Jáchymovský uran



2026

- Jáchymov patří k **nejvýznamnějším místům světových dějin uranu**. Zdejší **smolinec** poskytoval surovinu pro výrobu barev, přispěl k objevu polonia a radia a nepřímo také ke vzniku radonového lázeňství. Po druhé světové válce se jáchymovské doly staly významným dodavatelem uranu pro sovětský jaderný program a místem nucené práce politických vězňů. Tyto souvislosti dávají jáchymovskému uranu mimořádný přírodovědný, průmyslový i historický význam.
- Hlavním uranovým minerálem jáchymovského revíru je **uraninit**, tradičně nazývaný smolinec. Jde o černý, těžký, radioaktivní nerost se smolným leskem, tvořený převážně oxidem uraničitým. Obvykle vytváří celistvé nebo ledvinité agregáty ve výplních rudních žil; pro jáchymovské vzorky je charakteristický také výskyt v růžovém dolomitu.
- Jáchymovské ložisko patří mezi hydrotermální ložiska: rudní minerály se ukládaly z mineralizovaných roztoků pronikajících puklinami hornin. Uran je zde součástí složitého rudního systému, s nímž jsou spojeny také **stříbro, kobalt, nikl, bismut** a **arsen**. Právě proměnlivé složení rud umožňovalo, aby se hospodářský význam zdejšího hornictví v průběhu staletí měnil.
- Smolinec znali jáchymovští horníci již v 16. století, kdy město prožívalo rozmach těžby stříbra. Dlouho však neměl významnější využití. Surovina, která se později stala strategicky důležitou, tak původně představovala málo ceněnou součást stříbrných rud.
- Uran jako nový chemický prvek rozpoznal roku **1789** německý chemik **Martin Heinrich Klaproth** při studiu smolince. Získaná látka však byla sloučeninou uranu; samotný kovový uran připravil až francouzský chemik **Eugène-Melchior Péligot** v roce **1841**.

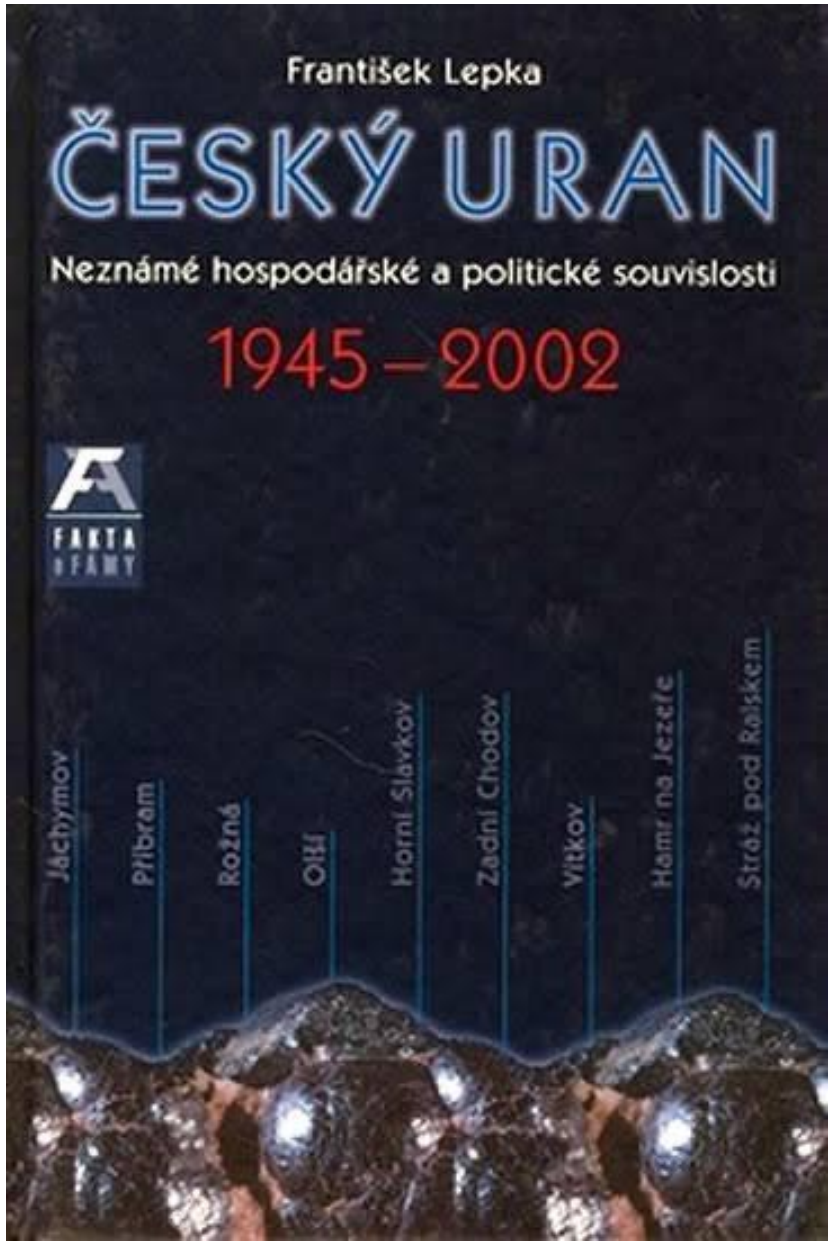
- První průmyslové využití uranu souviselo s jeho barevnými sloučeninami. **Uranové barvy** se používaly při výrobě skla a porcelánu, zejména pro žluté a zelené zbarvení. V Jáchymově se od 40. let 19. století začaly uranové rudy systematicky těžit, významně především v dole Svornost. V následujícím desetiletí se rozvinula průmyslová výroba barev podle postupu chemika Adolfa Patery. Uran tak získal hospodářskou hodnotu několik desetiletí předtím, než byla poznána jeho radioaktivita.
- **Přírodní radioaktivitu** objevil **Henri Becquerel** roku **1896** při výzkumu uranových sloučenin. Na jeho práci navázala **Marie Curie-Skłodowská**, která zkoumala záření různých látek a spolu s **Pierrem Curiem** hledala vysvětlení mimořádné aktivity některých minerálů. Jejich výzkum probíhal v Paříži.
- Jáchymovský smolinec a zbytky po jeho průmyslovém zpracování poskytly důležitou surovinu pro výzkum, který v roce **1898** vedl k objevu **polonia** a **radia**. V závěru původního oznámení objevu radia z 26. prosince 1898 autoři výslovně děkovali za dodávku 100 kilogramů zbytků po zpracování jáchymovského smolince. Uran byl z tohoto materiálu již odstraněn, zatímco další radioaktivní látky v něm zůstaly. Oznámení podepsali Pierre Curie, Marie Curie a Gustave Bémont.
- Z dosavadního výrobního odpadu se tím stala vyhledávaná vědecká surovina. Na počátku 20. století se v Jáchymově rozvinula také **výroba radiových solí**. Marie Curie město osobně navštívila v roce 1925, kdy sfárala i do dolu Svornost.
- Další významnou souvislostí bylo zjištění radioaktivity jáchymovských důlních vod. Roku **1906** zde vznikly první **radonové lázně** na světě. Hornictví tak umožnilo zpřístupnit podzemní vody, na nichž se založila nová hospodářská činnost města.

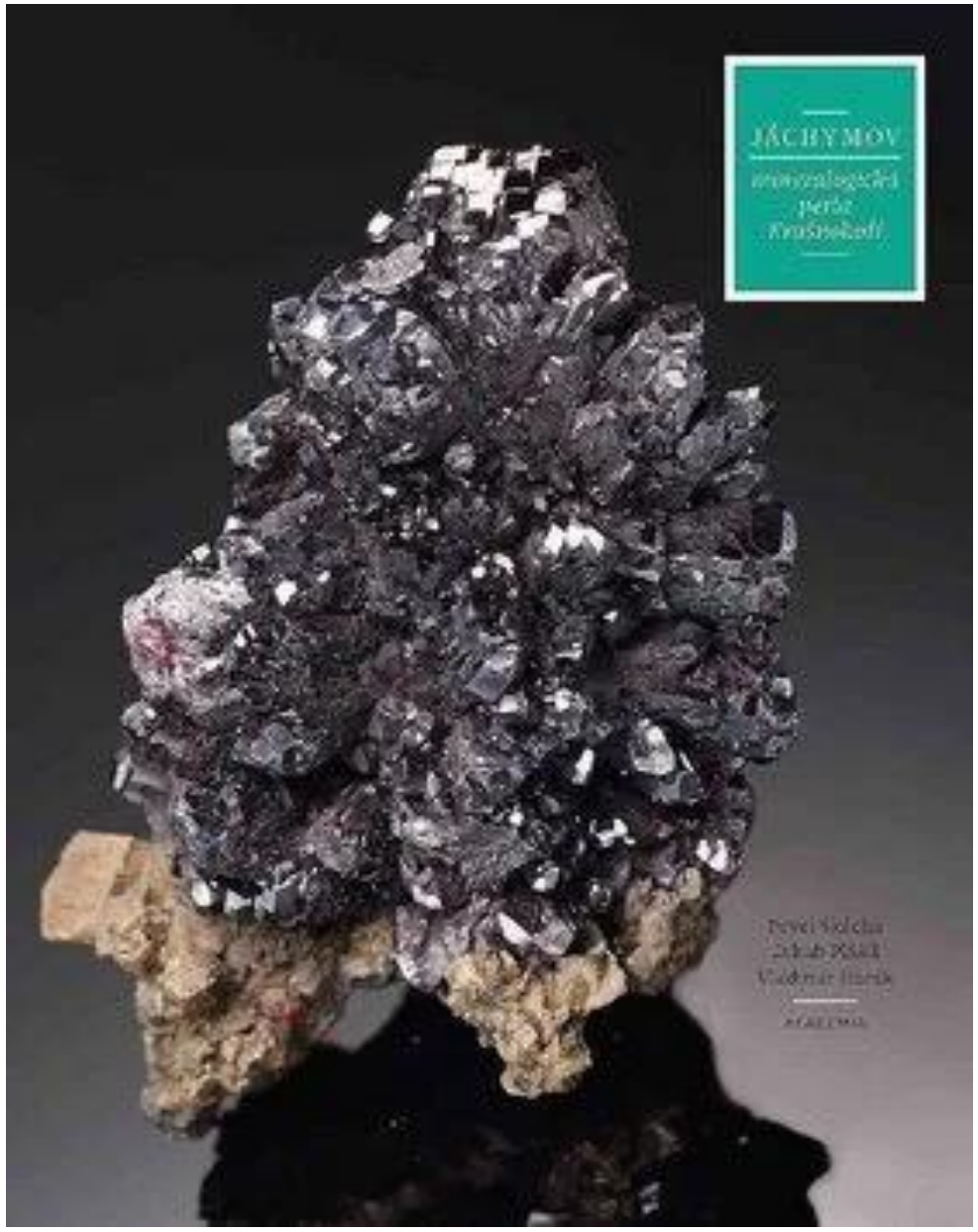
- Pro lázeňské využití má bezprostřední význam **radon**, radioaktivní plyn vznikající v přeměnové řadě uranu. Voda se jím obohacuje při kontaktu s horninovým prostředím. Uran, radium a radon jsou tedy různé chemické prvky, jejichž výskyt v jáchymovském podloží spolu souvisí.
- **Důl Svornost** dodnes slouží k jímání a dopravě radonové vody do lázeňských provozů. Jeho současné využití navazuje na dlouhou hornickou historii, přestože dobývání uranových rud již skončilo.
- Zásadní obrat přinesl konec druhé světové války. Dne 23. listopadu 1945 byla v Praze podepsána československo-sovětská dohoda o těžbě a dodávkách radioaktivních rud. Podle dohody a doprovodného protokolu připadala Sovětskému svazu naprostá většina vytěženého a zpracovaného radioaktivního materiálu. Počátek tohoto uspořádání tedy spadá již do roku **1945**.
- K 1. lednu 1946 vznikl **národní podnik Jáchymovské doly**. Poválečný provoz navázal na činné doly Rovnost, Svornost a Bratrství, následovaly rozsáhlé průzkumné a těžební práce. Působnost uranového průmyslu se postupně rozšířila na další oblasti Československa, takže název Jáchymovské doly získal širší význam než samotný jáchymovský revír.
- Jáchymovské dodávky se staly jedním ze surovinových zdrojů sovětského jaderného zbrojního programu. Těžba proto dostala mimořádnou politickou prioritu a prudce vzrostla potřeba pracovních sil.
- V uranových dolech pracovali civilní zaměstnanci i nesvobodné pracovní síly. V prvních poválečných letech byli nasazováni **němečtí váleční zajatci**. Následovali lidé internovaní v táborech nucených prací a soudně odsouzení vězni. Vedle politických vězňů zde byli také vězni kriminální a lidé odsouzení za válečnou kolaboraci.
- Od roku **1949** se rozvíjela soustava **nápravně pracovních táborů**. K místům spojeným s vězněním a nucenou prací patřily například Rovnost, Svornost, Nikolaj, Eliáš a Bratrství. Těžká práce, tvrdé zacházení a drsné klimatické podmínky učinily z Jáchymovska jeden ze symbolů komunistické perzekuce, známý jako „Jáchymovské peklo“. Poslední místní vězeňské tábory zanikly roku **1961**.

- Zvlášť nebezpečným pracovištěm byla **Rudá věž smrti v Dolním Žďáru u Ostrova**, spojená s táborem Vykmanov II, označovaným písmenem L. Zde se uranová ruda drtila, třídila a připravovala k odeslání do Sovětského svazu. Vězni přicházeli do bezprostředního styku s radioaktivním prachem.
- K dlouhodobým zdravotním rizikům práce v uranových dolech patřilo vdechování krátkodobých produktů přeměny radonu, které se zachycují v dýchacích cestách a ozařují jejich tkáně. Výzkum onemocnění horníků později významně přispěl k poznání vztahu mezi touto expozicí a **rakovinou plic**.
- Pro poválečnou těžbu v jáchymovském revíru se uvádí přibližně **7 200 tun uranu**. Tento údaj vyjadřuje množství uranu obsaženého v produkci; celková hmotnost vytěžené rudy byla podstatně větší. Rozsah zásahů do podzemí dokládá údaj o **29 vyhloubených šachtách** a více než **1 100 kilometrech vyražených chodeb**, který uvádí přehled hornického dědictví Krušnohoří.
- Těžba se od druhé poloviny 50. let postupně utlumovala a v roce **1964** skončila. Důl Svornost byl předán lázním pro zajišťování radonové vody. Zánik vězeňských táborů a ukončení těžby tedy představovaly dvě časově odlišné události.
- Historii jáchymovského uranu dnes připomínají důlní stavby, štoly, odvaly, pozůstatky táborů i pamětní místa. Naučná stezka Jáchymovské peklo propojuje místa někdejších dolů a pracovních táborů; s hornictvím a osudy vězňů seznamuje také expozice ve **Štole č. 1**.
- Zvláštní pokračování má **důl Bratrství**: část jeho podzemních prostor byla roku 1974 upravena na **úložiště nízkoaktivních a středněaktivních odpadů** obsahujících přírodní radionuklidy.
- Hornická krajina Jáchymov a Rudá věž smrti jsou od roku **2019** součástmi **památky UNESCO Hornický region Erzgebirge/Krušnohoří.** Jejich ochrana zahrnuje technické památky i krajinu, která uchovává doklady proměn hornictví, vědeckých objevů a nucené práce.

