



Vývoj Jadrových zbraní

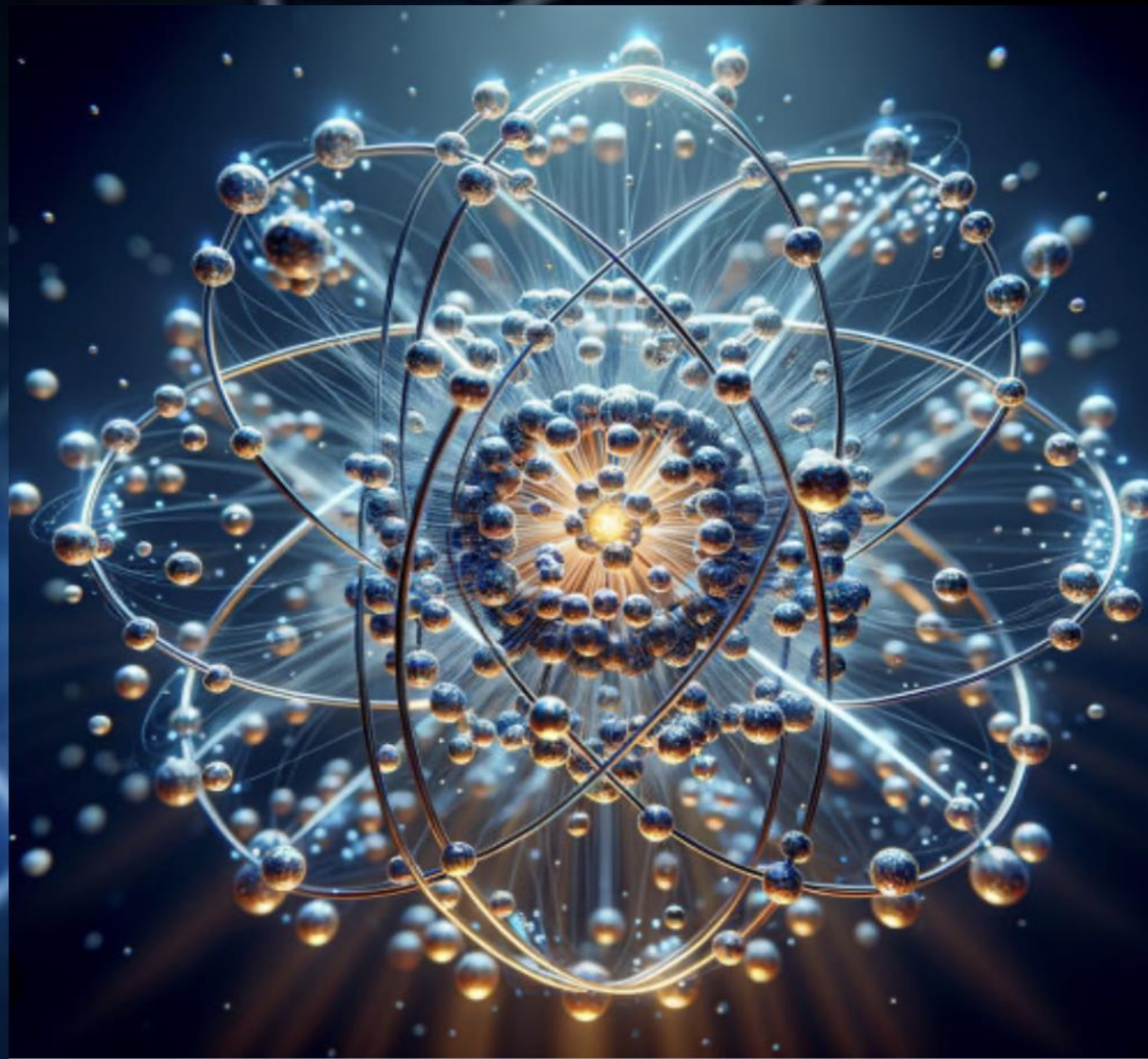
Slovenská Nukleárna Spoločnosť
SNUS - Častá-Papiernička 13.05.2025

Ing. Marián NANIAŠ



Je ľudskou
prirodzenosťou
testovať, pozorovať a
snívať.

História jadrovej
energie je príbehom
stáročného sna, ktorý
sa stal skutočnosťou.



Prvá zmienka a predpovede vývoja atómových zbraní

- 1914 – H.G. Wells napísal sci-fi román **“The World Set Free”**, ktorý predpokladá svetovú vojnu v roku 1956, v ktorej sa UK a Francúzsko postaví proti Nemecku a Rakúsko-Uhorsku.
- Inšpirovaný výskumom Rutherforda, Sira Williama Ramsaya a hlavne Fredericka Soddyho, román **predpovedá vývoj atómových zbraní** a obsahuje ručný granát na báze „karolínu“, ktorý po výbuchu nezhasne.



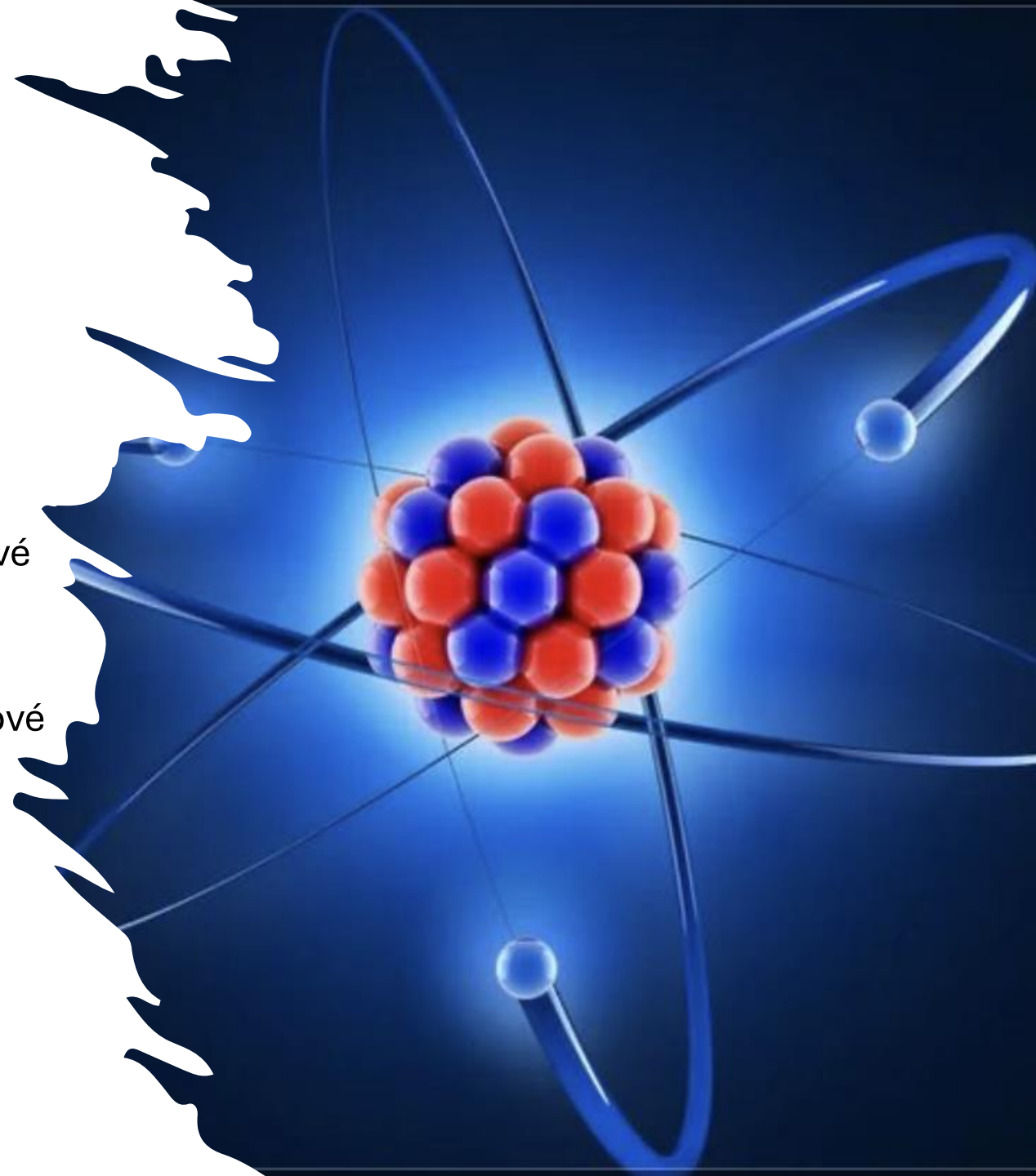
Druhá zmienka o vývoji atómových zbraní

- 1924 – “nejaký” **Winston Churchill**, dopisovateľ The Pall Mall Gazette, špekuluje:
- „Je možné **nájsť bombu nie väčšiu ako pomaranč**, ktorá má takú silu že zničí celé bloky budov – alebo mesto?“



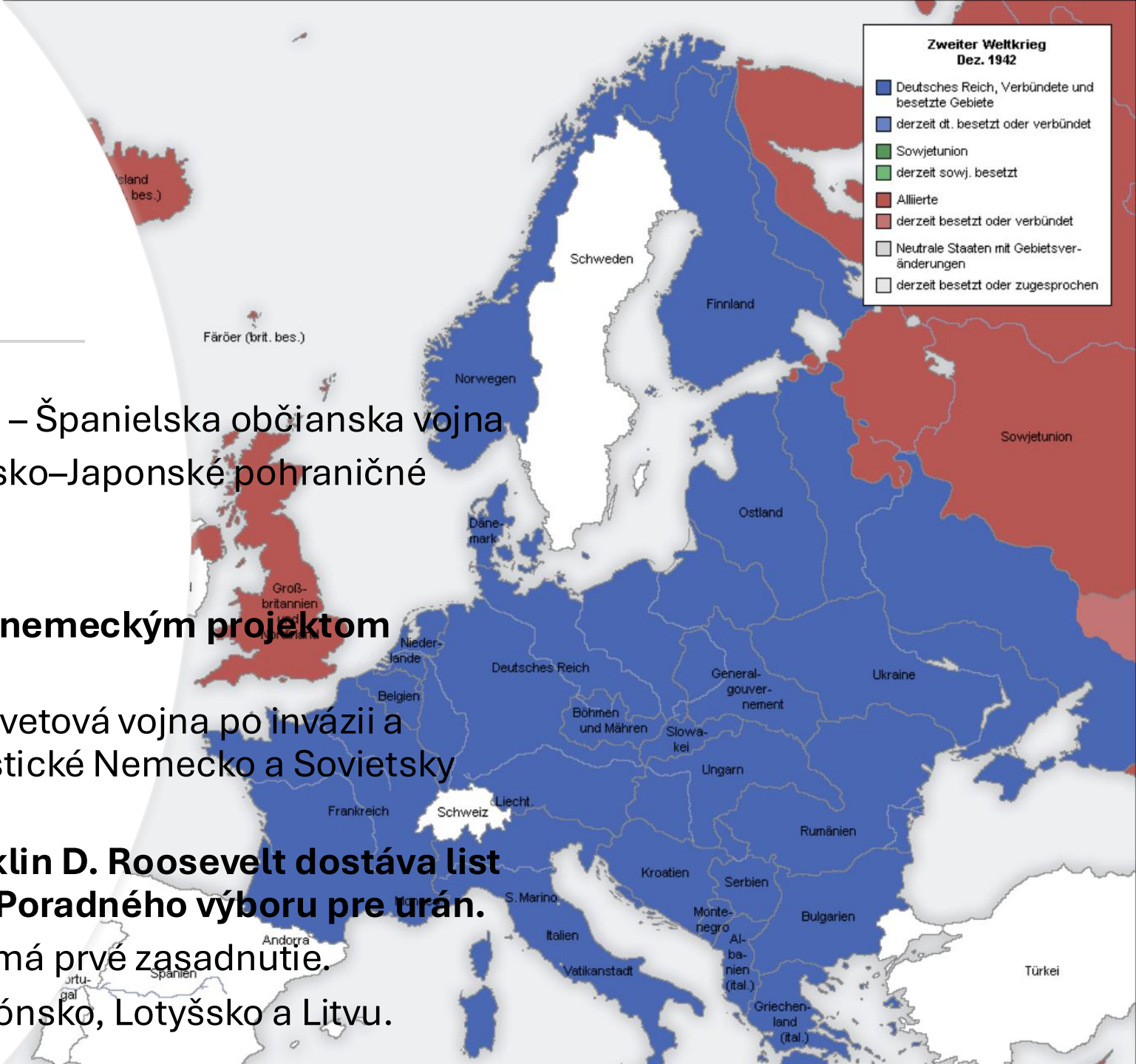
Bohaté roky 1930 – v oblasti vedy

- 1932 – Chadwick objavil neutrón
- 1933 – Szilárd patentuje ideu o jadrovej reťazovej reakcii
- 1934 – Enrico Fermi experimentuje s U a Tht – prvé syntetické prvky, transuránové prvky.
- 1938 – Hahn a Strassman objavili bárium po bombardovaní U.
- - Meitner a Otto Robert Frisch to chápu ako jadrové štiepenie.
- 1939 – Frisch experimentálne potvrdzuje objav. Delí sa tom s Bohrom a ten o tom hlási americkým kolegom.
- Bohr a John Wheeler cez experimenty reťazovej reakcie zistili, že urán-235 by mohol spôsobiť jadrový výbuch.



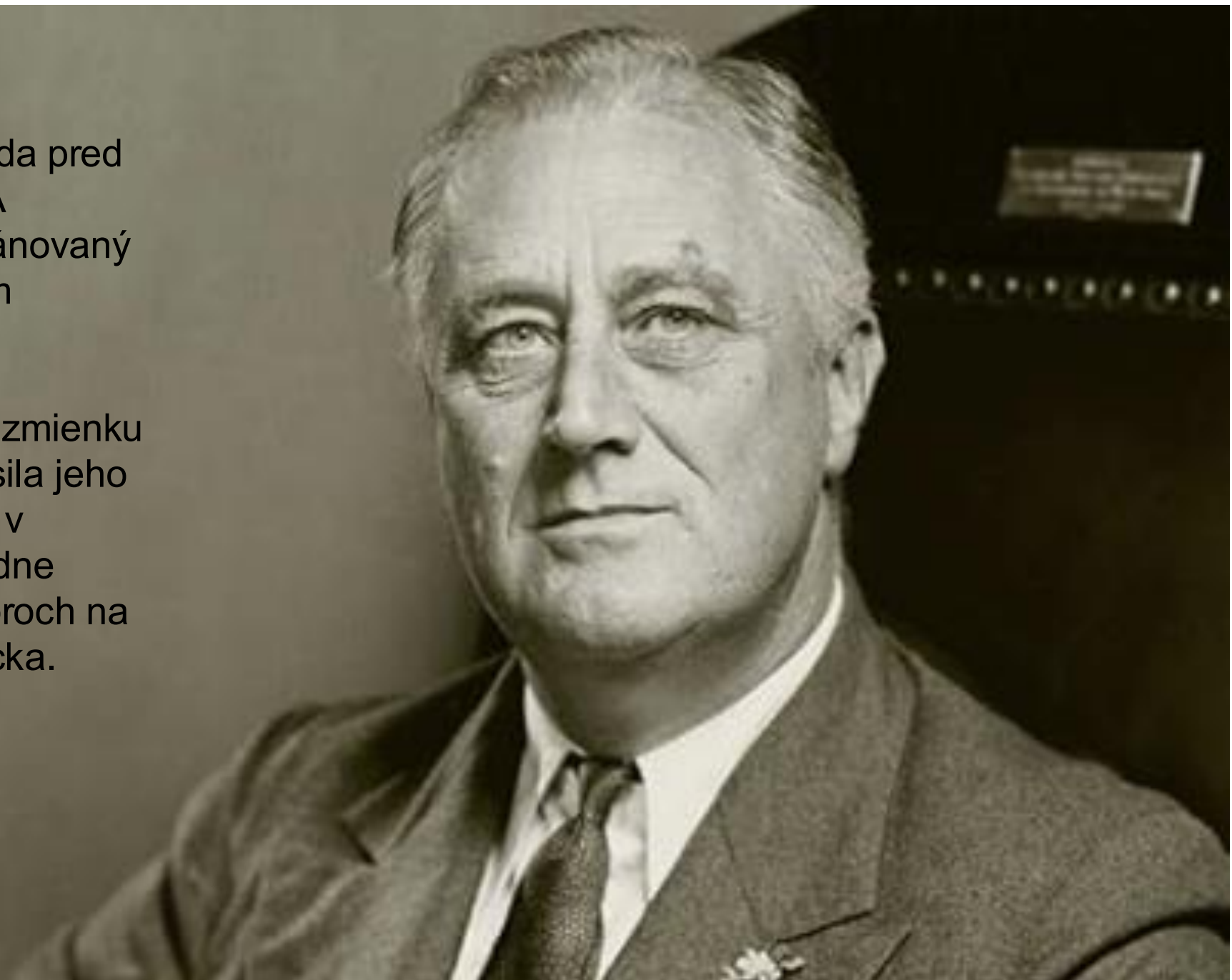
Búrlivé roky 1930 – v medzinárodnej politike

- 1935 – Taliani napadli Etiópiu, 1936-39 – Španielska občianska vojna
- 1937 – Japonsko napadlo Čínu, Sovietsko–Japonské pohraničné konflikty
- -1938 – Nemecko okupuje Rakúsko
- **1939 – nacistické Nemecko začína s nemeckým projektom jadrovej energie „Uranverein“.**
- - 1. Septembra 1939 — Začala Druhá svetová vojna po invázii a následnom rozdelení Poľska medzi nacistické Nemecko a Sovietsky zväz.
- - Október 1939 – prezident USA Franklin D. Roosevelt dostáva list Einstein-Szilárd a povoľuje vytvorenie Poradného výboru pre urán.
- - 21. Októbra 1939 má Uránový výbor má prvé zasadnutie.
- - Jún 1940, Sovietsky Zväz okupuje Estónsko, Lotyšsko a Litvu.



Večer 10. mája 1940 (teda pred 85 rokmi) prezident USA Roosevelt predniesol plánovaný prejav na Panamerickom vedeckom kongrese.

Sám vlastnoručne vložil zmienku o inváziách v Európe a sila jeho slov, vysielaných naživo v rozhlase, nenechala žiadne pochybnosti o jeho názoroch na otvorenú agresiu Nemecka.



„Krv, drina, slzy a pot“ je fráza, ktorá preslávila Winstona Churchilla 13. mája 1940; Bol to prejav keď žiadal Dolnú Snemovňu UK stať sa premiérom Spojeného kráľovstva v prvom roku druhej svetovej vojny. Churchill vtedy nahradil Nevilla Chamberlaina.

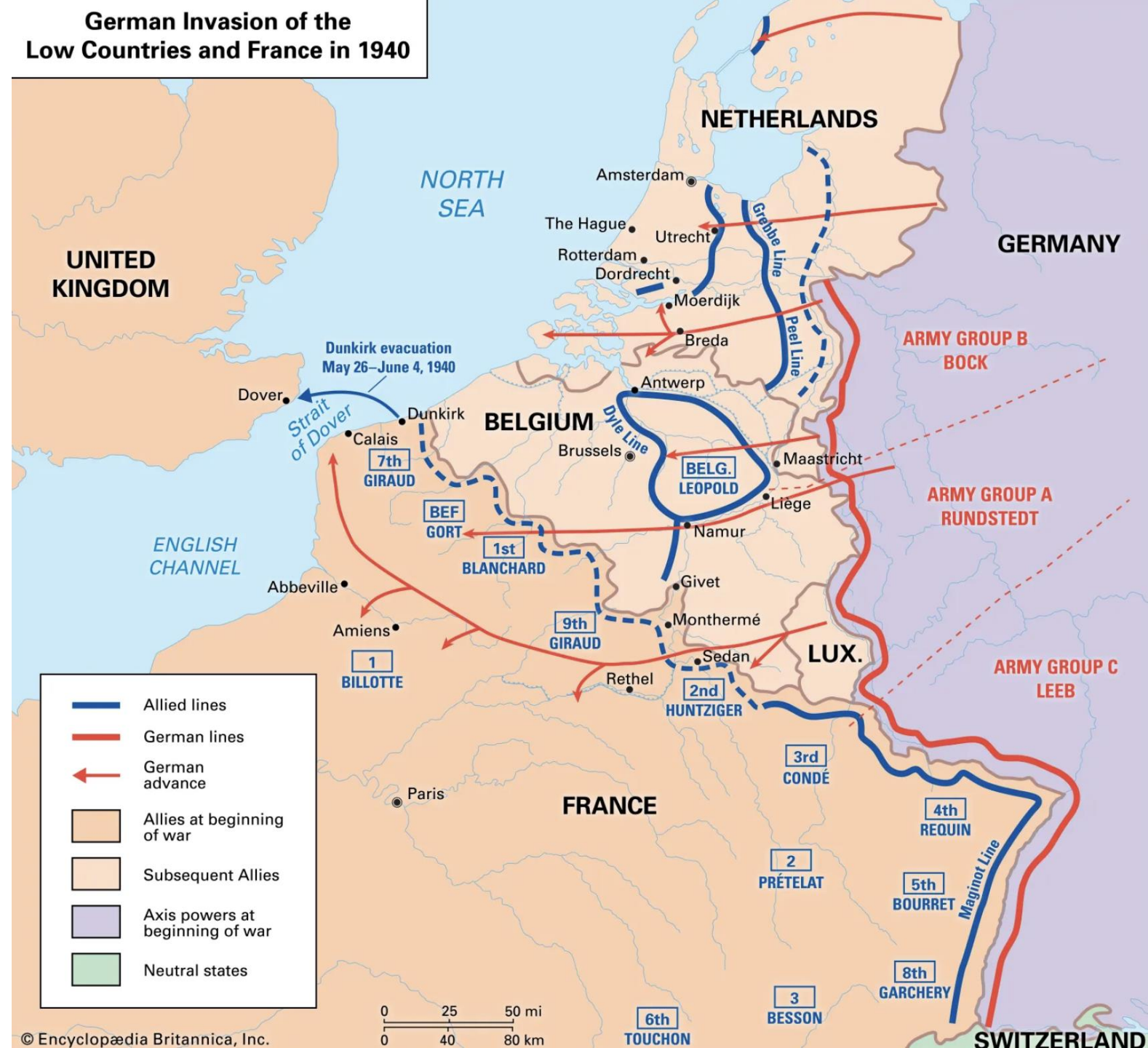


**“ I have nothing
to offer but
blood, toil, tears,
and sweat. ”**

German Invasion of the Low Countries and France in 1940

Bolo to 10. mája 1940.

V teň deň so svojimi 77 divíziami
a 3 500 lietadlami Nemecko bez
vyhlásenia alebo varovania
napadlo Belgicko, Holandsko a
Luxembursko, aby si uvoľnilo
cestu na inváziu do Francúzska.





Roosevelt hovoril o výzve „pokračovania typu civilizácie“, ktorú si ľudia z Ameriky cenili, ako moderný svet s modernými technológiami. A zvlášť spomenul aj úlohu vedca, ktorý bol obvinený z vynájdenia smrtiacich zbraní. Ale pripomenul, že ***„ak vedci v slobodných krajinách nevyrobia zbrane na obranu slobody svojich krajín, potom bude sloboda stratená.“***

Povedal, že väčšina ľudí nenávidí „dobývanie a vojnu a krviprelievanie“, ale zároveň zdôraznil, že „*hľadanie pravdy je veľkým dobrodružstvom, ale že „v iných častiach sveta učitelia a učitelia to nemajú dovolené“.*

A ku koncu prejavu prehlásil:

“Vám, ktorí ste vedci, možno bolo povedané, že ste čiastočne zodpovední za dnešný debakel... ale uist'ujem vás, že to nie sú svetoví vedci, ktorí sú zodpovední....

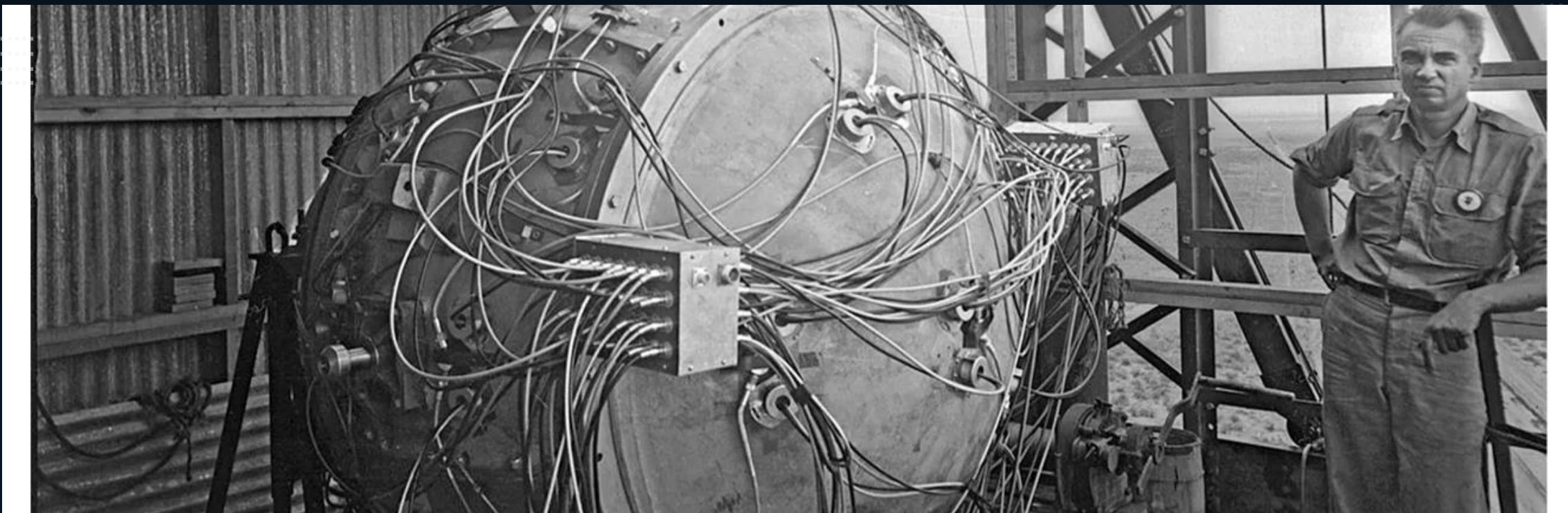
To, čo sa stalo, spôsobili výlučne tí, ktorí by využili a využívajú pokrok, ktorý ste dosiahli v rámci mieru v úplne inej veci.“

Svojim prejavom Roosevelt vlastne vopred ponúkol súhlas a rozhrešenie za vojnovú prácu.



O 5 rokov neskôr....

- O päť rokov neskôr v máji 1945 už USA finišovali pred prvým jadrovým testom Projektu Manhattan. Druhá svetová vojna v Európe sa skončila 8. mája 1945, keď Nemecko kapitulovalo, čo umožnilo USA sústrediť sa na vojnu v Tichomorí proti Japonsku.
- Projekt Manhattan bol v plnom prúde dokončiť a otestovať prvú atómovú bombu – tzv. „Gadget“ a test pod názvom “Trinity” bol naplánovaný na júl, takže máj bol časom intenzívnych príprav.
- V týchto dňoch tam vtedy prebehol tzv. „100-tonový test“, čo bola simulácia odpálenia 108 ton TNT zmiešaných s rádioaktívnymi izotopmi z reaktora Hanford.



A o dva mesiace neskôr Trinity test

- 16. júla 1945 o 5:29 ráno prvá testovacia atómová bomba – „Gadget“ explodovala s výkonom 18,6 kT.
- Celosvetová jadrová éra sa začala.
- Ale to sme trochu predbehli....

Prečo vlastne
boli jadrové
zbrane
vyrobené?

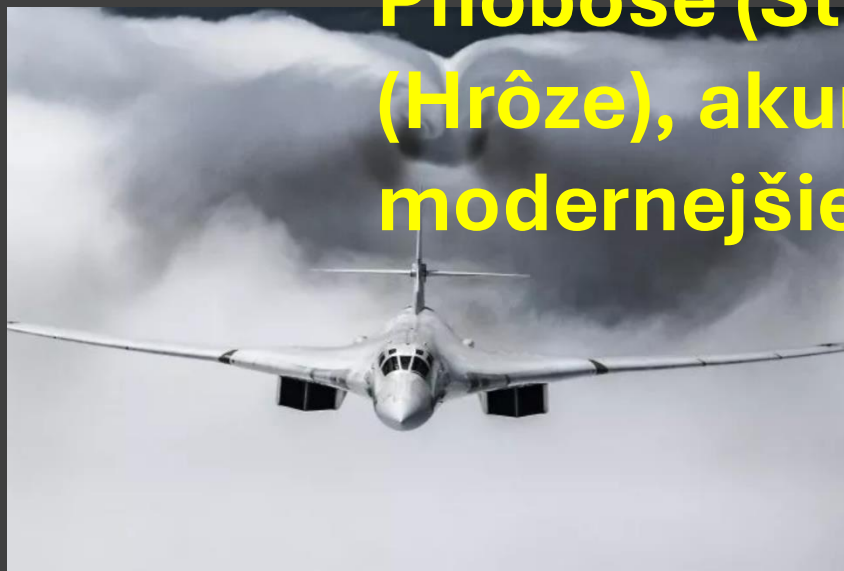
**Zo strachu, že ich
prvý vyrobí Hitler!**



Phobos (strach) a Deimos (hrôza)

A keďže sa jadrová energia “narodila v brnení” a jej prvé použitie bolo vojenské! – tak dodnes ľudí desí...





Aj dnes jadrové zbrane jazdia na
Phobose (Strachu) a Deimose
(Hrôze), akurát ich prevedenie je
modernejšie .

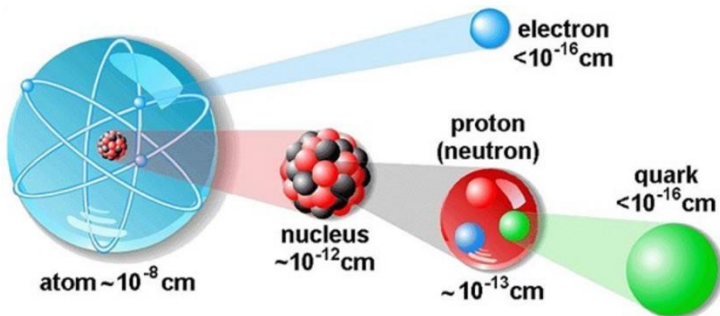
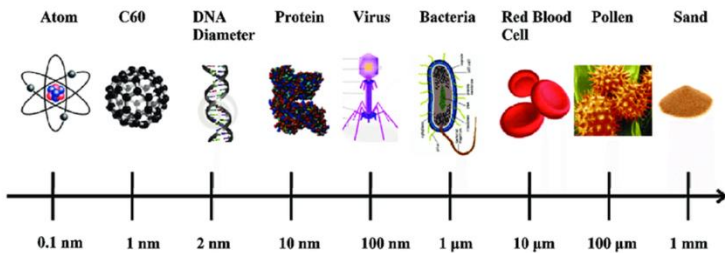


Money, money, money - Politická podpora je nevyhnutná...

Politické rozhodnutia o vývoji jadrovej bomby

- **Nemecko:**
September 1939 je približný, pretože neexistuje explicitný príkaz „urobte bombu“. Založenie Uranverein je však najbližším momentom k politickému mandátu.
- **Japonsko:** Apríl 1941 je potvrdený Nishinovými správami a armádnymi dokumentmi, hoci detaily sú menej jasné kvôli utajeniu a vojnovému chaosu.
- **Spojené kráľovstvo:** Dátum júl 1941 je dobre zdokumentovaný v historických záznamoch (správa MAUD), takže je presný.
- **USA:** Dátumy 9. október 1941 je dobre zdokumentovaný v historických záznamoch (Rooseveltovo rozhodnutie), takže je tiež presný.
- **Obmedzenia:** V Nemecku a Japonsku bolo zadanie menej jednoznačné kvôli nejasným prioritám a slabým vedeckým pokrokom. USA a UK mali jasnejšie politické rozhodnutia, čo odráža ich organizačnú a zdrojovú prevahu.

Jadrové zbrane je iný svet ako bežne vnímame...



Entita	Približný rozmer (m)	Popis
Človek	~1–2 m	Výška dospelého človeka.
Bunka	~10 ⁻⁵ m (10 μm)	Priemerná veľkosť živočíšnej bunky, napr. červená krvinka (~7 μm).
Molekula	~10 ⁻⁹ m (1 nm)	Napr. molekula vody (~0,3 nm) alebo DNA (~2 nm v priemere).
Atóm	~10 ⁻¹⁰ m (0,1 nm)	Priemer atómu, napr. atóm vodíka (~0,05 nm).
Jadro atómu	~10 ⁻¹⁵ m (1 fm)	Priemer jadra, napr. uhlík-12 (~6 fm).
Subjadrové častice	<10 ⁻¹⁸ m	Kvarky, elektróny a pod.; ich "veľkosť" je skôr bodová, limitovaná meraním.

