;
- 6 - теплоносій.

Сповільнення нейтронів - зменшення кінетичної енергії нейтронів в результаті багаторазових зіткнень з атомними ядрами речовини.

У ядерних реакціях, що є джерелами нейтронів, утворюються швидкі нейтрони (з енергією $> 1 \text{ MeV}$). Швидкі нейтрони при зіткненнях з атомними ядрами втрачають енергію великими порціями, витрачаючи її головним чином на порушення ядер або їх розщеплення. В результаті одного або декількох зіткнень енергія нейтрона стає менше мінімальної енергії збудження ядра (від десятків кеВ до декількох МеВ в залежності від властивостей ядра). Після цього розсіювання нейтрона ядром стає пружним. При одному пружному зіткненні нейтрон втрачає в середньому частку енергії, що дорівнює $2A / (A + 1)^2$ де A - масове число ядра - мішені.

Середня кількість зіткнень N , середній час сповільнення t і середнє квадратичне видалення L нейтрона від джерела при уповільненні нейтрона в необмеженому середовищі від енергії 1 MeV до енергії $0,1 \text{ eV}$

Речовина	N	t , мксек	L , см
Свинець	1600	1300	200
Графіт	110	70	43
Вода	23	3	13



Fuel	UO ₂
Enrichment U-235, %	19.8
Density, g/cm ³	10.96
Fuel pellet diameter, cm	0.772
Zirconium clad thickness, cm	0.0722
Fuel rod length, cm	45
Number of the fuel rods	42
Pitch, cm	2.8
Fuel weight, kg	9.7
Radius core	?

Fig.1. The general view of the subcritical system.

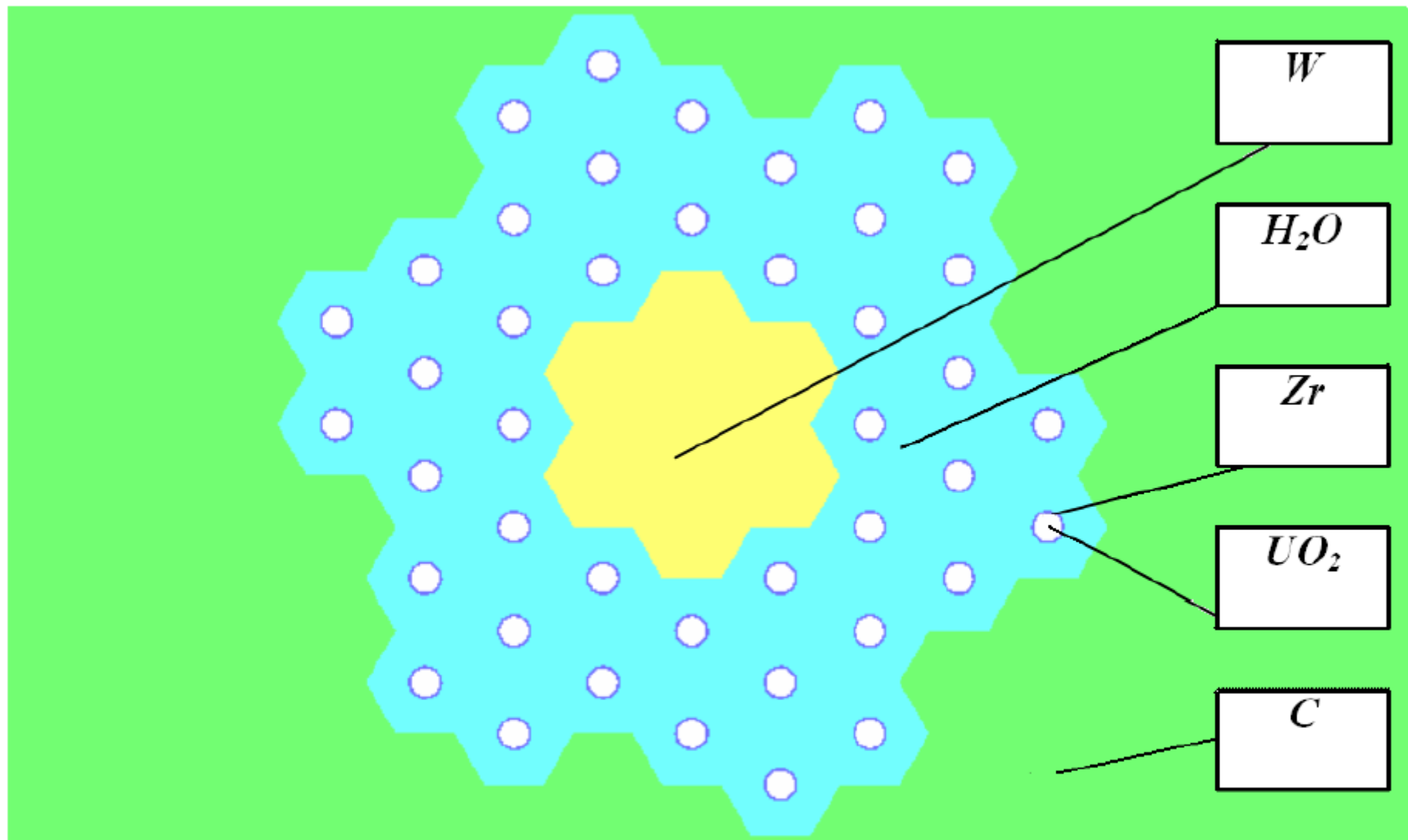


Fig.2. Core cross section.

Thanks for attention!!!