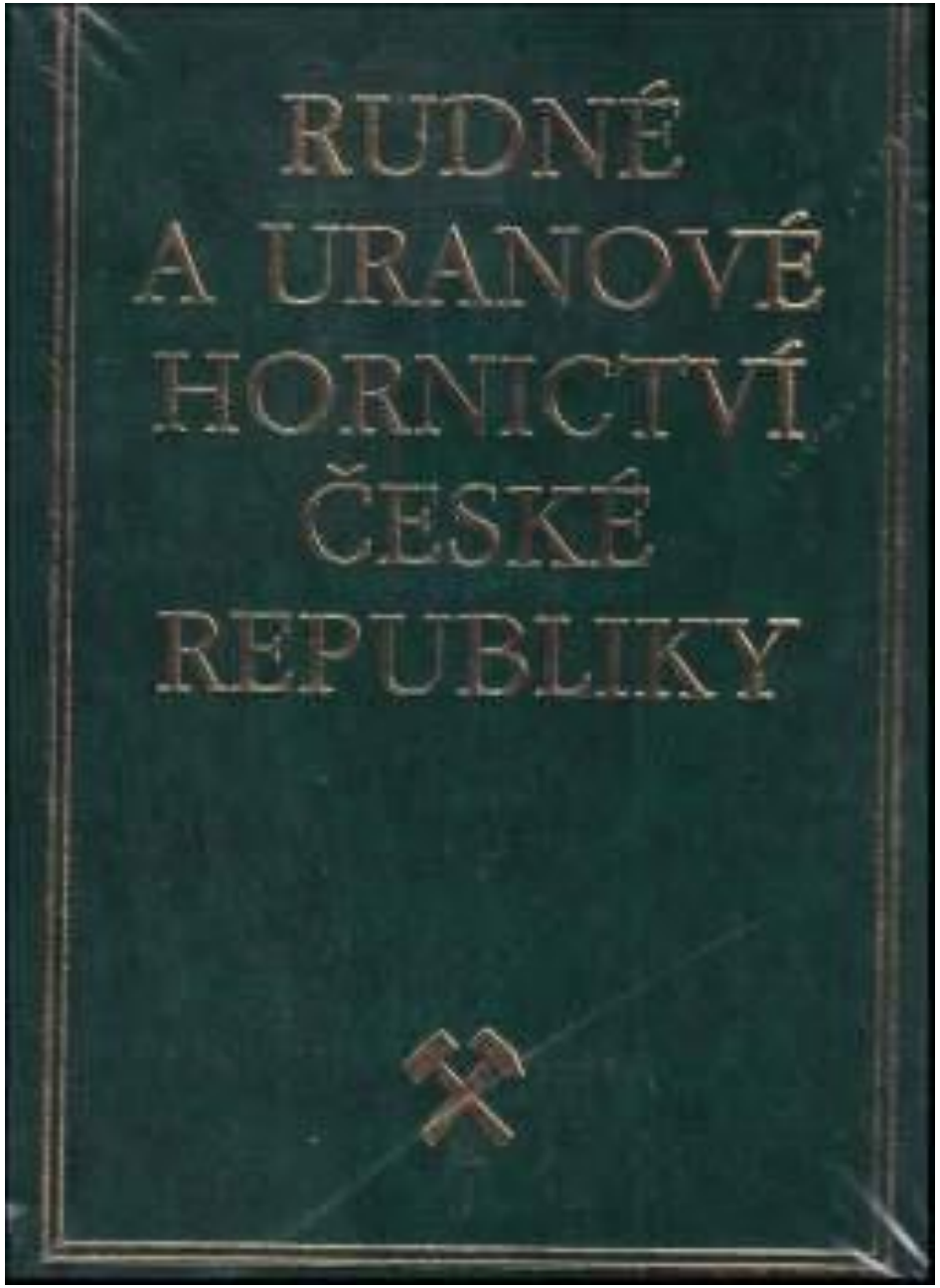
- Využití jáchymovského prostoru, bohatého na uranové rudy, zásadním způsobem ovlivnila „***Dohoda mezi vládou Svazu sovětských socialistických republik a vládou Československé republiky o rozšíření těžby rud a koncentrátů v Československu, obsahujících radium a jiné radioaktivní prvky, jakož i o jejich dodávkách Svazu sovětských socialistických republik***“. K této dohodě došlo 23. listopadu 1945.
- První výbuch vlastní jaderné bomby uskutečnil Sovětský Svaz 29. září **1949**. Země se tím strategicky vyrovnala Spojeným státům americkým, které se coby jaderná velmoc etablovaly již na konci druhé světové války svržením atomových bomb na japonská města Hirošimu a Nagasaki.
- Sovětský svaz byl v prvních poválečných letech zemí s vyčerpanými lidskými i materiálními zdroji. Byl proto významně závislý na dodávkách ze zahraničí. Kromě jiného z Československa (cca 20 %) a také ze sovětské okupační zóny Německa. Ta se podílela na krytí sovětské potřeby z více než jedné poloviny. Také prudký rozvoj sovětského jaderného komplexu koncem 40. a počátkem 50. let by nebyl myslitelný bez československé pomoci. A nutno v této souvislosti dodat, že se na tomto rozvoji nuceně podíleli i političtí vězni. Bylo mezi nimi také mnoho někdejších příslušníku armádních složek, vojáků, kteří ještě před pár lety bojovali společně se Sovětským Svazem proti nacistům. Bez jejich masového nasazení by tak rozsáhlá těžba uranových rud na Jáchymovsku nebyla vlastně ani možná.
- Ke znatelnému nárůstu těžby došlo již v roce 1947, ještě před únorovým převratem a převzetí moci komunisty. Zatímco v roce 1946 bylo vytěženo **18 tun** uranu, v roce 1946 bylo vytěženo **103 tun**. SSSR již nedostával smolinec, ale k obohacování rudy docházelo přímo na Jáchymovsku. Investice do rozvoje těžby uranové rudy v požadovaném rozsahu vysoko překračovaly možnosti dvouletého hospodářského plánu, a tak Sovětský svaz poskytl bezúročnou půjčku, od roku 1950 splatnou v deseti letech dodávkami uranové rudy.
- Podle původních variant (minimální, střední a maximální) z roku 1949 se měla těžba uranové rudy v Československu pohybovat **od 700 tun uranu do 2 000 tun**, investice od 3 do 8,5 miliard korun a zaměstnáno mělo být **od 15 000 zaměstnanců do 57 000**. Vzhledem k nárůstu těžby nemohly být požadavky uranových dolů na horníky kryty náborem. Pracovali zde nejprve horníci německé národnosti, kteří byli vyjmuti z odsunu, poté byli využíváni němečtí váleční zajatci - ti však museli podle mezinárodních dohod opustit Československo do konce roku 1949.

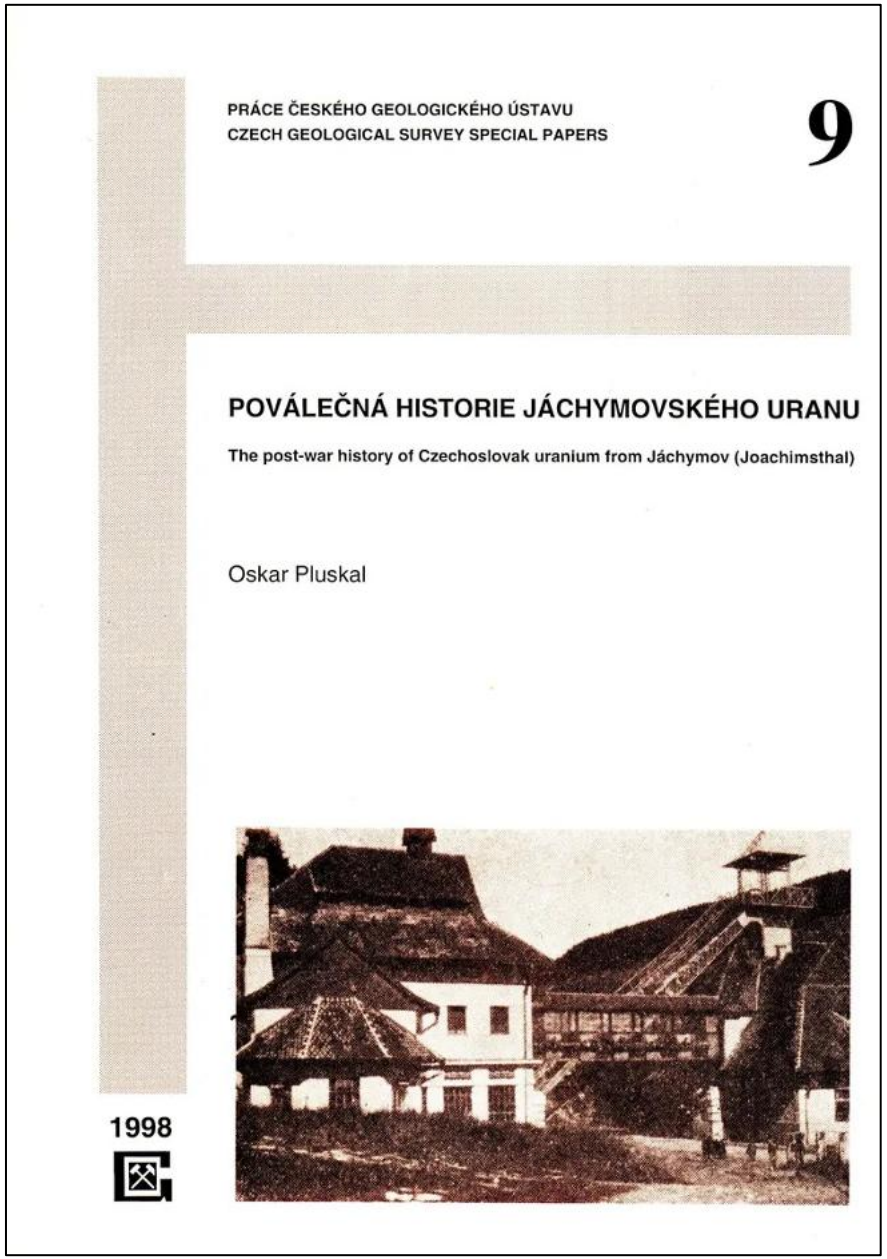
- K zabezpečení pracovních sil byl proto prováděn organizovaný nábor, na němž se podílely odborové organizace. Průmyslové podniky měly za povinnost vyslat určitý počet pracovníků na dlouhodobou brigádu do jáchymovských dolů. Ti obdrželi řadu výhod, např. poměrně vysoké příjmy, hornický a k tomu ještě zvláštní „jáchymovský“ příplatek, dále možnost nákupu zboží ze SSSR a další.
- Druhým zdrojem pracovních sil byli vězni. V rámci akce D (později přejmenované na Ostrov, podle města ležícího nedaleko Jáchymova) tam bylo odsunuto více než 6 000 především politických vězňů, později i kriminální vězni. K 1. lednu 1950 tak bylo v jáchymovských dolech už asi 4 000 vězňů, z toho přibližně 40 % politických! Od října 1949 byly na Jáchymovsku také zřizovány tábory nucené práce, první v lokalitě Jáchymov-Vršek. Následovaly Nikolaj, Eliáš, Eduard, Svornost, Mariánská, Prokop, Svatopluk, Rovnost a další.
- Snížení podílu politických vězňů a postupné propouštění kriminálních vězňů po výkonu trestu vedlo ke kritickému úbytku pracovníků. Proto byli do Jáchymova opět ve zvýšené míře posíláni političtí vězni, a to i z těch kategorií, které dříve nesměly být na Jáchymovsko odesílány - tj. osoby vojenské, duchovní, Svědci Jehovovi, usvědčení agenti a další.
- V roce 1949 došlo k několika pokusům o hromadný útěk. V červenci utíkalo 19 vězňů z tábora v Horním Slavkově, pět vězňů z tábora Eliáš. Z tábora u Horního Slavkova uteklo 14. října 1951 dvanáct vězňů. Při útěku byl zastřelen jeden dozorce a další byl zraněn; pět vězňů bylo zastřeleno, pět dopadeno a dvěma se útěk podařil. Těla zastřelených vězňů byla během táborového apelu vystavena pro výstrahu.
- V jáchymovských dolech byly velmi obtížné životní podmínky. Způsob těžby byl zastaralý a fyzicky velmi náročný, chyběla jakákoli mechanizace. Špatné pracovní podmínky byly znásobeny skutečností, že odsouzení jako horníci neměli žádné zkušenosti, bezpečnostní opatření při práci byla na velmi nízké úrovni. Vězni byli postihováni množstvím různých trestů za banální přestupky. Projevovalo se to ve velkém počtu smrtelných úrazů a zranění. Přidružily se i naprosto katastrofální hygienické podmínky, nedostatečná strava a těžké poškození zdraví způsobené ionizujícím zářením.

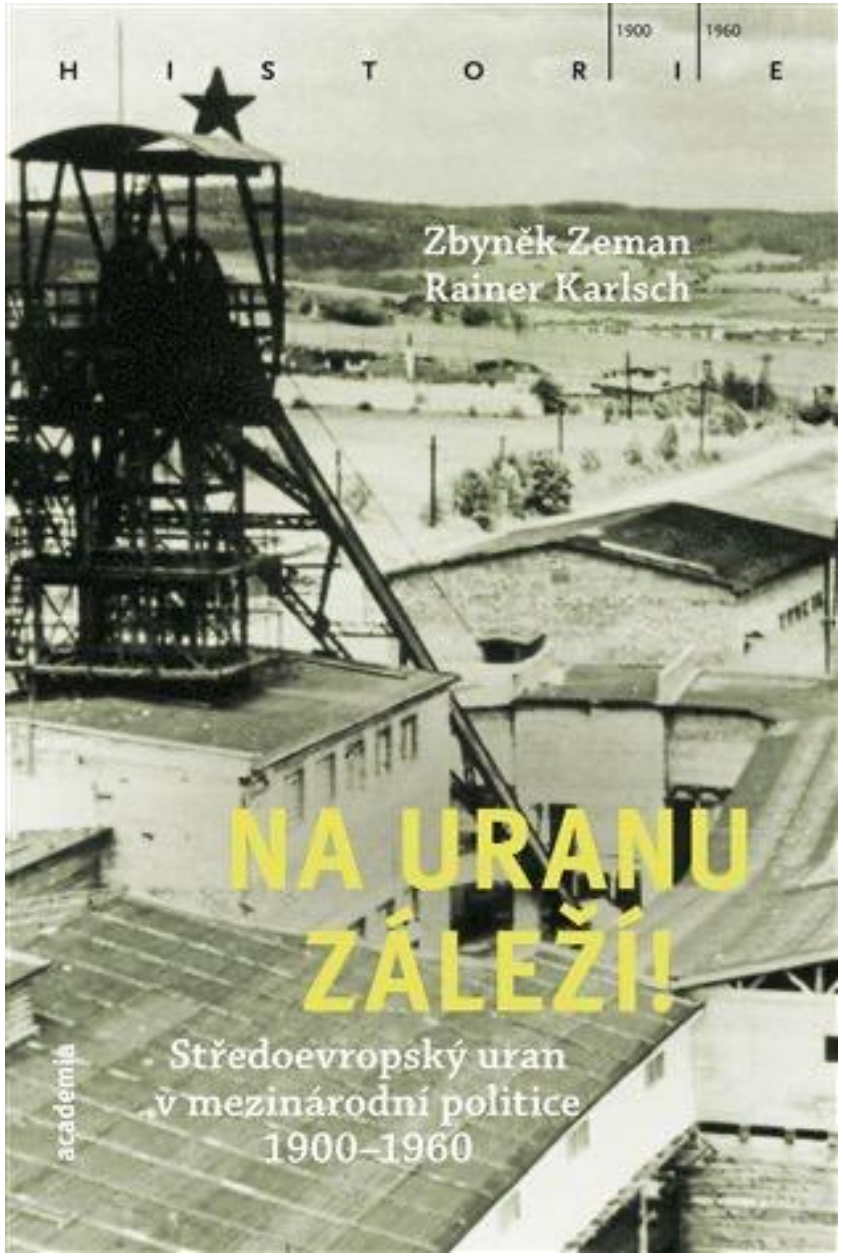

František Lepka
ČESKÝ URAN
Neznámé hospodářské a politické souvislosti
1945 – 2002
FAKTA A FAMY
Jáchymov
Příbram
Rožná
Olší
Horní Slavkov
Zadní Chodov
Vítkov
Hamr na Jezeře
Stráž pod Ralskem

