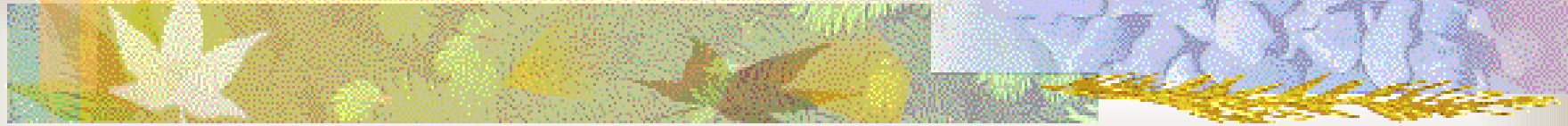


O tym jak Smok Feynmana rozjarzył się w błękicie



Jerzy Cetnar
AGH Kraków

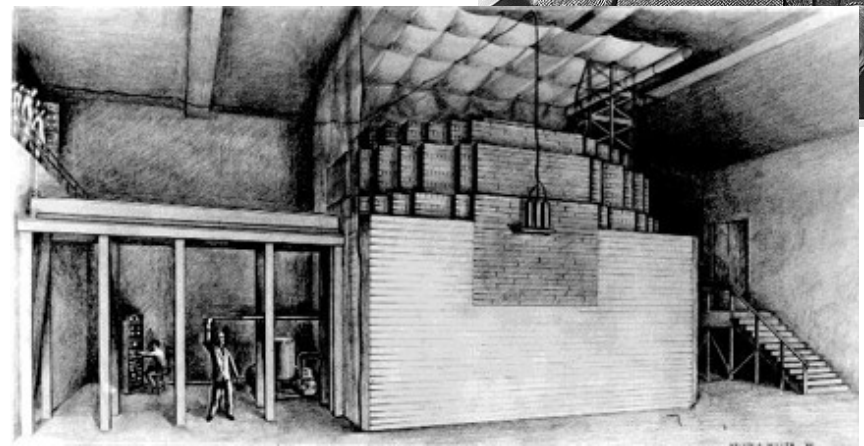
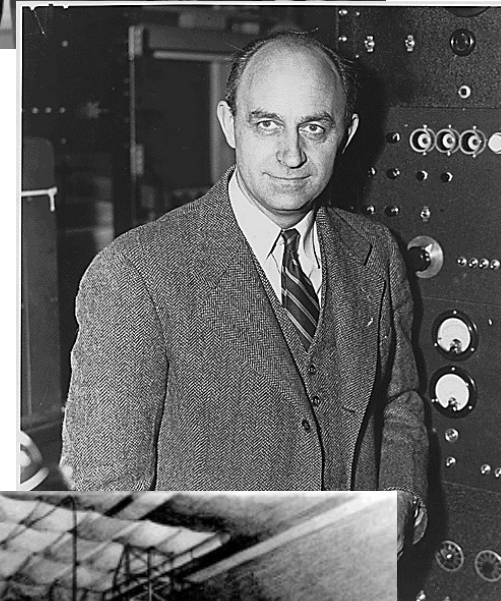
Historia projektu Manhattan

- 2 sierpnia 1939 - Leo Szilard przekonuje Alberta Einsteina do podpisania listu do prezydenta Roosevelta w sprawie badań nad bronią jądrową



- 21 października 1939 zainicjowanie działalności Komitetu Uranowego (budżet 6000 \$)

- 26 lutego 1941 Glenn Seaborg i Arthur Wahl odkrywają pluton
- sierpień - październik 1942 - ustanowienie laboratorium Los Alamos (projekt Y) - Robert Oppenheimer
- 2 grudnia 1942 - Enrico Fermi - pierwszy reaktor Chicago Pile-1



- 
- 1943 - intensywne prace konstrukcyjne i badawcze - z nadanym wysokim priorytetem

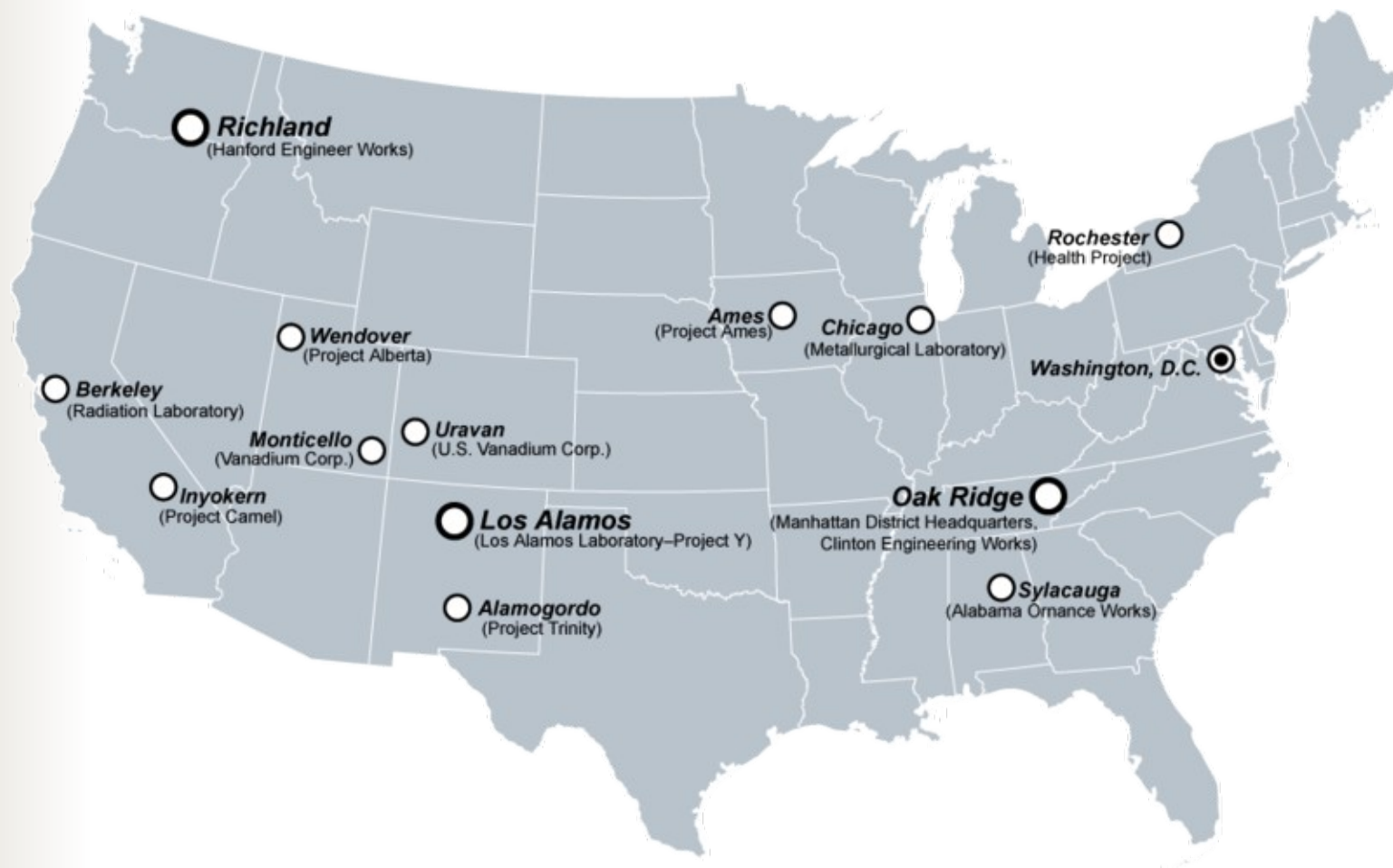
Główne zagadnienia badawcze:

