



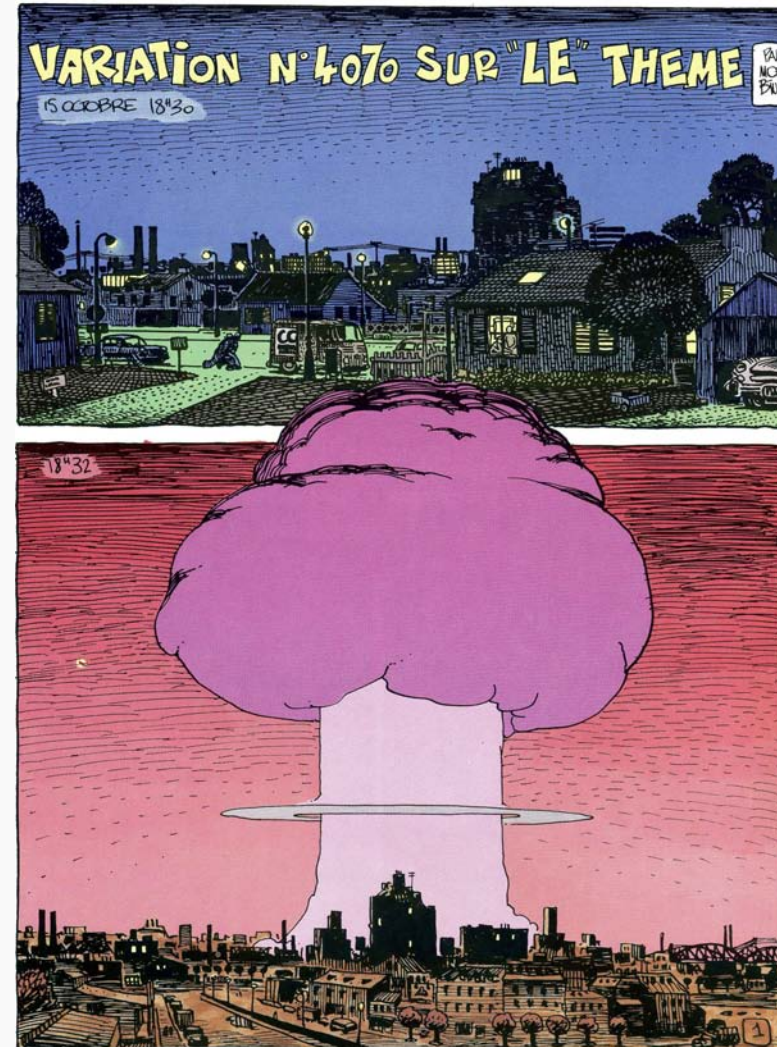
La storia della bomba

Alessandro Pascolini – marzo 2017

Le armi nucleari

L'avvento delle armi nucleari è stato un evento epocale, con impatto pervasivo su tutta la società umana, tanto segnare l'inizio dell'“era atomica”.

- sono le uniche vere armi di distruzione di massa
- aggiungono i danni delle radiazioni e la contaminazione radioattiva su territori vasti e per tempi lunghi
- impossibili forme di difesa e di profilassi e vacui i programmi di protezione civile
- valore politico: simbolo e metafora di potenza mondiale

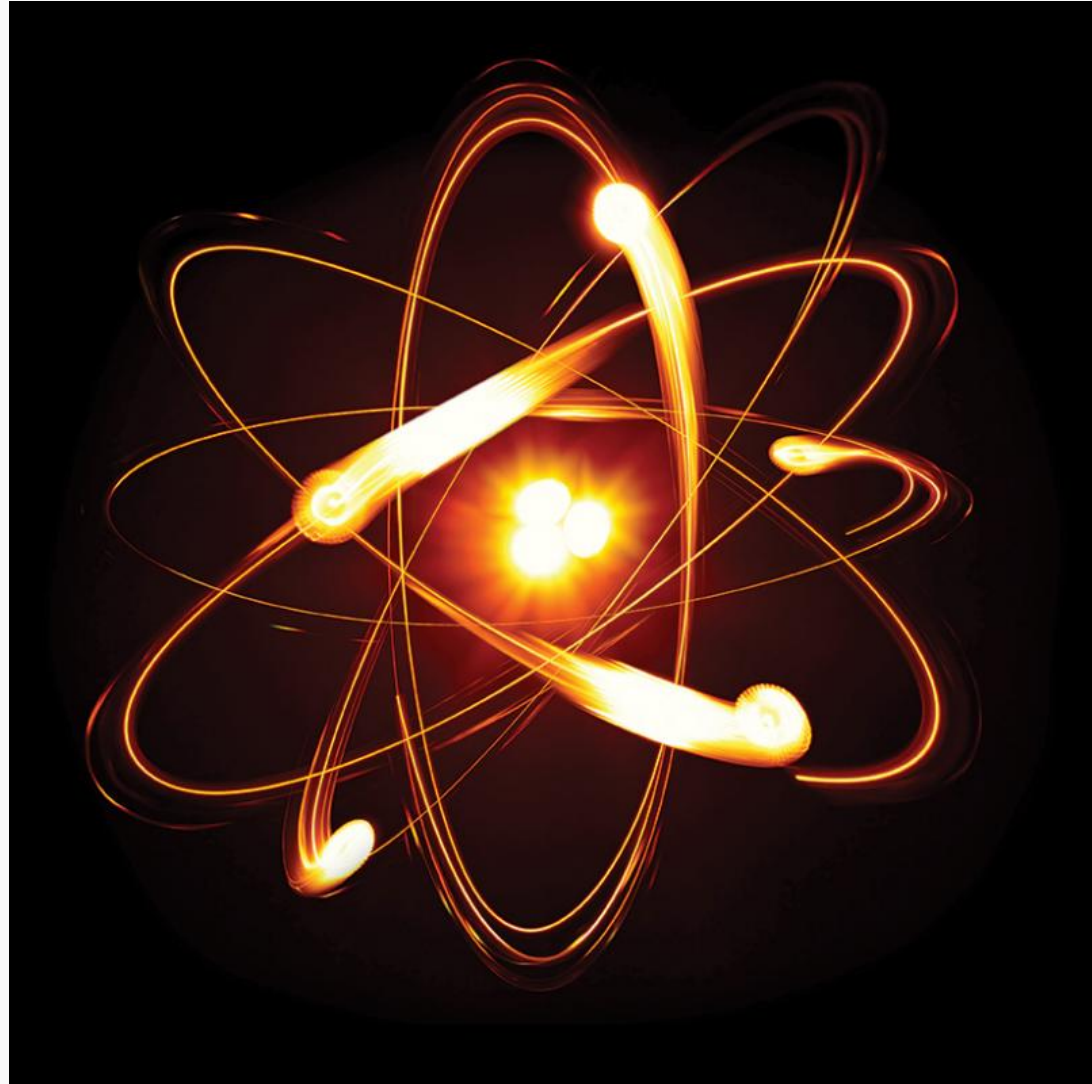




La realizzazione delle armi nucleari è stata possibile grazie alla conoscenza delle proprietà fondamentali della materia, frutto della ricerca scientifica dello scorso secolo. Gli scienziati hanno svolto un ruolo fondamentale

La teoria atomica di Niels Bohr

l'atomo è costituito da un piccolissimo nucleo positivo circondato da un sistema di elettroni negativi orbitanti su traiettorie stabili determinate dalla meccanica quantistica



Il nucleo atomico

- è piccolissimo: $\approx 10^{15}$ volte più piccolo dell'atomo
- possiede una massa migliaia di volte quella dell'elettrone (praticamente tutta quella dell'atomo)
- ha una carica elettrica positiva a bilanciare quella di tutti gli elettroni atomici
- la carica elettrica positiva è portata da *protoni*
- lo stesso elemento chimico può possedere nuclei di massa differente, ma di stessa carica elettrica (*isotopi*), con proprietà differenti

nei nuclei

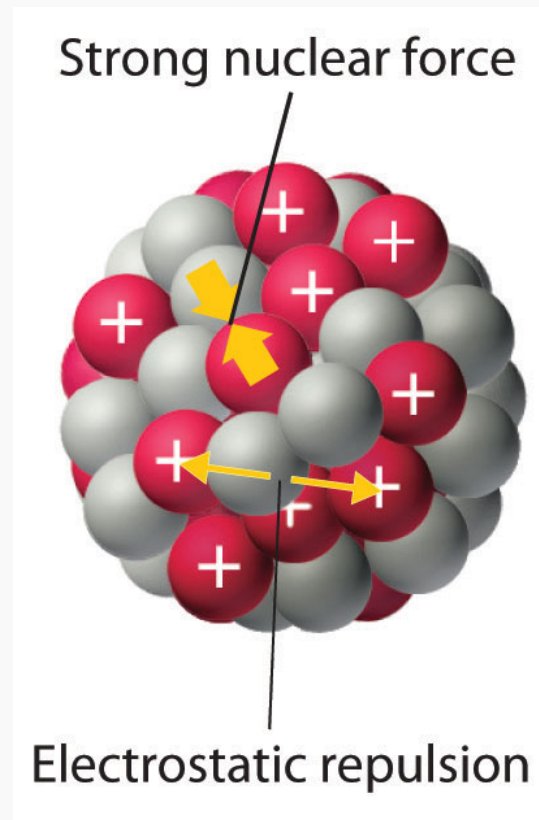
~ oltre all'elettromagnetismo agisce una nuova forza: la forza nucleare o "forte"

- attrattiva ed enorme
- a raggio d'azione limitato all'interno del nucleo

~ esiste una nuova particella
il *neutrone*

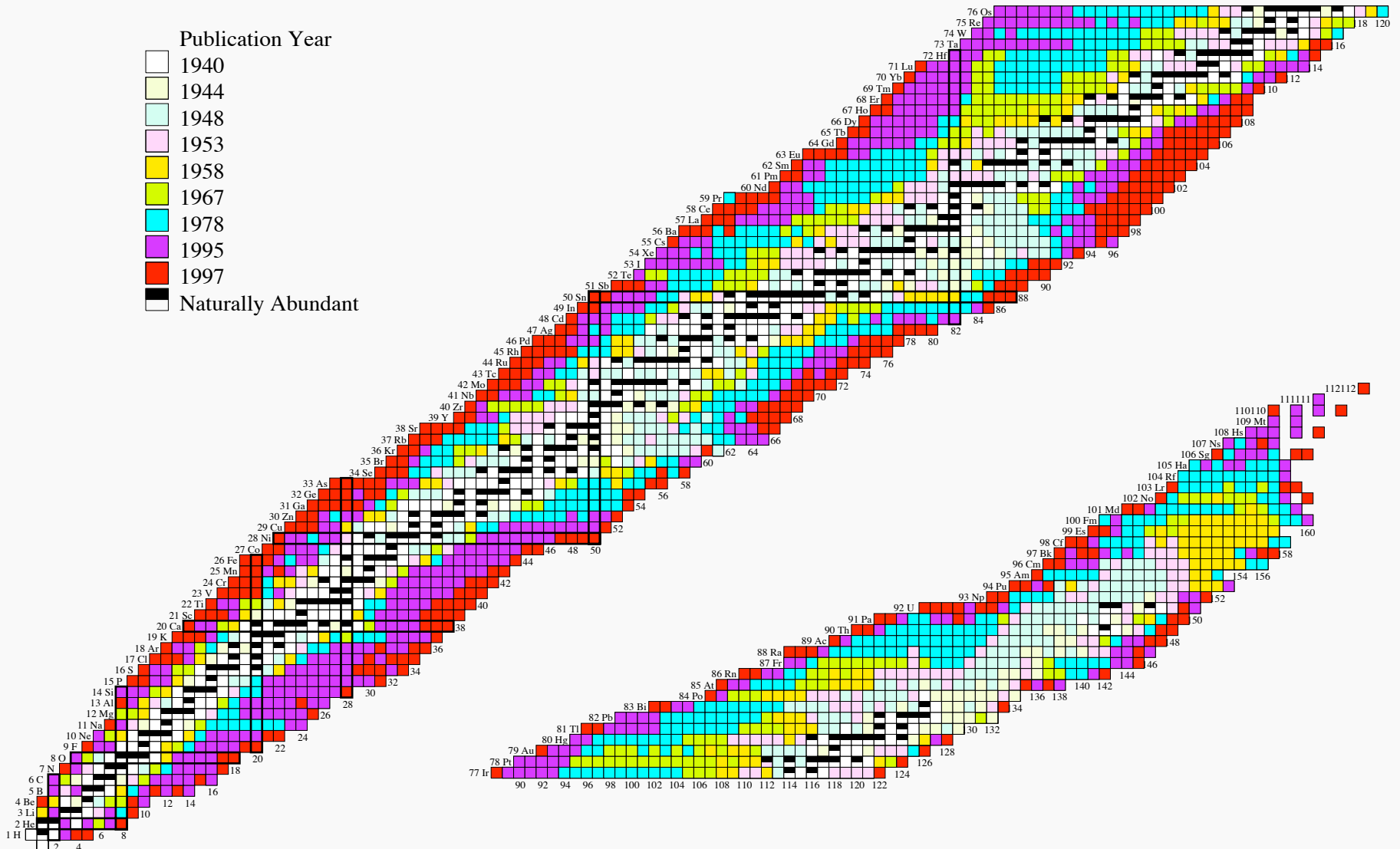
- neutra
- di massa analoga al protone

gli isotopi hanno un numero fisso di protoni e variabile di neutroni



le specie nucleari: elementi e isotopi

Evolution of the *Table of Isotopes*

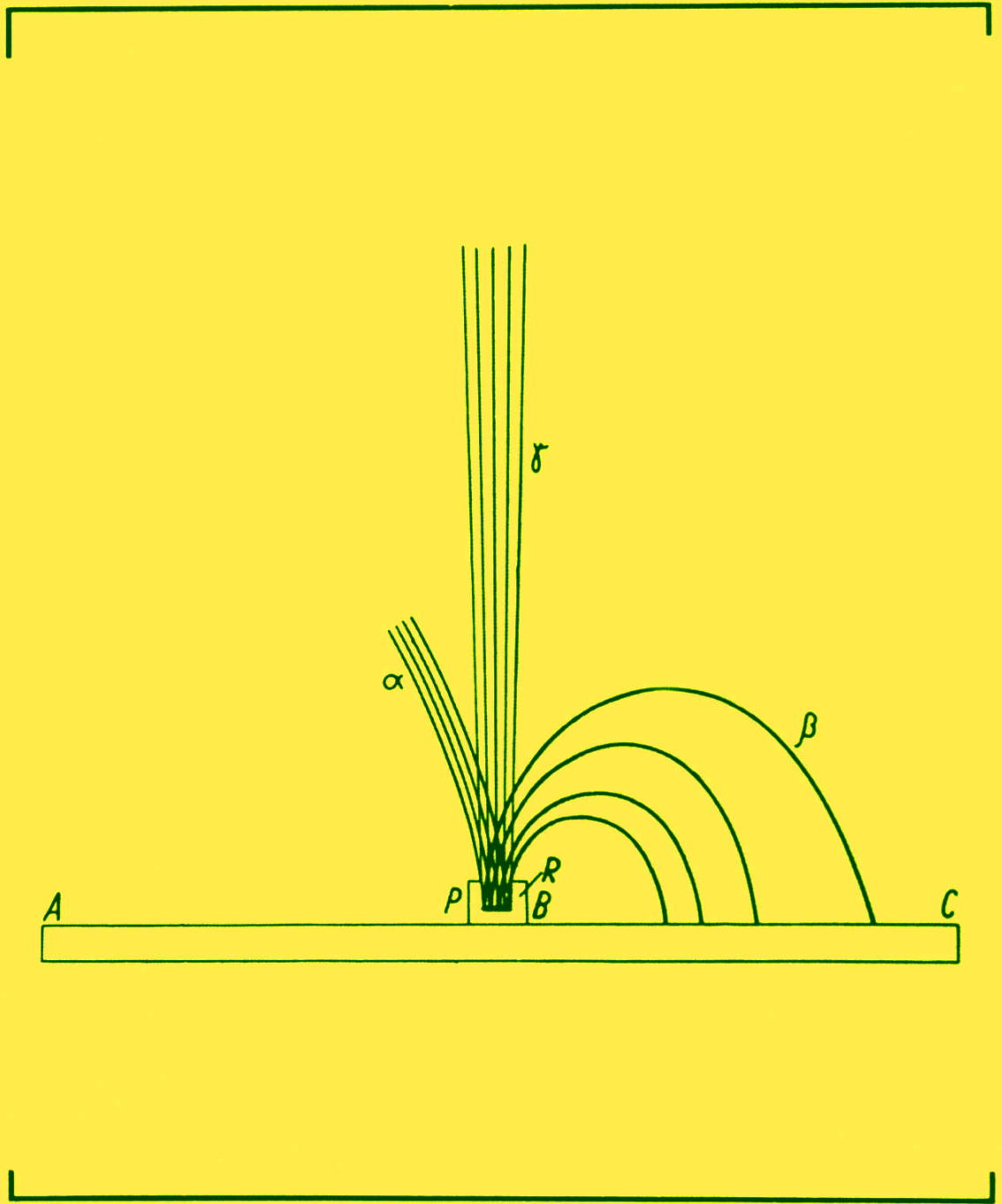
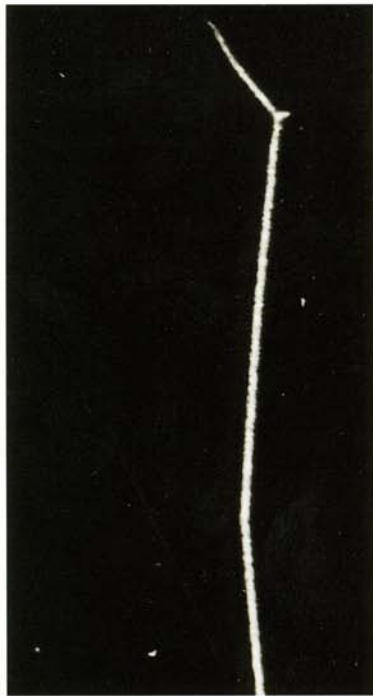


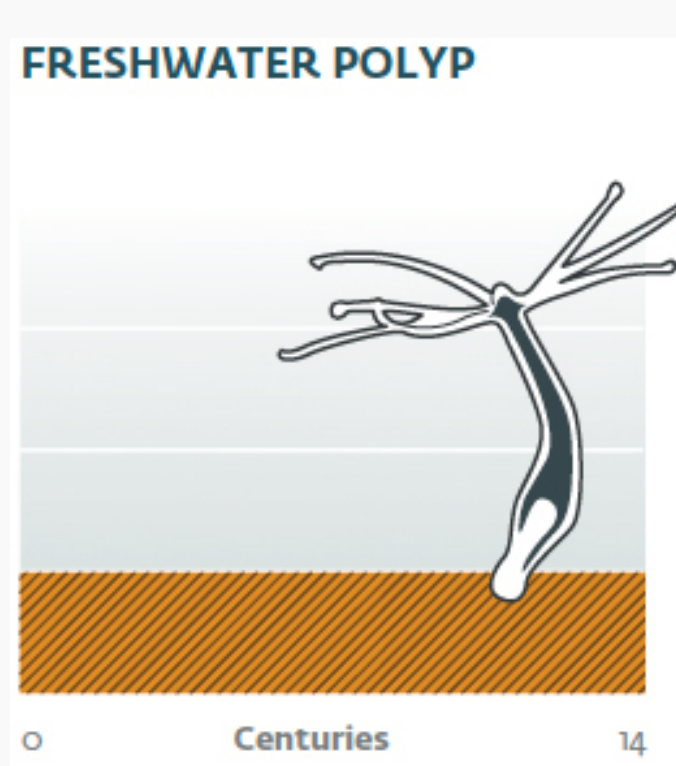
la radioattività

alcuni nuclei emettono spontaneamente e in modo casuale radiazioni di varia energia:

- alfa: radiazioni con carica elettrica positiva
doppia di quella elettronica e
massa 4 volte quella del protone
[nuclei di elio: due protoni e due neutroni]**
- beta: radiazioni costituite da un elettrone**
- gamma: radiazioni elettromagnetiche, neutre,
di altissima frequenza**

le radioattività alfa e beta trasformano nuclei in nuclei di elementi differenti



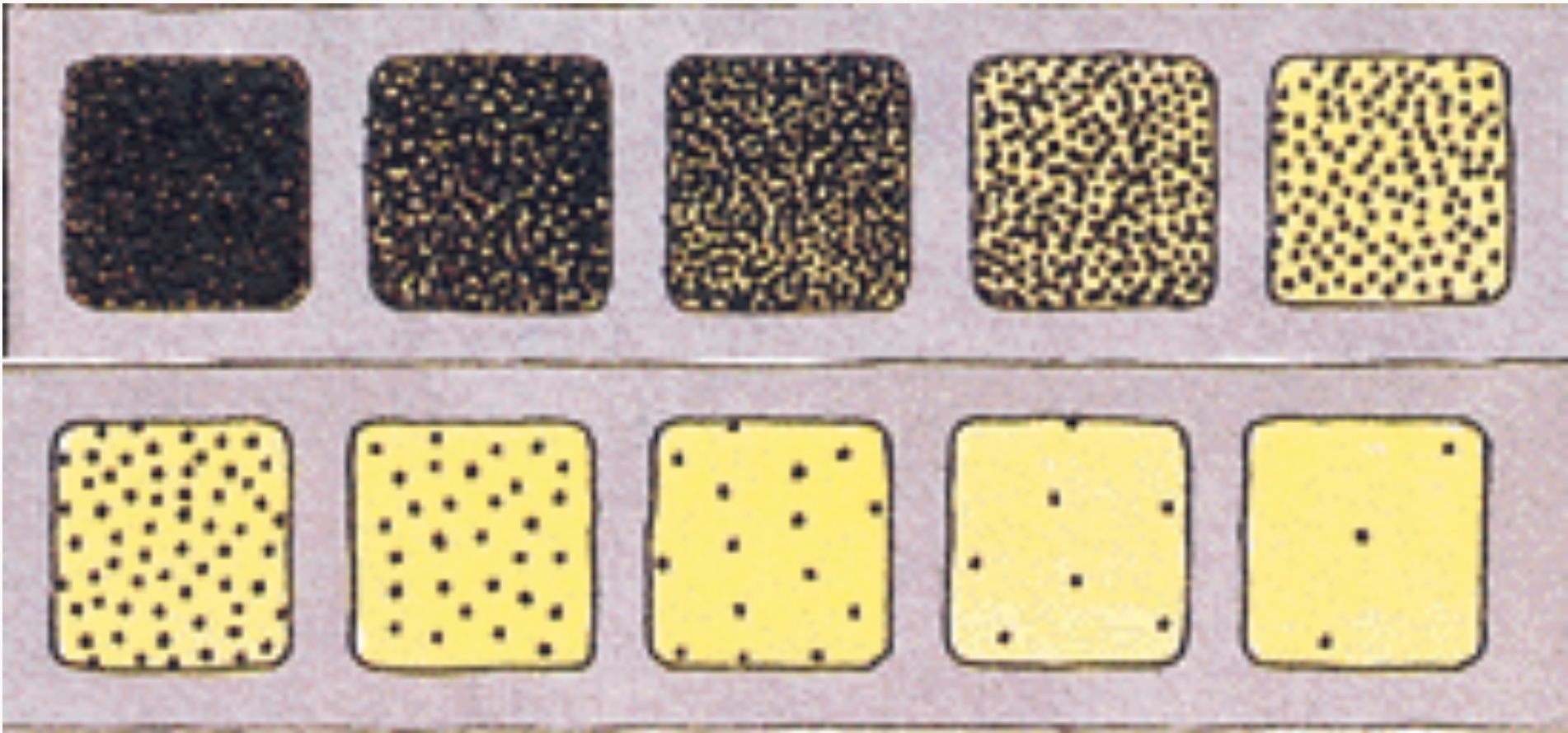


i nuclei radioattivi “non invecchiano”:
 la probabilità di decadere rimane costante nel tempo ed è espressa dalla costante di decadimento λ

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$$

il tempo di dimezzamento è quando metà dei nuclei iniziali sono decaduti

$$N(T_{1/2}) = \frac{1}{2} N_0; \quad T_{1/2} = 0,693/\lambda$$



popolazione residua dopo successivi tempi di dimezzamento

Uranio naturale

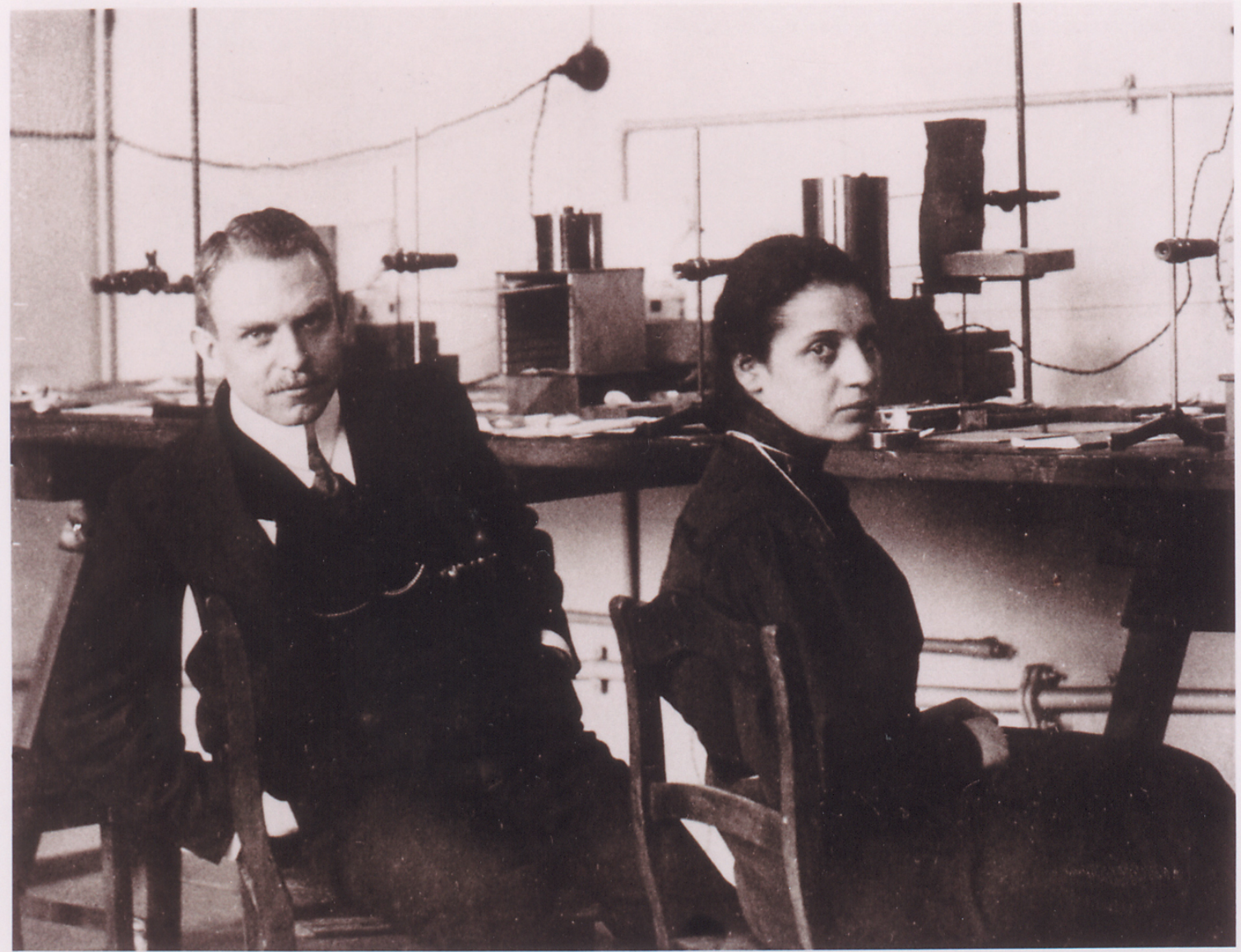
numero atomico (protoni) = 92

tre isotopi, tutti radioattivi

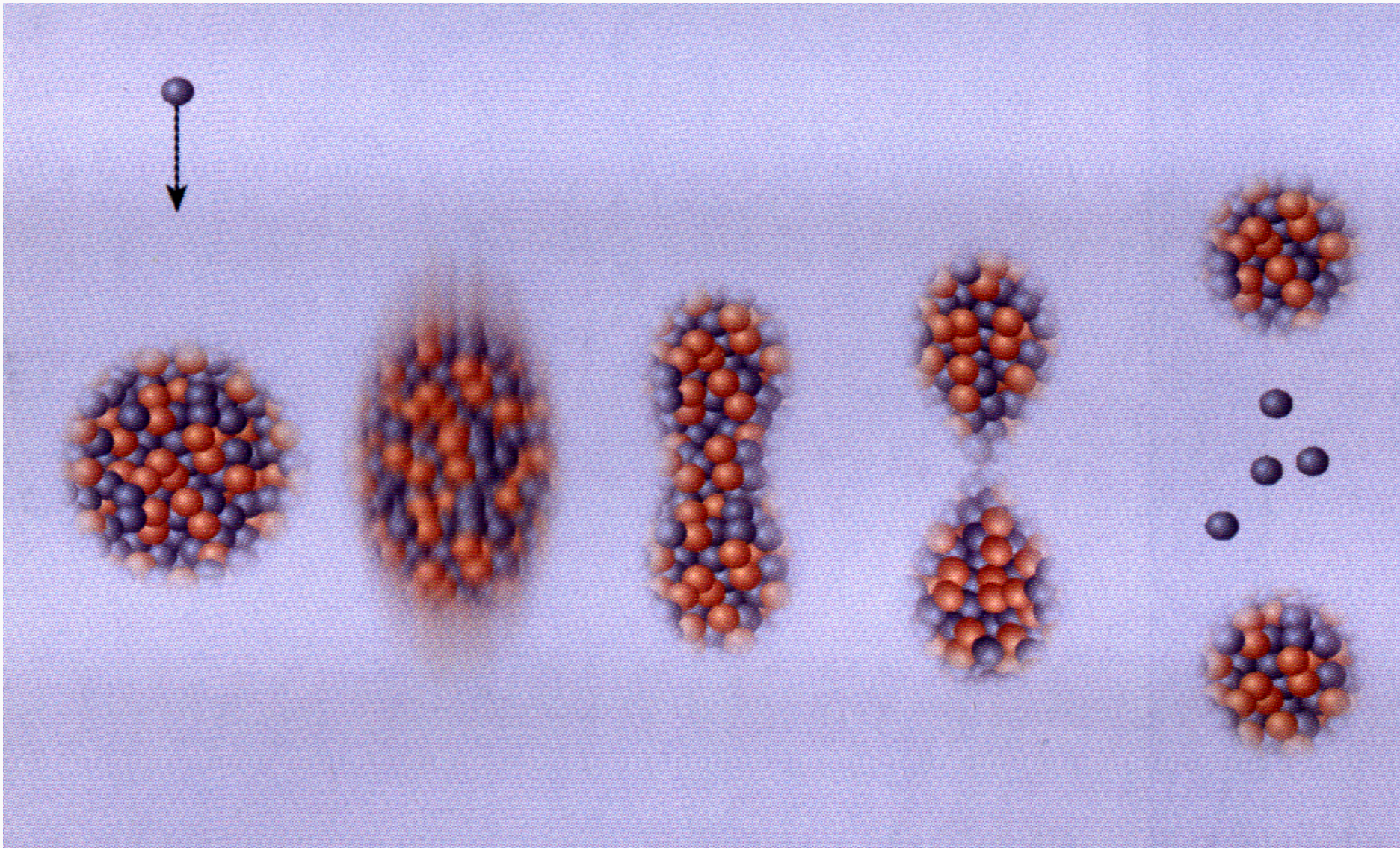
U-238	99,2745%	$T_{1/2}$	$4,468 \times 10^9$ anni
-------	----------	-----------	--------------------------