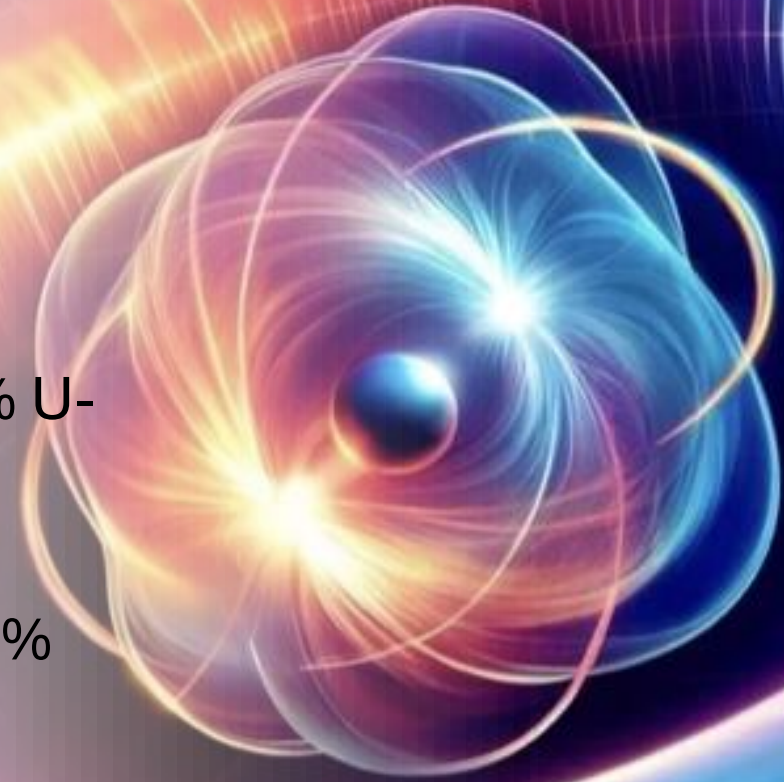
Poznámky:

- **Bunka:** Rozmery sa líšia – baktérie môžu mať ~1 μm, zatiaľ čo nervové bunky až centimetre (dĺžka).
- **Molekula:** Malé molekuly (napr. O₂) sú menšie ako veľké biomolekuly (napr. proteíny, ~10 nm).
- **Atóm a jadro:** Atóm je asi 100 000-krát väčší ako jeho jadro.
- **Subjadrové častice:** Kvarky a leptóny sú považované za bodové častice; ich "rozmer" je skôr limit rozlíšenia experimentov (napr. v urýchľovačoch).

Je to iný svet.... pozývam Vás na návštevu.....

1. Čistota Reaktory

- izotopová čistota uránu 3-5 % U-235, plus 95-97 % U-238.
- Pelety UO_2 tolerujú menšie nečistoty (napr. 0,1 – 1 % iných prvkov, ako je kyslík alebo uhlík)
- Plutónium je vedľajší produkt, nepotrebujeme čistý Pu-239; Chemická čistota je stredná.



Je to iný svet.... pozývam Vás na návštevu.....

1. Čistota

Jadrové zbrane

- izotopová čistota U-235 až 90 % (často 93 – 95 %).
- Chemická čistota extrémne vysoká. Kovový urán musí byť bez nečistôt absorbujúcich neutróny (napr. bór, uhlík < 0,01 %)
- Izotopová čistota Pu je 93 – 94 % Pu-239 a menej ako < 7 % Pu-240.
- Chemická čistota Pu mimoriadne vysoká. Kovové Pu musí byť bez absorbérov neutrónov (napr. bór, kyslík <0,01%) a chemicky reaktívnych nečistôt (napr. vodík).
- Berýlium čisté na 99,9 %, U-238 (Tamper) čistý na 99,8%
- silné výbušné trhavy (napr. HMX, PBX) čisté na 99,5 %, a bez nečistôt



Je to iný svet.... pozývam Vás na návštevu

- 2. Časové hodnoty

- Je tu vlastná nová jednotka. “**Shake**”, v preklade “**trasenie chvostom**”, či “**trepanie**”, resp. “**chvenie**”?

- Je to neformálna jednotka času používaná v jadrovej fyzike a technológii zbraní, ktorá sa rovná 10 nanosekundám (10^{-8} sekundám alebo 0,00000001 sekundám).



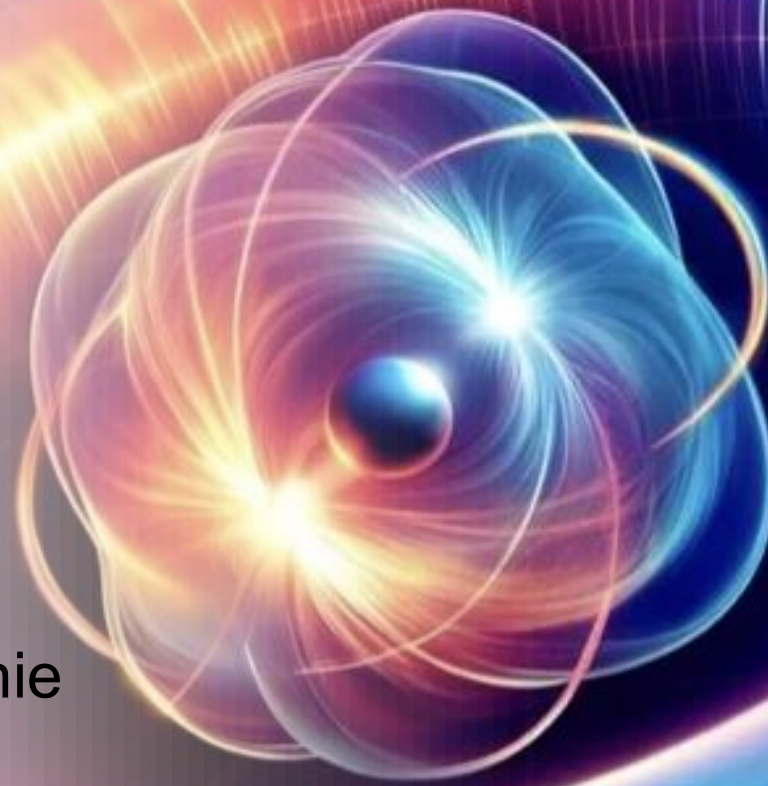
Je to iný svet.... pozývam Vás na návštevu

2. Časové hodnoty

Jednotka “**Shake**”, v preklade “**trasenie chvostom**”,

Z pohľadu fyzikálneho kontextu tu ide o to, že pri jadrovom výbuchu „chvenie“ približuje čas, ktorý neutrón potrebuje na to, aby prekonal krátku vzdialenosť a spôsobil štiepnu udalosť v štiepnom materiáli, ako je U-235 alebo Pu-239.

Je to zhruba trvanie jednej „generácie“ v exponenciálnej reťazovej reakcii. Na úplné štiepenie plutónia-239 alebo uránu-235 s hmotnosťou 1 kilogramu (uvoľnenie ~17 kiloton energie) je potrebných približne 50-80 generácií alebo 500-800 otrasov (~5-8 mikrosekúnd). Toto je to “okno” predtým, ako sa jadro roztiahne a rozloží, čím sa reakcia zastaví.

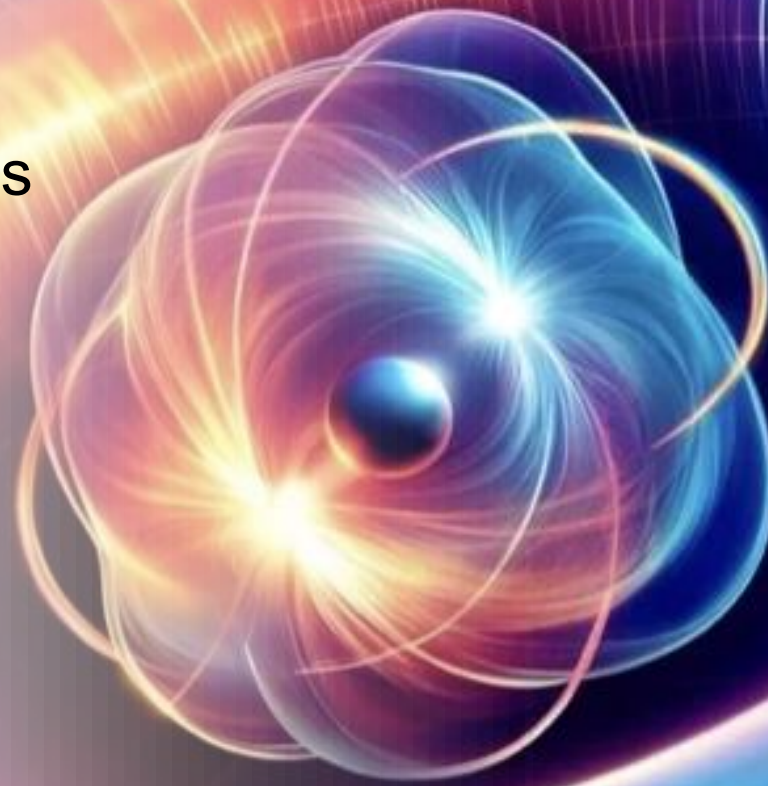


Je to iný svet.... pozývam Vás na návštevu

3. Šírka záberu typov zbraní

Od roku 1945 až dodnes vymysleli a vyrobili štáty s jadrovými zbraňami približne **370 – 400 rôznych návrhov a modifikácií jadrových zbraní.**

- **Štiepne zbrane: Hlavnový typ** (~5-10 vzorov, napr. Little Boy, Južná Afrika), implózia (~20-30 vzorov, napr. Fat Man, RDS-1).
- **Posilnené štiepenie:** ~30-40 návrhov.
- **Termonukleárne:** ~20-30 základných návrhov (napr. Ivy Mike, Tsar Bomba, B61), s ~100+ modifikáciami (napr. W88, B61-12).
- **Taktické varianty:** ~50-70 modifikácií pre použitie na bojisku (napr. WE.177, Hwasal-31).



Je to iný svet.... pozývam Vás na návštevu(4)

4. Šírka záberu profesí...

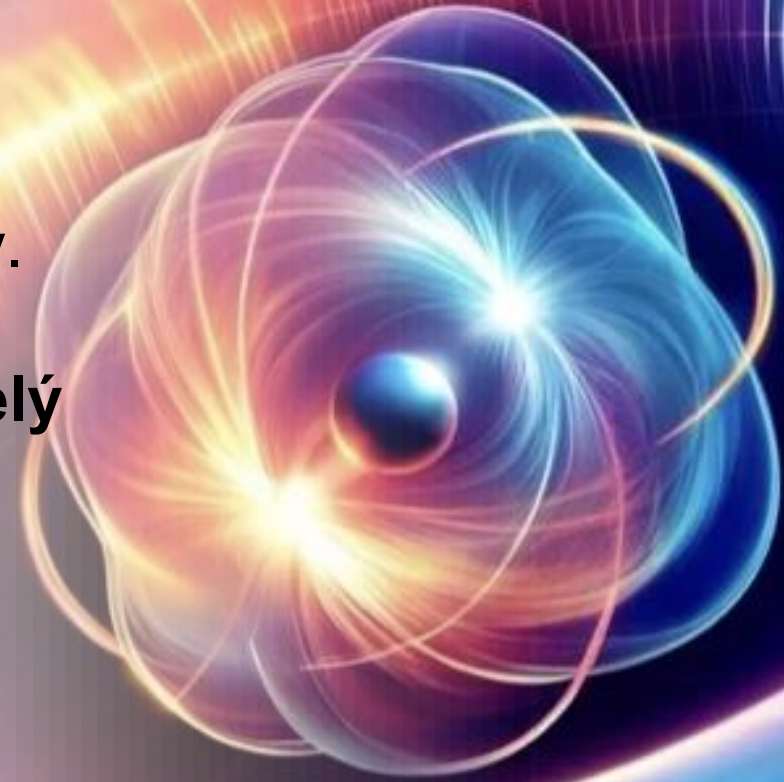
Jadrové zbrane sú brilantné technologické výtvary.

Prakticky z nuly museli vymyslieť a vytvoriť celý "jadrový palivový cyklus" a samozrejme aj "jadrové reaktory".

Nič z toho predtým neexistovalo.

Bolo to spoločné úsile a spoločný úspech!

USA sa podarilo vytvoriť v priebehu iba 3 krátkych rokov úplne nové priemyselné odvetvie!



Je to iný svet.... pozývam Vás na návštevu(4)

4. Šírka záberu profesí...

Na vymyslenie a skonštruovanie jadrových zbraní bolo nutných tisíce rôznych špecialistov

– teoretikov a experimentátorov:

- jadrových vedcov, - fyzikov, - inžinierov, - chemikov,
- rádiochemikov, - metalurgov, - matematikov, -
zbrojárov, - jemných mechanikov, - elektronikov, -
plánovačov - je to kolektívny výsledok.

A ako vedľajší efekt prináša jadrová energia ľudstvu nespočetné možnosti od liečenia rakoviny, cez lacnú výrobu elektrickej energie až po kozmické lode.



Aktuálny stav jadrových zbraní



2025 ESTIMATED GLOBAL NUCLEAR WARHEAD INVENTORIES

The world's nuclear-armed states possess a combined total of over 12,400 nuclear warheads; nearly 90% belong to Russia and the United States. Approximately 9,700 warheads are in military service, with the rest awaiting dismantlement.



Source: Federation of American Scientists, U.S. Department of State, U.S. Department of Energy, U.S. Department of Defense, and the Stockholm International Peace Research Institute. Updated: January 2025

Arms Control
Association

Aktuálny stav jadrových zbraní

Jadrové zbrane vlastní 9 krajín: **USA, Rusko, Francúzsko, Čína, Spojené kráľovstvo, ale aj Pakistan, India, Izrael a Severná Kórea.**

Globálny jadrový arzenál sa blíži k 13 000 kusom.

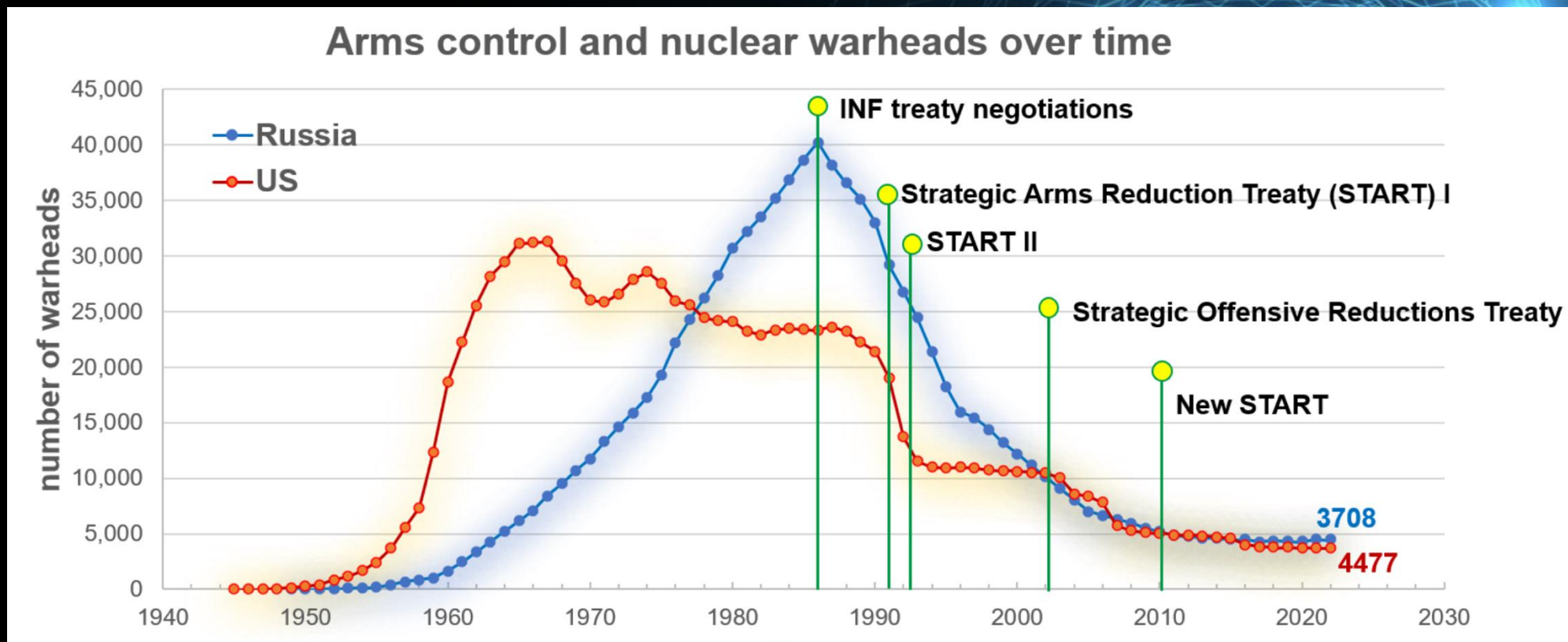
Z približne 12 331 jadrových hlavíc je cca 9 604 vo vojenských zásobách pre rakety, lietadlá, lode a ponorky. Zostávajúce hlavice boli vyradené z prevádzky, ale sú stále relatívne neporušené a čakajú na demontáž.

Z tých 9 604 hlavíc je približne 3 904 nasadených v rámci operačných síl (na raketových alebo bombardovacích základniach).

Z nich je približne 2 100 amerických, ruských, britských a francúzskych hlavíc v stave vysokej pohotovosti, pripravených na použitie v krátkom čase.



Aktuálny stav jadrových zbraní



Celkový globálny jadrový arzenál sa blíži k 13 000 kusom.

Hoci je toto číslo nižšie ako počas studenej vojny – keď bolo na celom svete približne 60 000 zbraní – nemení to nič na základnej hrozbe pre ľudstvo, ktorú tieto zbrane predstavujú.

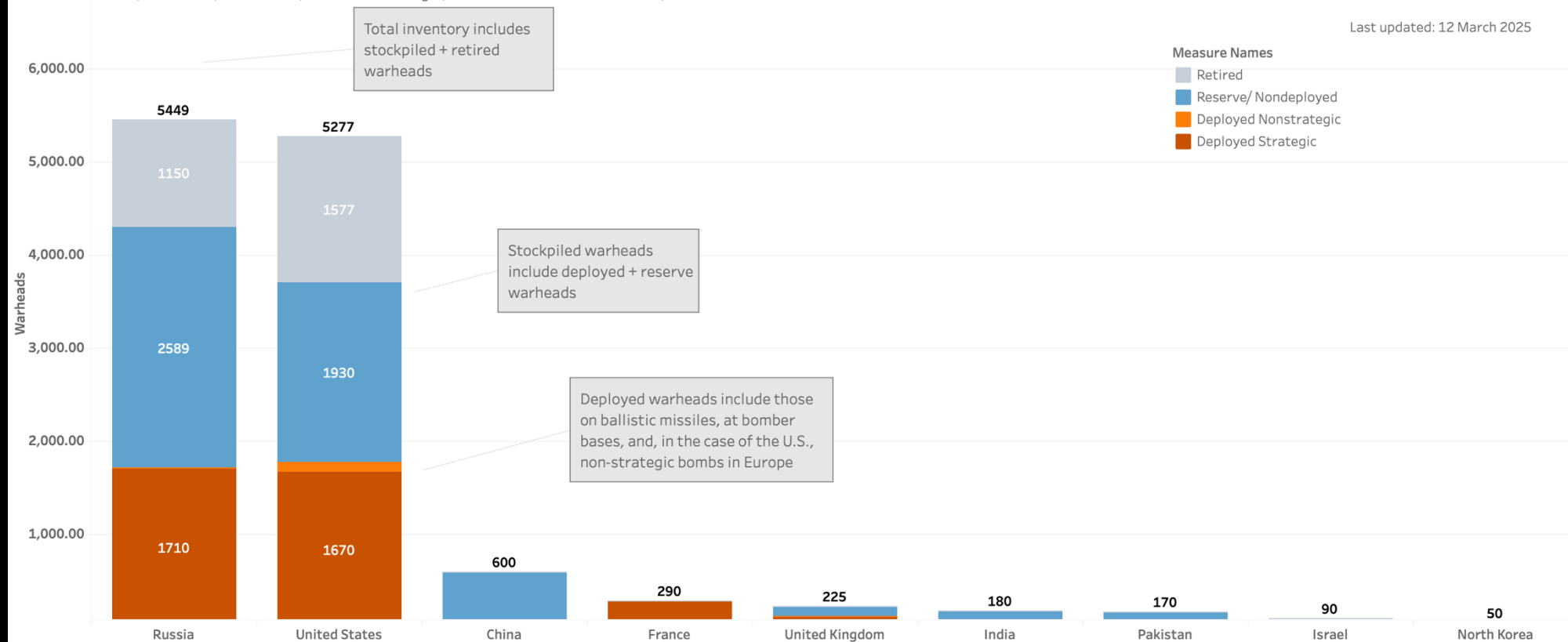
Aktuální stav jadrových zbraní

Estimated Global Nuclear Warhead Inventories, 2025

Hans M. Kristensen, Matt Korda, Eliana Johns, and Mackenzie Knight, Federation of American Scientists, 2025

FAS FEDERATION
OF AMERICAN
SCIENTISTS

Last updated: 12 March 2025



View on Tableau Public

Navigation icons: back, forward, search, and other controls.

Data Visualisation: Estimated Global Nuclear Warhead Inventories: Dashboard 1

Aktuálny stav jadrových zbraní

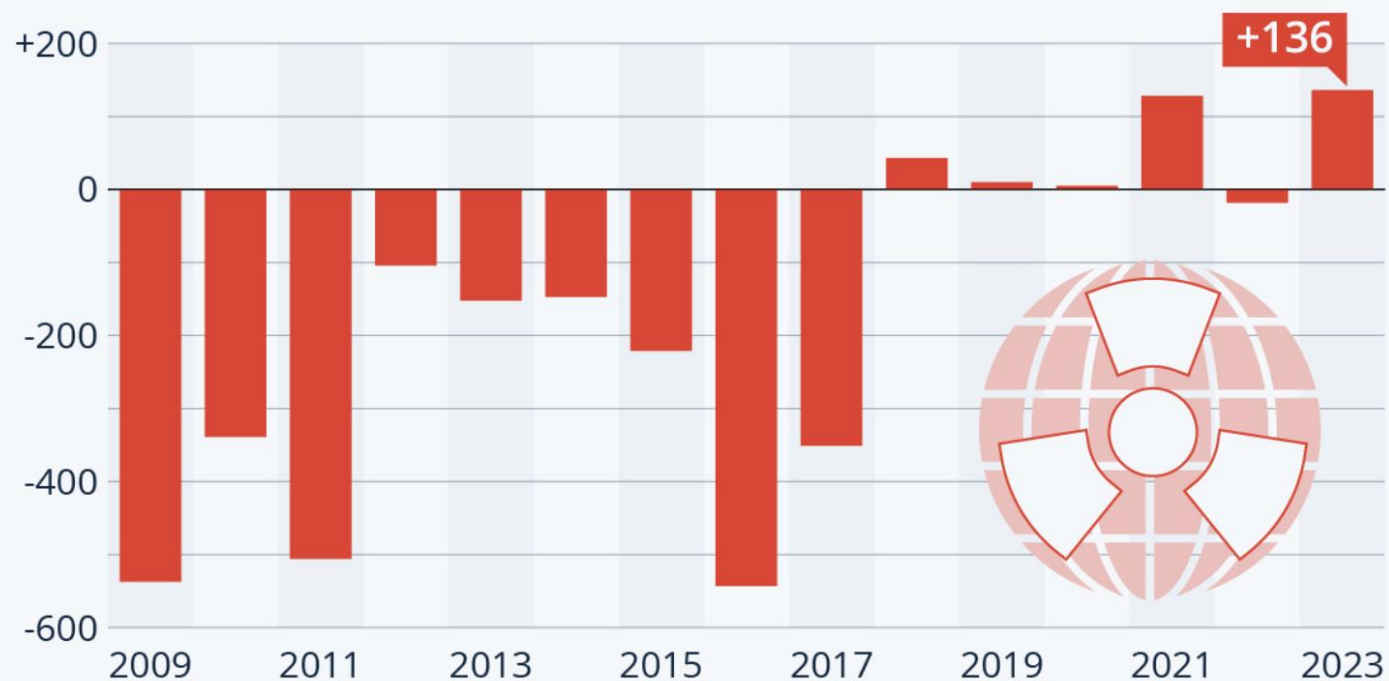
Status Of World Nuclear Forces, 2025

Country	Deployed Strategic	Deployed Nonstrategic	Reserve/Nondeployed	Military Stockpile(a)	Total Inventory(b)
Russia	1,710(c)	0(d)	2,589(e)	4,299	5,449
United States	1,670(g)	100(h)	1,930	3,700(i)	5,277(j)
France	280	n.a.	10(k)	290	290
China	24	n.a.	576	600	600(l)
United Kingdom	120	n.a.	105	225	225(m)
Israel	0	n.a.	90	90	90(n)
Pakistan	0	n.a.	170	170	170(o)
India	0	n.a.	180	180	180(p)
North Korea	0	n.a.	50	50	50(q)
Total(r)	~3,804	~100	~5,700	~9,604	~12,331

Status of World Nuclear Forces, 2025

Global Nuclear Warhead Stockpiles Growing Again

Estimated annual change in global nuclear warhead stockpiles from 2009 to 2023*



As of January of each year.

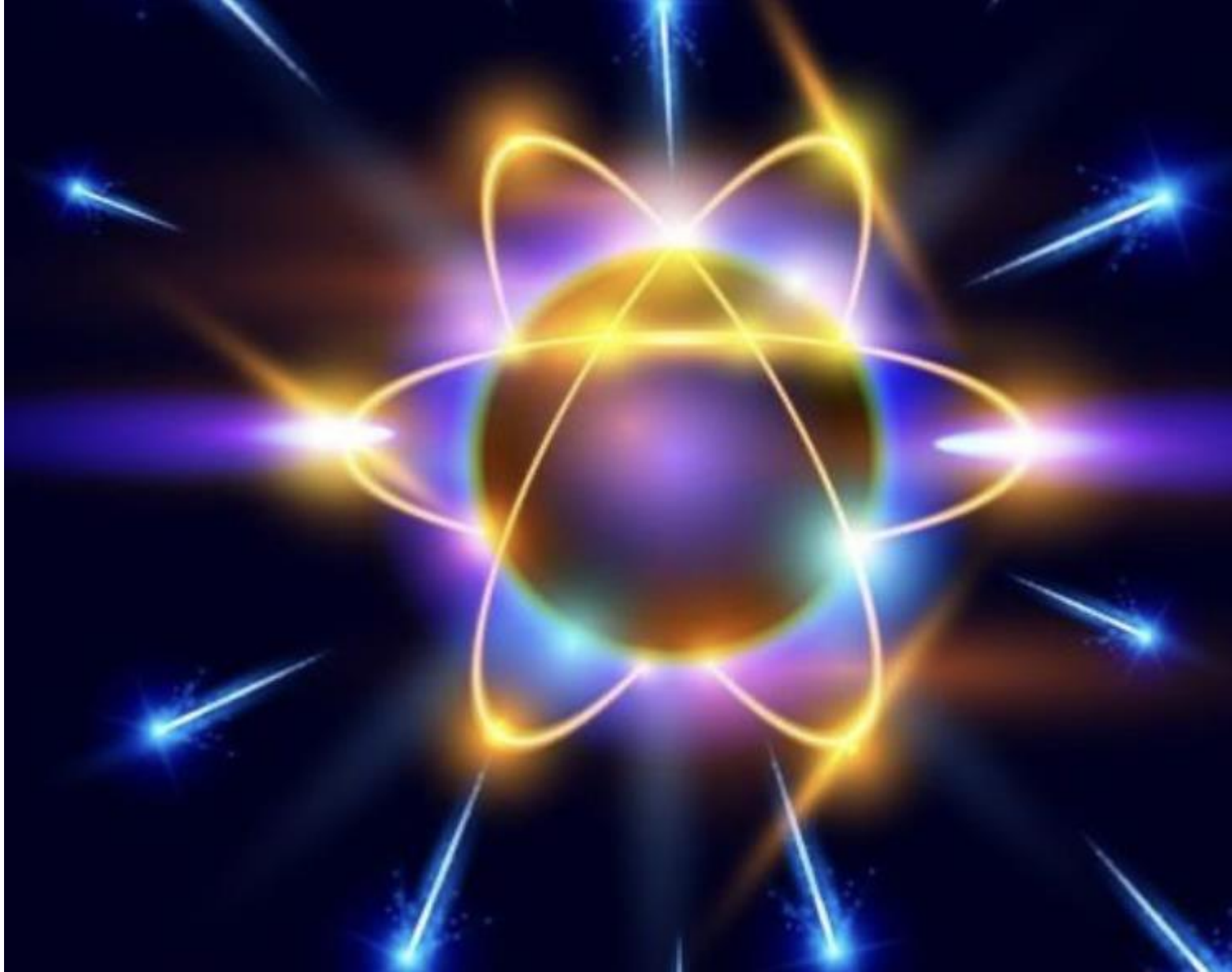
* 'Stockpiled' warheads are those usable by armed forces including deployed and stored weapons.

Source: Federation of American Scientists

Aktuálny stav
jadrových zbraní

Žiaľ počet jadrových
hlavíc opäť pomaly
narastá....

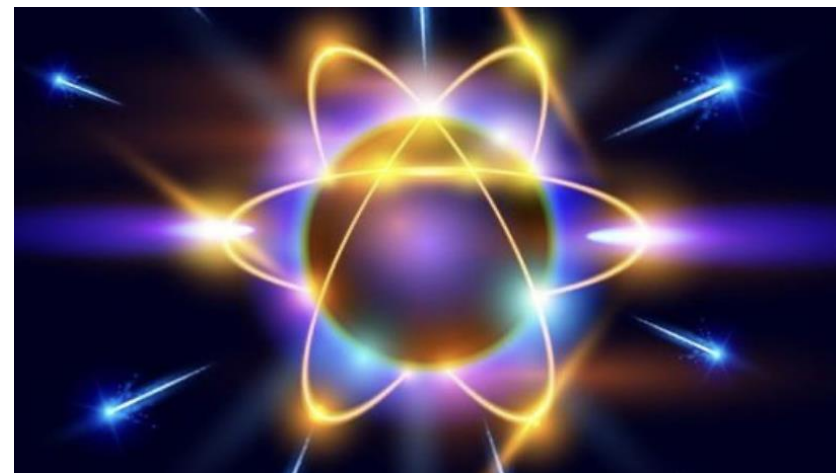
Programy vývoja jadrových zbraní



Programy vývoja jadrových zbraní

Prehľadné zoradenie podľa začiatku

Krajina	Začiatok	Koniec	Trvanie
Nemecko	Apríl 1939	Máj 1945	~6 rokov
USA (Manhattan)	Október 1939	August 1945	~6 rokov
UK (Tube Alloys)	Apríl 1940	1943 (spojenie)	~3 roky
Japonsko	Máj 1941	August 1945	~4 roky
Sovietsky zväz	Jún 1941	August 1949	~8 rokov
Kanada	1942	August 1945	~3 roky



Programy vývoja jadrových zbraní

Paralelnosť:

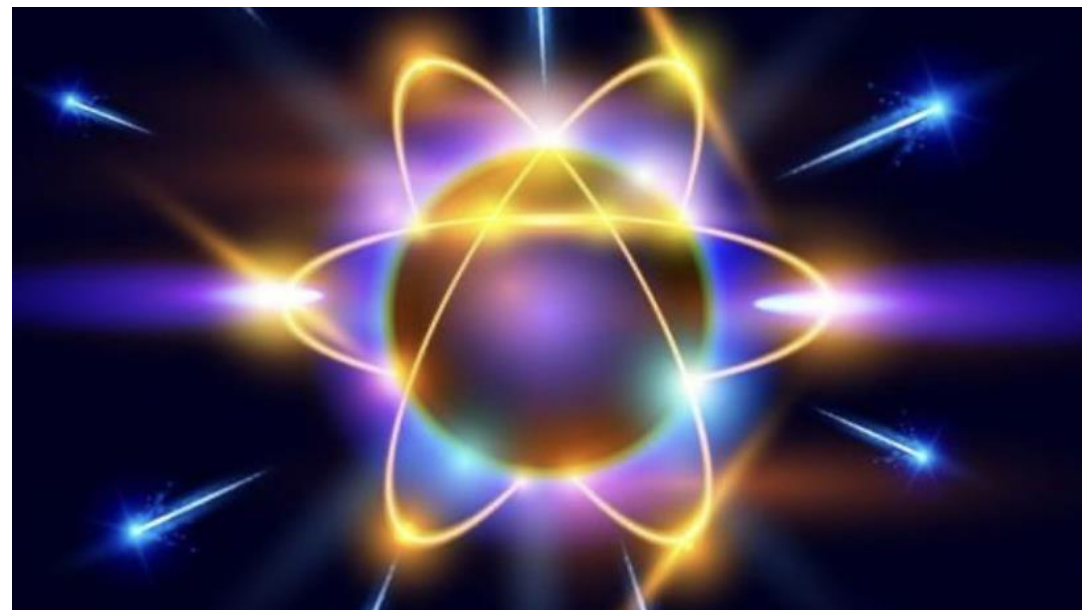
- **1939 – 1941:** Nemecko začína ako prvé, nasledované UK a USA. Japonsko a Sovietsky zväz sa pridávajú v 1941, ale ich programy sú spočiatku obmedzené.
- **1942 – 1945:** Najväčšia paralelná aktivita – Nemecko, Japonsko, USA, UK a Kanada spolupracujú (UK a Kanada v rámci Manhattanu). Sovietsky zväz začína špionáž, ale jeho hlavný program štartuje až po vojne.
- **Po 1945:** USA a UK pokračujú v spolupráci, Sovietsky zväz dobieha a testuje bombu v 1949. Nemecko a Japonsko končia prehrou vo vojne.