- Separacja izotopów uranu
- Produkcja plutonu
- Oddziaływanie neutronów prędkich z materią - *projekt Y* (Los Alamos)
 - rozpraszanie, odbicie (akceleratory, układy krytyczne)
- Pomiar masy krytycznej
- Dynamika reakcji łańcuchowej rozszczepienia

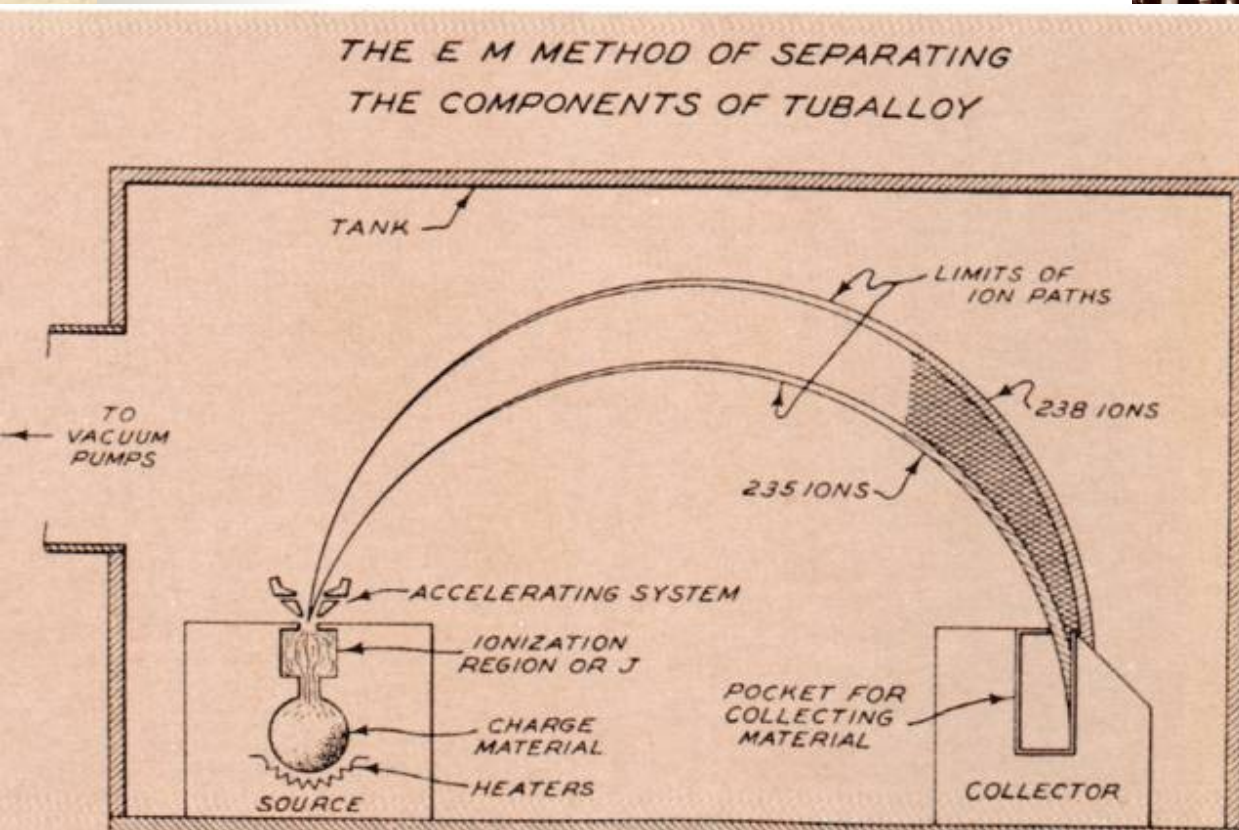
Richard Feynman: określił prace w Los Alamos nad bombą jako:

„łaskotanie ogona śpiącego smoka”.

Laboratoria i testy projektu Manhattan



Separacja uranu



Spektrometry masowe „Calutrony” w Oak Ridge

With information in the report... other members of the project, even of the same laboratory, without specific authorization.

THE LOS ALAMOS PRIMER

UNCLASSIFIED

The following notes are based on a set of five lectures given by R. Serber during the first two weeks of April 1943, as an "indoctrination course" in connection with the starting of the Los Alamos Project. The notes were written up by E. U. Condon.

Bob Serber

1. Object

The object of the project is to produce a practical military weapon in the form of a bomb in which the energy is released by a fast neutron chain reaction in one or more of the materials known to show nuclear fission.

2. Energy of Fission Process

The direct energy release in the fission process is of the order of 170 MEV per atom. This is considerably more than 10 times the heat of reaction per atom in ordinary combustion processes.