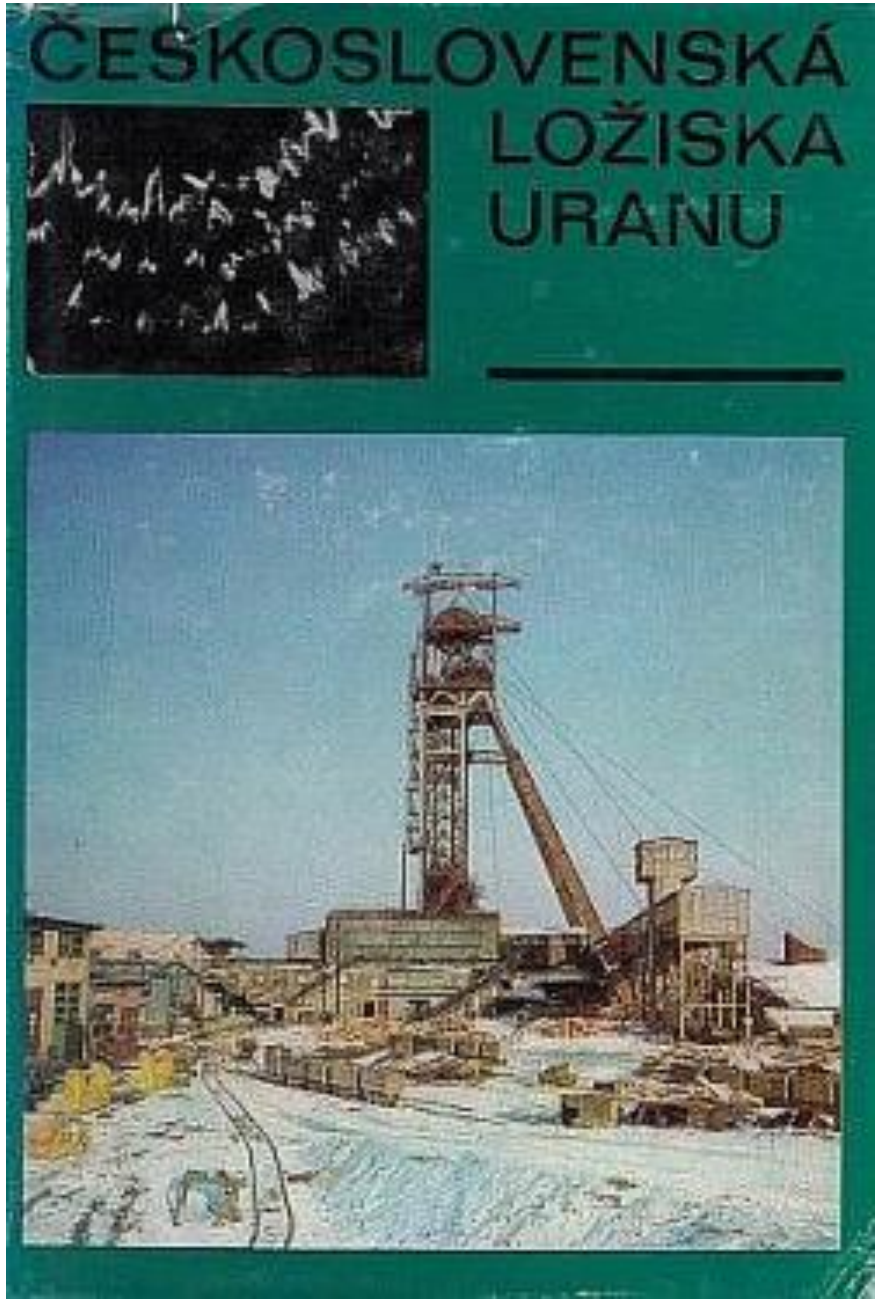

JÁCHYMOV

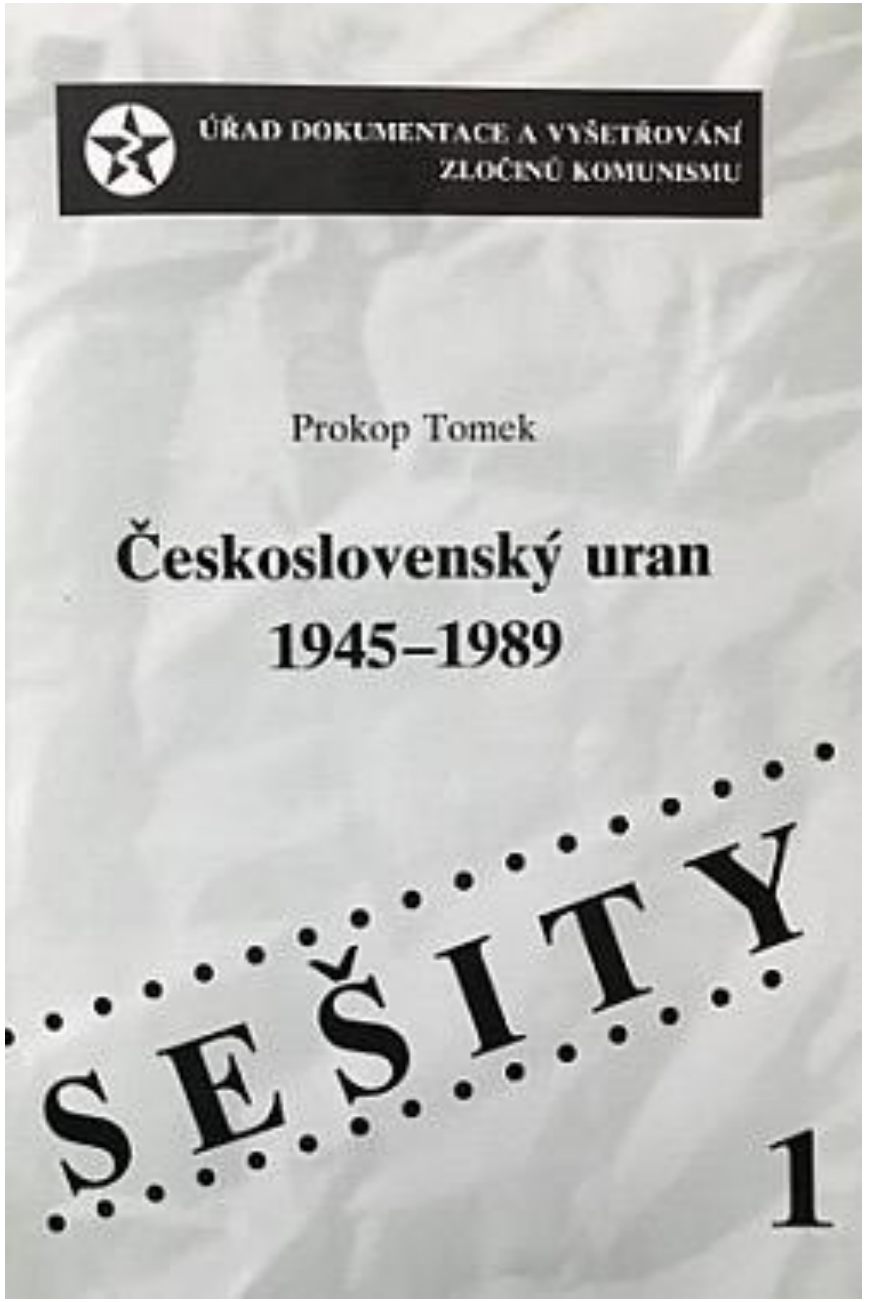

František Bártík
ZEMŘELÉ NESVOBODNÉ PRACOVNÍ SÍLY
v oblastech produkce uranové rudy 1946 až 1986
HORNICKÉ MUZEUM PŘÍBRAM

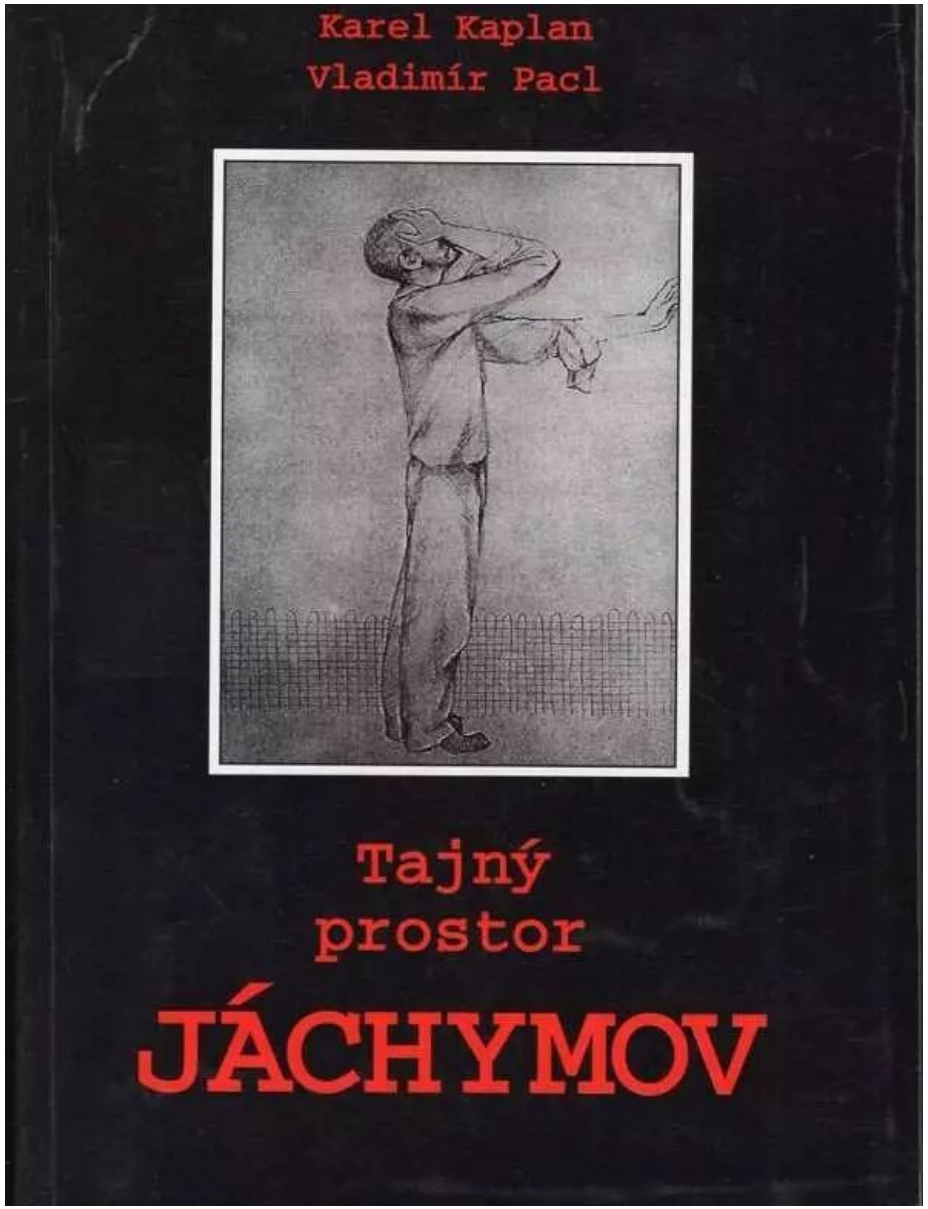

RUDNÉ A URANOVÉ HORNICTVÍ ČESKÉ REPUBLIKY

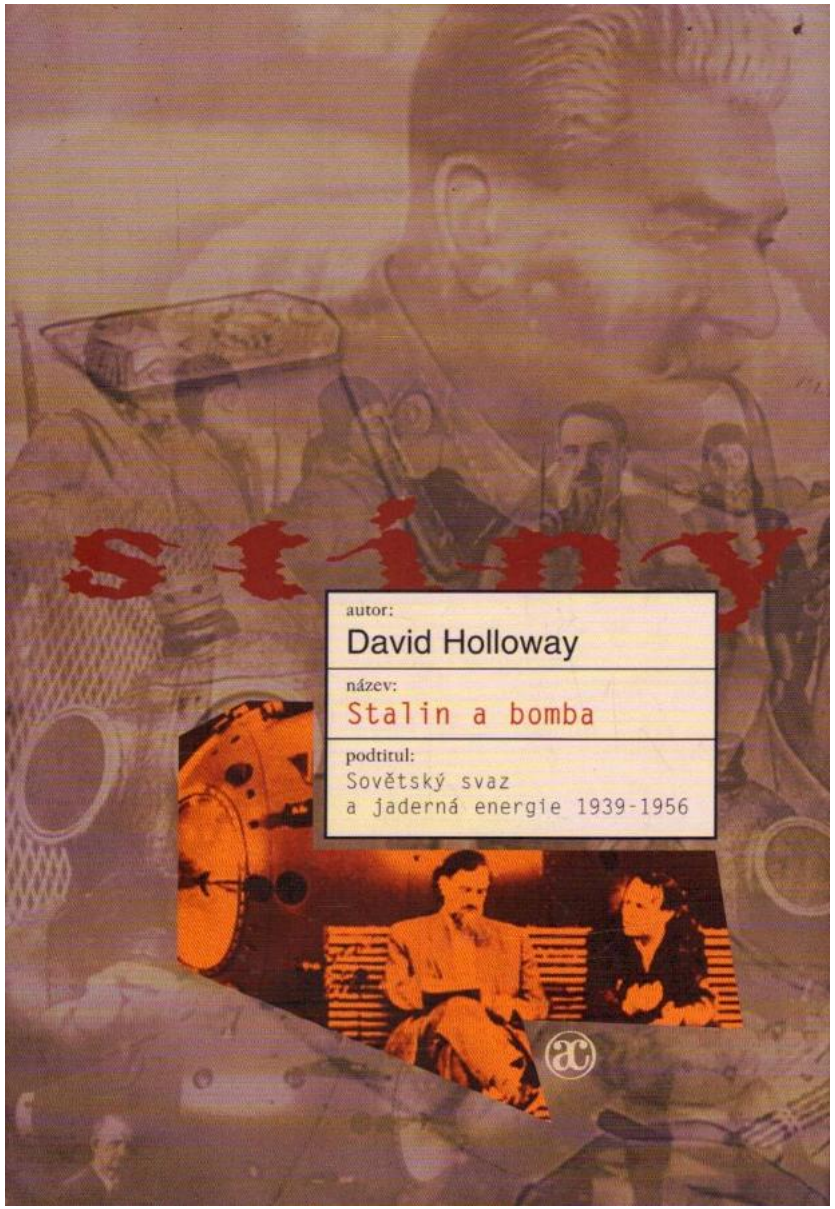

PRÁCE ČESKÉHO GEOLOGICKÉHO ÚSTAVU
CZECH GEOLOGICAL SURVEY SPECIAL PAPERS
9
POVÁLEČNÁ HISTORIE JÁCHYMOVSKÉHO URANU
The post-war history of Czechoslovak uranium from Jáchymov (Joachimsthal)
Oskar Pluskal
1998


H I S T O R I E
1900
1960
Zbyněk Zeman
Rainer Karlsch
NA URANU ZÁLEŽÍ!
Středoevropský uran v mezinárodní politice 1900–1960
academia