U-235	0,72%	$T_{1/2}$	$7,038 \times 10^8$ anni
-------	-------	-----------	--------------------------

U-234	0,0055%	$T_{1/2}$	$2,455 \times 10^5$ anni
-------	---------	-----------	--------------------------



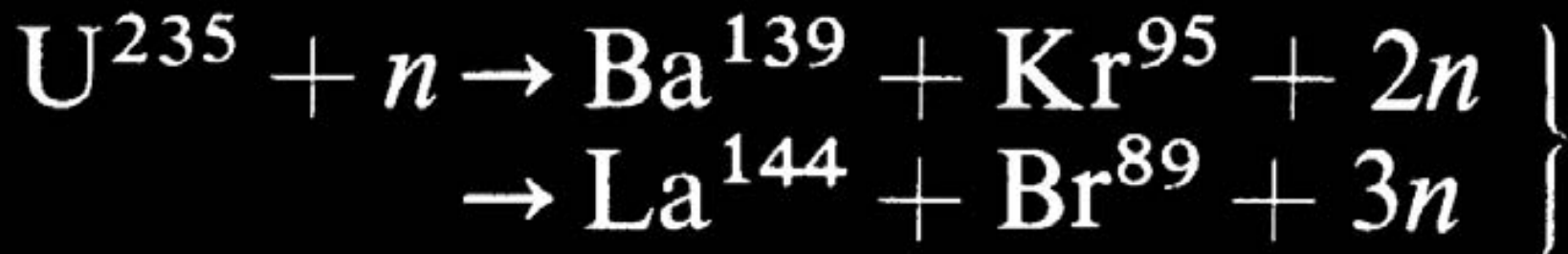
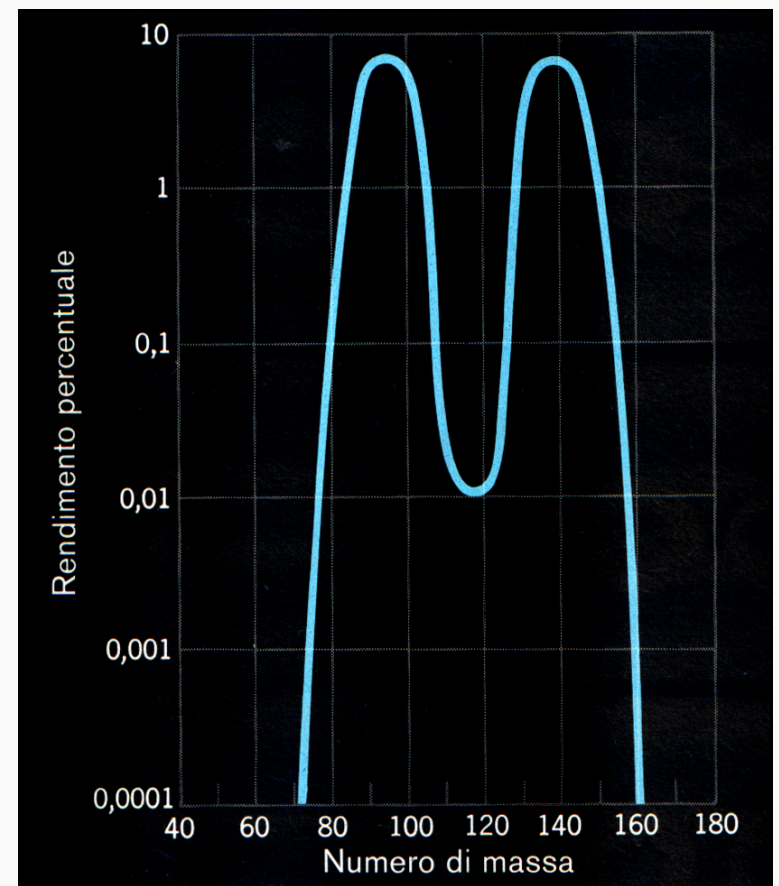
Otto Hahn e Lise Meitner scoprono un nuovo processo nucleare: la fissione (dicembre 1938)



**la fissione nucleare: un nucleo di uranio
assorbe un neutrone e si spacca in due**

Reazioni di fissione

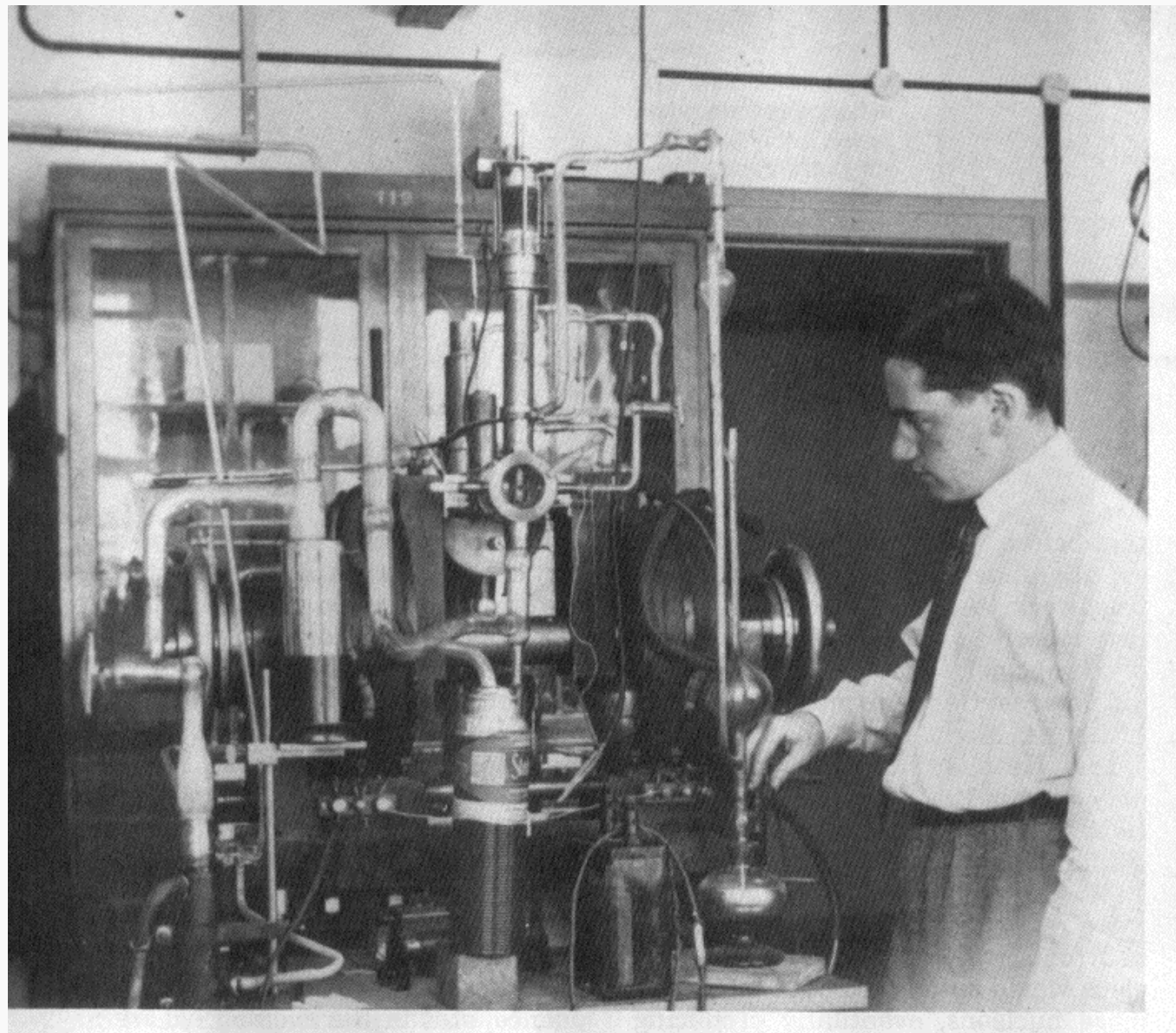
- molte possibilità
alternative



sorpresa!

**Copenhagen
dicembre
1938:**

**Otto Frisch misura l'energia della fissione:
è enorme!**



**L'unità di misura dell'energia nel microcosmo è
l'elettronvolt eV: energia di una carica elementare *e*
che attraversa una differenza di potenziale di 1 V
1 eV equivale a $1,602176565(35) \times 10^{-19}$ joule
o a circa $3,822 \times 10^{-20}$ calorie**

**è estremamente piccola
per il mondo ordinario**

**Un battito d'ala di una
farfalla richiede 1 GeV
di energia
(un miliardo di eV)**



Energie chimiche e nucleari

combustione di un atomo di carbonio	4,2 eV
esplosione molecola TNT	11 eV

radioattività alfa	4 MeV
fissione di un nucleo di uranio-235	200 MeV

il fattore 20 milioni fra energia chimica e energia di
fissione è mostruoso
rende qualitativa la differenza

**fattore 20 milioni:
una coda di 3
persone diventa
di 60 milioni**



**fattore 20 milioni:
una lezione
da 50 minuti
dura 19 secoli**



**fattore 20 milioni:
un bacio
da 1 minuto
dura 38 anni**



Energia dalla fissione di 1 kg di uranio

il numero di atomi in una massa di dimensioni ordinarie è enorme

ci sono circa $2,58 \times 10^{24}$ atomi in un kg di uranio

$$E = 2,58 \times 10^{24} \text{ atomi} \times 200 \text{ MeV}$$

$$= 2,58 \times 10^{24} \times 200 \times 10^6 \times 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$= 8,256 \times 10^{13} \text{ J} \approx 20 \text{ GWh}$$

$$\approx 18 \text{ kton [come 18 mila tonnellate di tritolo]}$$

una centrale elettronucleare da 1GWe “brucia”
uranio-235: $\approx 47 \text{ mg}$ al secondo, $\approx 1,3 \text{ t}$ all’anno

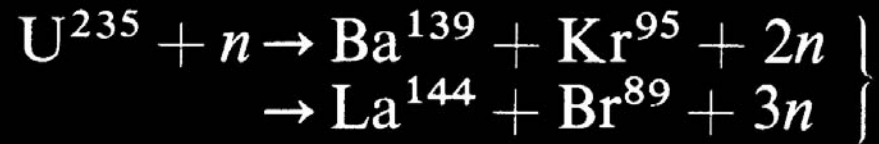
sorpresa!

**è l'uranio-235
[l'isotopo raro]
a subire fissione**

**Niels Bohr,
primavera 1939**



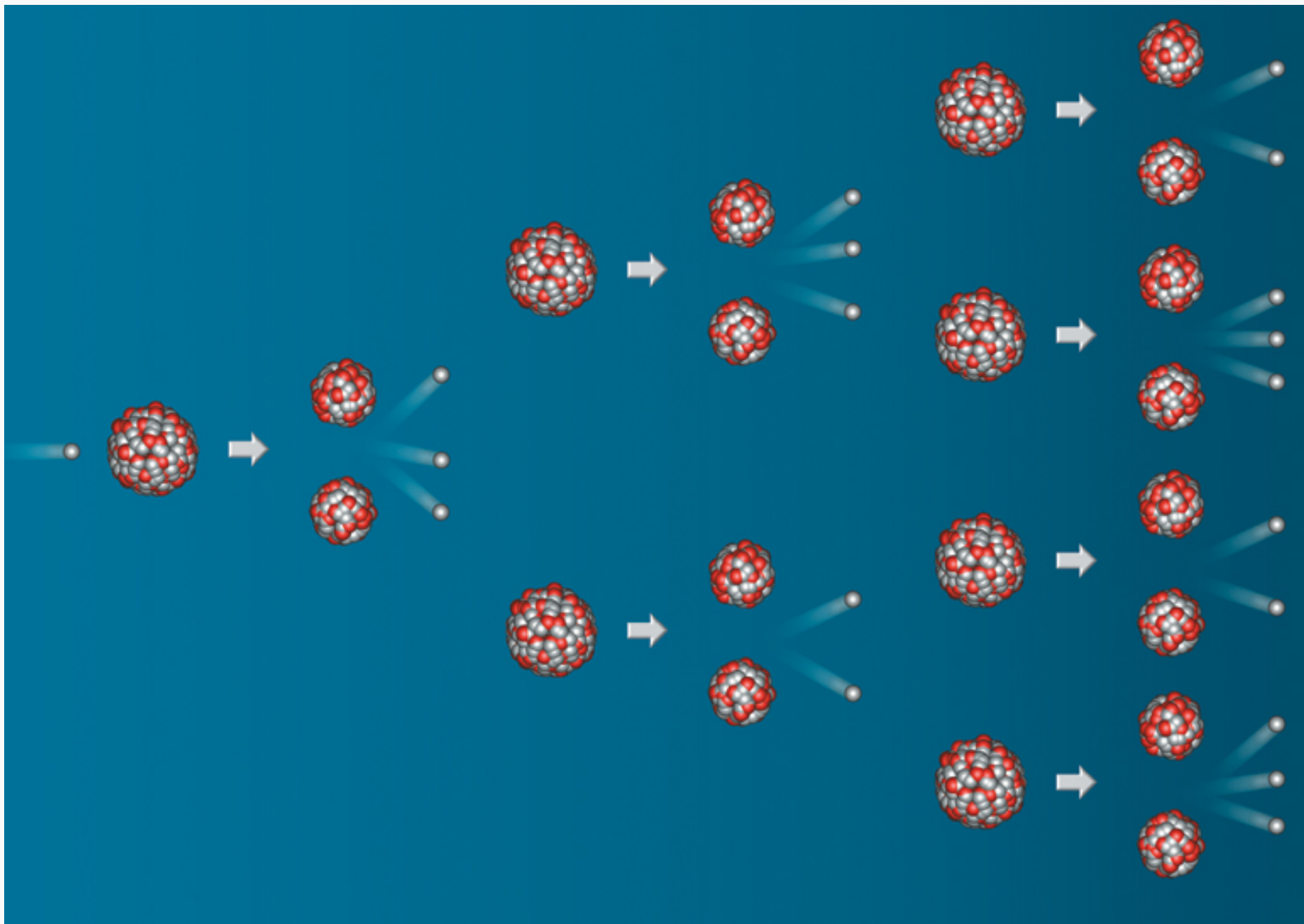
sorpresa!
nella fissione vengono
emessi nuovi neutroni



⇒ possono produrre
altre fissioni, in un
processo a catena

Enrico Fermi,
New York, primavera 1939



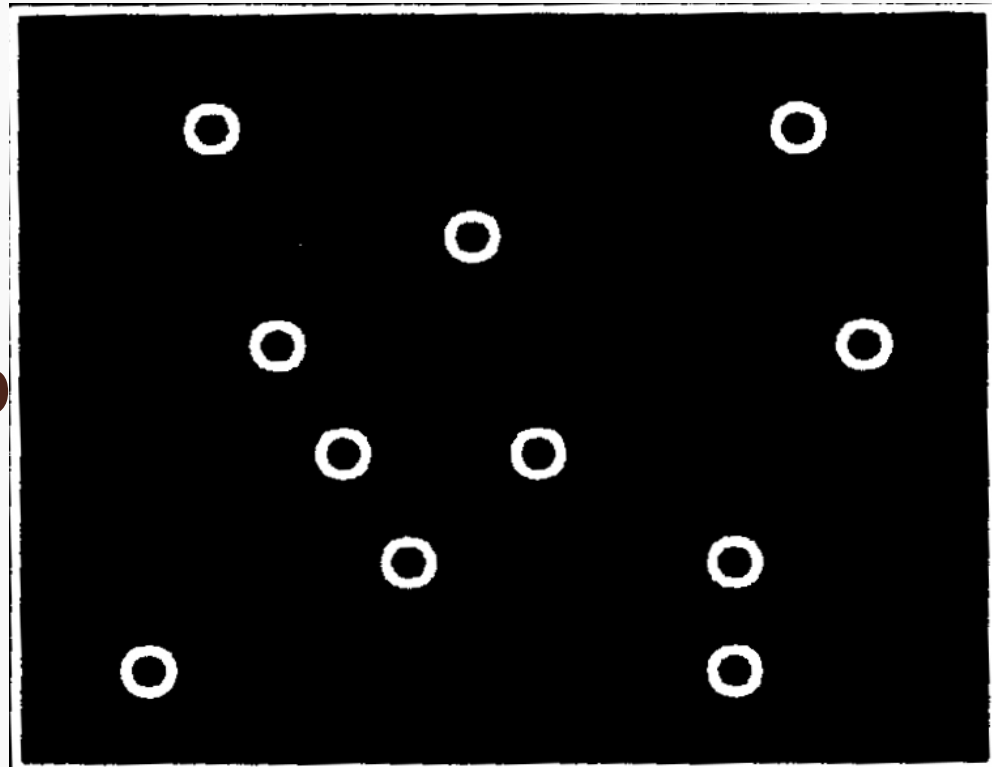


Condizioni per una reazione a catena

- in ogni fissione deve venir generato più di un neutrone
- i neutroni devono interagire con i nuclei fissili (uranio-235 o plutonio); anche se questi materiali sono molto densi, gli atomi sono quasi del tutto vuoti e i neutroni possono sfuggire senza trovare nuclei fissili sul loro cammino
- a seguito dell'interazione devono produrre fissione e non processi alternativi
- i neutroni non devono venir assorbiti da impurità

visuale dei neutroni nell'uranio

- il raggio dei nuclei è $\approx 1 \text{ fm} = 1 \times 10^{-15} \text{ m}$
- la densità dell'uranio è $\approx 19 \text{ g/cm}^3$
- il numero di nuclei di uranio per cm^3 è $\approx 4,9 \times 10^{22}$
- la distanza fra nuclei è $\approx 2,7 \times 10^{-10} \text{ m}$
27 000 volte il raggio del nucleo



Processi alternativi nell'interazione neutrone-uranio

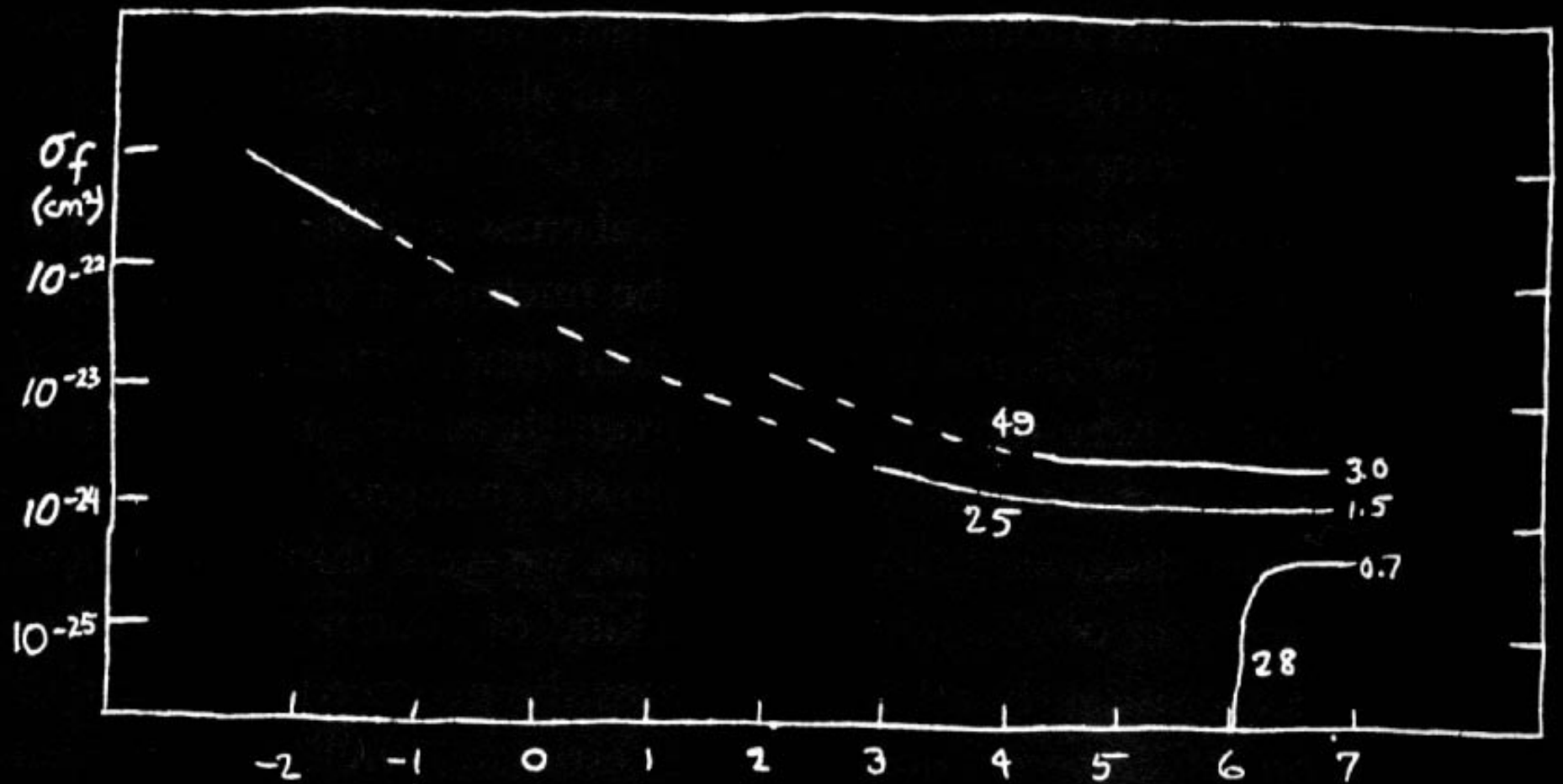
- **diffusione elastica**
 - **diffusione con perdita di energia**
 - **assorbimento senza fissione**
 - **reazioni nucleari**
-
- **ogni processo avviene con una precisa probabilità**
 - **le probabilità dipendono dall'energia del neutrone**

Neutroni di diversa energia hanno differenti probabilità di essere catturati o di produrre fissione

	neutroni termici			neutroni veloci		
isotopo	σ fissione	σ cattura	rapporto % fissione/totale	σ fissione	σ cattura	rapporto % fissione/totale
U-233	530	45	90	1,9	0,3	80
U-235	579	100	85	2,0	0,5	80
U-238	-	3	-	0,05	0,3	17
Pu-239	741	267	74	1,9	0,6	76
Pu-240	-	290	-	0,4	0,6	40
Pu-241	1009	368	73	2,6	0,6	81
Pu-242	-	19	-	0,3	0,4	43
Am-241	3	832	0,4	0,4	1,9	17

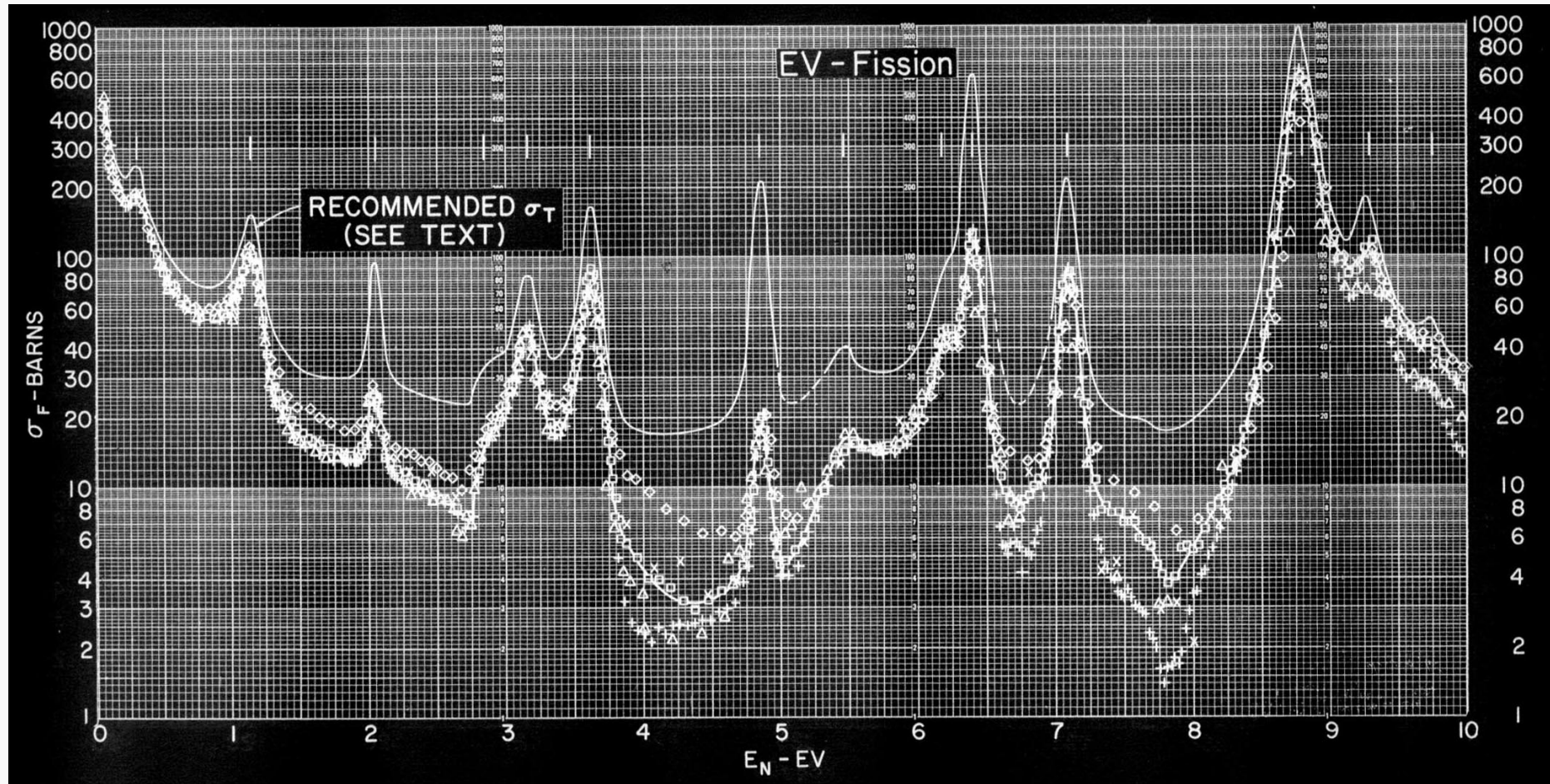
Neutroni veloci e neutroni termici

- i neutroni emessi nella fissione sono “veloci”
 - energia media 2 MeV
 - velocità media 20 000 km/s
 - sigma-fissione 2,0 sigma-cattura 0,5
- neutroni “termici” hanno l’energia dell’agitazione termica alla temperatura ambiente
 - energia media 0,025 eV
 - velocità media < 2 km/s
 - sigma-fissione 579 sigma-cattura 100



(thermal) log neutron energy in EV.