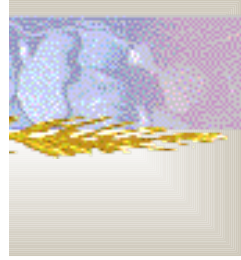
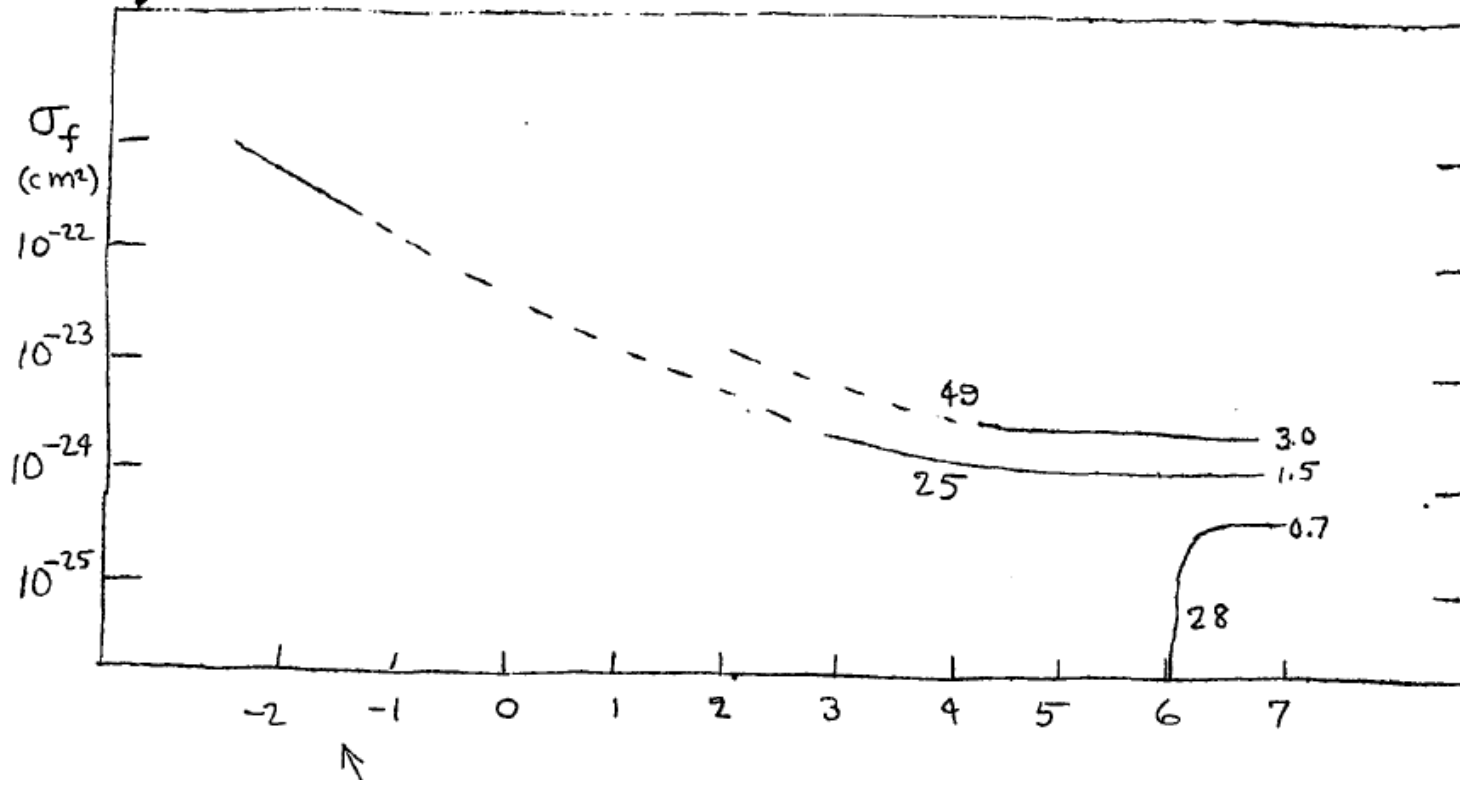
This is $170 \cdot 10^6 \cdot 4.8 \cdot 10^{-10} / 300 = 2.7 \cdot 10^{-4}$ erg/nucleus. Since the weight of 1 nucleus of 25 is $3.88 \cdot 10^{-22}$ gram/nucleus the energy release is

$7 \cdot 10^{17}$ erg/gram

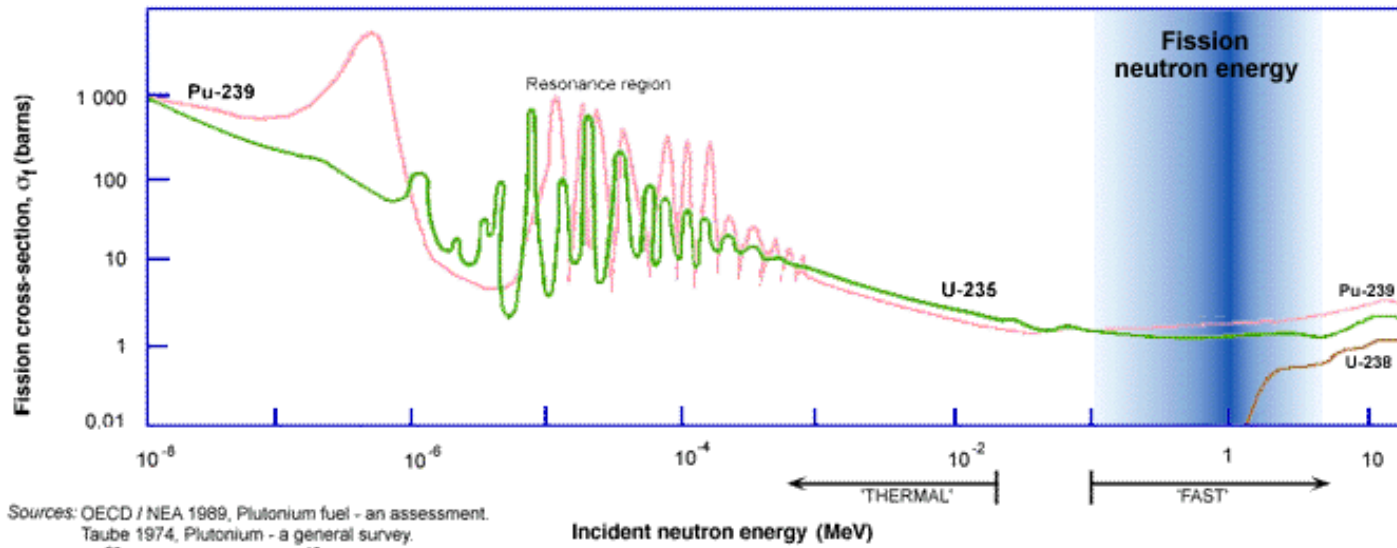
The energy release in TNT is $4 \cdot 10^{10}$ erg/gram or $3.6 \cdot 10^{16}$ erg/ton. Hence