Nemecko a Japonsko zaostali, zatiaľ čo USA (s UK a Kanadou) uspeli ako prví. Sovietsky zväz využil špionáž na rýchly pokrok po vojne.

Programy vývoja jadrových zbraní

Porovnávacia tabuľka: Politické rozhodnutia o vývoji jadrovej bomby

Krajina	Dátum	Politici	Vedci	Kontext	Výsledok
Nemecko	September 1939	Reichsforschungsrat, Heereswaffenamt	Heisenberg, Diebner	Založenie Uranvereinu po začiatku vojny; výskum vojenského potenciálu štiepenia.	Program stagnoval; zameranie na reaktory, nie bomby.
Japonsko	Apríl 1941	Generál Yasuda Takeo	Yoshio Nishina	Armáda zadala program Ni-Go v očakávaní vojny s USA.	Oba programy (Ni-Go, F-Go) zlyhali kvôli nedostatku zdrojov.
Spojené kráľovstvo	Júl 1941	Winston Churchill, MAUD výbor	Frisch, Peierls, Chadwick	Schválenie správy MAUD; začatie Tube Alloys.	Integrácia do Manhattan Project po Dohode z Quebecu.
USA	9. október 1941	Franklin D. Roosevelt, Vannevar Bush	Robert Oppenheimer, Enrico Fermi a iní	Roosevelt schválil urýchlený vývoj po správe MAUD a obavách z Nemecka.	Spustenie Manhattan Project; úspešný test Trinity (16. júl 1945).



Programy vývoja jadrových zbraní

1. Nemecko (German Nuclear Energy Project)

- **Úspešnosť:** Neúspešný
- **Výsledok:** Nemecko nevyrobilo funkčnú jadrovú zbraň ani reaktor schopný udržať reťazovú reakciu.
- **Dôvody neúspechu:**
 - **Organizačný chaos:** Program (*Uranverein*) trpel roztrieštenosťou – viacero tímov (Heisenberg, Diebner) pracovalo oddelene bez jasnej koordinácie.
 - **Nedostatok zdrojov:** Vojsko odčerpávala urán, ťažkú vodu (zničenú sabotážami v Nórsku) a financie na iné priority (napr. rakety V-2).
 - **Stratégia:** Hitler a vedenie uprednostňovali krátkodobé zbrane pred dlhodobým výskumom. Heisenberg navyše veril, že bomba je príliš komplikovaná na rýchle dokončenie.
 - **Sabotáže:** Spojenecké operácie (napr. útoky na Vemork) narušili zásoby ťažkej vody.
- **Najbližší pokrok:** Experimentálny reaktor v Haigerlochu (1945) bol blízko kritickej hmoty, ale vojna skončila skôr.

Programy vývoja jadrových zbraní



2. Spojené kráľovstvo (Tube Alloys)

- **Úspešnosť:** Čiastočne úspešný
- **Výsledok:** UK nevyrobilo vlastnú bombu počas vojny, ale výrazne prispelo k úspechu Manhattan Projectu. Samostatnú bombu otestovalo až v roku 1952 (*Operation Hurricane*).
- **Dôvody:**
 - **Spolupráca:** Po Québeckskej dohode (1943) sa *Tube Alloys* spojilo s USA, čím UK stratilo samostatnosť, ale získalo prístup k výsledkom. Vedci ako Frisch a Peierls boli kľúčoví pre teoretický základ.
 - **Obmedzené zdroje:** Británia čelila vojnovému vyčerpaniu a nemala kapacitu na samostatný program.
 - **Úspech po vojne:** Po roku 1945, keď USA obmedzili spoluprácu (McMahon Act), UK pod Attleem vyvinulo vlastnú zbraň.
- **Hodnotenie:** Ako samostatný program neúspech, ale v aliancii s USA veľký prínos.

Programy vývoja jadrových zbraní



3. Japonsko (Japanese Nuclear Weapons Program)

- **Úspešnosť:** Neúspešný
- **Výsledok:** Japonsko nedosiahlo ani laboratórnu fázu jadrovej zbrane.
- **Dôvody neúspechu:**
 - **Nedostatok materiálov:** Japonsko malo obmedzený prístup k uránu (väčšinu dovážalo z Kórey) a nemalo zdroje na obohacovanie.
 - **Technologické zaostávanie:** Programy *Ni-Go* (armáda) a *F-Go* (námorníctvo) boli roztrieštené a chýbala im infraštruktúra (napr. cyklotrón Nishinu bol zničený spojencami).
 - **Vojnový tlak:** Bombardovanie a strata území (1944–1945) znemožnili pokrok.
- **Najbližší pokrok:** Nishina separoval malé množstvo U-235, ale bolo to ďaleko od bomby.

Programy vývoja jadrových zbraní



4. Sovietsky zväz (Soviet Atomic Bomb Project)

- **Úspešnosť:** Úspešný (po vojne)
- **Výsledok:** Sovietsky zväz otestoval prvú jadrovú bombu (*RDS-1*) 29. augusta 1949, čím sa stal druhou jadrovou mocnosťou.
- **Dôvody úspechu:**
 - **Špionáž:** Informácie od Klausa Fuchsa a ďalších z Manhattan Projectu urýchlili vývoj (napr. dizajn implózne bomby).
 - **Zdroje:** Po vojne Sovietsky zväz získal urán z východnej Európy a mobilizoval obrovské ľudské a materiálne zdroje pod Beriaovým vedením.
 - **Oneskorenie:** Počas vojny (1941–1945) bol program minimálny kvôli nacistickej invázii; plná aktivita začala až po Hirošime.
- **Hodnotenie:** Počas vojny neúspešný, ale povojnový úspech z neho urobil globálnu mocnosť.



Arnold Deutsch
“Otto”, “Stefan Lang”,

Edita Šušická



The Last
Cambridge
Spy JOHN
CAIRNCROSS,
BLETCHLEY PARK MOLE
AND SOVIET AGENT

Programy vývoja jadrových zbraní



5. USA (Manhattan Project)

- **Úspešnosť:** Úplne úspešný
- **Výsledok:** USA vyrobilo a použilo prvé jadrové zbrane – *Little Boy* (Hirošima, 6. augusta 1945) a *Fat Man* (Nagasaki, 9. augusta 1945).
- **Dôvody úspechu:**
 - **Masívne zdroje:** Investície (2 miliardy USD), tisíce vedcov (Fermi, Oppenheimer) a priemyselné kapacity (Oak Ridge, Hanford).
 - **Spolupráca:** Integrácia britských a kanadských vedcov a technológií (napr. ťažká voda z Kanady).
 - **Priorita:** Roosevelt a Groves dali programu najvyššiu prioritu, na rozdiel od Nemecka či Japonska.
- **Hodnotenie:** Jediný program, ktorý uspel počas vojny a rozhodol jej výsledok.

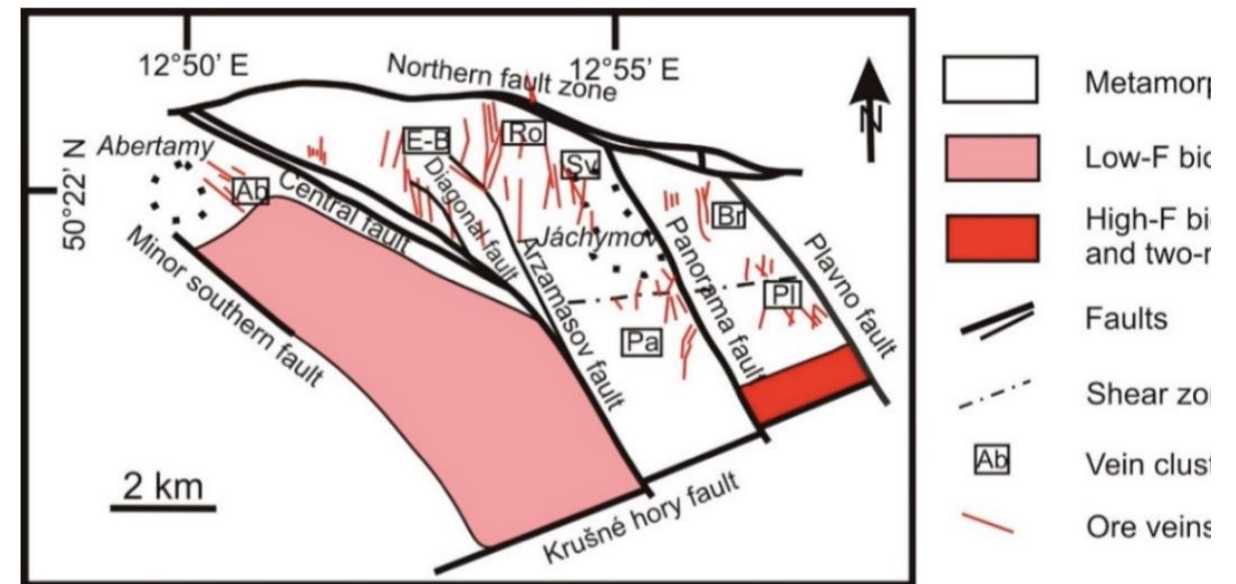
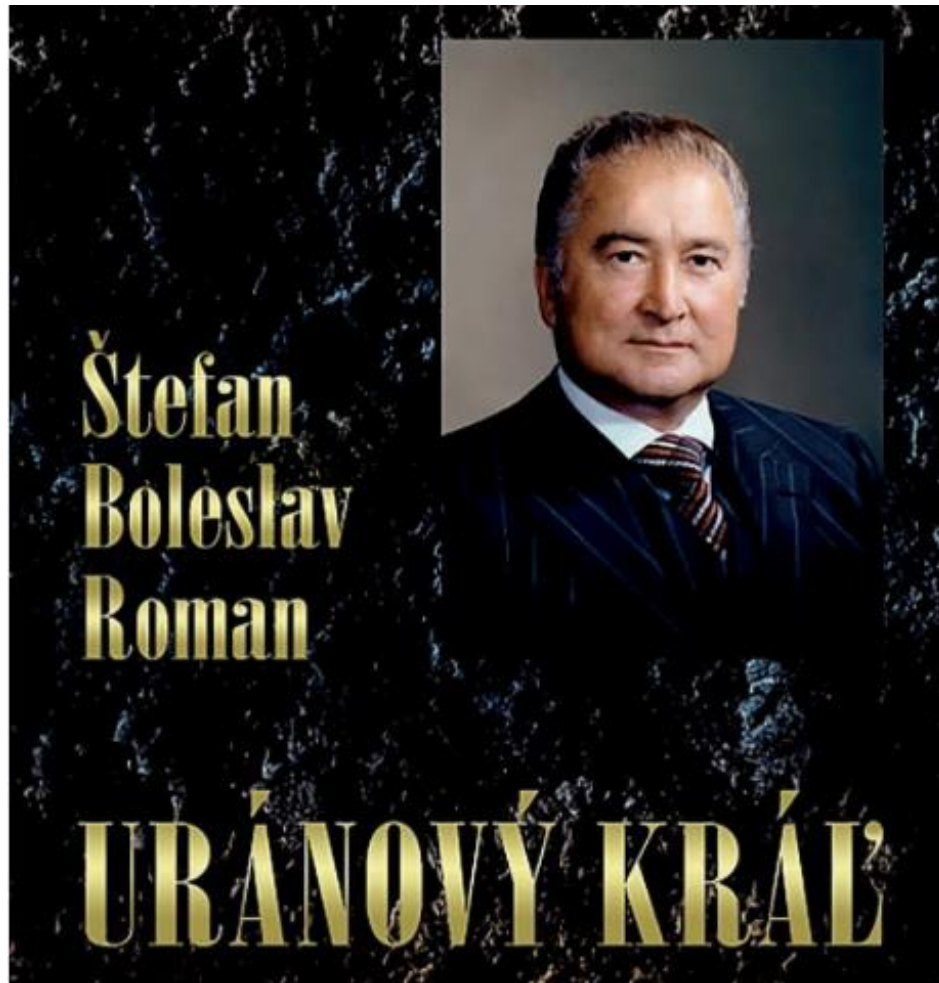
Programy vývoja jadrových zbraní



6. Kanada (spolupráca na Manhattan Project)

- **Úspešnosť:** Úspešný ako partner
- **Výsledok:** Kanada nevyvíjala vlastnú zbraň, ale jej príspevok k Manhattan Projectu bol kľúčový (urán, ťažká voda, laboratóriá).
- **Dôvody:**
 - **Podpora:** Kanada poskytla suroviny (urán z bane Eldorado) a výskumné zariadenia (Chalk River), ale nemala ambíciu na samostatnú bombu.
 - **Spolupráca:** Úzka väzba s USA a UK cez Québecsku dohodu.
- **Hodnotenie:** Úspech v rámci aliančného úsilia, nie ako samostatný hráč.

Urán pre Američanov od Slováka, ale aj pre Sovietov z Československa



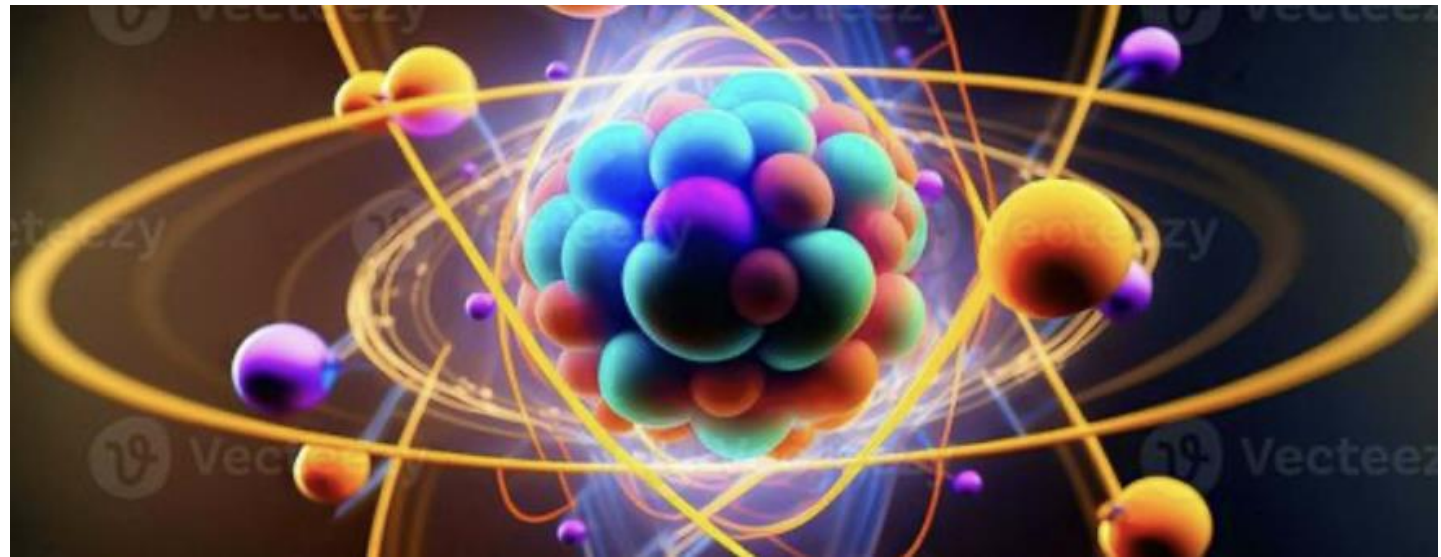
Ab - Abertamy, E - B - Eva-Barbora, Ro - Rovnost-Eliáš-Eduard,

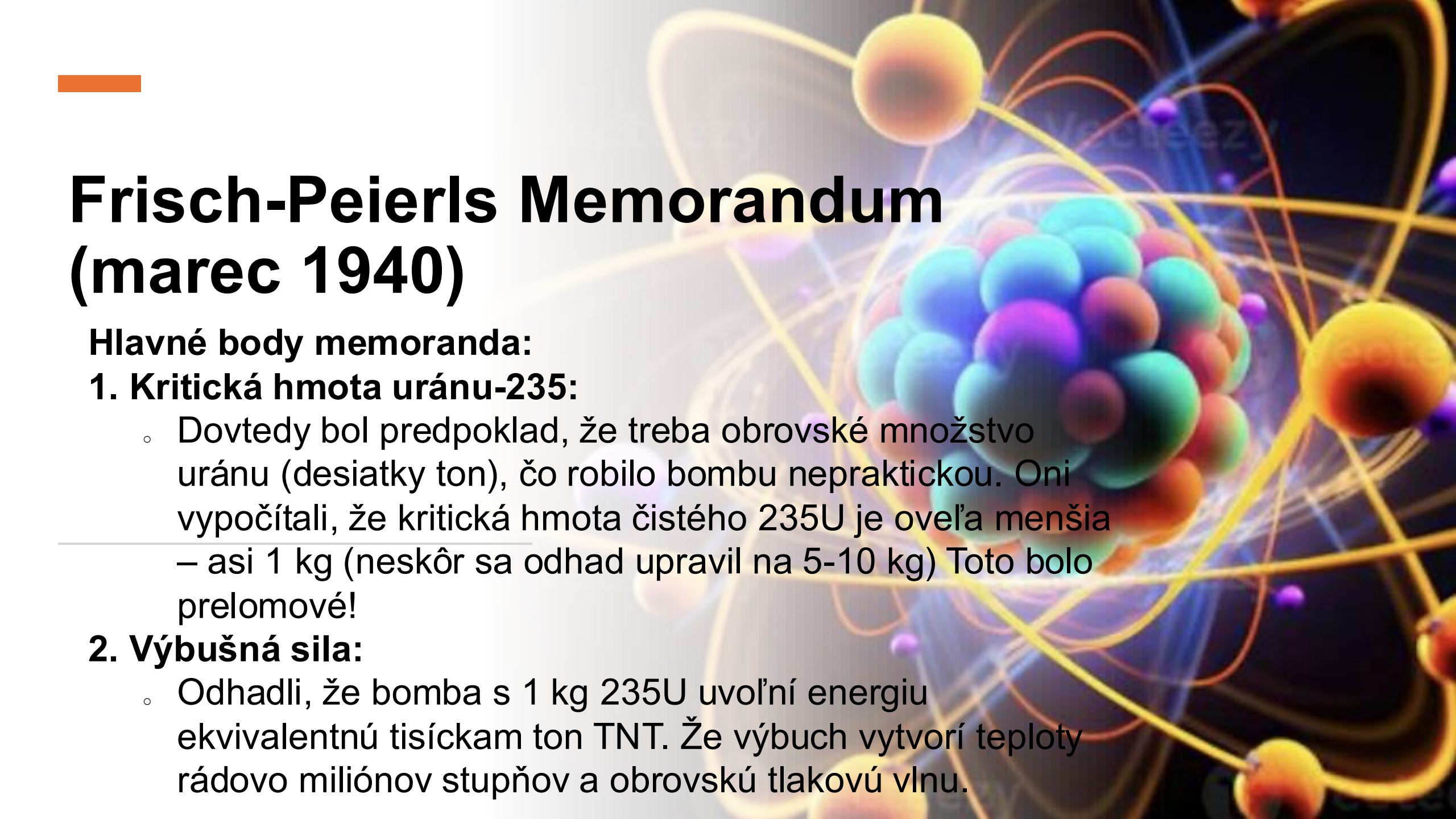
Sv - Svornost, Pa - Panoráma, Br - Bratrství, Pl - Plavno

Figure 3. Schematic geological map of the Jáchymov uranium district (modified from Komí

Skutočný reálny impulz na vývoj jadrovej bomby

- Bolo Memorandum adresované Henrymu Tizardovi, vedeckému poradcovi britskej vlády, a odovzdané cez ich šéfa Marka Oliphanta.
- **Vedci Frisch a Peierls** ho písali v tajnosti, mimo oficiálnych kanálov, čo ukazuje ich osobnú iniciatívu.





Frisch-Peierls Memorandum (marec 1940)

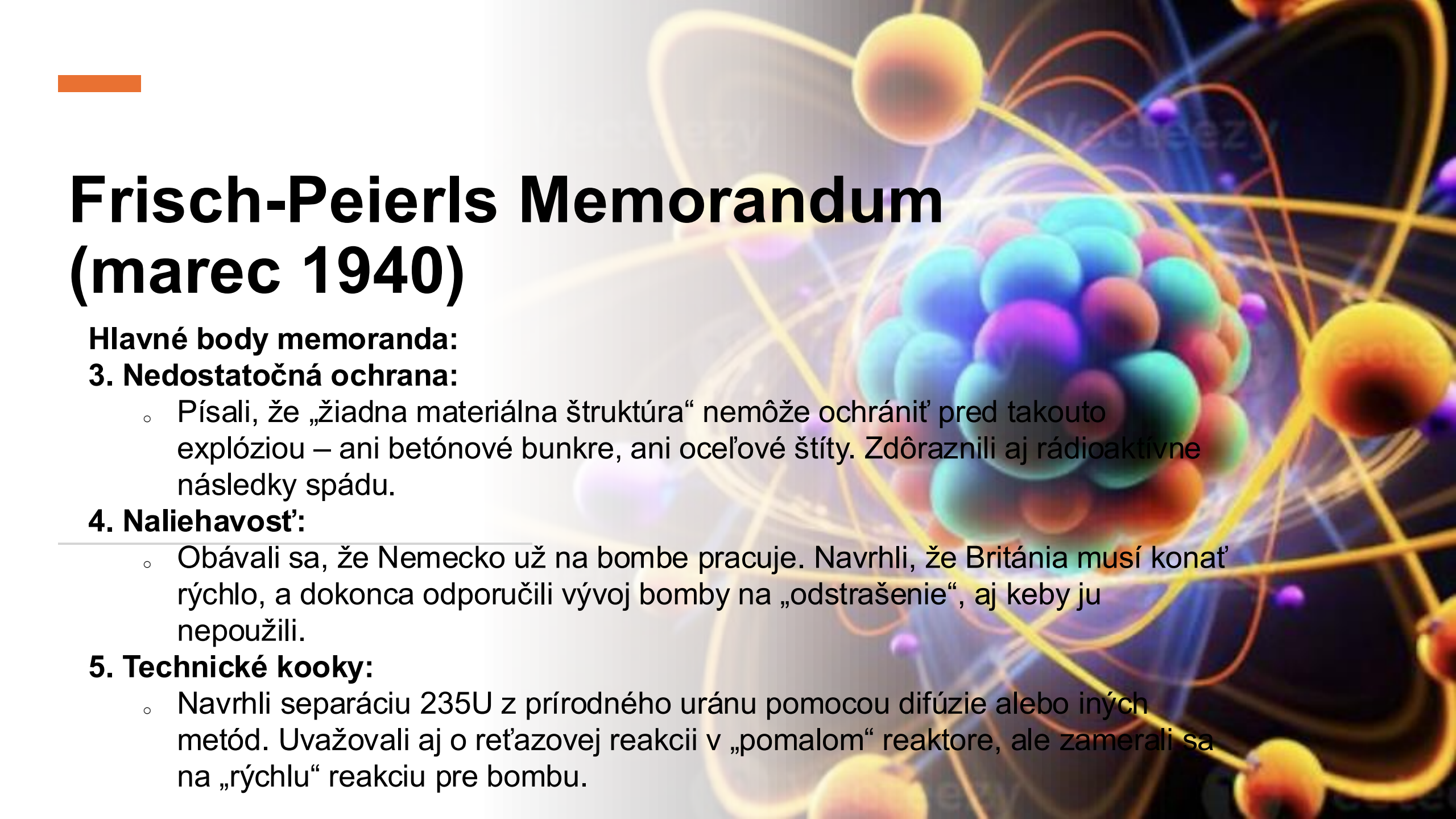
Hlavné body memoranda:

1. Kritická hmota uránu-235:

- Dovtedy bol predpoklad, že treba obrovské množstvo uránu (desiatky ton), čo robilo bombu nepraktickou. Oni vypočítali, že kritická hmota čistého ^{235}U je oveľa menšia – asi 1 kg (neskôr sa odhad upravil na 5-10 kg) Toto bolo prelomové!

2. Výbušná sila:

- Odhadli, že bomba s 1 kg ^{235}U uvoľní energiu ekvivalentnú tisíckam ton TNT. Že výbuch vytvorí teploty rádovo miliónov stupňov a obrovskú tlakovú vlnu.



Frisch-Peierls Memorandum (marec 1940)

Hlavné body memoranda:

3. Nedostatočná ochrana:

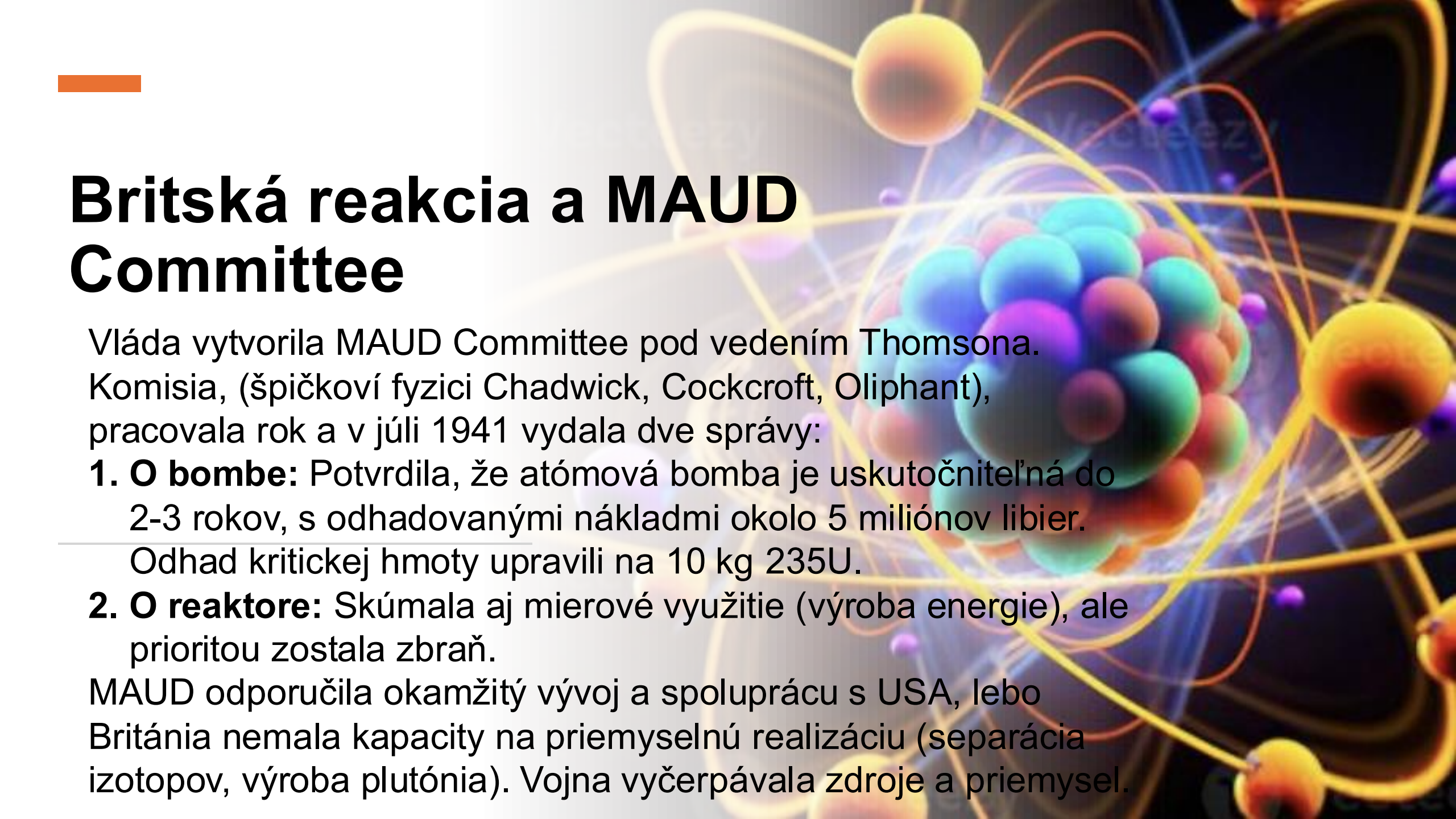
- Písali, že „žiadna materiálna štruktúra“ nemôže ochrániť pred takouto explóziou – ani betónové bunkre, ani oceľové štíty. Zdôraznili aj rádioaktívne následky spádu.

4. Naliehavosť:

- Obávali sa, že Nemecko už na bombe pracuje. Navrhli, že Británia musí konať rýchlo, a dokonca odporučili vývoj bomby na „odstrašenie“, aj keby ju nepoužili.

5. Technické kooky:

- Navrhli separáciu ^{235}U z prírodného uránu pomocou difúzie alebo iných metód. Uvažovali aj o reťazovej reakcii v „pomalom“ reaktore, ale zamerali sa na „rýchlu“ reakciu pre bombu.



Britská reakcia a MAUD Committee

Vláda vytvorila MAUD Committee pod vedením Thomsona. Komisia, (špičkoví fyzici Chadwick, Cockcroft, Oliphant), pracovala rok a v júli 1941 vydala dve správy:

- 1. O bombe:** Potvrdila, že atómová bomba je uskutočniteľná do 2-3 rokov, s odhadovanými nákladmi okolo 5 miliónov libier.
Odhad kritickej hmoty upravili na 10 kg ^{235}U .
- 2. O reaktore:** Skúmala aj mierové využitie (výroba energie), ale prioritou zostala zbraň.

MAUD odporučila okamžitý vývoj a spoluprácu s USA, lebo Británia nemala kapacity na priemyselnú realizáciu (separácia izotopov, výroba plutónia). Vojna vyčerpávala zdroje a priemysel.



Britské rokovania s americkými vedcami

Briti vedeli, že sami bombu nevyrobia, a tak začali tlačiť na USA.

1. Tizardova misia (september 1940):

- Primárne bola o radaroch (magnetron), ale otvorila vedeckú výmenu s USA. Jadrové detaily ešte neboli hlavnou témou, ale položila základ pre budúcu spoluprácu. Američania dostali prvé náznaky britského pokroku.



Britské rokovania s americkými vedcami

2. Prvé kontakty (1940-1941):

- MAUD Committee poslala svoje zistenia cez Jamesa Chadwicka a Johna Cockcrofta americkým kolegom, ako Enrico Fermi a Leo Szilárd, no reakcia bola vlažná.
- USA mali Uranium Committee pod Lymanom Briggsom, ale ten bol pomalý a skeptický – správy MAUD dokonca zamkol do trezora bez širšej diskusie.

Britské rokovania s americkými vedcami

3. Oliphantova intervencia (august 1941):

- **Mark Oliphant**, frustrovaný americkou nečinnosťou, odletel do USA, kde sa stretol s Ernestom Lawrence (vynálezca cyklotrónu) a Haroldom Ureym (expert na separáciu izotopov). Lawrenceovi ukázal MAUD správu a zdôraznil, že bomba je reálna a urgentná a presvedčil ho, aby loboval u vlády. Ten posunul správu Vannevarovi Bushovi, šéfovi Office of Scientific Research and Development.



Britské rokovania s americkými vedcami

4. Bush a Roosevelt (október 1941):

- Bush, ovplyvnený Oliphantom a MAUD, 9. októbra 1941 informoval prezidenta Roosevelta.
- Navrhol urýchlený program a spoluprácu s Britmi.
- Roosevelt súhlasil a zriadil Top Policy Group, čím sa začal reálny pohyb k Manhattanskému projektu.