Recenti misure della frequenza di reazioni di fissione di uranio-235 in funzione dell'energia dei neutroni termici



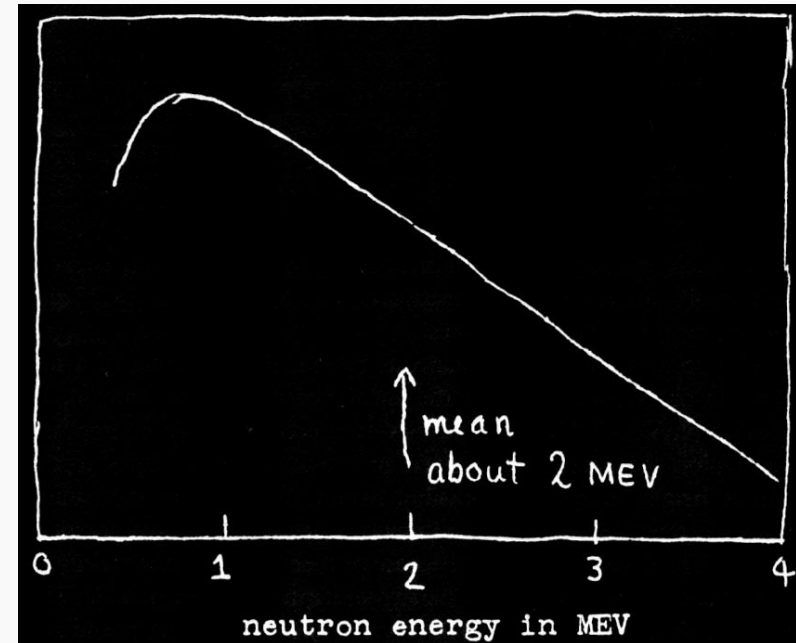
“termalizzare” i neutroni

- diffondere i neutroni da nuclei leggeri: idrogeno, carbonio, deuterio (D=H-2)
- aspettare che avvengano gli urti necessari: 18 con idrogeno, 31 con deuterio, 118 con carbonio
 $\approx 40 \mu\text{s}$ di intervallo fra due interazioni successive con uranio

~ inserire l'uranio in un moderatore:

acqua / acqua pesante (D_2O) / grafite

~ richiede una struttura di molti metri cubi



Il parametro caratteristico della reazione a catena è il fattore k di moltiplicazione dei neutroni:

k : rapporto fra il numero di neutroni nella generazione corrente e quello nella generazione precedente

$k < 1$ condizione sottocritica

$k = 1$ condizione critica

$k > 1$ condizione supercritica

$\Rightarrow$ la reazione a catena si mantiene solo se k è maggiore o uguale a 1

I reattori naturali di Oklo (Gabon)

[scoperti nel 1972]

- 1950 milioni di anni fa
- 17 reattori naturali intermittenti durante 150.000 anni
- consumate fra 5 e 6 tonnellate di uranio
- generati 500 GJ di energia (come un reattore nucleare da 1000 MWe in circa 5 anni)
- ~ il materiale era più ricco in uranio-235 (circa il 3%)
- ~ era presente acqua che è servita da moderatore



massa critica

per avere un'esplosione occorre una reazione a catena supercritica ($k > 2$)

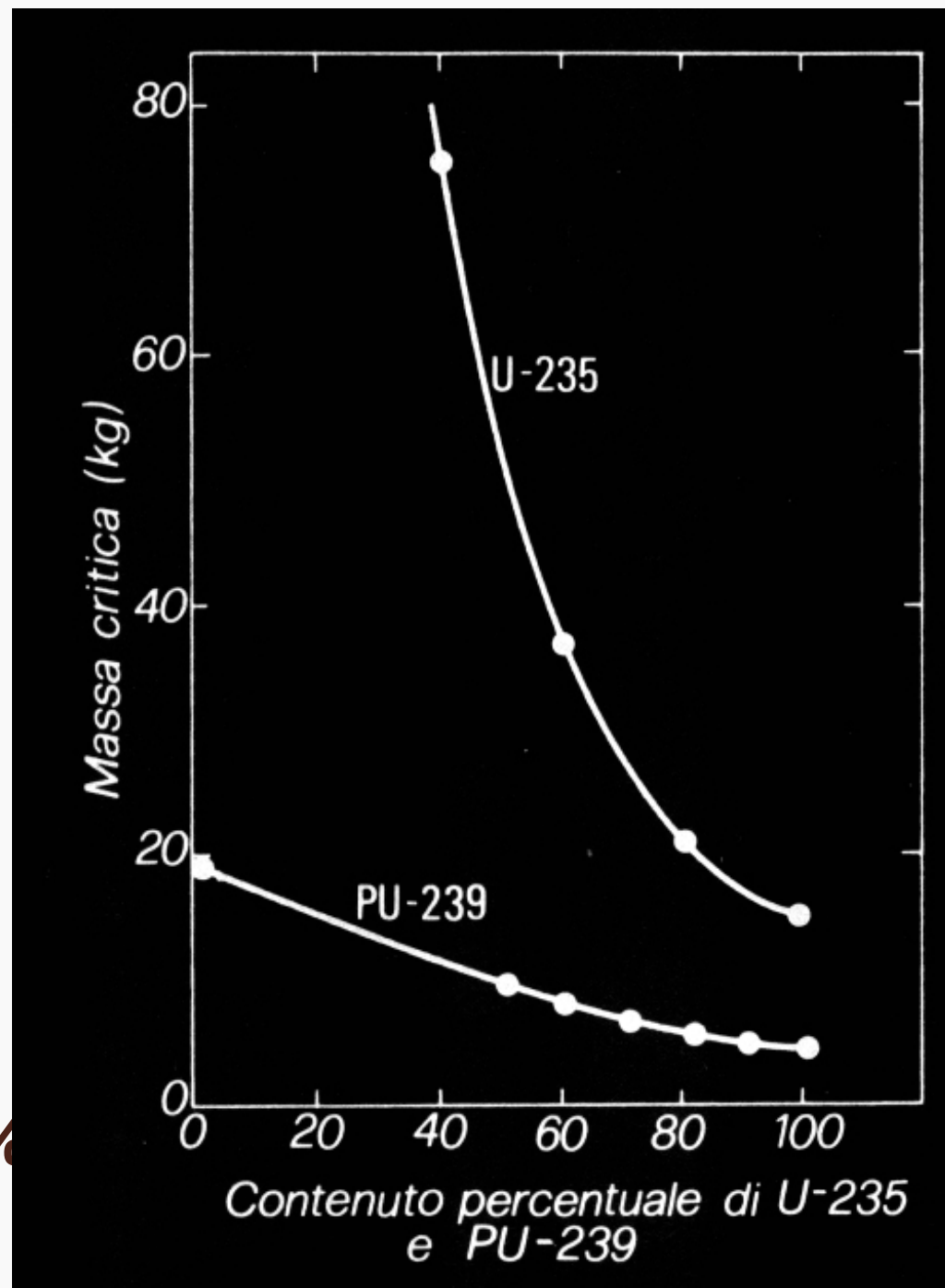
i neutroni devono incontrare abbastanza nuclei fissili sul loro cammino prima di uscire dal materiale

- alta densità del materiale
- sufficiente massa
- “riflettore” di neutroni attorno al materiale

la minima quantità di materiale necessaria per la reazione a catena costituisce la massa critica

massa critica

poiché sono fissili solo uranio-235 e plutonio-239, la massa critica dipende dalla percentuale di questi nuclidi presente nel combustibile - per le bombe si usa uranio e plutonio di purezza superiore al 90%



Fase uno, 1939: misura dei parametri di base per la fissione a catena

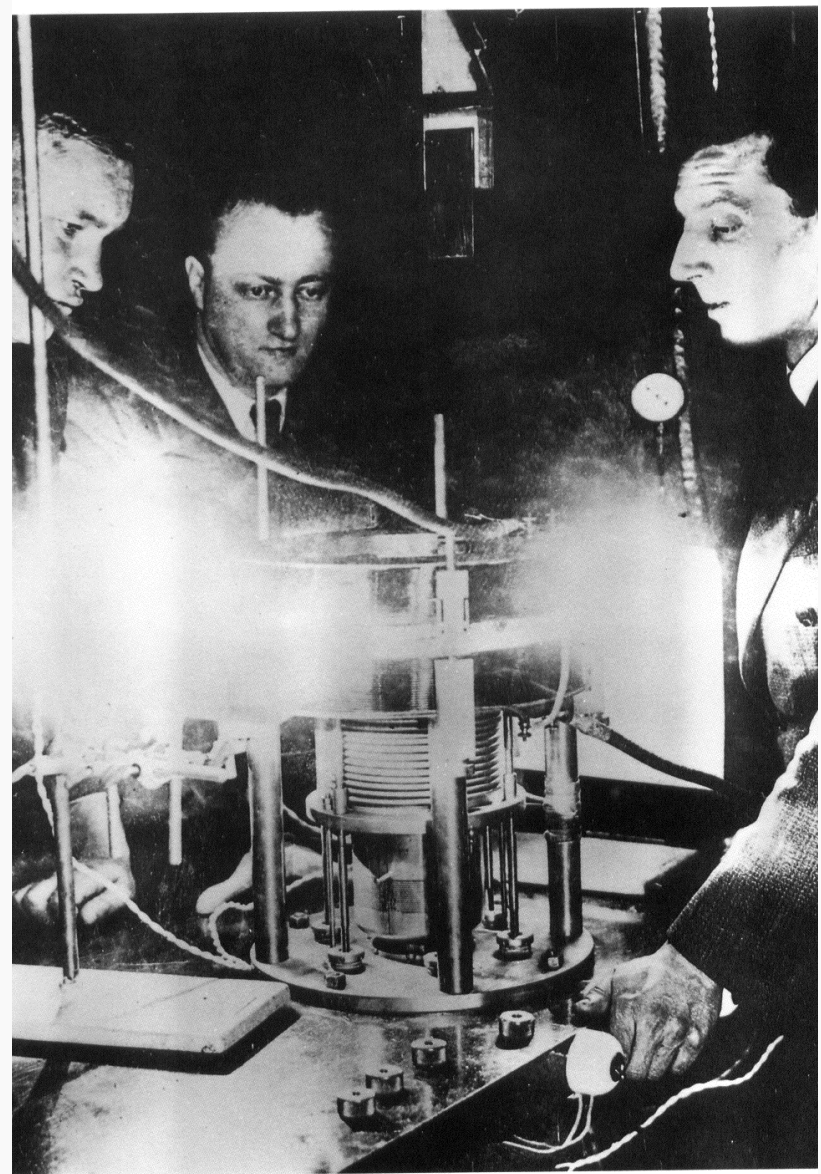
- **la fisica nucleare non era sviluppata**
- **la fissione era un fenomeno nuovo e sconosciuto**
- **mai prodotto uranio in forma metallica e quindi ignote le sue proprietà meccaniche**
- **le caratteristiche dell'uranio-235 mai studiate**
- **sconosciuti i metodi per isolare l'uranio-235**
- **ignote le condizioni per la fissione a catena**
- **servivano i valori esatti delle grandezze fisiche rilevanti per le varie reazioni coinvolte**
- **limitata disponibilità di strumentazione specifica**

Fase uno, 1939

- ricerche libere in tutto il mondo con pubblicazione dei risultati: tutti i fisici nucleari interessati
 - Fermi e Leo Szilard a New York
 - Frisch e Meitner a Copenhagen
 - Frédéric Joliot-Curie a Parigi
 - Paul Harteck, Wilhelm Groth, Georg Joos in Germania
 - Yoshio Nishina, Bunsaku Arakatsu in Giappone
 - Igor Vasil'evich Kurchatov, Yuli Khariton, Yakov Borisovich Zel'dovich in Russia
 - George Paget Thompson, Marcus Laurence Oliphant in Inghilterra
 - Edoardo Amaldi in Italia; sospende le ricerche, per evitare possibili applicazioni militari

Il programma più avanzato nel 1939: il gruppo di Frédéric Joliot-Curie a Parigi

- ~ dispone di un ciclotrone
- ~ risultati scientifici
 - acqua pesante miglior moderatore
 - teoria della reazione a catena [brevetti “segreti”]
 - stima la massa critica di ossido d’uranio per neutroni veloci e per neutroni lenti
- ~ interessi politico-militari
 - motori per sommergibili
- ~ sviluppi materiali
 - acquisizione dell’uranio dell’Union Minière belga (8 t)
 - acquisizione di tutta l’acqua pesante disponibile al mondo (185,5 kg) dalla Norsk Hydro norvegese



Fase 2 dal 1940: realizzare la fissione a catena – programmi militarizzati

indispensabile verificare che la fissione a catena si possa effettivamente produrre a livello macroscopico

~ francesi, inglesi, tedeschi e giapponesi ritengono necessario:

- usare acqua pesante come moderatore**
- arricchire l'uranio nella componente uranio-235**

~ Fermi (a New York) ritiene che si possa usare uranio naturale e grafite (pura) come moderatore

*** lui sapeva “parlare” ai neutroni ...**

Perché è indispensabile la reazione a catena

- se si vuole un'esplosione di ≈ 10 kton occorre far subire fissione a ≈ 1 kg di uranio-235 in qualche microsecondo**
- dato che ci sono $2,58 \times 10^{24}$ nuclei in 1 kg di uranio, servono almeno 10^{26} neutroni, tenuto conto che non tutti i neutroni producono fissione**
- nessuna sorgente artificiale si avvicina a flussi di neutroni così elevati (al massimo 10^{17} n/s)**
- solo la reazione a catena in ≈ 40 generazioni**

L'arricchimento dell'uranio – “estrazione” dell'isotopo uranio-235 dall'uranio naturale

una difficilissima sfida tecnologica

- ~ non esistono processi chimici
- ~ si deve giocare su una minima differenza di massa: solo 3 parti su 238
- ~ occorre “sminuzzare” l'uranio a livello atomico, per trattare atomo per atomo:
 - produzione di un gas
 - generazione di fasci di ioni

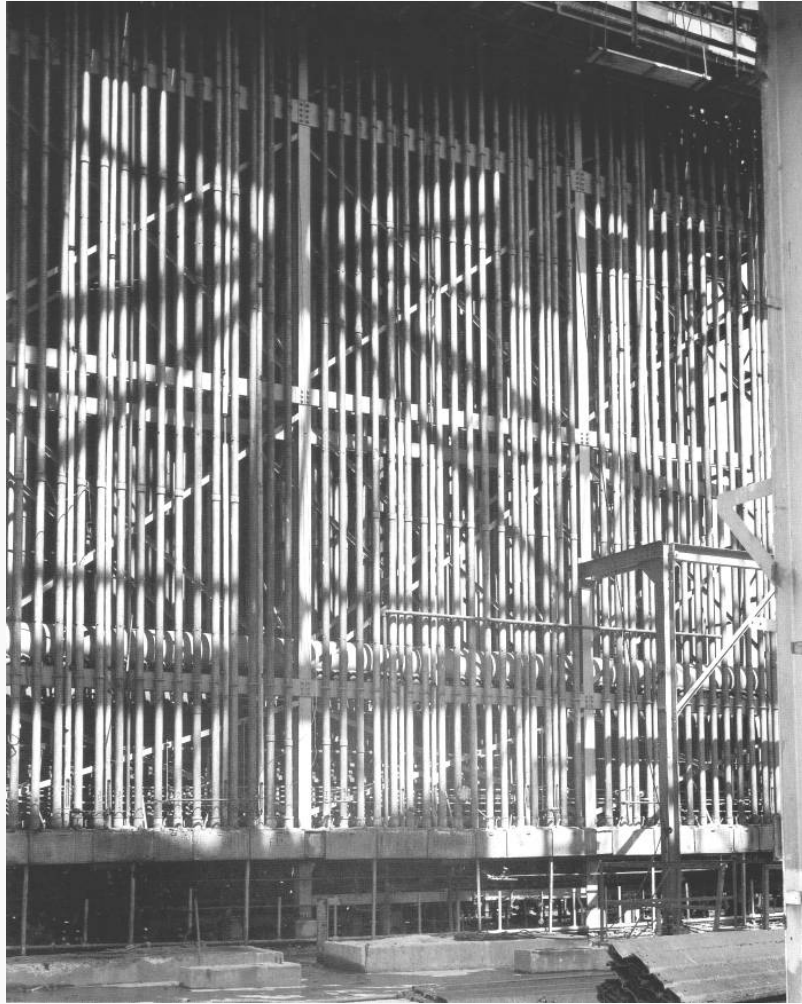
ossido di uranio “yellocake”



L'arricchimento dell'uranio

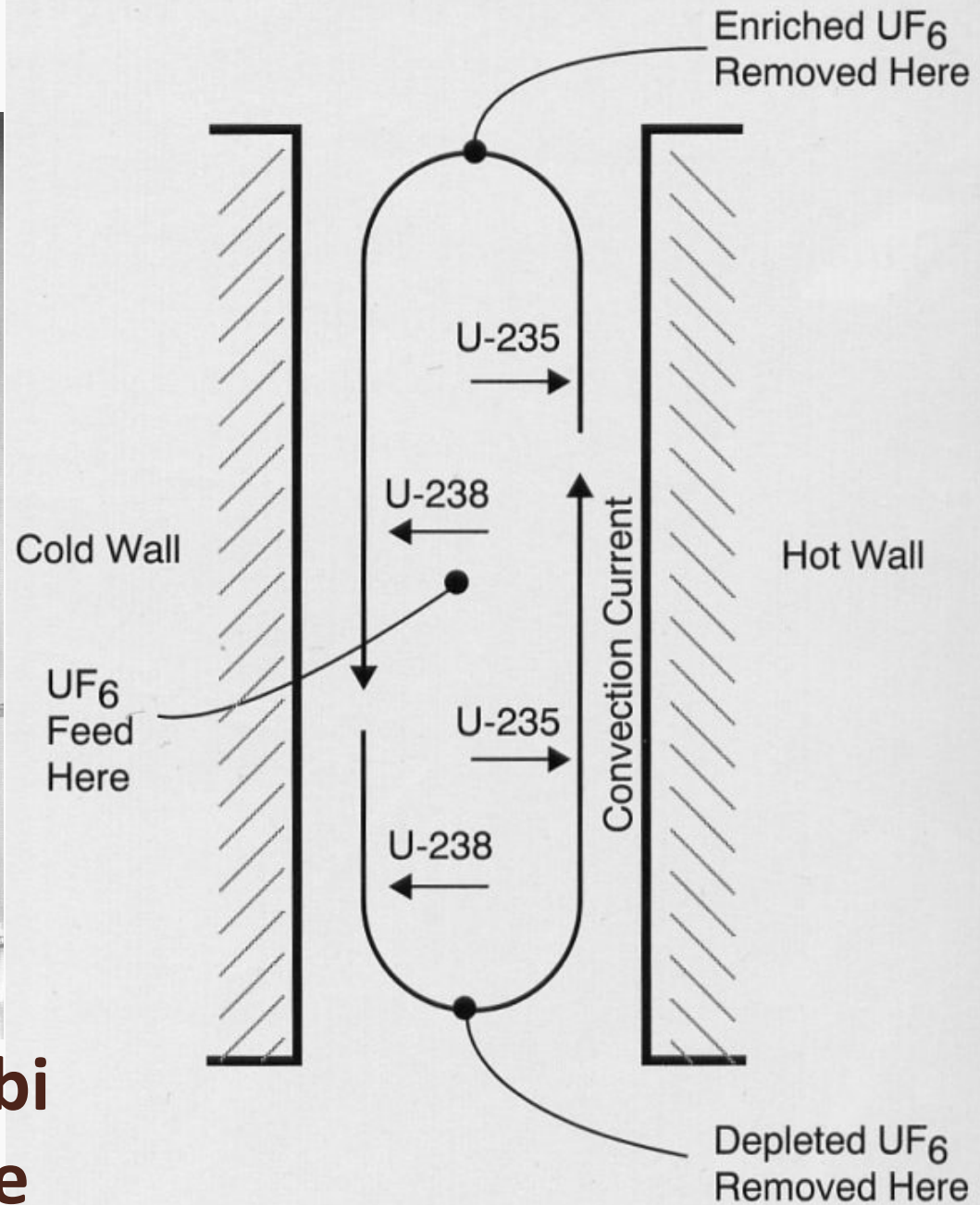
- ~ esiste un'unica forma gassosa di uranio:
l'esafluoruro UF_6 – un gas dalle orribili proprietà per le prime armi:
 - separazione termica (tubo di Clusius)
estremamente inefficiente
 - separazione magnetica
 - diffusione gassosa attraverso membrane
- ~ centrifugazione concepita dai tedeschi, ma non resa operativa – principale metodo attuale
- ~ processi aereodinamici
- ~ laser in fase di sviluppo

tubo di Clusius

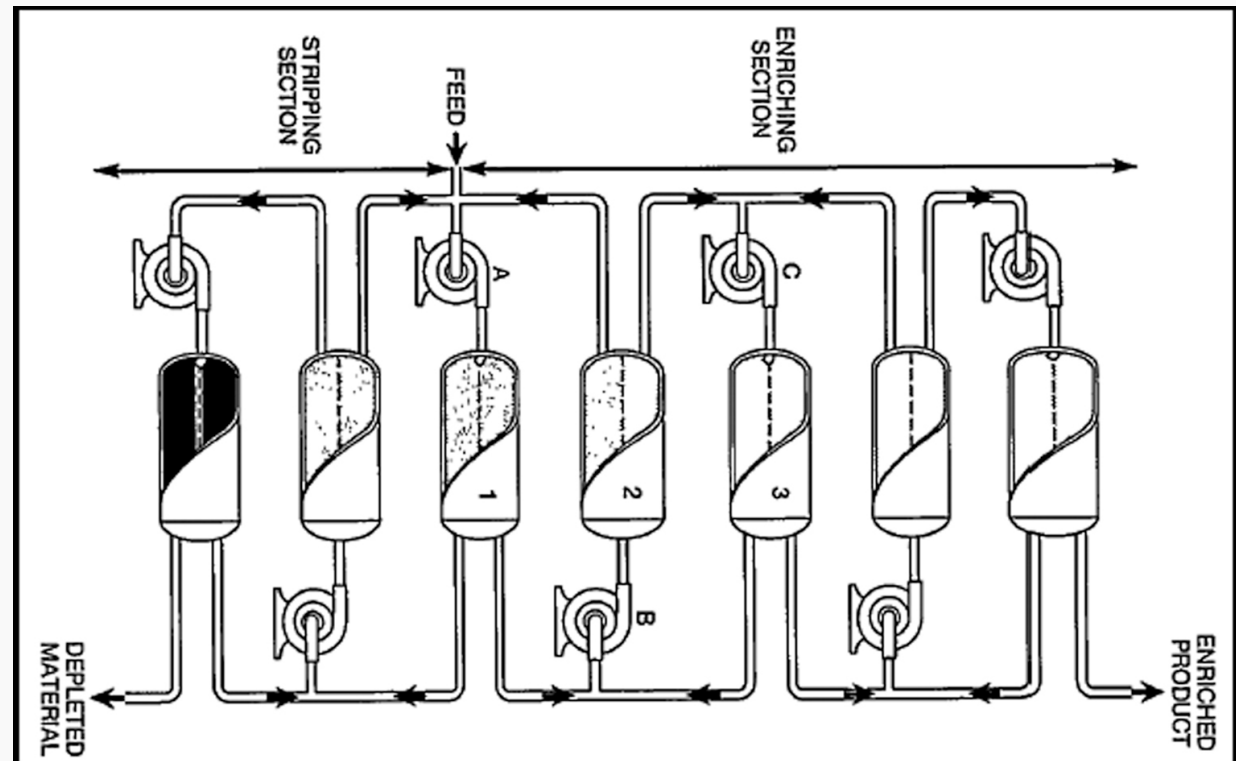
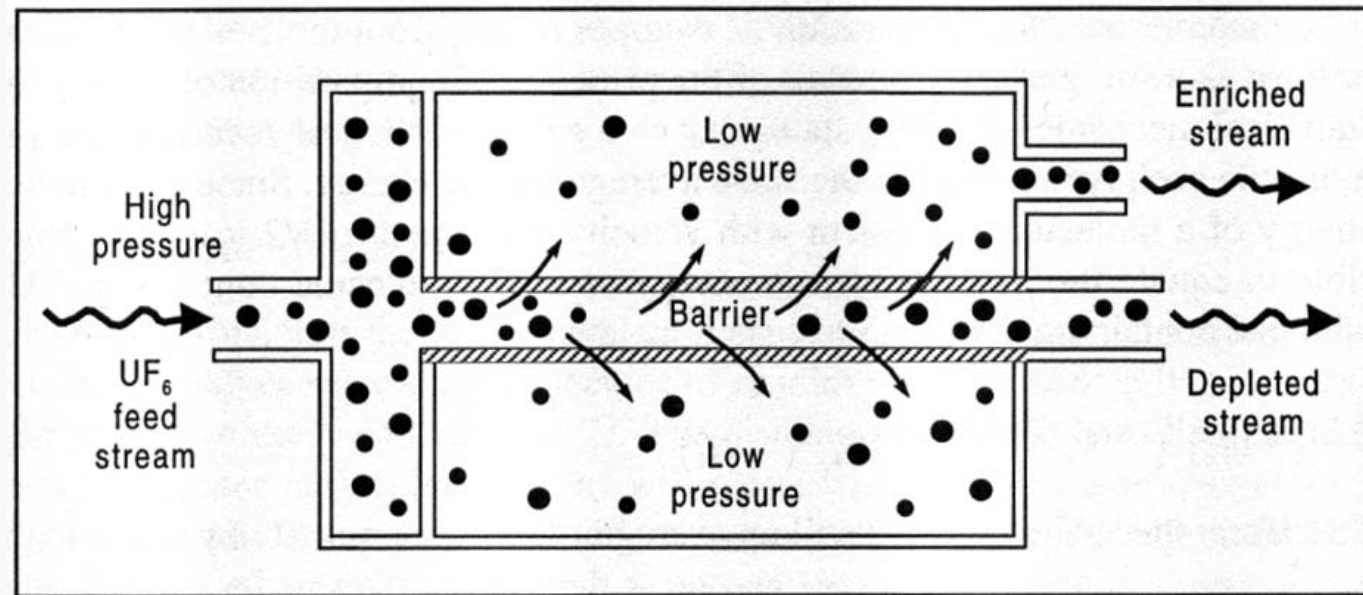


un impianto di 2100 tubi
fu costruito a Oak Ridge

Thermal Diffusion



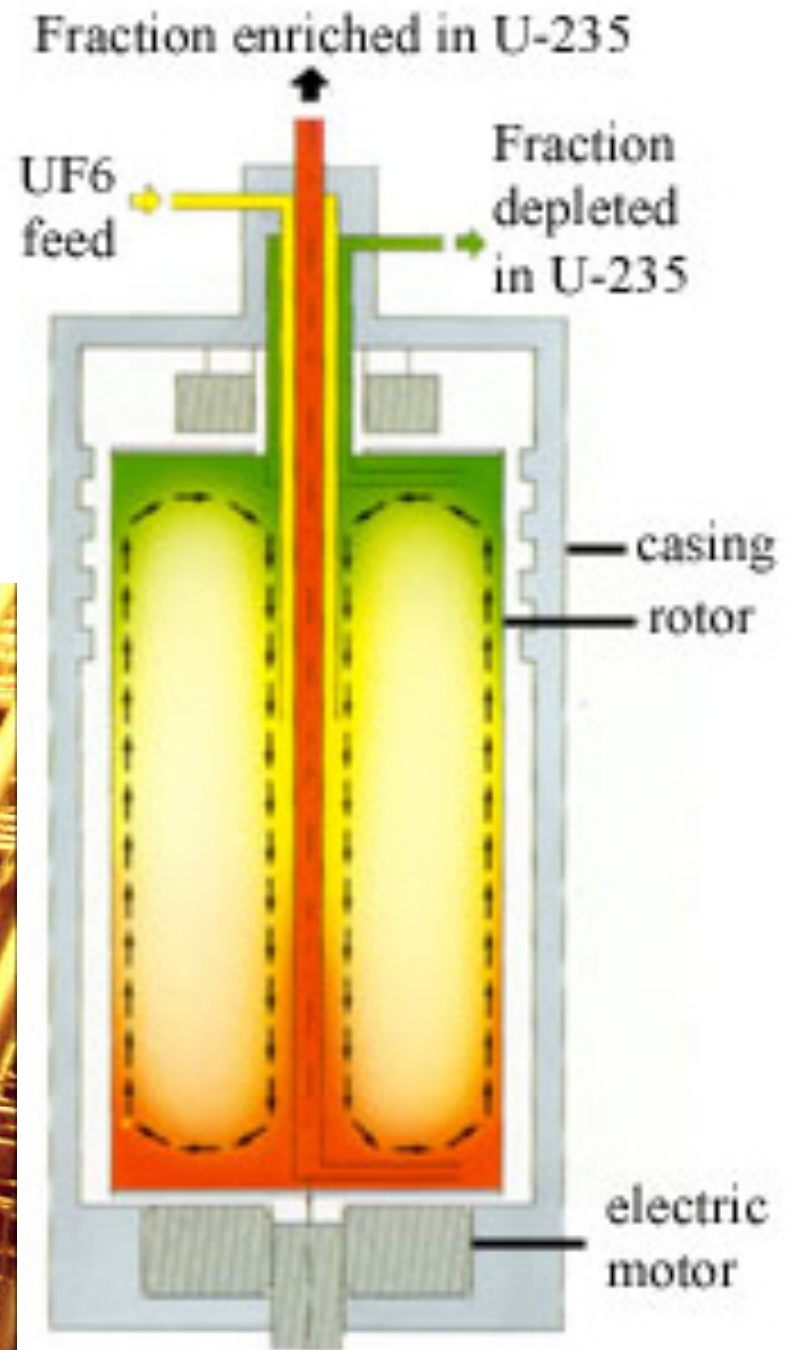
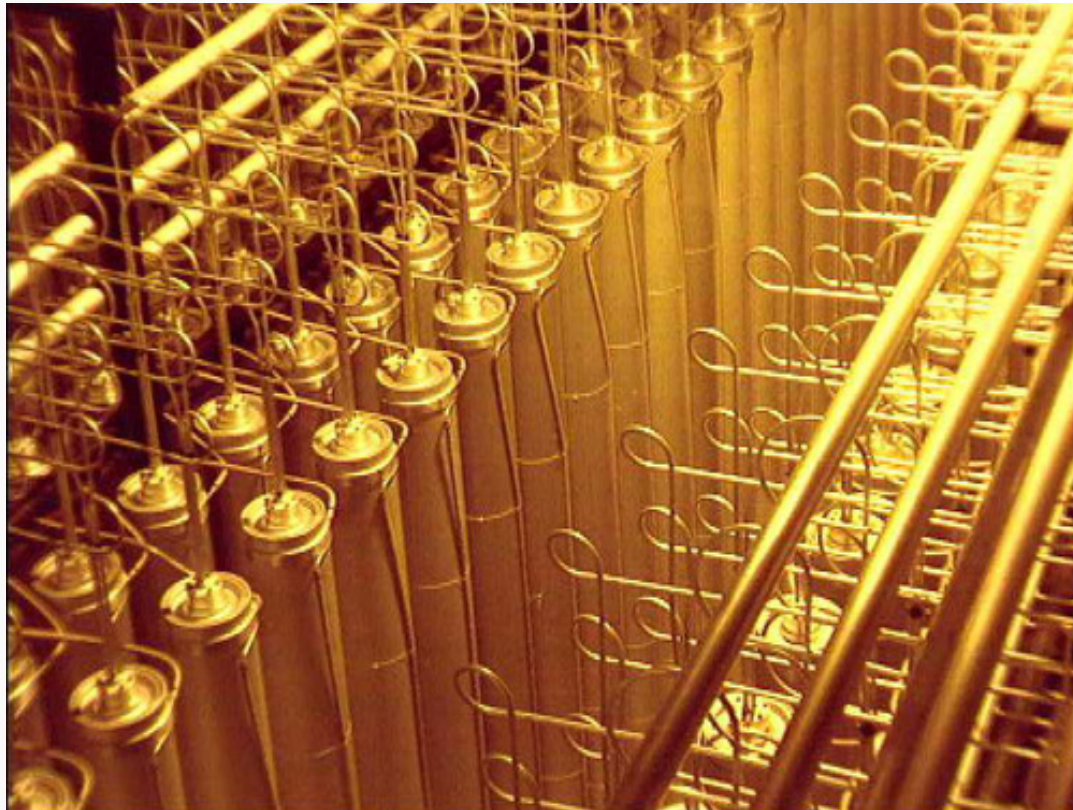
diffusione
gassosa
attraverso
membrane



impianto francese di diffusione gassosa
- richiedeva 4 reattori nucleari per 3GW



**ultracentrifughe per
floururo di uranio:
lunghe da 3 a 12 m,
compiono fra 50 e 70 mila
rotazioni al minuto**



arricchimento dell'uranio a qualità militare (WGU); uranio-235 > 90%

Tecnologia	fattore di separazione	numero di stadi per WGU al 90%	energia richiesta kWh/SWU
Diffusione gassosa	1,0040 – 1,0045	3500 – 4000	2500
Centrifugazione	1,2 – 1,5	40 – 90	100 – 200
Aerodinamica	1,015 – 1,030	540 – 1100	3600 – 4000

produrre 1 kg di WGU al 93% richiede circa 230 kg di uranio naturale e un'enorme quantità di energia