1 kg of 25 \approx 20000 tons of TNT

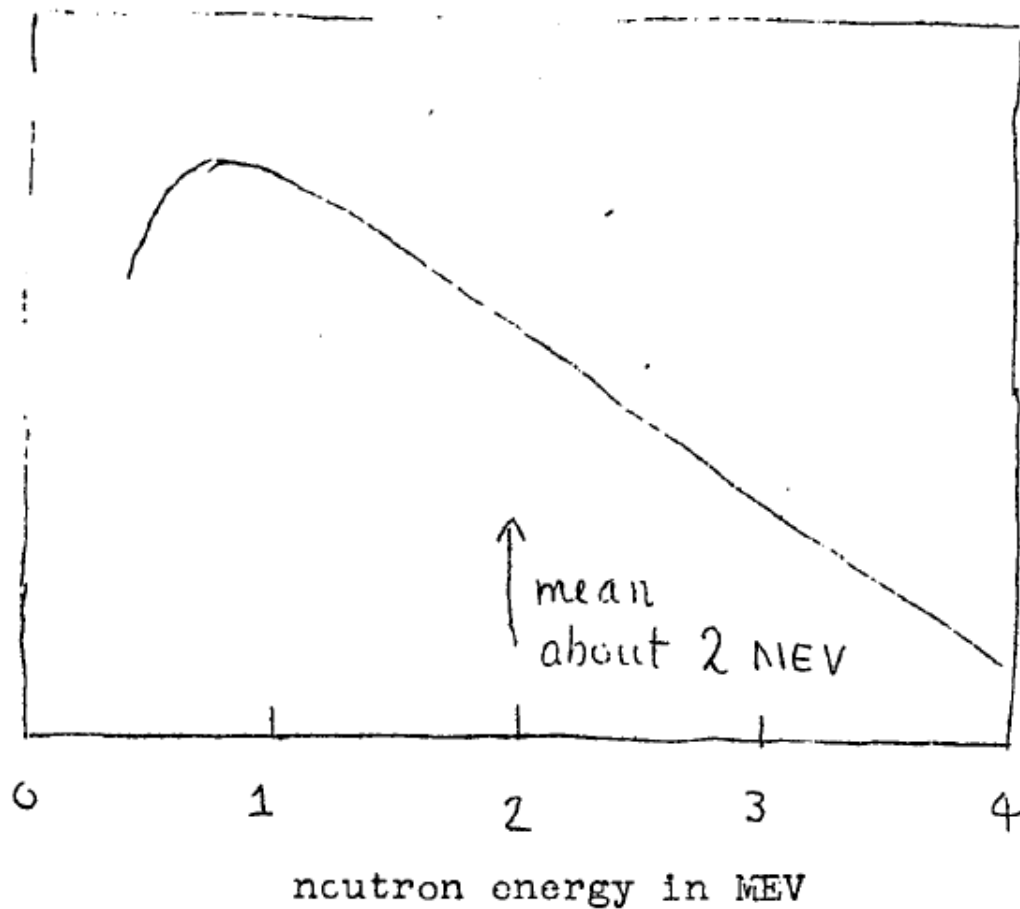
3. Fast Neutron Chain Reaction



NEUTRON CROSS-SECTIONS FOR FISSION OF URANIUM AND PLUTONIUM



Sources: OECD / NEA 1989, Plutonium fuel - an assessment.
 Taube 1974, Plutonium - a general survey.
 1 barn = 10^{-28} m², 1 MeV = 1.6×10^{-13} J



6. Neutron number

The average number of neutrons produced per fission is denoted by ν . It is not known whether ν has the same value for fission processes in different materials, induced by fast or slow neutrons or occurring spontaneously.

The best value at present is

$$\nu = 2.2 \pm 0.2$$

although a value $\nu = 3$ has been reported for spontaneous fission.

10. Simplest Estimate of Minimum Size of Bomb

Let us consider a homogeneous material in which the neutron number is ν and the mean-time between fissions is τ . In Sec. 3 we estimated $\tau = 10^{-8}$ sec. for uranium. Then if N is the number of neutrons in unit volume we have

$$\dot{N} + \text{div } \underline{j} = \frac{\nu-1}{\tau} N$$

The term on the right is the net rate of generation of neutrons in unit volume. The first term on the left is the rate of increase of neutron density. In the second term on the left \underline{j} is the net diffusion current stream of the neutrons (net number of neutrons crossing 1 cm^2 in 1 sec across a plane oriented in such a way that this net number is maximum).

In ordinary diffusion theory (which is valid only when all dimensions of boundaries are large compared to the mean free path of the diffusing particles - a condition not fulfilled in our case) the diffusion current is proportional to the gradient of N ,

$$\underline{j} = -D \text{ grad } N$$

UNCLASSIFIED

where D is the diffusion coefficient (cm^2/sec).

Hence we have

$$\dot{N} = D \Delta N + \left(\frac{\nu-1}{\tau}\right) N$$

UNCLASSIFIED

Assume a solution whose time dependence is of the form

$$N = N_1(x, y, z) e^{\nu' t / \tau}$$

where ν' is called the "effective neutron number". The equation to be satisfied by N_1 is

$$\Delta N_1 + \frac{-\nu' + \nu - 1}{D \tau} N_1 = 0$$

together with a boundary condition. In the simple case in which we are dealing with a sphere of radius R , we may suppose that N_1 is spherically symmetric.

At $r=R$ we would have, on simple theory $N_1 = 0$. (In point of fact $N_1 > 0$ due to the effect of the mean free path's not being small compared with R , but this will not be considered here). For spherical symmetry the equation for N_1 has the solution

This shows that in an infinitely large sphere the neutron density would build up with the time constant $(\nu-1)/\tau$. Smaller spheres build up less rapidly. Any sphere so small that $\nu' < 0$ is one for which the neutrons leak out the surface so rapidly that an initial density will die out rather than build up. Hence the critical radius is given by

$$R_c^2 = \frac{\pi^2 D \tau}{\nu - 1} \quad \nu' = 0$$

Now D is given by $D = \frac{1}{3} v \lambda$ where λ is the transport mean free path, $\lambda = 1/n \sigma_t$, n is the number of nuclei per cc and

$$\sigma_t = \left[\sigma_f + \int \sigma_s (1 - \cos \theta) d\omega \right]$$

which brings out the reason for measurements of the angular scattering of neutrons in U. In metallic U we have

$$\tau_t = 4 \cdot 10^{-24} \text{ cm}^2$$

which, for a density of 19 gm/cm^3 , gives $\lambda = 5 \text{ cm}$.

Also

$$\tau = \frac{1}{n \tau_f \nu} = \frac{\lambda}{v} \frac{\sigma_t}{\sigma_f} \quad \text{so } \pi^2 D \tau = \frac{\pi^2}{3} \lambda^2 \frac{\sigma_t}{\sigma_f} = 220.$$

Therefore

$$\pi^2 R_c^2 = \frac{220}{1.3} = 183 \text{ and } R_c = 13.5 \text{ cm.}$$

The critical volume is therefore $10.5 \cdot 10^3 \text{ cm}^3$ giving a critical mass of 200 kilograms.

UNCLASSIFIED
 Defense of the United States within the meaning of the
 Espionage Act, U.S.C. Title 18, Sections 793 and 794,
 is hereby authorized by the Atomic Energy Commission
 to be disseminated to all persons having a need to know
 thereof in the interest of national defense.

UNCLASSIFIED

The value of the critical mass is, however, considerably overestimated by the elementary diffusion theory. The more exact diffusion theory allowing for the long free path drops R_c by a factor about $2/3$ giving

$$R_c \sim 9 \text{ cm} \quad M_c \sim 60 \text{ kg of } ^{235}\text{U}$$

The elementary treatment just given indicates the dependence of M_c on the principal constants

$$M_c \sim \frac{1}{\rho^2} \left[\frac{1}{\sigma_f \sigma_t (\nu - 1)} \right]^{3/2}$$

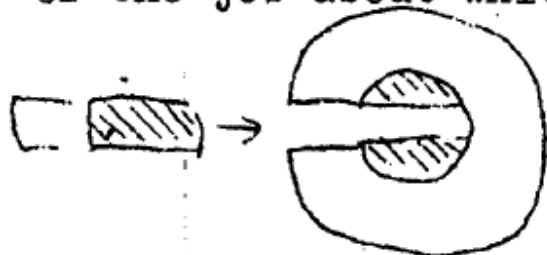
where ρ is the density. For $R \neq R_c$ we have the time dependence of neutron multiplication given by

$$e^{(\nu - 1) + [1 - (\frac{R_c}{R})^2] / \tau}$$

Hence for a sphere of twice the critical mass the time constant, for multiplication of neutron density by e is 2.4×10^{-8} sec.

