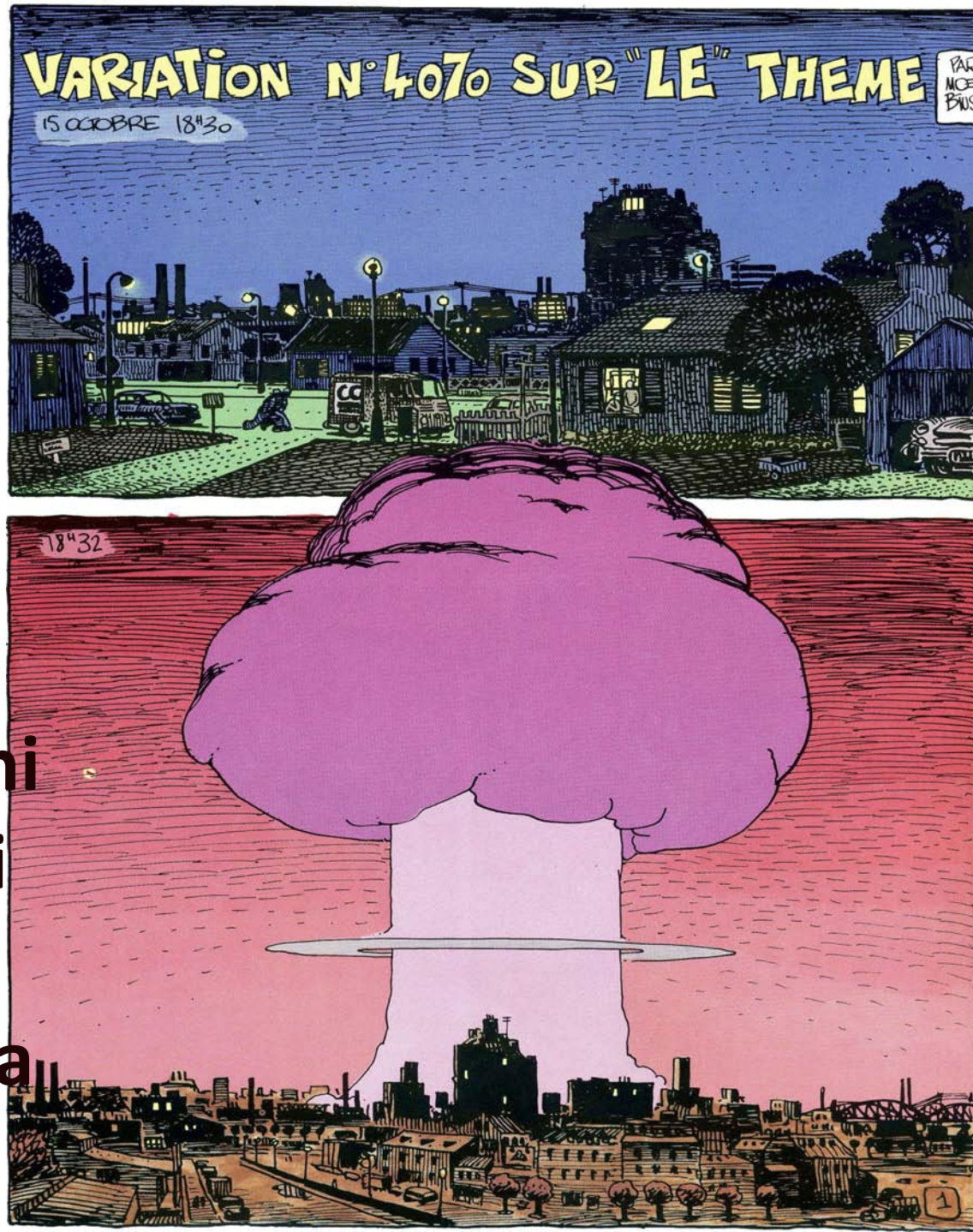
Le armi nucleari

ottobre 2018 Alessandro Pascolini

le armi nucleari

- potenza: basata sui fenomeni naturali più energetici: fissione e fusione
- effetti specifici non esistenti per altre armi
- impatto su vasti spazi e tempi lunghi
- impossibilità di difesa



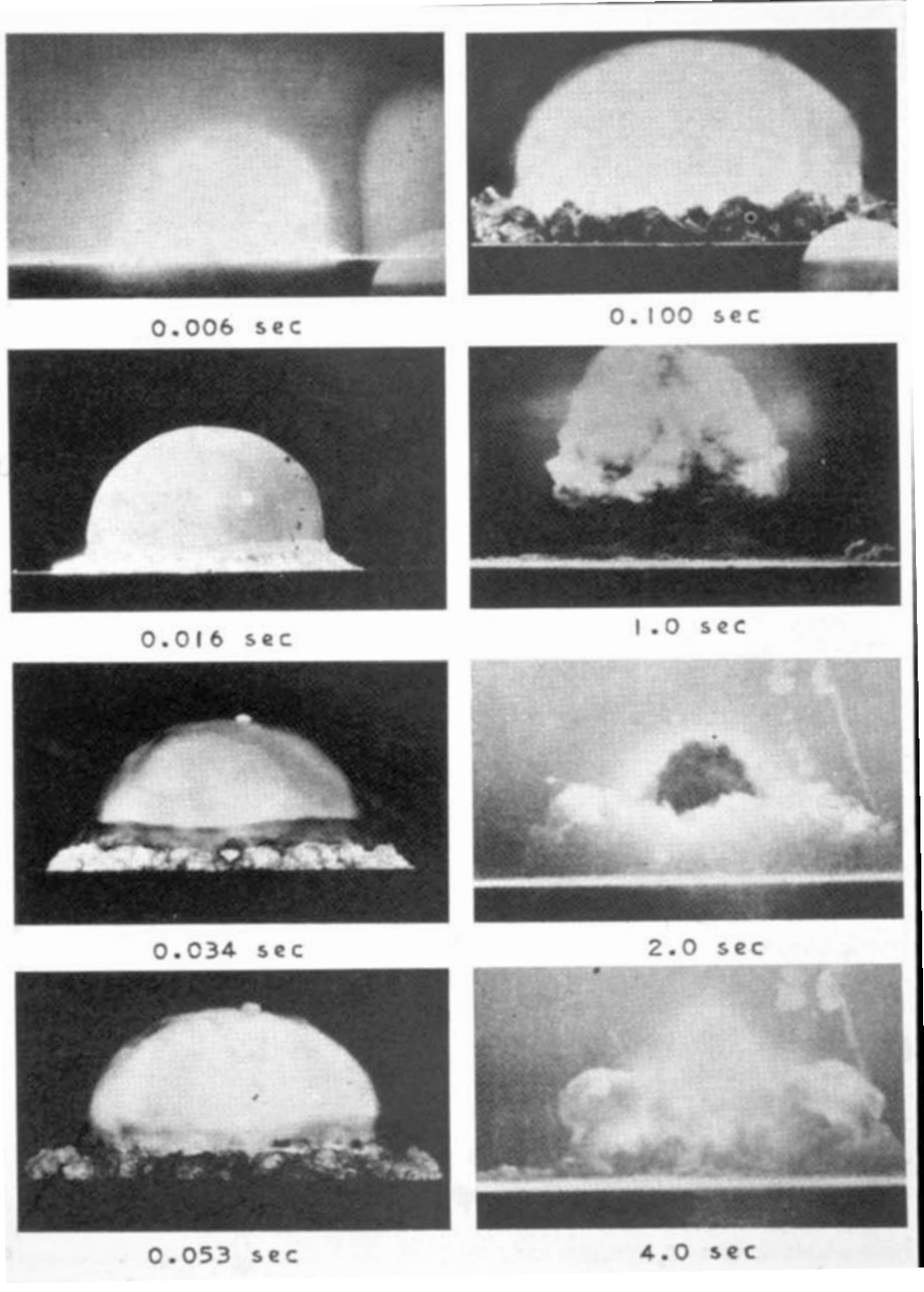
fissione e fusione nucleari

enorme densità di energia per unità di massa:
- fissione di 1 kg di uranio 235
≈ esplosione di 10.000.000 kg di tritolo
- fusione di 1 kg di deuterio-trizio
≈ esplosione di 40.000.000 kg di tritolo

una centrale elettrica da 1GWe "brucia":
- uranio-235: ≈ 3,8 kg al giorno, ≈ 1,3 t all'anno
- carbone: ≈ 6,85 milioni di kg al giorno

evoluzione di un'esplosione nucleare in aria:

- la radiazione nucleare
- la palla di fuoco
- la nube radioattiva
- l'onda d'urto
- la ricaduta radioattiva



la radiazione nucleare iniziale

I processi di fissione alla base di un'esplosione nucleare emettono immediatamente (10^{-8} s) un'enorme numero di neutroni (10^{26}) e di raggi gamma.

L'impulso di neutroni e di raggi gamma si diffonde a enorme velocità in tutte le direzioni fino a distanze considerevoli, a seconda della potenza della bomba.

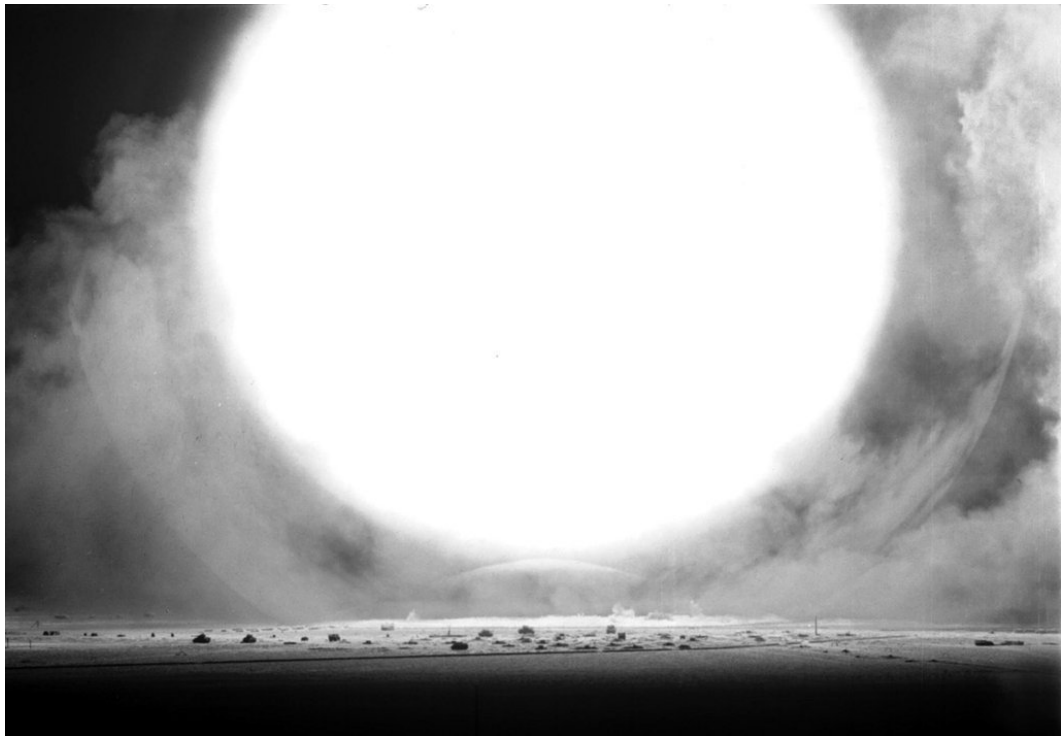
Queste radiazioni rendono radioattivi i materiali che le assorbono e producono effetti di varia gravità negli organismi viventi.

la “palla di fuoco”

Entro 0,8 μs l’enorme energia prodotta riscalda i materiali della bomba a centinaia di milioni di gradi e li vaporizza a pressioni milioni di volte quella atmosferica.

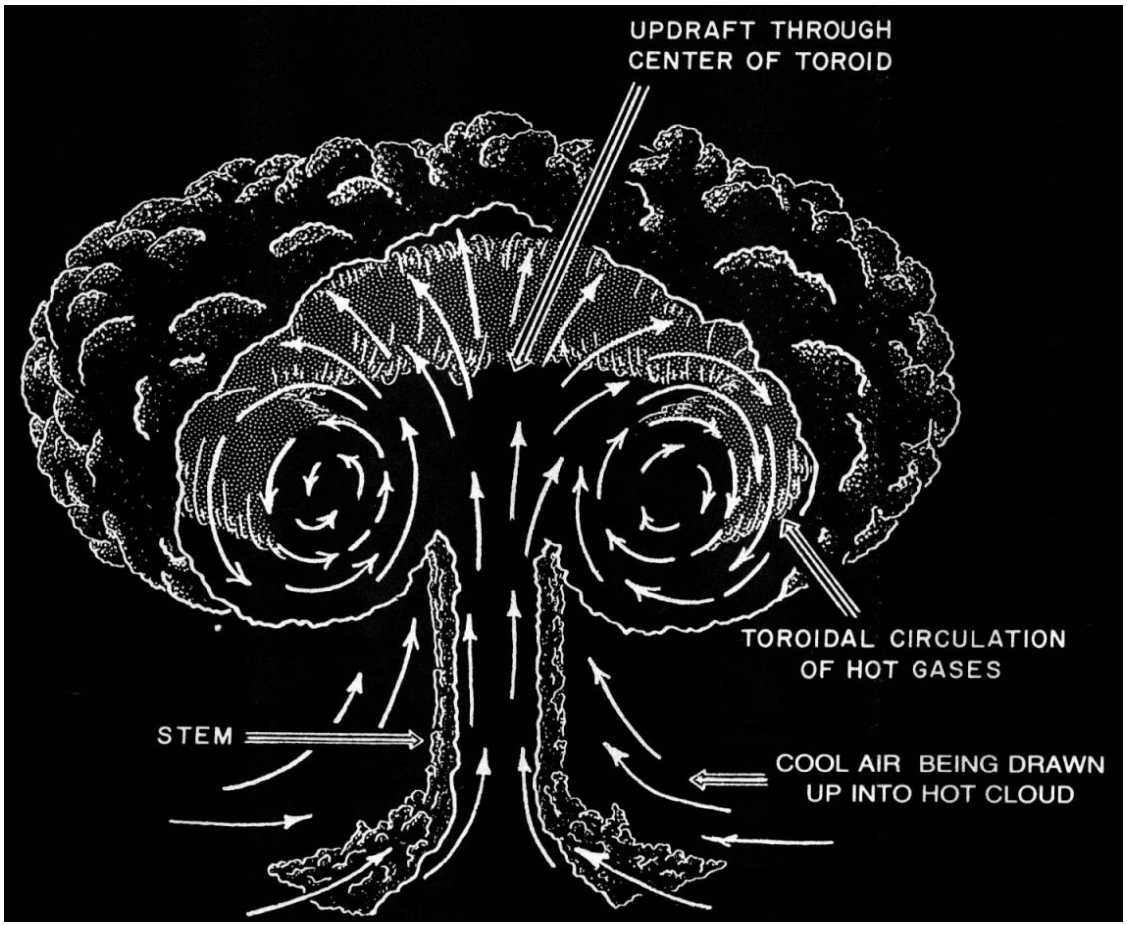
Enormi impulsi di raggi-X vengono assorbiti dall’aria, creando una massa d’aria estremamente calda e incandescente, molto più brillante del sole a mezzogiorno e 350 volte più ampia, visibile fino a centinaia di km di distanza.

La “palla di fuoco” si espande e si innalza, riducendo la propria temperatura: dopo un minuto cessa di emettere luce e raggiunge quasi 7 km di altezza.



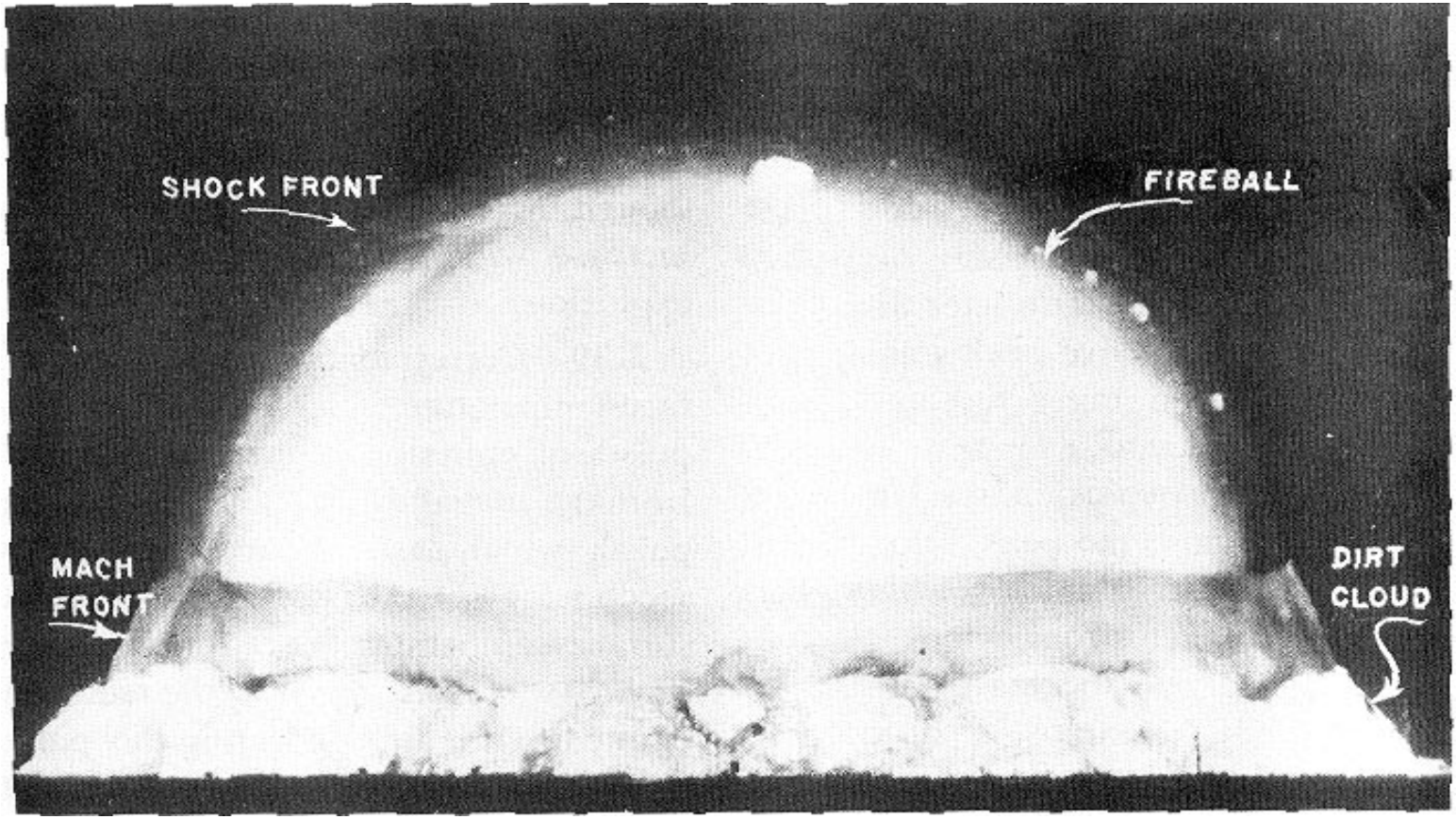
la nube radioattiva

Quando la palla di fuoco si raffredda i materiali gassosi condensano a formare una nuvola di particelle solide e di gocce d'acqua. La palla assume una forma a fungo e la parte centrale a ciambella viene sottoposta a un violento moto circolare interno. Aria fredda è trascinata nella nuvola calda portando all'interno frammenti e detriti, che diventano radioattivi.



l’onda d’urto

Una frazione di secondo dopo l’esplosione, fino al 50-60% dell’energia si converte in un’onda di alta pressione che parte dalla palla di fuoco. L’onda d’urto si comporta come uno spesso “muro” di aria altamente compressa che si muove a velocità superiore a quella del suono, seguita da una fase di depressione.



effetti di una esplosione nucleare

- immediati
  - la radiazione nucleare iniziale
  - la radiazione termica
  - danni meccanici
  - l'impulso elettromagnetico
- ritardati
  - la ricaduta radioattiva

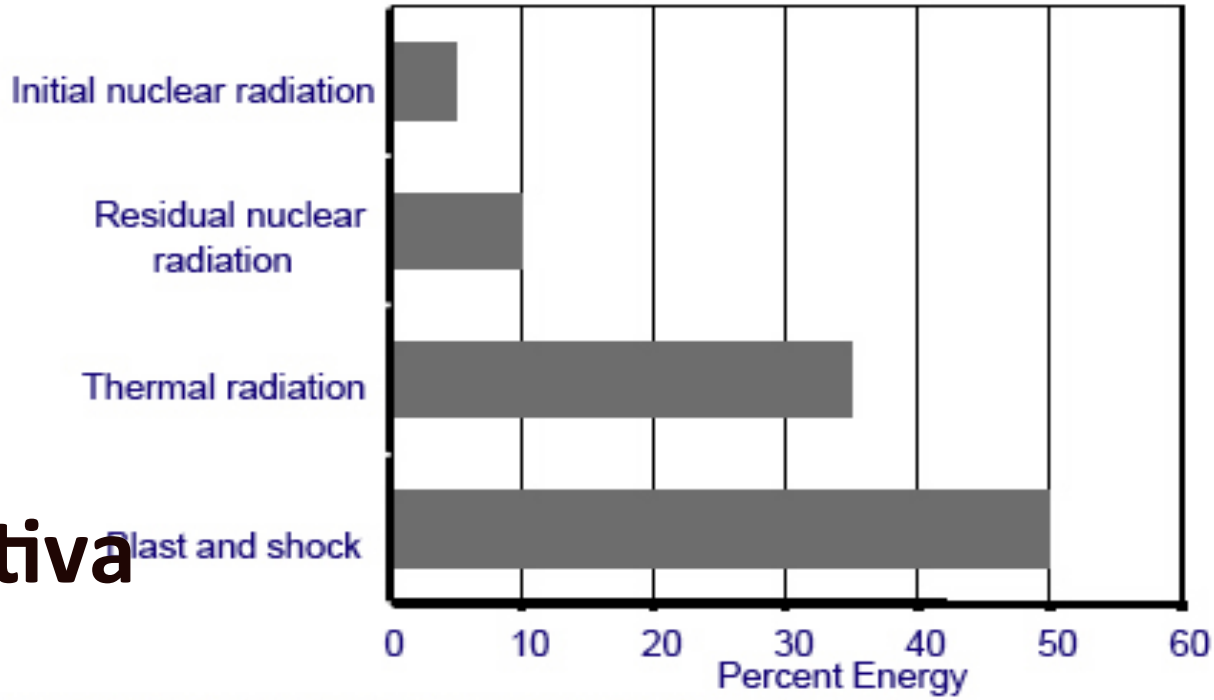


Figure 1. Distribution of Energy of an Air Burst below 100,000 ft

la radiazione nucleare iniziale

la radiazione nucleare costituisce solo circa il 5% dell'energia totale dell'esplosione, ma può causare una considerevole percentuale di morti e feriti, dato che la protezione dai neutroni e dai raggi gamma non è facile.