Il programma russo

tre decisioni:

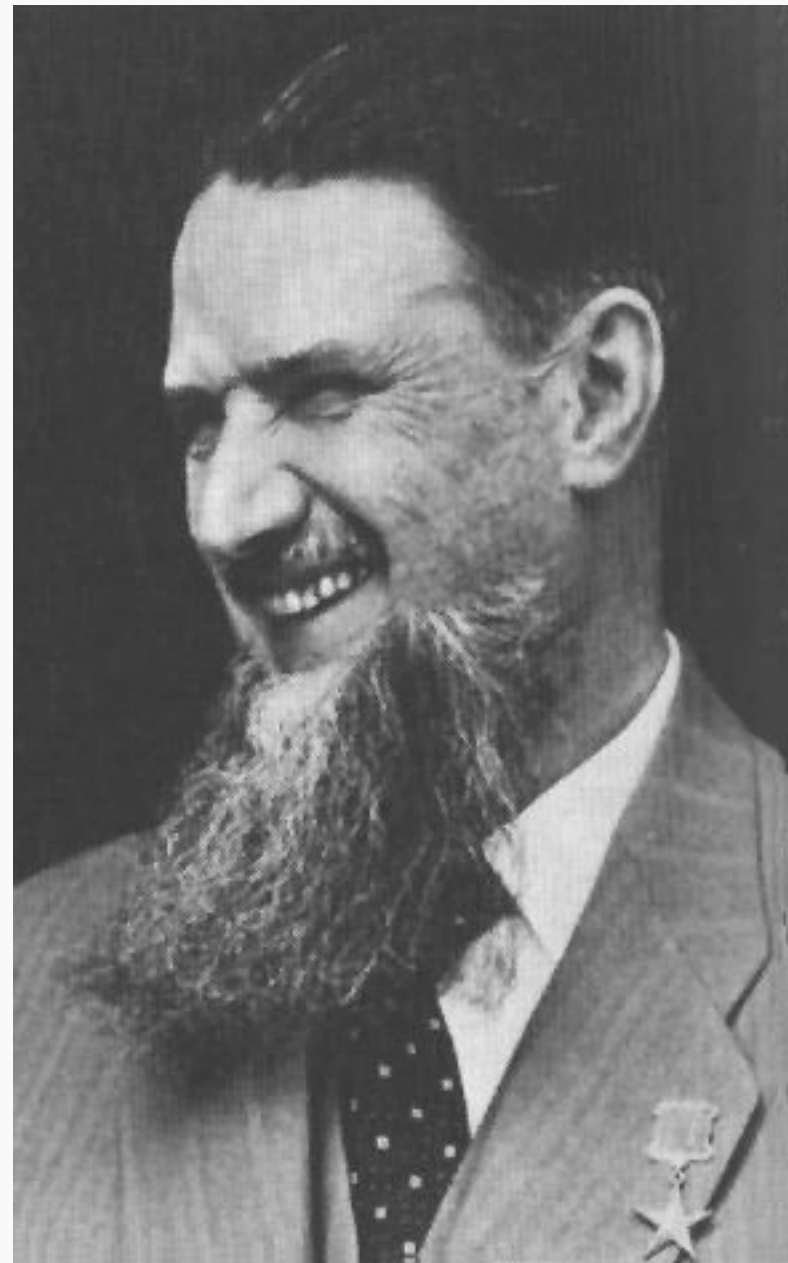
- nel 1940 l'Accademia delle scienze decide di non chiedere fondi speciali al governo per ricerche nucleari; all'invasione tedesca (giugno 1941) interrotta ogni attività sulla fissione**
- nel 1942 il Comitato per la difesa dello stato intraprende un programma militare ridotto**
- agosto 1945: l'URSS lancia un programma a tutto campo e senza limiti di mezzi per acquisire armi nucleari nel più breve tempo possibile**

URSS

**Kurchatov crea il Laboratorio
n. 2 a Mosca:**

- pila ad acqua pesante
- pila a grafite
- diffusione termica
- diffusione gassosa
- separazione elettromagnetica
- separazione del plutonio
- teoria della bomba

**Lavrenti Beria, capo del KGB,
dirige il programma**



Igor Kurchatov

Il programma giapponese

cinque fasi:

- 1. studi scientifici liberi sul fenomeno fisico (1939-40),**
 - 2. indagini preliminari da parte dei militari (1940-42),**
 - 3. analisi di fattibilità da parte di un comitato di scienziati sotto gli auspici della marina (luglio 1942-marzo '43),**
 - 4. il progetto Ni-go kenkyu a Tokyo finanziato dall'esercito (autunno 1942-aprile '45),**
 - 5. il progetto F-go kenkyu a Kyoto finanziato dalla marina dall'estate 1943 alla resa del Giappone.**
- iniziative largamente indipendenti e disarticolate, spesso in competizione**

Risorse

- pochissimo uranio disponibile
(~ 50 kg a Tokyo e ~100 kg a Kyoto)
- finanziamenti limitati
- poco personale (30 scienziati a Tokyo, 20 a Kyoto)
- limitata disponibilità di materiali adeguati
- i ciclotroni di Tokyo riservati a ricerche fondamentali

Risultati

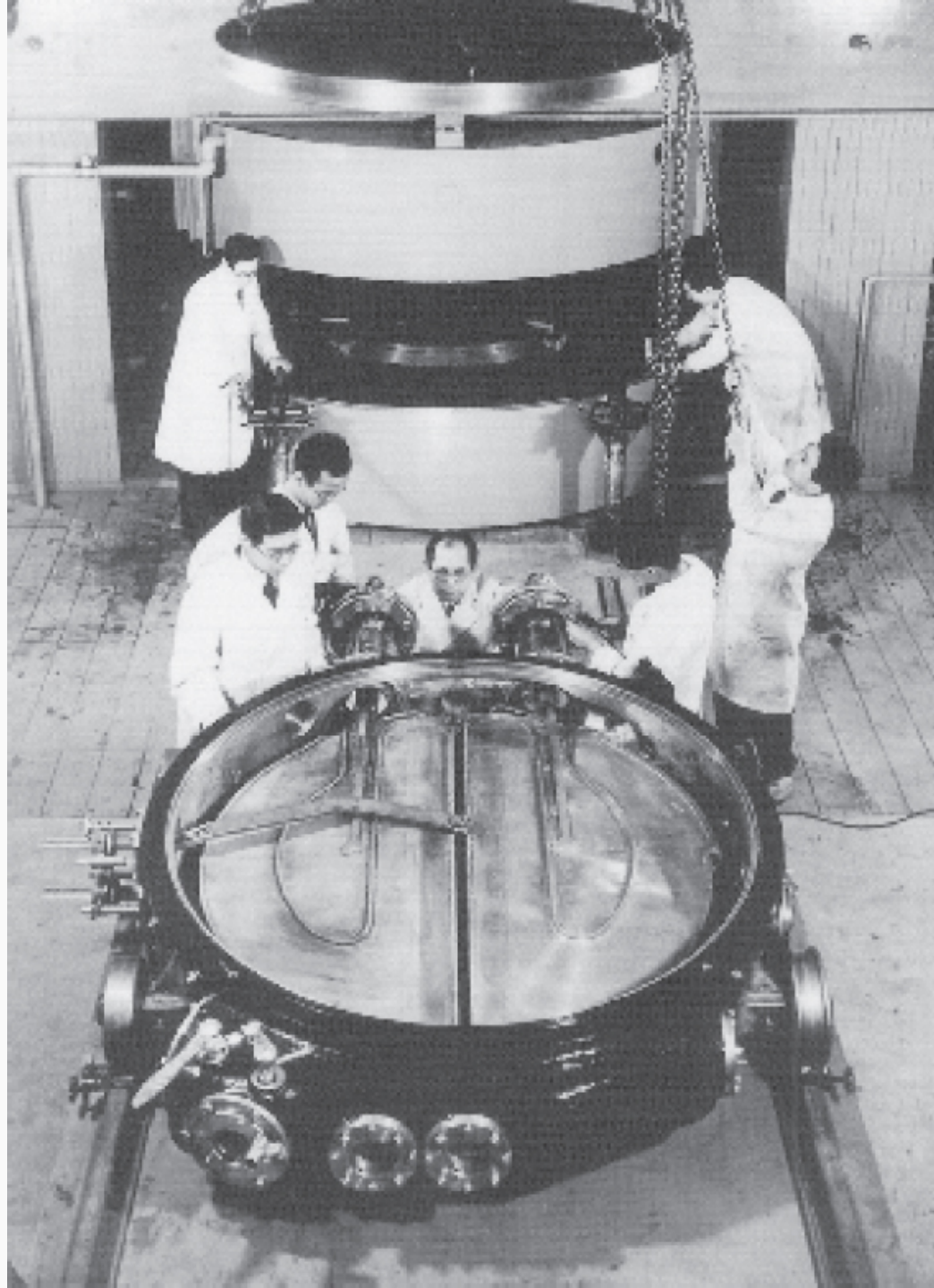
- teoria della reazione a catena inadeguata
- si considerano solo neutroni lenti
- tentativo di arricchimento per via termica
- progetto teorico di centrifuga

niente uranio arricchito

– nessuna prospettiva di fissione a catena

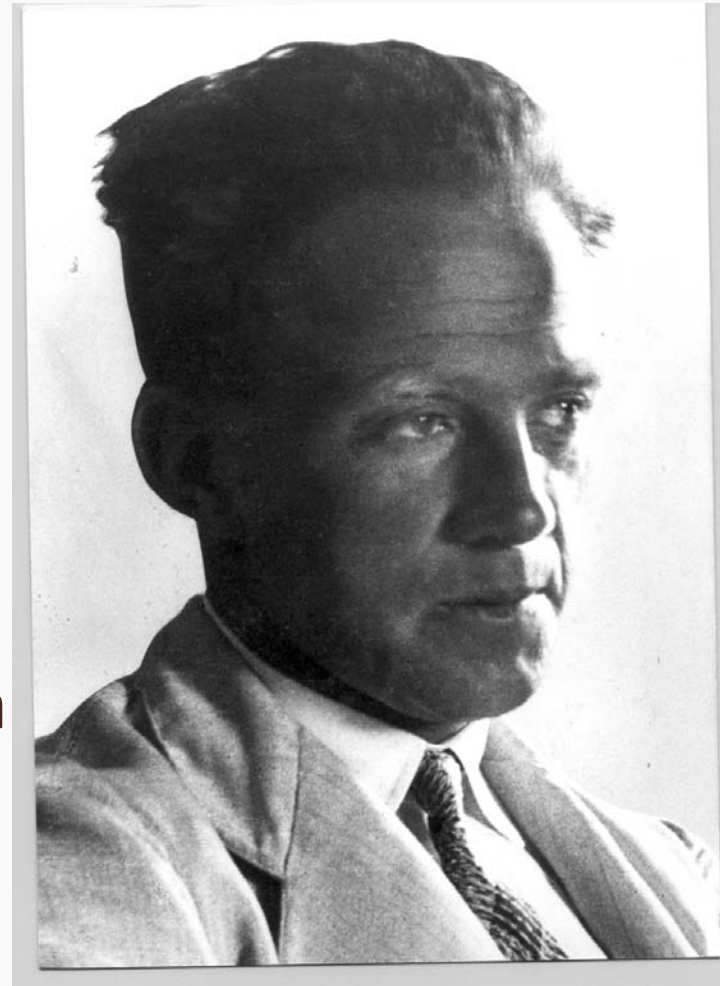


Yoshio Nishina, conscio dell'impossibilità di produrre una bomba o un reattore, continuò le ricerche per salvare giovani scienziati dalla guerra e prepararli per il futuro del Giappone



In Germania due istituzioni

- l'agenzia per gli armamenti dell'esercito (HWA) col generale Erich Schumann
- il consiglio delle ricerche del Reich (RFR) del ministero della cultura
- RFR costituisce un "club dell'uranio" (*Uranverein*)
- Werner Heisenberg, premio Nobel per la fisica, sviluppa una teoria della fissione (inadeguata)



- allo scoppio della guerra l'HWA prende il controllo
- direzione a Kurt Diebner con Erich Bagge
- centro scientifico l'*Institut für Physik* a Berlino-Dahlem
- nove gruppi di ricerca in tutta la Germania, con un centinaio di ricercatori





conferenza 4-6 giugno 1942 con Albert Speer ministro degli armamenti e il maresciallo Erhard Milch: Heisenberg dichiara possibile solo la produzione di energia con una pila. L'HWA taglia i fondi al progetto uranio e apre un laboratorio a Gottow, ove Diebner inizia la costruzione di una grande pila subcritica



Uranium-maschine

- conflitto fra istituzioni: il Ministero dell'istruzione assume il controllo delle ricerche, sotto Abraham Esau;
Hitler nomina Hermann Göring capo del RFR
- luglio '42 Heisenberg direttore dell'istituto di Berlino
- 1943 Walter Gerlach rimpiazza Esau come plenipotenziario delle ricerche sul reattore, col difficile compito di coordinare le attività di Heisenberg e di Diebner
- a metà del '44 Speer ordina a tutti i gruppi di ricerca di trasferirsi lontano da Berlino
 - ~ Heisenberg va a Haigerloch
 - ~ Gerlach e Diebner vanno a Stadtilm
- il reattore ricostruito a Haigerloch produce i migliori risultati ma non raggiunge una reazione a catena che si auto-sostenga ($k < 1$)

La cattura - operazione *epsilon*

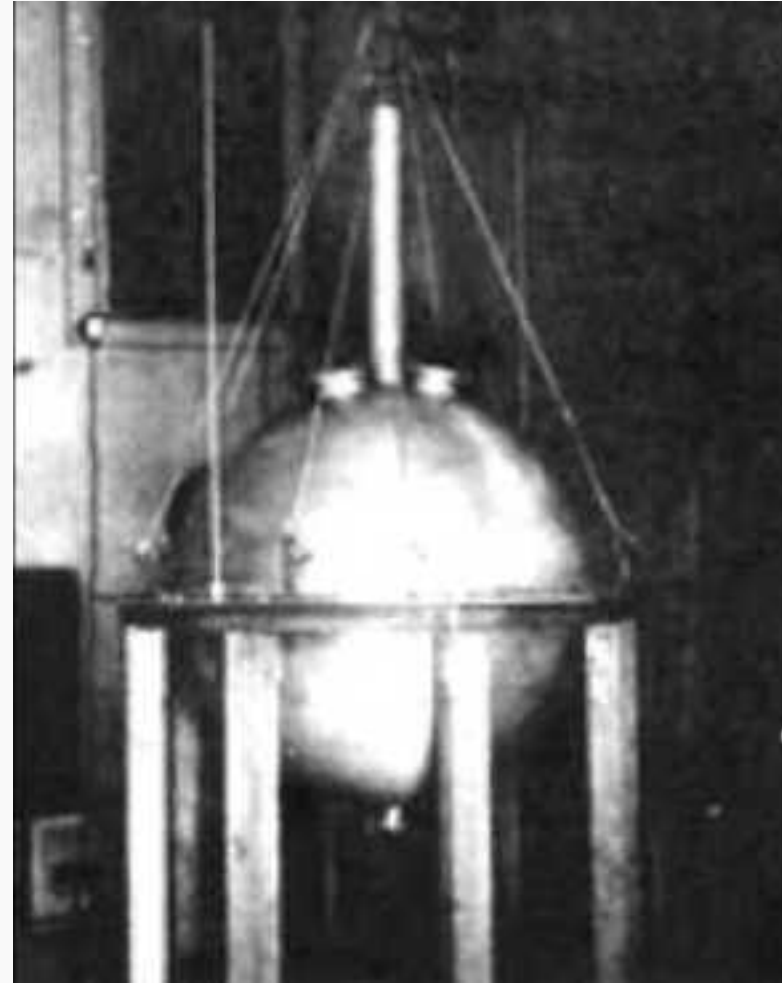
fra il 23 aprile e il 3 maggio 1945 la missione americana Alsos cattura i fisici tedeschi e fino al 3 gennaio 1946 li trattiene e spia segretamente in una villa presso Cambridge



Cattura della pila di
Heigerloch

Risultati del programma tedesco

- teoria della reazione a catena inadeguata
- ricorso come moderatore alla sola acqua pesante
- previsione errata del comportamento della pila
- arricchimento dell'uranio per via termica; individuazione della centrifugazione, ma non viene costruito un prototipo
- niente uranio arricchito
- la pila rimane sottocritica
- niente plutonio

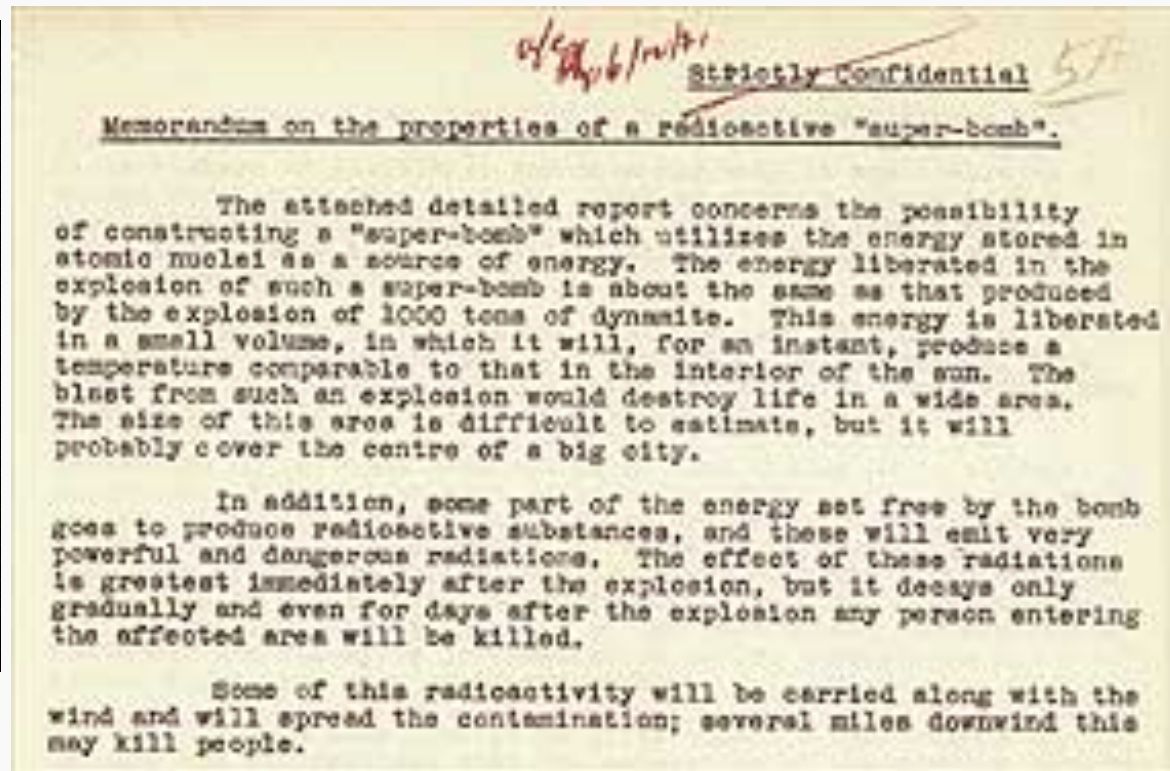
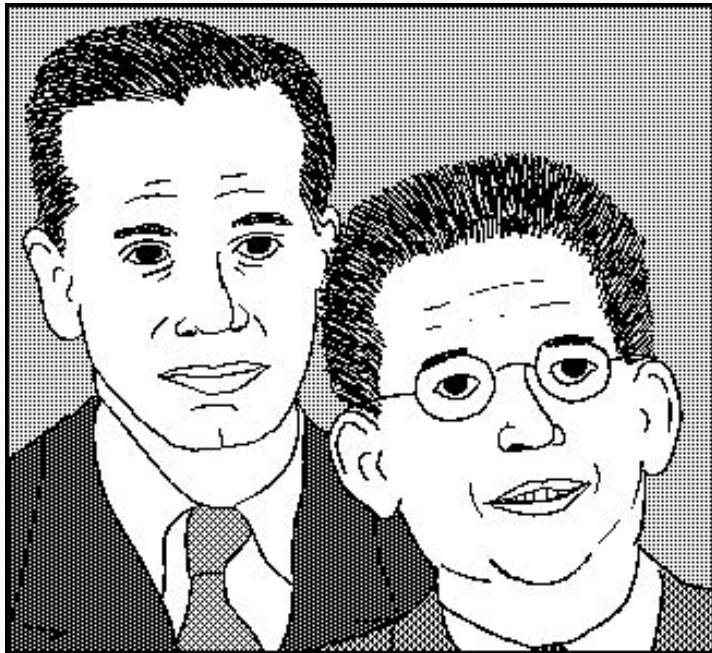


Evoluzione del programma francese

- all'occupazione tedesca della Francia von Halban e Kowarski fuggono in Inghilterra con l'acqua pesante, mentre Joliot diventa uno dei capi della resistenza francese**
- le ricerche continuano in UK nell'ambito del programma inglese, con accordi riguardanti i diritti futuri**
- si trasferiscono in Canada assieme al gruppo inglese che lavora sui reattori**
- problemi con gli americani: non sono ammessi al programma Manhattan**
- nel dopoguerra sviluppano un reattore in Canada (5 settembre 1945) e quindi in Francia (15 dicembre 1948)**

Fase 3: la bomba

i memorandum Frisch-Peierls individuano le condizioni per una fissione a catena esplosiva e il percorso per produrla
punto cruciale: indispensabili neutroni veloci



il fattore tempo e la bomba

- un neutrone impiega tipicamente $0,01 \mu\text{s}$ a interagire con un nucleo
 - dopo 40 generazioni ($0,4 \mu\text{s}$) l'energia prodotta diventa enorme e il materiale si riscalda a $\approx 40 \times 10^6 \text{ }^\circ\text{C}$ trasformandosi in plasma che si disperde a $\approx 10^6 \text{ m/s}$
 - un'espansione di pochi centimetri basta a diminuire la densità sotto il limite critico e a spegnere la reazione a catena
- ⇒ la catena deve completarsi entro $\approx 0,5 \mu\text{s}$
- per termalizzare i neutroni servono $40 \mu\text{s}$ fra due interazioni successive con uranio
- ⇒ non c'è tempo per termalizzare i neutroni

le due strade

- neutroni termici con moderatore
alta probabilità ed efficienza
ossido d'uranio poco arricchito
reazione lenta e controllata
grandi dimensioni



⇒ reattore

- neutroni veloci senza moderatore
bassa probabilità ed efficienza
uranio-235 o plutonio quasi puri
reazione veloce libera
dimensioni compatte

⇒ bomba



Il comitato MAUD per “investigare le possibilità dell’uranio a contribuire allo sforzo bellico”

Thompson dirige ricerche in quattro università:

- a Liverpool il premio Nobel James Chadwick con Frisch, Joseph Rotblat e un gruppo di Bristol: misure fisiche**
- a Birmingham Peierls con Klaus Fuchs: teoria della bomba**
- a Birmingham il premio Nobel Walter Norman Haworth: i problemi della chimica dell’uranio e dei suoi composti**
- a Oxford Franz Eugen Simon: lo sviluppo della separazione dell’uranio-235 per diffusione gassosa**
- a Cambridge la separazione isotopica con centrifughe e i francesi con la loro pila ad acqua pesante;**
- il complesso industriale ICI: la produzione di esafluoruro di uranio e uranio metallico, la costruzione di un impianto di arricchimento e di un reattore per la produzione di energia**

Directorate Tube Alloys

il 7 luglio 1941 il Comitato MAUD presenta al governo due documenti: “uso dell’uranio per una bomba” e “uso dell’uranio come fonte d’energia”

Il 5 settembre Churchill riferisce al Consiglio dei capi di stato maggiore, che raccomanda un’azione immediata nel massimo segreto

Si istituisce il *Directorate Tube Alloys* sotto la direzione di Wallace Alan Akers (direttore della ricerca alla ICI) e la supervisione a livello governativo di Lord John Anderson

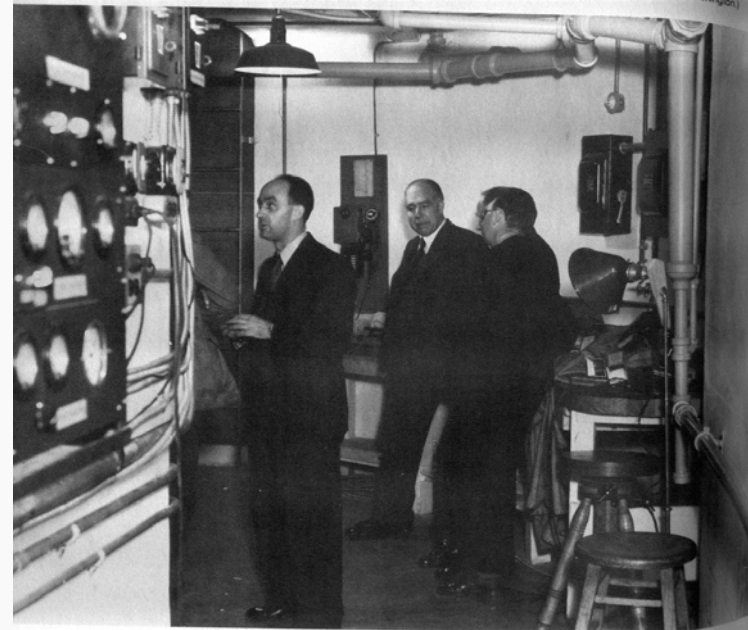
Si studiano i prototipi di reattore e di impianto di arricchimento e si decidono contatti con Canada e USA per costruire gli impianti finali sulla base dei prototipi fatti in Inghilterra

Contatti problematici con USA e Canada

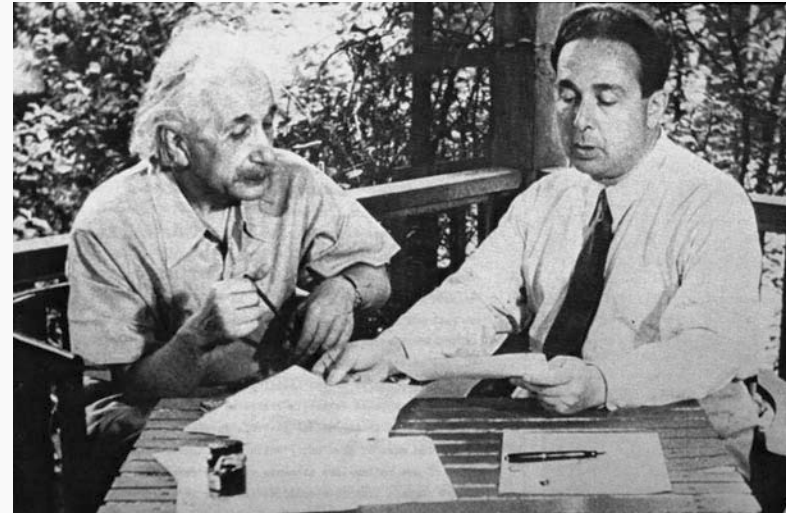
- nel 1942 gli USA propongono una collaborazione paritetica, ma gli inglesi rallentano i contatti
- alla fine del 1942 il programma americano supera quello inglese e gli americani limitano la partecipazione inglese
- il problema risolto a livello politico da Churchill e Roosevelt con l'accordo di Quebec (19 agosto 1943):
 - ~ impegno dei due governi a non usare la bomba uno contro l'altro
 - ~ decidere assieme l'uso dell'arma nella guerra
 - ~ vincolo a non trasferire informazioni a paesi terzi
 - ~ rinuncia da parte inglese a ogni diritto commerciale sulle applicazioni civili
 - ~ sul programma militare "full and effective collaboration" sotto la direzione di un *Combined Policy Committee*

Sviluppi in America

- il programma di Fermi era scientifico: realizzare la fissione a catena in “mucchi” (*pile*) di blocchi di grafite con uranio posto in punti strategici, in modo da moltiplicare i neutroni



- Szilard ritiene necessario un deciso impegno americano per far fronte al programma tedesco
Convince Einstein a firmare una lettera a Roosevelt



A seguito della lettera, nell'ottobre 1939 il Presidente forma un comitato consultivo sull'uranio (ACU). L'ACU finanzia gli esperimenti di Fermi e studi per l'arricchimento dell'uranio. Entra in gioco Vannevar Bush che vuole integrare la ricerca e la tecnologia americana con le esigenze della difesa. Il 2 giugno 1940 Roosevelt crea il *National Defense Research Council* (NDRC), per lo sviluppo della ricerca finalizzata ad applicazioni militari, direttamente collegato al Presidente degli USA.

-2-

The United States has only very poor ores of uranium in moderate quantities. There is some good ore in Canada and the former Czechoslovakia, while the most important source of uranium is Belgian Congo.

In view of this situation you may think it desirable to have some permanent contact maintained between the Administration and the group of physicists working on chain reactions in America. One possible way of achieving this might be for you to entrust with this task a person who has your confidence and who could perhaps serve in an unofficial capacity. His task might comprise the following:

- a) to approach Government Departments, keep them informed of the further development, and put forward recommendations for Government action, giving particular attention to the problem of securing a supply of uranium ore for the United States;
- b) to speed up the experimental work, which is at present being carried on within the limits of the budgets of University laboratories, by providing funds, if such funds be required, through his contacts with private persons who are willing to make contributions for this cause, and perhaps also by obtaining the co-operation of industrial laboratories which have the necessary equipment.