20. Shooting

We now consider briefly the problem of the actual mechanics of shooting so that the pieces are brought together with a relative velocity of the order of 10^5 cm/sec or more. This is the part of the job about which we know least at present.

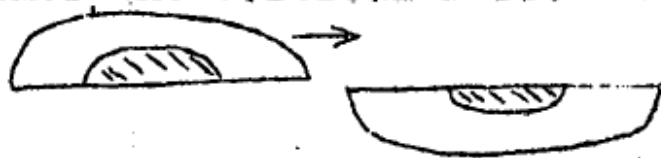


One way is to use a sphere and to shoot into it a cylindrical plug made of some active material and some tamper, as in the sketch. This avoids fancy shapes and gives the

most favorable shape, for shooting; to the projected piece whose mass would be of the order of 100 lbs.

The highest muzzle velocity available in U. S. Army guns is one whose bore is 4.7 inches and whose barrel is 21 feet long. This gives a 50 lb. projectile a muzzle velocity of 3150 ft/sec. The gun weighs 5 tons. It appears that the ratio of projectile mass to gun mass is about constant for different guns so a 100 lb. projectile would require a gun weighing about 10 tons.

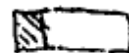
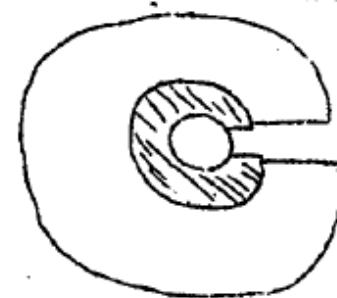
piece would be sub-critical than analyzed, times the critical mass. The



Thus there are many or have answered. We would like

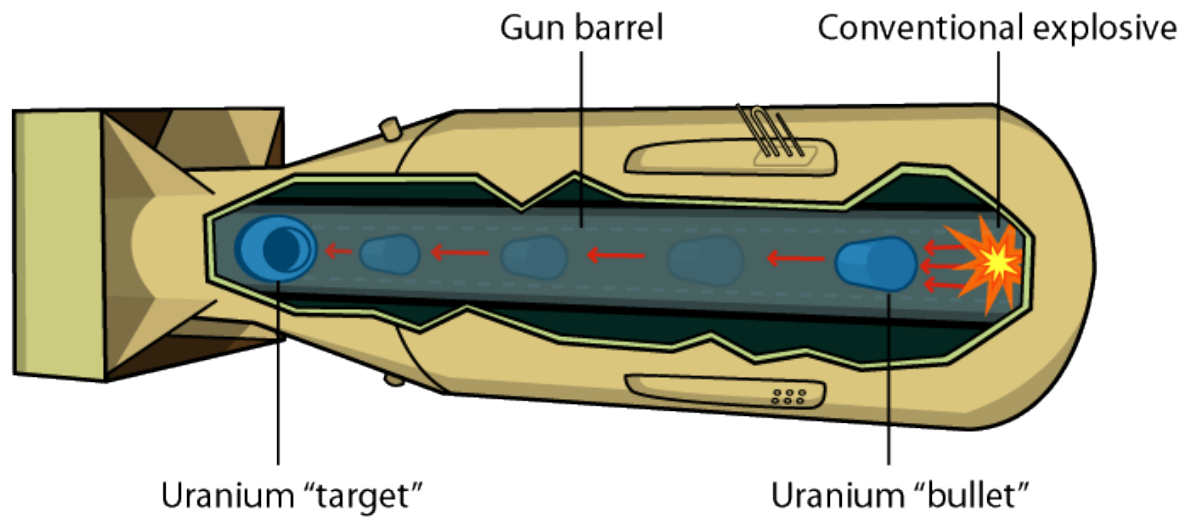


en suggested that t

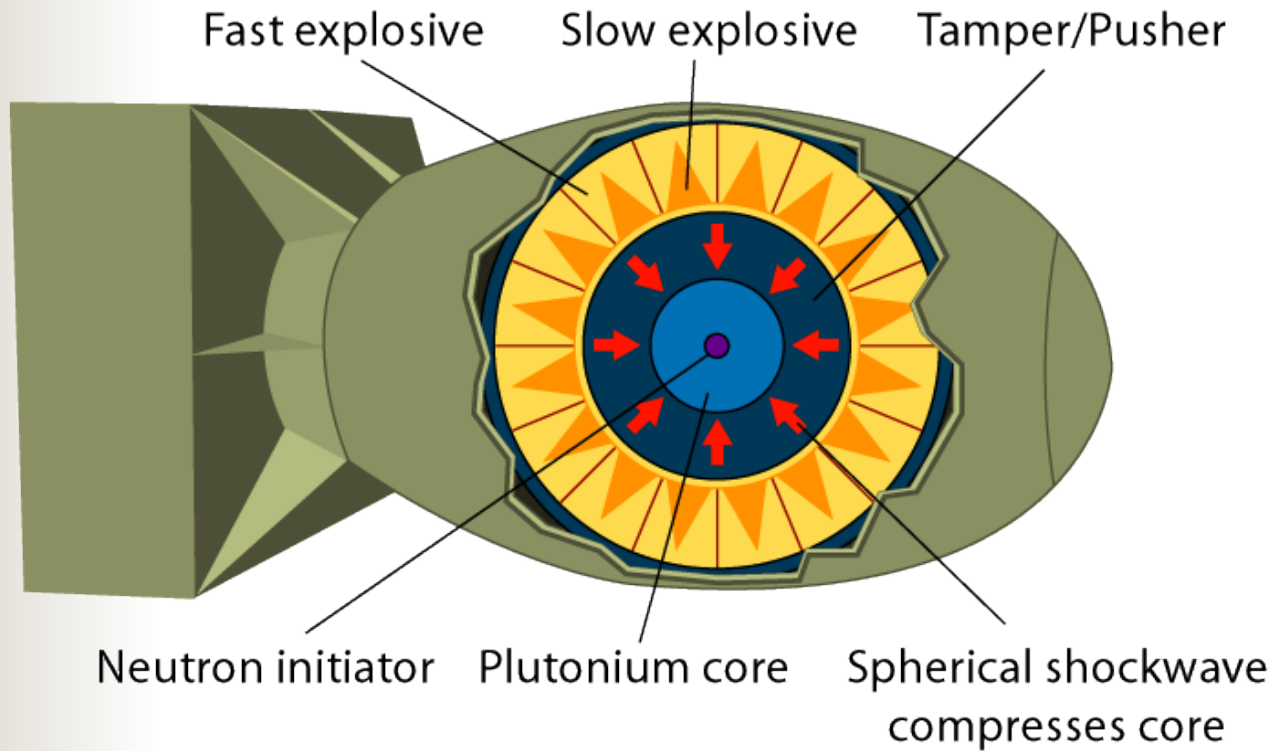
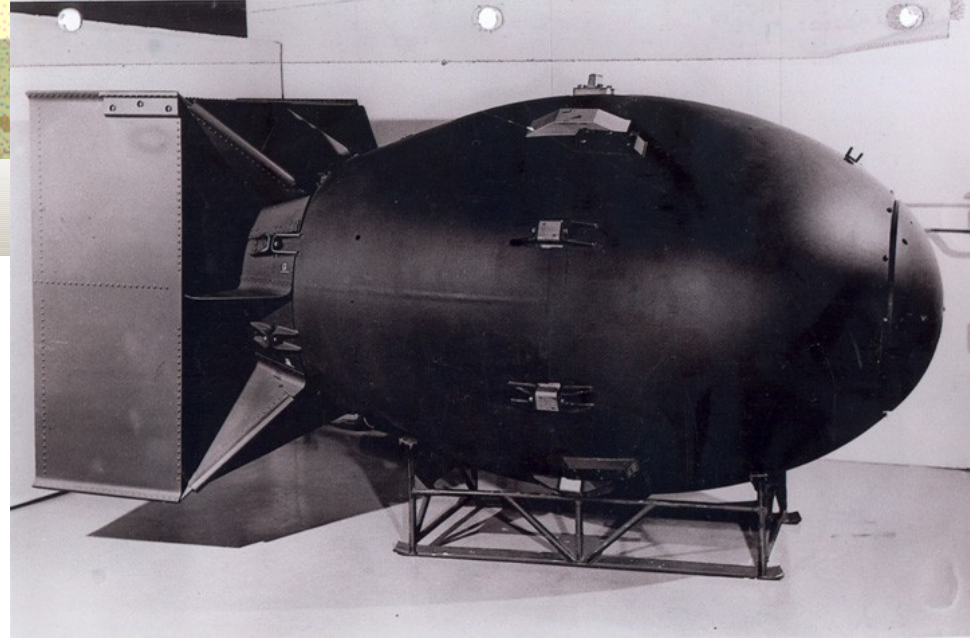