Ad esempio, a una distanza di 1,6 km da un'esplosione di 1 Mton la radiazione nucleare sarebbe fatale a gran parte delle persone anche se protette da uno schermo di 60 cm di calcestruzzo.

Gli effetti biologici dipendono dalla quantità di radiazione assorbita, che si misura in sievert.

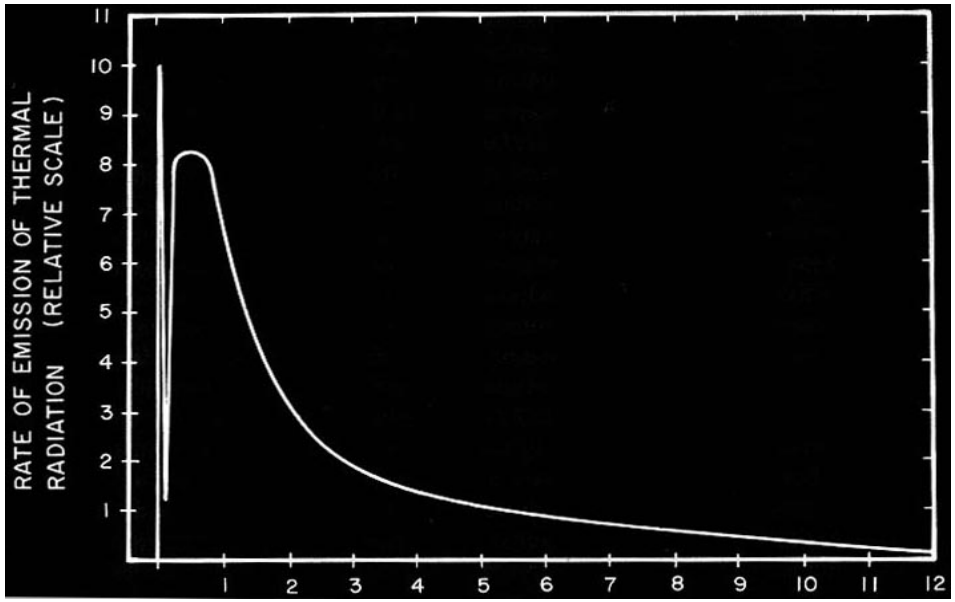
sintomi per alte dosi di radiazione

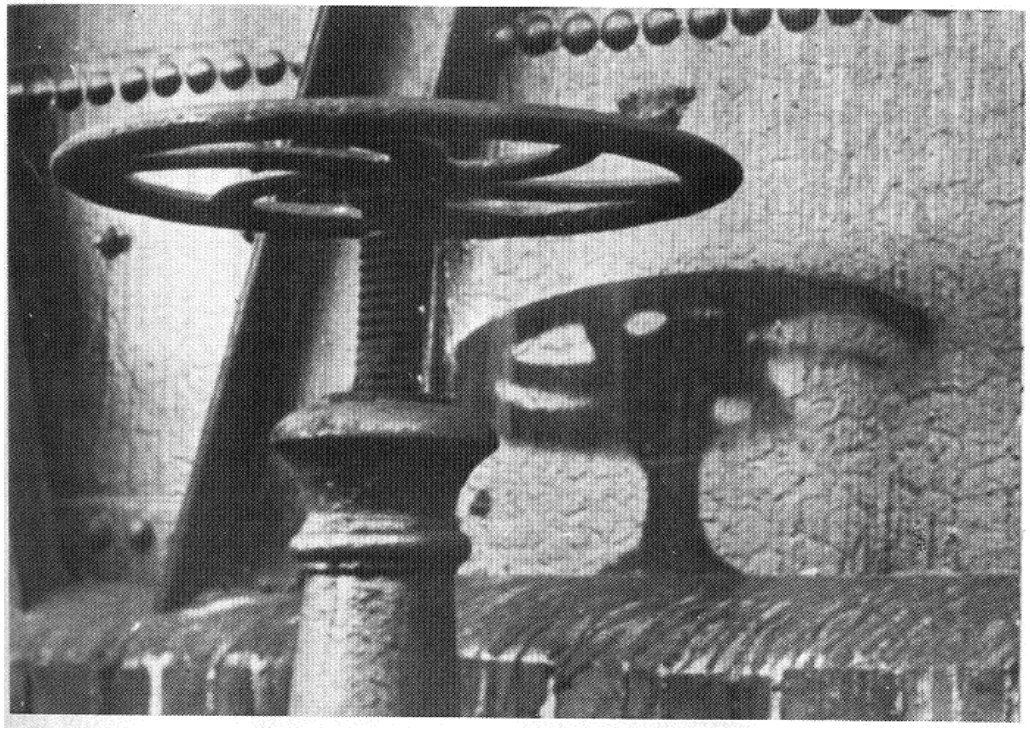
Sintomi	150 mSv	500 mSv	600 mSv	1000 mSv
Nausea e vomito				
Frequenza	comune	100%	100%	100%
Inizio	qualche ora	qualche ora	qualche ora	mezzora
Durata	≤ 1 giorno	1-2 giorni	≤ 2 giorni	≤ 1 giorno
Periodo di latenza	2 settimane	2-3 settimane	≤ 2 settimane	1 settimana
Fase finale				
Durata	1 mese	1 mese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

la radiazione termica

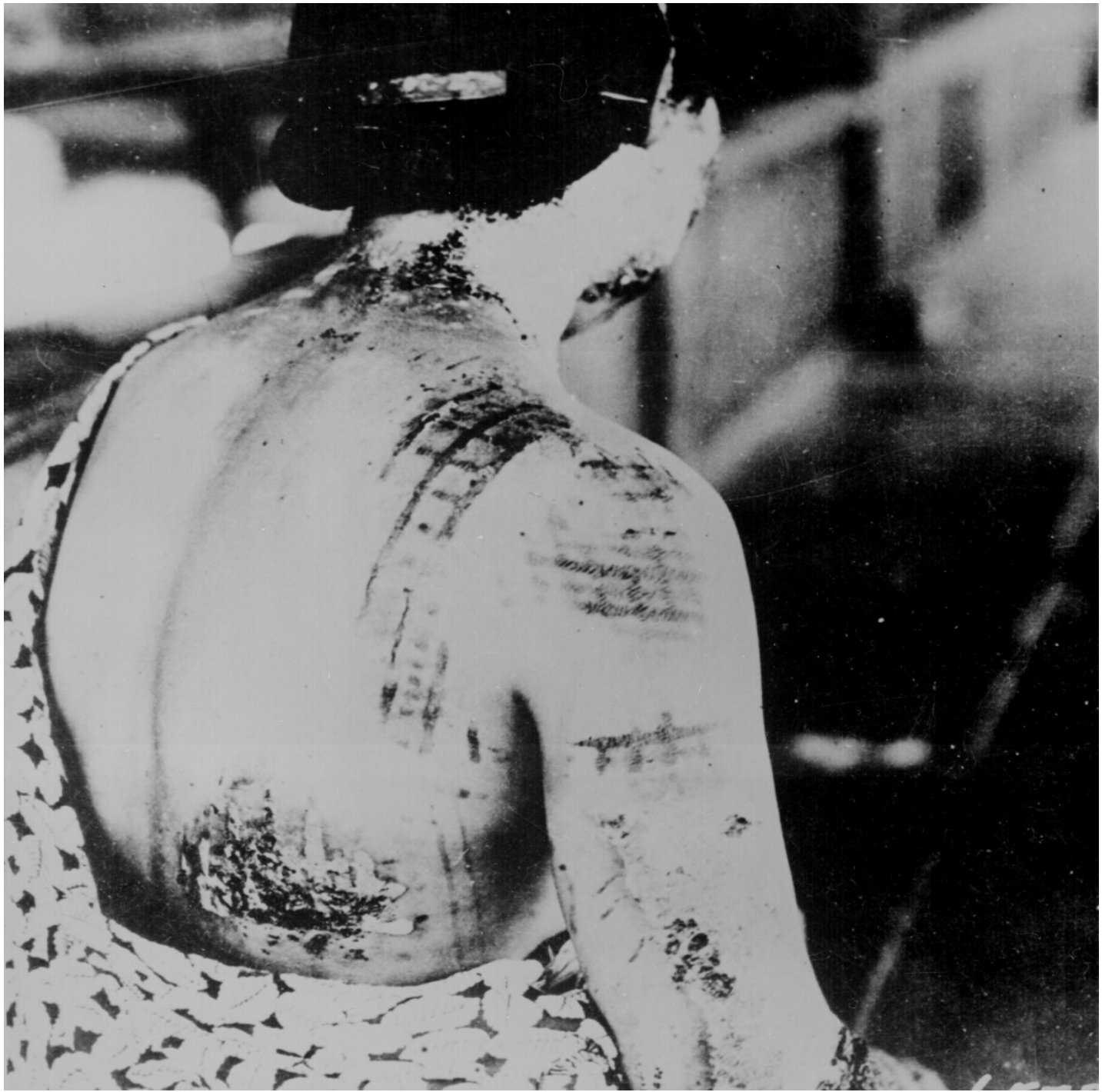
La palla di fuoco emette radiazione termica in due impulsi:

- **radiazione ultravioletta intensa e breve (decimi di secondo)**
- **luce visibile e infrarossa in una decina di secondi: comprende il 99% della radiazione termica totale. È la causa principale di ustioni cutanee e di danni agli occhi e può dare avvio a incendi.**





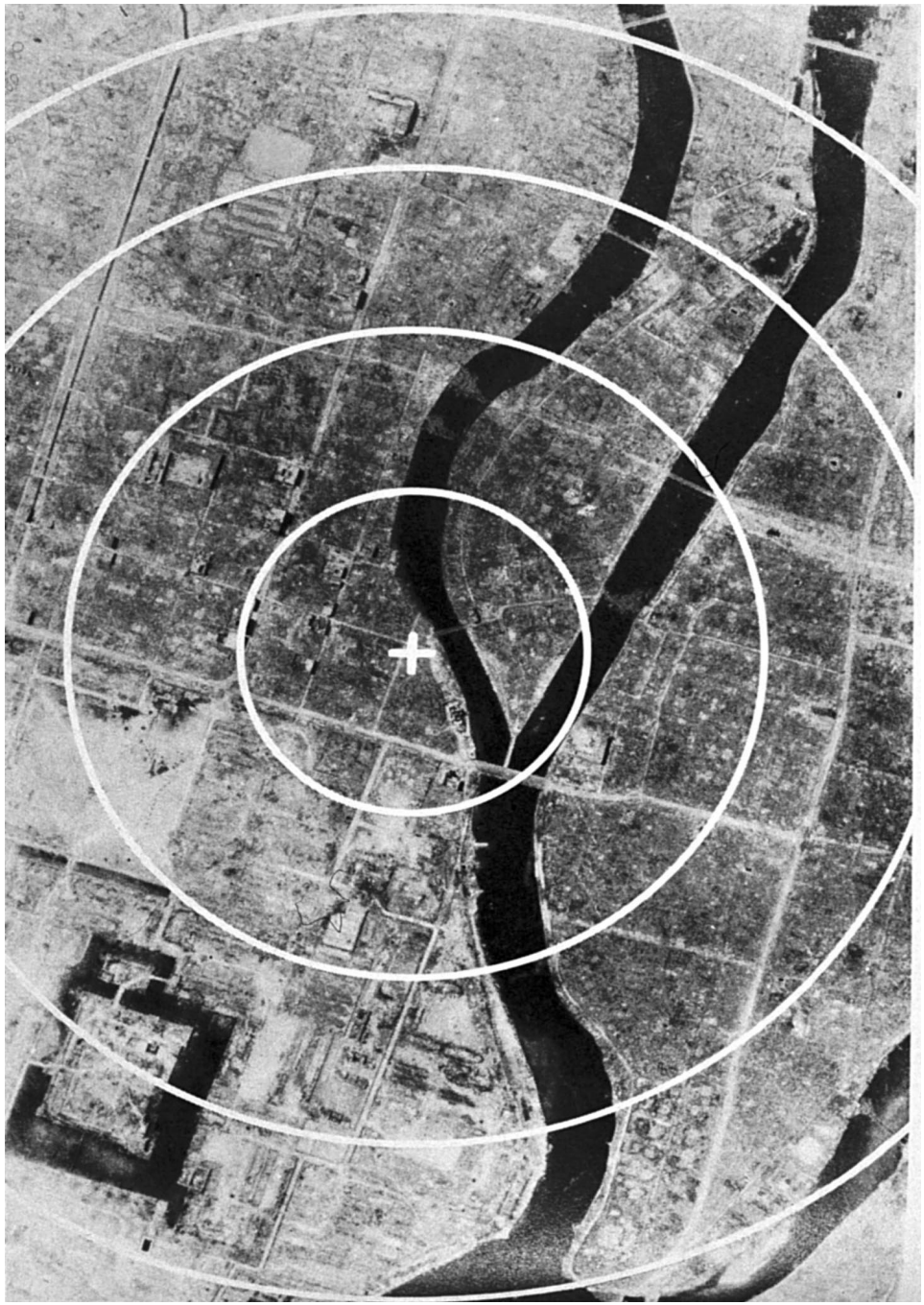
ustioni di una vittima di Hiroshima: il disegno del vestito tatuato sul corpo



distruzioni meccaniche

Il fronte d'urto è accompagnato da venti fortissimi e di breve durata, con velocità di punta di oltre 3.000 km/ora.

Onde d'urto secondarie vengono generate dalla riflessione al suolo dell'onda primaria. Gli effetti cumulativi delle onde d'urto e dei venti producono pressioni dinamiche fino a 20 atmosfere: basta una sovrappressione di 1/3 di atmosfera per distruggere una casa e di 2/3 per demolire un edificio di cemento armato.



Nagasaki 9 agosto 1945, ore 11.02

vittime a Hiroshima e Nagasaki

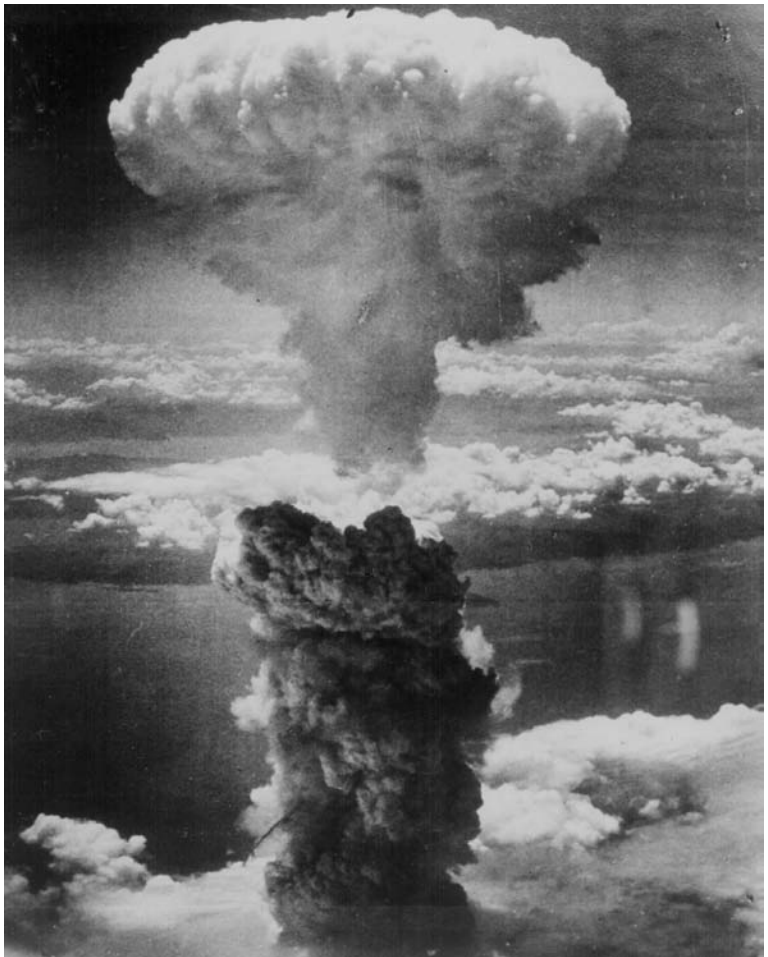
Distanza dall'epicentro	popolazione	%decessi	%feriti
Hiroshima			
0 1,0 km	31.200	86	10
1 – 2,5 km	144.800	27	37
2,5 – 5 km	80.300	2	25
totale	256.300	27	30
Nagasaki			
0 – 1,0 km	30.900	88	6
1 – 2,5 km	27.700	34	29
2,5 – 5 km	115.200	11	10
totale	173.800	22	12

Area di devastazione mortale in km^2

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

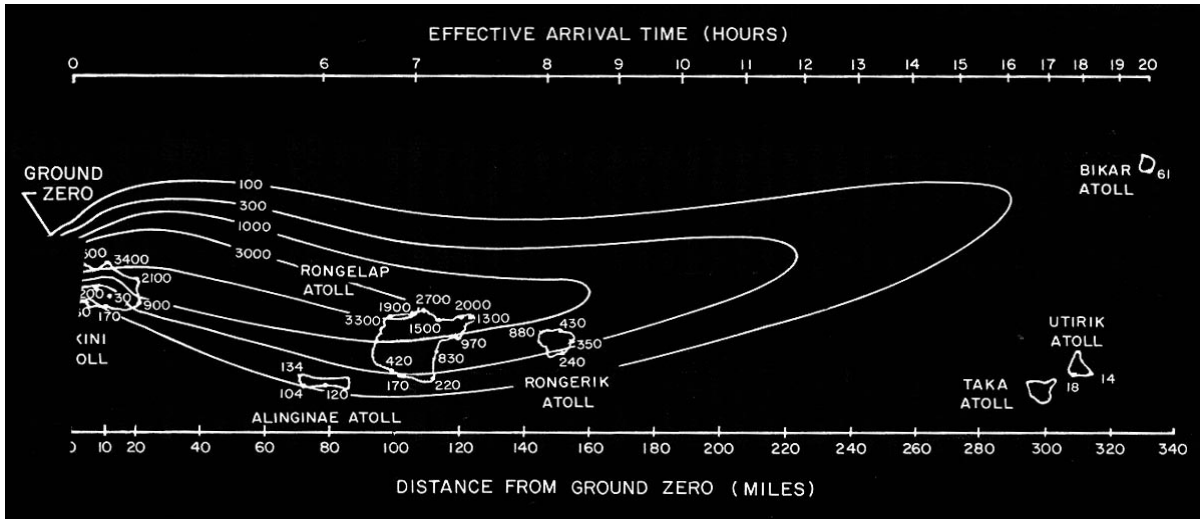
la ricaduta radioattiva

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 così detta ricaduta radioattiva (*fallout*).
La radioattività di queste particelle decade solo in tempi lunghi ed è responsabile delle contaminazioni nucleari residue, che assorbono circa il 10% dell'energia totale dell'esplosione.
Il fenomeno è particolarmente presente nel caso di esplosioni al suolo, che coinvolgono una grande quantità di materiale.