I understand that Germany has actually stopped the sale of uranium from the Czechoslovakian mines which she has taken over. That she should have taken such early action might perhaps be understood on the ground that the son of the German Under-Secretary of State, von Weissäcker, is attached to the Kaiser-Wilhelm-Institut in Berlin where some of the American work on uranium is now being repeated.

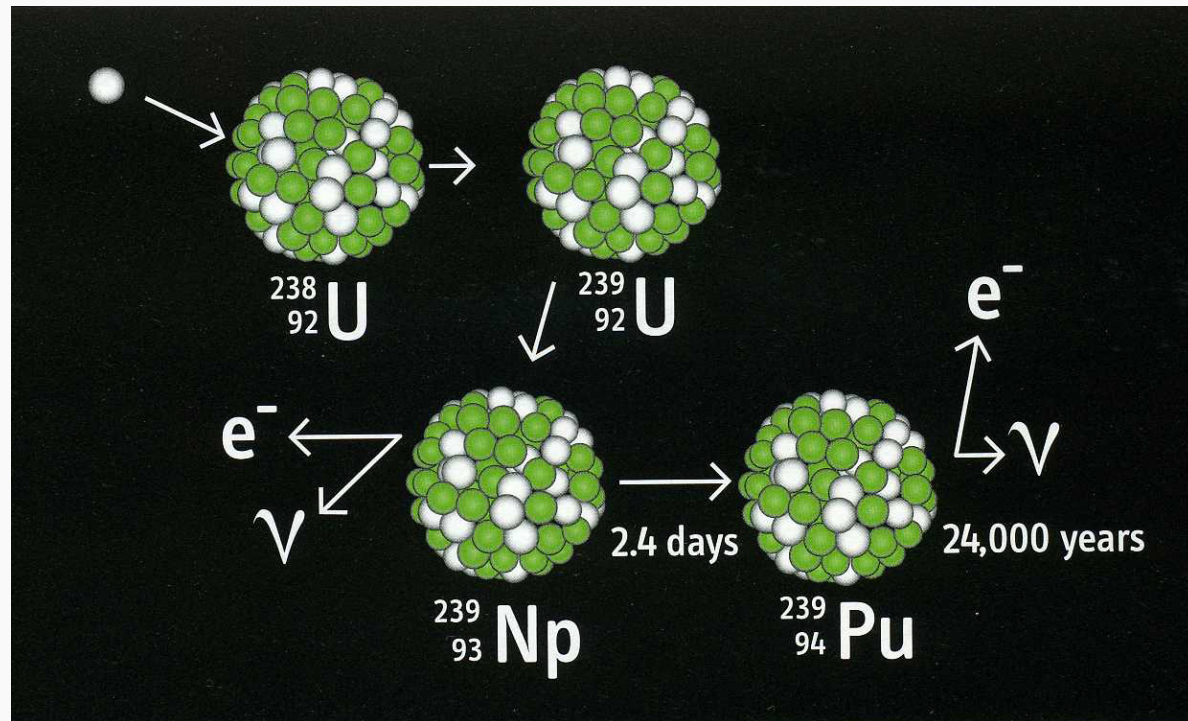
Yours very truly,
A. Einstein
(Albert Einstein)



Nel 1940 il NDRC, sotto la presidenza di Bush, intensifica la ricerca di uranio e l'acquisizione di grafite di alta purezza per gli esperimenti di Fermi; in vari centri si studia la separazione isotopica mediante centrifugazione, diffusione gassosa o termica; iniziano ricerche teoriche, dirette da Gregory Breit con Edward Teller.

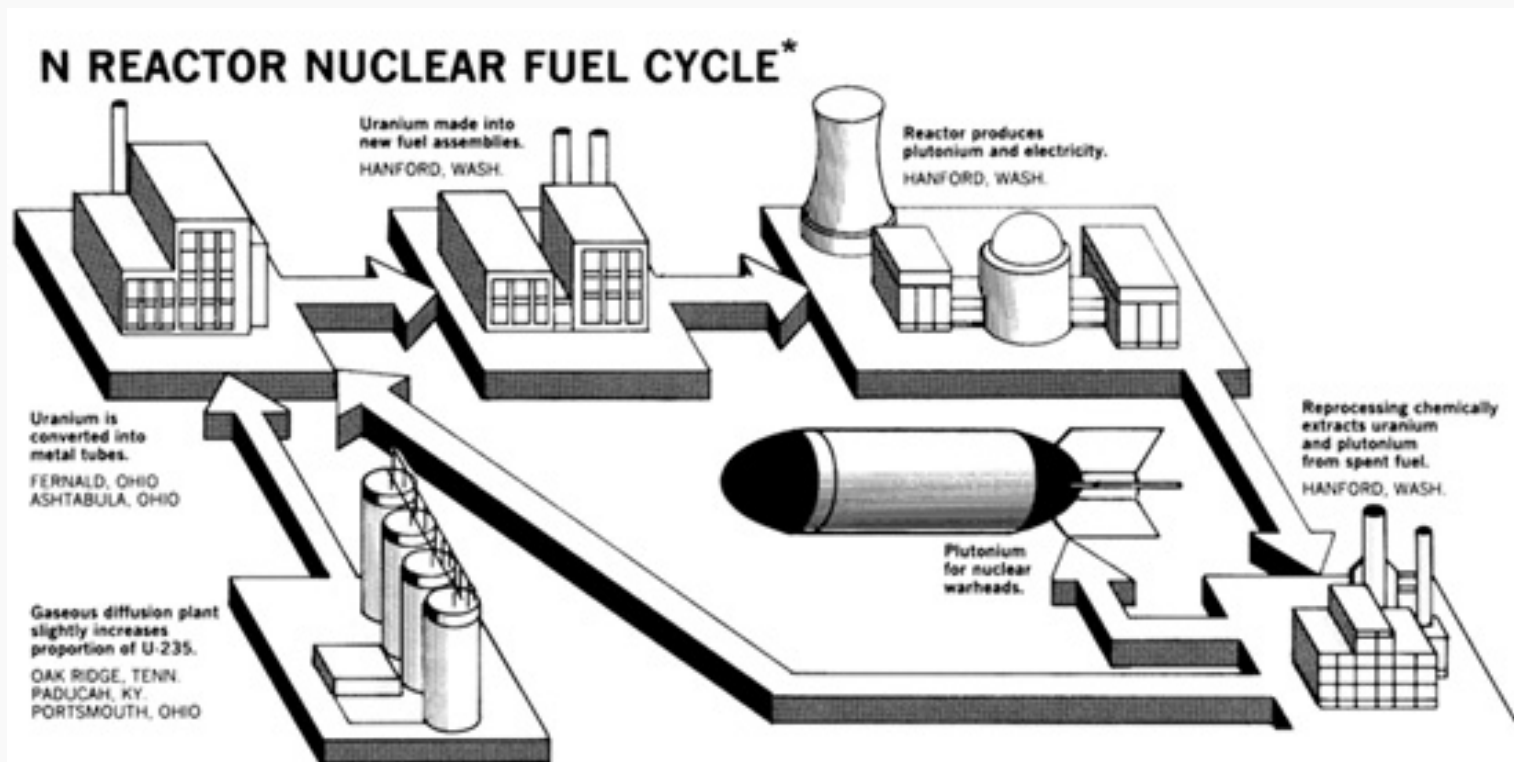
La via del plutonio

Nel febbraio 1941 Glenn Seaborg a Berkeley produce un granello dell'elemento 94 (che chiama plutonio): il plutonio risulta molto più fissile dell'uranio-235, ed è "stabile". Il plutonio promette un'alternativa all'arricchimento dell'uranio, processo che sembrava irraggiungibile. Può essere prodotto nelle pile di Fermi!



La via del plutonio

Il plutonio viene prodotto nei reattori nucleari e rimane nelle scorie della fissione. È chimicamente differente dagli altri residui e può venir separato con processi chimici molto efficienti, anche se con speciali cautele per la radioattività



*The N Reactor fuel cycle at Hanford has been shut down, but some facilities continue to operate.

La via del plutonio

gli impianti per la separazione del plutonio sono enormi e impiegano grandi quantità di energia



La via della bomba

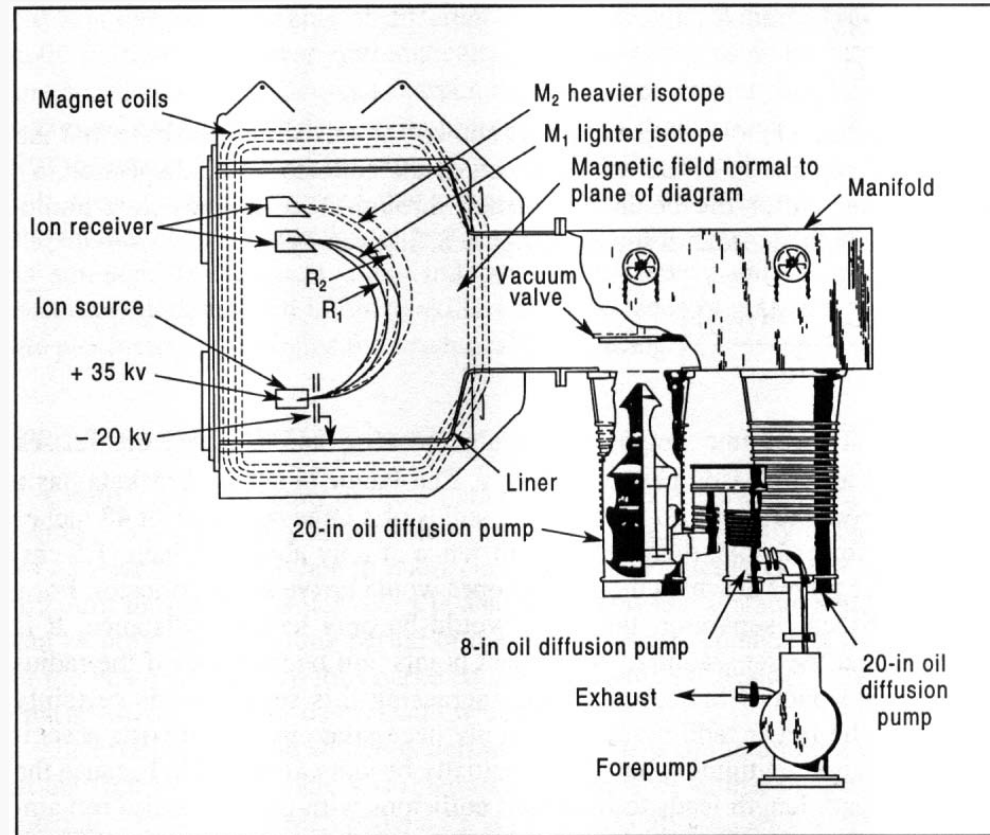
Nell'estate 1941 Oliphant comunica agli americani i risultati degli inglesi e le prospettive dell'impiego di neutroni veloci per la realizzazione di una bomba; discute con Ernst Lawrence l'uso del ciclotrone quale possibile separatore isotopico e le potenzialità del plutonio. Questi contatti imprimono un senso di urgenza al programma americano e lo indirizzano in una precisa prospettiva militare.



“calutroni” per l’arricchimento magnetico

Le particelle cariche in un campo magnetico percorrono un'orbita circolare che dipende dalla loro massa. Ioni positivi di uranio da una sorgente vengono accelerati ad alta velocità da un campo elettrico all'interno di un forte campo magnetico in cui viene generato il vuoto:

gli ioni più pesanti vengono deflessi in misura minore di quelli leggeri all'interno del “calutrone” e finiscono su elettrodi differenti. Il problema principale del metodo è la bassa efficienza.



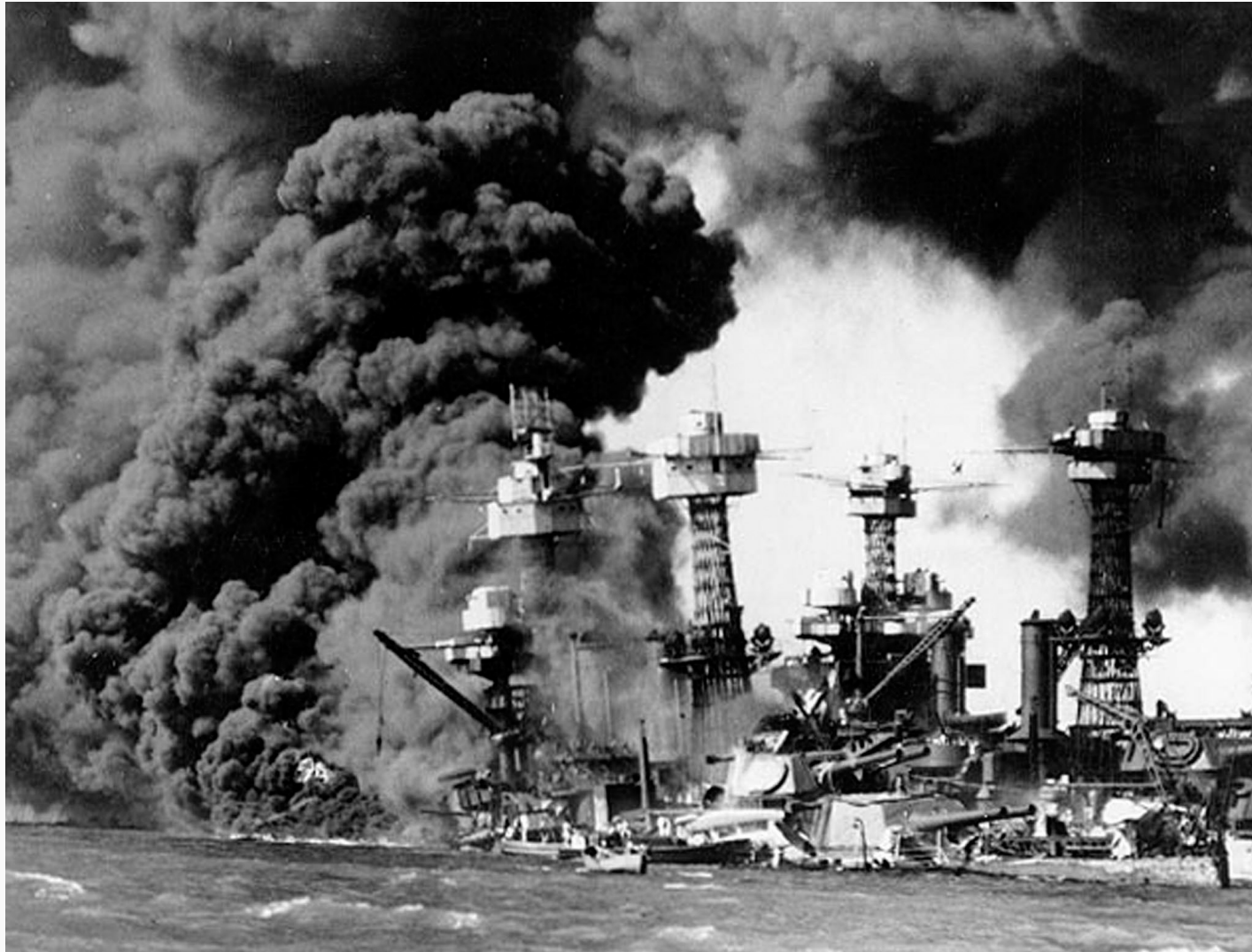
9 ottobre 1941: l'impegno del Presidente

Roosevelt affida a Bush il compito di analizzare in tempi brevi le possibilità concrete di una bomba a fissione e di definire i costi relativi; destina uno speciale fondo presidenziale a coprire il fabbisogno finanziario e impone uno stretto segreto su tutta l'operazione, riservando a sé ogni decisione sulle implicazioni politiche.



7 dicembre 1941

l'entrata in guerra degli USA accelera il programma per produrre armi in tempo per l'impiego bellico



- Bush riorganizza la ricerca:**
- perseguire tutte le strade per la bomba**
- **Harold Urey (Columbia): separazione mediante diffusione e centrifughe e ricerche con l'acqua pesante**
 - **Lawrence (Berkeley) produzione di campioni di plutonio e sviluppo dei "calutroni"**
 - **Arthur Compton (Chicago) reazione a catena per la produzione di plutonio**
 - **Robert Oppenheimer (Berkeley) teoria della bomba con neutroni veloci**
 - **Eger Murphee progettazione degli impianti industriali pilota**

Il Manhattan Engineer District

Per i grandi impianti industriali e laboratori necessari Bush ottiene dal Presidente che l'esercito produca la bomba.

Massimo organo direttivo un *Military Policy Committee*, presieduto da Bush, con James Conant come sostituto, l'ammiraglio William Purnell, e il generale Wilhem Styer.

Nel settembre 1942 il generale del genio Leslie Groves viene nominato capo militare del progetto.

Groves è estremamente risoluto: ottiene immediatamente la priorità assoluta per l'acquisizione di materiali e manodopera; acquisisce un'area di 230 km² nel Tennessee (Oak Ridge) e una di oltre 1700 km² nello stato di Washington (Hanford) per la costituzione dei siti segreti ove costruire gli impianti destinati alla produzione dei materiali fissili, affidati alla *Du Pont de Nemours* (per l'utile di 1 \$)

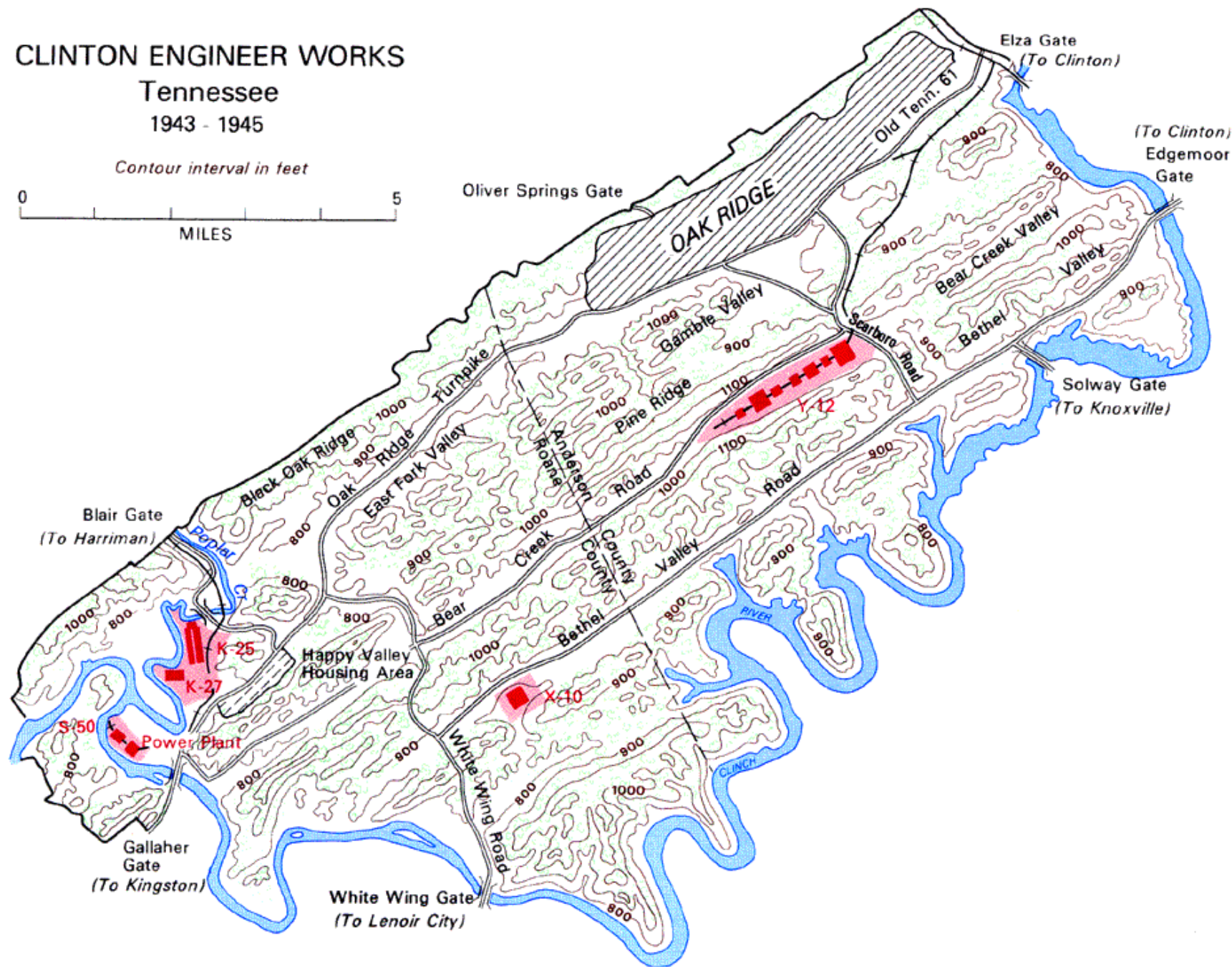


CLINTON ENGINEER WORKS

Tennessee

1943 - 1945

Contour interval in feet





**primi impianti a
Hanford**



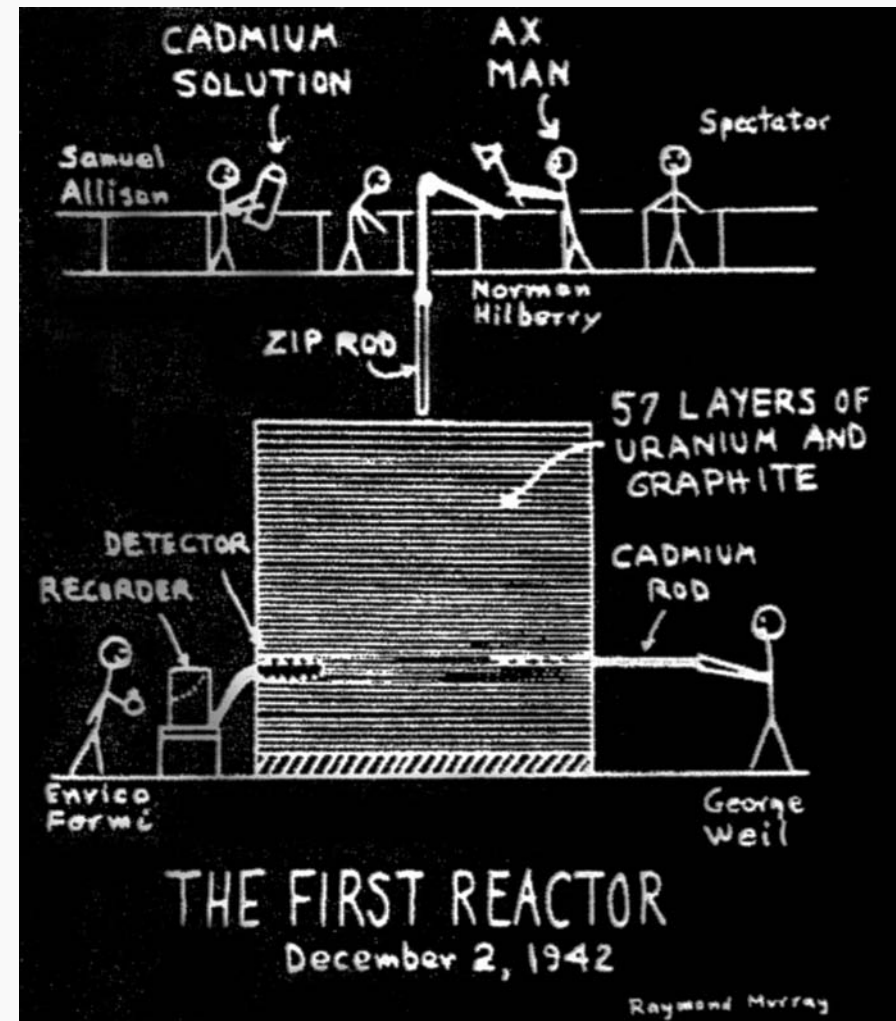
**primi impianti a
Oak Ridge**

Chicago il 2 dicembre 1942

prima reazione a catena auto-sostenuta

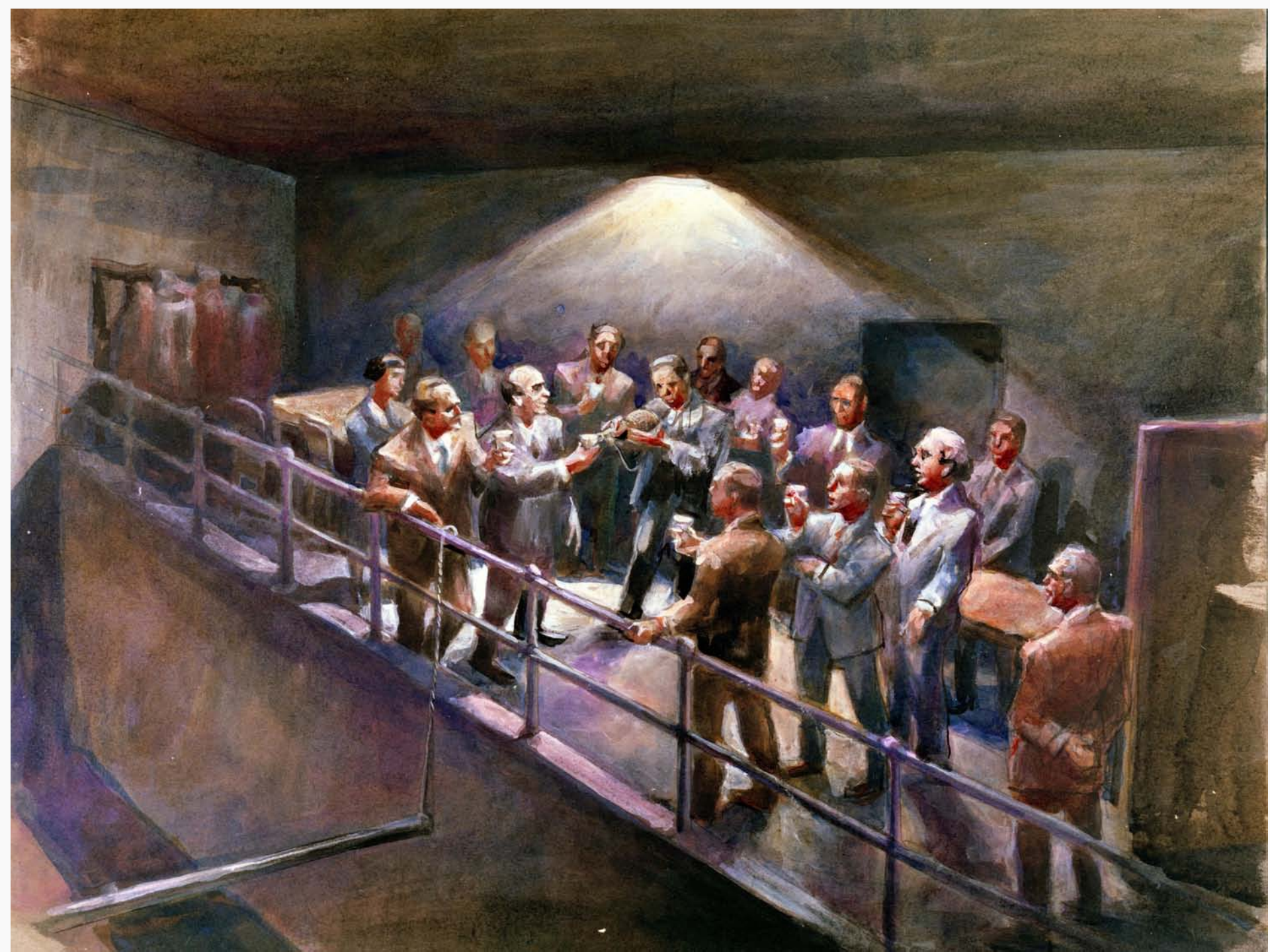
Fermi conferma la possibilità di generare plutonio per la bomba.

CP1 rimane in funzione per 10 giorni con una potenza fra mezzo Watt e un massimo di 200 W.



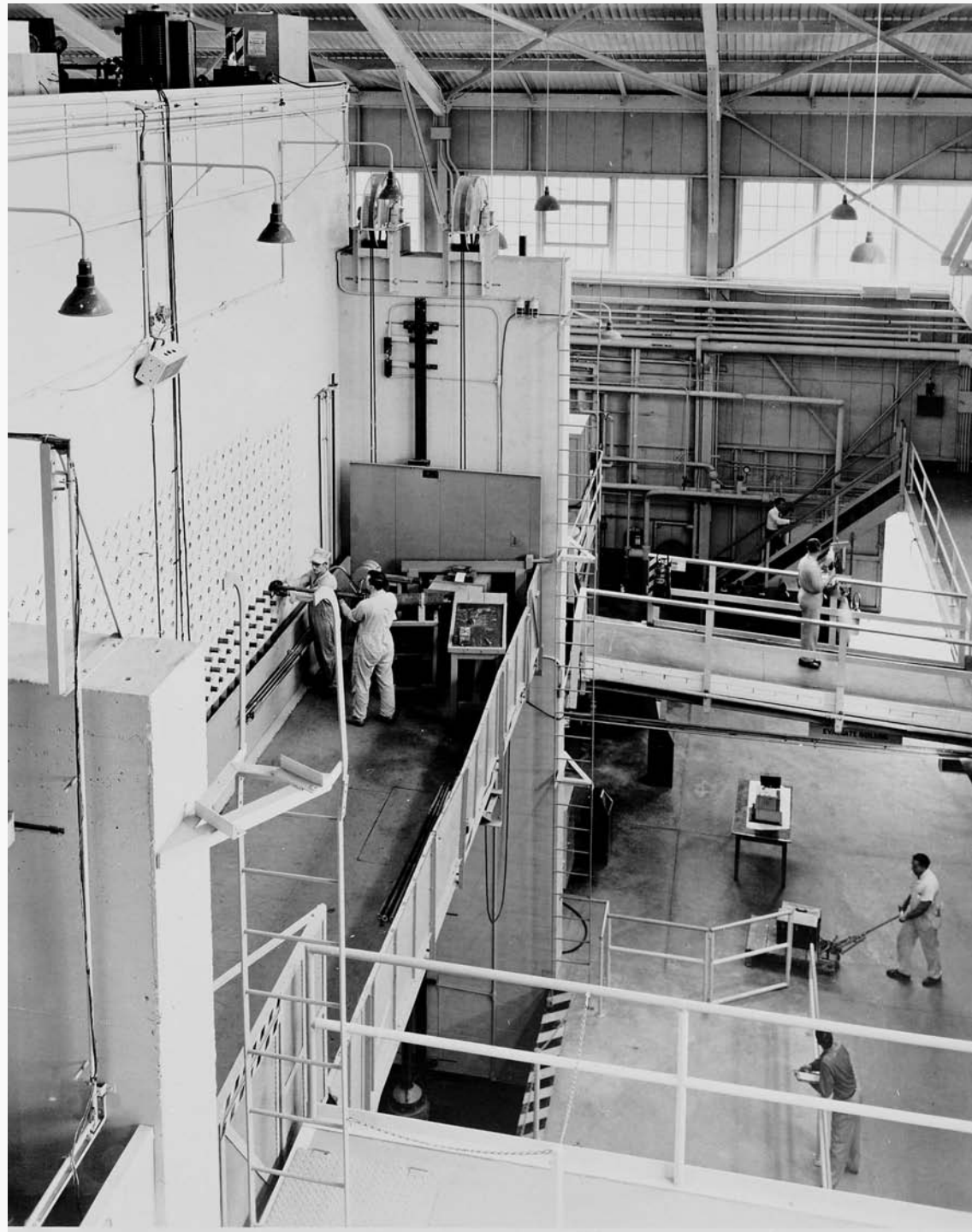


CP1



Il reattore prototipo da 1 MW a Oak Ridge (1943): un cubo di 1500 t di grafite attraversato da 1248 canali per gli elementi di uranio in tubi di alluminio, raffreddato ad aria compressa.