with information
for the usual secret
members of the project
without specific authorization
even the same laboratory,
them to other

Little Boy



Fat Man



Fast explosive

Slow explosive

Tamper/Pusher

Neutron initiator

Plutonium core

Spherical shockwave
compresses core



Wypadki krytyczności

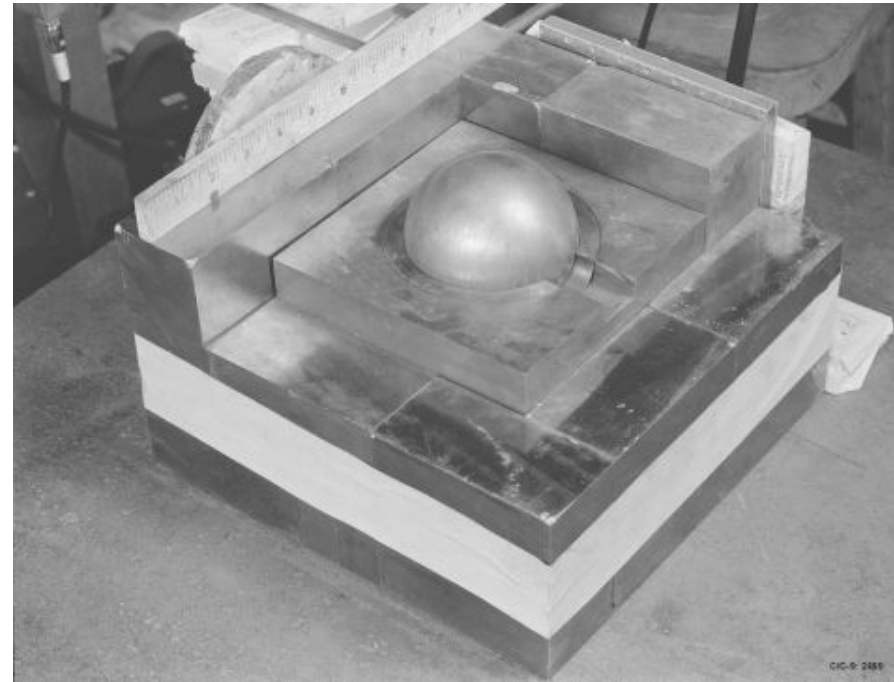
- wystąpienie niekontrolowanej reakcji łańcuchowej w materiale rozszczepialnym z gwałtownym wydatkiem energii oraz promieniowania

Przebieg:

- Niekontrolowane wprowadzenie reaktywności - rekonfiguracja geometryczno-materiałowa na skutek błędu lub cech fizycznych systemu.
- Zainicjowanie reakcji łańcuchowej:
 - na neutronach opóźnionych,
 - następnie na neutronach natychmiastowych
- Gwałtowny wzrost mocy z emisją promieniowania
(efekty wizualne: „blue flash”, „blue glow”)
- Dezintegracja systemu na skutek kontrakcji lub fizycznej ekspansji systemu
- Przy napromienieniu personelu - wczesne efekty psycho-somatyczne

Wypadek Daghiana

- 21 Sierpnia 1945 - 24 letni Harry K. Daghlian
- Upuszczenie cegły z węglika wolframu (WC) na kulę z plutonu o masie 6.2 kg
- Wystąpienie krytyczności na neutronach natychmiastowych
- Wystąpienie jonizacji z niebieskim jarzeniem; efekt "blue glow"
- Bliskie przetopienie sfery
- Kontrakcja Daghiana - odrzucenie ręczne cegły
- Śmierć Daghiana 15 września