Britské rokovania s americkými vedcami

5. Pearl Harbor a akcelerácia (december 1941):

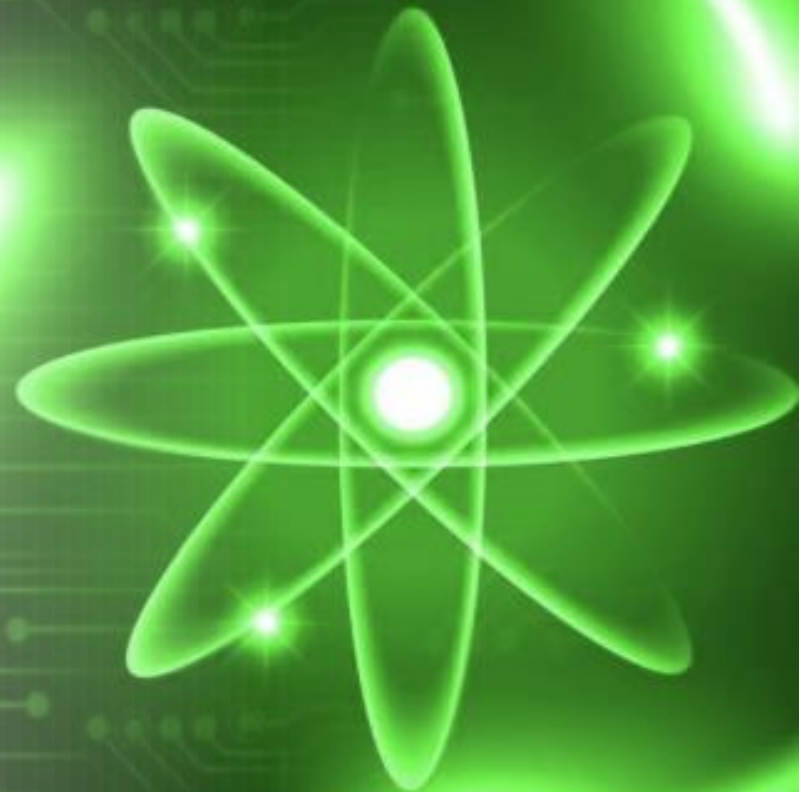
- Po útoku na Pearl Harbor sa USA zapojili do vojny, čo dramaticky zmenilo ich postoj. Britské poznatky už neboli len teóriou – stali sa základom pre praktický plán.
- V júni 1942 vznikol Manhattan pod Grovesom, a Briti sa neskôr pripojili (Dohoda z Quebecu, 1943).



Čo potrebujeme k zostrojeniu jadrovej zbrane?

Odpoveď je jednoduchá, realizácia zložitá!

- **Štiepny materiál** (napr. obohatený urán-235 alebo plutónium-239),
- Odborné **znalosti z jadrovej fyziky a chémie**,
- Pokročilé technológie na spracovanie materiálu a konštrukciu,
- **A hlavne peniaze (teda politické rozhodnutie)** na to aby sme získali to predošlé.

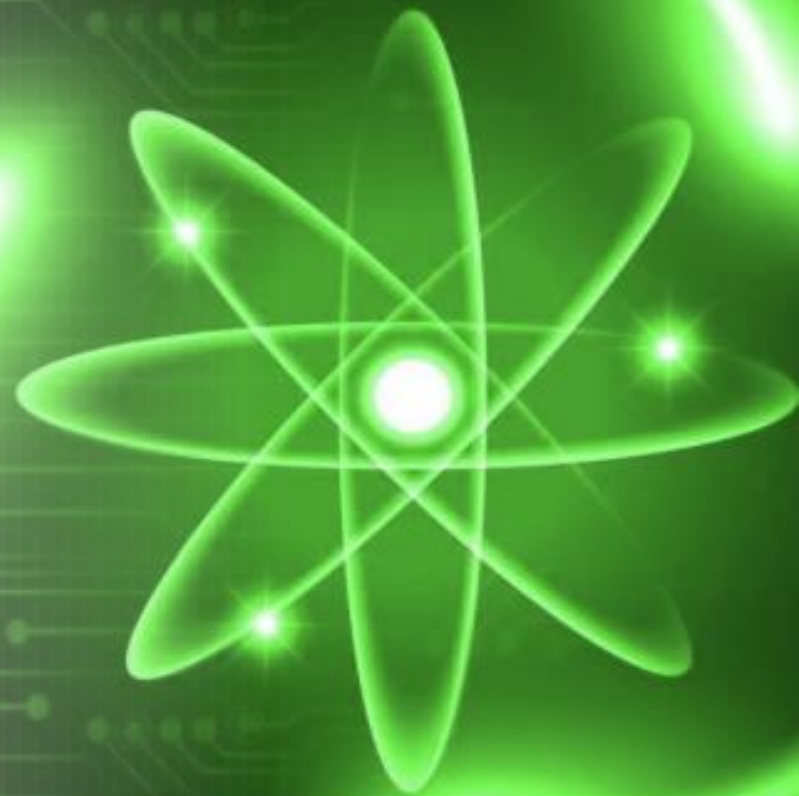


Čo potrebujeme k zostrojeniu jadrovej zbrane?

Materiály jadrových zbraní

Plutónium-239 aj Urán-235 sa používali ako základné jadrové výbušniny v štiepnych zbraniach.

Až približne 90 percent úsilia vynaloženého na výrobu prvých amerických bômb bolo venovaných výrobe týchto dvoch materiálov, čo nebola vôbec ľahká úloha, (a nie je ani dnes).



Čo potrebujeme k zostrojeniu jadrovej zbrane?

Materiály jadrových zbraní – Urán-235

- **15 kilogramov:** hmotnosť pevnej gule zo 100 percent **uránu-235** je dostatočne veľká na to, aby sa dosiahla kritická hmotnosť **s berýliovým reflektorom**. Priemer takejto gule: 11,4 cm. Priemer regulačnej softbalovej lopty: 9,7 cm.
- **50 kilogramov:** hmotnosť pevnej gule zo 100 percent **uránu-235** je dostatočne veľká na dosiahnutie kritickej hmotnosti **bez reflektora**. Priemer takejto gule: 17,2 cm, porovnateľný s priemerným „medovicovým“ melónom.
- 60 kilogramov: cca množstvo použité pri bombe v Hirošime „Little Boy“.

Čo potrebujeme k zostrojeniu jadrovej zbrane?

Materiály jadrových zbraní – Plutónium-239

- **4 kilogramy:** hmotnosť pevnej gule **plutónia** dostatočne veľká na dosiahnutie kritickej hmotnosti **s berýliovým reflektorom**. Priemer takejto gule: 7,28 cm. Priemer regulačnej baseballovej lopty: 7,36 cm.
- 4,4 kilogramu: odhadované množstvo použité v izraelských štiepných bombách.
- **5 kilogramov Pu:** odhadované množstvo potrebné na dnešnú výrobu štiepnej bomby prvej generácie.

Čo potrebujeme k zostrojeniu jadrovej zbrane?

Materiály jadrových zbraní – Plutónium-239

- 6,1 kilogramu: množstvo použité pri teste „Trinity“ v roku 1945 a pri bombe zhodenej na Nagasaki.
- **15 kilogramov Pu**: hmotnosť pevnej gule plutónia dostatočne veľká na dosiahnutie kritickej hmotnosti **bez reflektora**. Priemer takejto gule: 11,3 cm. Priemer regulačnej softbalovej lopty: 9,7 cm.



Čo potrebujeme k zostrojeniu jadrovej zbrane?

Materiály jadrových zbraní – Plutónium-vyrobené rôznymi reaktormi

- 5,5 až 8 kilogramov/rok: Severokórejský 20-30 MW (tepelný) reaktor Yongbyon moderovaný grafitom.
- 9 kilogramov/rok: Indický 40 MW (tepelný) reaktor Cirus moderovaný ťažkou vodou.
- 12 kilogramov/rok: Pakistanský 50 MW (tepelný) reaktor Khushab moderovaný ťažkou vodou.



Čo potrebujeme k zostrojeniu jadrovej zbrane?

Materiály jadrových zbraní – Plutónium-vyrobené rôznymi reaktormi

- 25 kilogramov/rok: Indický 100 MW (tepelný) reaktor Dhruva moderovaný ťažkou vodou.
- 40 kilogramov/rok: Izraelský viac ako 100 MW (tepelný) reaktor Dimona moderovaný ťažkou vodou.
- 230 kilogramov/rok: Iránsky 1 GW (elektrický) reaktor Búšehr je zásobovaný Ruskom a moderovaný obyčajnou (ľahkou) vodou (ešte nie je v prevádzke).



Čo potrebujeme k zostrojeniu jadrovej zbrane?

Dizajn a výroba zbraní

Špeciálne vybrané komponenty a vybavenie:

- Odpaľovacie súpravy: obsahujúce vysoko energetické, nízko impedančné kondenzátorové banky a vysoko prúdové, vysokorýchlostné spínače (tyratróny, krytróny, sprytróny).
- Trhaviny: látky alebo zmesi známe ako HMX, RDX, TATB, HNS.
- Vysokorýchlostné záznamové zariadenia (osciloskopy, streak kamery) a vysokorýchlostné fotografie, bleskové röntgenové lúče a mechanicko-elektronická diagnostika, ako sú pin-dome.

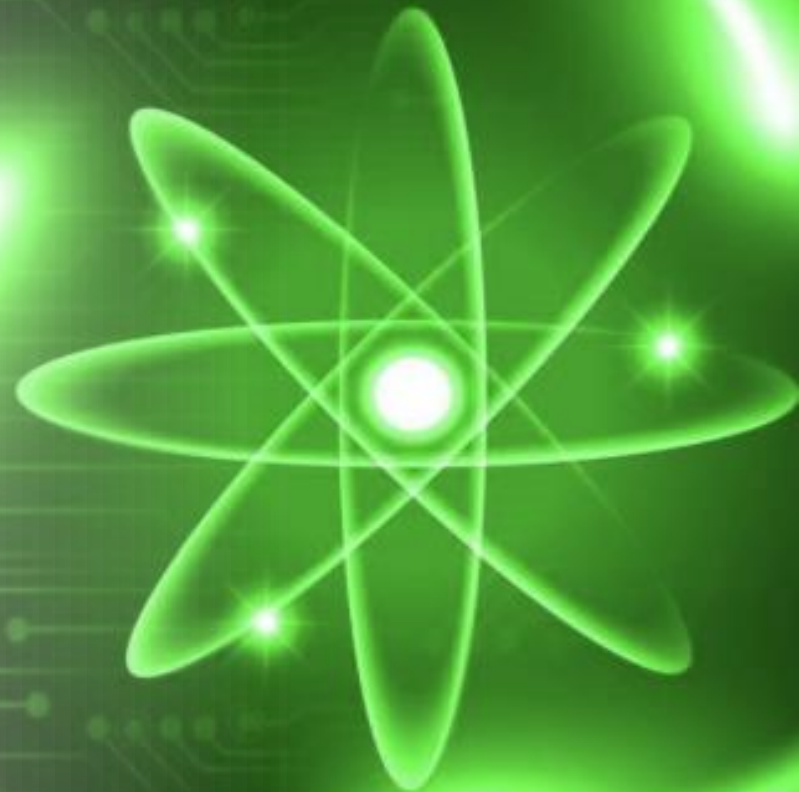


Čo potrebujeme k zostrojeniu jadrovej zbrane?

Dizajn a výroba zbraní

Špeciálne vybrané komponenty a vybavenie:

- Materiál reflektora, ako je berýlium a jeho zliatiny.
- Vákuové pece na odlievanie uránu a plutónia.
- Neutrónové generátory.

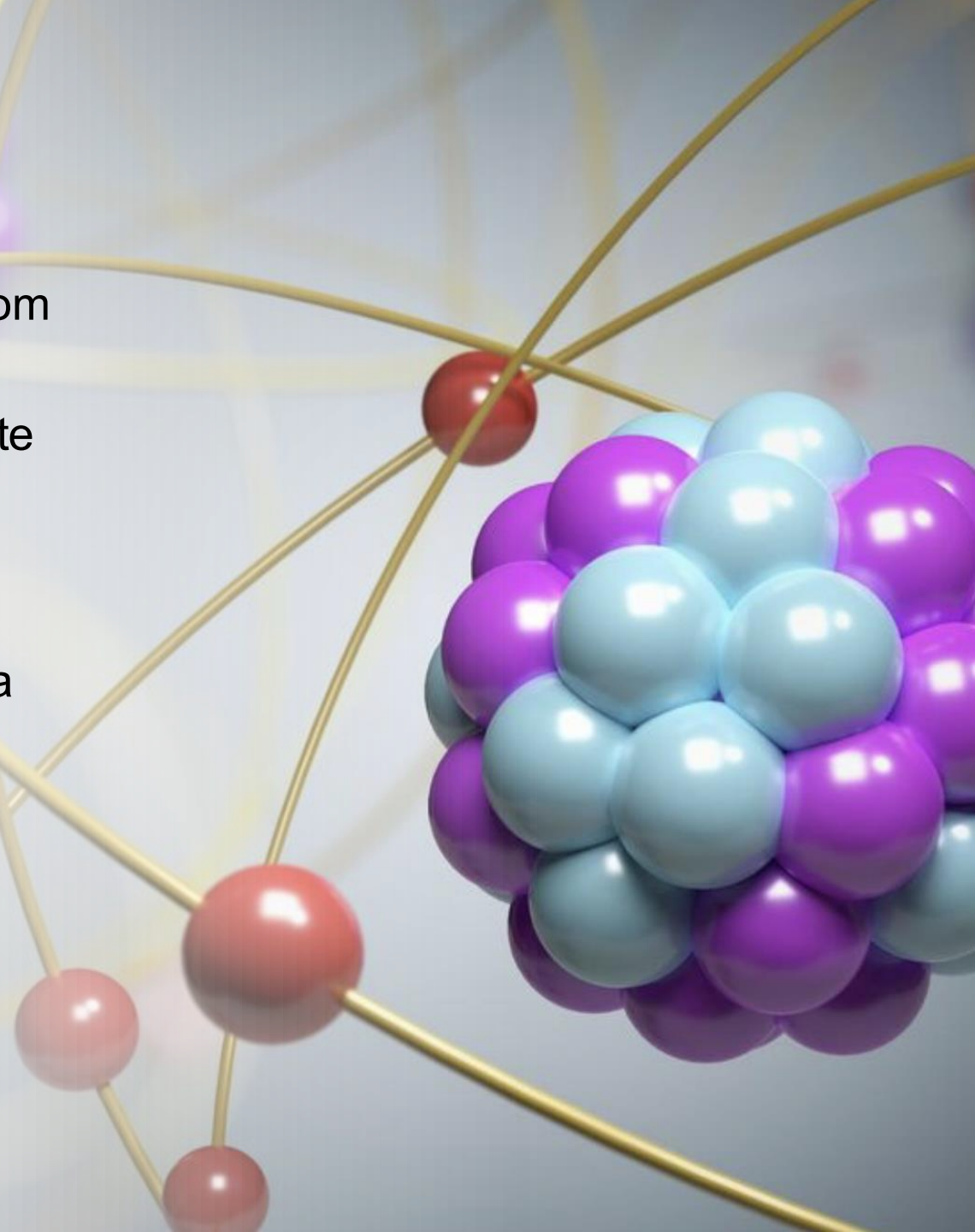


Technológie pre jadrové zbrane

- **Konverzia uránu** na UF_6 na oxid uránu (U_3O_8) a potom na tetrafluorid uránu (UF_4) pomocou fluoridácie a potom premenu UF_4 na hexafluorid uránu (UF_6) reakciou s fluórom (F_2) pri vysokých teplotách a pretože je pri teplote $56,5\text{ }^\circ\text{C}$ aj chemicky stabilný, je ideálny pre difúznu separáciu.
- Prvé kilá UF_6 boli vyrobené v lete 1942 a dodané na testovanie.
- **Výroba kovového uránu** – ako palivo v reaktoroch na výrobu plutónia a ako materiál pre výskum štiepenia.

Prvá priemyselná výroba kovového U na vojenské účely začala v roku 1943).

Používal sa tzv. Amesov proces, - redukcia uránového tetrafluoridu (UF_4) horčíkom za vysokých teplôt v špeciálnych peciach.



Technológie pre jadrové zbrane

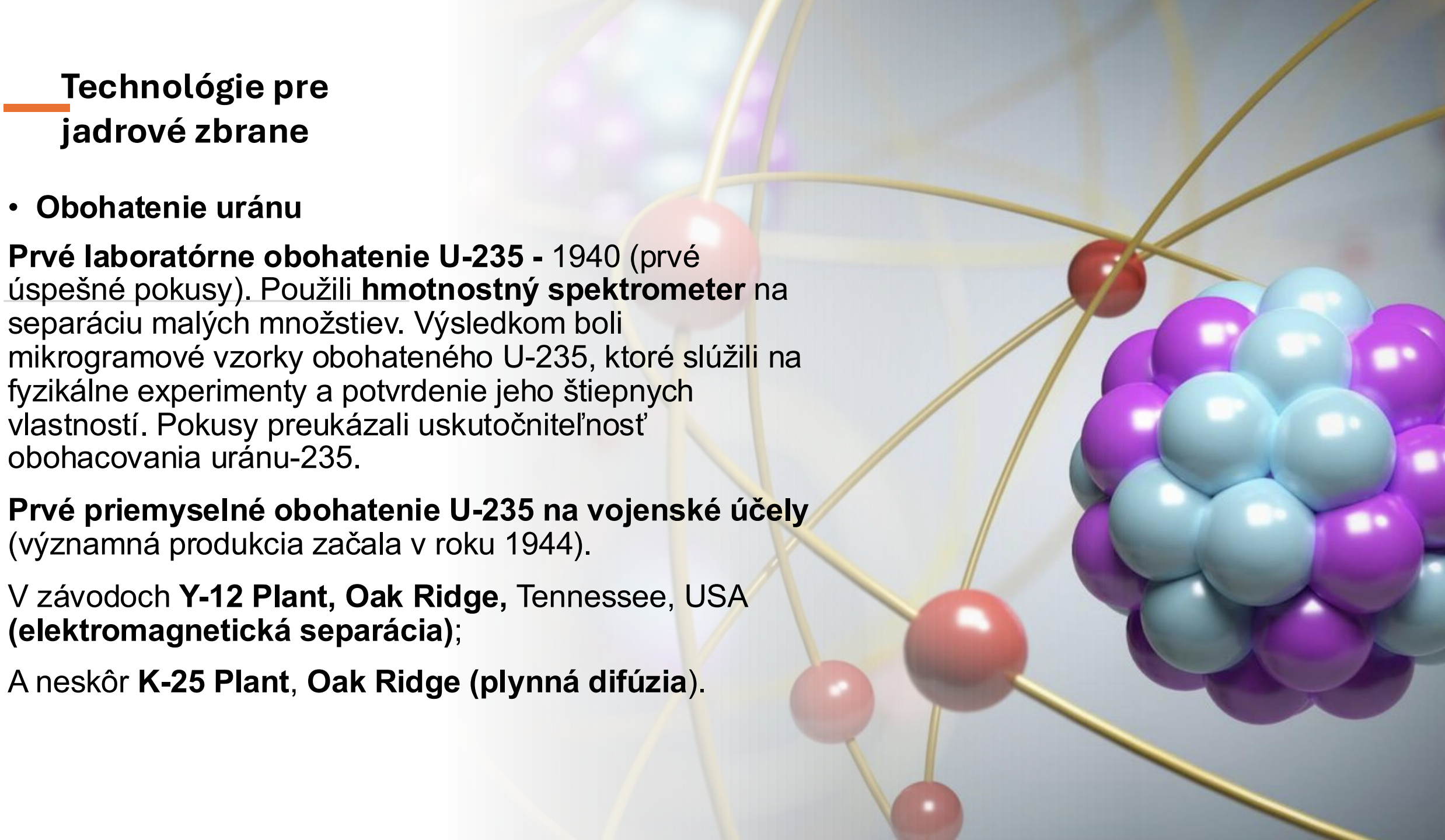
- **Obohatenie uránu**

Prvé laboratórne obohatenie U-235 - 1940 (prvé úspešné pokusy). Použili **hmotnostný spektrometer** na separáciu malých množstiev. Výsledkom boli mikrogramové vzorky obohateného U-235, ktoré slúžili na fyzikálne experimenty a potvrdenie jeho štiepnych vlastností. Pokusy preukázali uskutočniteľnosť obohacovania uránu-235.

Prvé priemyselné obohatenie U-235 na vojenské účely (významná produkcia začala v roku 1944).

V závodoch **Y-12 Plant, Oak Ridge, Tennessee, USA** (**elektromagnetická separácia**);

A neskôr **K-25 Plant, Oak Ridge** (**plynná difúzia**).



Technológie pre jadrové zbrane

- Obohatenie uránu
- Difúzny proces K-25 využíval plynnú difúziu na obohacovanie uránu – z 0,72 % na 90 % U-235 cez 4 000 stupňov.
- S-50, taktiež v Oak Ridge, používal kvapalnú tepelnú difúziu na čiastočné obohatenie (do 1 %).
- Y-12 boli kalutróny na elektromagnetickú separáciu (0,72 % → 15 % → 90 %).

K-27, K-29, K-31 a K-33 boli nové difúzne závody:

K-27 (1945) obohacoval na 20 %, K-29 (1951) na 36 %, K-31 (1951) na 60 %, a K-33 (1954) na 90 %, s postupne lepšími membránami a nižšou spotrebou energie.“

„K-27 mal 500 stupňov, K-33 až 2 000, a separačný faktor sa zlepšil z 1,0045 na 1,005. Vylepšenia zahŕňali niklovo-teflónové membrány, efektívnejšie kompresory a automatizáciu v K-33.“



Technológie pre jadrové zbrane

• Výroba Plutónia

Prvá laboratórna výroba plutónia Február–Marec 1941. Pu-238 (neskôr aj Pu-239) vyrobili v cyklotróne. U-238 zachytí neutrón, vznikne U-239, ten podlieha beta rozpadu na Ne-239 a následne na Pu-239. Prvé vzorky v mikrogramových množstvách potvrdili, že Pu-239 je štiepne a vhodné na jadrové zbrane.

Prvá priemyselná výroba plutónia na vojenské účely - začala koncom roka 1944. Pu-239 bolo vyrábané v obrovských jadrových reaktoroch (reaktor B) ožiarením kovového U-238 neutrónmi. Chemicky spracovali na separáciu Pu od ostatných produktov. Boli to zložité chemické separácie (bismut-fosfátový proces), aby získali čisté Pu v kilogramových množstvách. Vyrobené Pu bolo použité na vývoj a výrobu plutóniovej bomby s implóznym dizajnom. Prvé väčšie množstvá plutónia boli použité v bombe „Gadget“ testovanej v Trinity teste (16. júl 1945) a v bombe „Fat Man“ zhodenej na Nagasaki (9. august 1945).



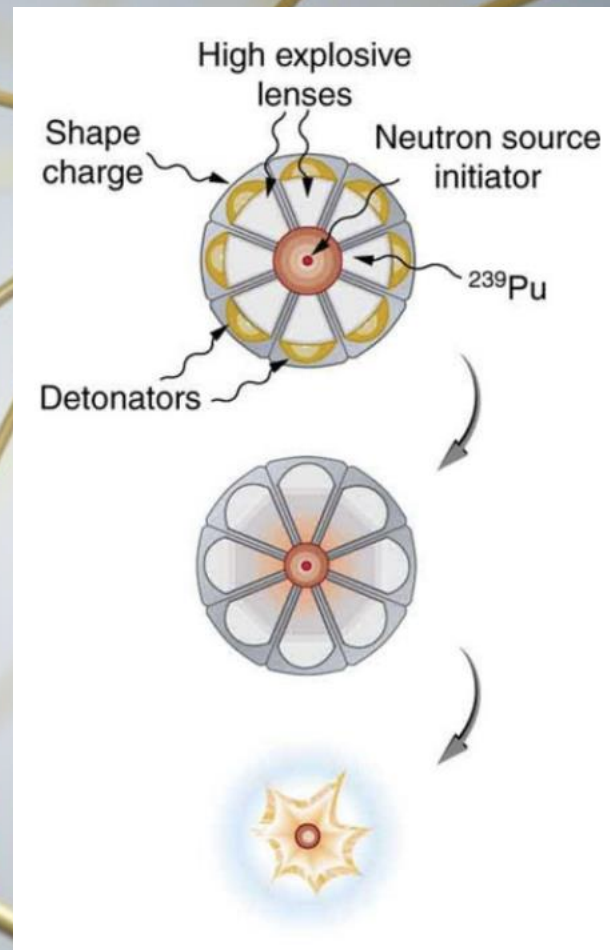
Technológie pre jadrové zbrane

• Implózný Desing

Plutónium je náchylné na predčasnú detonáciu kvôli prítomnosti izotopu Pu-240, ktorý má vysokú spontánnu štiepnu aktivitu (40 štiepení/kg/s oproti 0,7 u U-235).

Implózia vyžaduje symetrické stlačenie jadra pomocou výbušnín („lenses“ – rýchle a pomalé trhaviny) za mikrosekundy. Akékoľvek asymetrie vedú k zlyhaniu.

Ale implózia dokáže kompresiou znížiť objem jadra napríklad o faktor 20–30 (hustota stúpne z $19,8 \text{ g/cm}^3$ na $\sim 500 \text{ g/cm}^3$), čím vylúči predčasnú detonáciu, (stlačí jadro za $1 \mu\text{s}$), čím zníži riziko z 99 % na $< 1 \%$.



Technológie pre jadrové zbrane

- Implózný Desing

- **Lilli Hornig** (1921–2017) – „Špecialistka na výbušné šošovky“. Lilli Horning, sa narodila v Ústí nad Labem v židovskej rodine organického chemika Erwina Schwenka a bývalej pediatričky Rasche Shapirovej. Študovala na Bryn Mawr College a Harvarde (PhD, 1950). Jej otec bol chemik, ktorý emigroval pred nacistami.
- Rola v Projekte Manhattan: Od roku 1944 pracovala v Los Alamos so svojím manželom Donaldom Hornigom. Zameriavala sa na dizajn vysoko explozívnych tvarovaných náloží a šošoviek, ktoré obklopovali jadro „Fat Man“. Tieto šošovky boli kľúčové pre symetrickú implóziu.



Hornig's Los Alamos ID photo, c. 1944

rn

Lilli Schwenk

Czech: *Lilli Schwenková*

Americký program jadrových zbraní - **Manhattan**



Albert Einstein and Leo Szilard

Albert Einstein
Old Grove Rd.
Nassau Point
Peconic, Long Island

August 2nd, 1939

F.D. Roosevelt,
President of the United States,
White House
Washington, D.C.

Sir:

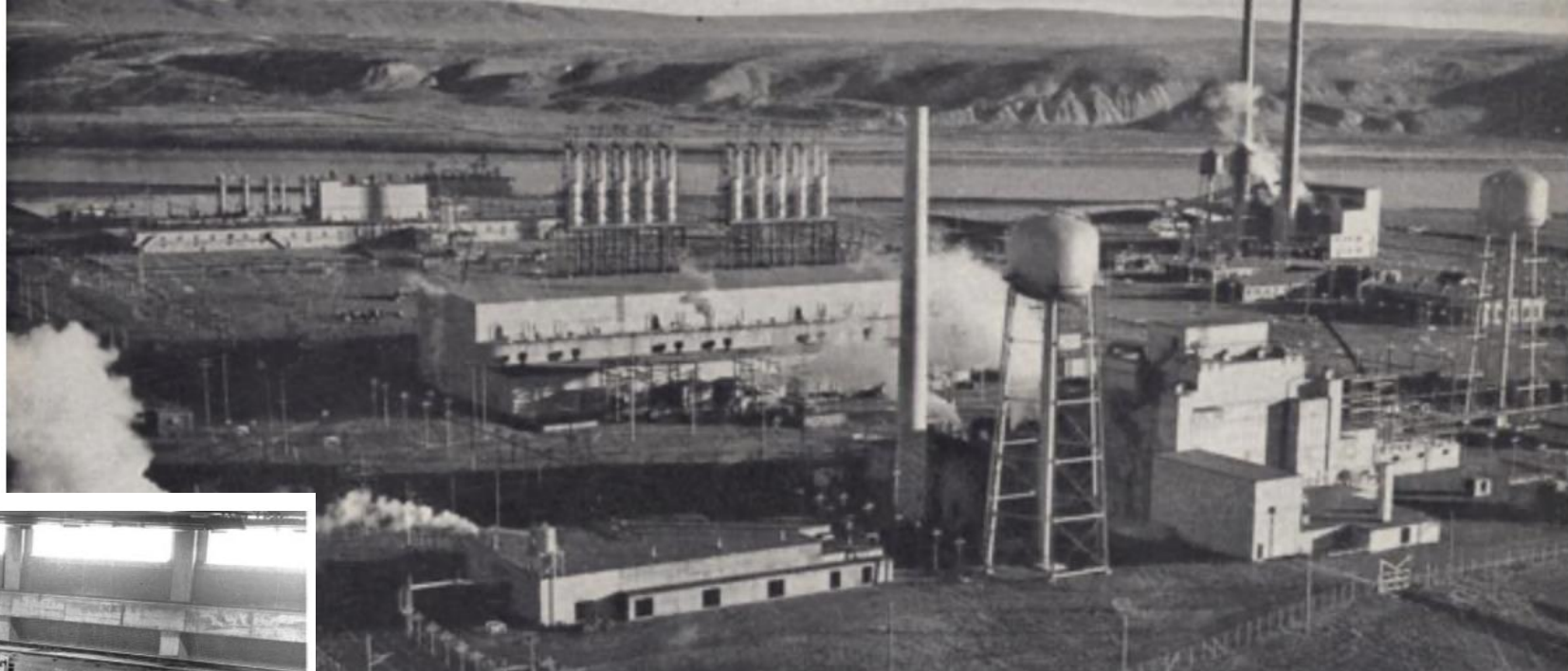
Some recent work by E. Fermi and L. Szilard, which has been communicated to me in manuscript, leads me to expect that the element uranium may be turned into a new and important source of energy in the immediate future. Certain aspects of the situation which has arisen seem to call for watchfulness and, if necessary, quick action on the part of the Administration. I believe therefore that it is my duty to bring to your attention the following facts and recommendations:

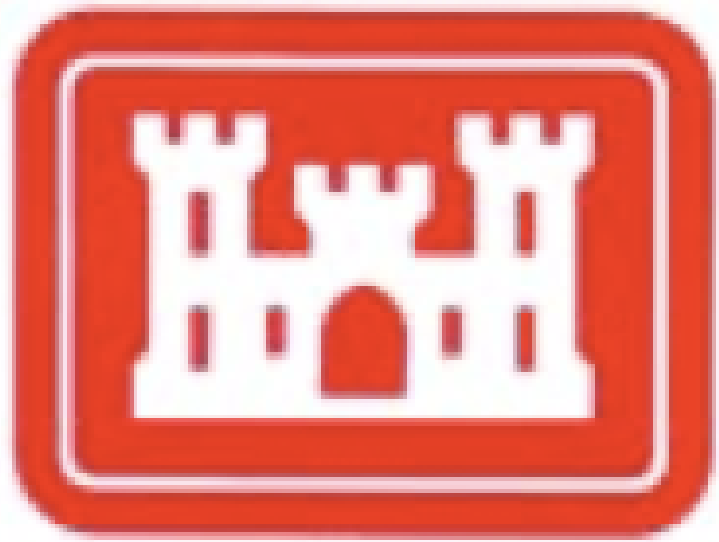
In the course of the last four months it has been made probable - through the work of Joliot in France as well as Fermi and Szilard in America - that it may become possible to set up a nuclear chain reaction in a large mass of uranium, by which vast amounts of power and large quantities of new radium-like elements would be generated. Now it appears almost certain that this could be achieved in the immediate future.

This new phenomenon would also lead to the construction of bombs, and it is conceivable - though much less certain - that extremely powerful bombs of a new type may thus be constructed. A single bomb of this type, carried by boat and exploded in a port, might very well destroy the whole port together with some of the surrounding territory. However, such bombs might very well prove to be too heavy for transportation by air.

ab4a01

Americký program jadrových zbraní - **Manhattan**



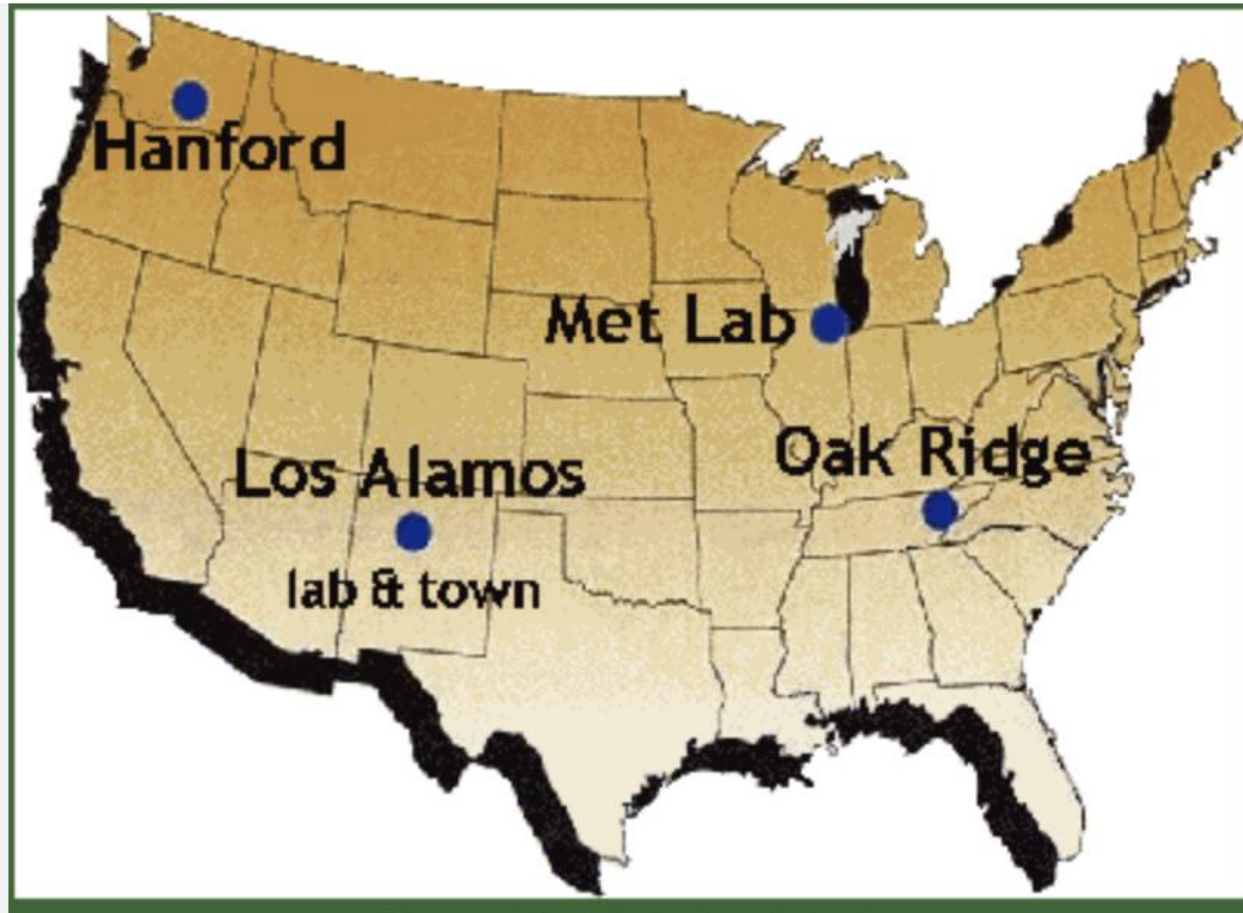


US Army Corps of Engineers®

Ako to
všetko
zvládnuť?