isotopi radioattivi principali del fallout

- di breve durata, efficaci solo in prossimità dell'esplosione
  - iodio-131 (tempo di dimezzamento 8,1 giorni)
    viene assorbito dalla tiroide e si concentra nel latte
- di lunga durata, distribuiti su vaste zone
  - cesio-137 (tempo di dimezzamento 30 anni)
  - stronzio-90 (tempo di dimezzamento 28 anni)
    simile chimicamente al calcio viene assorbito nelle ossa
  - carbonio-14 (tempo di dimezzamento 5600 anni)



un tipico obiettivo – bomba da 200 kT

energia di una bomba da 200 kt

$200\ \text{kt} = 200 \times 4{,}184 \times 10^{12}\ \text{J}$

$= 200 \times 1{,}16 \times 10^{6}\ \text{kWh}$

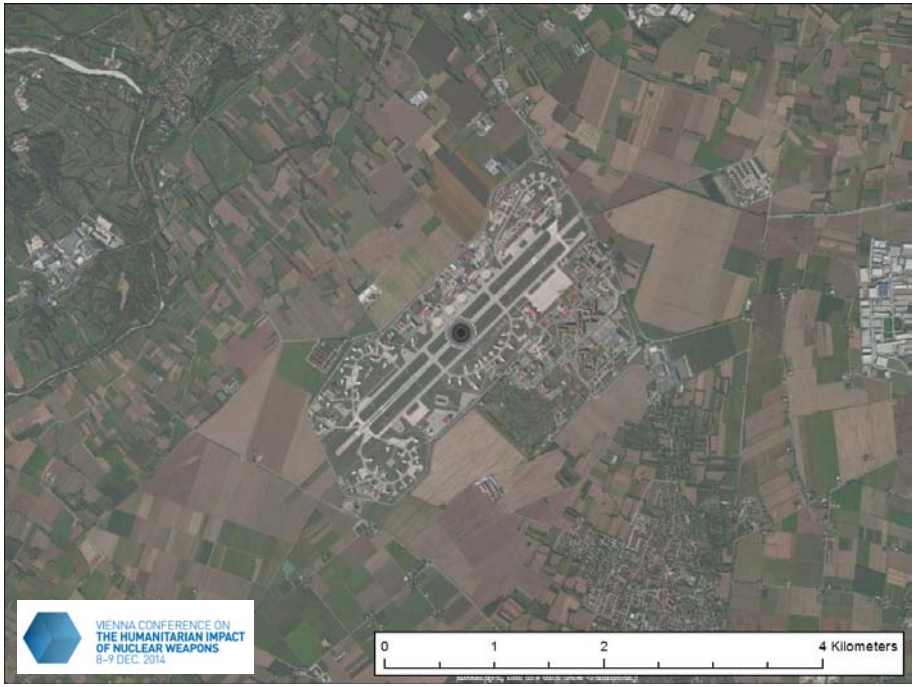
$= 200 \times 132{,}4\ \text{kWanno}$

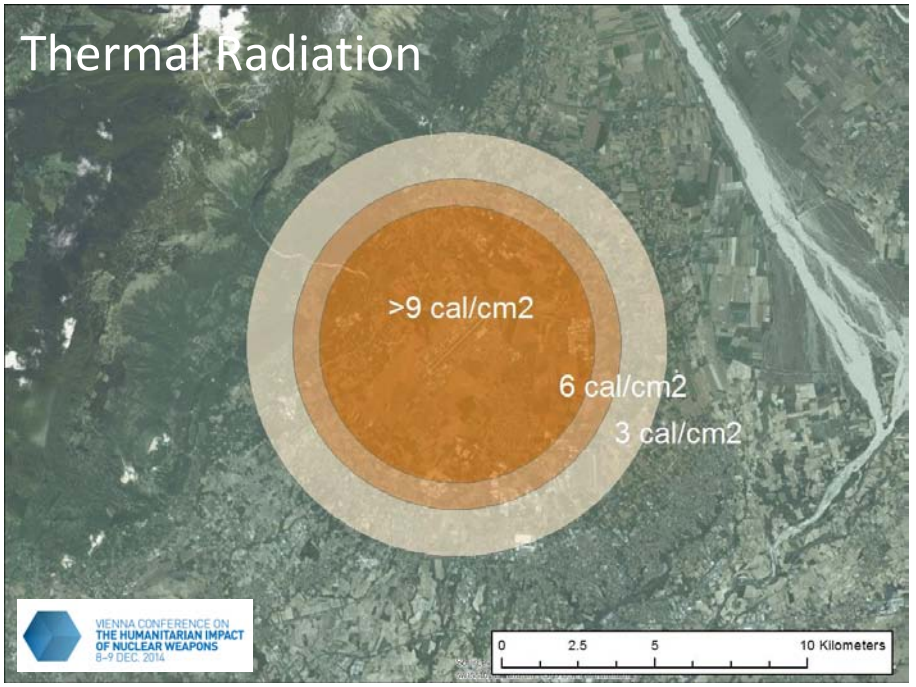
potenza massima per un'utenza abitativa: 3,3 kW

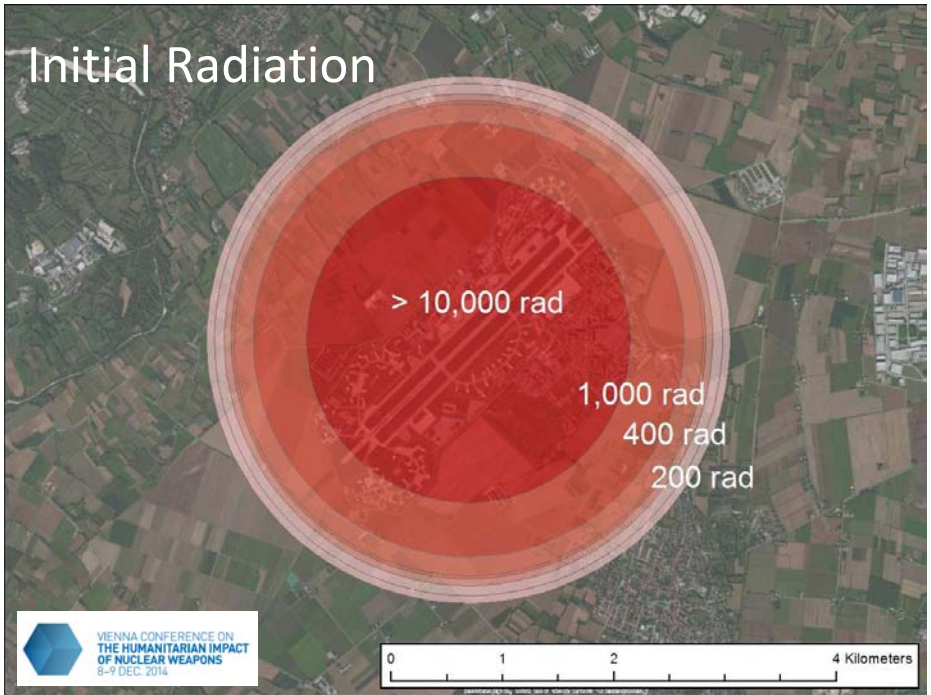
= 200 × consumo massimo annuo di 40 case

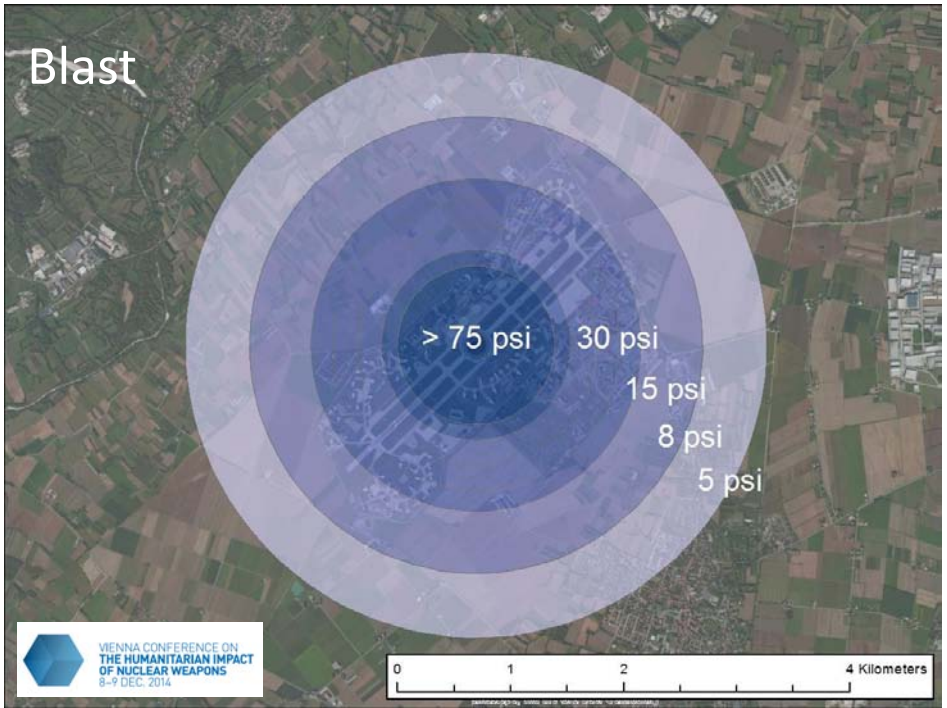
= consumo massimo annuo di 8.000 case

= consumo tipico annuo di 185.000 case

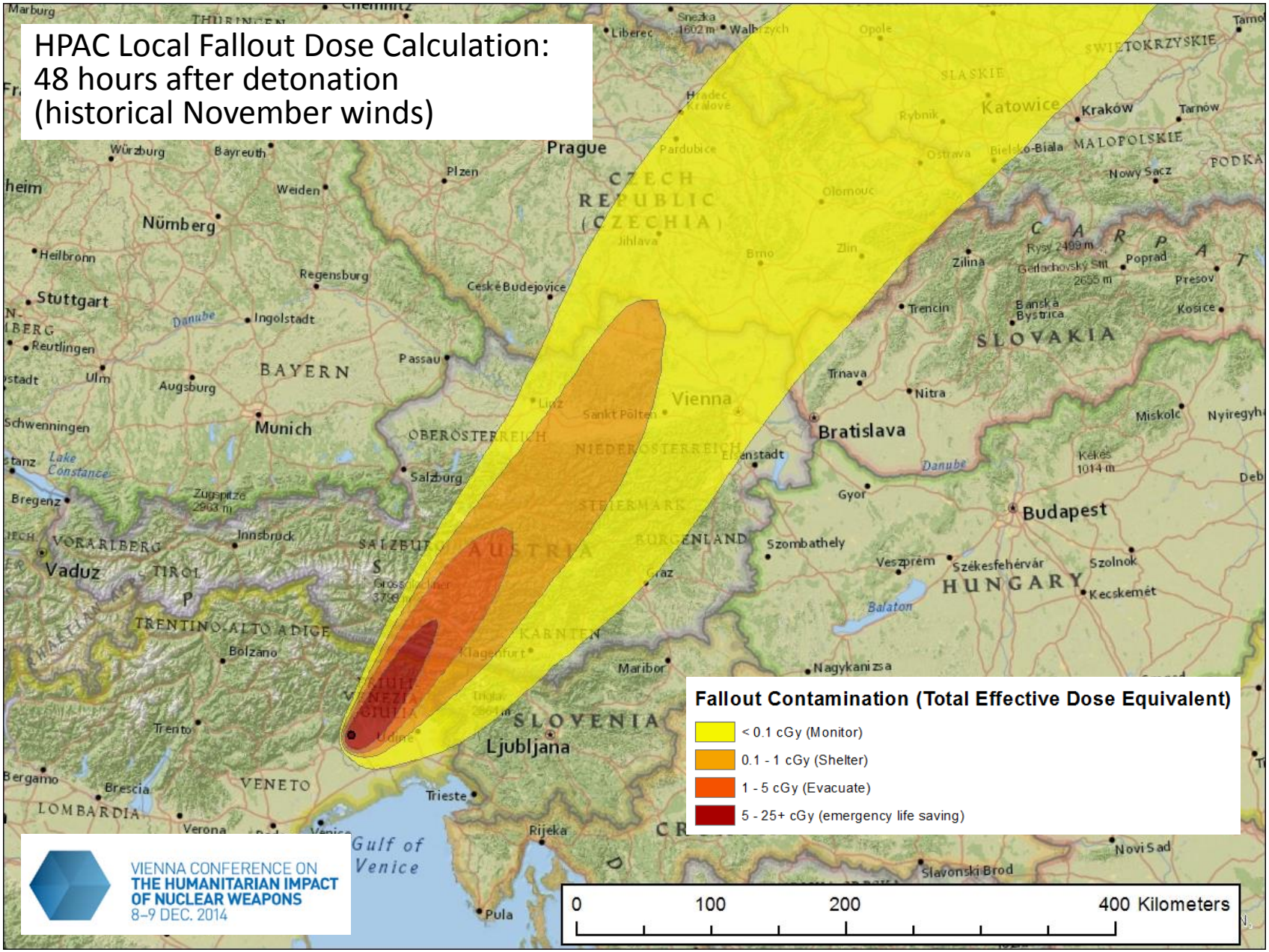

VIENNA CONFERENCE ON
THE HUMANITARIAN IMPACT
OF NUCLEAR WEAPONS
8–9 DEC. 2014
0
1
2
4 Kilometers


Thermal Radiation
>9 cal/cm2
6 cal/cm2
3 cal/cm2
VIENNA CONFERENCE ON
THE HUMANITARIAN IMPACT
OF NUCLEAR WEAPONS
8–9 DEC. 2014
0
2.5
5
10 Kilometers

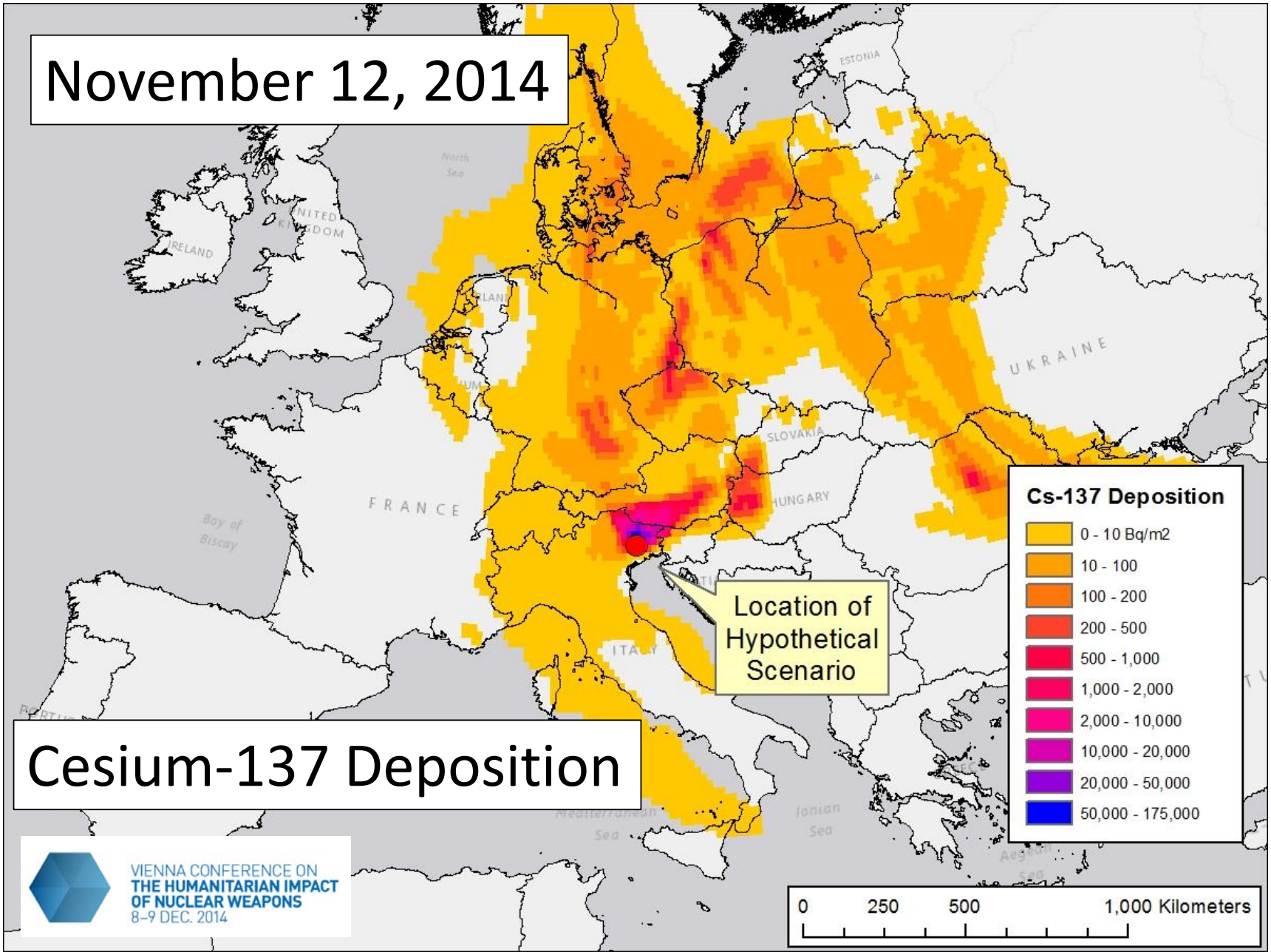

Initial Radiation
> 10,000 rad
1,000 rad
400 rad
200 rad
VIENNA CONFERENCE ON
THE HUMANITARIAN IMPACT
OF NUCLEAR WEAPONS
8–9 DEC. 2014
0
1
2
4 Kilometers


Blast
> 75 psi
30 psi
15 psi
8 psi
5 psi
VIENNA CONFERENCE ON
THE HUMANITARIAN IMPACT
OF NUCLEAR WEAPONS
8–9 DEC. 2014
0
1
2
4 Kilometers

Ricaduta a 48 ore



contaminazione cesio



vittime

For an Unsheltered Population

	Best Estimate		
	Prompt	Fallout	Total
Fatalities	16,901	69,740	86,641
Injuries	6,304	150,559	156,863
Total Casualties	23,205	220,299	243,504

For a Sheltered Population

	Best Estimate		
	Prompt	Fallout	Total
Fatalities	10,169	16,208	26,377
Injuries	16,737	39,280	56,017
Total Casualties	26,906	55,488	82,394

effetti globali di una guerra nucleare

- ▹ effetti immediati – “somma” delle single esplosioni
- ▹ effetti indiretti sull’ambiente e sul clima

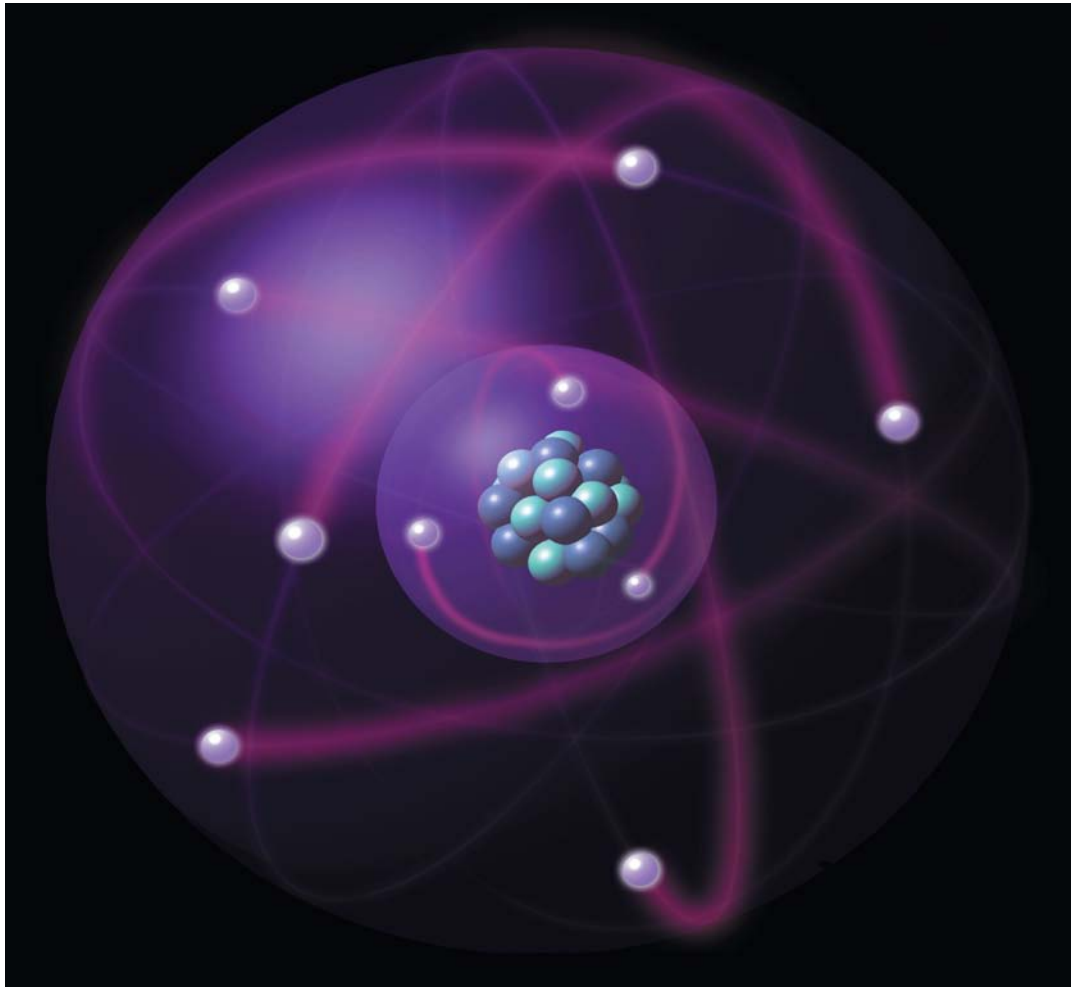
guerra nucleare regionale “limitata” tra India e Pakistan: 100 testate “piccole” (come quella su Hiroshima) fatte esplodere nelle aree urbane

- ▹ circa 20 milioni di vittime entro una settimana per gli effetti diretti
- ▹ incendi su una vasta area, tempeste di fuoco, iniettano nella stratosfera fino a 6,5 milioni di tonnellate di fuliggine e detriti