Wypadek Slotina

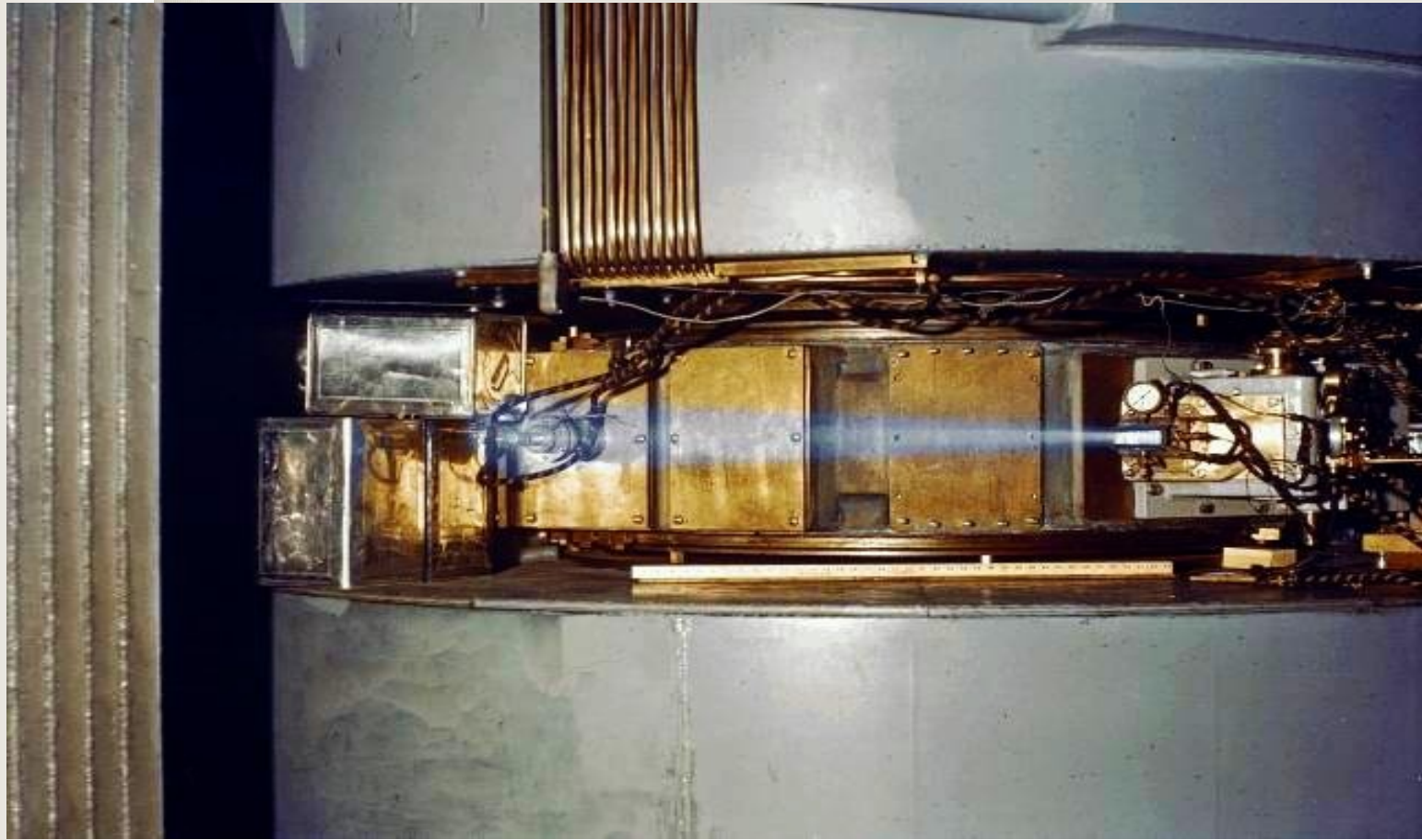
„łaskotanie ogona śpiącego smoka”

- 21 Maja 1946 - ta sama kula Pu ale z reflektorem Be
- Luis Slotin w obecności 7 osób
- Świadome nałożenie reflektora berylowego na sferę Pu
- Wystąpienie krytyczności z efektem "blue glow"
- Kontrakcja Slotina - odrzucenie ręcznego reflektora
- Śmierć Slotina po 9 dniach
- Inne 3 osoby umierają w ciągu roku

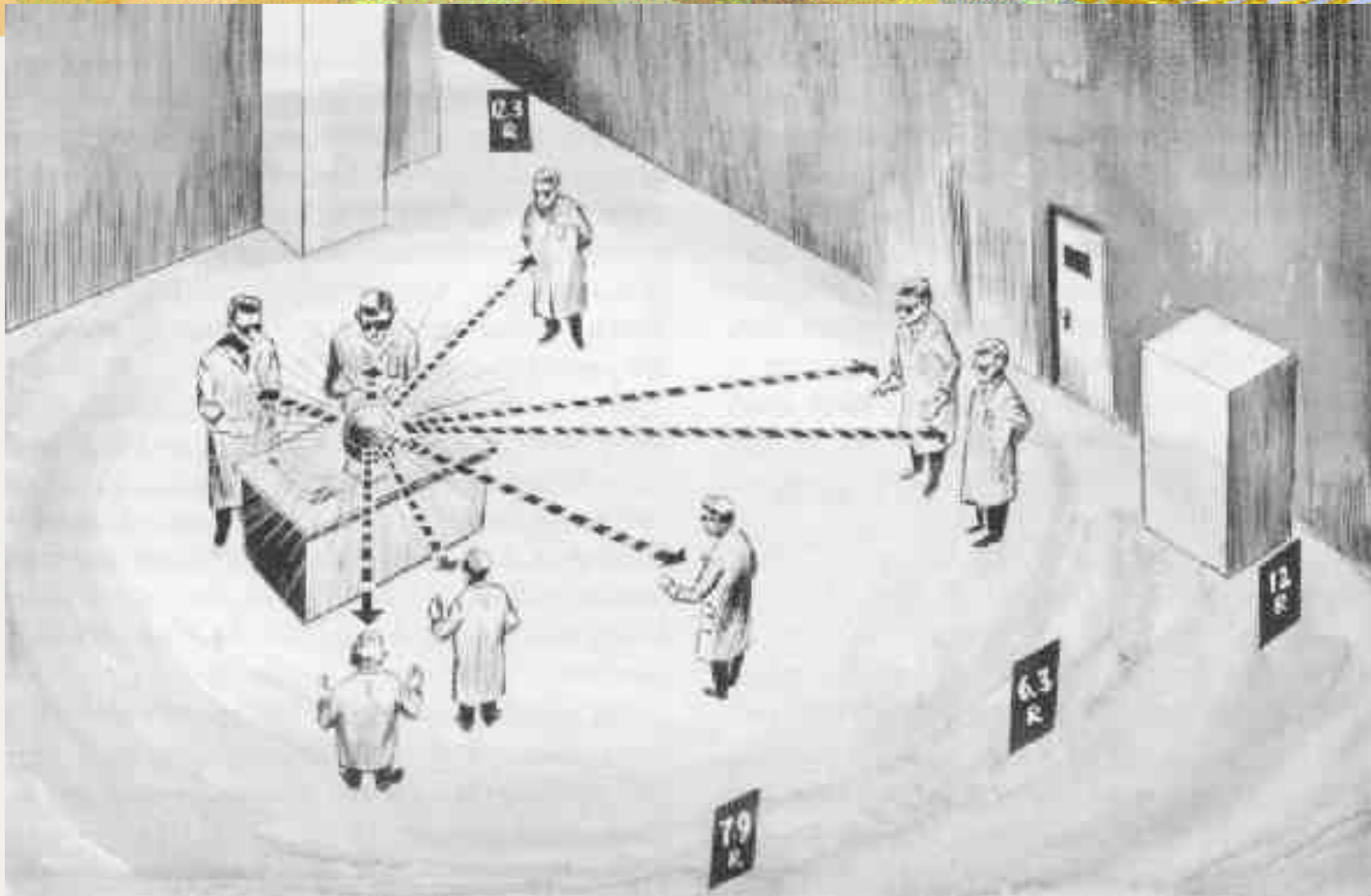


Źródła niebieskiego światła w wypadkach krytyczności

- Rozszczepienie jest źródłem promieniowania jonizującego o energii $< 20 \text{ MeV}$: X, gamma oraz beta
- Jonizacja tlenu, azotu – de-ekscytacja z emisją niebieskiego światła
- Promieniowanie Czerenkowa - elektrony w gałce ocznej
- (p. Czerenkow w powietrzu nie powstaje - poniżej progu $E_e \sim 20 \text{ MeV}$)