“Army Corps of Engineers”,
- “Zbor inžinierov armády
Spojených štátov” (USACE)

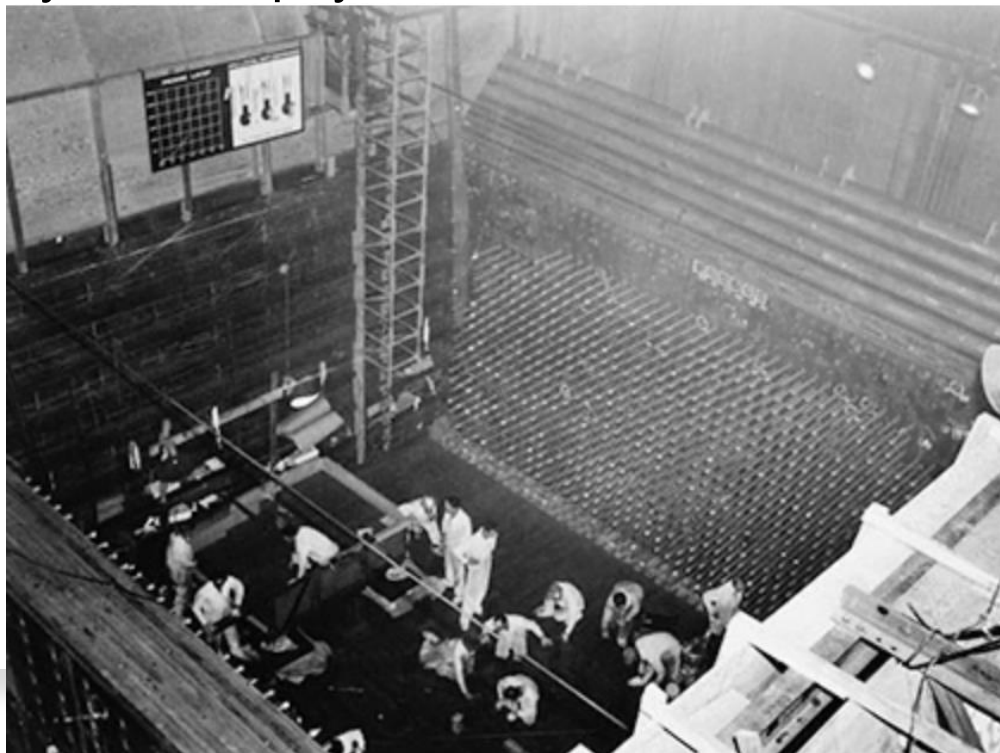
Postavili obrovské zariadenia v Oak Ridge, Hanforde a Los Alamos, koordinovali 225 000 ľudí a umožnili vývoj bômb 'Little Boy' a 'Fat Man' v rekordnom čase.



**US Army Corps
of Engineers®**

Groves riadil projekt s železnou disciplínou, Nichols zabezpečil logistiku a Matthias postavil Hanford na výrobu plutónia. Ich práca je často prehliadaná, no bez nej by vedecké objavy nemohli byť realizované

Riadenie práce 225 000 ľudí priamo a ďalších 600 000 nepriamo, vrátane zabezpečenia materiálov, dopravy a utajenia. Projekt stál vyše 2 miliardy dolárov (ekvivalent asi 31 miliárd dolárov v roku 2024), a USACE muselo efektívne alokovať prostriedky na výskum, výstavbu a výrobu štiepných materiálov.



Riadenie rozpočtu:

Projekt stál vyše 2 miliardy dolárov (ekvivalent asi 31 miliárd dolárov v roku 2024), a USACE muselo efektívne alokovať prostriedky na výskum, výstavbu a výrobu štiepných materiálov.

Počas 6,5 roka sa v rámci programu USA minulo 1,83 miliardy dolárov. V dolároch z roku 2016 to predstavuje približne 30 miliárd dolárov. V relatívnom vyjadrení predstavovali vrcholné výdavky v roku 1944 približne 0,4 % HDP USA a celková suma predstavovala približne 0,75 % ročného HDP.

Tieto náklady sa výrazne preniesli na výstavbu, pričom približne dve tretiny týchto peňazí sa vynaložili na výstavbu zariadení a iba jedna tretina na ich prevádzku.

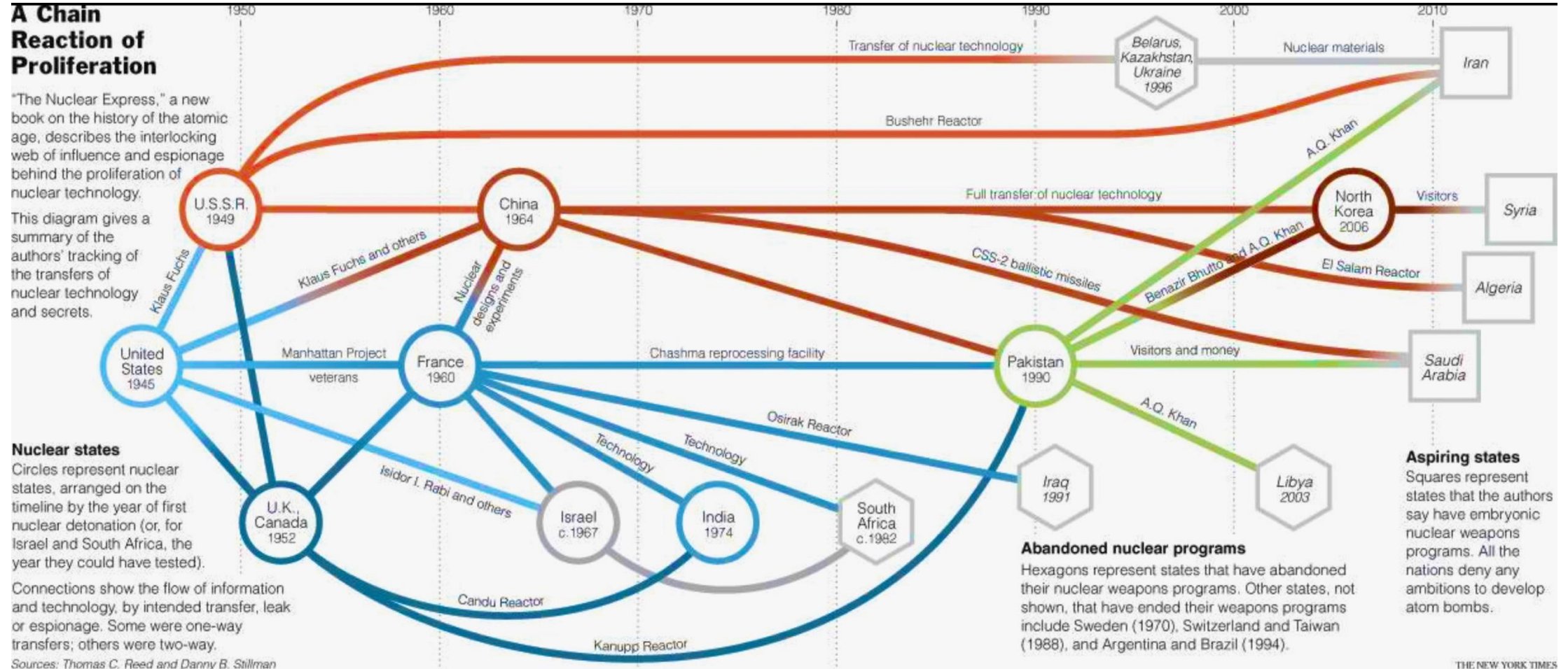
Bolo to veľa peňazí, ale boli vynaložené v čase národnej núdze a boli pomerne malé v porovnaní s všeobecnými výdavkami počas vojny.

V skutočnosti sa rovnali iba 9 dňom vtedajších výdavkov USA na vojnu.



**US Army Corps
of Engineers®**

Jadrové programy zbraní





Jadrové reaktory

“Nulté” (nemecké) jadrové reaktory

Reaktor	Miesto	Obdobie	Technické údaje	Stav a misia Alsos
L-I	Lipsko	1940	Uránový prah (125 kg), parafín ako moderátor, 600 l vody.	Nekritický, demontovaný, materiály presunuté.
L-II	Lipsko	1941	Uránový prah (750 kg), parafín + voda, 1,5 tony uránu.	Nekritický, pokračovanie výskumu.
L-III	Lipsko	1941–1942	Uránový prah, pokusy s ťažkou vodou (200 kg).	Nekritický, experimenty prerušené.
L-IV	Lipsko	1942	Uránový prah (750 kg), 140 kg ťažkej vody. Prvý nárast neutrónov.	Nehoda (požiar, jún 1942), výskum zastavený.
B-I	Berlín	1941	1,5 tony uránu, grafit ako moderátor.	Nekritický, presun do Gottowa kvôli náletom.
B-II	Berlín	1942	1 tona uránu, pokusy s grafitom a ťažkou vodou.	Nekritický, pokračovanie výskumu.
B-III	Berlín	1942–1943	Uránové kocky (200 kg), 200 kg ťažkej vody.	Nekritický, zlepšená konfigurácia.
B-VI	Gottow	1943	1 tona uránu, pokusy s kockami, ťažká voda.	Nekritický, príprava na B-VIII.
B-VII	Gottow	1943–1944	1,2 tony uránu, 1 tona ťažkej vody, kocková štruktúra.	Nekritický, presun do Haigerlochu.
B-VIII	Haigerloch	1944–1945	664 uránových kociek (1,5 tony uránu), 1,5 tony ťažkej vody, betónový reaktor v jaskyni.	Nekritický, demontovaný misiou Alsos (apríl 1945). Materiály (urán, ťažká voda) odvezené do USA.



“Nulté” (nemecké) jadrové reaktory

Prečo iba pokusy a žiadny funkčný reaktor?

- **Nedostatok zdrojov:** Obmedzený prístup k obohatenému uránu a ťažkej vode (po sabotáži v Nórsku). Prírodný urán vyžadoval väčšie množstvo moderátora.
- **Chyby vo výpočtoch:** Heisenberg a Bothe podcenili schopnosť grafitu ako moderátora (kvôli nečistotám), čo ich viedlo k preferencii drahej ťažkej vody.
- **Organizačné problémy:** Rivalita medzi tímami (Heisenberg vs. Diebner) a nízka priorita zo strany nacistického vedenia spomalili pokrok.

Technické poznámky

- **Palivo:** Prírodný urán (0,7 % U-235), buď ako prah (kovový urán) alebo kocky (2,5 cm hrana, pokryté parafinom).
- **Moderátor:** Ťažká voda (D_2O) alebo grafit. Grafit vyradili kvôli nečistotám, čo zvýšilo závislosť na ťažkej vode.
- **Výkon:** Žiadny reaktor nedosiahol kritickosť.
- **Konštrukcia:** Reaktory boli malé, experimentálne, často umiestnené v laboratóriách alebo bunkroch (Haigerloch). B-VIII mal valcový tvar (priemer $\sim 1,2$ m).



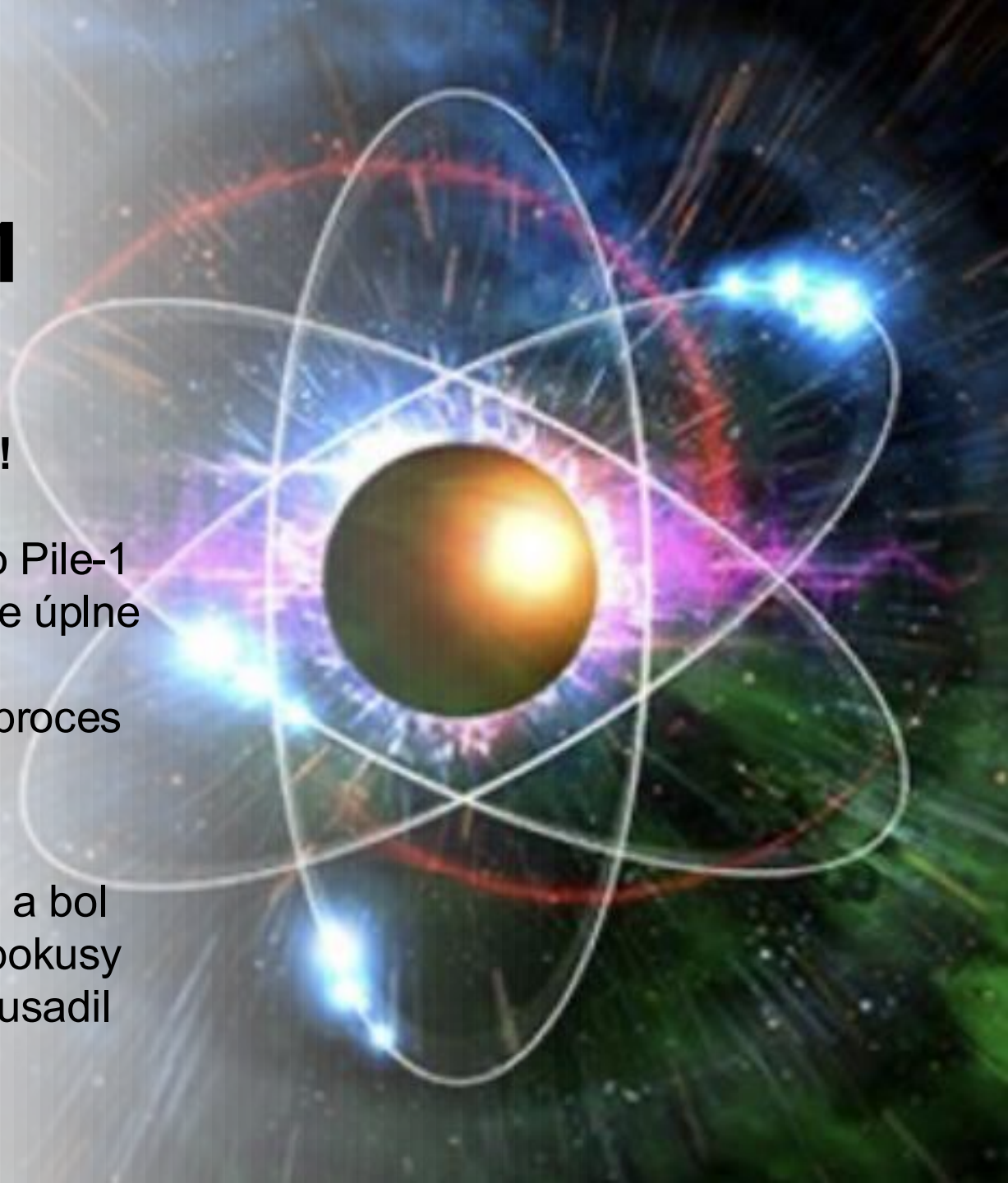
Prvý jadrový reaktor CP-1

Na to aby sme mohli vyrobiť jadrové zbrane potrebuje nevyhnutne najprv jadrové reaktory!

Príbeh vývoja prvého jadrového reaktora Chicago Pile-1 (CP-1) pod vedením geniálneho Enrica Fermiho je úplne fascinujúci.

Vývoj CP-1 bol však v skutočnosti komplikovaný proces plný pokusov, omylov a technických výziev.

Vývoj CP-1 prebiehal v rámci Projektu Manhattan a bol sústredený na Chicagskú univerzitu, ale plány a pokusy sa odohrávali na viacerých miestach, kým sa tím usadil na finálnej lokalite.



Jadrový reaktor CP-1

Kde všade skúšali postaviť reaktor?

- Kolumbijská univerzita, New York (1939–1941):

Experimenty na meranie hodnôt multiplikačného koeficientu "k" v menších zostavách grafitu a uránu. Pokusy skôr teoretické a laboratórne, bez snahy o zostavenie plnohodnotného reaktora. Hodnoty "k" boli (okolo 0,7–0,8), chýbal dostatočne čistý grafit a urán.

- **Argonne Forest Preserve, Illinois (pôvodný plán, 1942):** Asi 25 km juhozápadne od Chicaga, pre minimalizovanie rizika v prípade nehody.

- Rôzne miestnosti v rámci Chicagskej univerzity:

Počas príprav skúšali rôzne menšie experimentálne zostavy na testovanie usporiadania grafitu a uránu, ako aj na meranie hodnôt "k".



Jadrový reaktor CP-1

Kde ho nakoniec postavili?

Chicagská univerzita, Stagg Field (finálna lokalita, 1942): CP-1 postavený pod tribúnami futbalového štadióna Stagg Field v bývalej squashovej hale, bolo to núdzové riešenie.

Fermi a Compton presadili túto lokalitu, aby urýchlili pokrok. Rozhodnutie bolo kontroverzné, pretože reaktor nemal tienenie ani chladenie, čo predstavovalo riziko.



Jadrový reaktor CP-1

Ako skladali reaktor?

CP-1 bol primitívny reaktor, ktorý Fermi sám opísal ako „hrubú hromadu čiernych tehál a drevených trámov“. Konštrukcia bola výsledkom mnohých pokusov a iterácií.

Materiály:

Grafit: 360 ton grafitu v podobe blokov. Výzvou bola čistota grafitu – skoré pokusy zlyhávali kvôli nečistotám (napr. bóru), ktoré pohlcovali neutróny. Tím nakoniec získal čistejší grafit od firmy National Carbon Company.

Urán: 5,4 tony kovového uránu a 45 ton oxidu uránu (UO_2). Urán bol formovaný do „pseudo-sfér“ (valcovitých tvarov) alebo brikiet. Kovový urán bol čistejší, ale drahší, zatiaľ čo oxid uránu bol lacnejší, no menej efektívny.



Jadrový reaktor CP-1

Ako skladali reaktor?

Materiály:

Drevená konštrukcia: Nosná štruktúra reaktora bola vyrobená z dreva, (lacné a dostupné). Drevené trámy držali grafitové bloky na mieste.

Kadmiové tyče: kontrolné tyče na pohlcovanie neutrónov a reguláciu reakcie. Kadmium bolo vybrané pre svoju vysokú schopnosť zachytávať neutróny.

Plechové obaly:

Počas skorých pokusov tím skúšal baliť urán alebo grafit do plechových obalov (zvyčajne z hliníka alebo ocele), aby chránili materiály pred oxidáciou a znečistením. Tie však mali nežiaduci efekt – pohlcovali neutróny, čím znižovali hodnotu "k". Hliníkové obaly síce zachytávali menej neutrónov ako oceľ, ale stále boli problémom. V niektorých experimentoch boli uránové valce ponechané bez obalov.



Jadrový reaktor CP-1

Veľkosť a usporiadanie kúskov:

Grafitové bloky mali rozmery približne **10 x 10 x 40 cm** (niektoré zdroje uvádzajú 10,2 x 10,2 x 41 cm). Boli presne opracované, aby vytvorili mriežkovú štruktúru. Do blokov boli vyvrtané otvory na vkladanie uránových valcov alebo briekiet.

Uránové valce (pseudo-sféry) mali priemer okolo **5–7 cm** a hmotnosť niekoľko kilogramov.

Oxid uránu bol formovaný do menších briekiet (približne **5 x 5 x 5 cm**).

Reaktor mal **mriežkové usporiadanie**, kde sa striedali vrstvy grafitu s uránovými vložkami. Prvé vrstvy boli čisto grafitové, aby vytvorili základňu, a postupne sa pridával urán.

Celkovo bolo použitých **45 000 grafitových blokov** a **19 000 kusov uránu/oxidu uránu**.



Jadrový reaktor CP-1

Proces skladania:

Výstavba CP-1 začala **16. novembra 1942**. Na podlahu bol nakreslený kruh, ktorý určoval základňu reaktora. Prvá vrstva bola čisto grafitová, bez uránu, aby sa vytvoril moderátor. Postupne sa pridávali vrstvy s uránovými vložkami. Tím pracoval v zmenách, pričom vrstvy boli ukladané ručne. Na stavbe sa podieľalo aj 30 stredoškolských študentov. Grafitový prach sťažoval podmienky (podlaha bola šmyklavá).

Reaktor mal pôvodne guľovitý tvar, ale Fermiho výpočty ukázali, že postačí menší, sploštený tvar (výška 6,1 m, šírka v strede 7,6 m). To bolo možné vďaka čistejšiemu grafitu a uránu, než sa pôvodne predpokladalo.



Jadrový reaktor CP-1

Cesta ku kritickému stavu

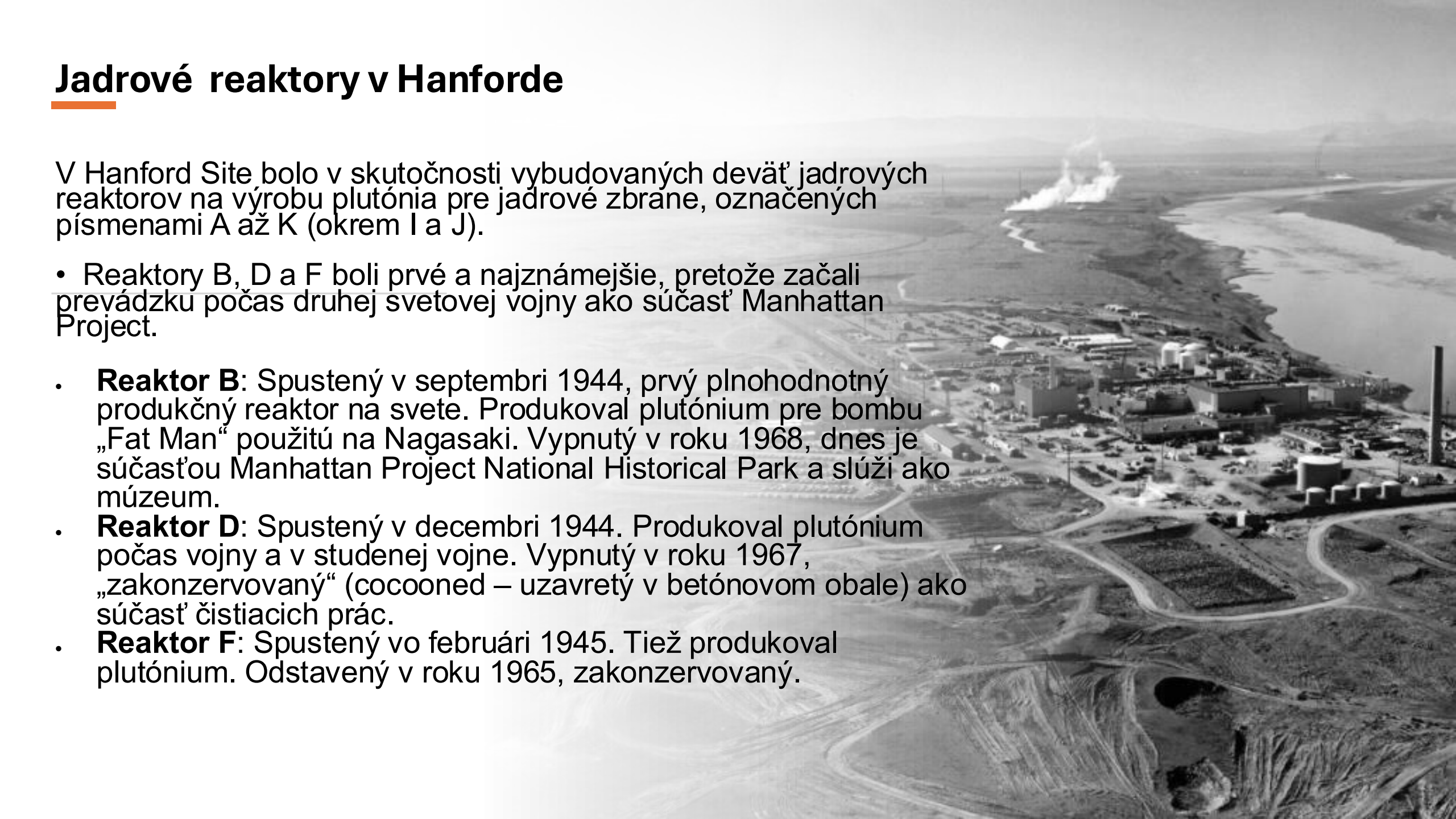
- CP-1 tím pravidelne meral intenzitu rádioaktivity neutrónovým čítačom s borónovým fluoridom, vloženým do reaktora pri 15. vrstve.
- Pri približne 30–40 vrstvách dosahovalo "k" hodnoty okolo **0,98–0,99**, čo naznačovalo, že reaktor sa blíži ku kritickému stavu.
- Fermiho výpočty predpokladali, že kritickosť bude dosiahnutá pri 57. vrstve. 2. decembra 1942 o 15:25 dosiahli **$k = 1,0006$** , čo znamenalo prvú samostatne udržateľnú reťazovú reakciu.
- Reaktor pracoval približne 28 minút pri nízkom výkone (asi 0,5 W, neskôr zvýšený na 200 W), kým ho Fermi zastavil zasunutím kontrolných tyčí.
- Experiment dokázal, že reťazová reakcia je možná a kontrolovateľná, čím otvoril cestu k vývoju jadrových zbraní aj jadrových elektrární.



Jadrové reaktory v Hanforde

V Hanford Site bolo v skutočnosti vybudovaných deväť jadrových reaktorov na výrobu plutónia pre jadrové zbrane, označených písmenami A až K (okrem I a J).

- Reaktory B, D a F boli prvé a najznámejšie, pretože začali prevádzku počas druhej svetovej vojny ako súčasť Manhattan Project.
- **Reaktor B:** Spustený v septembri 1944, prvý plnohodnotný produkčný reaktor na svete. Produkoval plutónium pre bombu „Fat Man“ použitú na Nagasaki. Vypnutý v roku 1968, dnes je súčasťou Manhattan Project National Historical Park a slúži ako múzeum.
- **Reaktor D:** Spustený v decembri 1944. Produkoval plutónium počas vojny a v studenej vojne. Vypnutý v roku 1967, „zakonzervovaný“ (cocooned – uzavretý v betónovom obale) ako súčasť čistiacich prác.
- **Reaktor F:** Spustený vo februári 1945. Tiež produkoval plutónium. Odstavený v roku 1965, zakonzervovaný.



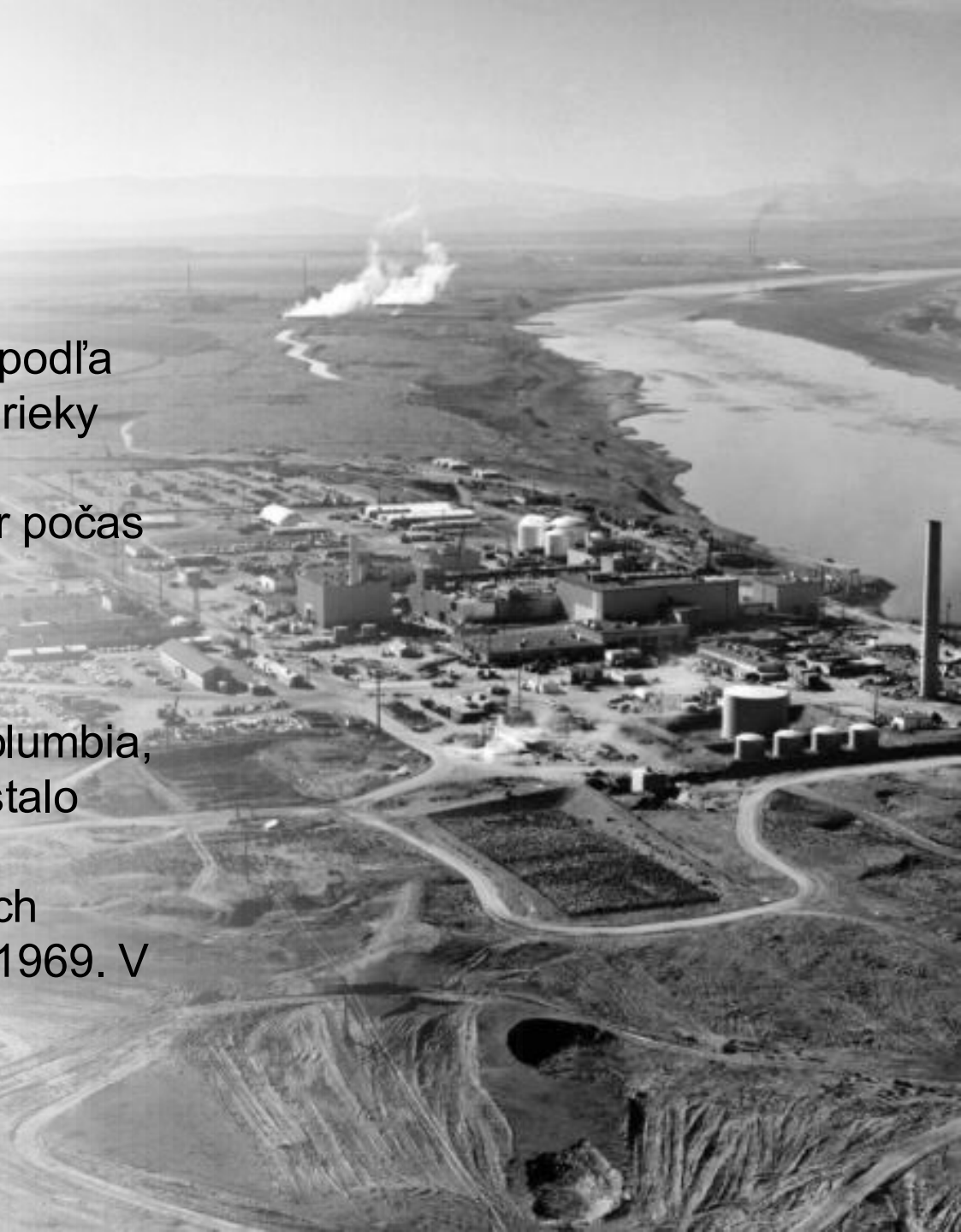
Jadrové reaktory v Hanforde

Čo sa stalo s reaktormi A, C, E a ostatnými?

Reaktory boli označované písmenami **A** až **K** (bez **I** a **J**) podľa plánovanej postupnosti výstavby a rozmiestnenia pozdĺž rieky Columbia.

Nie všetky boli postavené naraz, a niektoré vznikli neskôr počas studenej vojny. Tu je ich osud:

- **Reaktor A:** Nebol nikdy postavený. Písmeno „A“ bolo rezervované pre plánované miesto v rámci rozloženia reaktorov (označovali sa podľa pozícií pozdĺž rieky Columbia, približne 10 km od seba) a bolo zrušené, a miesto zostalo nevyužitú.
- **Reaktor C:** Spustený v novembri 1952, jeden z novších reaktorov, produkoval plutónium a odstavili ho v roku 1969. V súčasnosti je zakonzervovaný (cocooned) ako súčasť čistiacej prác.



Jadrové reaktory v Hanforde

- **Reaktor E:** Neexistoval žiadny reaktor E. Písmeno „E“ bolo vynechané v označovaní, kvôli plánovacím alebo logistickým dôvodom, aby sa zachovala jasná identifikácia lokalít (napr. kvôli odlíšeniu od iných kódov alebo zariadení).
- Prečo „chýbajú“ niektoré písmená?
- Kvôli plánovaniu a logistike: Reaktory boli označované podľa lokalít (A, B, C atď.) vopred, ale nie všetky plánované miesta boli využité (napr. A).
- A písmená ako E boli vynechané, aby sa predišlo zmätkom v označovaní alebo kvôli zmene priorít.