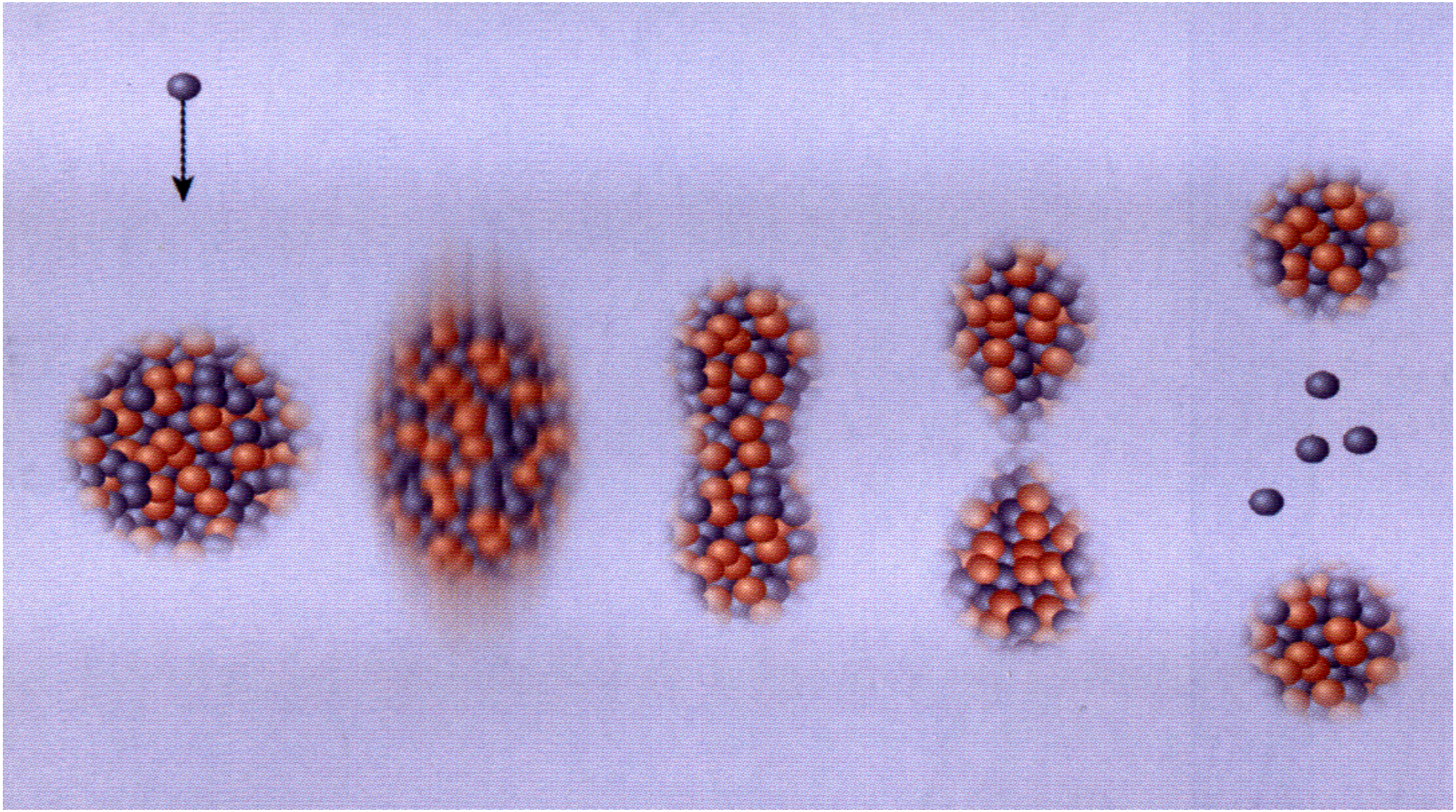
$\Longrightarrow$ blocco della radiazione solare e calo significativo della temperatura media e delle precipitazioni in tutto il mondo per più di una decade

$\Longrightarrow$ questa interruzione ecologica diminuirebbe significamente la produzione alimentare globale mettendo circa 2 miliardi di persone a rischio di carestia.

i processi di fissione e fusione riguardano i nuclei di certi atomi.
Il nucleo atomico è piccolissimo (150 mila volte più piccolo dell'atomo) e concentra tutta la massa atomica.
È composto da neutroni e protoni



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



la fissione nucleare: un nucleo di uranio assorbe un neutrone e si deforma fino a spaccarsi in due

uranio naturale
numero atomico (protoni) = 92

tre isotopi, tutti radioattivi

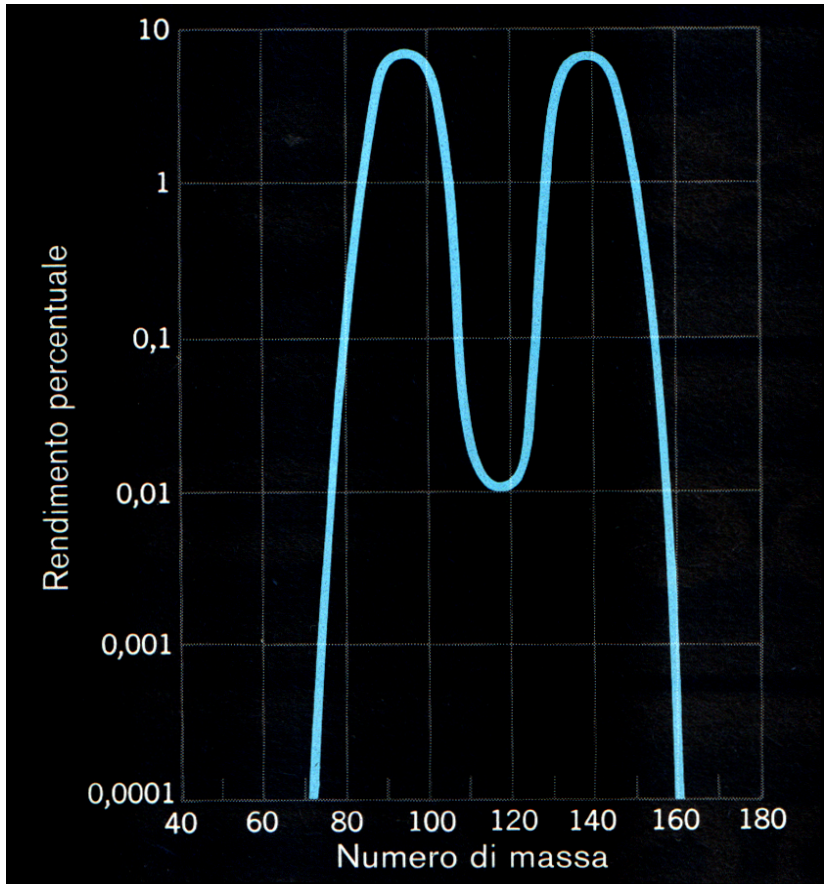
U-238 99,2745% $T_{1/2}$ $4{,}468 \times 10^9$ anni

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

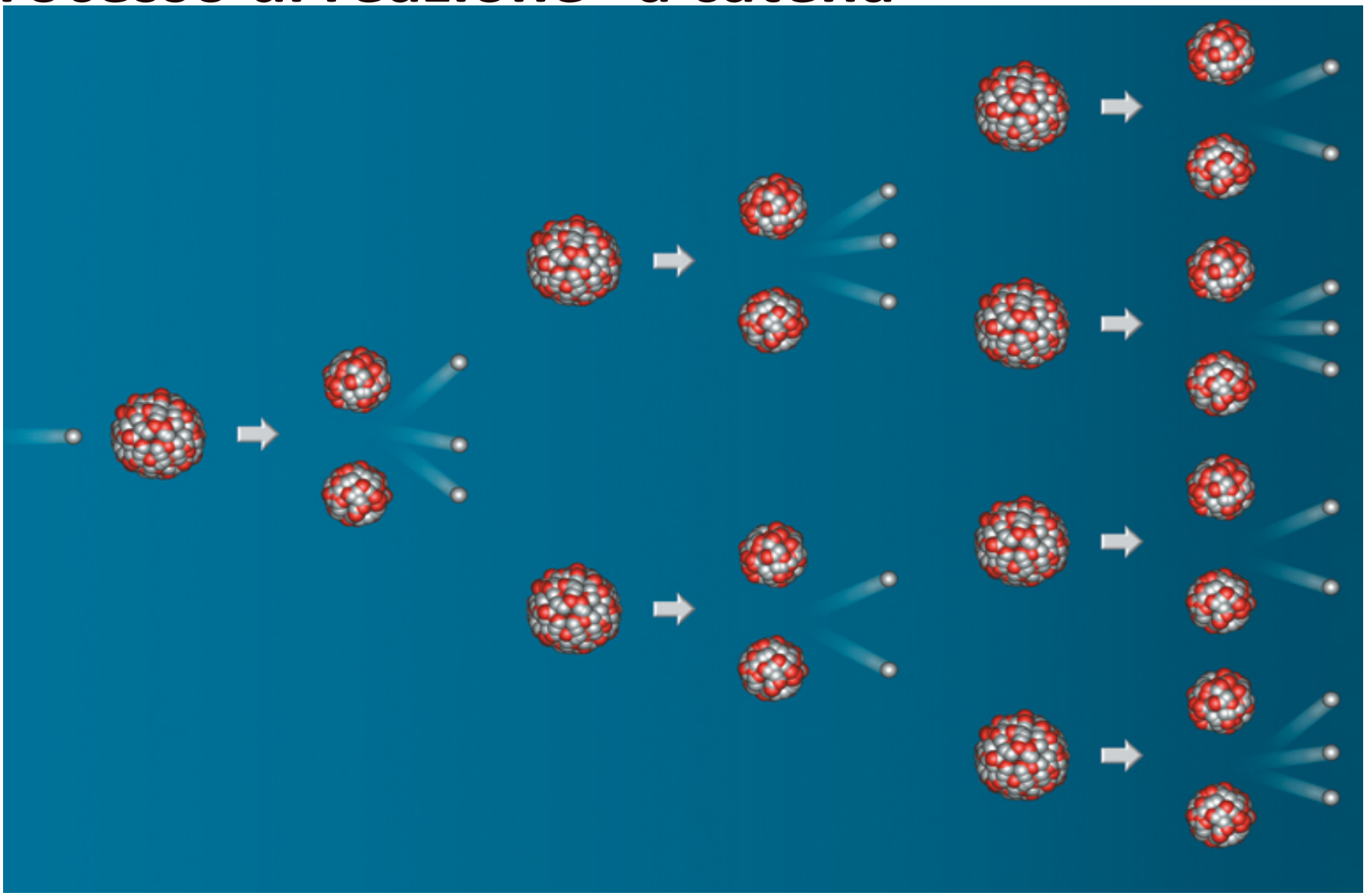
reazioni di fissione

- molte possibilità alternative
- l'energia emessa è enorme
- è l'uranio-235 a subire fissione
- vengono emessi nuovi neutroni



$$\left.\begin{aligned} \mathrm{U}^{235} + n \rightarrow \mathrm{Ba}^{139} + \mathrm{Kr}^{95} + 2n \\ \rightarrow \mathrm{La}^{144} + \mathrm{Br}^{89} + 3n \end{aligned}\right\}$$

i neutroni emessi possono produrre altre fissioni, in un processo di reazione “a catena”

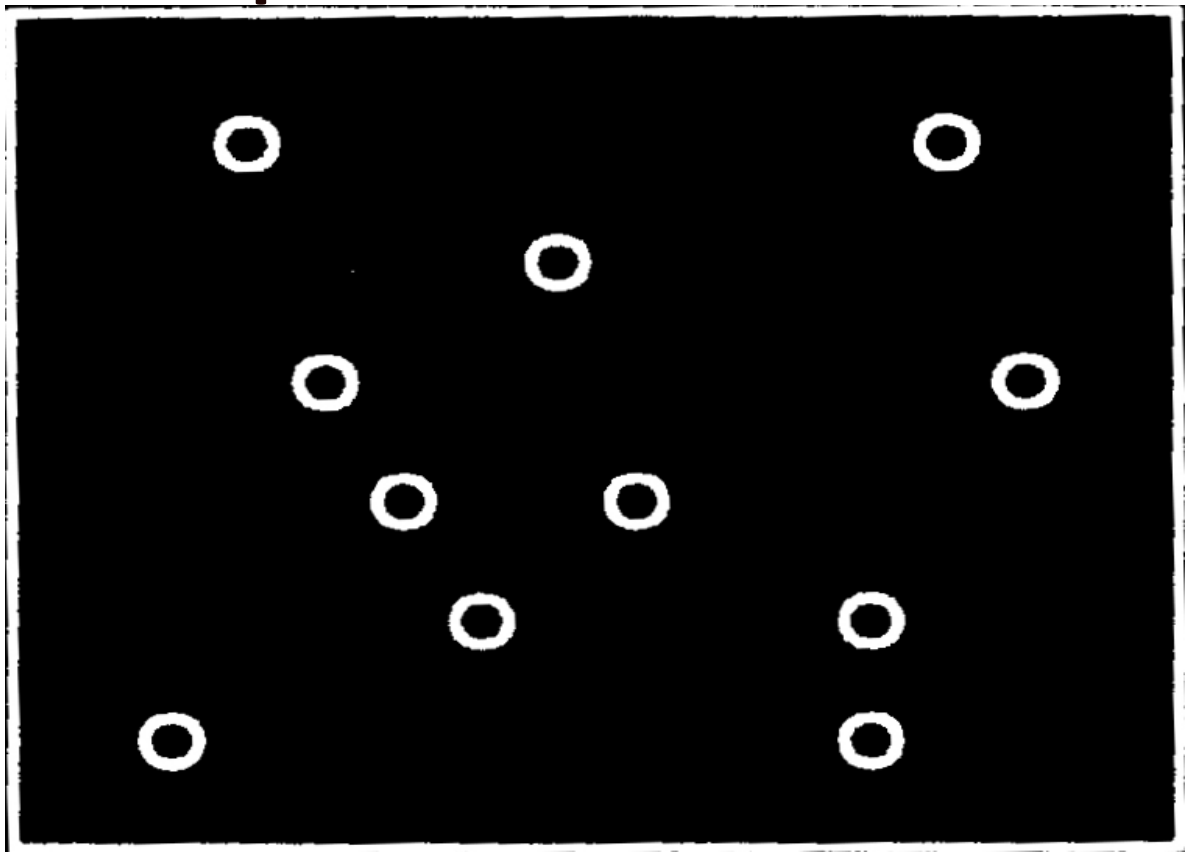


condizioni per una reazione a catena

- nella fissione si deve generare più di un neutrone
- i neutroni devono interagire con i nuclei fissili: anche se questi materiali sono molto densi, gli atomi sono praticamente 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 ≈ 1 fm = 1×10^{-15} m
- la densità dell'uranio è ≈ 19 g/cm^3
- il numero di nuclei di uranio per cm^3 è ≈ $4{,}9 \times 10^{22}$
- la distanza fra nuclei è ≈ $2{,}7 \times 10^{-10}$ 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

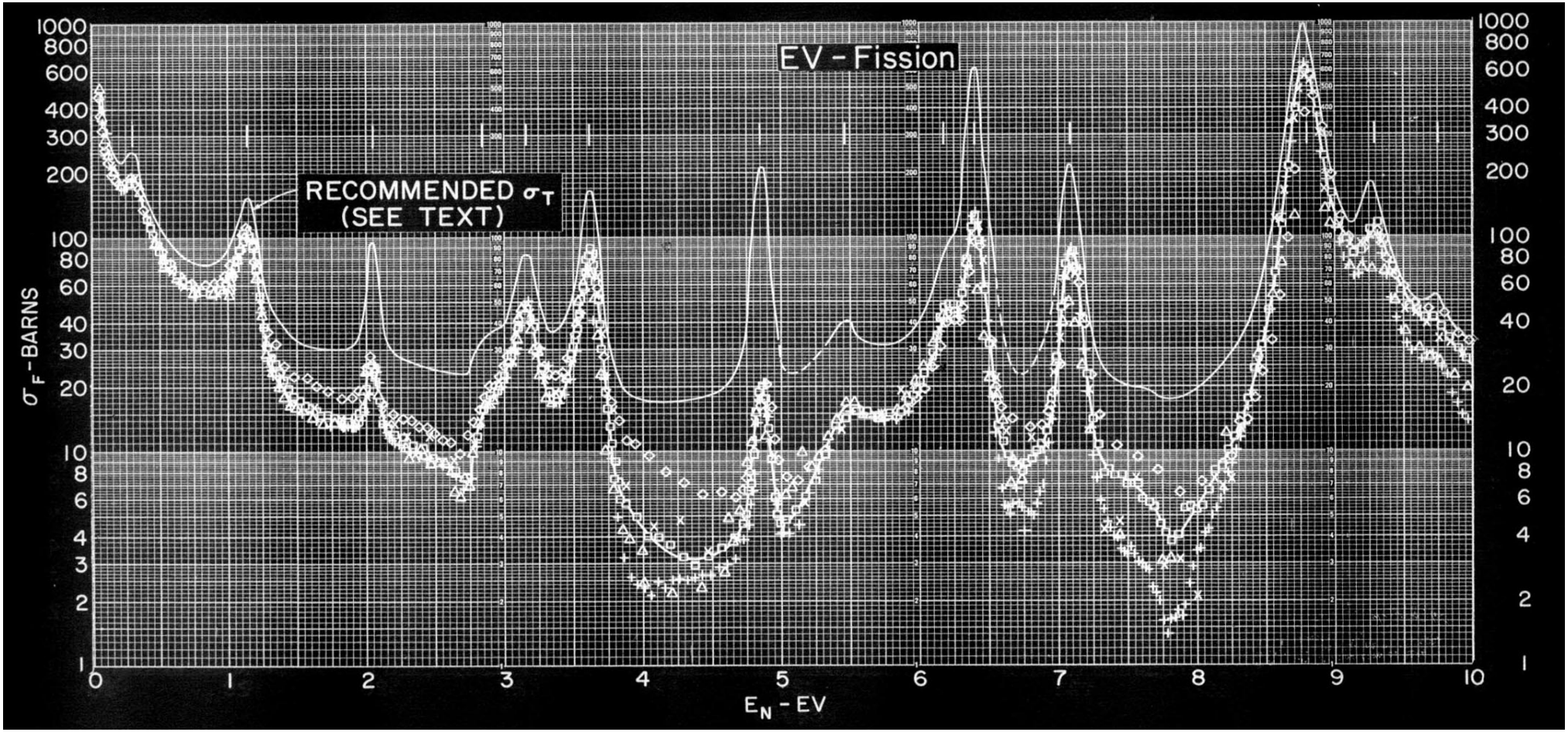
neutroni di diversa energia hanno differenti probabilità di essere catturati o di produrre fissione

	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

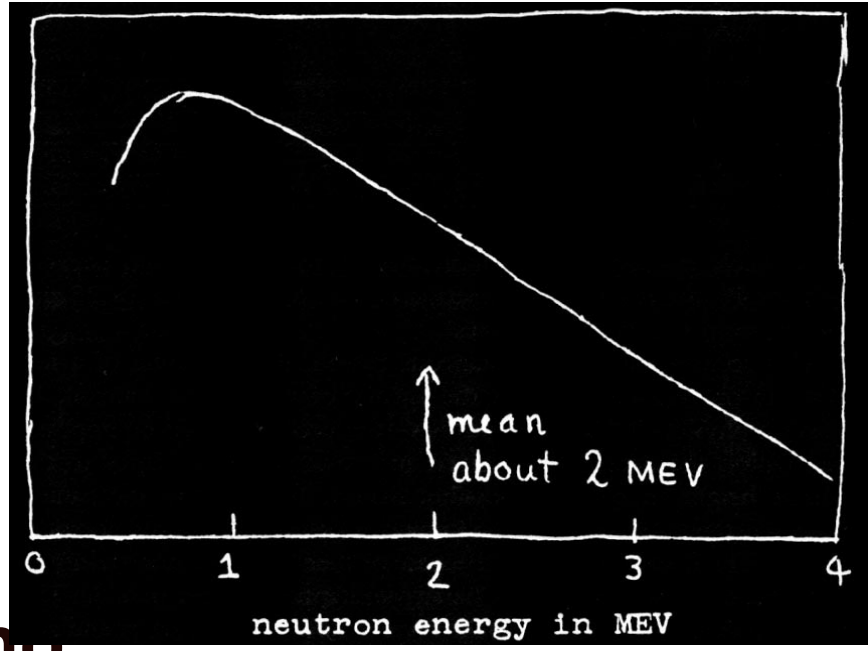
neutroni veloci e neutroni termici

- 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

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)
- gli urti necessari: 18 con idrogeno, 31 con deuterio, 118 con carbonio
  ≈ 40 μs 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**