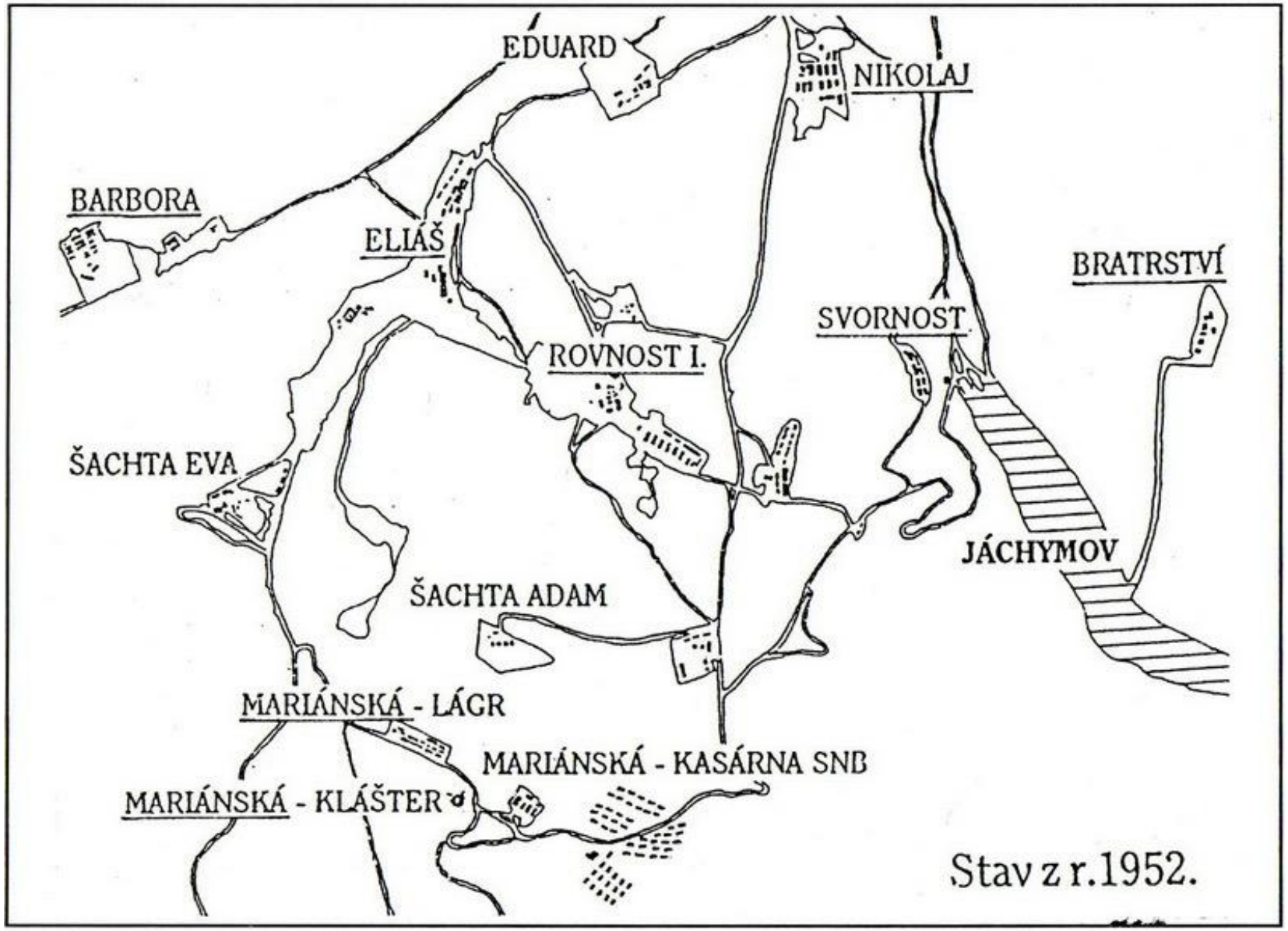

ČESKOSLOVENSKÁ
LOŽISKA
URANU

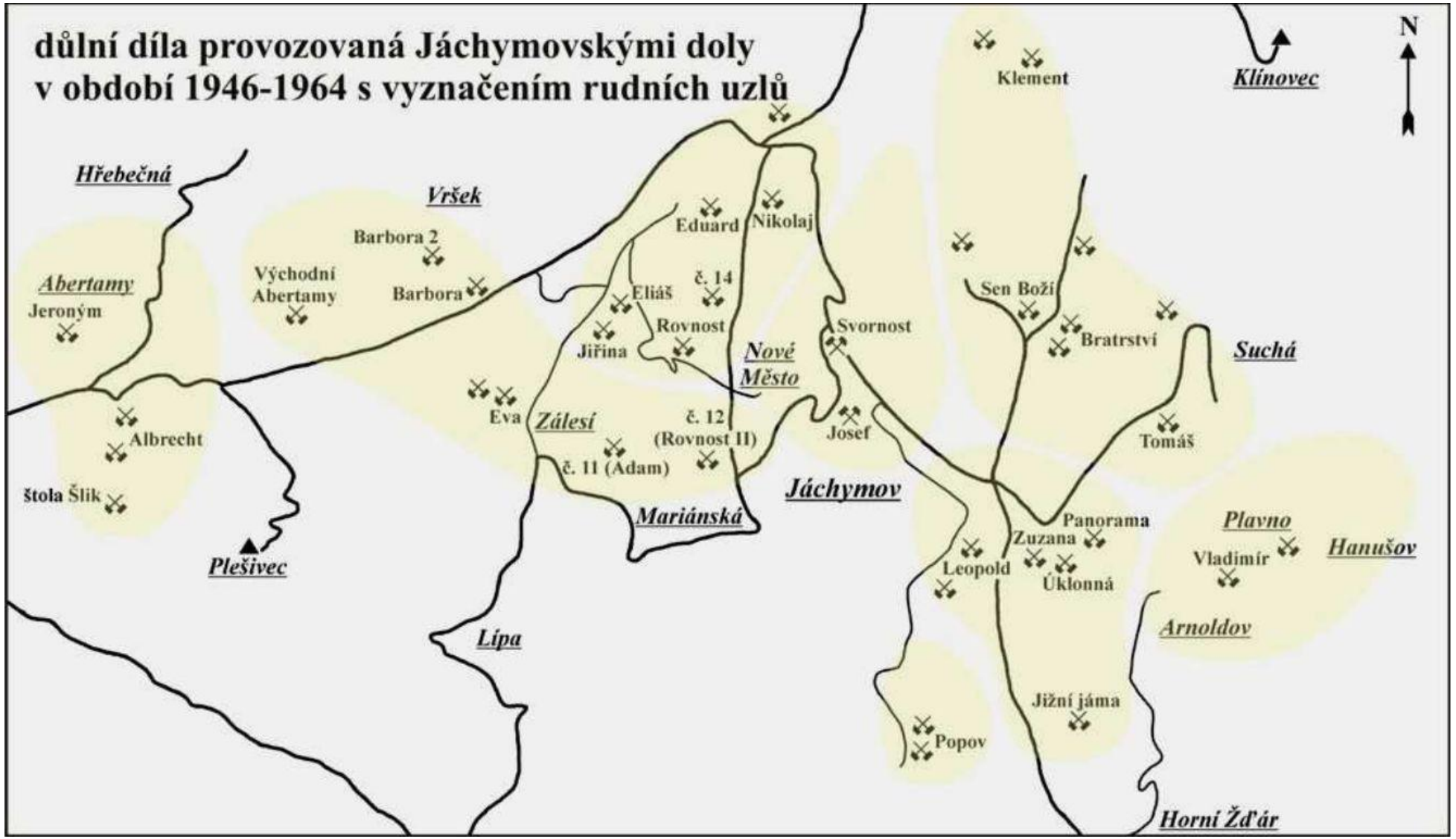

ÚŘAD DOKUMENTACE A VYŠETŘOVÁNÍ
ZLOČINŮ KOMUNISMU
Prokop Tomek
Československý uran
1945–1989
SEŠITY
1

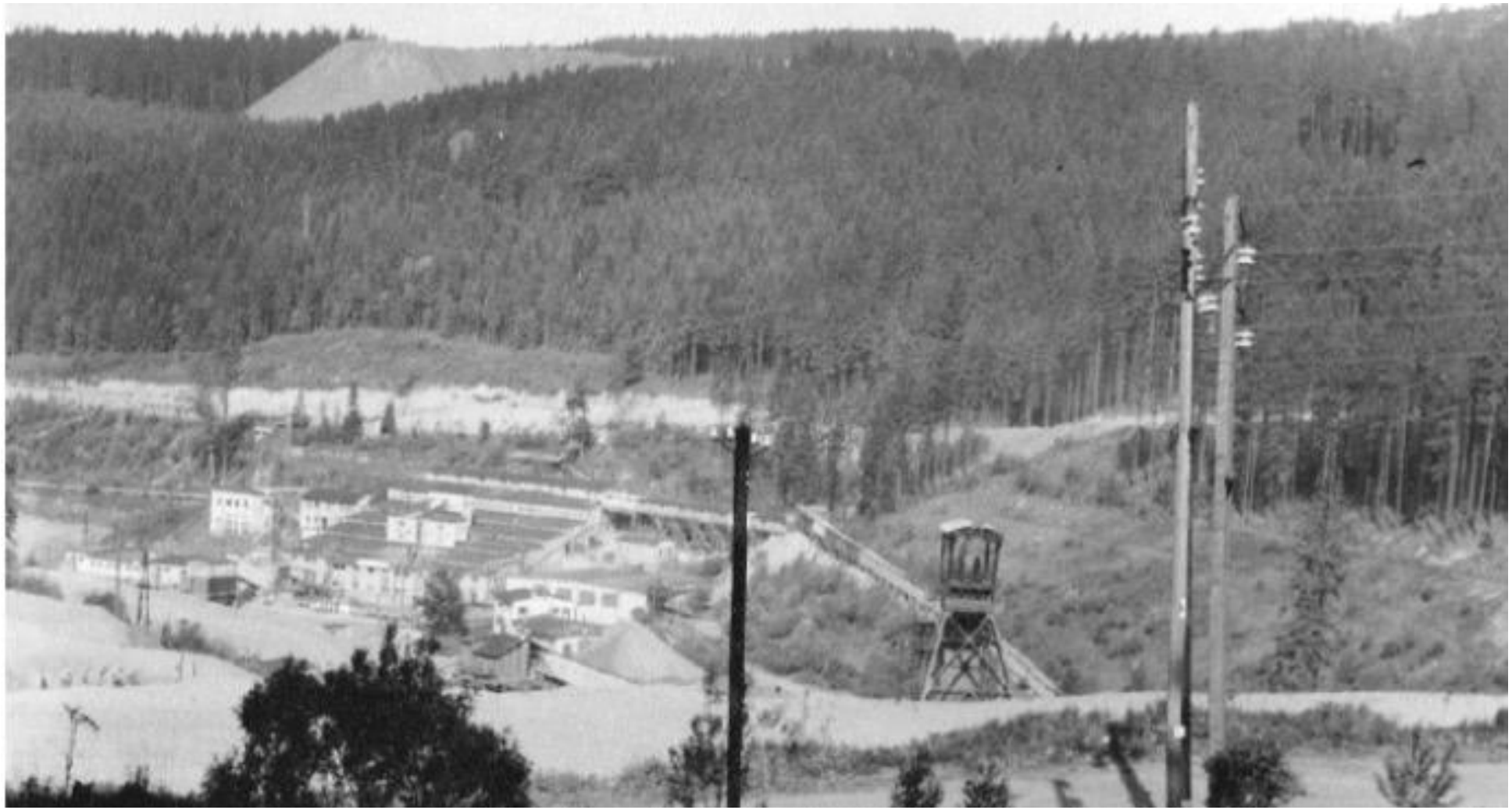

Karel Kaplan
Vladimír Pacl
Tajný
prostor
JÁCHYMOV


stíny
autor:
David Holloway
název:
Stalin a bomba
podtitul:
Sovětský svaz
a jaderná energie 1939-1956

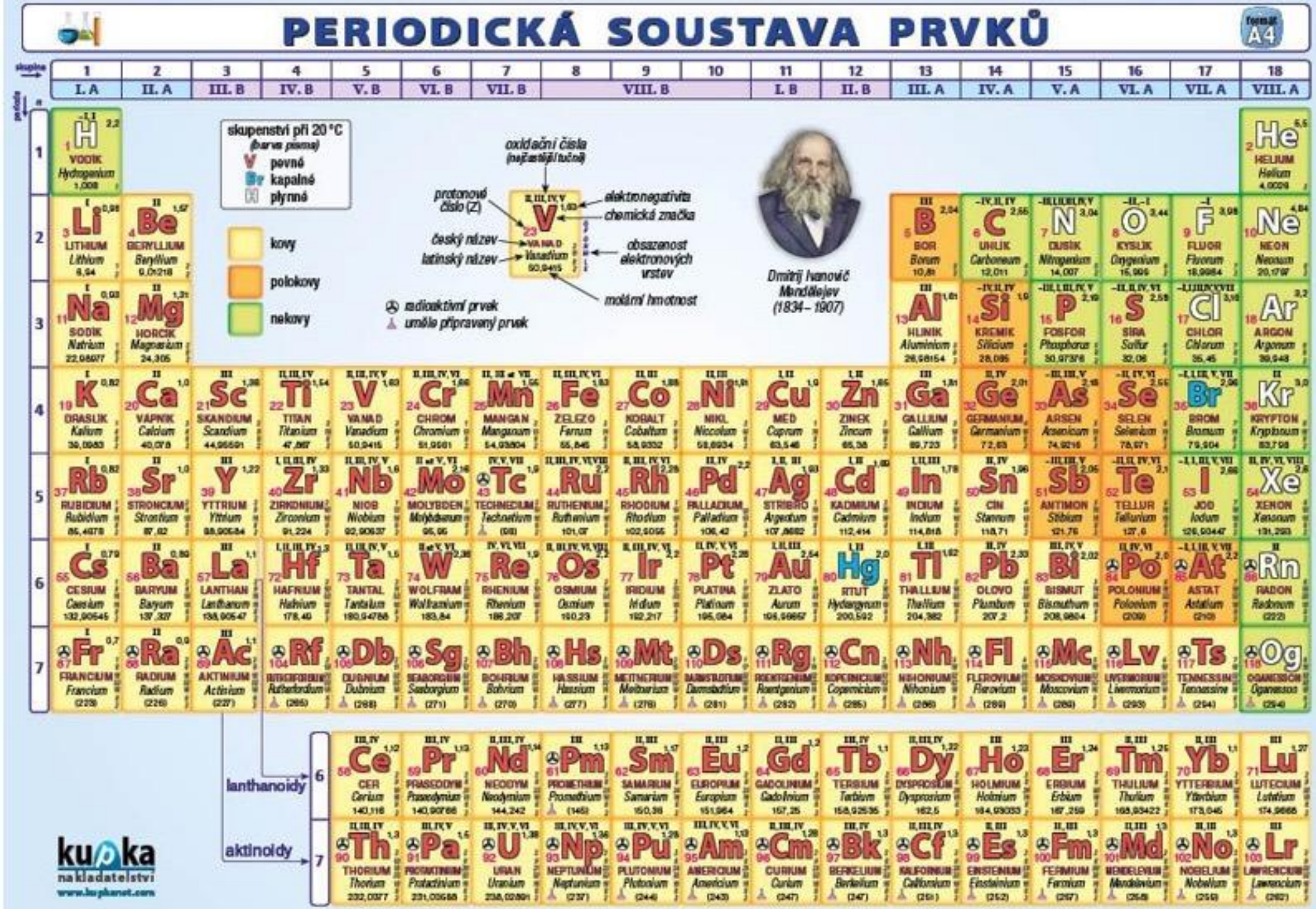



EDUARD
NIKOLAJ
BARBORA
ELIÁŠ
BRATRSTVÍ
SVORNOST
ROVNOST I.
ŠACHTA EVA
JÁCHYMOV
ŠACHTA ADAM
MARIÁNSKÁ - LÁGR
MARIÁNSKÁ - KASÁRNA SNB
MARIÁNSKÁ - KLÁŠTER
Stav z r.1952.