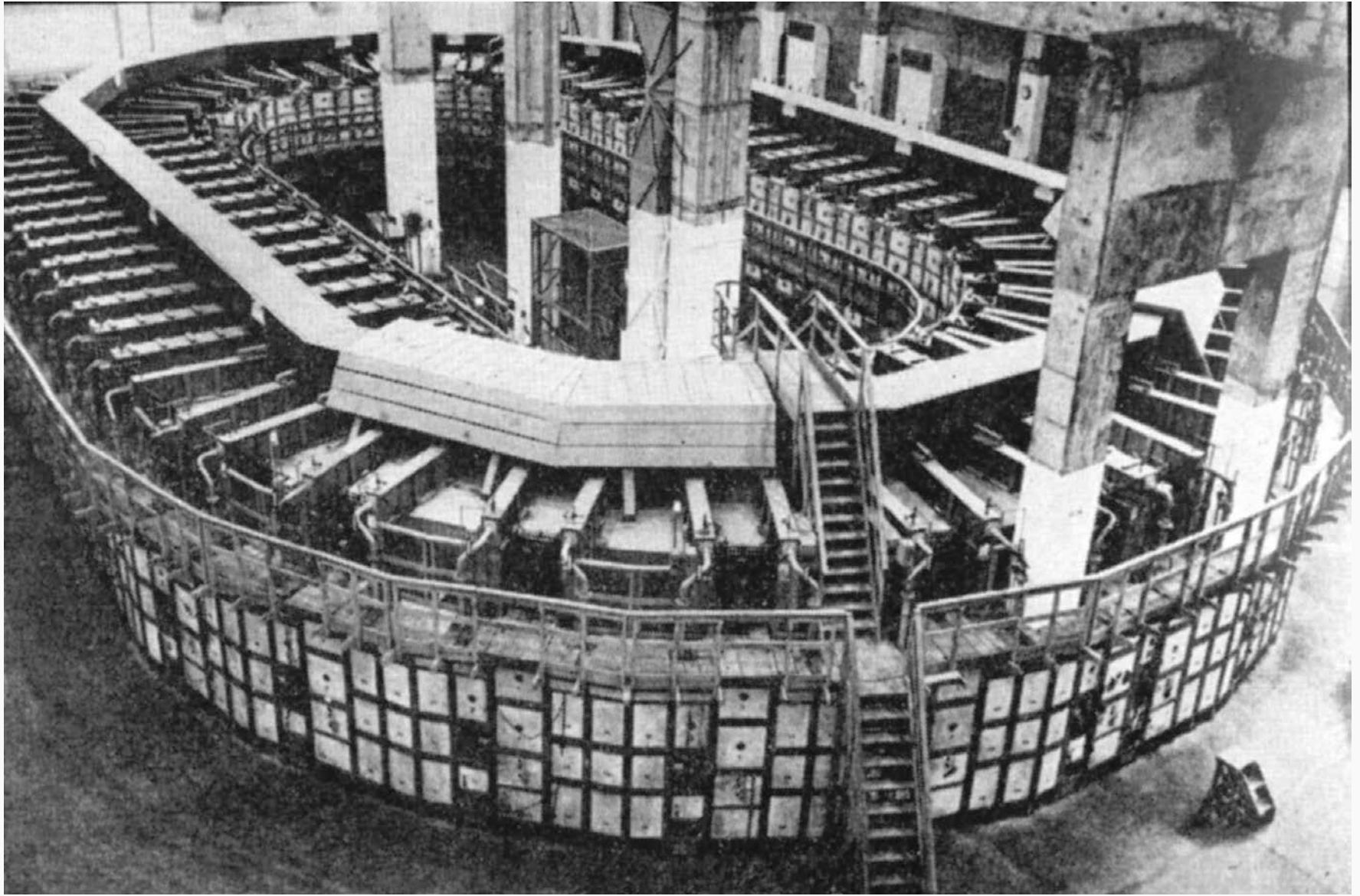
Seguono a Hanford 3 reattori da 250 MW raffreddati ad acqua, critici entro dicembre 1944



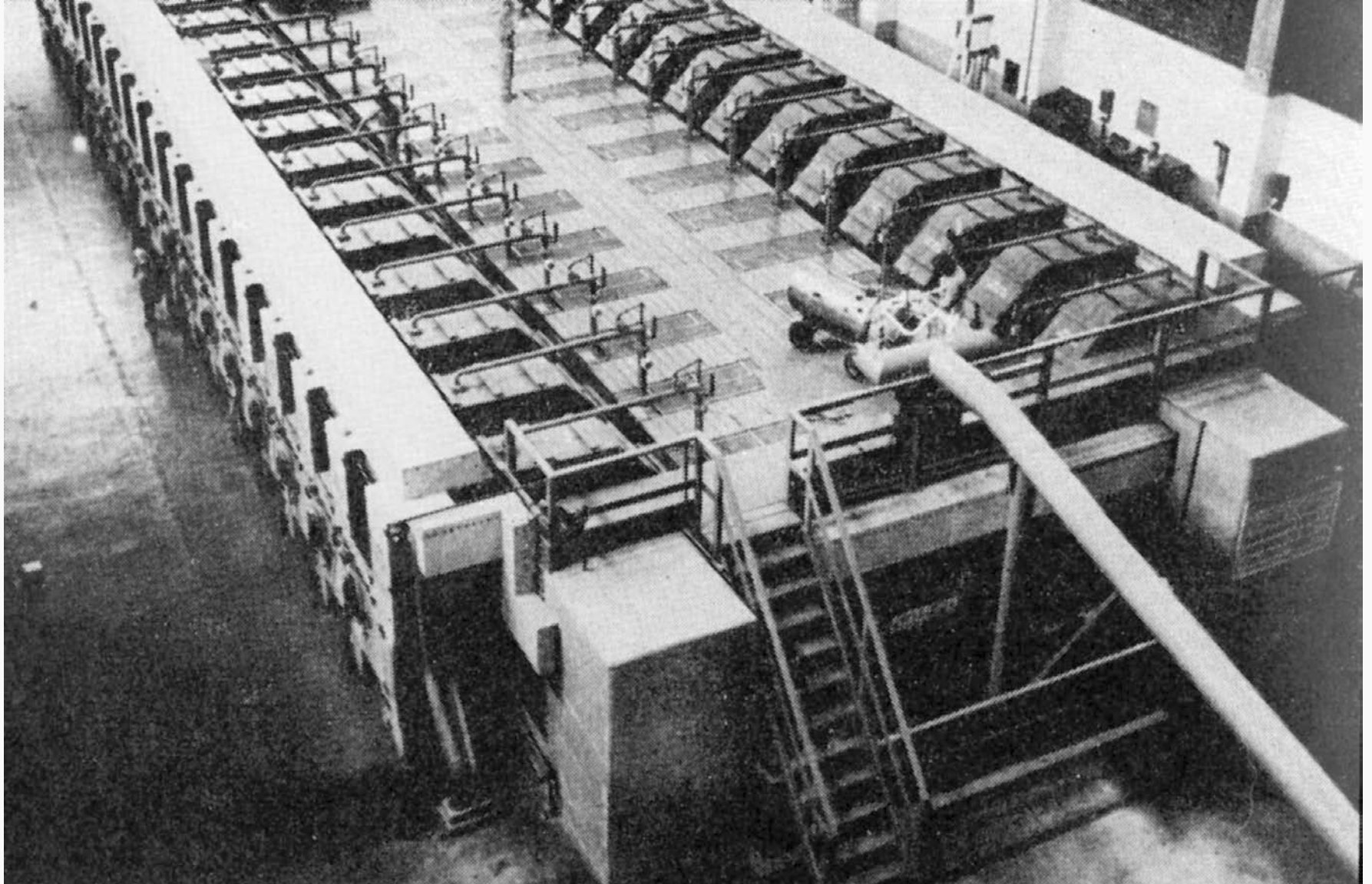
impianto per la diffusione gassosa K-25 in un fabbricato di quattro piani lungo oltre 800 m esteso su un'area di quasi 180.000 m²; la superficie totale dei diaframmi porosi raggiungeva migliaia di metri quadri. L'arricchimento limitato al 20%



una delle 9 unità “alfa” di calutroni per i primi stadi di arricchimento



**una delle 6 unità “beta” di calutroni per
l’arricchimento finale al 90%**



operatrici nell'impianto Y12 dei calutroni



il laboratorio di Los Alamos

Mentre si producevano i materiali fissili, occorreva affrontare la confezione finale di una bomba utilizzabile praticamente. Per permettere un aperto scambio di idee fra esperti di varie competenze e garantire uno stretto segreto, Oppenheimer costruisce un laboratorio a Los Alamos, un luogo estremamente isolato e sorvegliato rigorosamente.

La popolazione di Los Alamos raggiunge i 5.000 abitanti nel 1945, oltre al personale militare di supporto e sorveglianza.



ricerche a Los Alamos

- studi sperimentali delle proprietà dei materiali fissili e loro metallurgia
- sviluppo della teoria della bomba con determinazione di massa critica ed efficienza in varie configurazioni
- individuazione del meccanismo d'innesco
- previsione degli effetti
- definizione della struttura fisica dell'ordigno
- studi di balistica e aerodinamica



meccanismi di detonazione

- l'ordigno deve rimanere inerte e sicuro fino all'innesco della reazione a catena (k inferiore a 1)
- l'innesco deve creare in tempi rapidissimi le condizioni per una reazione a catena divergente (k superiore a 2)
- introdurre un fiotto di neutroni alle condizioni ottimali
- va evitata una predetonazione
- impedire la dispersione dell'esplosivo prima della fissione della quantità necessaria per un dato effetto

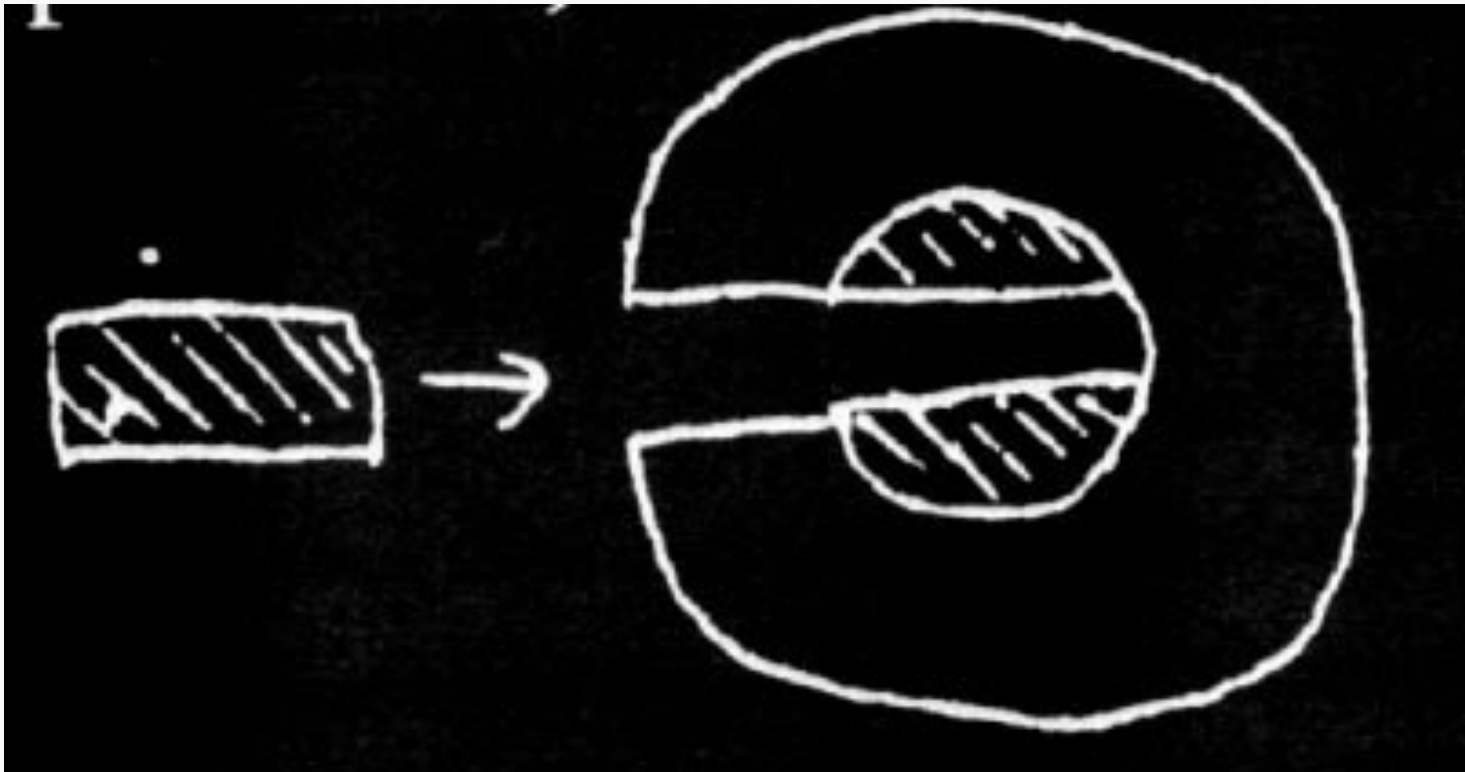


tempo utile di innesco per uranio $< 1,5$ ms

tempo utile di innesco per plutonio < 4 μ s

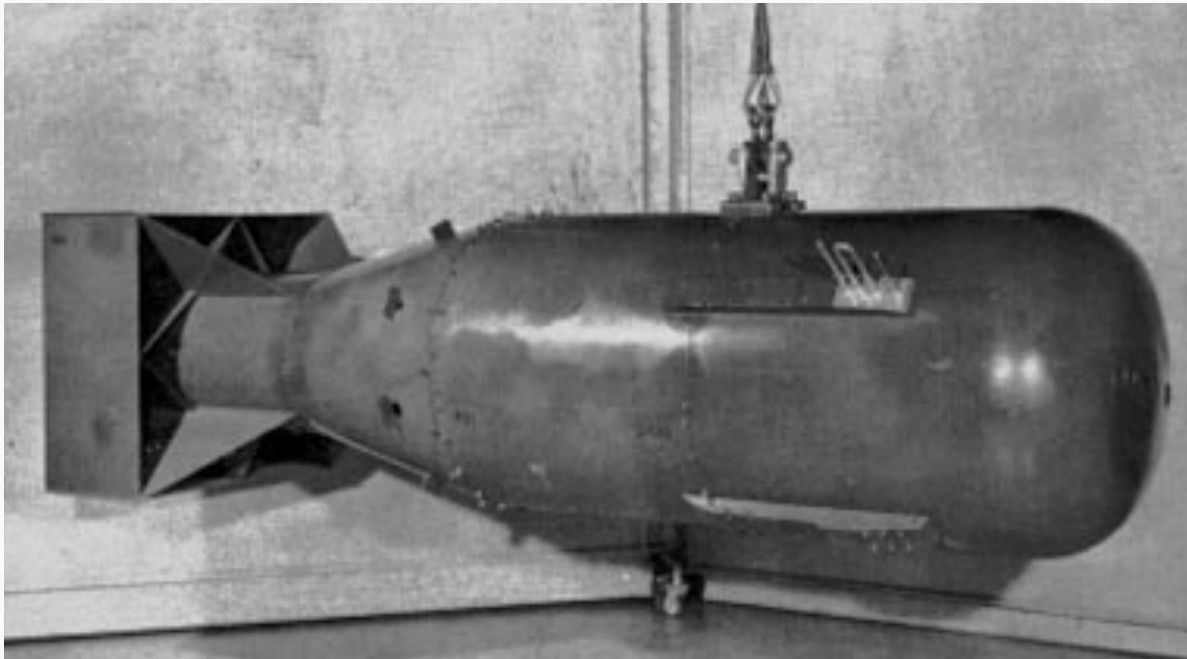
innescò a incastro

una massa non critica (proiettile) viene “sparata” ad alta velocità con un’esplosione convenzionale entro un’altra massa non critica (bersaglio), in modo creare una massa supercritica. Una piccola massa di berillio viene esposta a un’intensa sorgente alfa (polonio-210) per produrre un intenso fiotto di neutroni a iniziare la reazione esplosiva



bomba a innesco: little boy

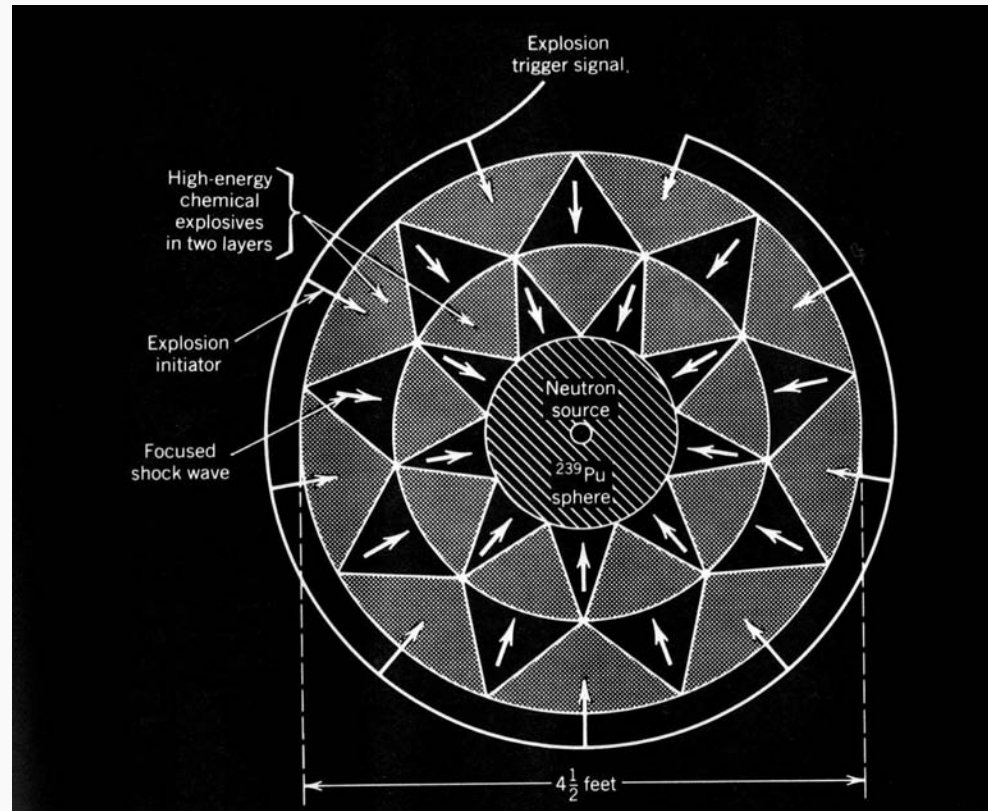
- uranio arricchito fino all'89% (media 80%)
- 2,4 masse critiche pari a 64,1 kg
- proiettile: un cilindro col 40% della massa fissile
- sparato a 300 m/s in canna antiaerea lunga 1,80 m
- supercriticità raggiunta in 1,35 ms
- la bomba lunga 3 m, diametro 70 cm, peso 4000 kg
- potenza 15 kton, efficienza 1,3%



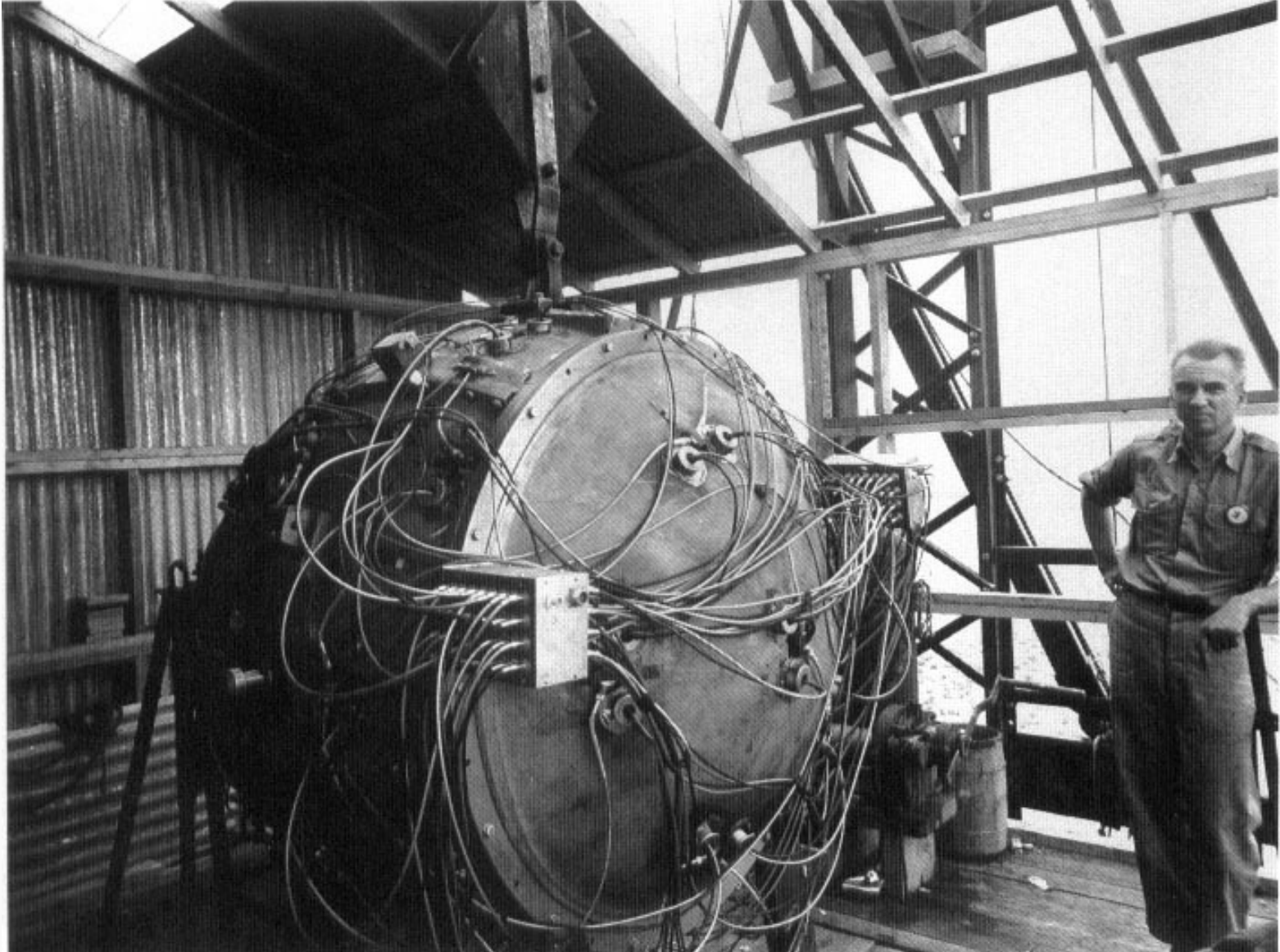
innesco a implosione

Il materiale fissile in configurazione sottocritica viene circondato da cariche di esplosivo chimico di alta potenza disposte in modo tale che la loro detonazione in un ordine ben stabilito generi un'onda d'urto convergente verso l'interno a comprimere il materiale fino a raggiungere una densità supercritica; la reazione a catena viene iniziata da una sorgente di neutroni.

Si possono raggiungere pressioni fino a qualche milione di atmosfere e aumentare la densità di uranio (o plutonio) metallico di un fattore fra 2 e 3. È veloce (microsecondi), efficiente, permette masse critiche inferiori, è affidabile e sicuro

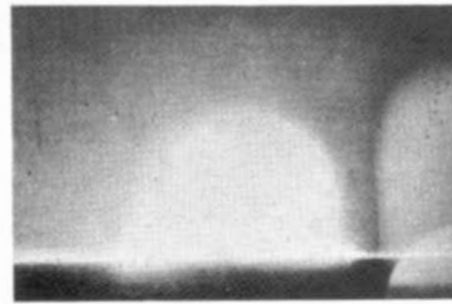


**i dubbi sulla tecnica a implosione
impongono un test di prova**

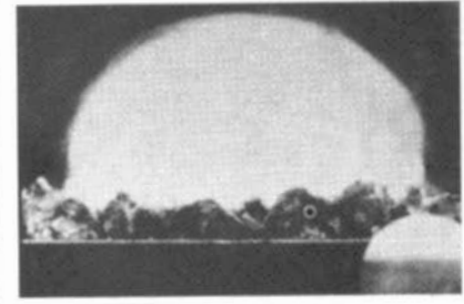


prima esplosione nucleare della storia

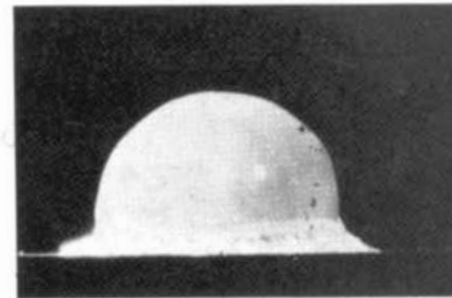
5 e 29 del mattino del
16 luglio 1945
test *trinity* alla *Jornada
del Muerto*, nel
poligono di tiro
dell'aeronautica nel
deserto del Nuovo
Messico



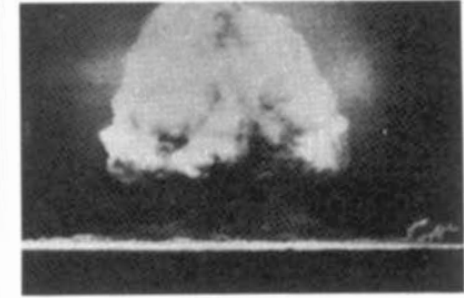
0.006 sec



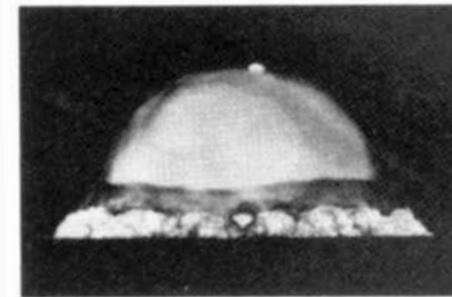
0.100 sec



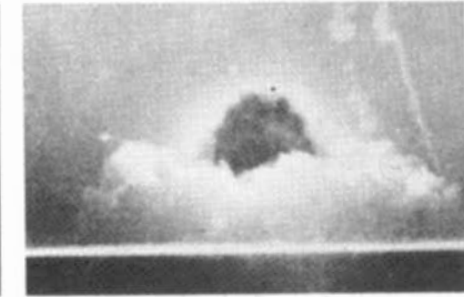
0.016 sec



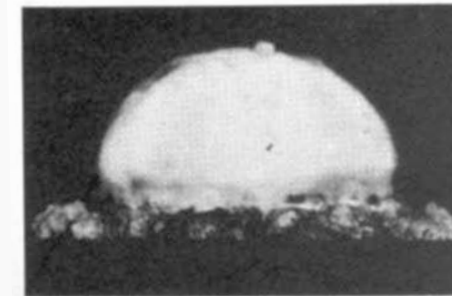
1.0 sec



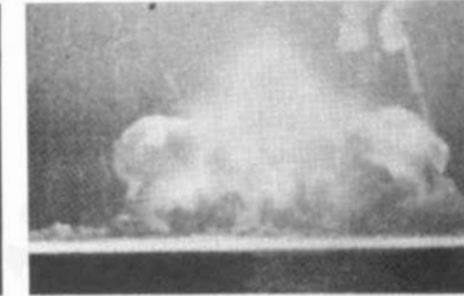
0.034 sec



2.0 sec



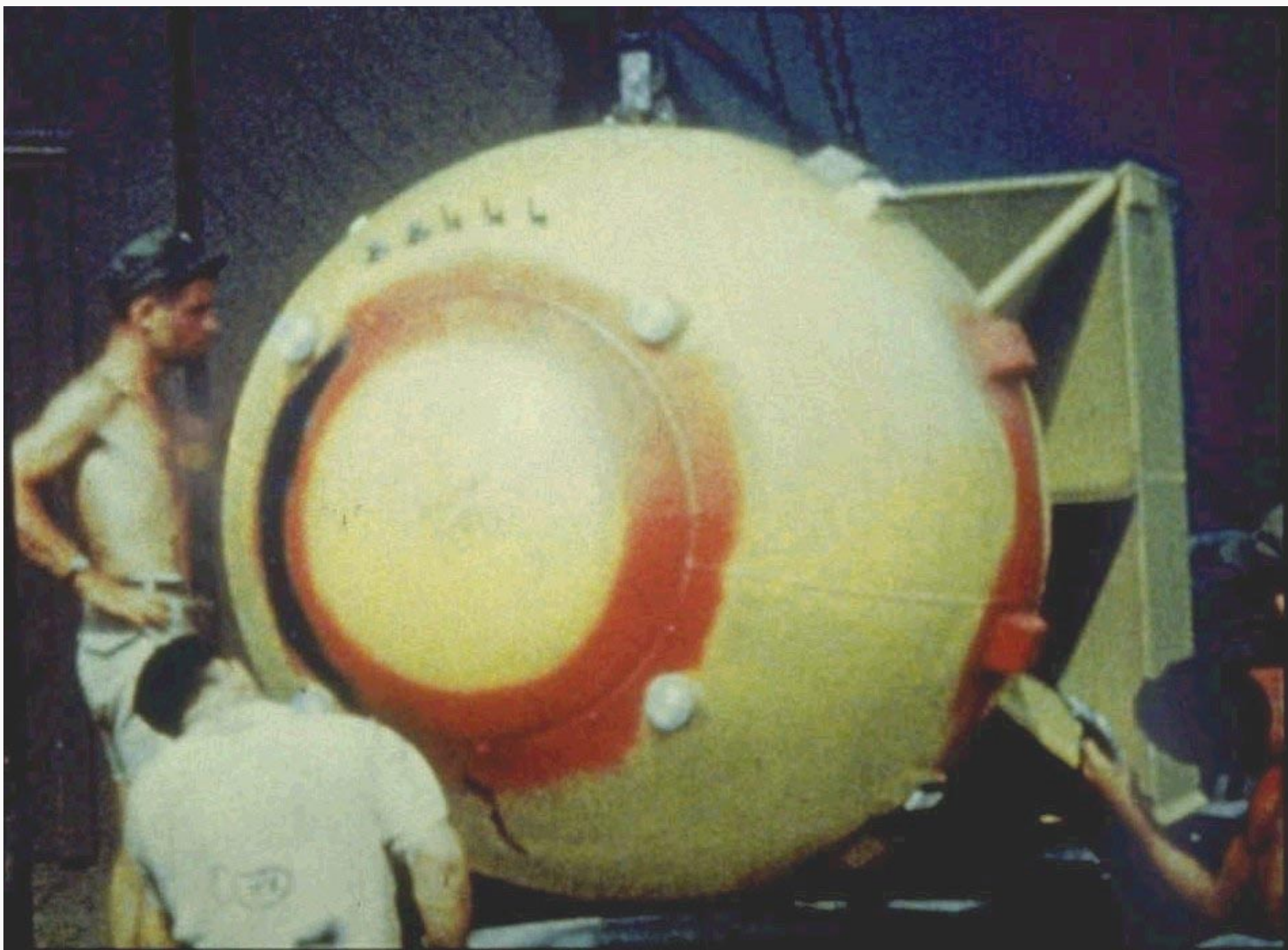
0.053 sec



4.0 sec

bomba a implosione: fat man

- lega di plutonio (fase delta) con 3% di gallio
- massa fissile 6,2 kg
- struttura a sfere concentriche:
 - * iniziatore di neutroni di polonio-berillio
 - * materiale fissile
 - * borraggio/riflettore di uranio naturale (120 kg)
 - * strato di alluminio
 - * lenti esplosive per 2500 kg in 32 lenti
 - * conchiglia esterna a uovo, diametro di 150 cm
- implosione in ≈ 2 microsecondi
- lunghezza 365 cm, peso totale 4900 kg
- potenza 22 kton, efficienza 20%



il rapporto Franck

Nella primavera 1945 gli scienziati del Met Lab considerano le implicazioni sociali e politiche dell'energia nucleare, il rischio di una corsa agli armamenti e le conseguenze dell'uso effettivo della bomba.