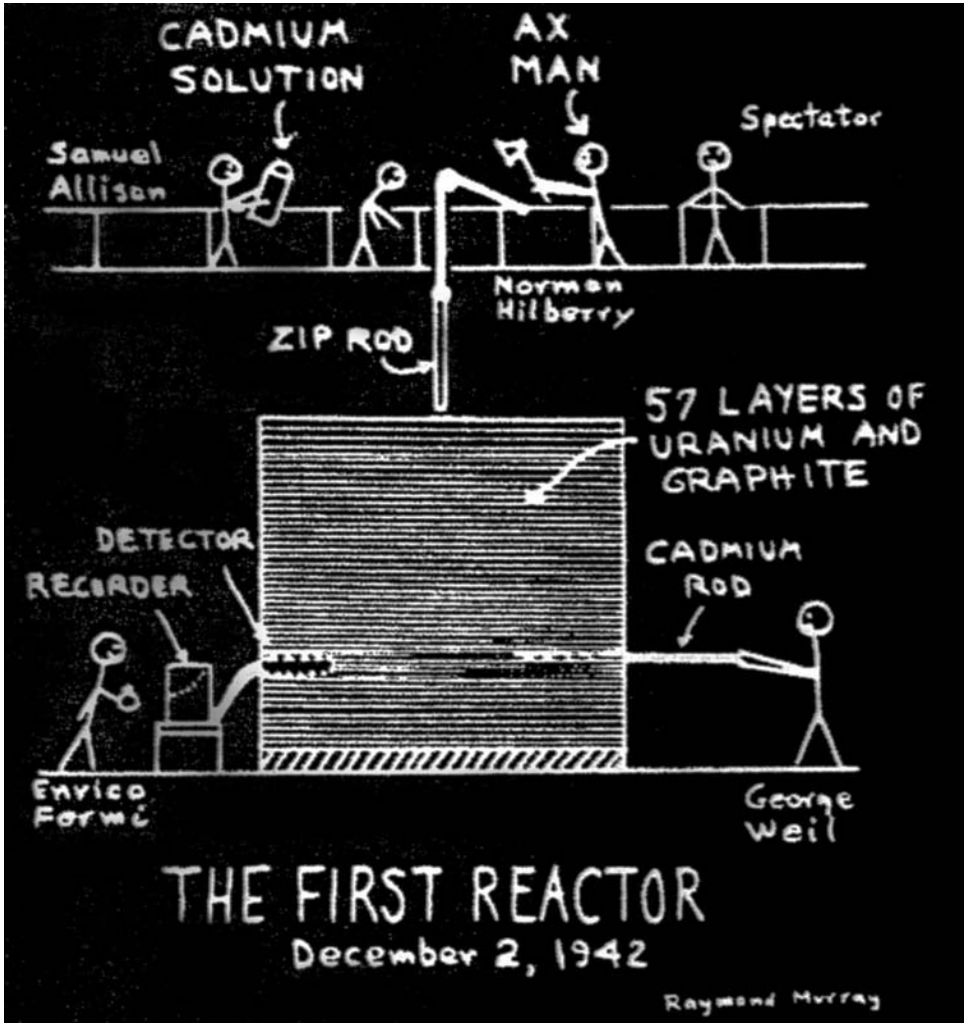
***k* = 1 condizione critica**

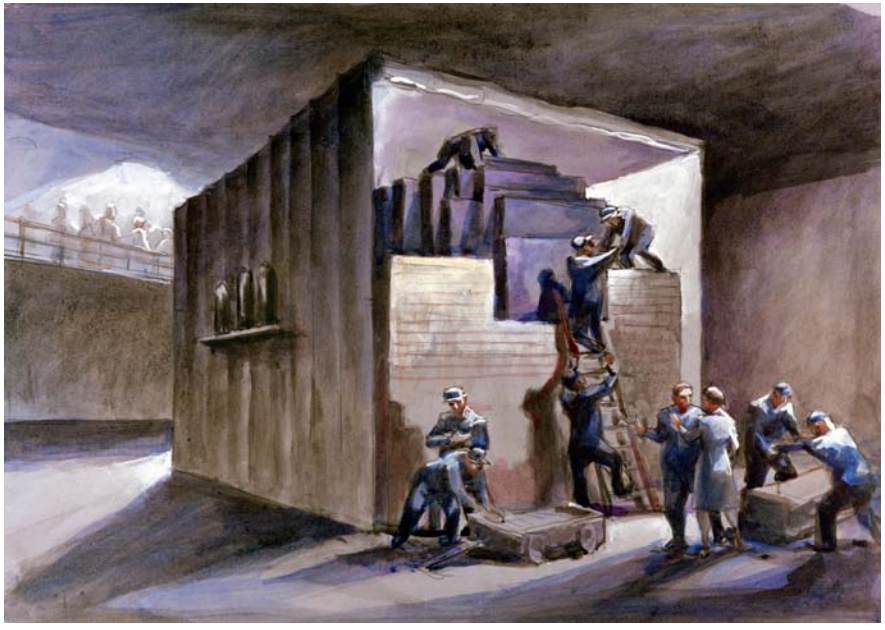
***k* > 1 condizione supercritica**

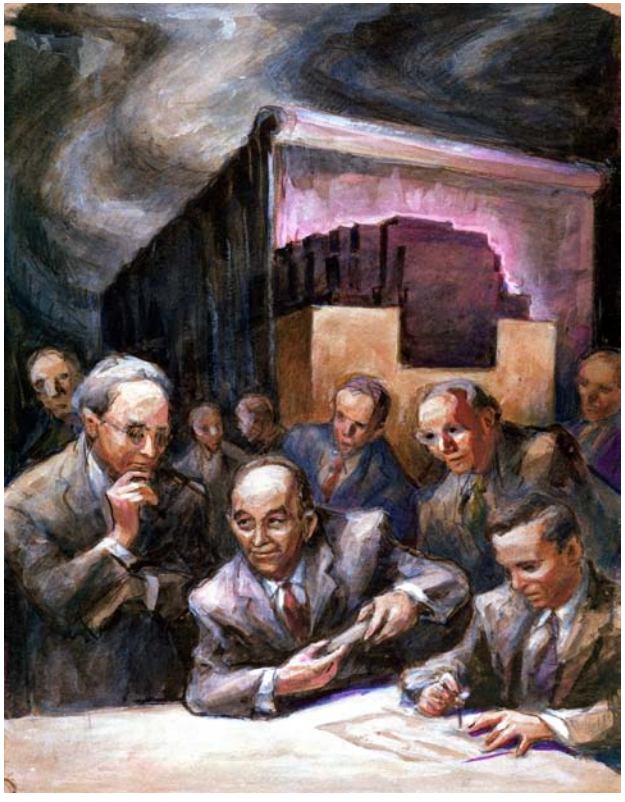
⇒ la reazione a catena si mantiene solo se *k* è maggiore o uguale a 1

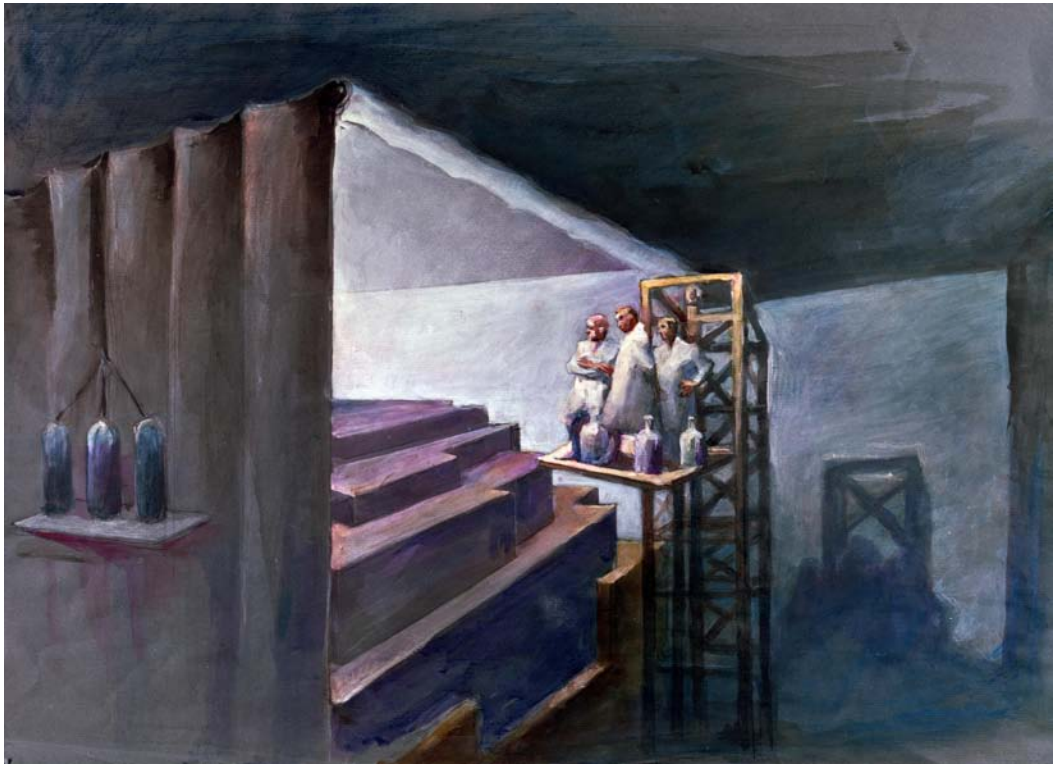
Chicago il 2 dicembre 1942
prima reazione a catena auto-sostenuta

Fermi realizza la reazione a catena in una "pila" di strati di grafite con inseriti blocchi di uranio.
CP1 rimane in funzione per 10 giorni con una potenza fra mezzo Watt e un massimo di 200 W.









CP1

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 li genera in ≈ 40 generazioni

il fattore tempo e la bomba

- un neutrone impiega tipicamente 0,01 μs a interagire con un nucleo
- dopo 40 generazioni (0,4 μs) l'energia prodotta diventa enorme e il materiale si riscalda a ≈ 40×10^6 °C trasformandosi in plasma che si disperde a ≈ 10^6 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 ≈0,5 μs

- per termalizzare i neutroni servono 40 μs fra due interazioni successive con uranio

⇒ non c'è tempo per termalizzare i neutroni

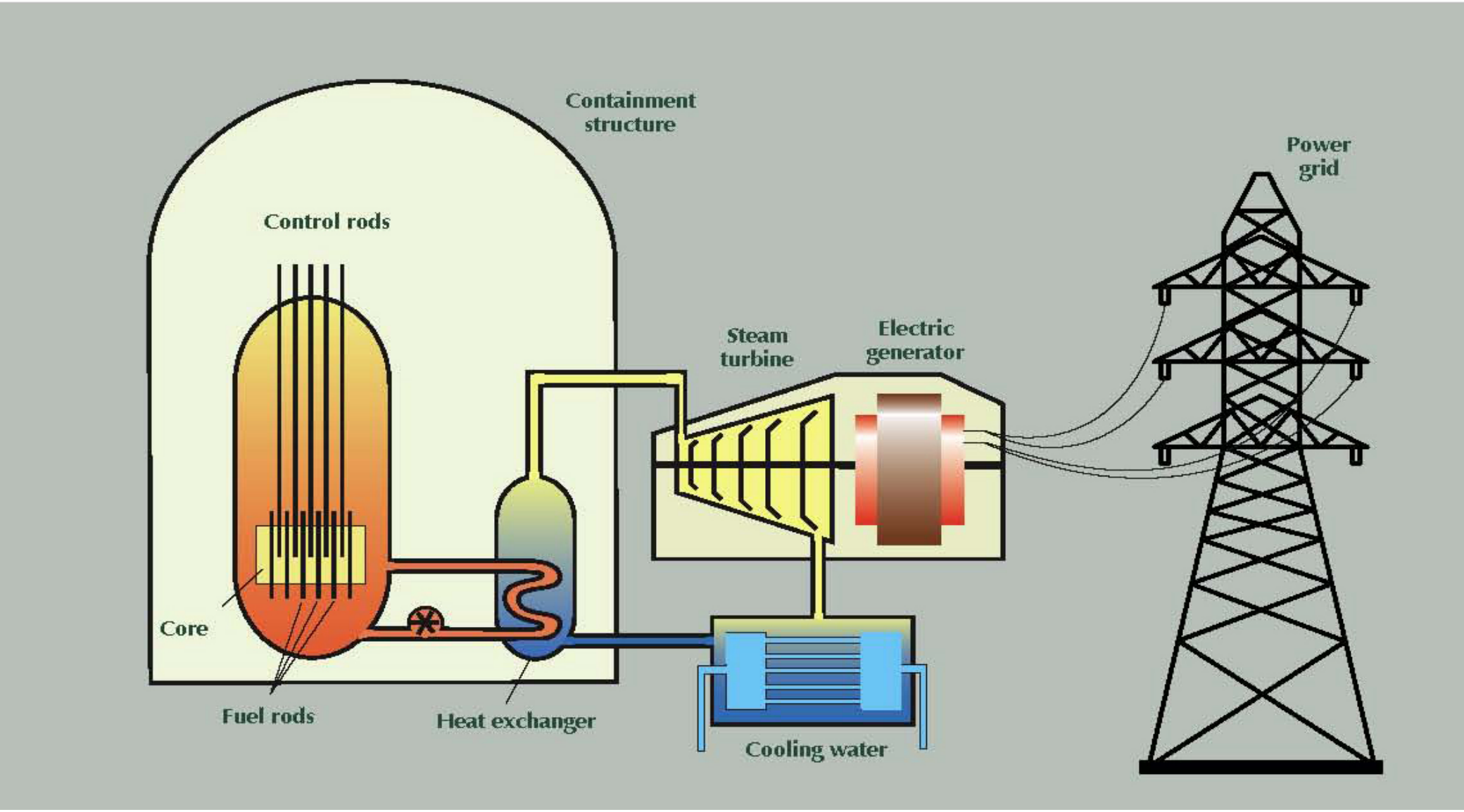
le due strade

- 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



impianto elettronucleare

elementi strutturali di una centrale nucleare

- nocciolo ove si sviluppa la reazione a catena (uranio + moderatore)
- sistema di estrazione del calore
- schermatura per contenere le radiazioni
- sistemi di regolazione della potenza mediante controllo della reazione a catena
- materiali che riflettano all'interno i neutroni che raggiungono le pareti

arricchimento dell'uranio – "estrazione" dell'isotopo uranio-235 dall'uranio naturale

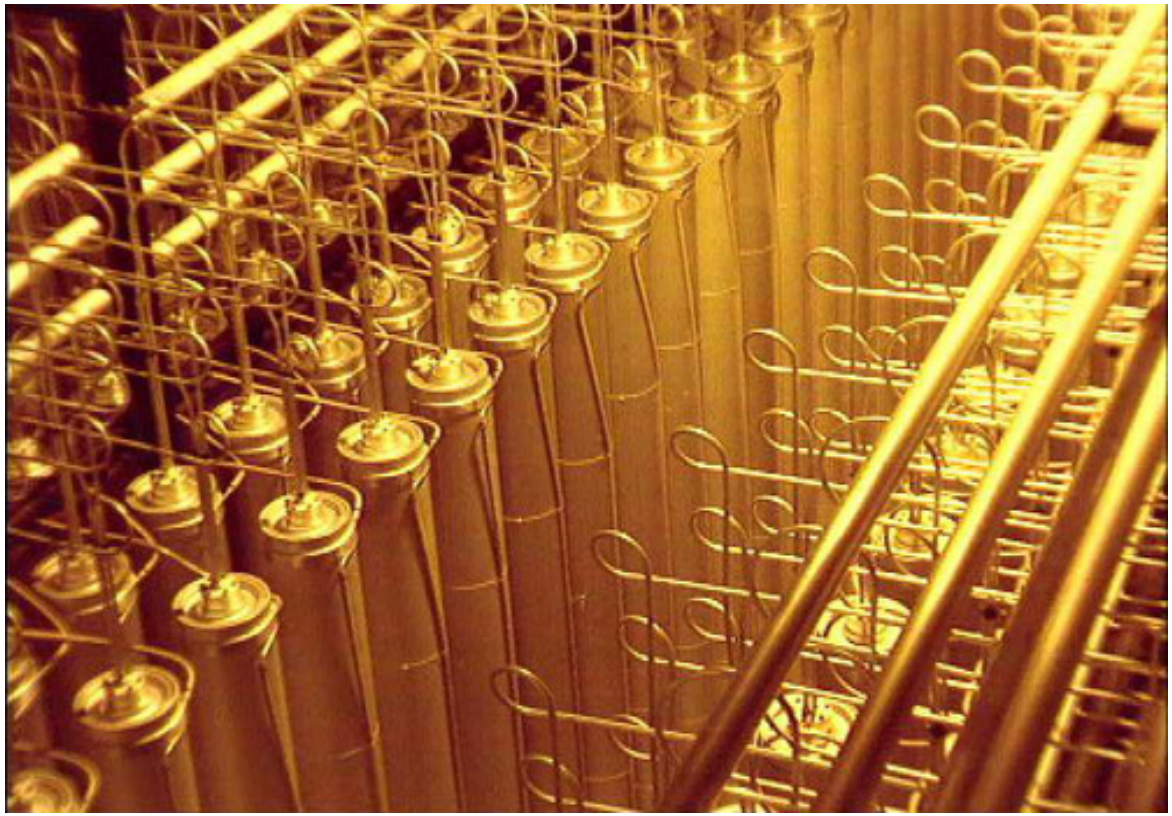
una difficilissima sfida tecnologica

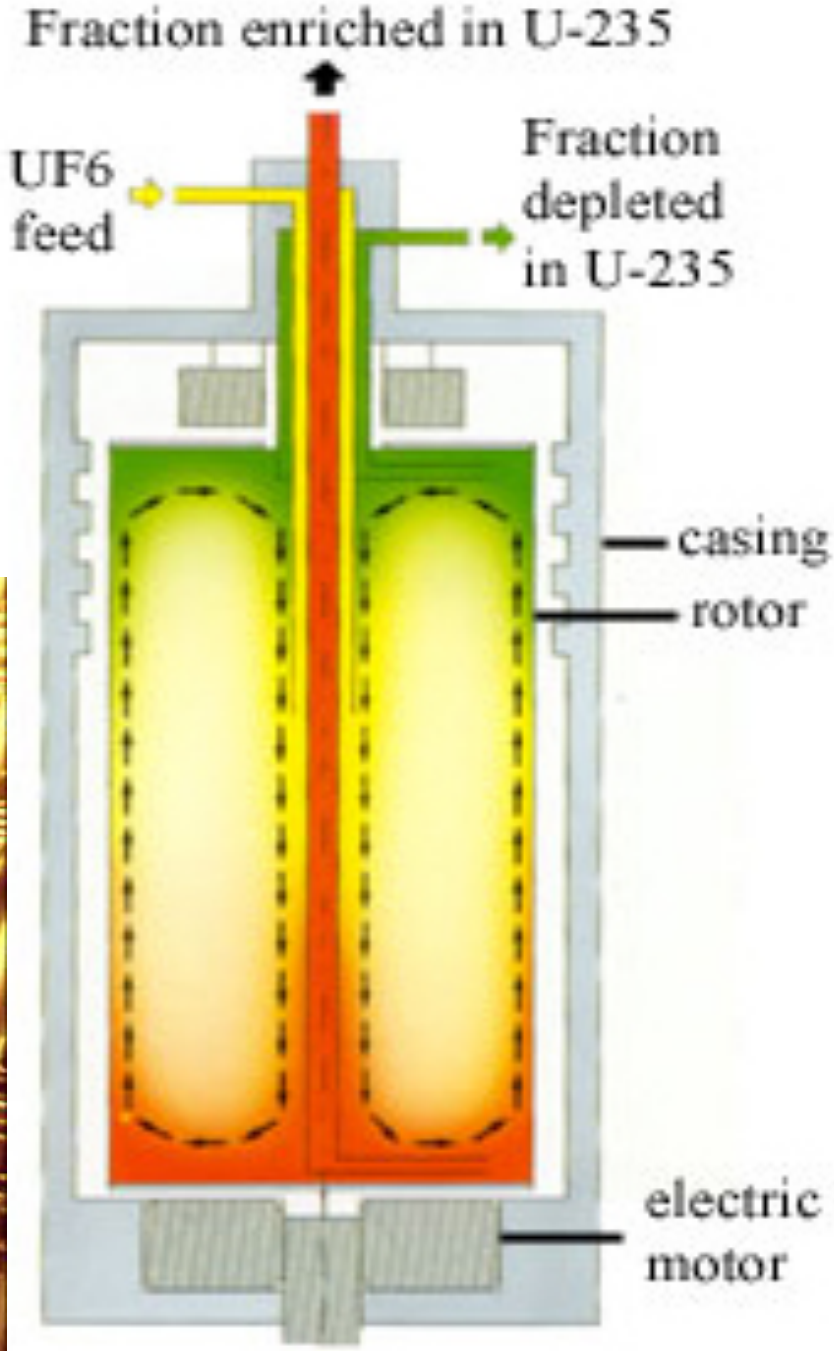
- non esistono processi chimici
- si deve giocare su una minima differenza di massa: solo 3 parti su 238
- occorre trattare l'uranio atomo per atomo: produzione di esafluoruro UF_6 un gas dalle orribili proprietà