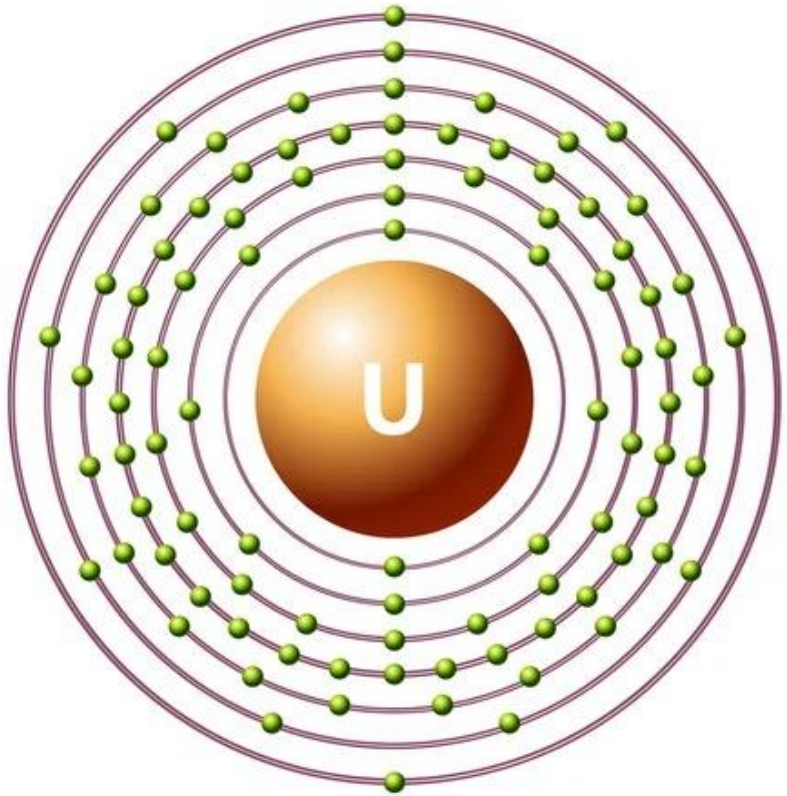

důlní díla provozovaná Jáchymovskými doly
v období 1946-1964 s vyznačením rudních uzlů
N
Klínovec
Klement
Hřebečná
Vršek
Abertamy
Jeroným
Barbora 2
Východní
Abertamy
Barbora
Eduard
Nikolaj
Eliáš
č. 14
Rovnost
Jiřina
Nové
Město
Svornost
Sen Boží
Bratrství
Suchá
Eva
Zálesí
č. 12
(Rovnost II)
č. 11 (Adam)
Josef
Tomáš
Albrecht
štola Šlik
Jáchymov
Mariánská
Plešivec
Panorama
Zuzana
Úklonná
Leopold
Plavno
Vladimír
Hanušov
Arnoldov
Lípa
Jižní jáma
Popov
Horní Žďár






PERIODICKÁ SOUSTAVA PRVKŮ
formát A4
skupina
1 I. A
2 II. A
3 III. B
4 IV. B
5 V. B
6 VI. B
7 VII. B
8 9 10 VIII. B
11 I. B
12 II. B
13 III. A
14 IV. A
15 V. A
16 VI. A
17 VII. A
18 VIII. A
perioda n
skupenství při 20 °C
(barva písma)
V pevné
Br kapalné
H plynné
kovy
polokovy
nekovy
oxidační čísla
(nejčastější/tučná)
protonové číslo (Z)
český název
latinský název
elektronegativita
chemická značka
obsazenost elektronových vrstev
molární hmotnost
radioaktivní prvek
uměle připravený prvek
Dmitrij Ivanovič Mendělejev
(1834–1907)
lanthanoidy
aktinoidy
kupka
nakladatelství
www.kupkanet.com

92 **Uranium** U



Atomic mass: 238.02

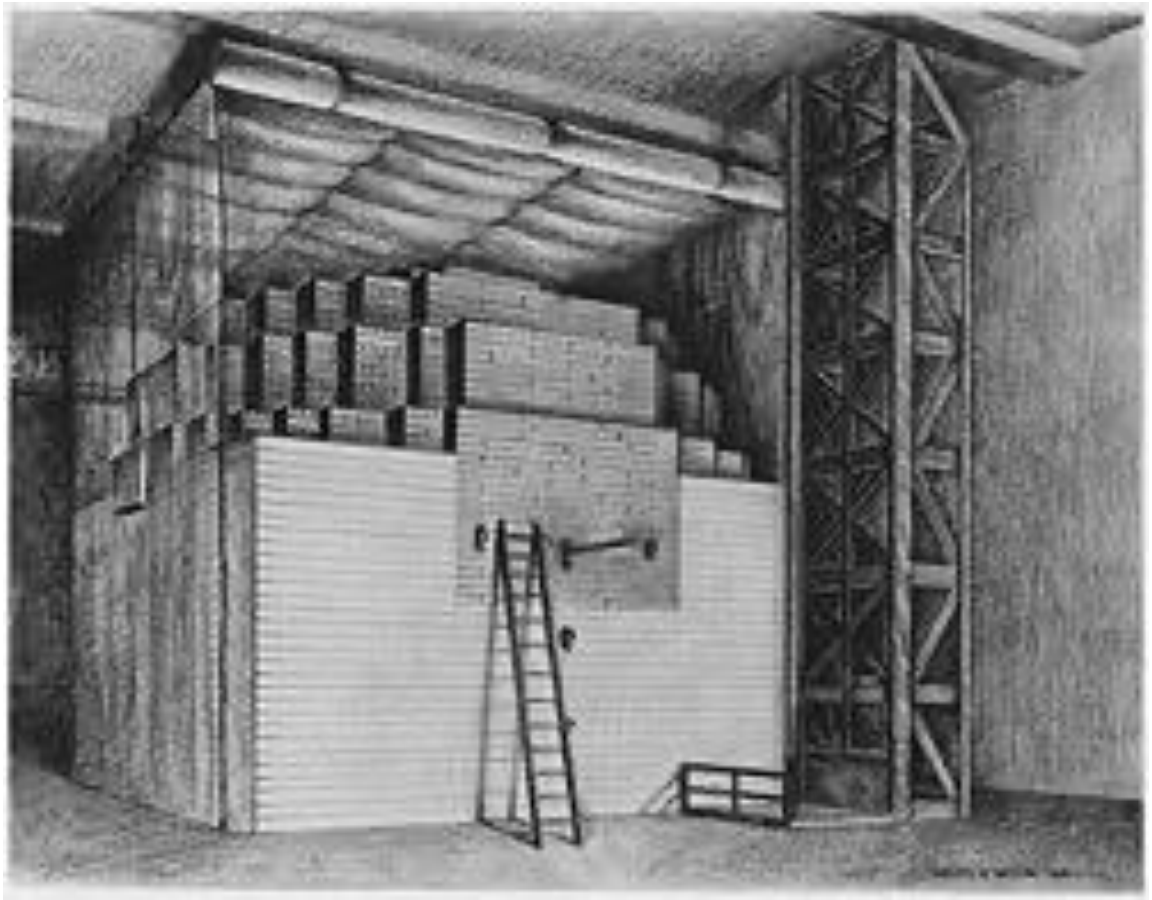
Electron configuration: 2, 8, 18, 32, 21, 9, 2


30
40
50
60

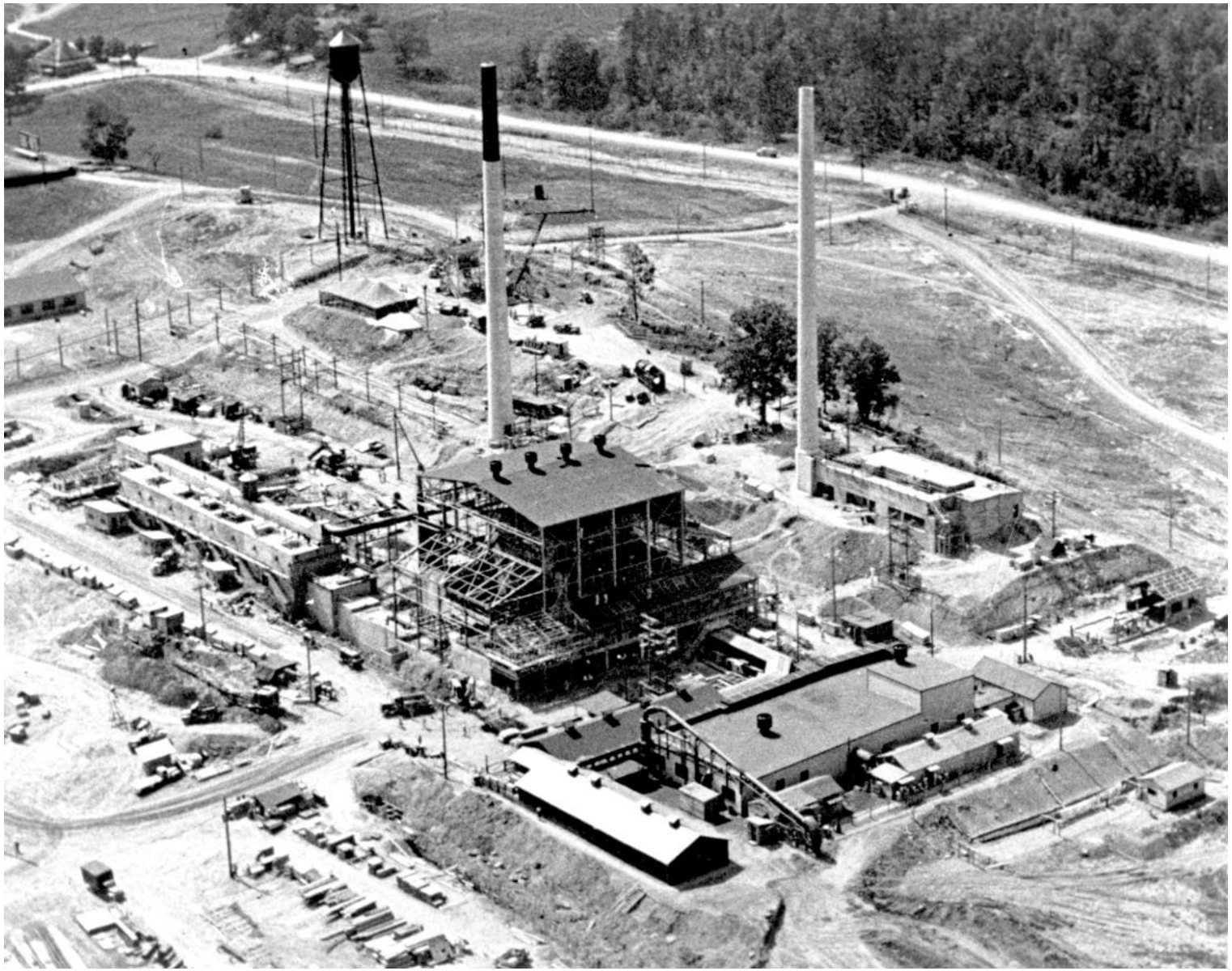



2068

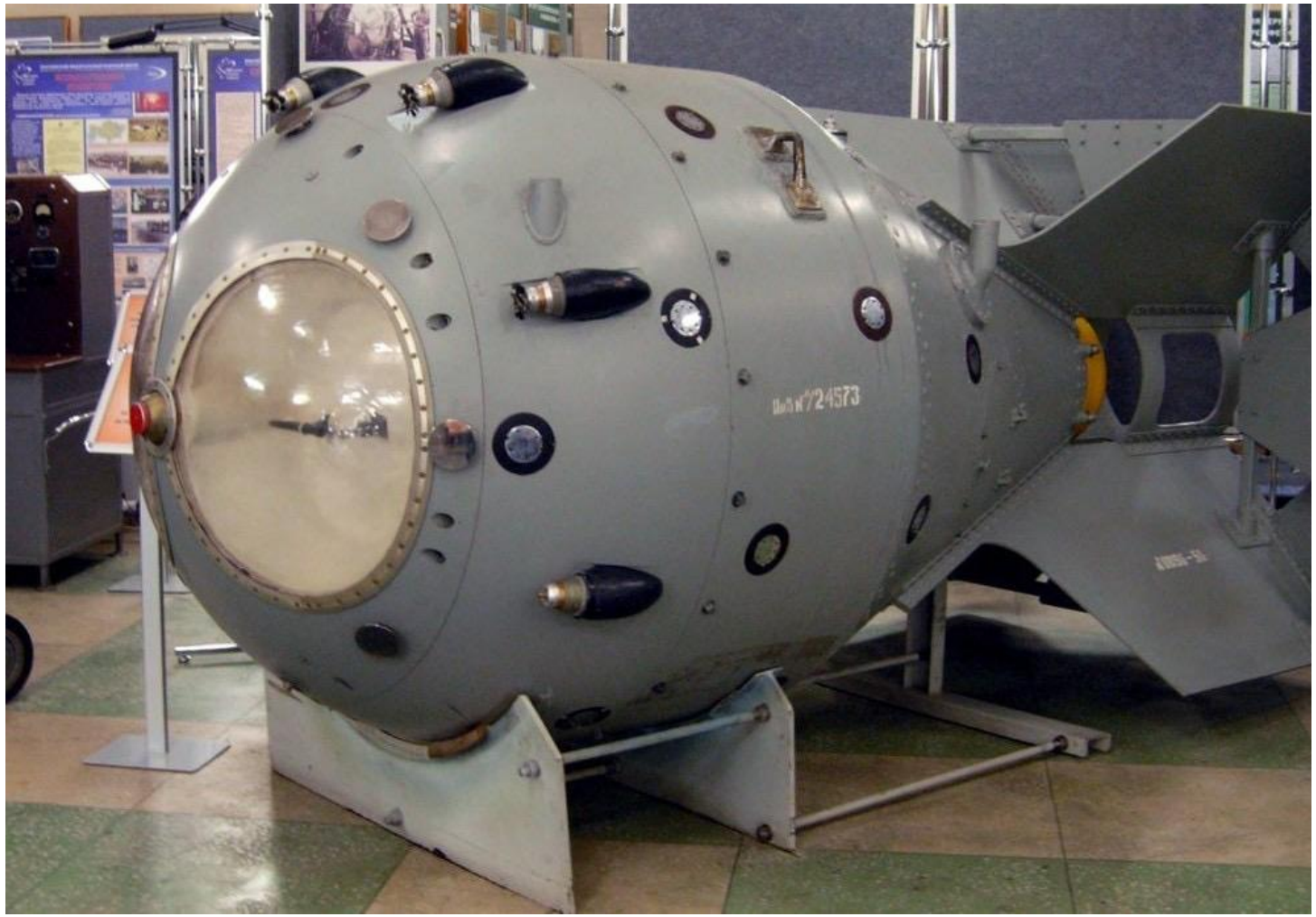




Experimentální jaderný reaktor (Chicago Pile-1 (nebo též CP-1)
první jaderný reaktor na světě – pro ilustraci



Grafitový reaktor X-10 (Oak Ridge, Tennessee) – pro ilustraci



RDS-1 (rusky РДС-1; «изделие 501» – produkt "501"; атомный заряд «1-200» – atomový náboj "1-200", první záblesk – Первая молния (pervaja molnija), na západě jako Joe-1 v odkazu na Stalina) byla první sovětská atomová puma. Byla odpálena 29. srpna 1949, 7:00 hodin v semipalatinském jaderném polygonu na území dnešního Kazachstánu. Síla pumy byla ekvivalentní síle 22 kilotun TNT, její délka byla 3,7 m, průměr 1,5 m, a hmotnost 4,6 tuny, čímž byla velmi podobná americké pumě Fat Man, shozené na japonské město Nagasaki. K jejímu sestrojení byla významně použita jáchymovská uranová ruda sloužící k výrobě plutonia.