Il rapporto sconsiglia l'impiego diretto di tale "mezzo di distruzione indiscriminata contro l'umanità" e suggerisce di avvisare il Giappone della bomba e di dimostrarne la potenza e gli effetti devastanti a osservatori internazionali in qualche area disabitata.



James Franck

“Interim Committee e le decisioni sulla bomba

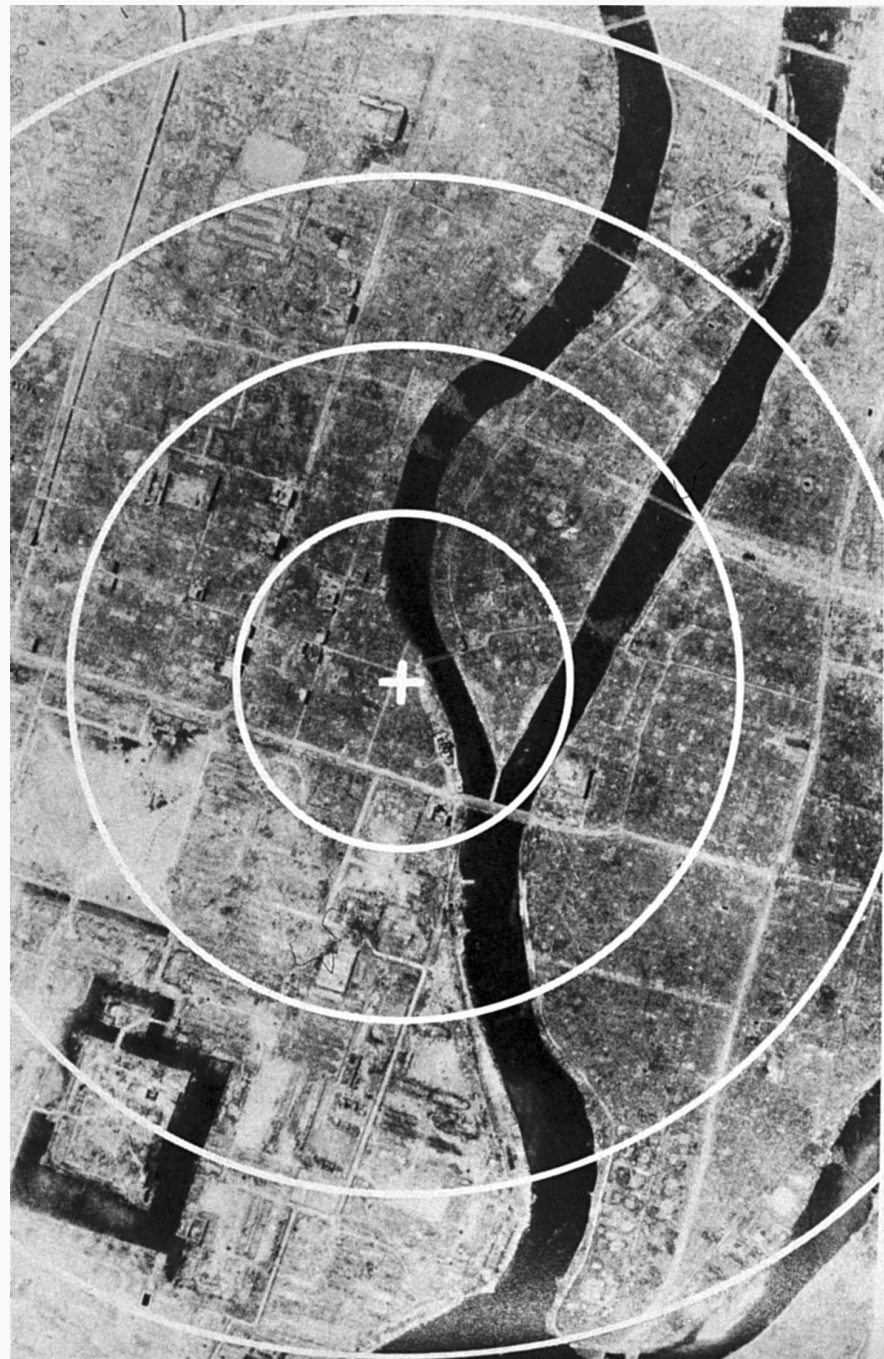
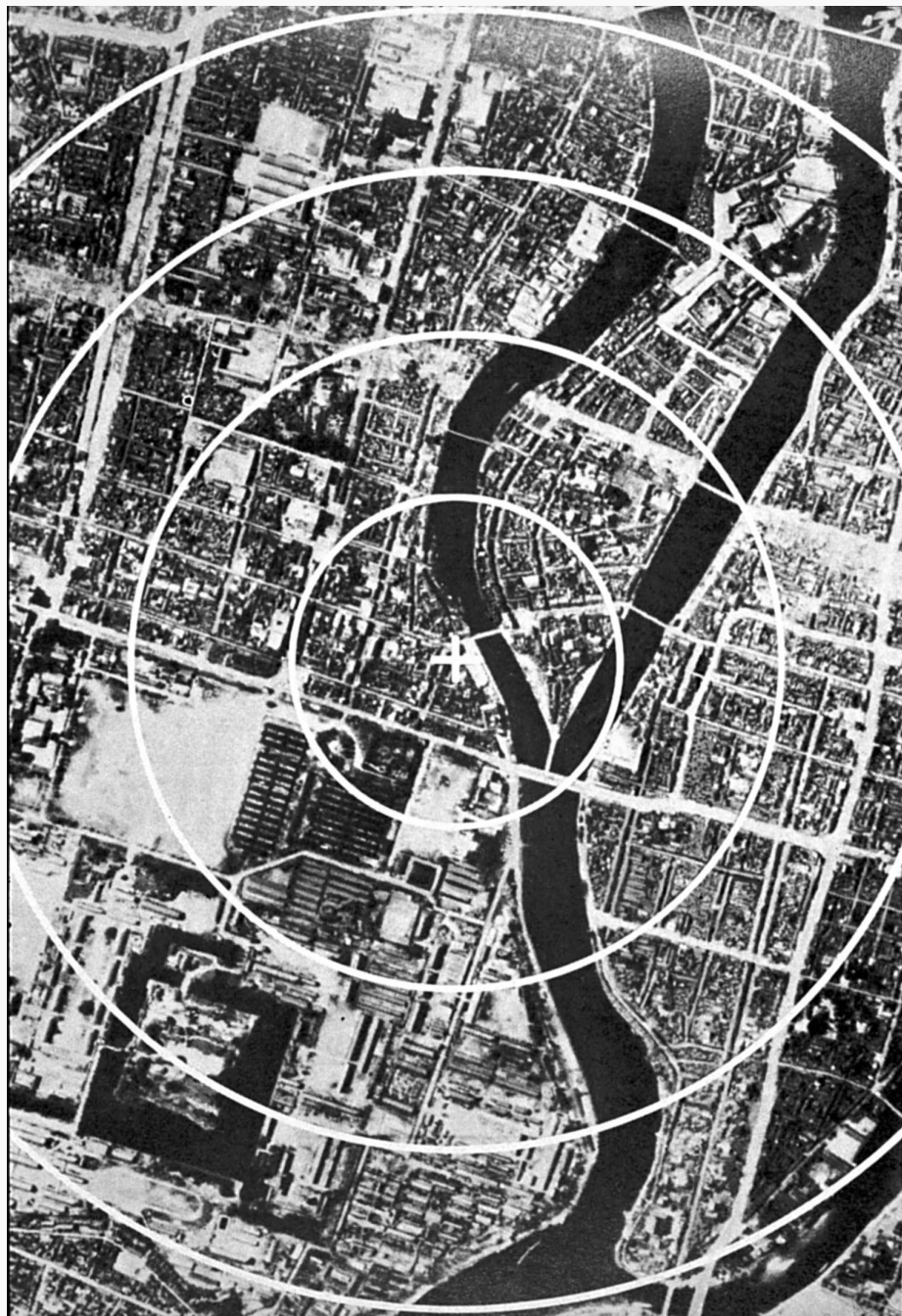
Il nuovo presidente Truman istituisce (maggio 1945) un *Interim Committee* di consulenti per decidere sull’uso delle armi e sulla politica atomica interna e internazionale.

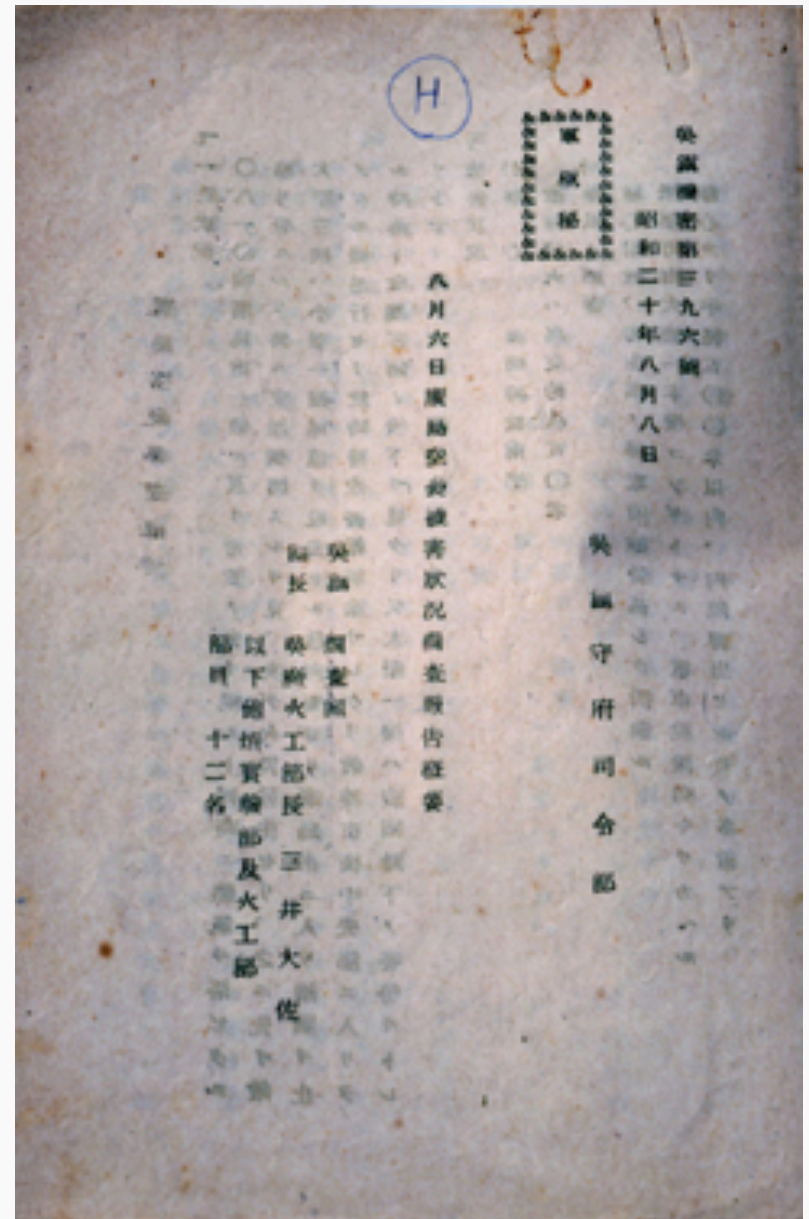
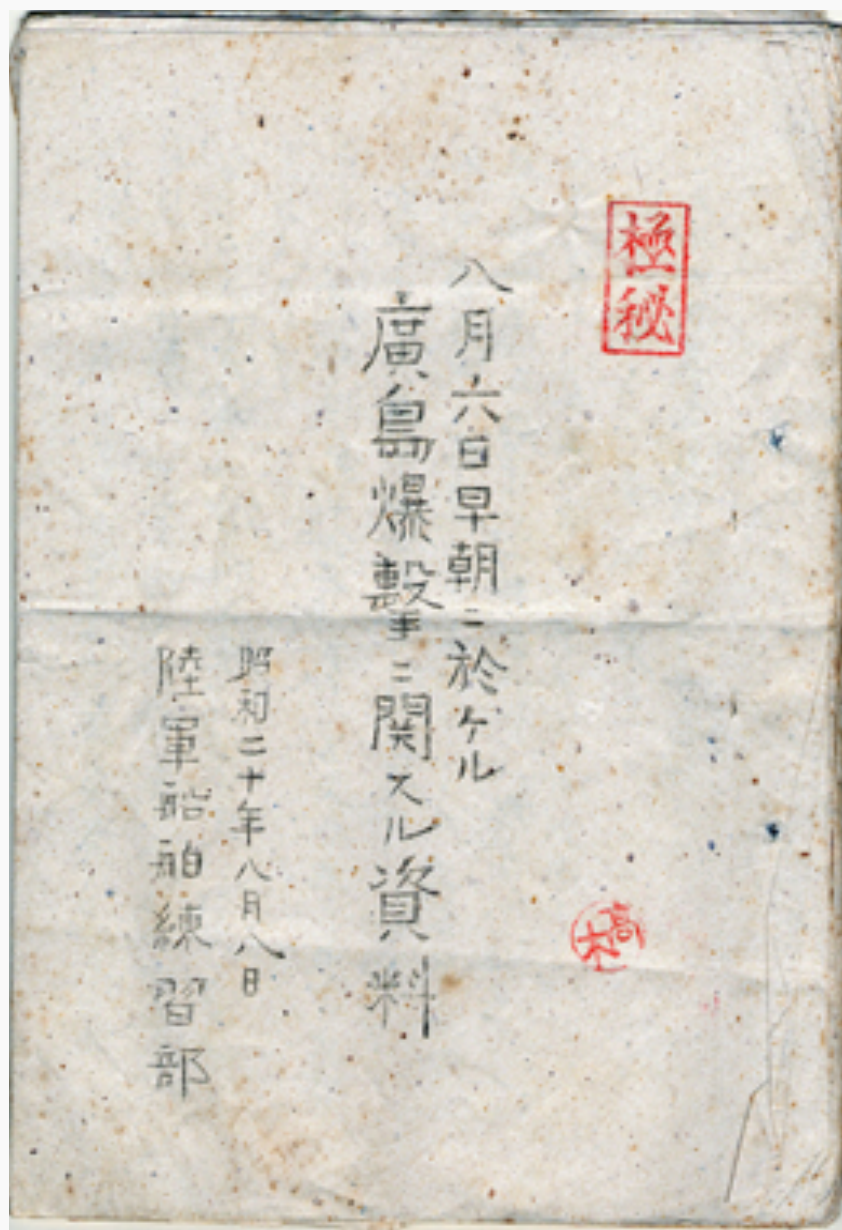
Uno *Scientific Panel*, composto da Compton, Fermi, Lawrence e Oppenheimer, creato per fornire suggerimenti all’*Interim Committee*, riferisce i diversi pareri degli scienziati, ma considera necessario un uso militare diretto dell’arma, dopo contatti con tutti gli alleati.

Per il futuro, essi auspicano una cooperazione internazionale aperta per uno sviluppo comune dell’energia nucleare civile.

Hiroshima, 6 agosto 1945, ore 8 e 15



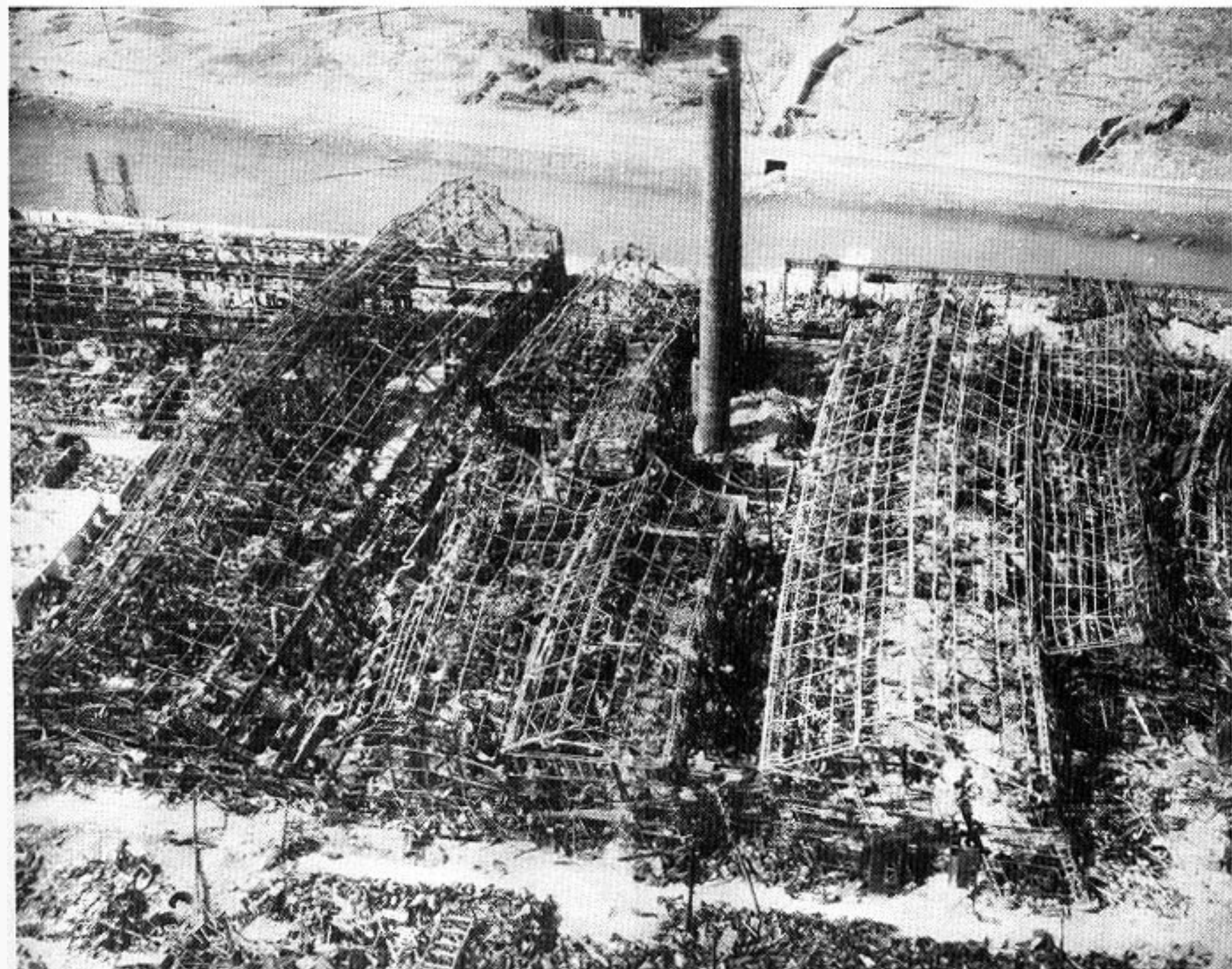




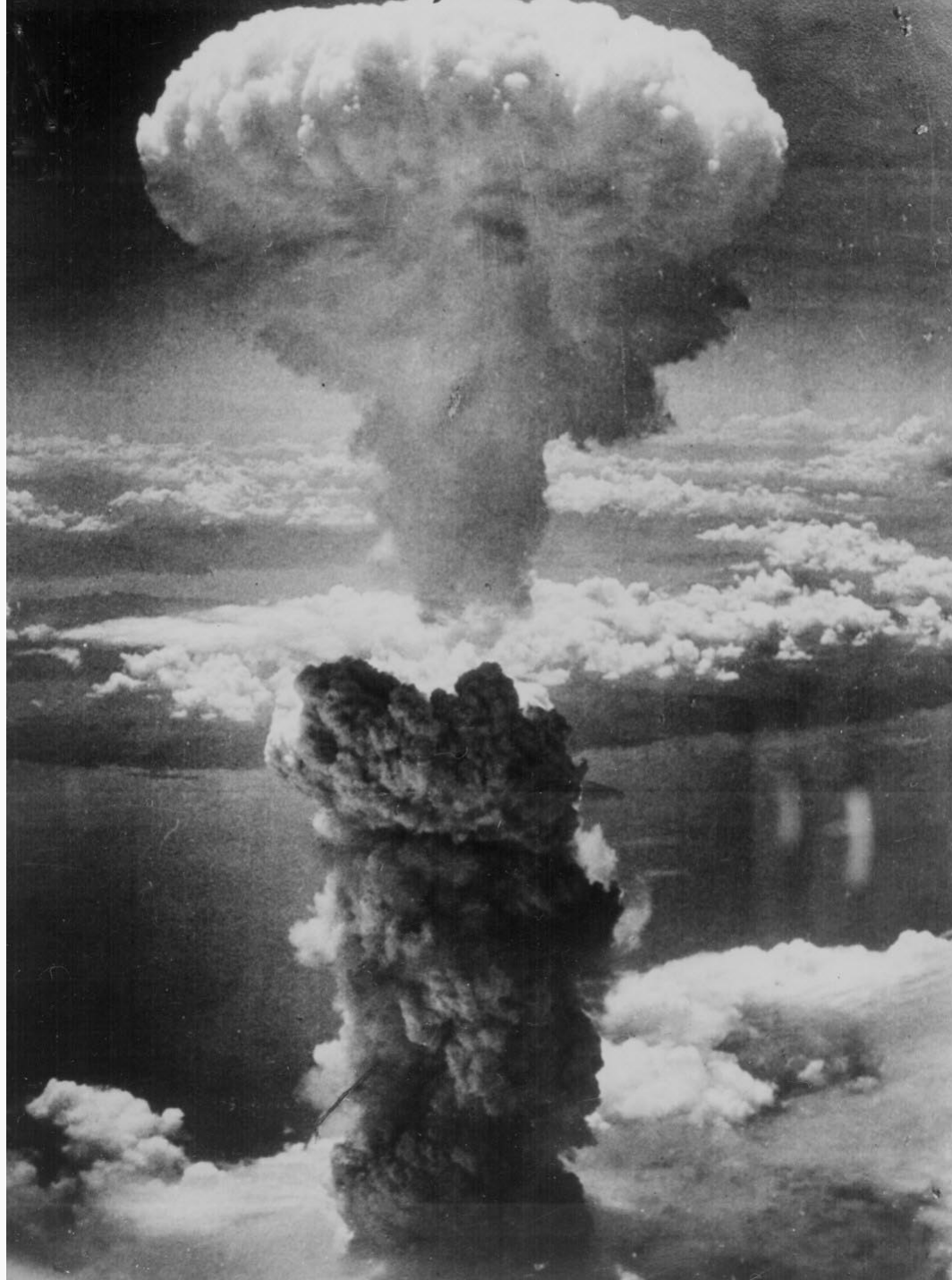
rapporto su Hiroshima redatto da Nishina

Nagasaki 9 agosto 1945, ore 11 e 02



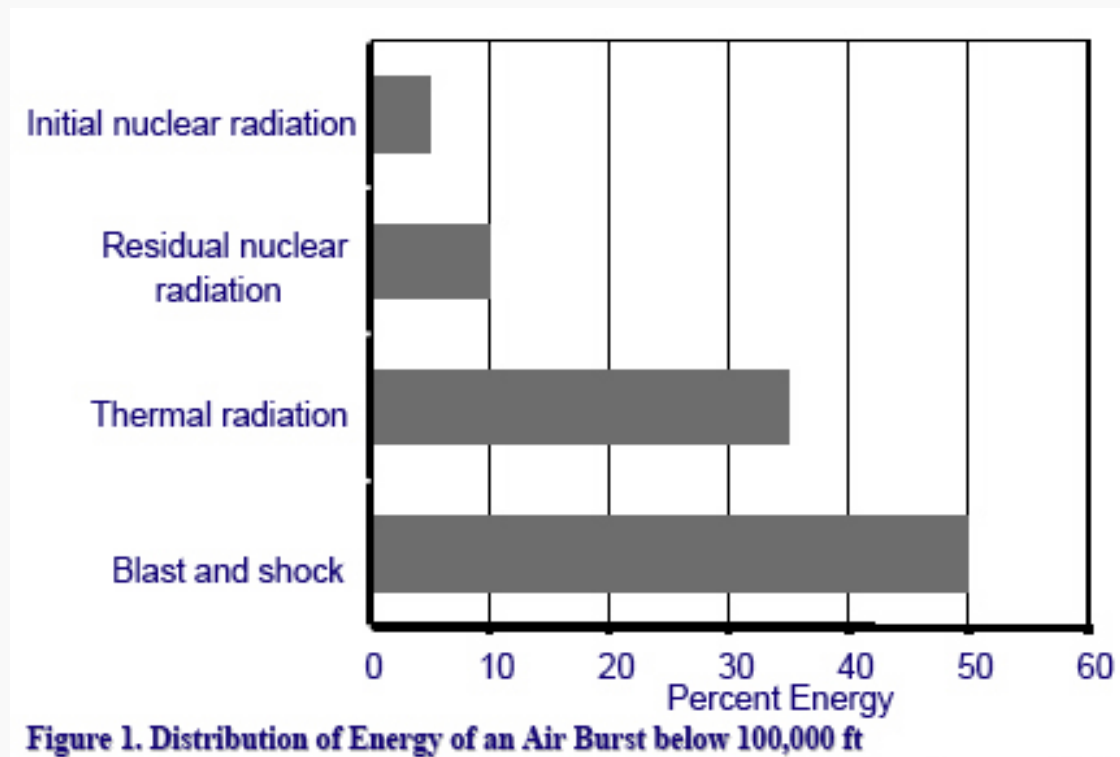


**il “fungo atomico”
su Nagasaki**



effetti di una esplosione nucleare

- la radiazione termica
- la radiazione nucleare iniziale
- l'onda d'urto
- la ricaduta radioattiva



Dose addizionale dovuta a 30 ore di volo ad una altitudine di 10000 metri

Dose limite di esposizione alle radiazioni artificiali non terapeutiche consentita ai cittadini europei

Esposizione media alle radiazioni in Europa per diagnosi e trattamenti medici

Esposizione naturale media in Europa

Dose naturale addizionale per abitanti in case fatte di calcestruzzo o granito

0,1 mSv/a

1 mSv/a

1,1 mSv/a

2,4 mSv/a

3 mSv/a

20 mSv/a

ca. 7000 mSv

ca. 4000 mSv

ca. 1000 mSv

ca. 250 mSv

200 mSv/a

Dose letale per un singolo irraggiamento su tutto il corpo

Grave malattia (letale al 50%) per un singolo irraggiamento su tutto il corpo

Primi segni di una leggera malattia per un singolo irraggiamento su tutto il corpo

Primi effetti clinici rilevabili per un singolo irraggiamento su tutto il corpo

Massima esposizione naturale sulla terra

Valore limite di esposizione consentita in Europa per motivi professionali

Sintomi per alte dosi di radiazione

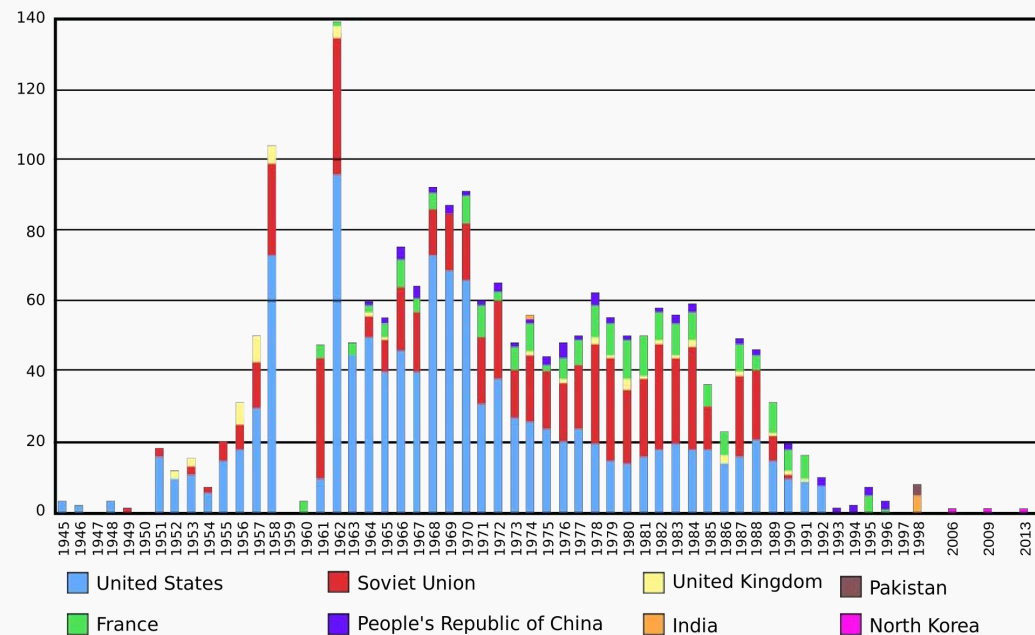
Sintomi	150 mSv	500 mSv	600 mSv	1000 mSv
Nausea e vomito				
Frequenza	comune	100%	100%	100%
Inizio	qualche ora	qualche ora	qualche ora	mezzora
Durata	≤ 1 giorno	1-2 giorni	≤ 2 giorni	≤ 1 giorno
Periodo di latenza	2 settimane	2-3 settimane	≤ 2 settimane	1 settimana
Fase finale				
Durata	1 mese	1 mese	≤1 mese	1 settimana
Letalità	~0%	~50%	~90%	~100%

la ricaduta radioattiva

I materiali solidi polverizzati della bomba e del suolo, divenuti radioattivi all'interno della nuvola, alla fine della fase turbolenta iniziano a cadere sotto l'effetto della gravità e costituiscono la ricaduta radioattiva (*fallout*).