Jadrové reaktory v Hanforde

- **Ostatné reaktory (H, DR, KE, KW, N):**
 - **Reaktor H:** Spustený v októbri 1949, odstavený v roku 1965, zakonzervovaný.
 - **Reaktor DR** (D Replacement): Spustený v októbri 1950 ako náhrada za možné zlyhanie reaktora D. Odstavený v roku 1964, zakonzervovaný.
 - **Reaktor KE a KW** (K-East a K-West): Spustené v rokoch 1955. Boli to dvojité reaktory na rovnakej lokalite. Odstavené v rokoch 1970–1971. Stále čakajú na zakonzervovanie, prebiehajú prípravné práce.
 - **Reaktor N:** Spustený v marci 1964, jediný reaktor, ktorý produkoval popri plutóniu aj elektrinu. Odstavený v roku 1987, zakonzervovaný.



Jadrové reaktory v Hanforde

Pri porovnaní s obohacovaním U-235 a výrobe Pu

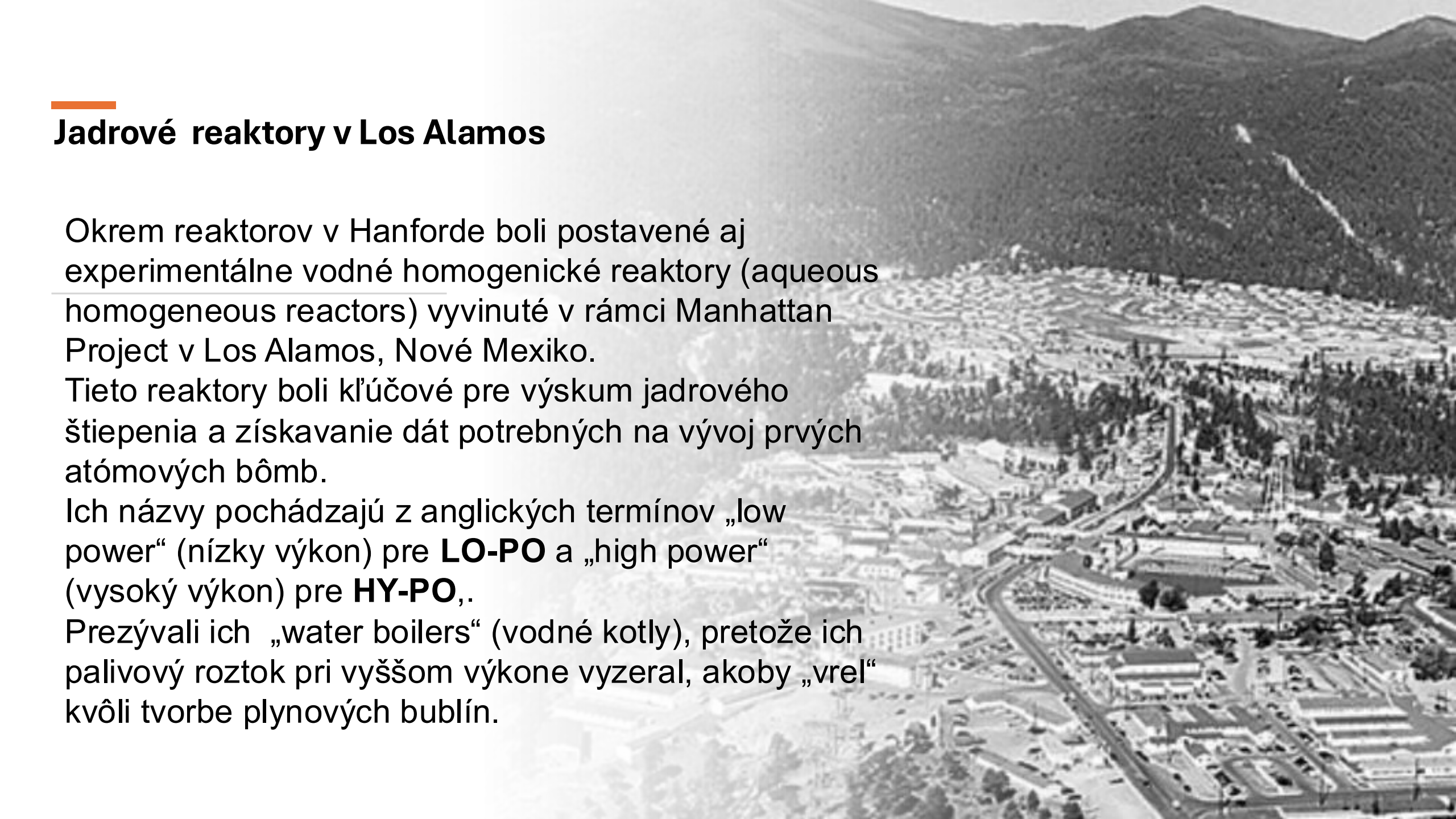
bola výroba plutónia v Hanforde technologicky menej náročná než obohacovanie U-235 v Oak Ridge z nasledujúcich dôvodov:

Jednoduchší proces: Reaktorová výroba a chemická separácia nevyžadovali fyzikálne oddeľovanie izotopov s minimálnym hmotnostným rozdielom.

Efektivita: Reaktor B produkoval dostatok plutónia na bombu za pár týždňov, zatiaľ čo Y-12 a K-25 v Oak Ridge trvali roky na produkciu 64 kg obohateného uránu pre „Little Boy“.

Množstvo materiálu: Plutóniová bomba vyžadovala ~6 kg materiálu, zatiaľ čo uránová ~64 kg, čo znižovalo logistické nároky.



An aerial photograph of the Los Alamos National Laboratory complex, showing various buildings, parking lots, and surrounding forested hills. The image is in grayscale and serves as a background for the text.

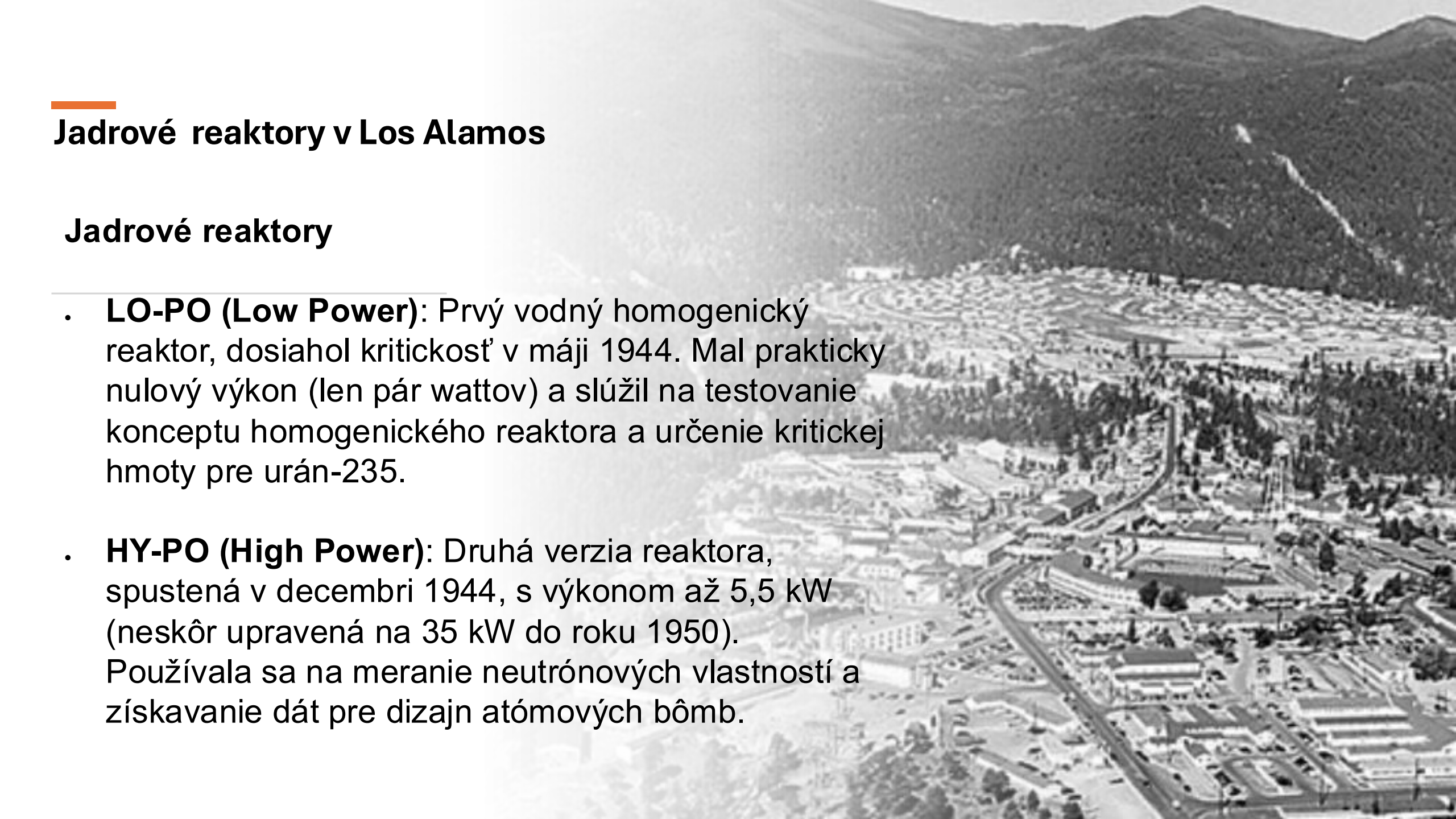
Jadrové reaktory v Los Alamos

Okrem reaktorov v Hanforde boli postavené aj experimentálne vodné homogenické reaktory (aqueous homogeneous reactors) vyvinuté v rámci Manhattan Project v Los Alamos, Nové Mexiko.

Tieto reaktory boli kľúčové pre výskum jadrového štiepenia a získavanie dát potrebných na vývoj prvých atómových bômb.

Ich názvy pochádzajú z anglických termínov „low power“ (nízky výkon) pre **LO-PO** a „high power“ (vysoký výkon) pre **HY-PO**,.

Prezývali ich „water boilers“ (vodné kotly), pretože ich palivový roztok pri vyššom výkone vyzeral, akoby „vrel“ kvôli tvorbe plynových bublín.



Jadrové reaktory v Los Alamos

Jadrové reaktory

- **LO-PO (Low Power):** Prvý vodný homogenický reaktor, dosiahol kritickosť v máji 1944. Mal prakticky nulový výkon (len pár wattov) a slúžil na testovanie konceptu homogenického reaktora a určenie kritickej hmoty pre urán-235.
- **HY-PO (High Power):** Druhá verzia reaktora, spustená v decembri 1944, s výkonom až 5,5 kW (neskôr upravená na 35 kW do roku 1950). Používala sa na meranie neutrónových vlastností a získavanie dát pre dizajn atómových bômb.

Ďalšie jadrové reaktory

- **Jadrový reaktor CP-3**
- Okrem reaktorov v Hanforde a v Los Alamos postavili v Argonne, Novom Mexiku aj reaktor CP-3.
- CP-3, LO-PO a HY-PO boli vodné homogenické reaktory (tekuté palivo), čo ich odlišuje od grafitových CP-1/CP-2.
- Všetky tri testovali fyziku štiepenia v kvapalnom médiu, ale CP-3 už používal ťažkú vodu (D_2O) ako moderátor, čo bolo efektívnejšie, ale drahšie.



Ďalšie jadrové reaktory

- Rok 1944 ukončil éru počiatkových výskumných reaktorov (CP-1, CP-2, CP-3, LO-PO) a otvoril cestu produkčným reaktorom (Hanford D, F) a tiež neskorším civilným reaktorom (EBR-I, Obninsk).



Ďalšie jadrové reaktory

Reaktor	Miesto	Rok spustenia	Typ	Palivo	Moderátor	Výkon	Neutrónový tok (neutrónov/cm ² /s)	Účel
HY-PO	Los Alamos, USA	December 1944	Vodný homogenický	Uranyl nitrát (obohatený U-235)	Obyčajná voda	5,5–35 kW	$\sim 10^{11}$ – 10^{12}	Výskum pre bomby
Reaktor D	Hanford, USA	December 1944	Grafitový	Prírodný urán	Grafit	~250 MWt	$\sim 10^{12}$ – 10^{13}	Výroba plutónia
Reaktor F	Hanford, USA	Február 1945	Grafitový	Prírodný urán	Grafit	~250 MWt	$\sim 10^{12}$ – 10^{13}	Výroba plutónia
ZEEP	Chalk River, Kanada	September 1945	Ťažkovodný	Prírodný urán	Ťažká voda	~10 kWt	$\sim 10^9$ – 10^{10}	Výskum neutrónov
Clementine (po úpravách)	Los Alamos, USA	1946	Rýchly neutrónový	Plutónium	Žiadny	~25 kWt	$\sim 10^{10}$ – 10^{11}	Testovanie rýchlych neutrónov
F-1	Moskva, ZSSR	December 1946	Grafitový	Prírodný urán	Grafit	~24 kWt	$\sim 10^9$ – 10^{10}	Výroba plutónia, výskum
NRX	Chalk River, Kanada	Júl 1947	Ťažkovodný	Prírodný urán	Ťažká voda	~42 MWt	$\sim 10^{12}$ – 10^{13}	Výskum, izotopy
GLEEP	Harwell, UK	August 1947	Grafitový	Prírodný urán	Grafit	~100 W	$\sim 10^7$ – 10^8	Výskum neutrónov
EBR-I	Idaho, USA	December 1951	Rýchly neutrónový	Obohatený urán	Žiadny	~1,4 MWt	$\sim 10^{11}$ – 10^{12}	Produkcia elektriny, breeder
Obninsk APS-1	Obninsk, ZSSR	Jún 1954	Grafitový, vodné chladenie	Obohatený urán	Grafit	~30 MWt	$\sim 10^{12}$ – 10^{13}	Produkcia elektriny

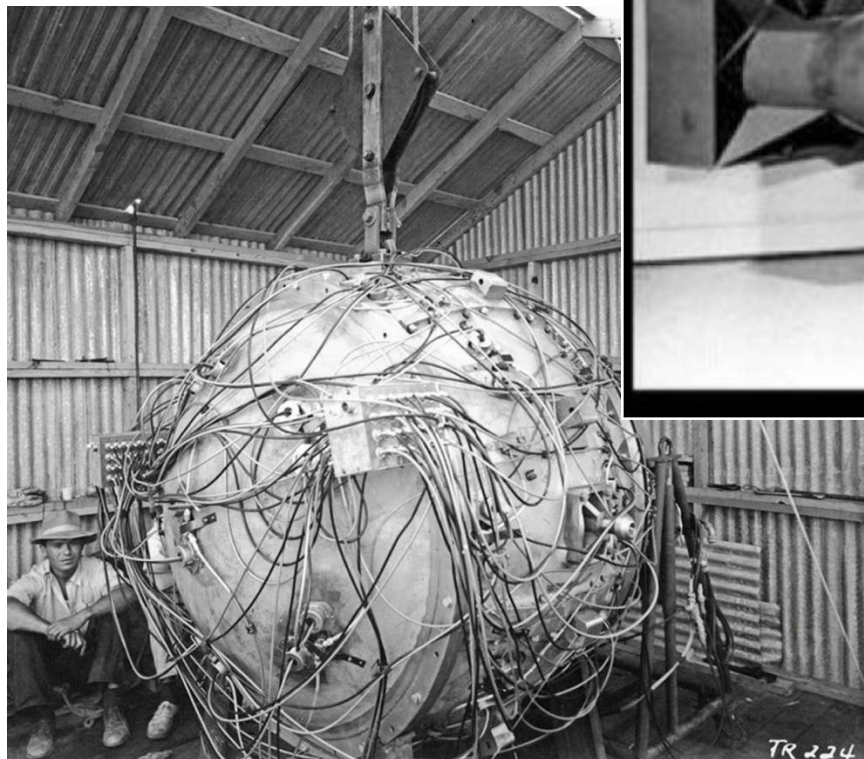
Ďalšie jadrové reaktory

Po roku 1954 sa jadrový priemysel rýchlo rozrástol, napríklad:

- **Calder Hall (UK, 1956):** Prvá komerčná jadrová elektráreň (grafitový, 50 MWe).
 - **Shippingport (USA, 1957):** Prvý komerčný tlakovodný reaktor (PWR, 60 MWe).
-
- Tieto reaktory označujú začiatok éry **Generation I** reaktorov, ktoré nasledovali po experimentálnych reaktoroch.



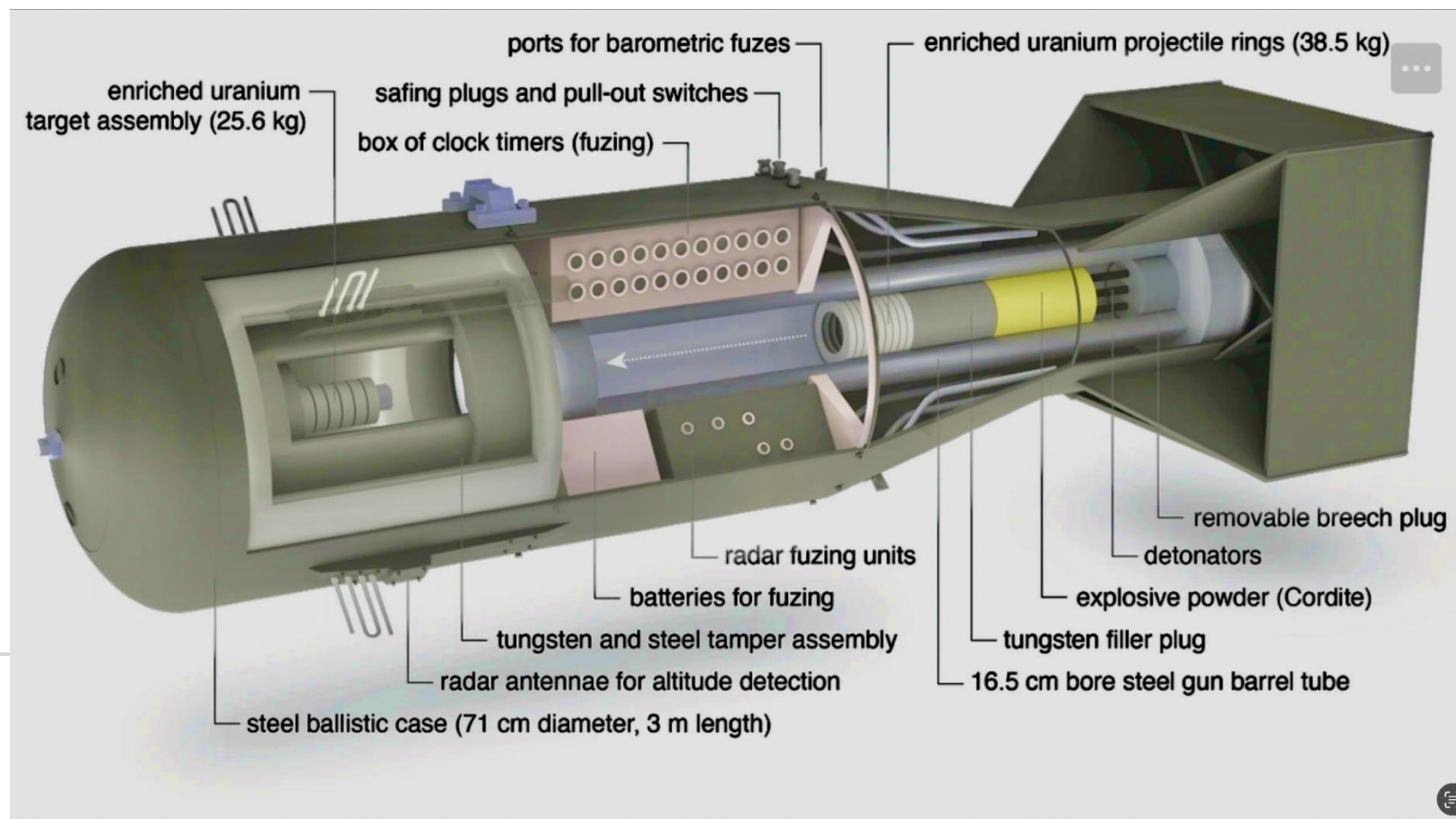
Prvé tri jadrové zbrane.



“Gadget”, “Little Boy” a “Fat Man”

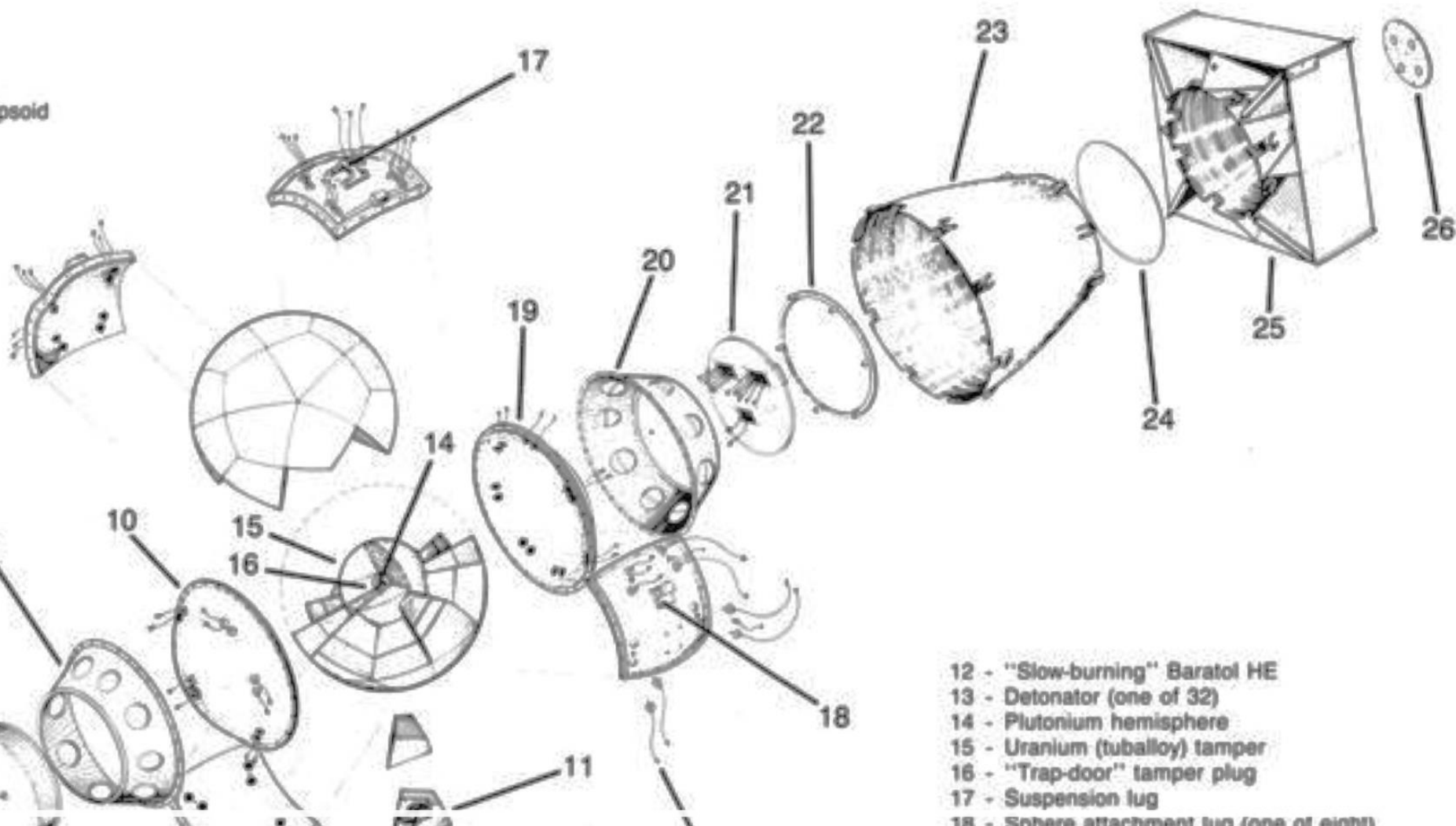
Parameter	Gadget	Little Boy	Fat Man
Typ zbrane	Implozná (plutóniová)	Kanónová (uránová)	Implozná (plutóniová)
Dátum testu/použitia	16. júl 1945 (test Trinity)	6. august 1945 (Hirošima)	9. august 1945 (Nagasaki)
Miesto	Alamogordo, Nové Mexiko, USA	Hirošima, Japonsko	Nagasaki, Japonsko
Štiepny materiál	Plutónium-239 (~6,2 kg)	Urán-235 (~64 kg, 80 % obohatený)	Plutónium-239 (~6,2 kg)
Mechanizmus	Implozia (vysokovýbušné šošovky)	Kanónový (strela U-235 do cieľa)	Implozia (vysokovýbušné šošovky)
Výkon (TNT ekvivalent)	~20–22 kt	~15 kt	~21 kt
Hmotnosť	~4 400 kg	~4 400 kg	~4 670 kg
Rozmery	Priemer: ~1,5 m	Dĺžka: ~3 m, Priemer: ~0,7 m	Dĺžka: ~3,3 m, Priemer: ~1,5 m
Konštrukcia	Experimentálne zariadenie, nepohyblivé	Zjednodušený dizajn, dopravené B-29	Zložitejší dizajn, dopravené B-29
Spoľahlivosť	Testovací prototyp, riziko zlyhania	Vysoká (nevyžadoval test pred použitím)	Stredná (založené na teste Gadget)
Zdroj plutónia/uránu	Reaktor B, Hanford	Obohacovanie uránu, Oak Ridge	Reaktor B, Hanford

Princíp “hlavnovej” jadrovej bomby



FAT MAN ASSEMBLY

- 1 - Nose cap
- 2 - AN 219 destruct fuse (one of four)
- 3 - Forward two-piece homogeneous armor ellipsoid
- 4 - Archie radar antenna (one of four)
- 5 - Primacord-filled tube (one of four)
- 6 - "A" plate with batteries
- 7 - X-unit (firing set) mounted on "B" plate
- 8 - Forward cone
- 9 - Cork-lined duralumin equatorial segment (one of five)
- 10 - Front duralumin polar cap (with cork lining)
- 11 - "Fast-burning" Composition B HE charge (one of 64)

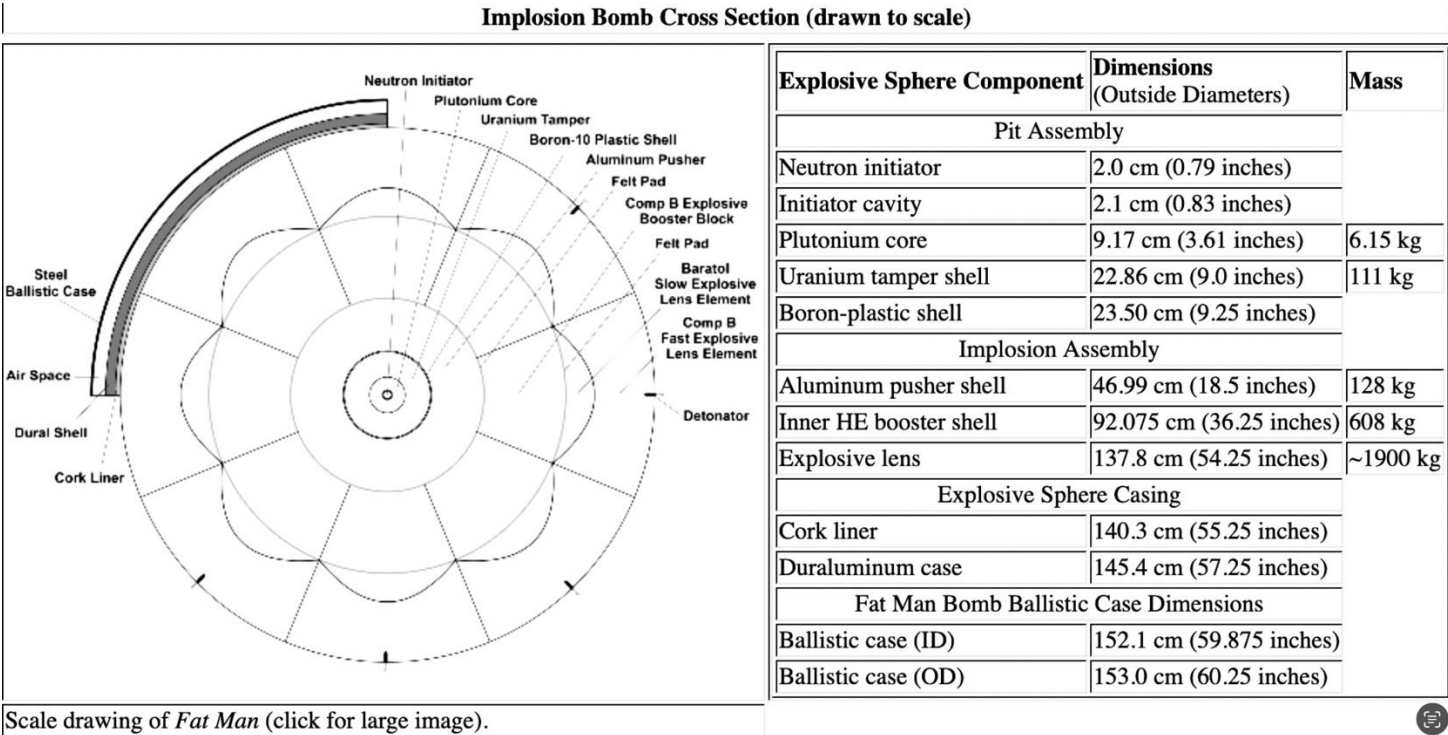
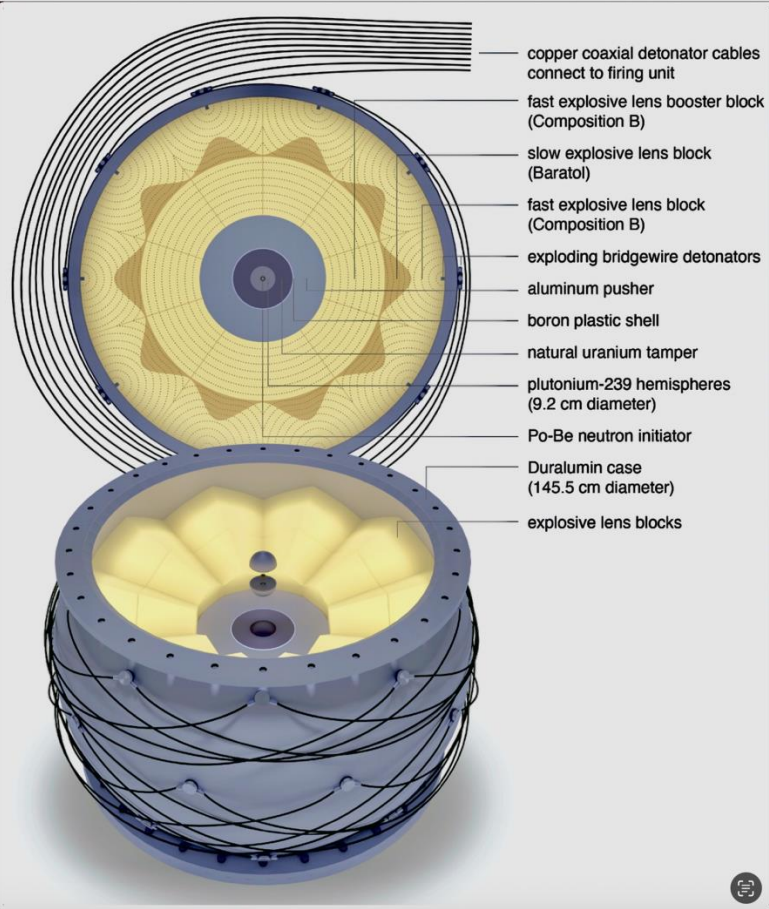


- 12 - "Slow-burning" Baratol HE
- 13 - Detonator (one of 32)
- 14 - Plutonium hemisphere
- 15 - Uranium (tuballoy) tamper
- 16 - "Trap-door" tamper plug
- 17 - Suspension lug
- 18 - Sphere attachment lug (one of eight)
- 19 - Rear duralumin polar cap (with cork lining)

A takto vyzerá konštrukcia "Fat Man"

- 20 - "B" plate with Archie radars, timers, baroswitches
- 21 - Baratol manifold
- 22 - Rear two-piece homogeneous armor ellipsoid
- 23 - "D" plate
- 24 - "California Parachute" aluminum tail assembly
- 25 - "E" plate
- 26 - "F" plate

Zásadný rozdiel je v implóznom designe

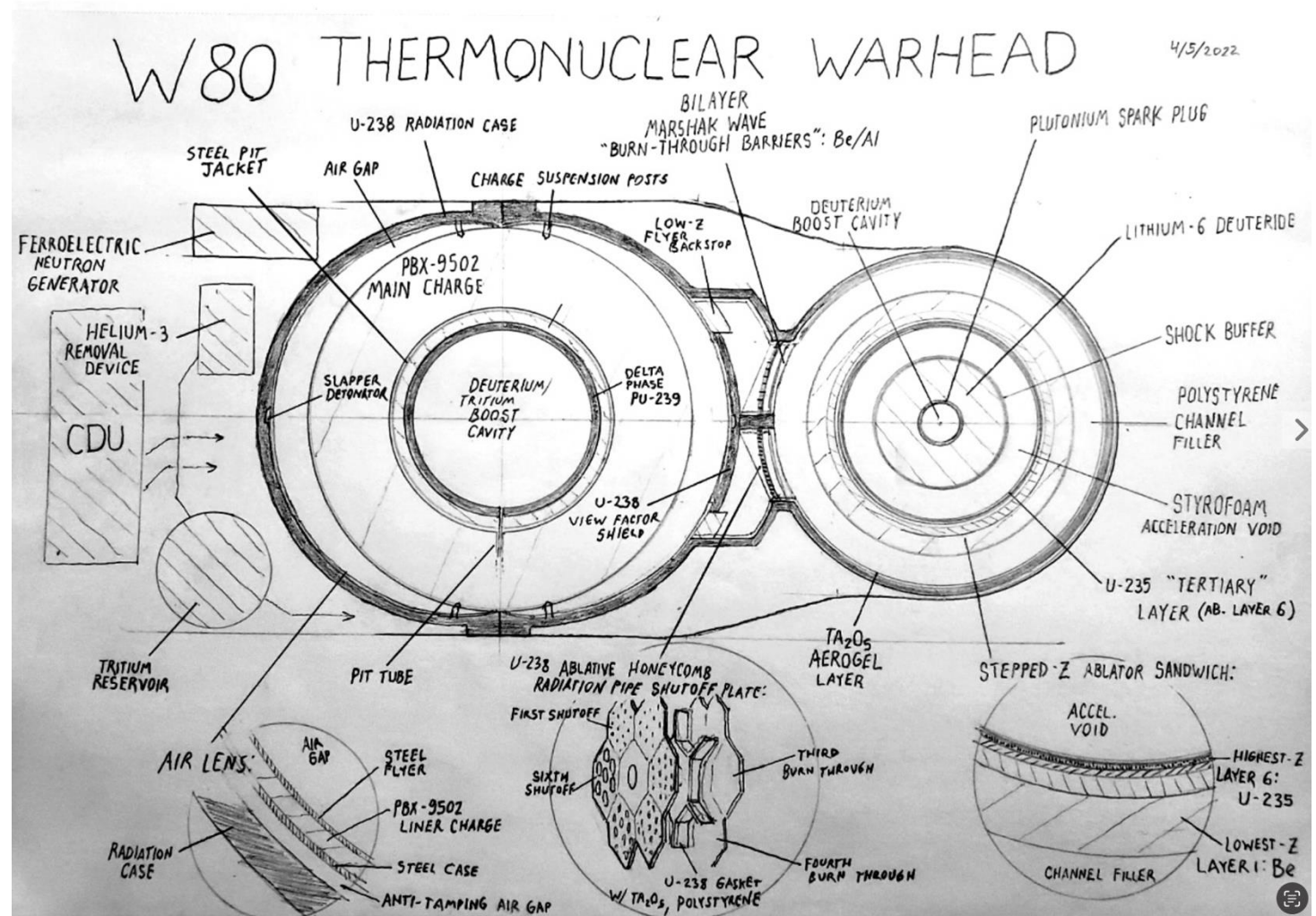


A takto je konštruovaná termonukleárna zbraň

Inak “fúzna, vodíková, H” je jadrová zbraň druhej generácie.