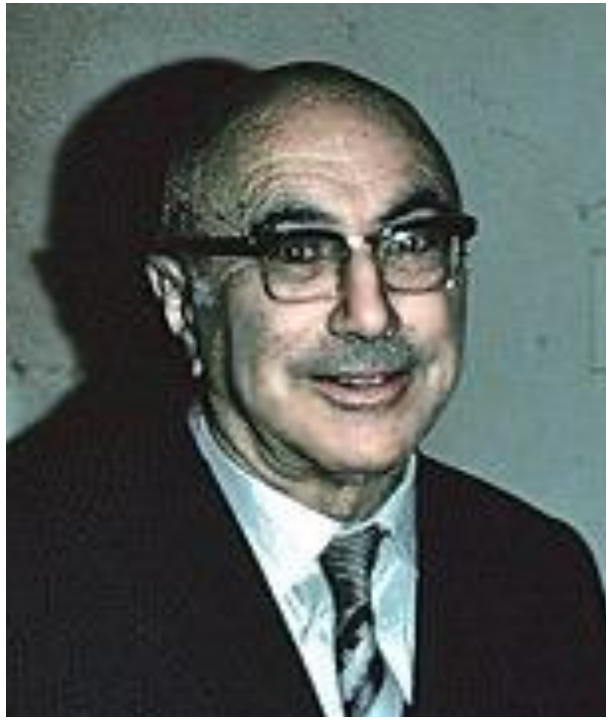
Tvůrci sovětských atomových zbraní



Igor Kurčatov



Andrej Sacharov



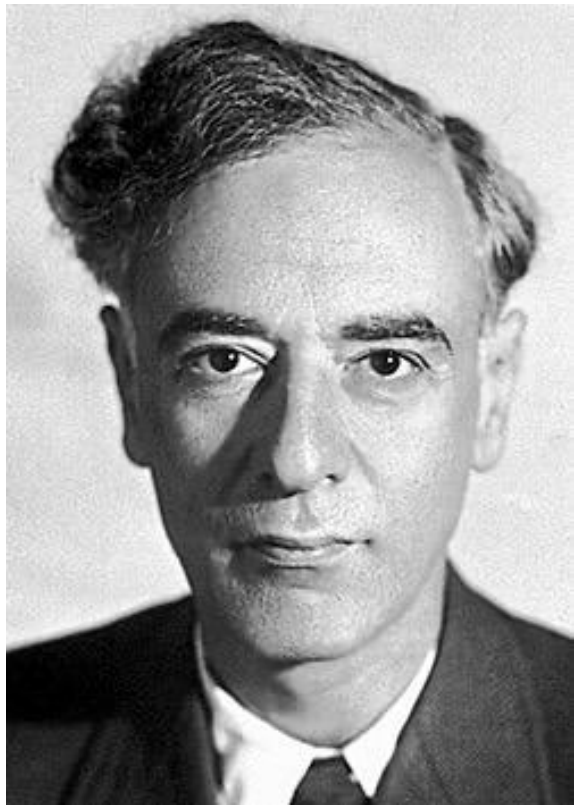
Jakov Zeldovič



Igor Tamm



Julij B. Chariton



Lev D. Landau



Kirill I. Ščolkin



Nikolaj L. Duchov



Georgij N. Fljorov



Abram I. Alichanov



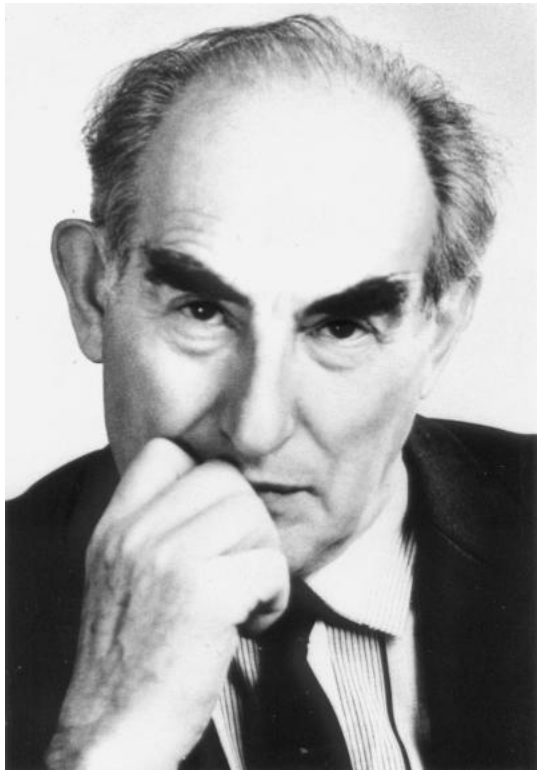
Isaak K. Kikoin



Vitalij G. Chlopin

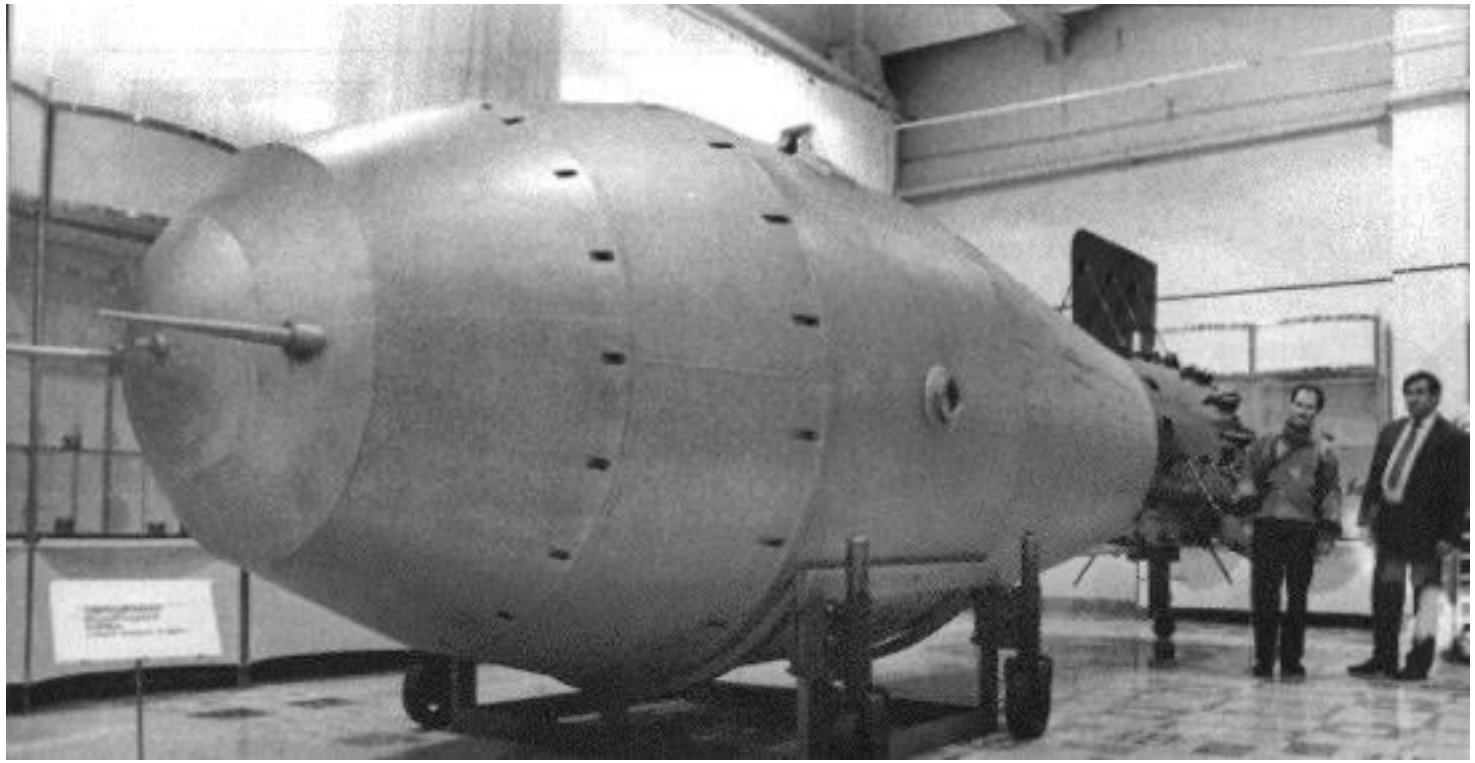


Nikolaj A. Dolležal



Vitalij L. Ginzburg


NÁŠ URAN JE PRO MÍR



Car (délka ± 8 m, průměr ± 2 m, hmotnost 27 tun, síla 50-58 Mt TNT) - vůbec nejsilnější jaderná bomba jaká kdy byla vyvinuta. Byla vytvořena během pouhých 14 týdnů. Zúčastnění konstruktéři: Andrej Sacharov, Viktor Adamskij, Juri Babaev, Juri Trunev a Juri Smirnov. Vyzkoušena byla 30. října 1961 nad Novou Zemí, SSSR. V 50Mt konfiguraci byla na padáku shozena z výšky 10500 m letounem Tu-95, pilotovaným mjr. Andrejem Durnovsevem. Výbuch proběhl ve výšce 4000 m, hřib vystoupal do výšky 64 km, tlaková vlna třikrát obletěla zem, hodinu byla rušena rádiová komunikace.

Jáchymovský uran a americký projekt Manhattan

- Otázka, zda mohl uran vytěžený v Jáchymově sehrát určitou úlohu také při vzniku prvních amerických atomových zbraní, se pohybuje na rozhraní doložených skutečností a historické hypotézy. Zatímco využití jáchymovského uranu v německém jaderném výzkumu za druhé světové války je dnes možné doložit i metodami jaderné forenzní analýzy, přímý důkaz, že se tento materiál následně stal součástí štěpného materiálu některé z amerických atomových bomb, znám není.
- Po připojení Sudet k Německé říši v roce 1938 se jáchymovské uranové ložisko dostalo pod německou kontrolu. Uran z Jáchymovska byl za války využíván také v německém výzkumném programu zaměřeném na možnost uskutečnění řízené štěpné řetězové reakce.
- Významný důkaz přinesla až moderní analýza dochovaných vzorků kovového uranu z německých experimentů. Mezinárodní tým odborníků zkoumal mimo jiné jednu z tzv. Heisenbergových uranových kostek, uranovou desku používanou skupinou **Karla Wirtze** a vzorek uranového koncentrátu z laboratoře **Otto Hahna** a **Fritze Strassmanna**. Podle izotopového složení stroncia a charakteristického zastoupení prvků vzácných zemin dospěli vědci k závěru, že výchozí ruda s vysokou pravděpodobností pocházela z oblasti Jáchymova, nikoli z významného afrického ložiska Shinkolobwe v tehdejším Belgickém Kongu. Analýza současně datovala výrobu kovového uranu do první poloviny čtyřicátých let.
- Největší německý reaktorový experiment, označovaný **B-VIII**, byl uskutečněn na jaře 1945 v Haigerlochu v jihozápadním Německu pod vedením skupiny kolem **Wernera Heisenberga**. Experimentální zařízení obsahovalo **664 kostek přírodního kovového uranu** o celkové hmotnosti přibližně 1,5 tuny, zavěšených v těžké vodě. Reaktor kritického stavu nedosáhl.

Operace Alsos a přechod uranu do amerických rukou

- V závěru války postupovala do Německa americko-britská mise Alsos, jejímž úkolem bylo zjistit stav německého jaderného programu, zajistit jeho dokumentaci, vědce a jaderné materiály a zabránit tomu, aby se dostaly do rukou jiných mocností.
- Němečtí vědci před příchodem spojenců haigerlochský experiment rozebrali a uranové kostky ukryli. Příslušníci mise Alsos je však nalezli. Dne **27. dubna 1945 bylo vyzvednuto 659 kostek**, které byly spolu s dalšími materiály nejprve dopraveny do Francie a následně přešly pod americkou kontrolu; podle rekonstruované historie jejich dalšího osudu byly později převezeny do Spojených států.
- Tím vzniká historicky pozoruhodný a dnes již dobře doložitelný řetězec:
- **Jáchymov → německý jaderný výzkum → Haigerloch → mise Alsos → Spojené státy.**
- Samotná existence tohoto řetězce však ještě nedokazuje, že se jáchymovský uran stal součástí některé americké atomové bomby.

Mohl být použit jáchymovský uran pro americkou atomovou bombu?

- Z hlediska času nelze tuto možnost absolutně vyloučit. Haigerlochský uran získali Američané na konci dubna 1945. První americký jaderný výbuch Trinity se uskutečnil 16. července, bomba **Little Boy** byla svržena na **Hirošimu** 6. srpna a plutoniová bomba Fat Man na **Nagasaki** 9. srpna 1945.
- Pro dvě plutoniové nálože – **Trinity** a **Fat Man** – je možnost významnějšího využití haigerlochského uranu prakticky velmi nepravděpodobná. Plutonium pro ně bylo vyráběno ozařováním uranu v produkčních reaktorech v **Hanfordu** a následně chemicky separováno. Na zavedení nově získaného německého uranu do tohoto výrobního cyklu, jeho ozáření a následné přepracování zbývalo jen velmi málo času.
- Teoreticky o něco představitelnější by byla cesta k uranové bombě **Little Boy**, jejímž štěpným materiálem byl vysoce obohacený uran. Jáchymovský kovový uran by však musel být znovu chemicky převeden do podoby vhodné pro některý z amerických obohacovacích procesů, projít separací izotopů a být následně zahrnut do výsledného zbraňového materiálu.
- Pro takový postup ovšem **není znám žádný přímý doklad**.

- Americký projekt Manhattan navíc na jaře 1945 disponoval rozsáhlými a již zavedenými zdroji uranu. Převážná část amerických zásob pocházela z mimořádně bohatého ložiska Shinkolobwe v Belgickém Kongu; další surovinu dodávala Kanada a naleziště na Coloradské plošině ve Spojených státech. Americké ministerstvo energetiky uvádí jako zdroje uranu používané projektem Manhattan právě Belgické Kongo, Kanadu a domácí americkou produkci.
- Již v září 1942 získal vedoucí projektu Manhattan generál Leslie Groves kontrolu nad přibližně 1 250 tunami vysoce kvalitní uranové rudy z Belgického Konga. Americký program proto v roce 1945 nebyl existenčně závislý na několika tunách evropského uranu.
- Na druhé straně je doloženo, že Američané v závěru války evropské zásoby uranu skutečně aktivně zajišťovali a některé z nich dopravovali do svého výrobního systému. Přibližně třicet tun uranové rudy, které spojenci zajistili ve Francii, bylo například odesláno do Oak Ridge za účelem získání dalšího uranu-235. Také náklad přibližně 1 200 liber oxidu uranu nalezený na německé ponorce U-234 po její kapitulaci v květnu 1945 byl podle historické studie US Geological Survey dopraven do Oak Ridge.
- To dokládá, že **uran získaný v Evropě ještě na jaře 1945 mohl být americkým projektem Manhattan převzat a technologicky využit**. Neprokazuje to však totéž konkrétně u haigerlochských kostek.

Co se stalo s haigerlochským uranem?

- Další osud většiny kostek není dodnes spolehlivě rekonstruován. Výzkum publikovaný v časopise *Physics Today* ukazuje, že po převozu do Spojených států se jednotlivé kostky dostávaly do různých institucí a někdy i do soukromých sbírek; značná část jejich poválečného osudu zůstává neznámá. Právě skutečnost, že některé původní kostky přežily jako laboratorní či historické předměty, naopak ukazuje, že alespoň část materiálu nebyla přepracována na jaderné palivo nebo zbraňový materiál.
- Dosud tedy nebyl zveřejněn dokument, který by prokazoval, že uranové kostky z Haigerlochu byly před srpnem 1945 odeslány do Oak Ridge k obohacení. Stejně tak neexistuje známá materiálová bilance, která by spojovala jáchymovský uran přímo s uranem použitým v bombě Little Boy.

Americký zájem o československý uran po válce

- Samostatnou otázkou je zájem Spojených států o československá uranová ložiska po skončení války. Ten je historicky doložen.
- Uran byl v prvních poválečných letech považován za mimořádně vzácnou strategickou surovinu a Spojené státy spolu s Velkou Británií usilovaly o zabezpečení co největší části známých světových zásob. Jáchymov byl jediným významným evropským ložiskem, které během války neleželo v dosahu západních Spojenců. Historik Zbyněk Zeman doložil na základě britských archivních materiálů, že se již na počátku roku 1946 o Jáchymov intenzivně zajímaly americká, britská, francouzská i švédská vláda. Britští diplomaté a odborníci zjišťovali možnosti vývozu československého uranu a informace o těžbě v Jáchymově systematicky směřovaly také do Washingtonu.
- Z toho však nelze bez dalšího vyvozovat, že Spojené státy předložily Československu konkrétní nabídku na odkoupení veškeré jáchymovské produkce. **Strategický americký zájem o československý uran je doložen, konkrétní formální nabídku USA na výkup celé produkce však dostupné prameny nepotvrzují.**
- Možnost západního přístupu k československému uranu byla navíc velmi brzy zásadně omezena československo-sovětskou dohodou uzavřenou **23. listopadu 1945**. Podle Národního archivu připadala na jejím základě Sovětskému svazu naprostá většina vytěženého a zpracovaného radioaktivního materiálu. Sovětské úsilí o převzetí již existujících zásob a o zajištění budoucí produkce přitom začalo bezprostředně po skončení války.