servono grandi impianti ed enormi quantità di energia

Tricastin – 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

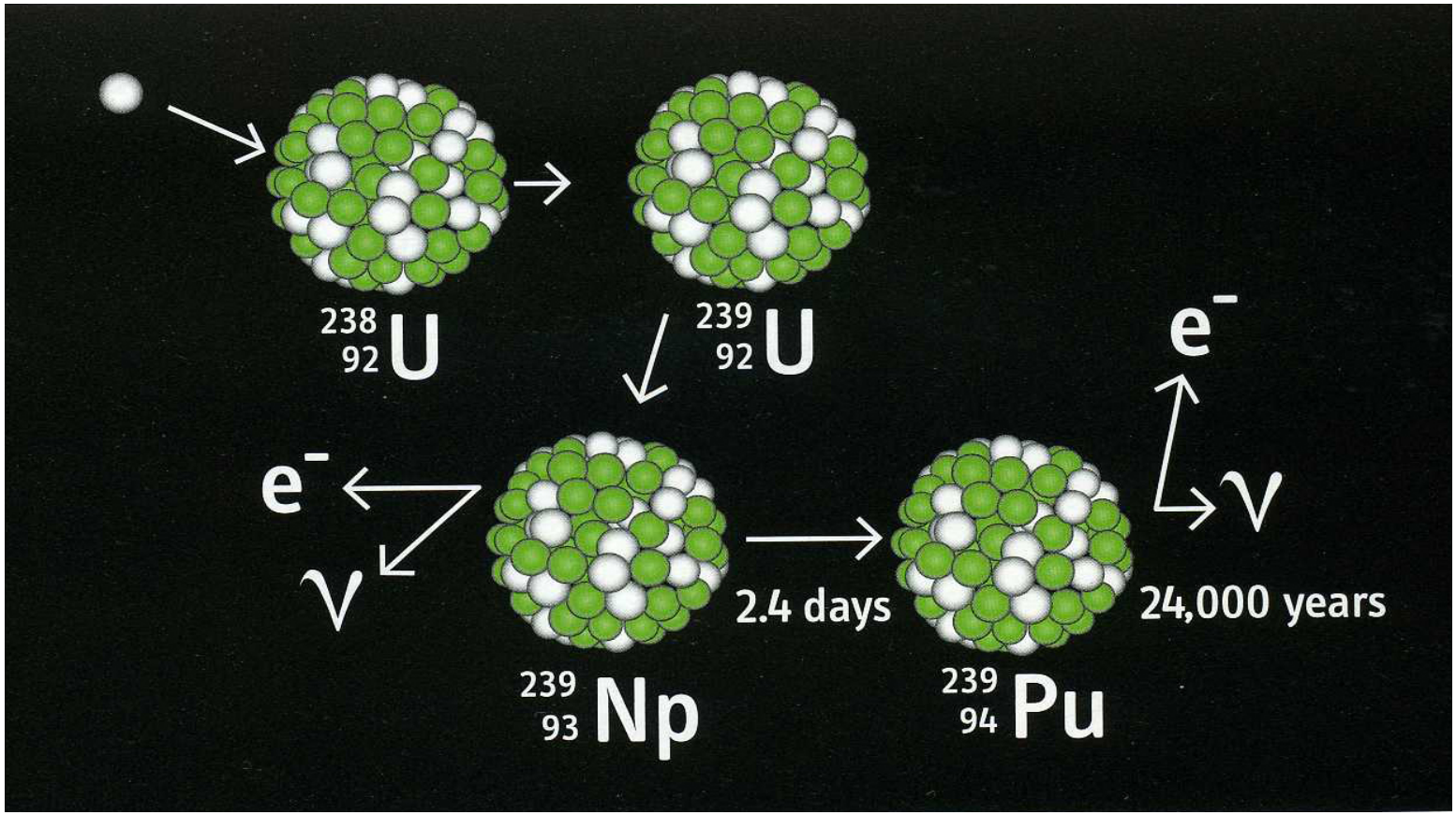




la via del plutonio

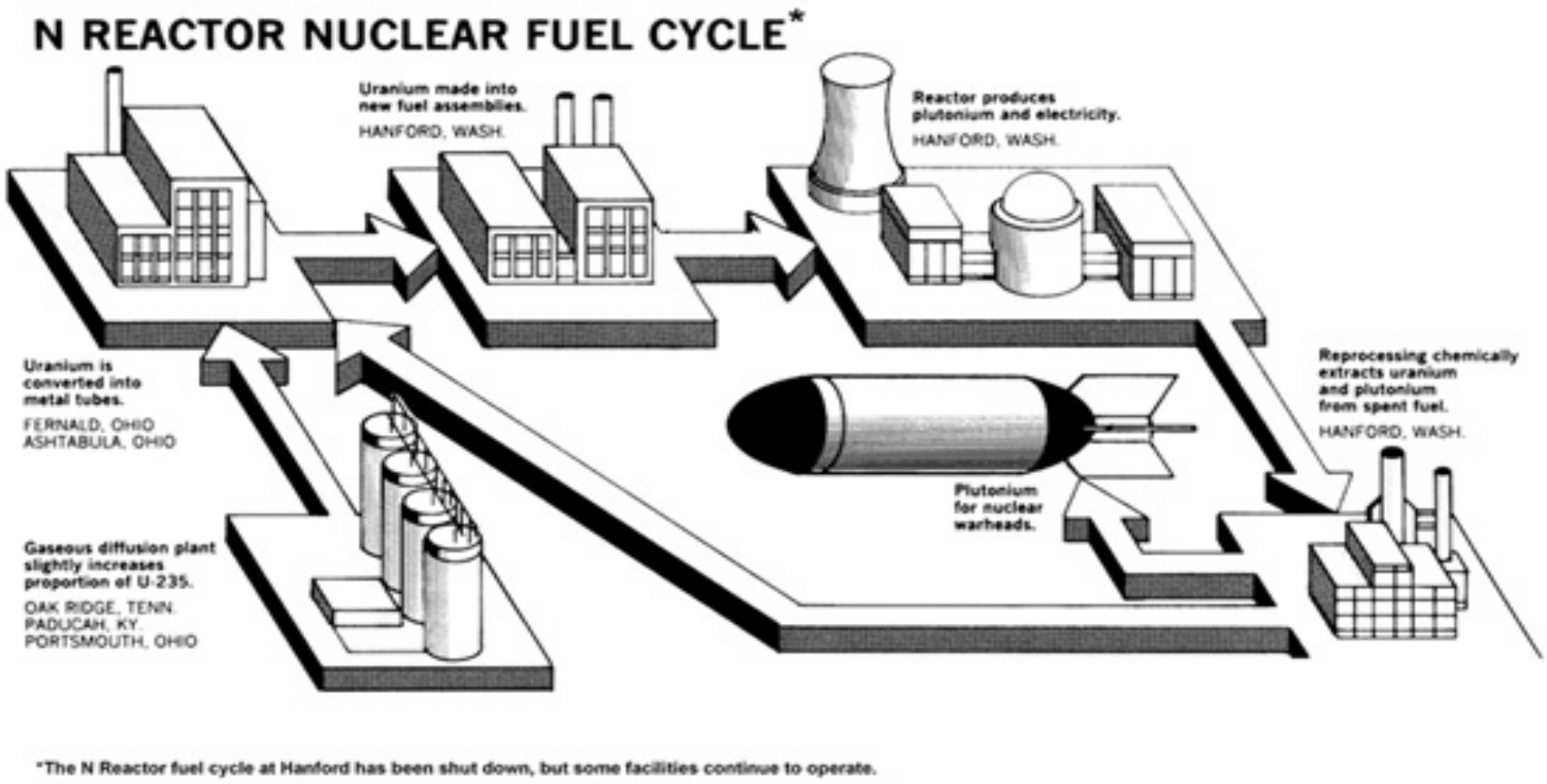
nel febbraio 1941 Glenn Seaborg a Berkeley produce un granello dell'elemento 94 (non esistente in natura): il plutonio risulta molto più fissile dell'uranio-235, ed è "stabile".

Il plutonio costituisce un'alternativa all'arricchimento dell'uranio



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



la via del plutonio

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

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

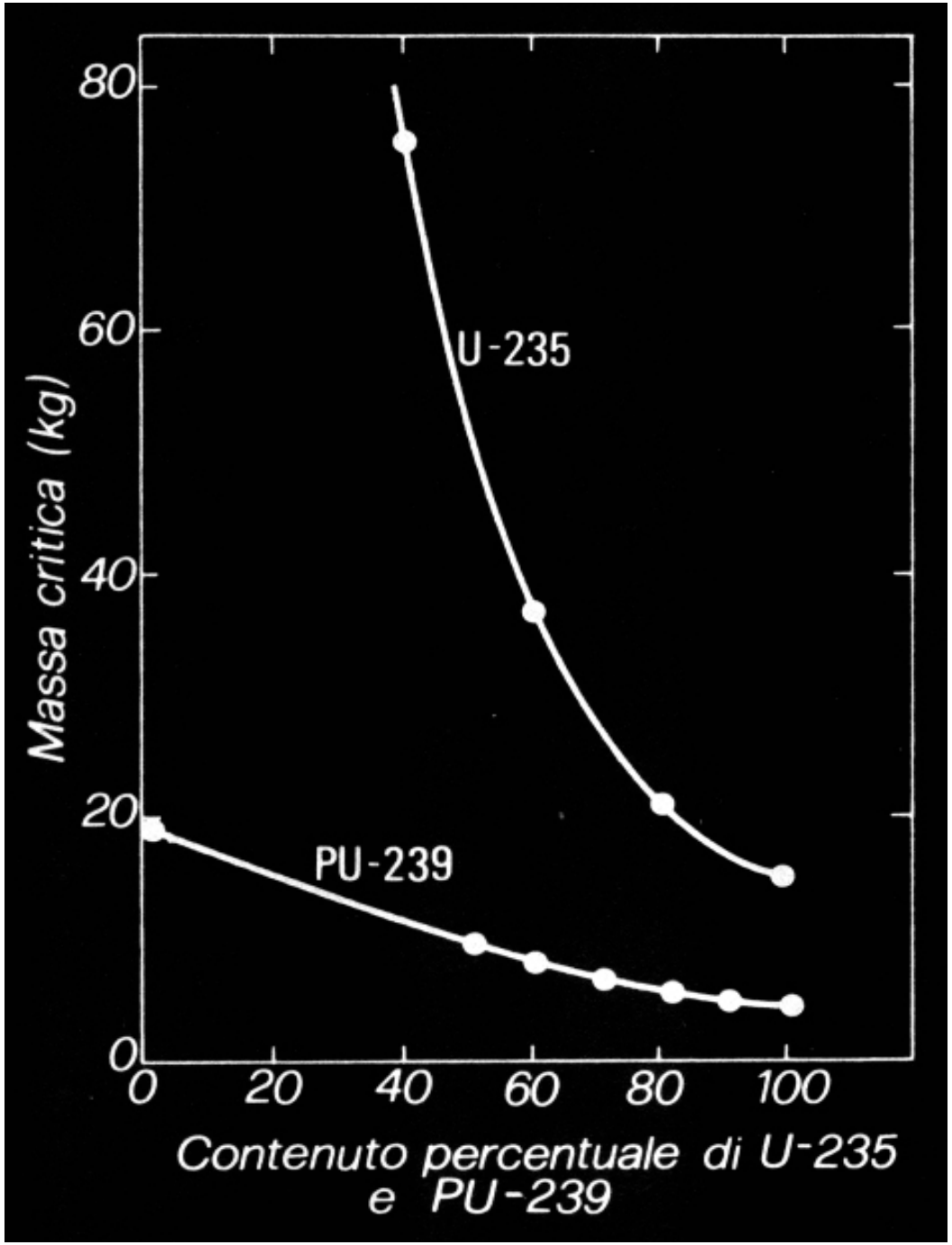
- **alta densità del materiale**
- **sufficiente massa**
- **"riflettore" di neutroni attorno al materiale**

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 puri più del 90%**



dal materiale alla bomba

Una volta acquisito il materiale fissile, per produrre un'arma militarmente utile occorre creare le condizioni perché la reazione a catena esplosiva avvenga con sicurezza con la potenza voluta, ma solo una volta deciso il suo impiego.
Dal punto di vista operativo, occorre inoltre che le dimensioni dell'ordigno siano abbastanza piccole da poterlo lanciare sul bersaglio con opportuni vettori, aerei, missili, razzi, proiettili d'artiglieria.
Queste condizioni sono in conflitto fra loro e la loro ottimizzazione richiede vaste competenze scientifiche e tecniche in molti campi.

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

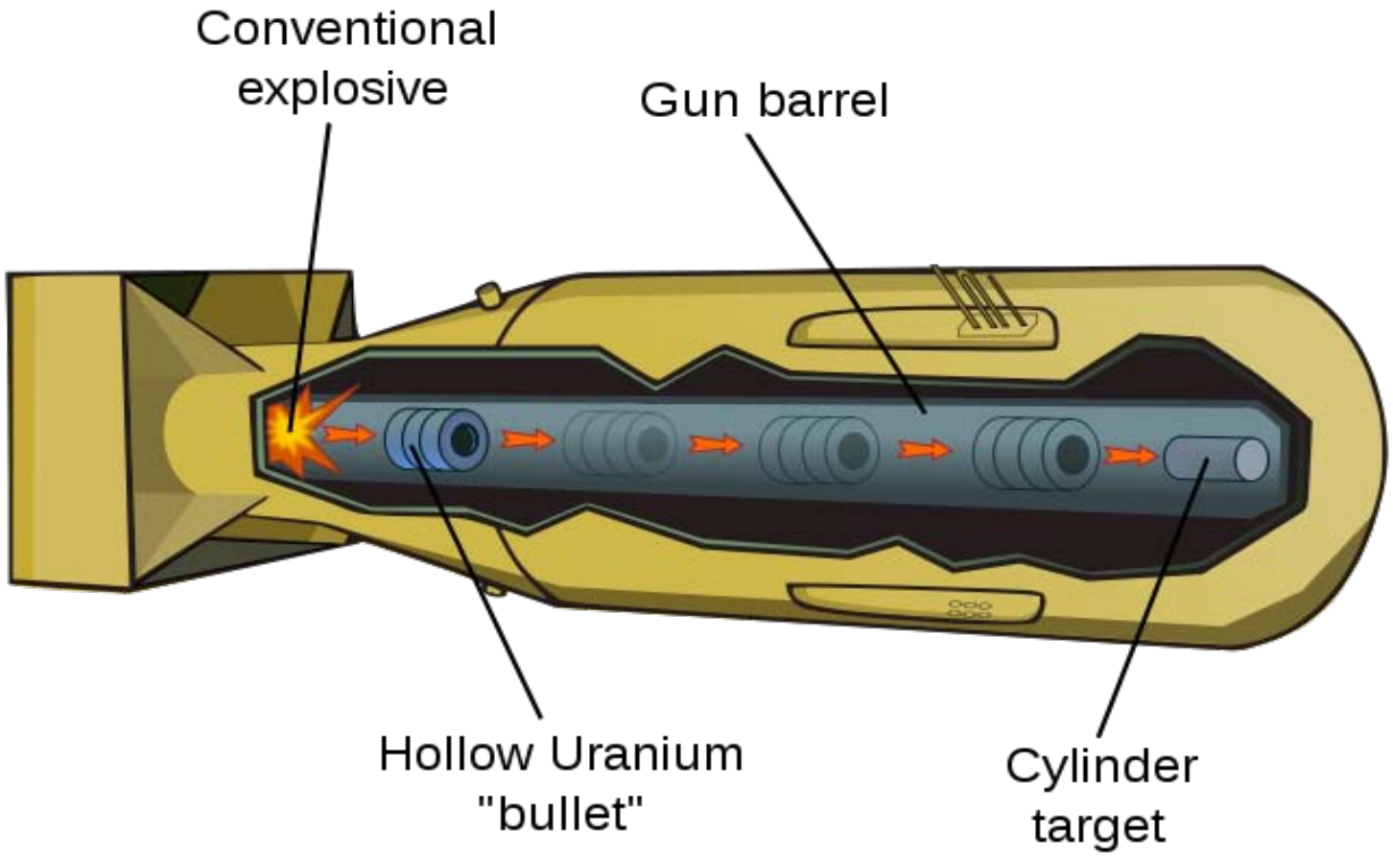
⇒

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

tempo utile di innesco per plutonio < 4 μs

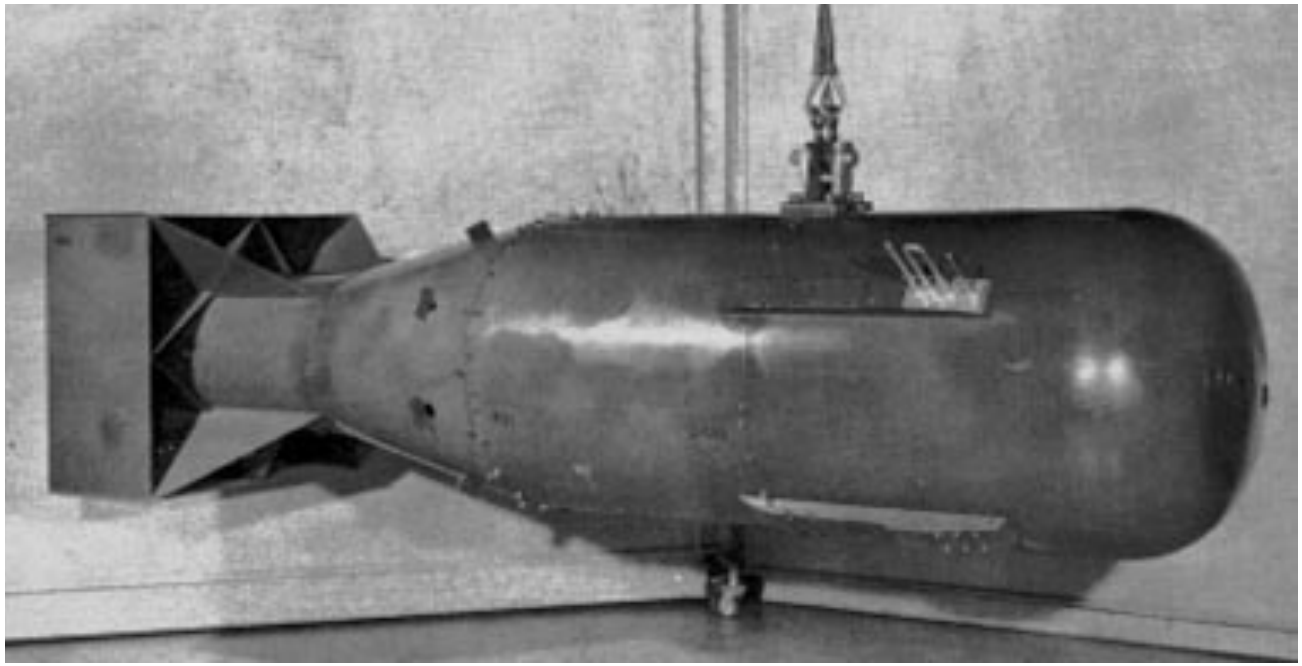
innesco a incastro

una massa non critica (proiettile) viene “sparata” ad alta velocità con un’esplosione convenzionale contro 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 incastro: little boy

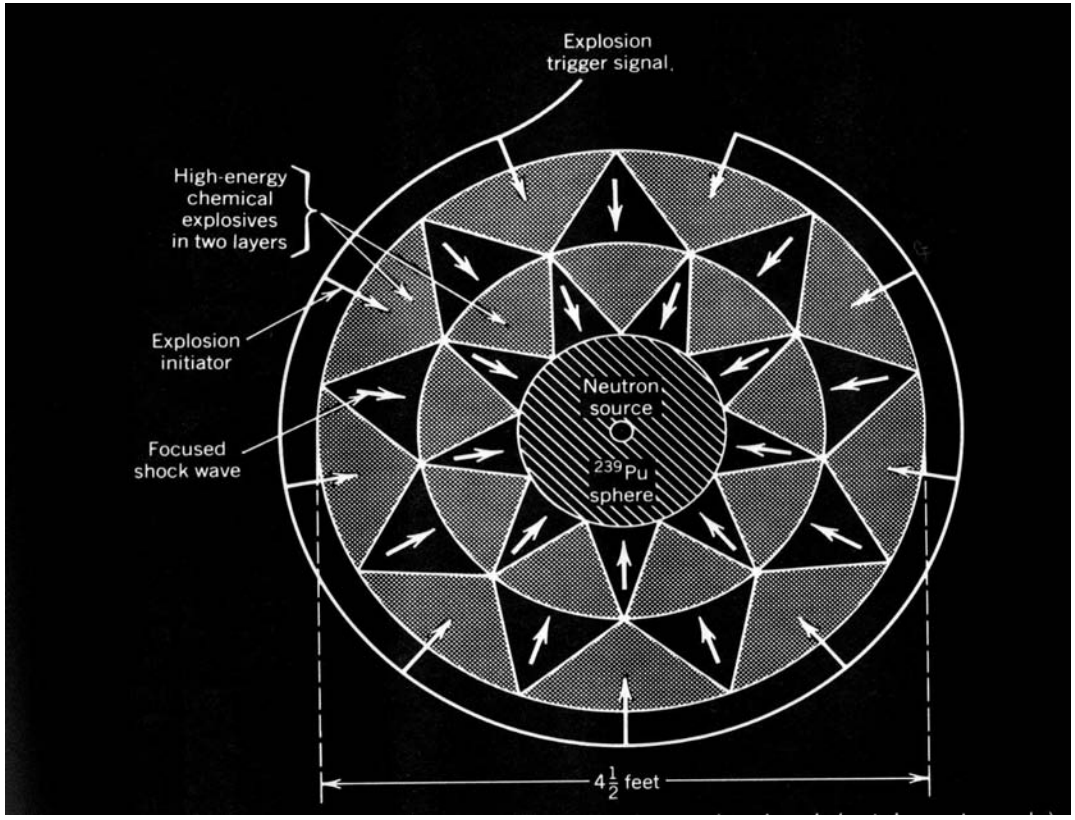
- uranio arricchito fino all'89% (media 80%)
- 2,4 masse critiche pari a 64,1 kg
- proiettile: un cilindro col 40% della massa fissile sparato a 300 m/s in canna antiaerea lunga 1,80 m
- supercriticità raggiunta in 1,35 ms
- la bomba lunga 3 m, diametro 70 cm, peso 4000 kg
- potenza 15 kton, efficienza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