Má oveľa väčšiu ničivú silu, kompaktnější rozmery, nižšiu hmotnosť alebo kombináciu týchto výhod.

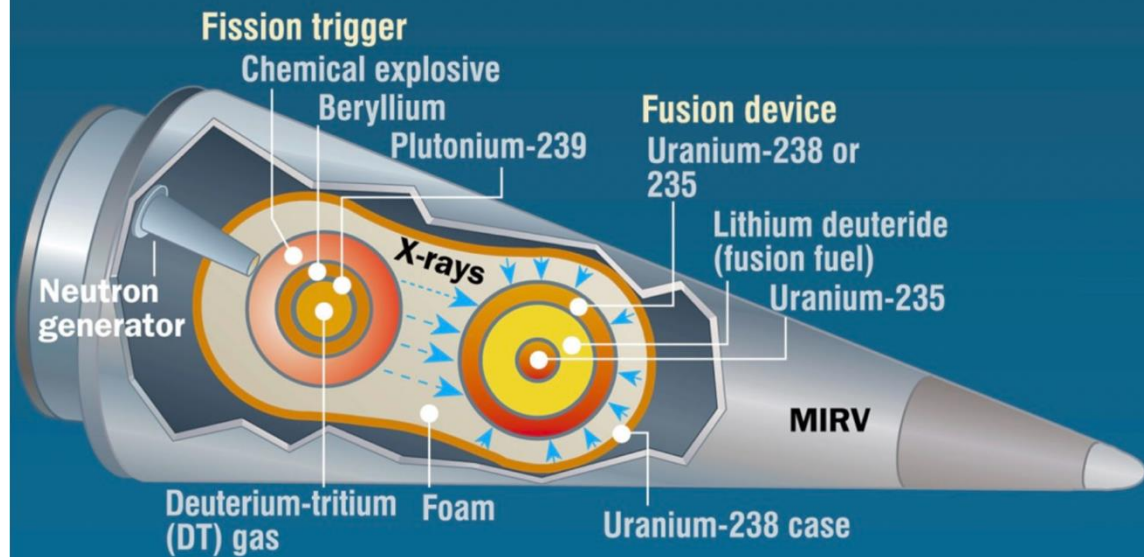
Jadrová fúzia umožňuje použitie neštípného ochudobneného uránu ako hlavného paliva zbrane, čo umožňuje efektívnejšie využitie vzácneho štípného materiálu.



Toto je moderná termojadrová hlavica

A modern thermonuclear

This W87 thermonuclear warhead is launched on an MX intercontinental missile. Packed into a multiple independently targeted re-entry vehicle (MIRV, shown below), it splits off from the missile to strike its target.



MIRV length: **5.7 feet** MIRV base diameter: **1.8 feet**
Explosive power: **300,000 tons of TNT**

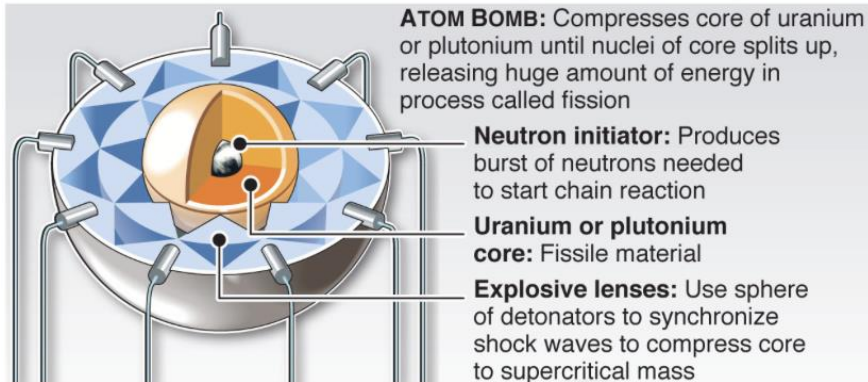
Explosion process: The compression of plutonium with a chemical explosive (above, left) starts a fission explosion that, in turn, is boosted by the fusion of DT gas. X-rays then compress the second component, causing a larger fission/fusion.

Blast over
per square

Zjednodušený princíp fungovania H bomby

What is a hydrogen bomb?

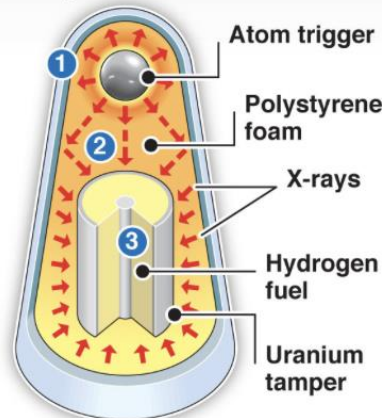
A hydrogen bomb, or thermonuclear weapon, uses the energy from a primary fission bomb to ignite a secondary nuclear fusion reaction. The result is the most destructive weapon ever created by man



HYDROGEN BOMB: Uses energy from primary fission bomb to ignite secondary nuclear fusion reaction

- 1 Small atom bomb explodes, emitting radiation
- 2 X-rays from primary detonation reflect inside casing, heating foam
- 3 Foam becomes plasma and compresses secondary package, igniting fusion fuel

Miniaturization: Hydrogen bombs can pack explosive power into smaller, light-weight packages delivered by ballistic missiles



Sources: Federation of American Scientists, Encyclopedia Britannica

© GRAPHIC NEWS

The hydrogen bomb Nuclear fission + fusion

1st stage
Fission bomb
(atomic bomb)

Core of fissionable material:
• Uranium 235,
• Plutonium 239

2nd stage
Fusion bomb

• Lithium-6
deuteride fuel

• Core rod
of plutonium

• Uranium 238
casing

1 Fission reaction in 1st stage

Fission of uranium
and plutonium
generates fierce
heat, x-rays
and neutrons

Pressure and heat
exerted on
plutonium
rod start
fission
reaction
in 2nd stage

2 Fission reaction in 2nd stage

Neutrons created
by fission of
plutonium rod
combine with
lithium-6
deuteride

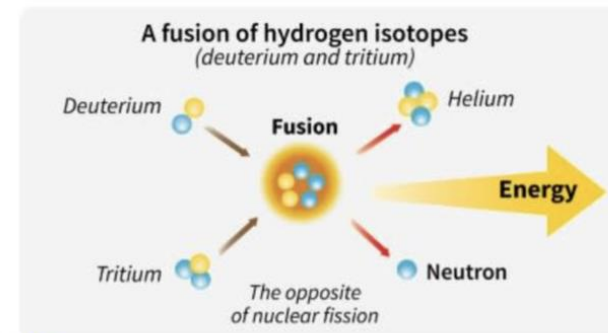
creating
deuterium
and tritium

3 Fusion reaction

Extreme
temperature
and pressure

Deuterium
and tritium
fuse

Explosion



© AFP

Typy jadrových zbraní





Jadrové zbrane môžeme rozdeliť na:

Technológia:

- Štiepne,
- Termonukleárne,
- Zosilnené.

Použitie:

- Strategické (vysoký výkon, masívne ciele) a
- Taktické (nízky výkon, bojisko).

Výkon:

- Nízky (0,1–10 kt),
- Stredný (10–100 kt),
- Vysoký (100 kt+).

Nosič:

- Balistické rakety,
- Lietadlá,
- Ponorky,
- Delostrelectvo.

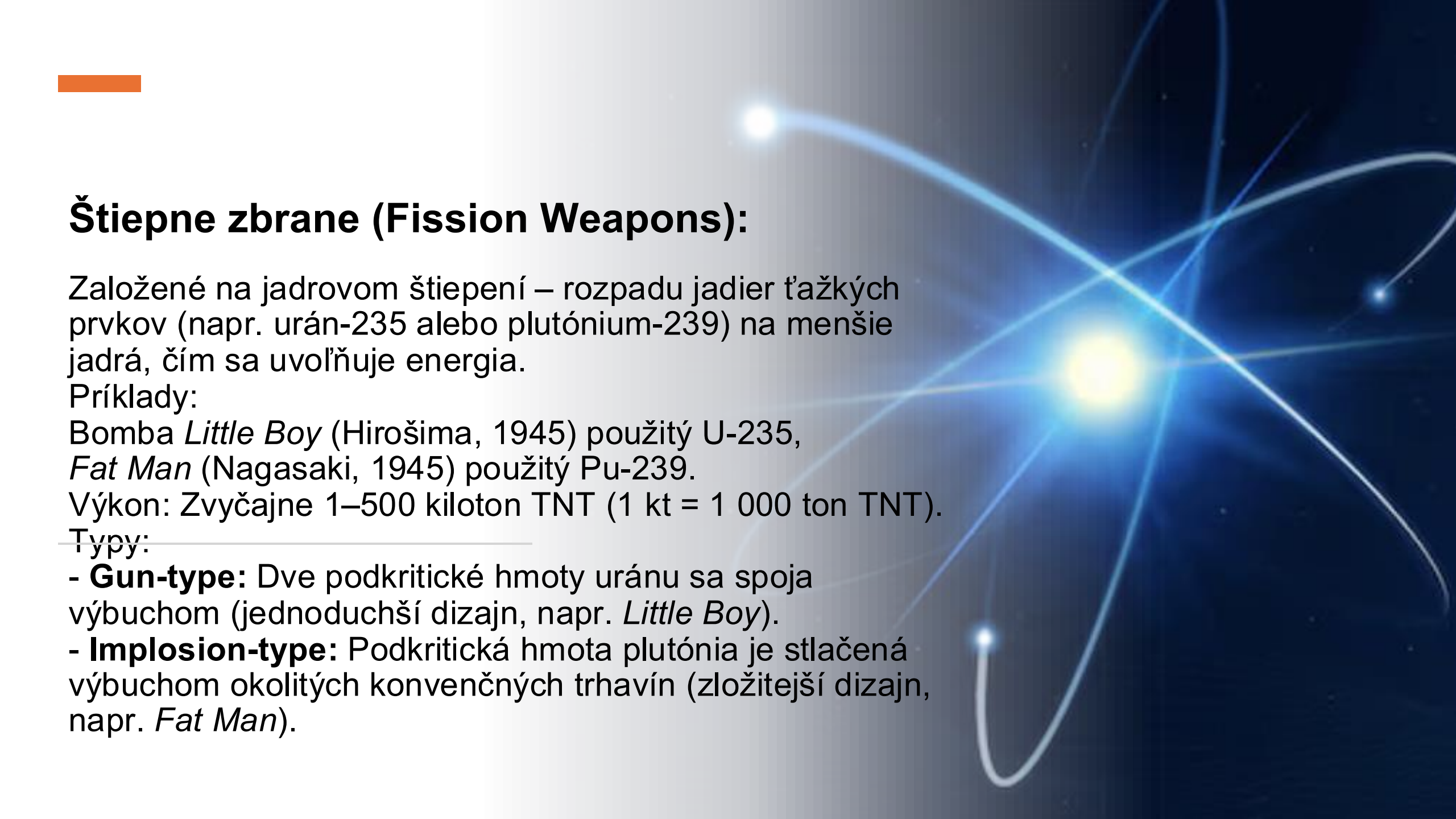
Nosič:

- Balistické rakety,
- Lietadlá,
- Ponorky,

Špeciálne typy:

- Neutrónové bomby,
- Špinavé bomby,
- EMP zbrane.



A stylized atomic model with a central yellow nucleus and several blue elliptical orbits. Small blue dots represent electrons on these orbits. The background is a dark blue gradient.

Štiepne zbrane (Fission Weapons):

Založené na jadrovom štiepení – rozpadu jadier ťažkých prvkov (napr. urán-235 alebo plutónium-239) na menšie jadrá, čím sa uvoľňuje energia.

Príklady:

Bomba *Little Boy* (Hirošima, 1945) použitý U-235,
Fat Man (Nagasaki, 1945) použitý Pu-239.

Výkon: Zvyčajne 1–500 kiloton TNT (1 kt = 1 000 ton TNT).

Typy:

- **Gun-type:** Dve podkritické hmoty uránu sa spoja výbuchom (jednoduchší dizajn, napr. *Little Boy*).
- **Implosion-type:** Podkritická hmota plutónia je stlačená výbuchom okolitých konvenčných trhavín (zložitejší dizajn, napr. *Fat Man*).

- **Termonukleárne zbrane (Nuclear Fusion Weapons):**

Založené na jadrovej syntéze – spájaní jadier ľahkých prvkov (napr. vodík – deutérium a trícium) za vzniku hélia, čím sa uvoľňuje obrovská energia. Vyžadujú štiepnu bombu ako „spúšťač“ na vytvorenie vysokých teplôt a tlakov potrebných na syntézu.

Nazývajú sa aj vodíkové bomby (H-bomby).
Príklad: Bomba *Ivy Mike* (USA, 1952) mala výkon 10,4 megaton TNT (1 Mt = 1 milión ton TNT).
Výkon: Zvyčajne 100 kt až desiatky Mt.

- **Zosilnené štiepne jadrové zbrane (Boosted Nuclear Fission Weapons):**

Kombinácia štiepenia a syntézy: malé množstvo deutéria a trícia v jadre štiepnej bomby zvyšuje jej účinnosť.

Syntéza produkuje extra neutróny, ktoré zvyšujú efektívnosť štiepenia.

Výkon: Zvyčajne 50–500 kt.

Používajú sa ako medzistupeň medzi čistými štiepnymi a termonukleárnymi zbraňami.



- **Strategické jadrové zbrane (Strategic Nuclear Weapons):**

Určené na masívne útoky na strategické ciele (mestá, vojenské základne, infraštruktúru).

Vysoký výkon (zvyčajne 100 kt až niekoľko Mt).
Nosiče: Medzikontinentálne balistické rakety (ICBM), ponorky (SLBM), strategické bombardéry.

Príklad: Ruské rakety RS-28 Sarmat alebo americké Minuteman III.



- **Taktické jadrové zbrane (Battlefield Nuclear Weapons):**

Určené na použitie na bojisku proti vojenským cieľom (tankové formácie, opevnenia).

Nižší výkon (0,1–50 kt).

Nosiče: Krátkodosahové rakety, delostrelecké granáty, torpéda.

Príklad: Americká delostrelecká munícia W48 (0,072 kt) alebo ruské taktické rakety Iskander.



Jadrové zbrane podľa výkonu

Nízkovýkonné (Low-Yield): 0,1–10 kt (napr. taktické zbrane).

Stredný výkon: 10–100 kt (napr. štiepne bomby ako *Fat Man* – 21 kt).

Vysoký výkon: 100 kt až niekoľko Mt (napr. termonukleárne bomby).

~~Najväčšia testovaná zbraň: *Tsar Bomba* (ZSSR, 1961)
– 50 Mt (pôvodne navrhnutá na 100 Mt).~~





Jadrové zbrane podľa nosiča

Balistické rakety:

- Medzikontinentálne (ICBM): Dosah 5 500+ km (napr. americké Minuteman III).
- Stredný dosah (IRBM): 3 000–5 500 km.
- Krátky dosah (SRBM): Do 1 000 km (napr. ruské Iskander).
- Odpaľované z ponoriek (SLBM): Napr. francúzske M51.

Lietadlá:

- Strategické bombardéry (napr. americké B-2 Spirit, ruské Tu-95).
- Gravitačné bomby (napr. americká B61).

Ponorky:

- Rakety odpaľované z ponoriek (SLBM) alebo torpéda s jadrovou hlavitou.

Delostrelectvo a iné:

- Jadrové delostrelecké granáty, míny, torpéda (väčšinou taktické zbrane).





Špeciálne typy jadrových zbraní

Neutrónové bomby (Enhanced Radiation Weapons-

Výkon: Zvyčajne 1–10 kt.

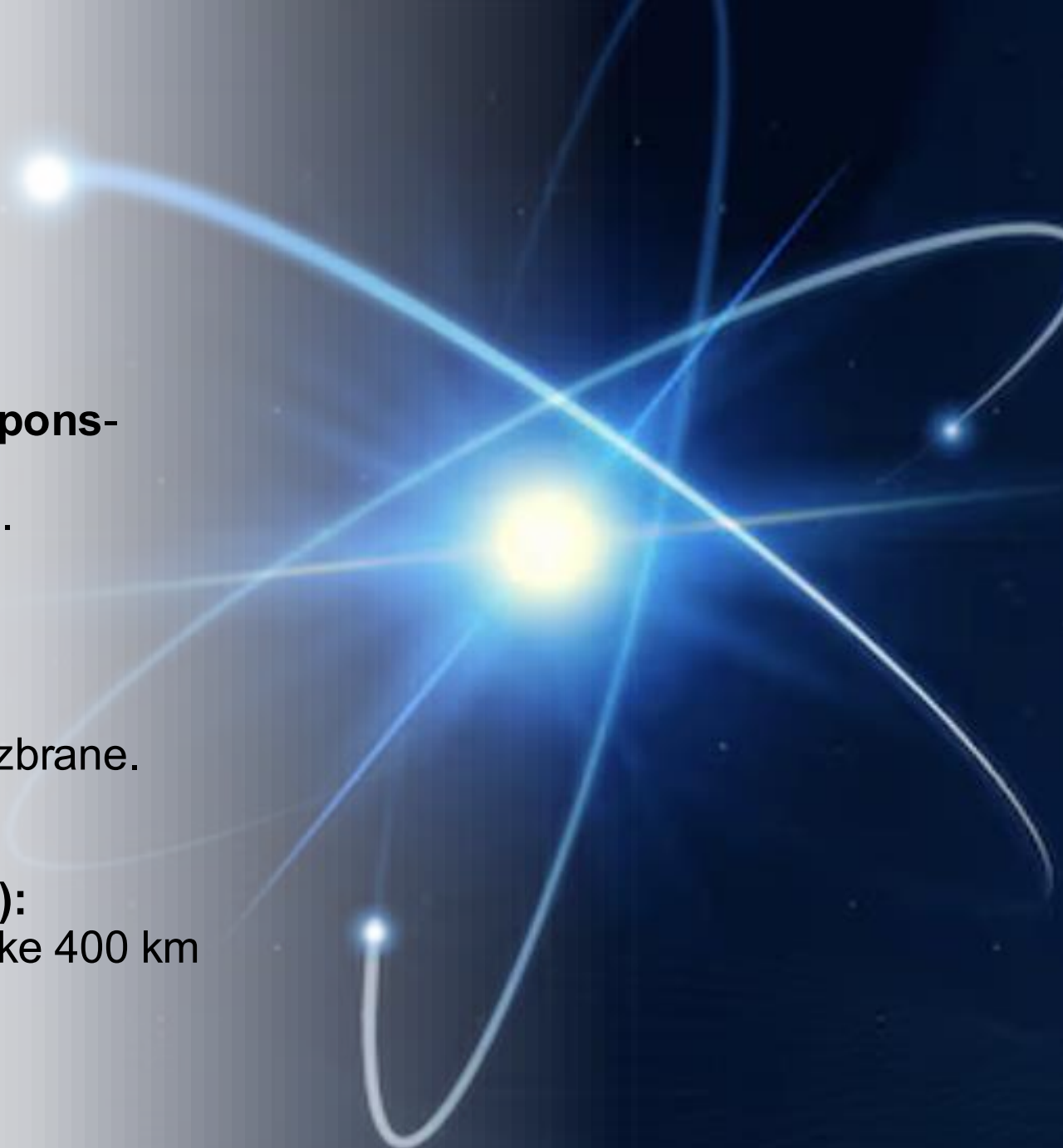
- Príklad: Americká W70 (testovaná v 80. rokoch).

Špinavé bomby (Radiological Weapons):

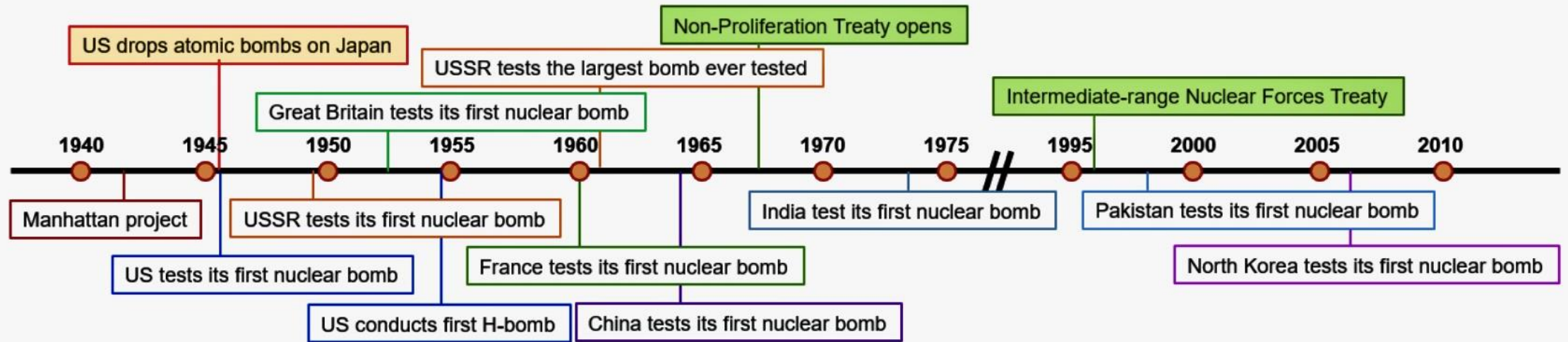
- Použitie: Skôr teroristické hrozby než vojenské zbrane.

EMP zbrane (Electromagnetic Pulse Weapons):

- Príklad: Test *Starfish Prime* (USA, 1962) vo výške 400 km nad Pacifikom.

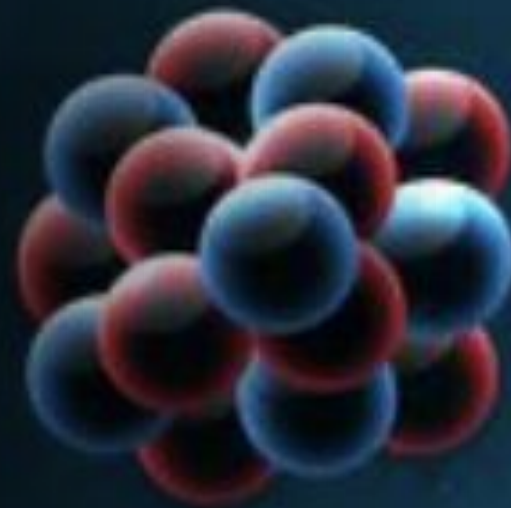


Skúšky jadrových zbraní



Timeline of nuclear weapons tests

**Najmodernejšia
termojadrová
zbraň je tá čo sa
dá podľa potreby
prestavovať**



Prestaviteľné jadrové zbrane



Prestaviteľné jadrové zbrane

Princíp prestaviteľného výkonu

Prestaviteľný výkon sa dosahuje úpravou množstva energie generovanej v **primárnej časti** (štiepna reakcia) a/alebo **sekundárnej časti** (fúzna reakcia). Kľúčové je ovplyvniť neutrónový flux a efektivitu fúzie, pričom sa mení konfigurácia paliva alebo spúšťacích mechanizmov. Hlavné techniky zahŕňajú:

1. **Úprava primárnej časti** – zmena počiatočného neutrónového impulzu.
2. **Boosting** – pridanie alebo odobratie fúzneho paliva ($D+T$) v primárnej časti.
3. **Modifikácia sekundárnej časti** – kontrola fúzie LiD .
4. **Tamper** – ovplyvnenie štiepenia $U-238$.

Prestaviteľné jadrové zbrane

1. Úprava primárnej časti – Neutrónový iniciátor

- **Technológia:** Primárna časť (Pu-239 alebo U-235 jadro) je vybavená variabilným iniciátorom neutrónov.
- **Spôsob:**
 - Moderné zbrane používajú **neutrónové generátory** (nie staré Po-210/Be iniciátory). Napríklad miniatúrne urýchľovače (deuterium-trícium trubice), ktoré produkujú neutróny reakciou: $D+T \rightarrow He-4+n+17.6 \text{ MeV}$
 - Výkon generátora sa dá regulovať – od nízkeho počtu neutrónov (slabá štiepna reakcia) po vysoký (maximálna reťazová reakcia).
- **Proces:**
 - Nízky výkon: Menej neutrónov $\rightarrow$ menej štiepení v Pu-239 $\rightarrow$ nižšia energia ($\sim 1\text{--}10 \text{ kT}$).
 - Vysoký výkon: Viac neutrónov $\rightarrow$ plná superkritická reakcia $\rightarrow \sim 50\text{--}100 \text{ kT}$.

Prestaviteľné jadrové zbrane

2. Boosting – Pridanie D+T do primárnej časti

- **Technológia:** Do jadra primárnej časti (Pu-239/U-235) sa vstrekuje malé množstvo plynného deutéria a trícia (D+T).
- **Spôsob:**
 - Externý zásobník (napr. titánový valec $\sim 10 \text{ cm}^3$) s D+T ($\sim 1\text{--}5 \text{ g}$) je prepojený s jadrom.
 - Pred detonáciou sa plyn vstrekuje (tlak $\sim 100 \text{ atm}$) a reguluje sa jeho množstvo:
 - Nízky výkon: Žiadne alebo málo D+T.
 - Vysoký výkon: Plná dávka D+T.
- **Proces:**
 - D+T reaguje vo vnútri štiepneho jadra: $\text{D}+\text{T} \rightarrow \text{He-4}+\text{n}+17.6 \text{ MeV}$
 - Rýchle neutróny (14.1 MeV) z fúzie zvyšujú efektivitu štiepenia Pu-239 – tzv. "boosting".
 - Bez boostu: $\sim 1\text{--}10 \text{ kT}$ (čisté štiepenie).
 - S boostom: $\sim 50\text{--}300 \text{ kT}$ (zvýšený neutrónový flux).

Prestaviteľné jadrové zbrane

3. Modifikácia sekundárnej časti – LiD a fúzia

- **Technológia:** Sekundárna časť (Li-6D) je navrhnutá s variabilným množstvom fúzneho paliva alebo modulárnym dizajnom.
- **Spôsob:**
 - **Množstvo LiD:** Zbraň má "prepínateľné" vrstvy Li-6D – menej paliva = nižší výkon, viac = vyšší.
 - Napr. vymeniteľné valce LiD (5 kg vs. 20 kg).
 - **Trícium boost:** Pridanie malého množstva trícia (~1–10 g) do sekundárnej časti zvyšuje počiatočnú fúziu.
 - **Tlmič fúzie:** Vloženie materiálu (napr. bóru-10) do sekundárnej časti absorbuje neutróny a znižuje fúziu: $B-10 + n \rightarrow Li-7 + \alpha + 2.8 \text{ MeV}$
- **Proces:**
 - Nízky výkon: Primárna časť generuje menej röntgenov (slabý boost), LiD sa čiastočne zapáli $\rightarrow \sim 100\text{--}200 \text{ kT}$.
 - Vysoký výkon: Plný boost, maximálna kompresia LiD $\rightarrow \sim 500 \text{ kT--}1 \text{ MT}$.

Prestaviteľné jadrové zbrane

4. Tamper – Štiepenie U-238

- **Technológia:** Vonkajší tamper (U-238) prispieva k výkonu štiepením rýchlymi neutrónmi z fúzie.
- **Spôsob:**
 - **Variabilný tamper:** Zbraň môže mať vymeniteľný tamper – tenší (nízky výkon) alebo hrubší (vysoký výkon).
 - Nízky: ~1–2 cm U-238 → menej štiepenia.
 - Vysoký: ~5–10 cm U-238 → viac štiepenia.
 - **Nahradenie:** Použitie olova namiesto U-238 (ako v *Tsar Bomba*) znižuje výkon o 50 % (žiadne štiepenie).
- **Proces:**
 - Neutróny z fúzie (14.1 MeV) štiepia U-238: $\text{U-238} + n \rightarrow \text{Ba-141} + \text{Kr-94} + 3n + 200 \text{ MeV}$
 - Nízky výkon: Menej fúzie → menej neutrónov → slabé štiepenie tamperu.
 - Vysoký výkon: Plná fúzia → vysoký flux → až 50 % energie z U-238.

Prestaviteľné jadrové zbrane

Konkrétne príklady moderných zbraní

1. W88 (USA):

- Výkon: 475 kT (max), prestaviteľný na ~100–200 kT.
- Mechanizmus: Boosting D+T v primárnej časti + variabilné LiD v sekundárnej.
- Proces: Regulácia D+T dávky (1–3 g) mení primárny výbuch (20–50 kT), čo ovplyvňuje fúziu.

2. B61-12 (USA):

- Výkon: 0,3–50 kT (taktická).
- Mechanizmus: Boosting + tlmič fúzie – bórové vložky znižujú neutrónový flux.
- Proces: Pri 0,3 kT je fúzia minimálna, pri 50 kT plná kompresia LiD.

3. RS-24 (Rusko):

- Výkon: 100–800 kT na hlavicu.
- Mechanizmus: Pravdepodobne boosting a variabilný tamper (U-238 hrúbka).
- Proces: Sovietsky dizajn uprednostňuje flexibilitu tamperu a Li-6D.



Jadrová zbraň B61-12 (USA):

Výkon: 0,3–50 kT (taktická).

Mechanizmus: Boosting + tlmič fúzie – bórové vložky znižujú neutrónový flux.

Proces: Pri 0,3 kT je fúzia minimálna, pri 50 kT plná kompresia LiD.

B61-12: Technický rozbor

Účel:

Taktická a strategická gravitčná bomba s prestaviteľným výkonom (0,3 kT – 50 kT), použiteľná lietadlami ako F-35, B-2 alebo F-16.

Celkové parametre:

Dĺžka: 3,56 m (11,8 stôp).