Závěr

- Současný stav poznání umožňuje učinit tři různě silné závěry.
- **Za prokázané lze považovat**, že uran z jáchymovské oblasti byl za druhé světové války využíván v německém jaderném výzkumu a že část kovového uranu z tohoto programu získala na jaře 1945 americko-britská mise Alsos a následně jej dopravila pod americkou kontrolu.
- **Za historicky možnou, avšak neprokázanou lze považovat** hypotézu, že určité množství tohoto uranu mohlo být ještě v roce 1945 zahrnuto do některého z amerických výrobních toků projektu Manhattan. Američané jiné evropské zásoby uranu skutečně v této době převáželi do Oak Ridge a zpracovávali.
- **Za nedoložené je však nutné považovat tvrzení**, že jáchymovský uran tvořil část štěpného materiálu bomby Little Boy nebo jiné z prvních amerických jaderných náloží. Žádný známý archivní dokument ani materiálová analýza takovou přímou souvislost zatím neprokázaly.
- Jáchymovský uran tak sehrál pozoruhodnou úlohu na rozhraní tří jaderných programů. **Prokazatelně vstoupil do německého jaderného výzkumu, jeho část se na konci války dostala do amerických rukou a od podzimu 1945 se československá produkce stala významným zdrojem sovětského atomového programu.** Zda některý z atomů uranu vytěženého v Jáchymově skončil také v první americké atomové zbrani, zůstává zajímavou, avšak dosud neprokázanou historickou možností.

- **Georg Placzek (1905-1955)**, rodák z Brna, patřil k opravdu významným fyzikům své generace. Zabýval se zejména neutronovou fyzikou a jadernou fyzikou, spolupracoval s Nielsem Bohrem, Rudolfem Peierlsem, Victorem Weisskopfem a dalšími předními fyziky. V rámci projektu Manhattan působil nejprve v kanadském Chalk River a následně od května 1945 v Los Alamos. Podle materiálů Akademie věd byl **vedoucím teoretické skupiny a jediným občanem Československa, který se přímo podílel na projektu Manhattan**.
- Jeho role byla odborně podstatná. Placzek nebyl pouze „účastníkem projektu“; patřil k úzkému okruhu teoretických fyziků zabývajících se neutronovými procesy a konstrukčními otázkami jaderné zbraně. Brněnské odborné materiály jej řadí mezi fyziky, kteří měli významný podíl už na formování jaderné fyziky před válkou a následně se zapojili do Manhattan Project.

- Druhou osobností je **Lilli Hornigová (1921-2017)**, narozená v Ústí nad Labem jako Lilli Schwenková. Pocházela z německo-židovské rodiny z Československa, později emigrovala do Spojených států. V Los Alamos pracovala jako **chemička**. Nejprve se zabývala chemií plutonia, později pracovala na **výbušných čočkách implozního systému plutoniové bomby**. Její účast dnes výslovně uvádí americký National Park Service, který spravuje Manhattan Project National Historical Park.

- Její odborné postavení však bylo jiné než Placzkovo. Hornigová byla mladá chemička na počátku kariéry, zatímco Placzek patřil k mezinárodně uznávaným teoretickým fyzikům a pohyboval se v nejvyšší vědecké vrstvě projektu. To potvrzují i novější historické práce zabývající se oběma československými stopami.

- Jáchymovský uran sehrál významnou úlohu nejen v dějinách radioaktivity a poválečného sovětského atomového programu, ale také v německém jaderném výzkumu za druhé světové války. Dlouho byla přesná provenience uranu používaného německými fyziky předmětem historických diskusí. Moderní nukleární forenzní analýzy však přinesly přesvědčivé důkazy, že nejméně část kovového uranu používaného v klíčových německých reaktorových experimentech pocházela právě z jáchymovského ložiska.
- Po připojení Sudet k Německé říši v roce 1938 se Jáchymov, tehdejší Joachimsthal, ocitl pod německou správou. Zdejší ložisko představovalo známý a dlouhodobě těžený evropský zdroj uranové rudy. Uran z něj mohl být po chemickém vyčištění a metalurgickém zpracování využíván v německém programu výzkumu jaderného štěpení, známém jako *Uranverein*.
- Německý program nebyl jednotným projektem s jediným centrem. Na problematice řetězové reakce a využití uranu pracovaly zejména skupiny kolem **Wernera Heisenberga, Karla Wirtze a Kurta Diebnera**. V jednotlivých experimentech byly jako palivo používány desky nebo kostky z přírodního kovového uranu, zatímco jako moderátor sloužila těžká voda.
- Za vrchol této vývojové řady je považován experiment **B-VIII**, uskutečněný v březnu 1945 v Haigerlochu. Do experimentálního zařízení bylo zavěšeno **664 kostek kovového uranu o celkové hmotnosti přibližně 1,5 tuny**. Reaktor kritického stavu nedosáhl, představoval však nejpokročilejší německý pokus o uskutečnění řízené štěpné řetězové reakce.

- Zásadní poznatky přinesla nukleární forenzní studie publikovaná v roce 2015 v odborném časopise *Angewandte Chemie International Edition*. Mezinárodní tým analyzoval vzorky dvou tzv. Heisenbergových uranových kostek, část uranové desky používané v experimentech Heisenbergovy a Wirtzovy skupiny a vzorek uranového koncentrátu pocházející z laboratoře Otto Hahna a Fritze Strassmanna.
- Výzkumníci stanovovali mimo jiné izotopové poměry uranu a stroncia a charakteristické zastoupení prvků vzácných zemin. Tyto údaje porovnali se vzorky uranové rudy a koncentrátů z Jáchymova a z dolu Shinkolobwe v Belgickém Kongu, který představoval druhý významný zdroj uranu dostupný Německu. Výsledek ukázal, že analyzovaný kovový uran **pocházel z jáchymovské oblasti, nikoli z Belgického Konga**.
- Radiochronologická analýza současně umožnila určit dobu posledního chemického oddělení uranu. U Wirtzovy desky vyšel přibližně rok **1940**, zatímco analyzované Heisenbergovy kostky byly vyrobeny přibližně v letech **1943-1944**.
- Tím byl vytvořen přímý vědecký důkaz, že uran vytěžený v jáchymovském revíru prošel během války cestou od rudy přes chemické zpracování až ke kovovému uranu používanému v německých reaktorových pokusech.
- Z těchto analýz nelze dovodit, že **veškerý uran německého jaderného programu pocházel z Jáchymova**. Německo disponovalo také zásobami uranových sloučenin pocházejících z Belgického Konga a mohlo pracovat i s dalšími zdroji.
- Pro nejvýznamnější dochované vzorky uranu z německých reaktorových experimentů je však jáchymovský původ doložen přímo. Proto je správné označovat Jáchymov za **jeden z klíčových zdrojů uranu německého jaderného programu**.
- Je přitom pozoruhodné, že analyzovaná Heisenbergova kostka, Wirtzova deska i uranový koncentrát z laboratoře Hahna a Strassmanna vykazovaly velmi podobné znaky provenience. Výzkumníci proto dospěli k závěru, že jejich výchozí uran pravděpodobně pocházel ze stejného těžebního regionu.

- Na jaře 1945 se část německého jaderného materiálu dostala do rukou západních Spojenců. Většinu uranových kostek z Haigerlochu zajistila americko-britská mise **Alsos**.
- Jiná část německých zásob uranových sloučenin, zařízení a technologického know-how se po rozdělení Německa dostala pod sovětskou kontrolu. Sovětský svaz současně zahájil systematický průzkum uranových ložisek v Sasku. Podle dnešní společnosti Wismut vznikla sovětská průzkumná organizace v září 1945 a **první tuny nově vytěženého saského uranu pocházejí až z dubna 1946**. Produkce za celý rok 1946 činila přibližně 17,2 tuny uranu.
- Toto časové rozlišení je důležité při hodnocení poválečných pramenů. Označení **„německý uran“** nemusí vždy znamenat nově vytěžený uran ze saských dolů. Může označovat také válečné zásoby uranových sloučenin nebo kovového uranu, které byly před rokem 1945 zpracovány na území Německa. U části takového materiálu mohl být geologický původ právě v Jáchymově.
- Nelze však bez konkrétního archivního dokladu automaticky převádět všechny poválečné údaje o „německém uranu“ na uran jáchymovský. Od jara 1946 už Sovětský svaz skutečně disponoval také novou produkcí ze saských ložisek Johanngeorgenstadt a Oberschlema a její objem rychle rostl.
- Historická pozice Jáchymova je v tomto ohledu výjimečná. Jeden těžební revír se v průběhu několika let dotkl tří nejvýznamnějších jaderných programů své doby.
  - **Německý program:** jáchymovský uran byl prokazatelně zpracován na kov a použit v německých reaktorových experimentech.
  - **Americký program:** část tohoto kovového uranu získala na jaře 1945 mise Alsos. Přímý doklad jeho následného použití při výrobě americké atomové bomby však není znám.
  - **Sovětský program:** Československo začalo po válce dodávat uran Sovětskému svazu a současně se do jeho rukou dostaly některé německé zásoby uranových materiálů. Při interpretaci údaje o „německém uranu“ používaném v počáteční fázi sovětského atomového programu proto nelze vyloučit, že část materiálu mohla být původně vytěžena právě v Jáchymově. Přesný rozsah takového podílu však dosud nebyl archivně prokázán.



Reaktor v Hanfordu



Nejdůležitější pracoviště Projektu Manhattan v USA a Kanadě

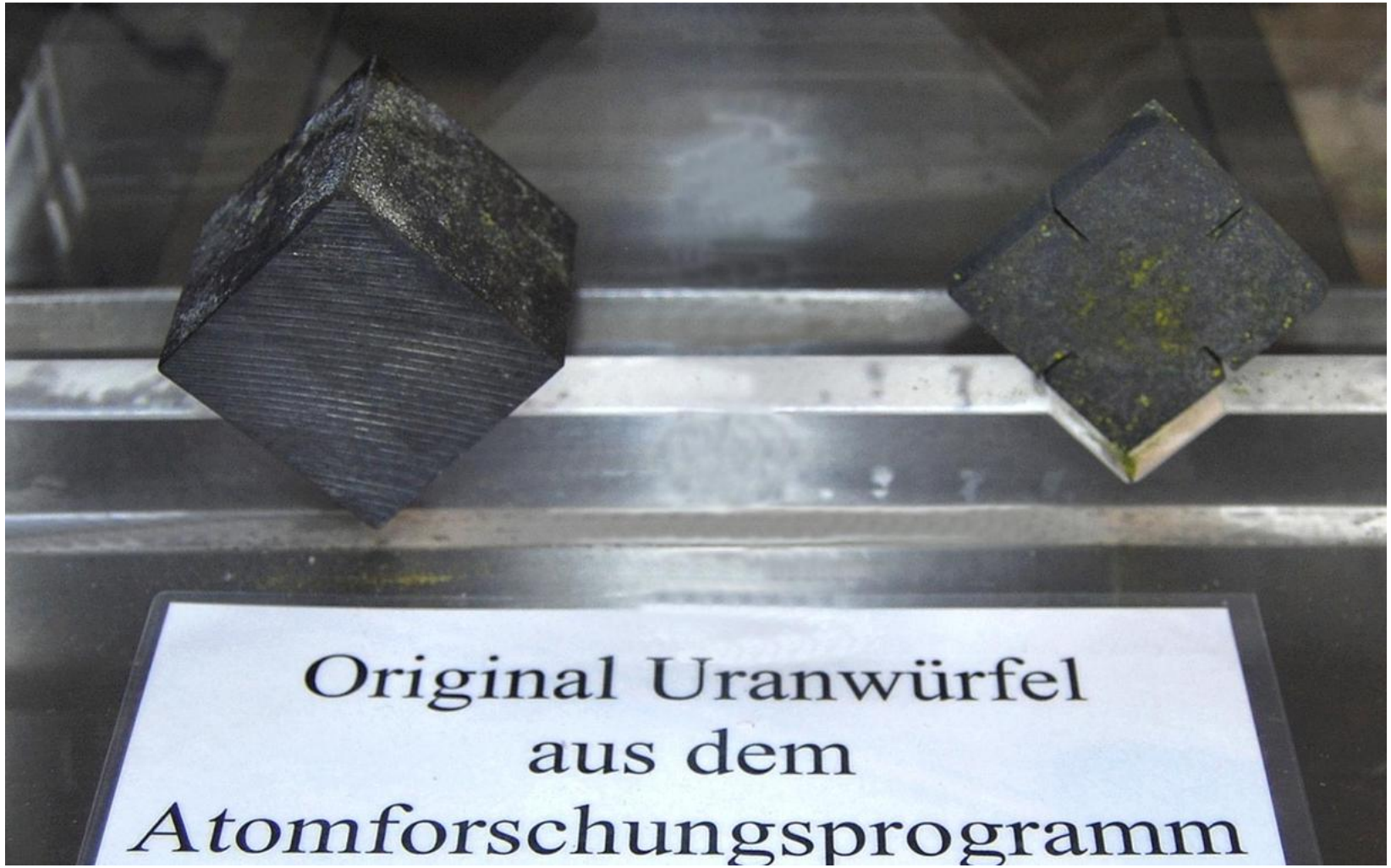


Příprava testu „*Trinity*“

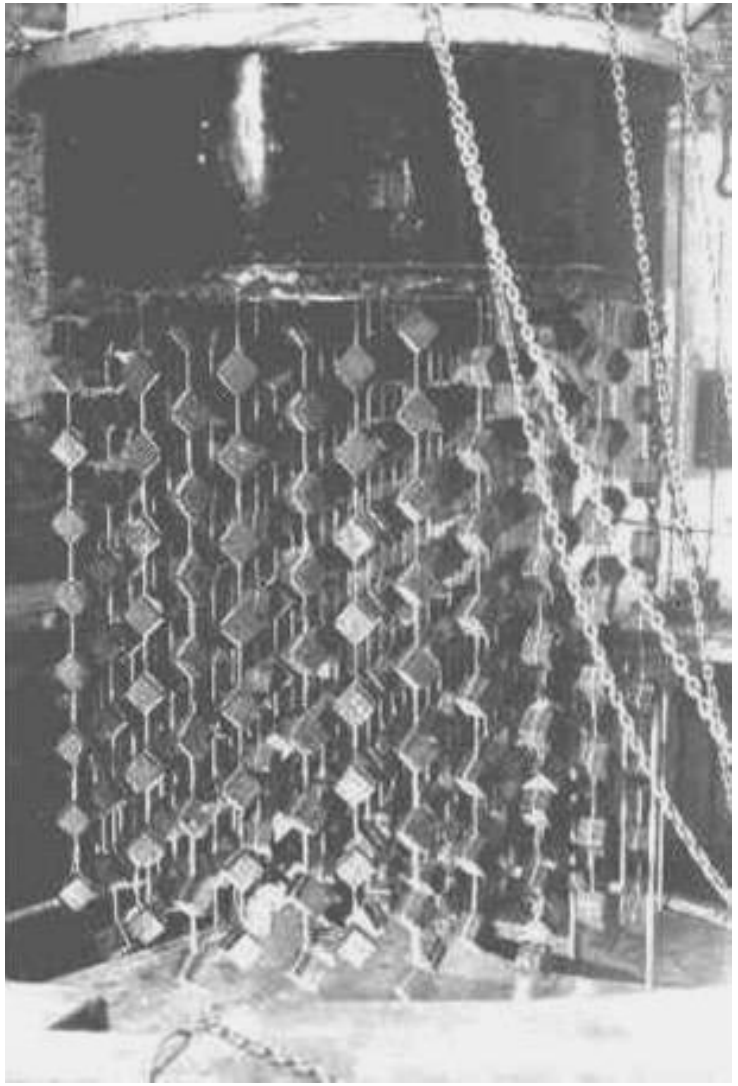


Atomová bomba Fat Man




Original Uranwürfel
aus dem
Atomforschungsprogramm





APPROVED FOR PUBLIC RELEASE

[redacted] CLASSIFIED [redacted]
[redacted] without specific authorization.