Dal 1945 al 1971 vi sono stati test atmosferici per un'energia totale di 500 Mton

Worldwide nuclear testing, 1945 - 2013



Area di devastazione mortale in km²

Effetto\ potenza	1 kton	10 kton	100 kton	1 Mton	10 Mton
meccanico	1,5	4,9	17,7	71	313
termico	1,3	11,2	74,2	391	1583
radioattivo	2,9	5,7	11,5	22	54

Gli effetti hanno conseguenze che si propagano nello spazio e si conservano nel tempo

Vittime a Hiroshima e Nagasaki

Distanza dall'epicentro	popolazione	%decessi	%feriti
Hiroshima			
0 - 1,0 km	31.200	86	10
1 - 2,5 km	144.800	27	37
2,5 - 5 km	80.300	2	25
totale	256.300	27	30
Nagasaki			
0 - 1,0 km	30.900	88	6
1 - 2,5 km	27.700	34	29
2,5 - 5 km	115.200	11	10
totale	173.800	22	12

fattori alla base del successo del programma

- il pieno sostegno politico al massimo livello**
- l'impegno coerente di molti scienziati di altissimo profilo**
- la collaborazione di grandi industrie con personale altamente specializzato in grado di affrontare tecnologie assolutamente nuove**
- l'ampia disponibilità di materiali e di risorse tecniche**
- un grande impegno finanziario (circa 2 miliardi di dollari del tempo) con notevole agilità amministrativa**
- il lavoro di circa 100.000 persone con vari livelli di responsabilità**
- una direzione centrale determinata, con articolazioni operative modificate agilmente al mutare dell'evoluzione del programma,**
- la collaborazione fra comunità scientifica, mondo industriale, forze armate e alta burocrazia**

Infine ha largamente giovato la sospensione di fatto del controllo democratico sul programma, tenuto segreto al parlamento, a parte del governo, incluso il vice-presidente Truman, alla stampa e all'opinione pubblica

nel dopoguerra gli scienziati si mobilitano sulle linee del rapporto Franck

- ~ Szilard e la Federation of American Scientists**
- ~ Einstein e l'Emergency Committee of Atomic Scientists**
- ~ Eugene Rabinovitch e il Bulletin of Atomic Scientists**
- inevitabile una corsa agli armamenti nucleari se non si fermano tutti gli sviluppi fino alla creazione di un'autorità internazionale**
- mantenere il controllo civile sull'energia nucleare**



BULLETIN of the ATOMIC SCIENTISTS of CHICAGO

VOL. 1

DECEMBER 10, 1945

— 100 —

NO. 1

PEARL HARBOR ANNIVERSARY and the MOSCOW CONFERENCE

On this fourth anniversary of the Pearl Harbor attack, American public opinion seems to be much more concerned with assessing the responsibility for the disaster which occurred four years ago, than with preventing a future "Pearl Harbor" on a continental scale, which may occur four years from now. Three thousand Americans — mostly members of our Armed Forces — lost their lives in the Japanese sneak attack. Thirty million Americans — civilians, women, and children — may be doomed to perish if a sneak attack on our cities by atomic bombs ever comes to pass. This catastrophe will be inevitable if we do not succeed in banishing war from the world. Our own better preparedness could have saved Pearl Harbor — but in a world of atomic bombs, preparedness can only give us the power to retaliate — to smash in our turn the cities of the nation which attacked us.

On the anniversary of Pearl Harbor, The Atomic Scientists of Chicago appeal to the American people to work unceasingly for the establishment of international control of atomic weapons, as a first step towards permanent peace. Let us realize that all we can gain in wealth, economic security, or improved health, will be useless if our nation is to live in continuous dread of sudden annihilation.

We are convinced that no insuperable technical difficulties stand in the way of an efficient international control of atomic power. In a consultation of scientists of all countries, the technical methods of control could be worked out; it will be up to the statesmen to bring about the necessary political understanding.

Right now, the Senate Committee on atomic energy, under the chairmanship of Senator MacMahon, is holding hearings, in which the most qualified experts are testifying. These hearings are perhaps the most important thing happening in the world today. How Congress makes up its mind in this matter and whether the American people will support or oppose the administration's atomic power policy, will have more effect on the future of this country and of the world than the civil wars in China or Iran, or the fate of Palestine or Bulgaria.

Scientists have repeatedly advocated immediate consultations with Russia on the subject of atomic power. We are therefore gratified by the announcement that the subject is to be discussed at Moscow by the foreign secretaries of the three big nations. However, we are worried lest these negotiations be endangered by combining them with an attempt to settle various other political differences between the Allies. The problem of atomic power requires a fresh approach and should not be encumbered by the burden of past and present conflicts and misunderstandings. We fervently hope that all three big nations are aware that an agreement on atomic power controls must be reached if our civilization is to survive.

Our readiness to submit our own atomic power development to control and inspection by an international body, and to restore full and free publication of all research results in the field of atomic studies, should be conditioned only by the readiness of other nations to assume the same responsibilities and submit to the same controls, and should not depend on any concessions in other controversial issues of world politics. We can afford compromises, disagreements, or delays in other fields — but not in this one, where our very survival is at stake.

* This statement was released on December 7 at a press conference held by H. C. Urey and members of the Executive Committee of the A.S.C.

THE ATOMIC SCIENTISTS OF CHICAGO

The Atomic Scientists of Chicago is an organization of the scientific employees of the Metallurgical Laboratory of the University of Chicago, founded on September 26, 1945 after informal discussions which began as early as June. The present constitution was adopted on October 30, 1945. The constitution defines the aims of the organization as:

1. To explore, clarify and formulate the opinion and responsibilities of scientists in regard to the problems brought about by the release of nuclear energy, and
2. To educate the public to a full understanding of the scientific, technological and social problems arising from the release of nuclear energy.

Any past or present scientific employee of the Manhattan Project is eligible for membership. There are at present 200 members who have signed a Declaration of Intent embodying the above aims. General meetings are held at least twice a month. The A. S. C. is now incorporated as a nonprofit corporation in the state of Illinois.

The present Executive Committee, elected on November 7, consists of J. A. Simpson, Jr., chairman, Austin Bruce, Francis L. Friedman, Arthur H. Jaffey, Robert L. Moon, J. J. Nickson, E. Rabinowitch. Alternates to Executive Committee: A. Wattenberg, R. Adams, L. I. Katzin, M. Freedman.

The Advisory Committee is composed of: Thorfin Hogness, chairman, Kenneth C. Cole, Farrington Daniels, James Franck, Robert S. Mulliken, Glenn T. Seaborg, Harold C. Urey and Walter H. Zinn.

The Executive Committee has made the following appointments: H. H. Goldsmith, secretary to the Executive Committee; L. C. Furney, treasurer; Mrs. R. Adams, secretary. Mrs. Adams can be reached at our temporary office, room 508, Social Science Building, University of Chicago, 1125 East 59th St., Chicago 37 — telephone Midway 0890, extension 1168.



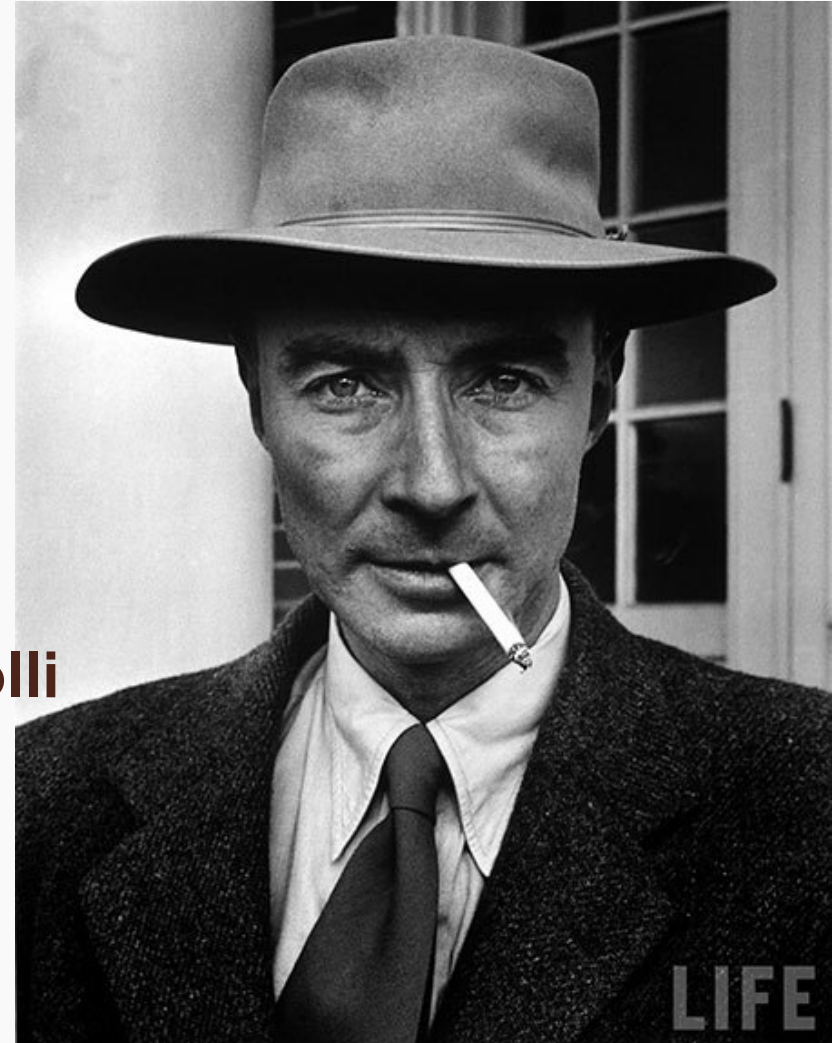
l'Atomic Energy Act (1 agosto 1946) mette l'energia e le armi nucleari americane sotto controllo civile



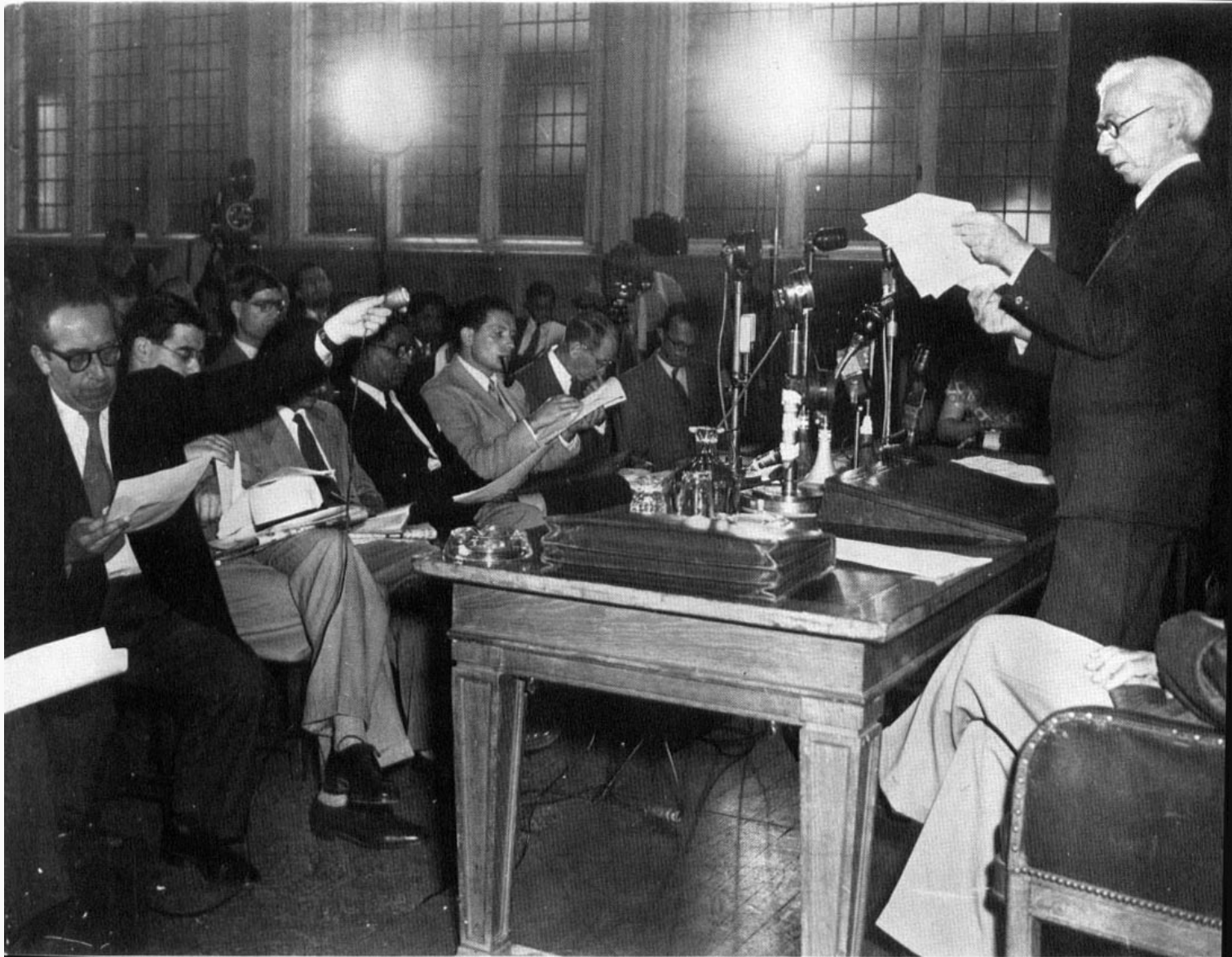
Oppenheimer e il rapporto Acheson-Lilienthal

~ promosso da Bush in vista della commissione dell'ONU sull'energia nucleare

- creazione di un autorità atomica internazionale per il controllo di tutte le attività di sviluppo e uso dell'energia nucleare
- rinuncia alle armi nucleari
- creazione di un sistema di controlli internazionale
- blocco della produzione di armi nucleari
- distruzione delle armi esistenti



Londra, Caxton Hall, 9 luglio 1955 Bertrand Russel presenta un “manifesto” co-promosso con Einstein

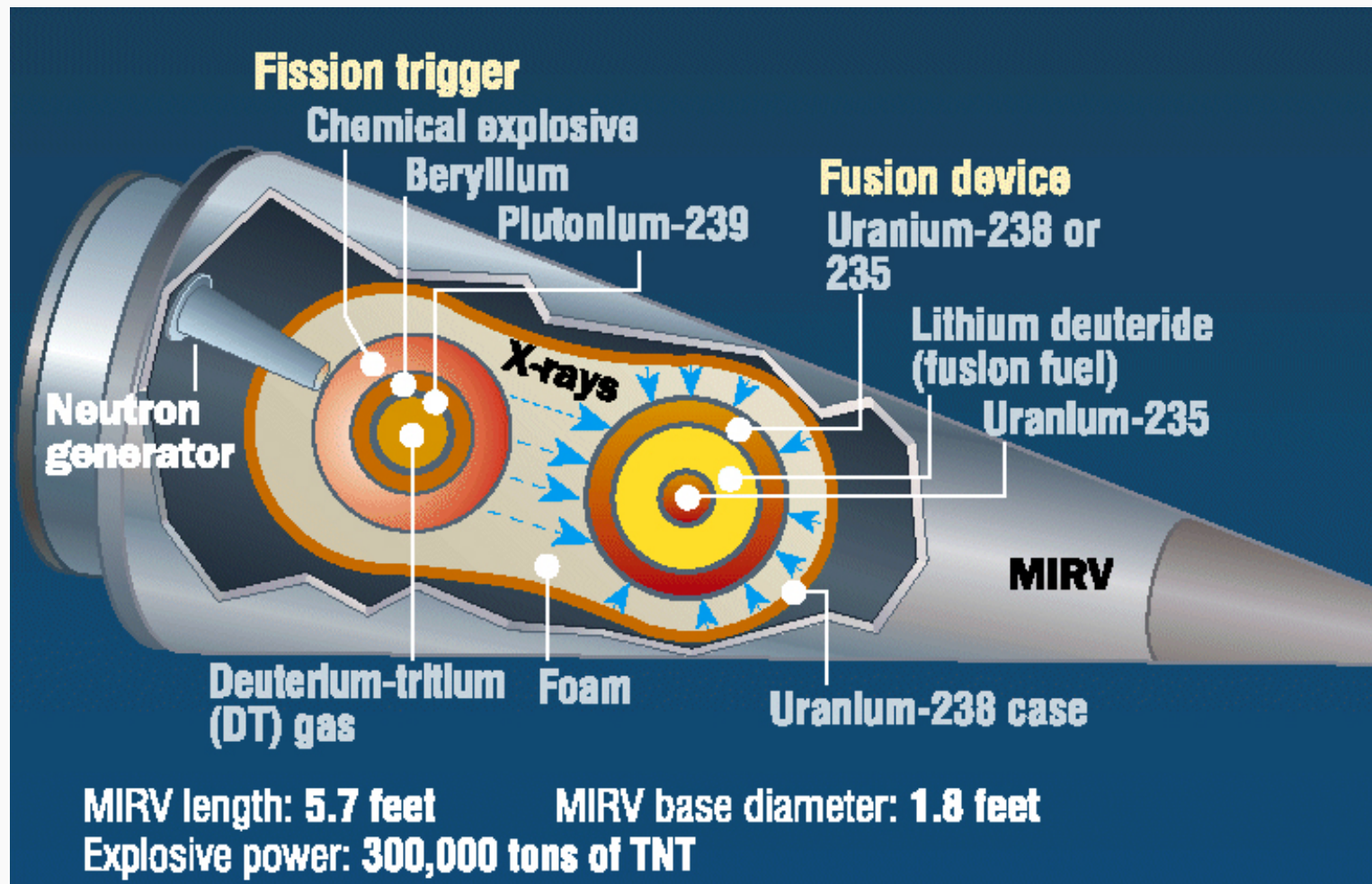


***C'è la possibilità di progredire in felicità,
conoscenza e saggezza, se si dimenticano le
lotte ed i conflitti che portano alla morte.***

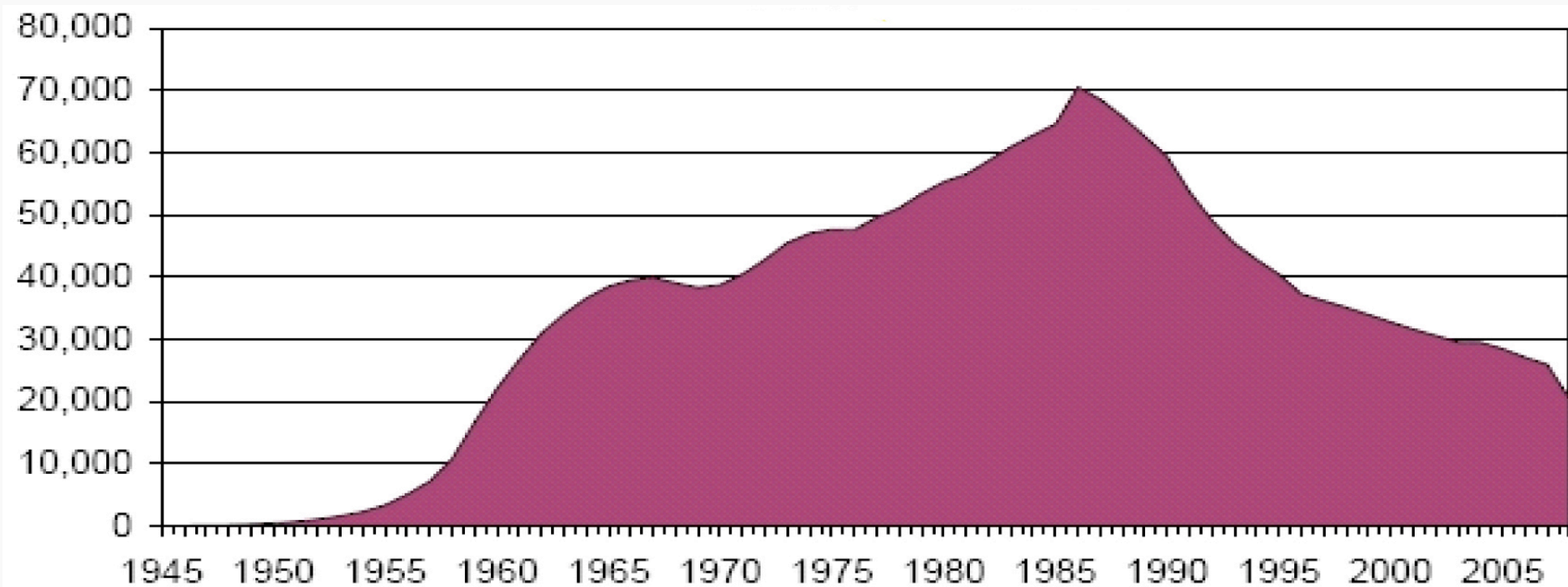
***L'appello di uomini a uomini: ricordatevi della
vostra natura umana e dimenticate il resto.
Se saprete farlo, ci si apre una via verso un
nuovo paradiso, altrimenti siamo esposti al
rischio di una morte universale***

**A. Einstein, B. Russell, M. Born, P.W. Bridgam, L. Infeld,
J.F. Joliot-Curie, H.J. Muller, L. Pauling, C.F. Powell,
J. Rotblat, H. Yukawa**

l'obiettivo immediato di bloccare lo sviluppo di armi termonucleari e la corsa agli armamenti non fu raggiunto



Evoluzione degli arsenali nucleari



perché preoccuparci oggi delle armi nucleari?

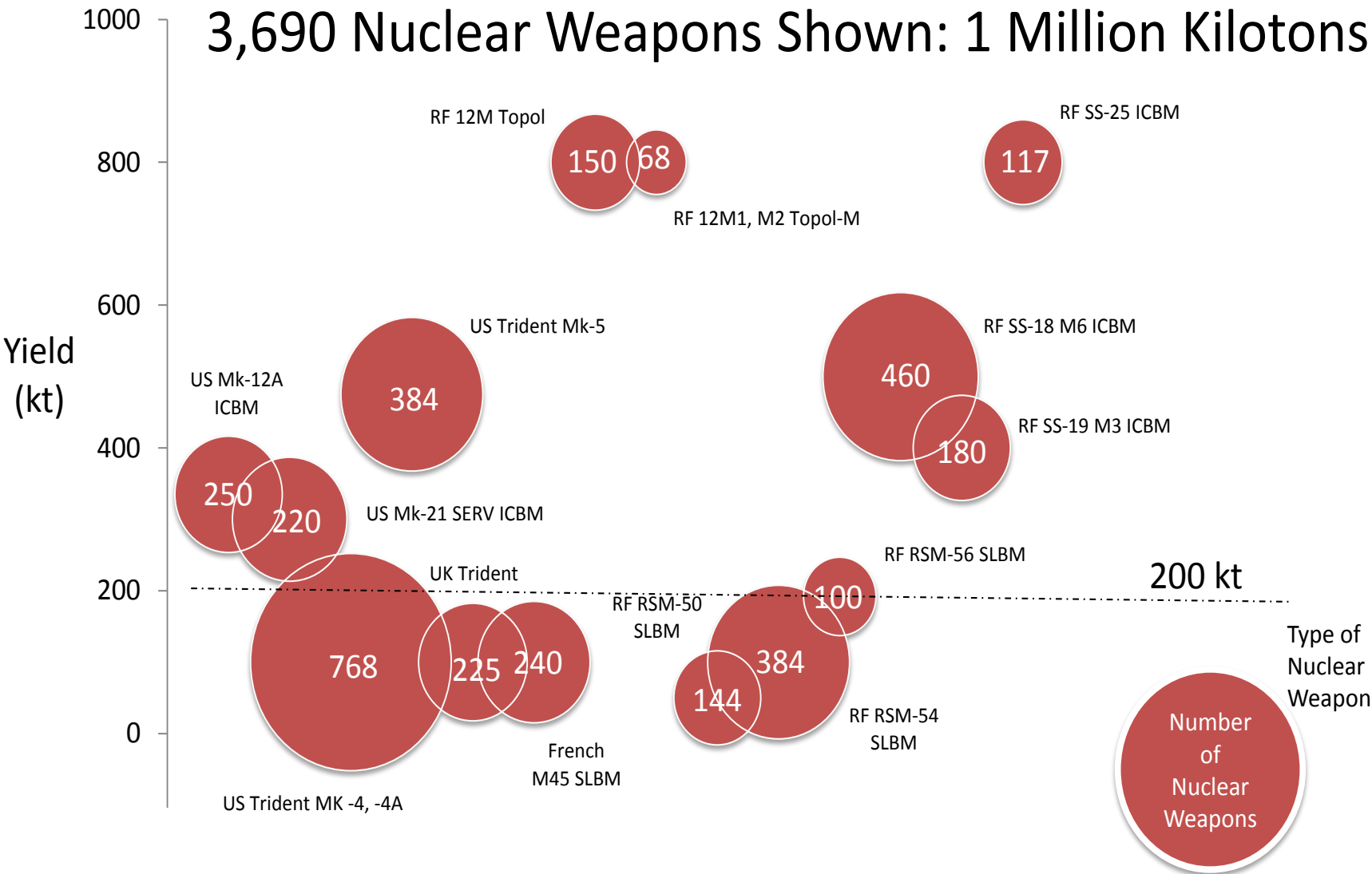
- effetti spaventosi**
- rischio di incidenti e uso non autorizzato**
- numero eccessivo**
- ulteriore sviluppo tecnologico**
- presenza in aree di crisi**
- enormi quantità di materiale fissile**
- pericoli di proliferazione**
- rischi di terrorismo nucleare**
- ostacoli al processo di disarmo e controllo**
- scarsa attenzione dell'opinione pubblica**

le armi nucleari attuali

Russia	7.300
Stati Uniti	8.000
Francia	300
Cina	250
Gran Bretagna	225
Israele	80 – 100
Pakistan	100 – 120
India	90 – 100
Nord Corea	?
Totale	~16.400

potenza delle armi più comuni

Data Source: Kristensen, Hans M., and Robert S. Norris. "Russian nuclear forces, 2014." *Bulletin of the Atomic Scientists* 70.2 (2014): 75-85; and "US nuclear forces, 2014." *Bulletin of the Atomic Scientists* 70.1 (2014): 85-93.



principi fondamentali del diritto umanitario

- principio della necessità militare**
- principio di distinzione**
- principio di proporzionalità**
- principio di umanità**

la minaccia o l'uso di armi nucleari sono in generale contrari alle regole della legislazione internazionale applicabile nei conflitti armati, e in particolare ai principi e regole della legge umanitaria

parere della Corte di giustizia internazionale (8 luglio 1996)



**la conferenza di Vienna (2 dicembre 2014):
bando delle armi nucleari per motivi umanitari**



23 dicembre 2016 l'assemblea dell'ONU decide di convocare una conferenza per un bando delle armi nucleari, che inizierà il 27 marzo prossimo

programmi di modernizzazione

tutti i paesi nucleari (Russia e USA in testa) stanno sviluppando nuovi ambiziosi progetti

attualmente ci sono in cantiere 27 categorie di nuovi missili balistici, 9 missili cruise, 8 vascelli navali, 5 diversi bombardieri, 8 tipi di testate e 8 fabbriche di armi nucleari.

Questi programmi minacciano di prolungare indefinitamente nel tempo l'era delle armi nucleari.



Alessandro Pascolini

pascolini@pd.infn.it
www.pd.infn.it/~pascolin
 **@pascolin**