Cyclotron with glowing beam; Lawrence Berkeley National Laboratory



Napromieniowanie:

Daghlian 5,1 [Sv], [t ~ kilka s]

Slotin: 21 [Sv], [t ~ 1/2 s]

dawki innych: 3,60, 2,50, 1,60, 1,10, 0,65, 0,47 0,37 [Sv]

wydatek rozszczepień 10^{16}

wydatek rozszczepień 3×10^{15}

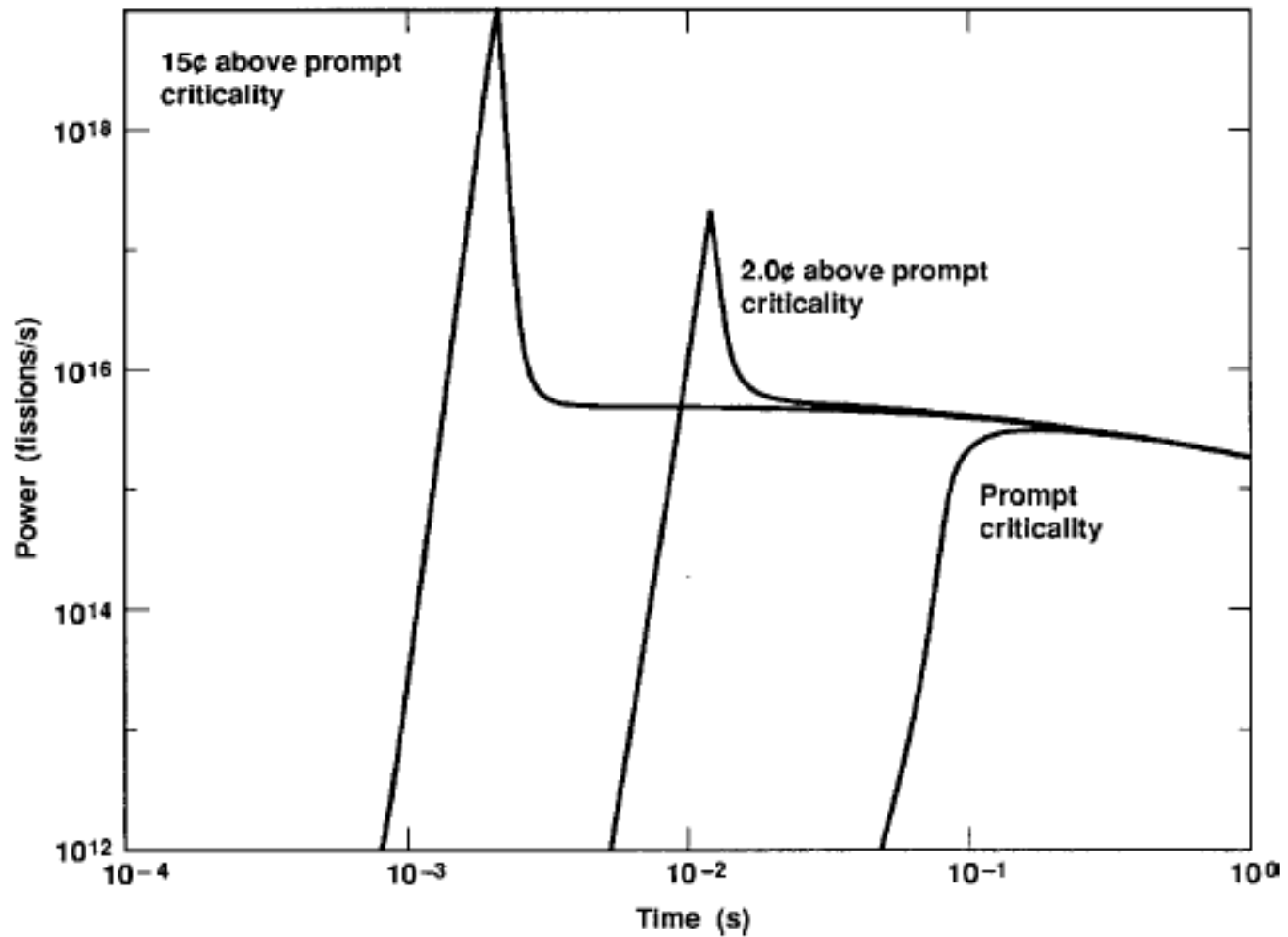


Figure 43. Calculated fission rate for the 6.2-kg plutonium sphere.

Parametry teoretyczne promień krytyczny sfery; masa krytyczna

Sfera U235

Primer - elementarna teoria dyfuzji	13.52 cm	197 kg
Primer - poprawiona teoria dyfuzji	9 cm	60 kg (58kg)
Aktualna krytyczność		1,059
Aktualne wyniki MCNP	8,4 cm	47 kg

Sfera U235 + reflektor z naturalnego uranu

Primer - poprawiona teoria dyfuzji	6 cm	15 kg (17,2 kg)
Aktualna krytyczność		1,010
Aktualne wyniki MCNP	5,9 cm	16,3 kg

Sfera U235 + reflektor ze złota

Primer - poprawiona teoria dyfuzji		22 kg
Aktualna krytyczność		1,025
Aktualne wyniki MCNP	6,2 cm	18,9 kg



*Parametry teoretyczne
promień krytyczny sfery; masa krytyczna*

Sfera Pu239

Aktualne wyniki MCNP	4,95 cm	10 kg
----------------------	---------	--------------

Sfera Pu239 + reflektor z naturalnego uranu

Primer - poprawiona teoria dyfuzji		5 kg
Aktualna krytyczność		1,042
Aktualne wyniki MCNP	3,75 cm	4,4 kg

Sfera Pu239 + reflektor ze złota

Primer - poprawiona teoria dyfuzji		7,5 kg
Aktualna krytyczność		1,110
Aktualne wyniki MCNP	3,9 cm	4,9 kg

„Demon core”		6,2kg
--------------	--	--------------



Konkluzje

- Po wypadkach Daghliana i Slotina nastąpił koniec (w USA) ręcznie przeprowadzanych eksperymentów z krytycznością
- Raporty z tych wydarzeń zostały utajnione
- Liczba innych wypadków krytyczności na świecie jest rzędu 100 (większość bez ofiar)
- Katastrofa RBMK w Czarnobylu jest największym z nich (aczkolwiek nie ostatnim)