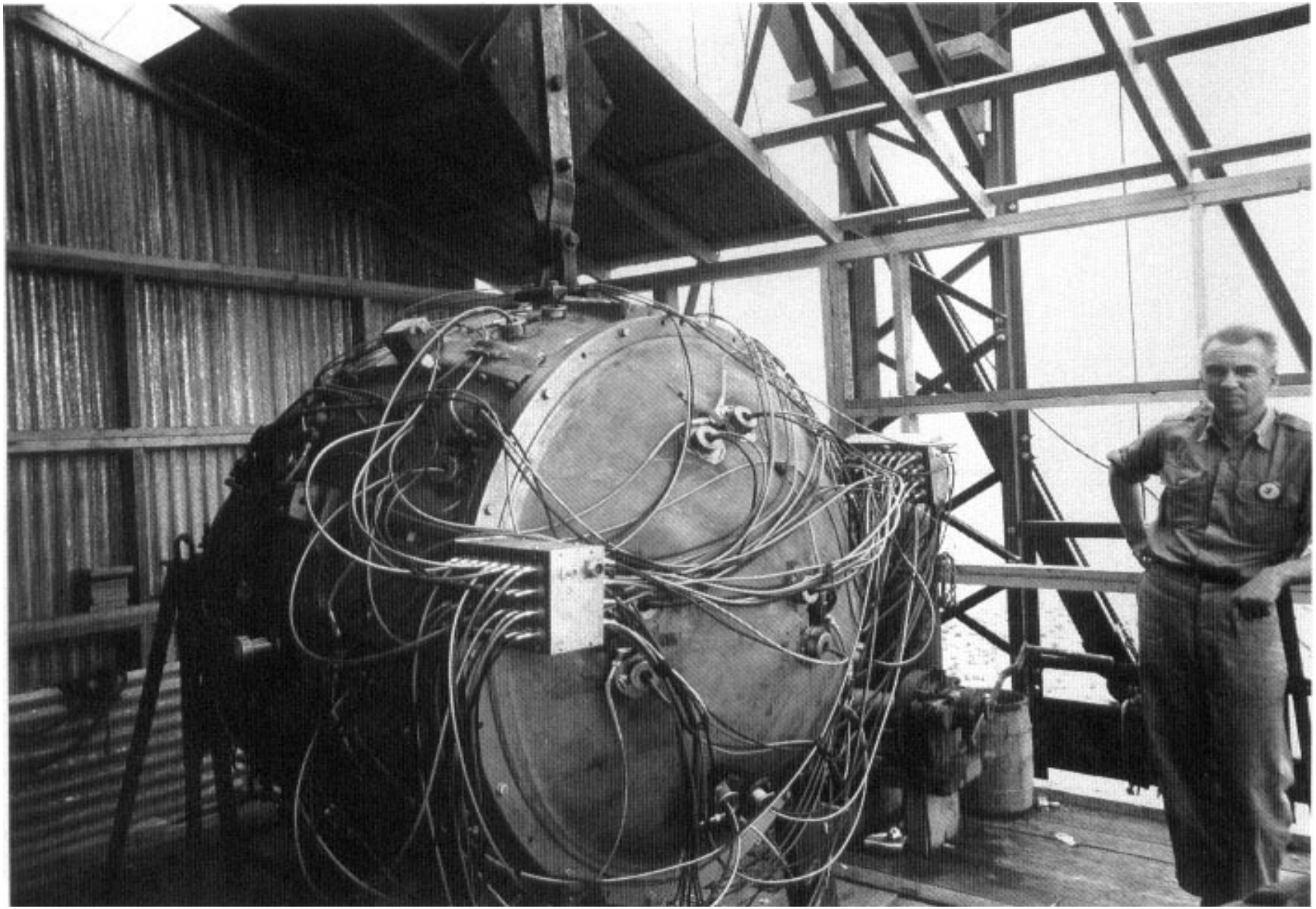
innesco a implosione

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

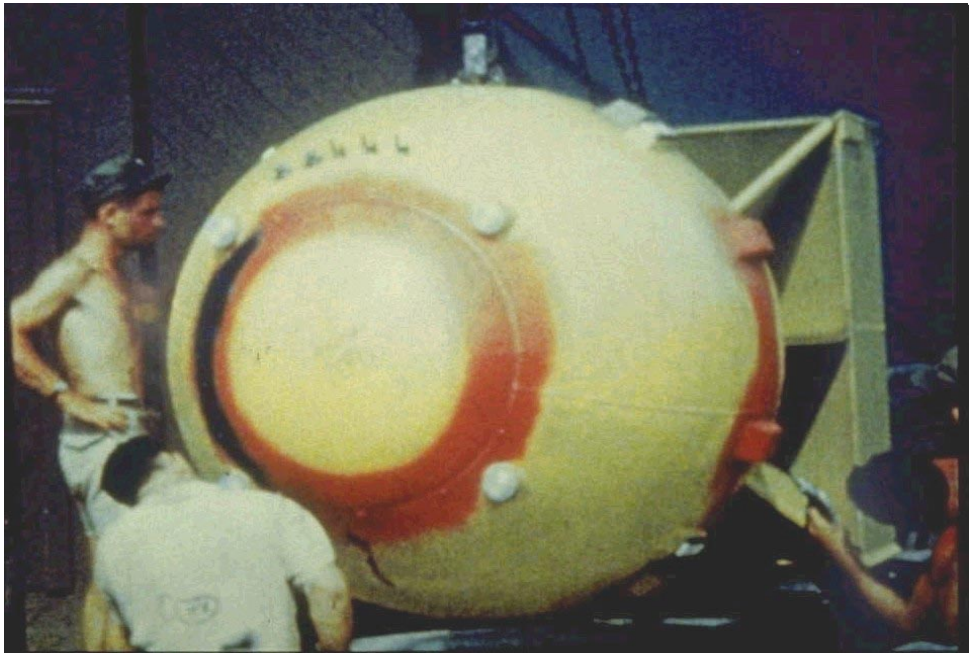


test Trinity a implosione
prima esplosione nucleare 16 luglio 1945, ore 5.29



bomba a implosione: fat man

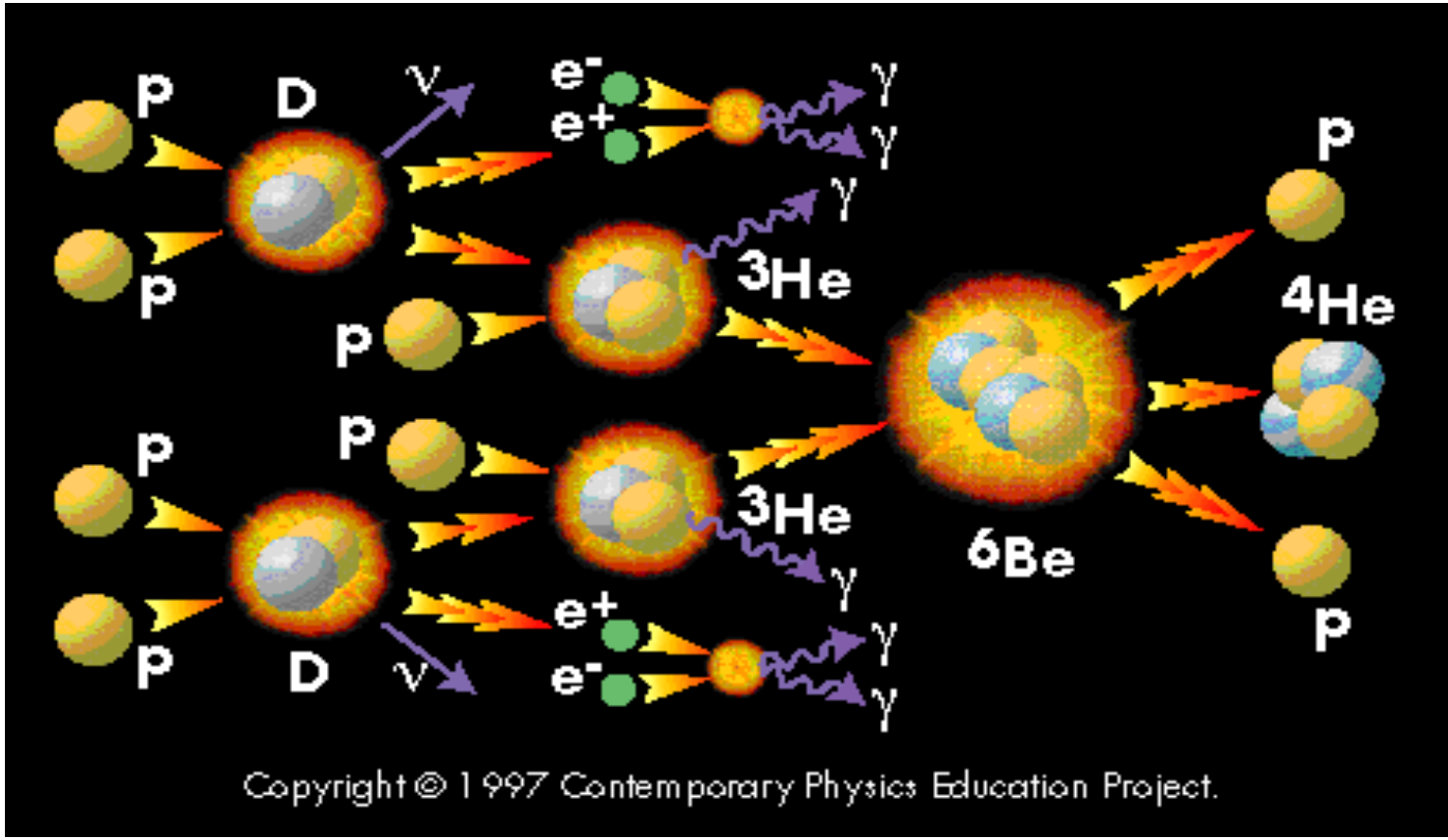
- lega di plutonio (fase delta) con 3% di gallio
- massa fissile 6,2 kg
- struttura a sfere concentriche: diametro di 150 cm
  * iniziatore di neutroni di polonio-berillio
  * materiale fissile
  * borraggio/riflettore di uranio naturale (120 kg)
  * strato di alluminio
  * 32 lenti esplosive per 2500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



la fusione nucleare

due nuclei in speciali condizioni possono "fondersi" a creare un unico nucleo più pesante

È il processo che genera nelle stelle i vari elementi a partire dalla fusione di idrogeno in deuterio



primi processi di fusione nelle stelle

reazioni in una bomba H

D+D → H+T + 4 MeV

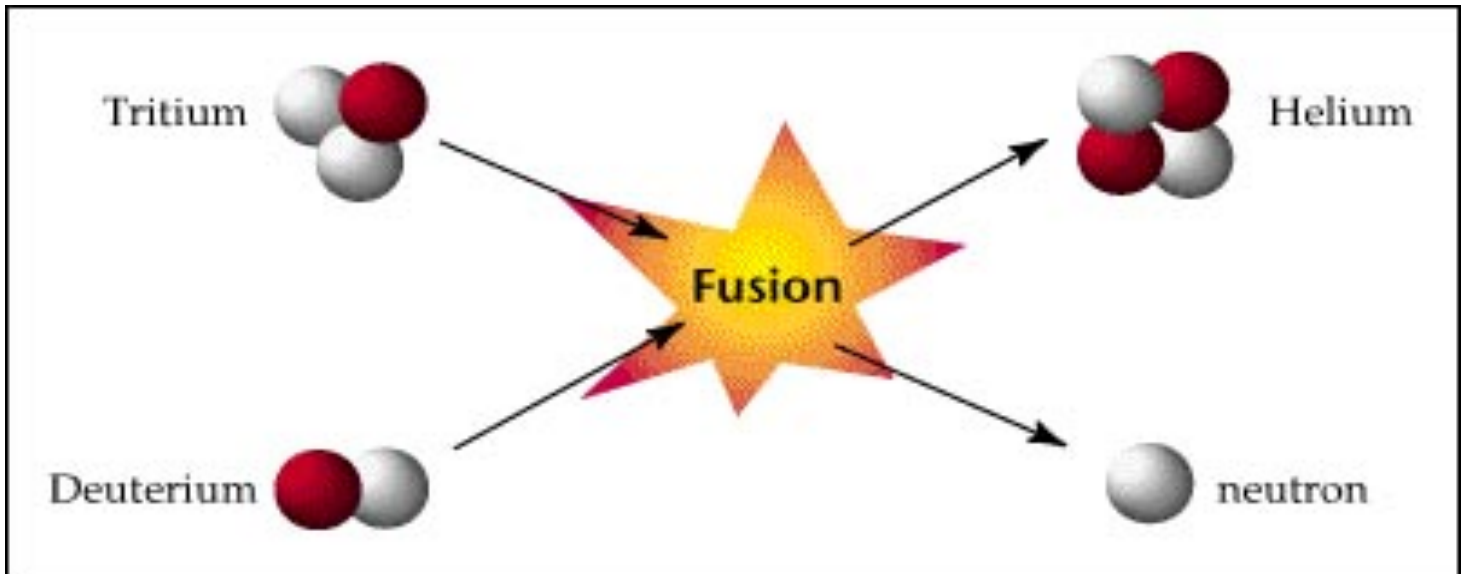
D+D → He-3 + n + 3,3 MeV

D+He-3 → He-4 + H + 18,3 MeV

T+T → He-4 + 2n + 11,3 MeV

D+T → He-4 + n + 17,6 MeV

l'energia rilasciata come raggi gamma e X e cinetica dei prodotti



bomba H – motivazioni

- la densità di energia per unità di massa della fusione

  $D + T \rightarrow He\text{-}4 + n$

  è 4 volte quella della fissione
- esiste una vasta disponibilità di deuterio
- riduce l'impiego di materiali fissili
- non esiste un limite alla potenza
- non esiste una massa critica
- raggiunge alte efficienze
- è una sfida scientifica e tecnologica

bomba H – problemi

- per far “incontrare” i nuclei da fondere occorre creare condizioni più estreme che nell’interno delle stelle
  - temperature di oltre 200 milioni di gradi
  - altissima densità del combustibile nucleare
    tipicamente 30×10^3 kg/m^3
    (deuterio e trizio sono normalmente dei gas)
- mantenere le condizioni per qualche microsecondo
- produrre il trizio, praticamente inesistente in natura

bomba H – soluzioni

- un sistema a due stadi: usare una bomba a fissione (primario) per innescare le reazioni di fusione e produrre trizio
- per la fusione (secondario) impiegare un composto solido del deuterio: il deuteruro di litio-6 (LiD)

➔ i neutroni emessi dal primario producono nel secondario trizio con la reazione esotermica Li-6 + n → T + He-4

➔ i raggi X emessi dal primario focalizzati da una schiuma di stirene creano l'onda di pressione necessaria per la compressione del secondario

➔ quando il secondario è adeguatamente compresso, arriva l'onda termica della fissione innalzando la temperatura alla condizione d'innesco delle reazioni di fusione

Andrei Dimitrievich Sakharov

Сов. секретно 7

Товарищу Харитон Ю.Б.

Об использовании изделия для целей обнаружения сверхвзрыва РДС 6с

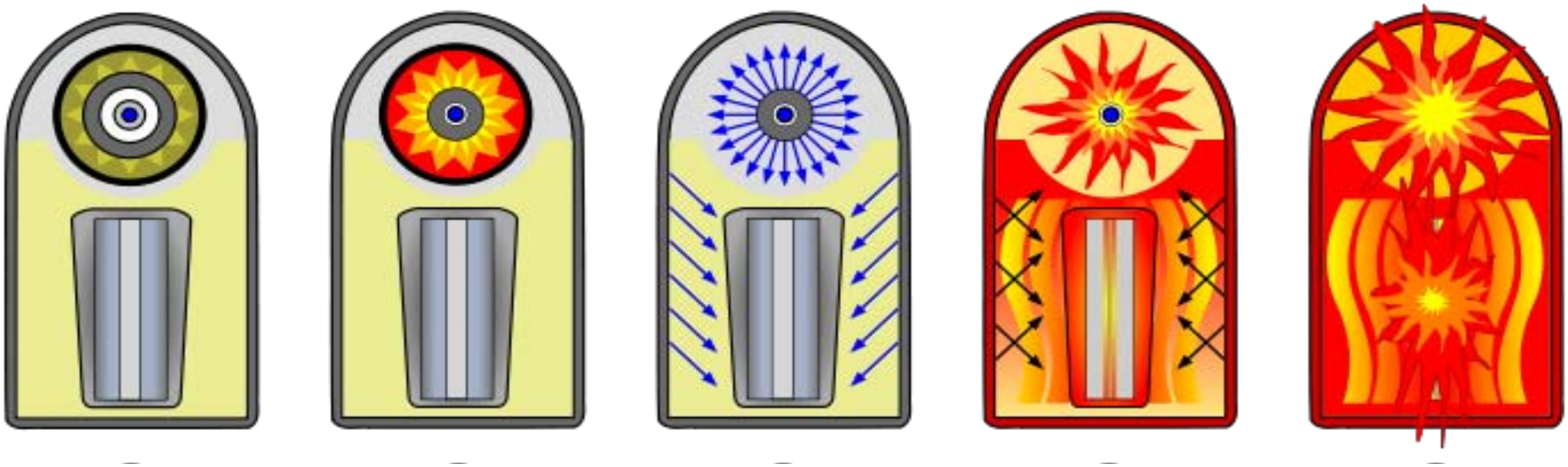
В настоящей записке сообщаются предварительные схема и устройство для обнаружения и оценочные расчеты её действия. К записке приложение об этом предложено В.А. Давиденко.

Схема.

a Yakov Borisovich Zel’dovich

bomba H a due stadi

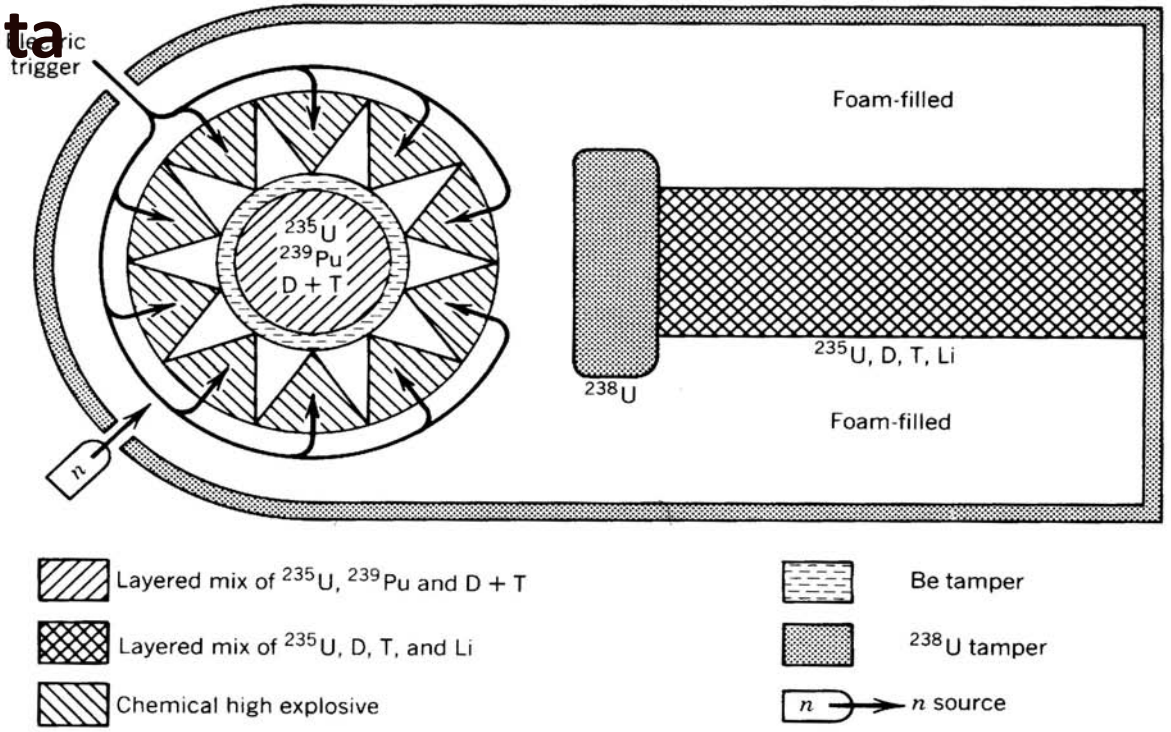
- il primario ha strati di plutonio e di uranio arrichito e contiene tracce di deuterio e trizio per aumentare il flusso di neutroni
- vengono prodotti moltissimi neutroni e aumenta l'effetto della radiazione immediata (bomba a neutroni) e diventa piccola la radiazione residua (bomba "pulita")



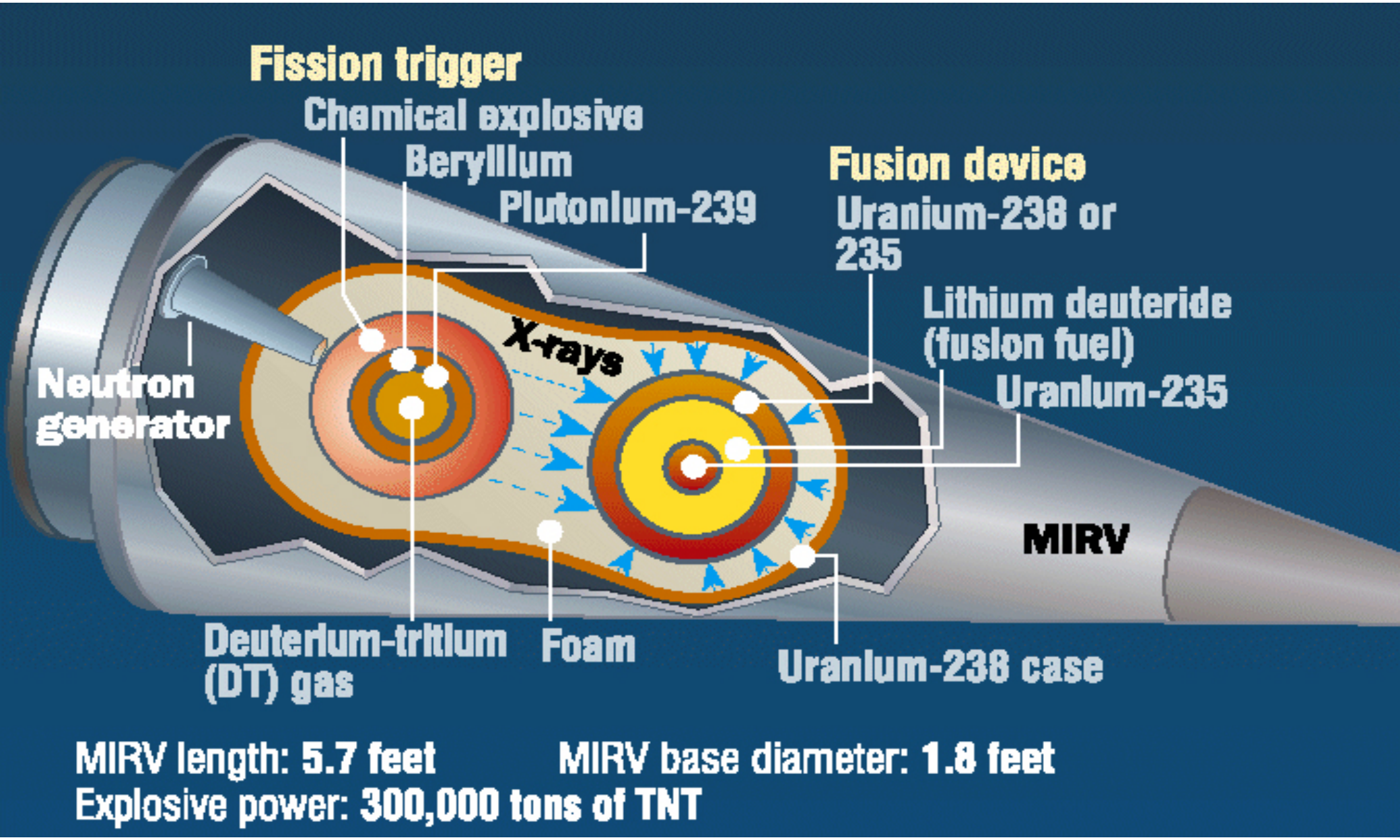
bomba H a tre stadi

- i neutroni emessi dalla fusione hanno energia sufficiente a indurre fissione dell'uranio-238
- nell'ordigno viene aggiunto uranio-238 e di uranio-238 viene fatto il contenitore della bomba