Priemer: 33 cm (13 palcov).

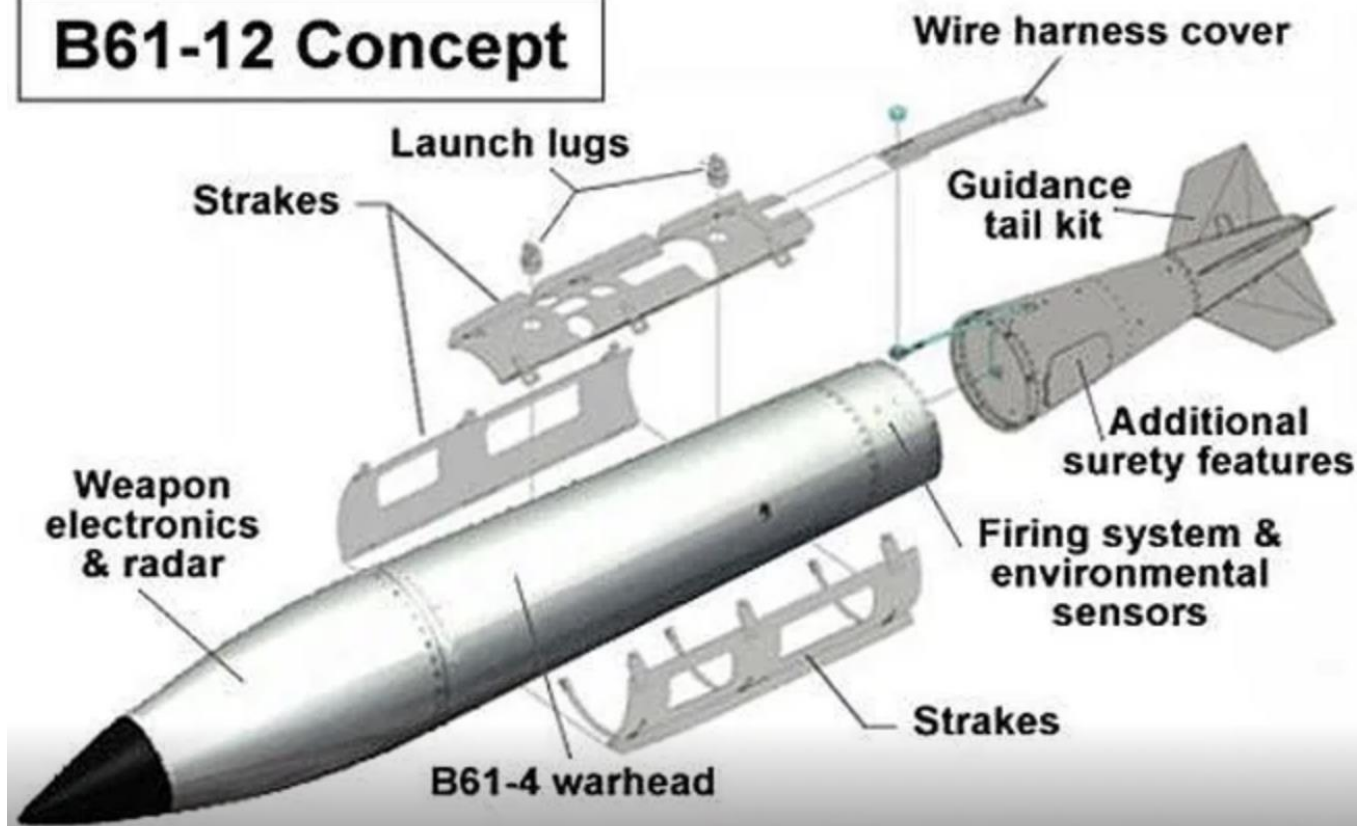
Hmotnosť: ~375 kg (825 libier).

Výkon: 0,3 kT, 1,5 kT, 10 kT, 50 kT (štyri voliteľné úrovne).

Dizajn:

Teller-Ulam konfigurácia s primárnou (štiepnou) a sekundárnou (fúznou) časťou, optimalizovaná na kompaktnosť a presnosť (CEP ~30 m s navigačným kitom).

B61-12 Concept



Federation of American Scientists

Jadrová zbraň B61-12

1. Primárna časť

- **Jadro:** Plutónium-239 (Pu-239), guľa s hmotnosťou ~5–10 kg (presné údaje tajné).
 - Priemer: ~10 cm pred implóziou, ~2 cm po stlačení.
- **Iniciátor:** Moderný neutrónový generátor (D-T trubica).
 - Dizajn: Miniaturný urýchľovač (~5 cm dlhý, ~2 cm priemer), generuje neutróny reakciou: $D+T \rightarrow He-4+n+17.6\text{ MeV}$
 - Regulácia: Elektricky nastaviteľný – počet neutrónov od $\sim 10^9$ do $\sim 10^{12}$ za pulz.
- **Boosting:** Zásobník D+T plynu (~1–3 g, tlak ~100 atm) vstreknutý do jadra.
 - Množstvo: Variabilné – od 0 g (čisté štiepenie) po 3 g (maximálny boost).
- **Výbušná šošovka:** RDX/TNT (~50–100 kg), hrúbka ~10–15 cm, implózný dizajn.
- **Tamper:** Urán-238, hrúbka ~2–5 cm (menšia ako strategické bomby kvôli kompaktnosti).

2. Sekundárna časť

- **Fúzne palivo:** Lítium-6 deuterid (Li-6D), obohatené (~50–90 % Li-6).
 - Hmotnosť: ~5–10 kg (menší objem pre taktický výkon).
 - Rozmery: Valec, dĺžka ~30 cm, priemer ~10 cm.
- **Štiepny zapalovač (*spark plug*):** Pu-239, valec ~10 cm dlhý, ~3 cm priemer, hmotnosť ~1–2 kg.
- **Tamper:** U-238, hrúbka ~2–3 cm (minimalizovaná pre nižší spád).
- **Tlmič fúzie:** Bór-10 vložky (voliteľné, hrúbka ~1 mm), absorbujú neutróny: $B-10+n \rightarrow Li-7+\alpha+2.8\text{ MeV}$
- **Radiačný kanál:** Polystyrén, hrúbka ~1 cm, prenáša röntgeny na kompresiu.

Jadrová zbraň B61-12

3. Mechanizmy prestaviteľného výkonu

B61-12 používa kombináciu nasledujúcich techník na reguláciu výkonu:

1. Neutrónový generátor:

- Nízky výkon (0,3 kT): Minimálny neutrónový pulz → slabá štiepna reakcia ($\sim 10^{17}$ štiepení).
- Vysoký výkon (50 kT): Maximálny pulz → plná reťazová reakcia ($\sim 10^{19}$ štiepení).

2. Boosting D+T:

- 0,3 kT: Žiadny boost – čisté štiepenie Pu-239 ($\sim 0,3$ kT).
- 1,5 kT: Malý boost ($\sim 0,5$ g D+T) → zvýšenie neutrónov ($\sim 1-2$ kT).
- 10 kT: Stredný boost ($\sim 1-2$ g) → výraznejší fúzny príspevok.
- 50 kT: Plný boost (~ 3 g) → maximálna štiepna reakcia + čiastočná fúzia LiD.

3. Sekundárna fúzia:

- 0,3–1,5 kT: Fúzia LiD je potlačená (slabé röntgeny, B-10 tlmič).
- 10–50 kT: Fúzia sa zapáli – Li-6D produkuje: $\text{Li-6} + n \rightarrow \text{T} + \text{He-4} + 4.8 \text{ MeV}$, $\text{D} + \text{T} \rightarrow \text{He-4} + n + 17.6 \text{ MeV}$ $\text{Li-6} + n \rightarrow \text{T} + \text{He-4} + 4.8 \text{ MeV}$, $\text{D} + \text{T} \rightarrow \text{He-4} + n + 17.6 \text{ MeV}$
- Výkon fúzie: $\sim 20-40$ % celkovej energie pri 50 kT (zvyšok štiepenie).

4. Tamper:

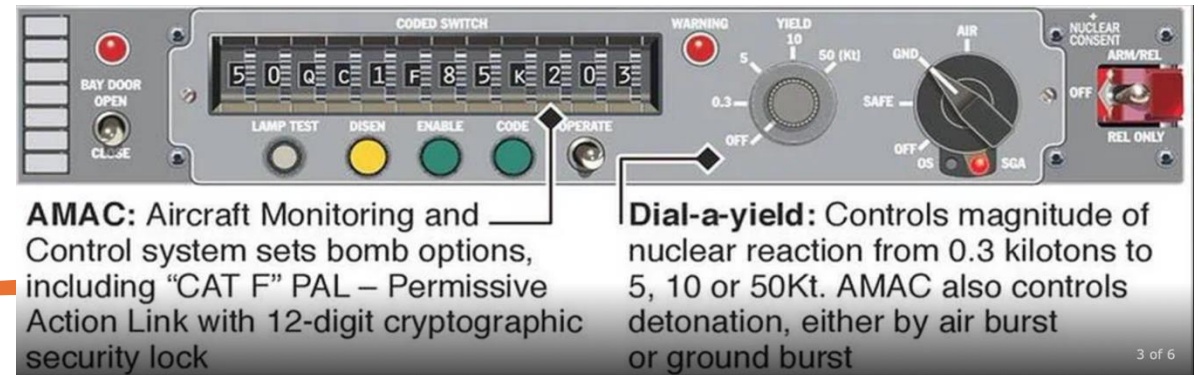
- Tenší U-238 (~ 2 cm) pri nižších výkonoch obmedzuje štiepenie neutrónmi z fúzie.
- Pri 50 kT plný tamper (~ 3 cm) pridá $\sim 10-15$ kT štiepením U-238.

Jadrová zbraň B61-12 - Nastavenie v poľných podmienkach

1. Technologické vybavenie

- **Rozhranie:** Zbraň má externý ovládací panel (zapojený do systému PAL – Permissive Action Link), ktorý komunikuje s vnútornou elektronikou.
 - Panel: Malý port na boku bomby ($\sim 5 \times 5$ cm), chránený kódom a biometrickou autentifikáciou.
- **Neutrónový generátor:** Elektricky nastaviteľný cez softvér – operátor zadá požadovaný výkon (0,3/1,5/10/50 kT).
- **Boosting systém:** Pneumatický ventil reguluje vstreky D+T z externého zásobníka:
 - Zásobník: Titánový valec ($\sim 10 \text{ cm}^3$), vymeniteľný v údržbovom cykle (každých ~ 5 rokov kvôli rozpadu trícia).
- **Tlmič fúzie:** Bór-10 vložky sú mechanicky zasúvateľné (servomotorom) do sekundárnej časti cez prístupový slot.

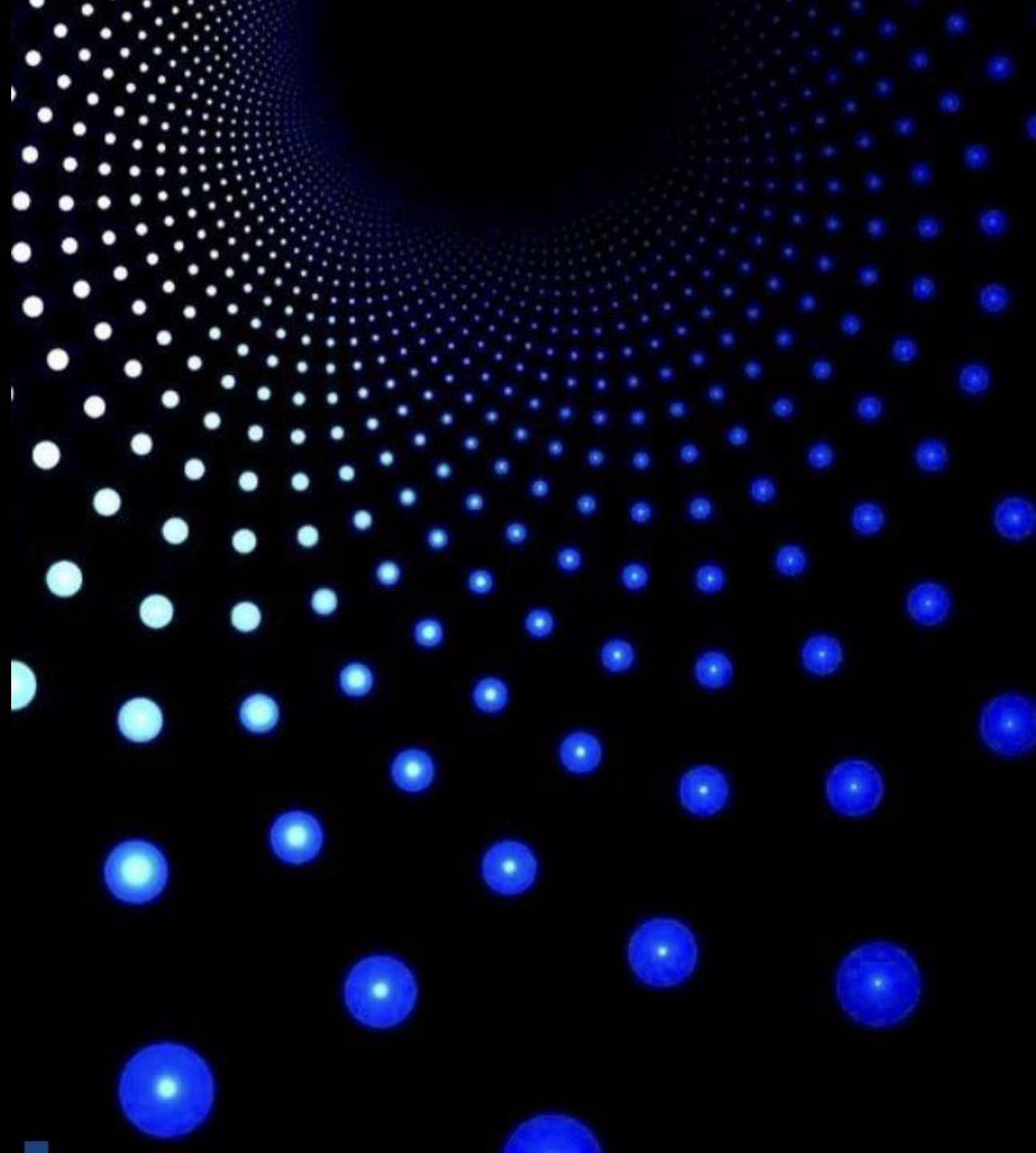
Jadrová zbraň B61-12 - Nastavenie v poľných podmienkach



2. Proces nastavenia

- **Krok 1: Autorizácia**
 - Dvojitá autentifikácia (kód + odtláčok prsta) cez PAL systém – trvá ~30 sekúnd.
 - Prikázané z velenia (napr. NORAD) na základe misie (taktická vs. strategická).
- **Krok 2: Výber výkonu**
 - Operátor (technik USAF) zadá úroveň cez rozhranie:
 - 0,3 kT: "Low yield" – mínus boost, B-10 vložky aktívne.
 - 50 kT: "Full yield" – plný boost, B-10 deaktivované.
 - Elektronika nastaví:
 - Neutrónový pulz (napätie na D-T trubici: 10 kV pre 0,3 kT, 50 kV pre 50 kT).
 - Dávku D+T (ventil otvorený 0–100 %).
- **Krok 3: Mechanická úprava**
 - Servomotory posunú B-10 vložky (~10 sekúnd).
 - Ventil vstrekuje D+T (tlak regulovaný solenoidom, ~5 sekúnd).
- **Čas:** Celý proces trvá ~1–2 minúty, vykonáva sa v hangári alebo na palube lietadla (napr. F-35).
- **Bezpečnosť:** Zbraň zostáva "zapečatená" – žiadne manuálne otváranie, všetko je diaľkovo ovládané.

**A čo keď.....
exploduje e
jadrová bomba
teraz v
Bratislave?**



Dopad odpálenia jadrovej zbrane v Bratislave

Predpoklady

Miesto detonácie: Centrum Bratislavy (napr. Námestie SNP, 48.145°N, 17.109°E).

Typ výbuchu: Predpokladáme vzdušný výbuch (airburst) na optimálnej výške (~1–2 km), maximalizujúci deštrukciu – štandard pre strategické zbrane. Iskander ako taktická zbraň by mohol byť povrchový (groundburst), čo zvyšuje spad.

Obyvateľstvo: Bratislava má ~440 000 obyvateľov (2023), hustota v centre ~5 000–10 000 ľudí/km².

Dátum: Dnes - 13. máj 2025 – bežný pracovný deň, žiadne špecifické faktory (počasie, evakuácia).

Dopad odpálenia jadrovej zbrane v Bratislave

Charakteristiky zbraní

1. **Americká W76-1:** 90 kt (termonukleárna).
2. **Americká W76-2:** 5–7 kt (nízkovýkonová termonukleárna).
3. **Ruská RS-24 Yars:** 300 kt na hlavicu (MIRV, predpokladáme jednu).
4. **Ruská R-36M2 SS-18:** 800 kt na hlavicu (MIRV, jedna).
5. **Ruská Iskander-M:** 50 kt (taktická).

Dopad odpálenia jadrovej zbrane v Bratislave

Dopad na obyvateľstvo a okolie

Okamžité účinky

- **Americká W76-2 (5–7 kt):** „Malý“ výbuch – centrum Bratislavy zničené, ~10–20 % obyvateľov mŕtvych. Okolie (Lamač, Devín) prežije s poškodením.
- **Americká W76-1 (90 kt):** Stredný rozsah – polovica mesta v troskách, ~30–40 % mŕtvych. Okrajové časti (Rača, Vajnory) poškodené, požiare.
- **Ruský Iskander (50 kt):** Podobné W76-1, ale spad – centrum zničené, ~20–30 % mŕtvych, okolité kraje kontaminované.
- **Ruský Yars (300 kt):** Katastrofa – ~70 % Bratislavy zmizne, požiare až po Trnavu, prežije len pár tisíc.
- **Ruský SS-18 (800 kt):** Totálne zničenie – Bratislava vymazaná, ~90 % mŕtvych, Trnava a Nitra v ruinách.

Dopad odpálenia jadrovej zbrane v Bratislave

Dopad na obyvateľstvo a okolie

Okamžité účinky

- **Americká W76-2 (5–7 kt):** „Malý“ výbuch – centrum Bratislavy zničené, ~10–20 % obyvateľov mŕtvych. Okolie (Lamač, Devín) prežije s poškodením.
- **Americká W76-1 (90 kt):** Stredný rozsah – polovica mesta v troskách, ~30–40 % mŕtvych. Okrajové časti (Rača, Vajnory) poškodené, požiare.
- **Ruský Iskander (50 kt):** Podobné W76-1, ale spad – centrum zničené, ~20–30 % mŕtvych, okolité kraje kontaminované.
- **Ruský Yars (300 kt):** Katastrofa – ~70 % Bratislavy zmizne, požiare až po Trnavu, prežije len pár tisíc.
- **Ruský SS-18 (800 kt):** Totálne zničenie – Bratislava vymazaná, ~90 % mŕtvych, Trnava a Nitra v ruinách.

Dopad odpálenia jadrovej zbrane v Bratislave

Dopad na obyvateľstvo a okolie

Dlhodobé dôsledky

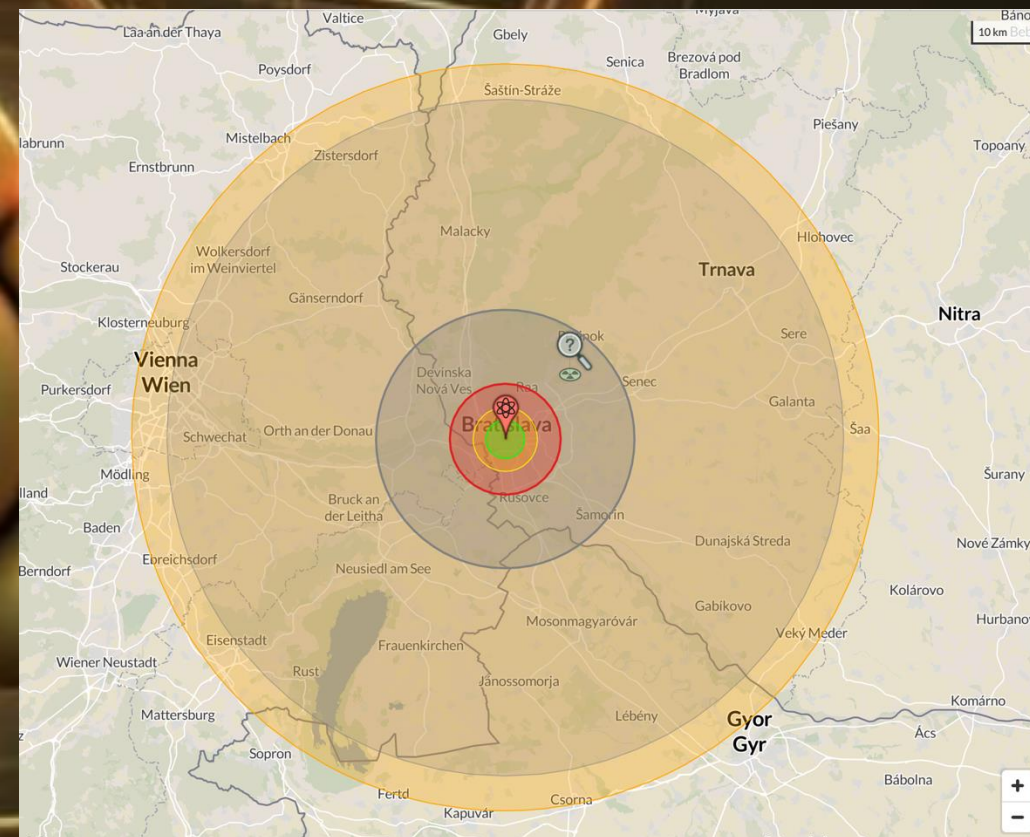
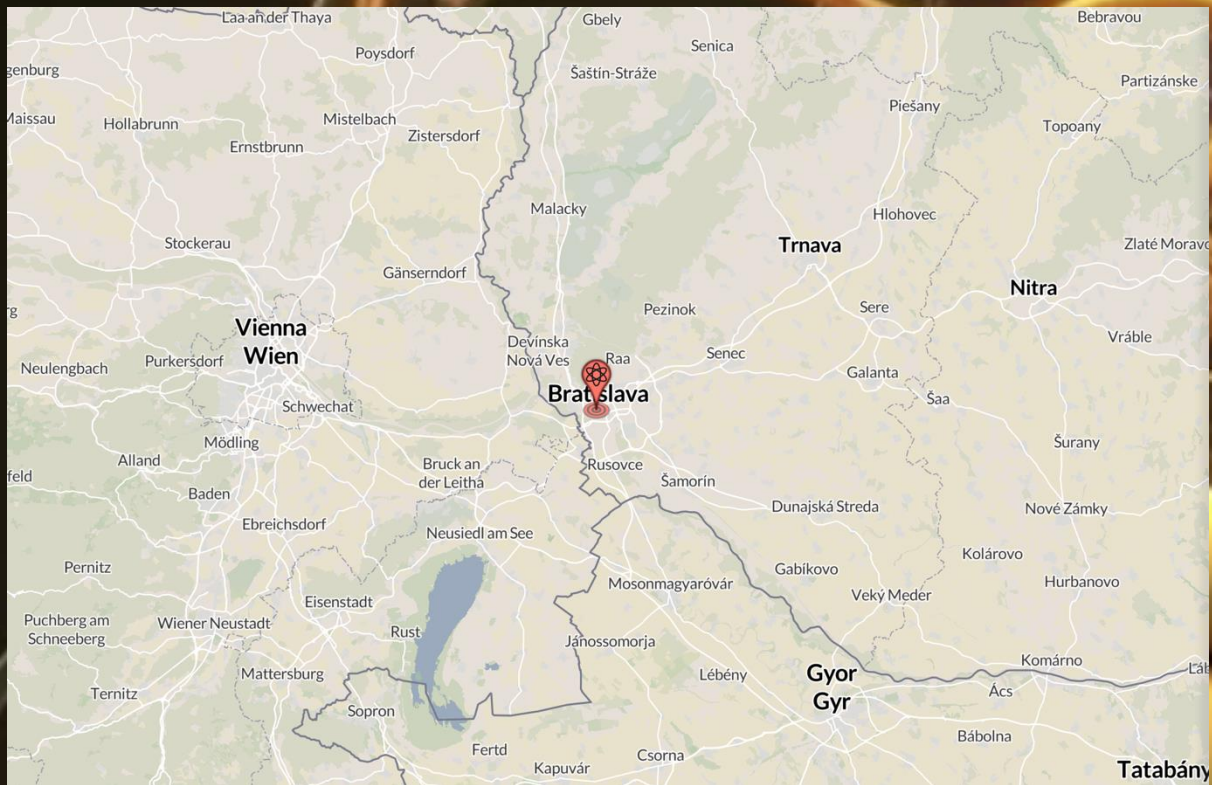
- **Spád:**
 - Airburst (W76, Yars, SS-18): Minimálny – radiácia klesne za dni.
 - Groundburst (Iskander): Vysoký spad – týždne až mesiace kontaminácie (napr. cézium-137, stroncium-90), rakovina, genetické poškodenia.
- **Infraštruktúra:**
 - Nemocnice, cesty, elektrina – zničené (najmä SS-18, Yars). W76-2 by mohlo zachovať okrajové časti funkčné.
- **Ekológia:** Dunaj kontaminovaný (Iskander), lesy (Malé Karpaty) spálené (Yars, SS-18).
- **Spoločnosť:** Panika, migrácia, kolaps Slovenska ako funkčného štátu (najmä pri 300+ kt).

Dopad odpálenia jadrovej zbrane v Bratislave

„Čo by bolo, keby...

- **Americká W76-2 (5 kt):** Centrum Bratislavy v troskách, ~20 000 mŕtvych – úder malý, ale zlý. Lokálna katastrofa – centrum padne, ale Slovensko prežije.
- **Americká W76-1 (90 kt):** ~150 000 mŕtvych – požiare všade. Pol mesta zničené.
- **Ruský Iskander (50 kt):** Podobne, ale prach – Trnava rádioaktívna. Iskander horší kvôli spádu až po Trnavu – 100 000 mŕtvych.
- **Ruský Yars (300 kt):** Bratislava zmizne, ~300 000 mŕtvych Apokalypsa – Bratislava vymazaná, región neobývatelný. – Trnava horí.
- **Ruský SS-18 (800 kt):** Nič nezostane, ~400 000 mŕtvych – aj Nitra v ruinách.

Dopad: Od ~10 % (W76-2) po ~90 % (SS-18) obyvateľov mŕtvych – malé zbrane chaos, veľké koniec civilizácie.



Čo znamená 1 kilotona?

Definícia: 1 kilotona (kt) výbušniny je jednotka energie, ktorá sa používa na vyjadrenie deštruktívnej sily výbuchu, ekvivalentná energii uvoľnenej výbuchom 1 000 ton (1 milión kg) trinitrotoluénu (TNT).

- Energeticky:

$$1 \text{ kt TNT} = 4,184 \times 10^{12} \text{ J} \quad (\text{alebo } 4,184 \text{ terajoulov})$$

- Táto hodnota sa najčastejšie používa v kontexte jadrových zbraní, kde sa meria výkon výbuchu (napr. *Little Boy* v Hirošime mal 15 kt, *Fat Man* v Nagasaki 21 kt).

Čo znamená 1 kilotona?

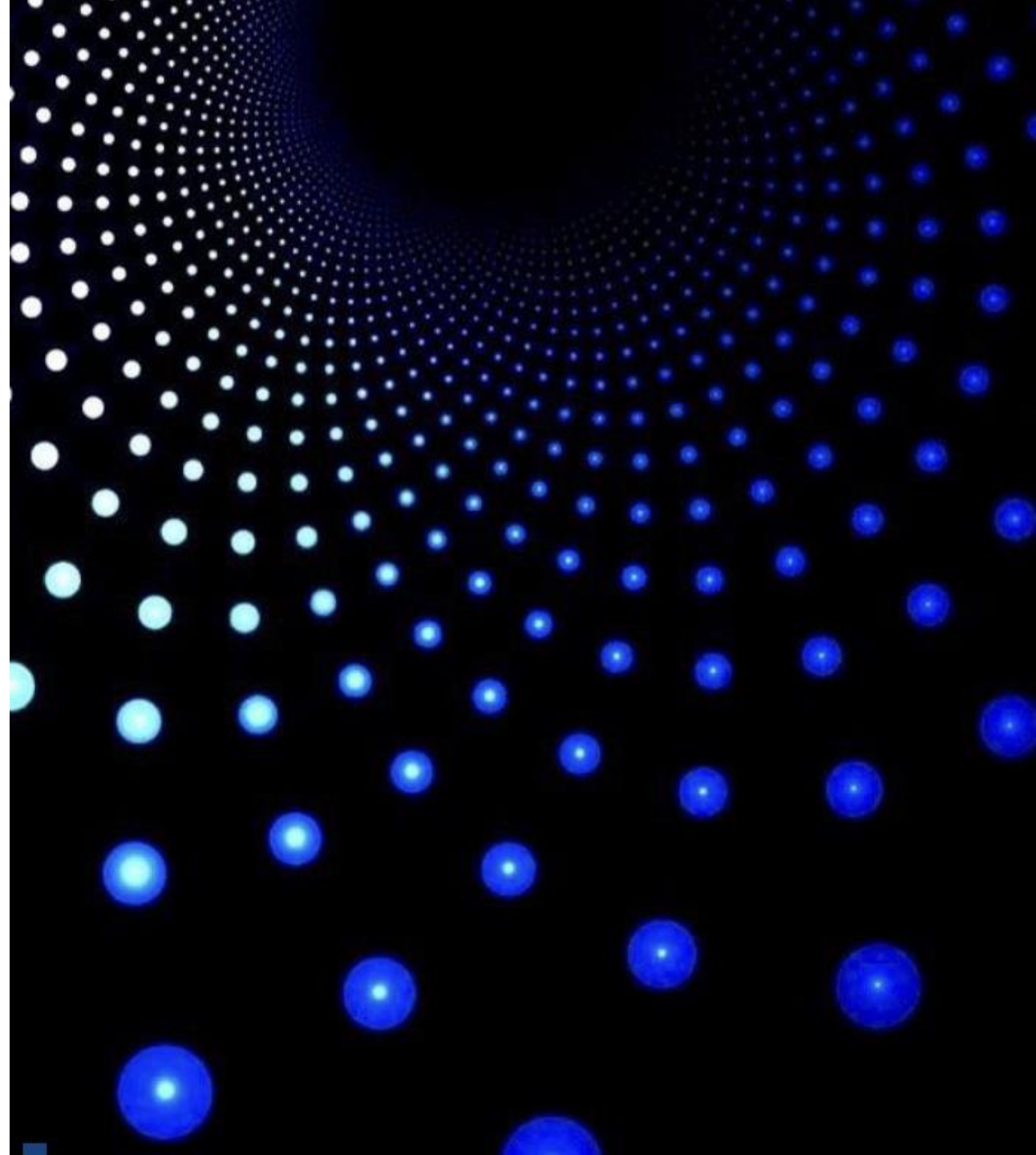
Jadrové zbrane sú fascinujúca technológia
– na jednej strane ukážka ľudského génia a fyzikálnej precíznosti,
- na druhej strane pripomienka obrovského deštrukčného potenciálu, ktorý dokážeme vytvoriť.

Zjednodušené porovnanie

- **1 kt výbušniny:** Mohla by zabiť **10 000–40 000 ľudí** v husto obývanej oblasti (a ešte viac pri dlhodobých následkoch).
- **1 kt energie:** Mohla by zásobovať **~592 000 ľudí** základnou energiou na **500 dní**, čím by podporila ich prežitie a základné potreby (alebo ~812 000 ľudí na 1 rok).

Aký nám teda jadrové zbrane ponúkajú odkaz ?

1. Jadrové zbrane boli vyrobené z ľudského strachu, ale paradoxne nám priniesli desaťročia mieru....
2. Ako vedľajšie produkty nám priniesli obrovské množstvo užitočných vecí, od ľahkého monitorovania a liečenia nášho zdravia, cez lacnú výrobu elektrickej energie, až po možnosť uplatnení v kozmických letoch.
3. Jadrové zbrane sú na rozdiel od umelej inteligencie iba technológie závislé od nášho ľudského rozhodovania, akým smerom budú (a či vôbec) použité, záleží výlučne na ľuďoch.





40.08 20

Ca

Calcium

55.85 26

Fe

Iron

$E=MC^2$

(ENERGY = MILK x COFFEE²)

99 Es Einsteinium (232)	59 Pr Praseodymium 140.907 65	99 Es Einsteinium (232)	16 S Sulfur 32.066	8 O Oxygen 15.9994
---	---	---	------------------------------------	------------------------------------



6 C Carbon 12	67 Ho Holmium 165	27 Co Cobalt 59	57 La Lanthanum 139	52 Te Tellurium 128
-------------------------------	-----------------------------------	---------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------

Marian.nanias@gmail.com

E-mail: marian.nanias@gmail.com

Ďakujem za Vašu pozornosť.