➔ la massa di uranio-238 subisce fissione (ternario) moltiplicando la produzione di energia e di materiale radioattivo nella ricaduta radioattiva



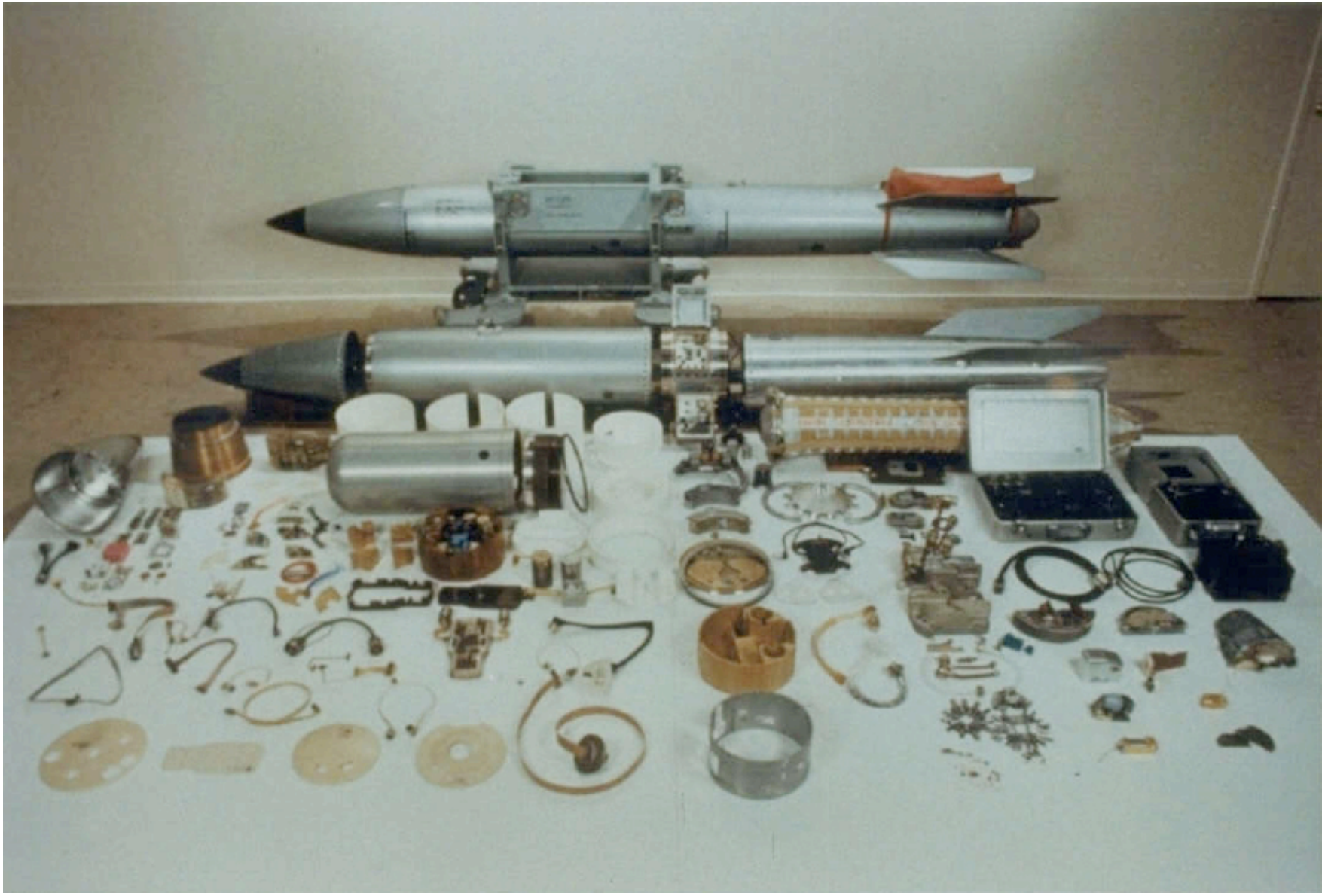
esplosione del primo ordigno a fusione “mike” (1 novembre 1952) – potenza 10,4 Mton


Fission trigger
Chemical explosive
Beryllium
Plutonium-239
Fusion device
Uranium-238 or 235
Lithium deuteride (fusion fuel)
Uranium-235
X-rays
Neutron generator
MIRV
Deuterium-tritium (DT) gas
Foam
Uranium-238 case
MIRV length: 5.7 feet
MIRV base diameter: 1.8 feet
Explosive power: 300,000 tons of TNT

condizioni operative: sicurezza, inviolabilità e affidabilità

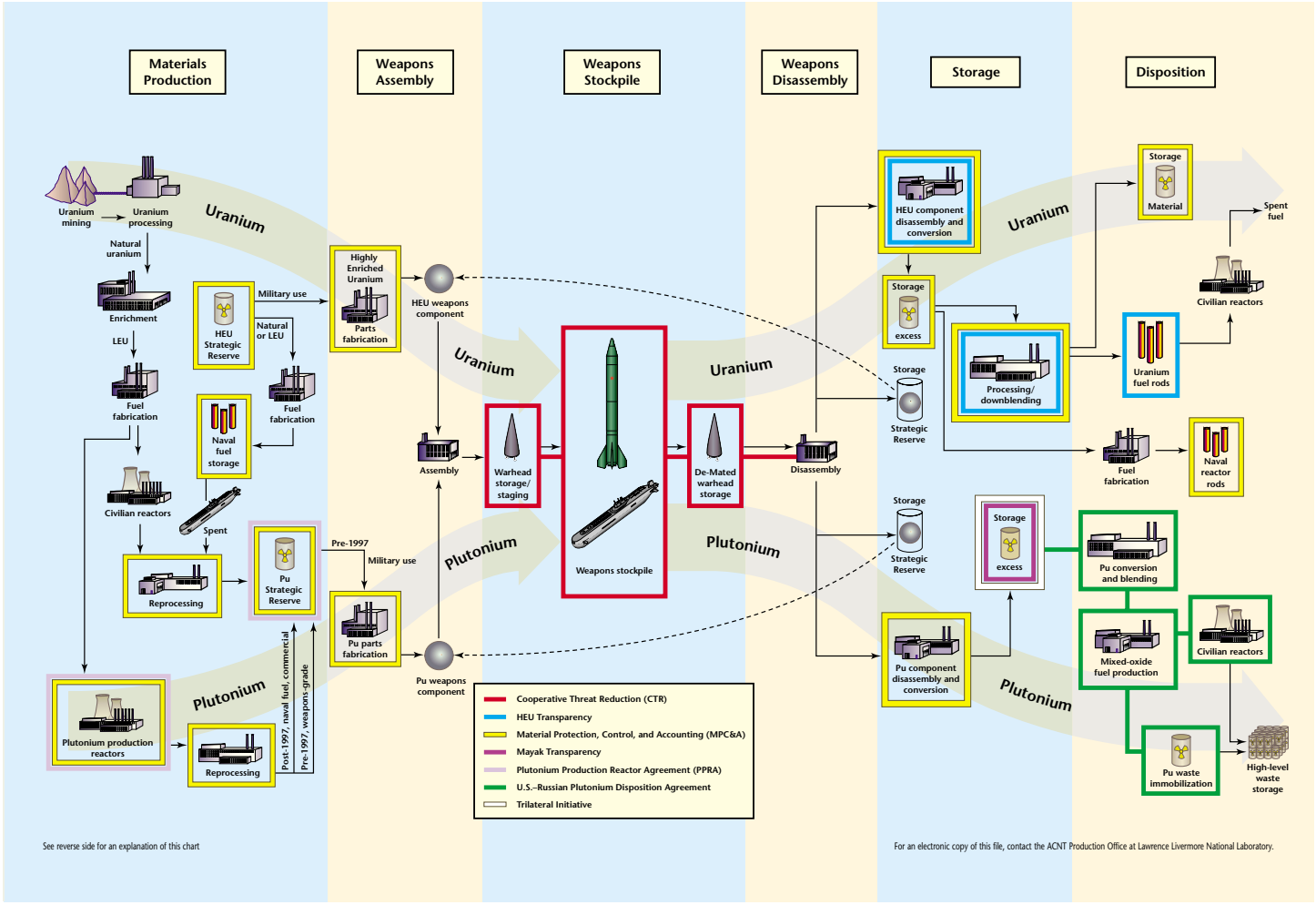
- sicurezza (*safety*) una testata sicura è innocua in tutte le situazioni diverse dalla deliberata detonazione
- affidabilità (*security*) una testata affidabile agisce nel modo prescritto quando viene detonata
- inviolabilità (*reliability*) una testata nucleare anche se catturata da un gruppo esperto non può mai produrre in alcun modo un'esplosione nucleare

Il criterio attuale americano di sicurezza richiede che la probabilità di una detonazione non voluta di un'arma nucleare sia inferiore, per anno e per arma, a un miliardesimo in condizioni normali e a un milionesimo in caso di incidenti.

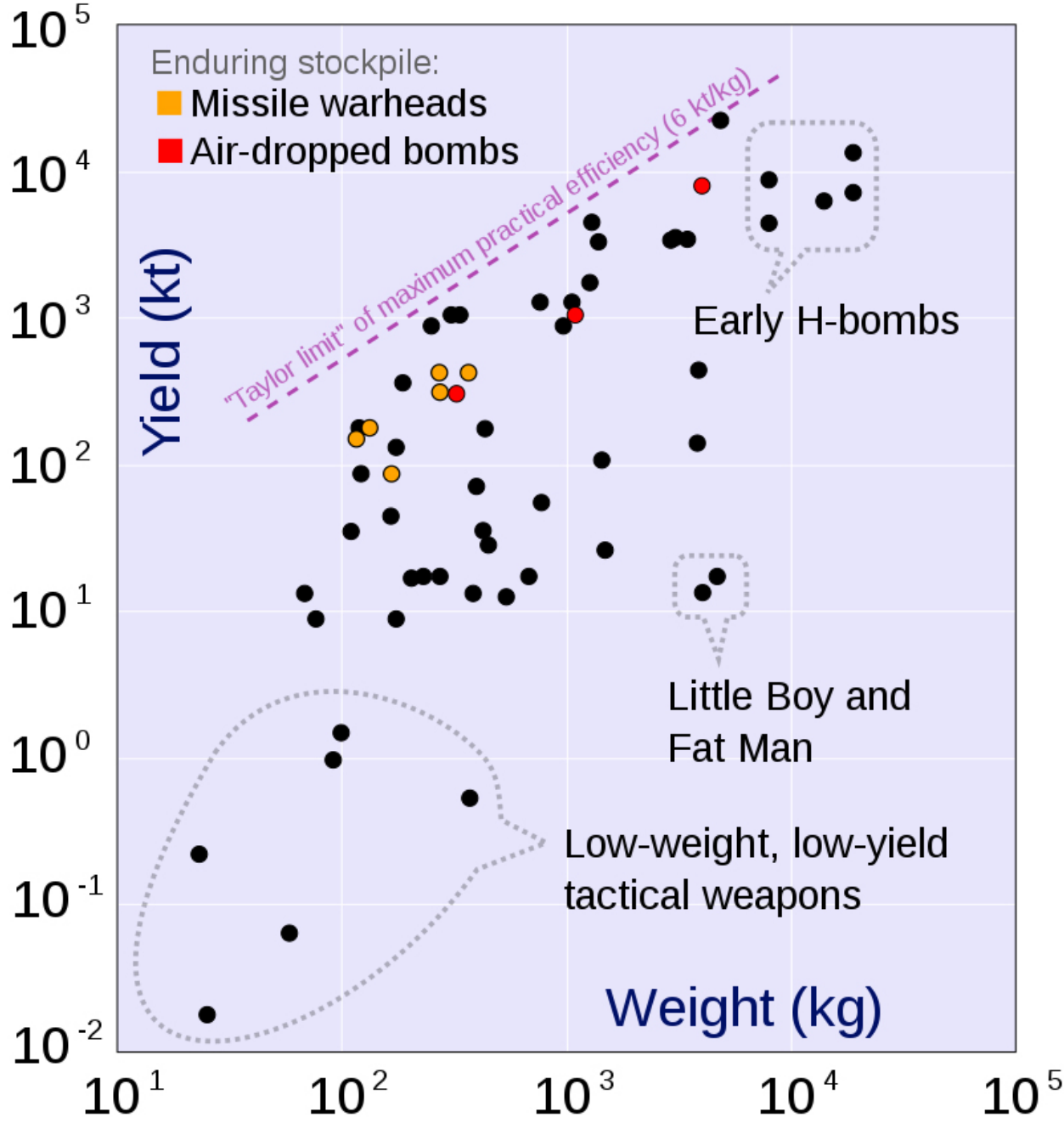


un arma nucleare è un apparato molto complesso

la produzione di un'arma a fissione richiede materiali speciali e competenze in un varietà di tecnologie, molte di interesse civile, e l'esecuzione di un programma articolato in circa 200 fasi



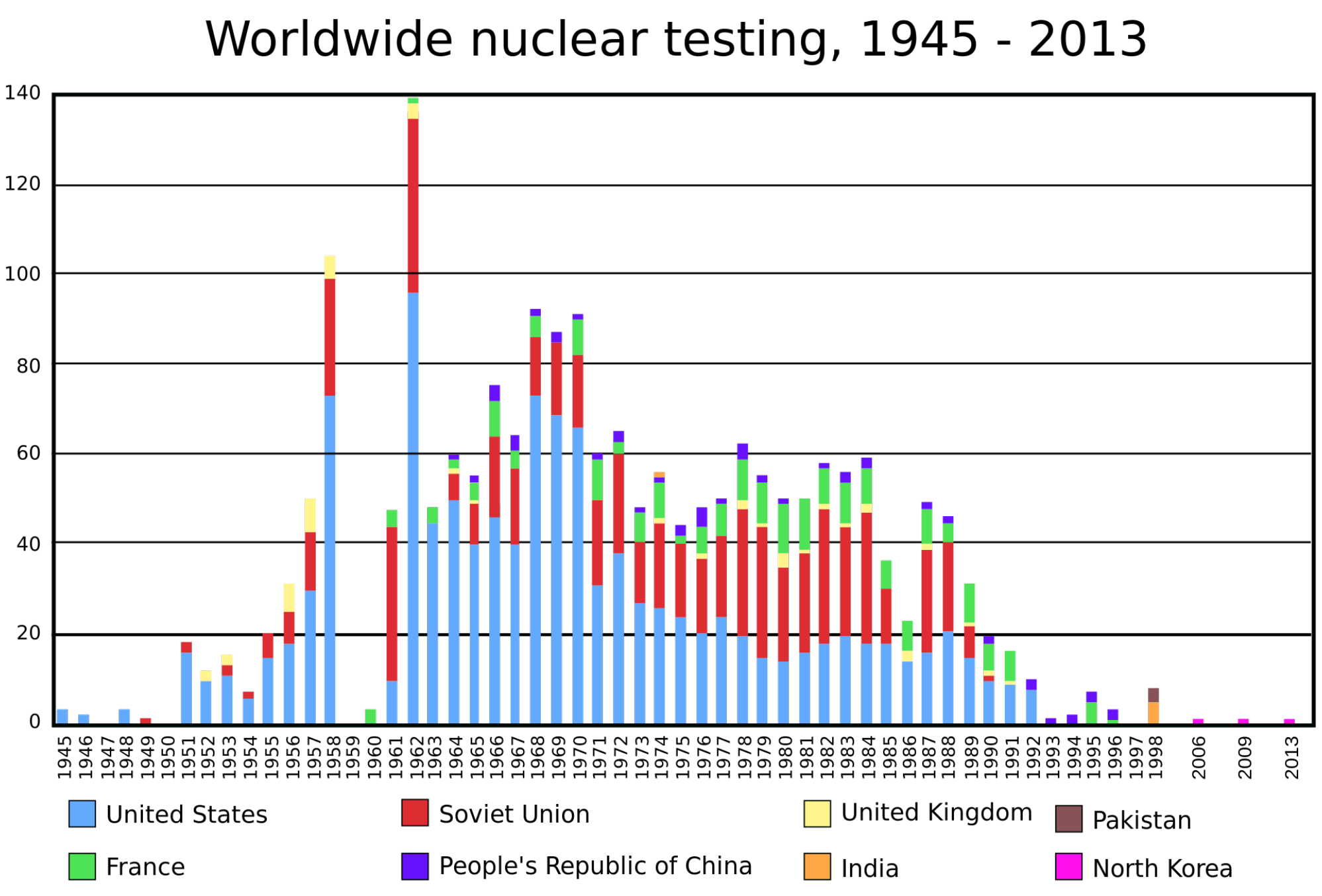
le principali bombe e testate nucleari americane

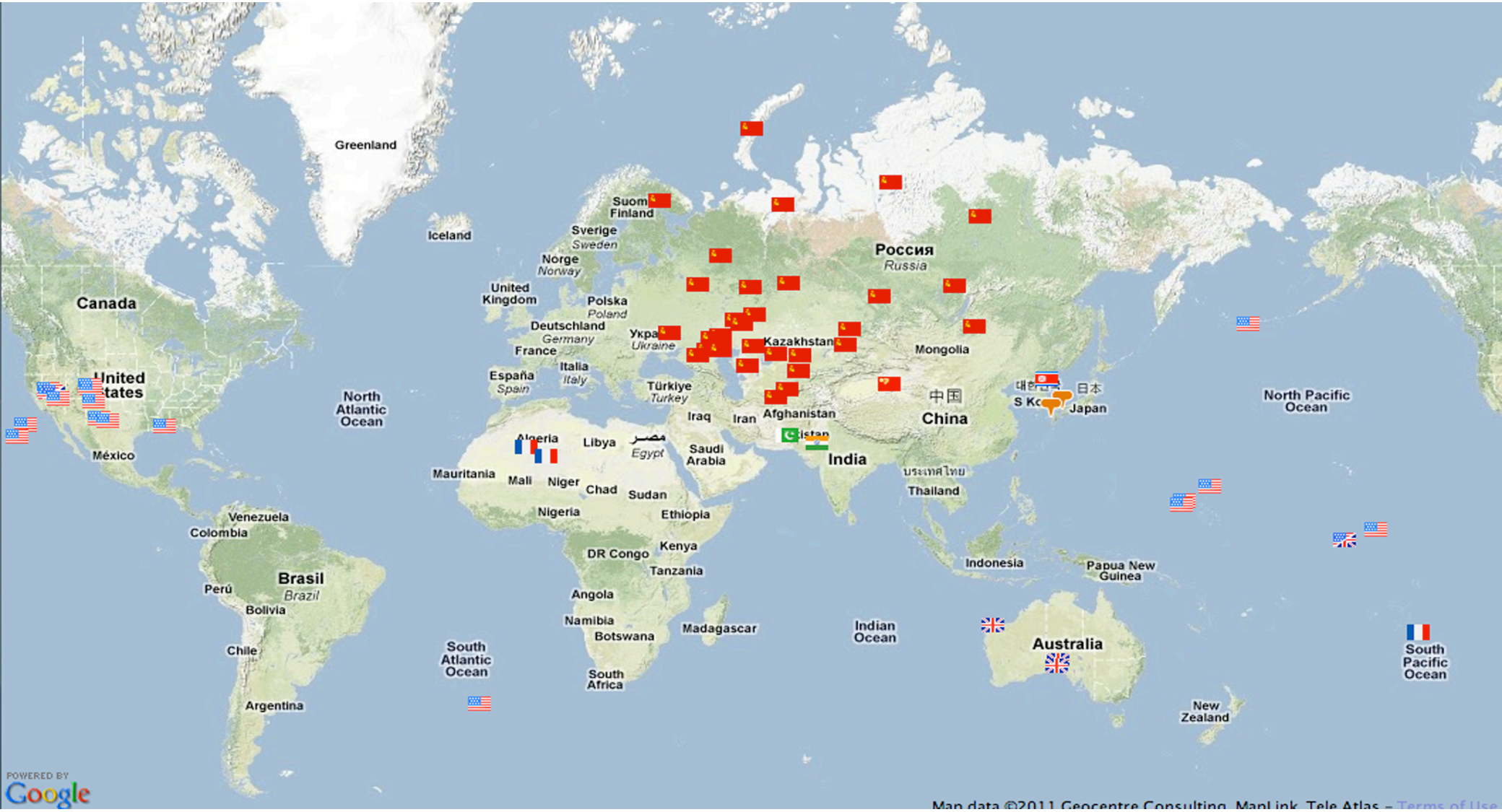


test nucleari esplosivi

- verificare gli effetti delle esplosioni nei vari ambienti: in aria, al suolo, ad altisima quota, sul mare, in profondità …
- mettere a punto/ottimizzare un nuovo modello
- assicurare la tenuta delle condizioni operative di una classe di armi
- testare e fissare i parametri dei codici delle simulazioni numeriche

non sono indispensabili


Worldwide nuclear testing, 1945 - 2013
140
120
100
80
60
40
20
0
1945 1946 1947 1948 1949 1950 1951 1952 1953 1954 1955 1956 1957 1958 1959 1960 1961 1962 1963 1964 1965 1966 1967 1968 1969 1970 1971 1972 1973 1974 1975 1976 1977 1978 1979 1980 1981 1982 1983 1984 1985 1986 1987 1988 1989 1990 1991 1992 1993 1994 1995 1996 1997 1998 2006 2009 2013
United States
Soviet Union
United Kingdom
Pakistan
France
People's Republic of China
India
North Korea



i siti dei test nucleari

Alessandro Pascolini

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