THE LOS ALAMOS PRIMER

UNCLASSIFIED

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

Bob Serber

1. Object

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

2. Energy of Fission Process

The direct energy release in the fission process is of the order of 170 MEV per atom. This is considerably more than 10^7 times the heat of reaction per atom in ordinary combustion processes.

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

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

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

1 kg of 25 $\approx$ 20000 tons of TNT

3. Fast Neutron Chain Reaction

Release of this energy in a large scale way is a possibility because of the fact that in each fission process, which requires a neutron to produce it, two neutrons are released. Consider a very great mass of active material, so great that no neutrons are lost through the surface and assume the material so pure that no neutrons are lost in other ways than by fission. One neutron released in the mass would become 2 after the first fission, each of these would produce 2 after they each had produced fission so in the nth generation of neutrons there would be 2^n neutrons available.

Since in 1 kg. of 25 there are $5 \cdot 10^{25}$ nuclei it would require about $n = 80$ generations ($2^{80} \approx 5 \cdot 10^{25}$) to fish the whole kilogram.

While this is going on the energy release is making the material very hot, developing great pressure and hence tending to cause an explosion.

In an actual finite setup, some neutrons are lost by diffusion out through the surface. There will be therefore a certain size of say a sphere for which the surface losses of neutrons are

[redacted] CLASSIFIED [redacted] UNCLASSIFIED
APPROVED FOR PUBLIC RELEASE

Frisch–Peierls memorandum

The **Frisch–Peierls memorandum** was the first technical exposition of a practical atomic weapon.[1] Written by Otto Frisch and Rudolf Peierls while they were both working at the University of Birmingham in England, the memorandum contained new calculations about the size of the critical mass needed for an atomic bomb, and helped accelerate British and U.S. efforts towards bomb development during World War II.

1 Background and influence

Given to Marcus Oliphant, Oliphant passed the document on to Henry Tizard, chairman of the Committee on the Scientific Survey of Air Defence who consequently requested the setting-up of what was to become the secret MAUD Committee. The memorandum (a copy of which is held in the Public Record Office at Kew) is dated March 1940.

The two men were the first to calculate that an atomic bomb would require about 1 kilogram (2.2 lb) of the isotope uranium-235.[2] (The estimate of 1 kg turned out to be too low; see Critical mass.) Before it had been assumed that the bomb itself would require many tons of uranium, implying that it was theoretically possible, but not a practical military device. An earlier letter to President Franklin D. Roosevelt, signed by Albert Einstein (but written by Leó Szilárd), had suggested it may need to be delivered by ship but "might very well" not be small enough to drop from the air.

The memorandum helped galvanize both Britain and America down a path which led to a report by the British MAUD Committee, the Tube Alloys project, the Manhattan Project, and ultimately the atomic bombings of Hiroshima and Nagasaki.

2 Contents

The memo was written in two parts. The second was an explanation of the science supporting their conclusions. The first was an elegant and comprehensive outline of the implications of their calculations. It included a proposal that the best defence against such a weapon would be to develop one before Germany did so. In a few short pages these two scientists had anticipated the policies of deterrence which would later shape Cold War geopolitics.

The memorandum opens with:

Strictly Confidential

Memorandum on the properties of a radioactive "super-bomb"

The attached detailed report concerns the possibility of constructing a "super-bomb" which utilizes the energy stored in atomic nuclei as a source of energy. The energy liberated in the explosion of such a super-bomb is about the same as that produced by the explosion of 1000 tons of dynamite. This energy is liberated in a small volume, in which it will, for an instant, produce a temperature comparable to that in the interior of the sun. The blast from such an explosion would destroy life in a wide area. The size of this area is difficult to estimate, but it will probably cover the centre of a big city.

In addition, some part of the energy set free by the bomb goes to produce radioactive substances, and these will emit very powerful and dangerous radiations. The effect of these radiations is greatest immediately after the explosion, but it decays only gradually and even for days after the explosion any person entering the affected area will be killed.

Some of this radioactivity will be carried along with the wind and will spread the contamination; several miles downwind this may kill people.

3 See also

- Einstein–Szilárd letter
- Timeline of the Manhattan Project
- Allied technological cooperation during World War II

4 References

[1] Kelly, Cynthia C. (2004). *Remembering The Manhattan Project: Perspectives on the Making of the Atomic Bomb and Its Legacy*. World Scientific. p. 44. ISBN 9812560408. Retrieved 2012-09-30.

- **Nejvýznamnější vědci a odborníci projektu Manhattan:**
- **J. Robert Oppenheimer** – vědecký ředitel Los Alamos, hlavní koordinátor vývoje atomové bomby.
- **Enrico Fermi** – klíčový fyzik neutronové fyziky; vedl tým, který v Chicagu uskutečnil první řízenou řetězovou reakci.
- **Niels Bohr** – zásadní teoretik štěpení a jaderné struktury; přinesl hluboký teoretický vhled do mechanismu štěpení a konstrukčních problémů.
- **Hans Bethe** – vedoucí teoretické divize v Los Alamos; jeden z hlavních autorů výpočtů neutronové fyziky, hydrodynamiky a energetiky výbuchu.
- **Edward Teller** – teoretický fyzik; pracoval na problémech imploze a velmi brzy prosazoval i termonukleární „Super“.
- **Richard Feynman** – teoretik a výpočtář; pracoval na neutronových výpočtech a organizaci rozsáhlých numerických výpočtů.
- **Leo Szilárd** – jeden z prvních, kdo formulovali myšlenku neutronové řetězové reakce; klíčový pro počátky programu.
- **Eugene Wigner** – významný teoretik a konstruktér reaktorových systémů, zejména v souvislosti s Hanfordem.
- **John von Neumann** – zásadní matematik a fyzik; pracoval na rázových vlnách, implozi a numerických výpočtech.
- **Rudolf Peierls** – britský teoretik, spoluautor Frisch-Peierlsova memoranda; významná role v teoretických výpočtech.
- **Otto Robert Frisch** – spoluautor Frisch-Peierlsova memoranda; podílel se na experimentální a teoretické práci v Los Alamos.
- **Klaus Fuchs** – velmi schopný teoretický fyzik; pracoval na hydrodynamice, implozi a neutronové fyzice (hlavní sovětský špion).
- **Robert Serber** – jeden z prvních teoretiků Los Alamos; autor slavného *Los Alamos Primer*.
- **John A. Wheeler** – významný teoretik jaderného štěpení, spoluautor zásadní práce s Bohrem.
- **Emilio Segrè** – experimentální fyzik; podílel se na měření spontánního štěpení plutonia, což mělo zásadní význam pro volbu implozní konstrukce.
- **Glenn T. Seaborg** – objevitel plutonia a klíčová osobnost jeho chemie a separace.
- **Arthur Compton** – vedl Metallurgical Laboratory v Chicagu a koordinoval část programu zaměřenou na reaktory a plutonium.
- **Ernest O. Lawrence** – vedl Berkeley Radiation Laboratory; zásadní pro elektromagnetickou separaci izotopů uranu.
- **Harold Urey** – významný chemik a fyzik, podílel se na metodách separace izotopů.
- **George Kistiakowsky** – vedoucí výbušninové divize; klíčová osobnost vývoje výbušných čoček pro implozní bombu.
- **Seth Neddermeyer** – jeden z prvních, kdo prosazovali implozní konstrukci plutoniové bomby.
- **Luis Alvarez** – experimentální fyzik; podílel se na detekční technice a měření účinků výbuchu.
- **George Placzek** – brněnský rodák a významný teoretický fyzik; působil v Los Alamos v závěrečné fázi projektu.
- **Lilli Hornigová** – chemička narozená v Ústí nad Labem; pracovala na chemii plutonia a později na výbušných čočkách.



Julius Robert Oppenheimer



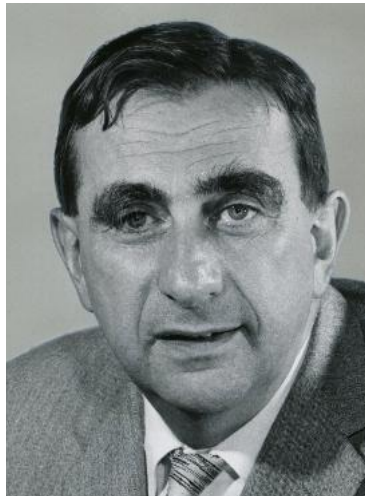
Enrico Fermi



Niels Bohr



Hans Albrecht Bethe



Edward Teller



George Kistiakowsky



Leo Szilard



Eugene Paul Wigner



John von Neumann



Glenn T. Seaborg



Ernest Orlando Lawrence



Klaus Fuchs



Georg Placzek



Lilli S. Hornigová

Photostat Price $ 3.30
Microfilm Price $ 2.40

Available from the
Office of Technical Services
Department of Commerce
Washington 25, D. C.

AECD-4223

51567

DISPERSION OF THE NEUTRON EMISSION IN U235 FISSION*

by

R. P. Feynman
Department of Physics
California Institute of Technology
Pasadena, California

F. de Hoffmann
Convair
San Diego, California
and
Los Alamos Scientific Laboratory
Los Alamos, New Mexico

R. Serber
Department of Physics
Columbia University
New York, New York

LEGAL NOTICE

This report was prepared as an account of Government sponsored work. Neither the United States, nor the Commission, nor any person acting on behalf of the Commission:

A. Makes any warranty or representation, express or implied, with respect to the accuracy, completeness, or usefulness of the information contained in this report, or that the use of any information, apparatus, method, or process disclosed in this report may not infringe privately owned rights; or

B. Assumes any liabilities with respect to the use of, or for damages resulting from the use of any information, apparatus, method, or process disclosed in this report.

As used in the above, "person acting on behalf of the Commission" includes any employee or contractor of the Commission to the extent that such employee or contractor prepares, handles or distributes, or provides access to, any information pursuant to his employment or contract with the Commission.

*This work was carried out by the authors at the Los Alamos Scientific Laboratory.

701-1

I. INTRODUCTION

During 1944 we made experiments and developed the theory for the neutron intensity fluctuations of a water boiler[1]. The fluctuations, as measured by a counter depend on (a) the fluctuations in ν, the number of neutrons per fission, (b) the absolute criticality of the system (which is a measure of the average likelihood of starting and perpetuating a chain), (c) the efficiency of the counter and (d) the length of time over which counts are taken. Thus a measurement of the fluctuations together with a determination of (b), (c) and (d) will yield information on the fluctuations in the number of neutrons per fission.

[1] Reported by F. de Hoffmann in Chapter 9 of "The Science and Engineering of Nuclear Power", Vol. II (Addison Wesley Press, Cambridge, Mass., 1949).

Let $\bar{c}$ denote the average number of counts recorded in the counter per unit time. Then $\left[\overline{c^2} - (\bar{c})^2\right]/\bar{c}$ is a convenient measure of the fluctuations encountered; the quantity is unity when the fluctuations are of purely random origin, since then c has the form of a Poisson distribution. In the case of chain reactors we have greater fluctuations and we define the excess Y by:

$$\left[\overline{c^2} - (\bar{c})^2 / \bar{c} = 1 + Y\right] \qquad (1)$$

We have previously shown[2] that if t is the gate-width, defined

[2] We refer the reader to the derivation of Eq. (9-55) of Ref. 1; there is an obvious typographical error in the formula referred to--in particular ν^2 should be $\overline{\nu^2}$.

701-2

as being the time over which counts are taken, then in first approximation Y is given by

$$Y = \frac{\epsilon(\overline{\nu^2} - \overline{\nu})}{(\alpha\tau)^2}\left[1 - \frac{(1 - e^{-\alpha t})}{\alpha t}\right] \qquad (2)$$

In (2), ϵ is the efficiency of the counter, i.e. the average number of counts per average fission[3] occurring in the water boiler. Furthermore,

---

[1] The fact that a neutron born at one place may not produce the same subsequent effect on the boiler as one born at another place has a small effect in our case. This is due to the symmetry of the boiler and also to its small size so that a neutron has a good chance of traversing the whole sphere during its lifetime. Calculations of Feynman (private communication 1944) have shown that this geometrical factor when taken account of amounts to about one percent and can really be neglected.

Incidentally, Feynman (private communication 1944) has further carried out the derivation of Eq. (2) with a continuum of neutron velocities and the result obtained is identical with that when only one group of neutron is assumed.

α is defined by the statement that one primary neutron introduced into the boiler means that $e^{-\alpha t}$ will be the expected number of neutrons present at time t due to the primary neutron. Finally, if one neutron is known to be present in the boiler then the probability of its producing fission in time dt is dt/τ, i.e. τ is the mean time between fission.

In Ref. 1 it is further shown that

$$\frac{\overline{\nu}}{\alpha\tau} = \frac{1}{1 - K'} \qquad (3)$$

where K' denotes the multiplication for an average neutron. Provided now that the gate-width t is short compared to the average delayed neutron period, the delayed neutrons do not significantly contribute to K' and we may write $K' = K_p$. We shall make the latter approximation from here on in. When the water boiler is run at delayed critical then[1]

$$1 - K_p = \gamma f \qquad (4)$$

where f is the fraction of fission neutrons which are delayed and γ their average effectiveness in the chain reaction as compared to prompt neutrons. Since all our fluctuation experiments were carried out at delayed critical, we therefore make the replacement (4). Denoting the brackets in (2) by the symbol B we thus find

$$Y = \frac{B\epsilon(\overline{\nu^2} - \overline{\nu})}{\overline{\nu}(\gamma f)^2} \qquad (5)$$

It will be noted that when the $\alpha t \gg 1$, B tends to unity and (5) becomes independent of the gate-width. Thus, a knowledge of Y, γf and ϵ enables one to determine $\overline{\nu^2}$.

II. EXPERIMENTAL METHOD

The experiments were carried out on LOPO, the first water boiler in existence at Los Alamos[4]. Our experiment was designed to yield information concerning $\overline{\nu^2}$ and incidentally also to try to check out the validity of (2) as far as dependence on t is concerned. To this end two experimental methods were pursued. In the one case the counts as a function of time were recorded on film so that one and the same series of counts could be analyzed in terms of different gate-widths t. In the second case, a very prolonged series of counts were recorded electronically at a fixed gate-width which was chosen large enough so as to make B almost unity.

In each of the two methods used the neutron counter used was a BF_3 chamber arranged for maximum efficiency with equipment then existing in conjunction with the boiler. It was placed just outside the BeO tamper with blocks of paraffin all around it. The efficiency ϵ, found by comparing it with a U235 fission chamber of known efficiency placed in the center of the boiler was found to be $\epsilon = 3.51 \times 10^{-4}$ counts/fission. After the BF_3 chamber, there was a pre-amplifier, amplifier and discriminator. The rise time of this electronic system (designed by the Los Alamos electronics group under W. Higinbotham and M. Sands) was 5-6 microseconds.

Following the discriminator, the two methods were as follows:

[4] For details of LOPO the reader is referred to Rev. of Sci. Inst. 22, 489 (1951).

Film Method[5]

The output of the discriminator was fed into a scalar and the scalar tapped off at the output of the first stage with the signal being fed to the vertical plates of a 5 inch oscillograph. On the horizontal plates a specially built linear sweep was imposed and adjusted to a frequency of 250 cycles. The screen was photographed by means of a continuously moving film, with the film moving vertically. The developed film showed a pattern like the sample shown in Fig. 1.

This pattern can be interpreted easily since the first stage of the scalar represents a flip-flop circuit, and consequently its output changes from a maximum to a minimum and back to a maximum with successive pulses. Thus a shift of the height of the line on the scope or film respectively will indicate that a pulse has registered[6].

[5] We are indebted to Messrs. B. Brixner and J. Mack for the use of their equipment and for their kind help.

[6] It is important that the sweep return very fast in order that pulses may not be lost between the end of one and the beginning of another sweep. Indeed, the sweep used had a return time of only several microseconds.

The oscilloscope was photographed on 35 mm film at a film speed of approximately 100 feet per minute, by means of a General Radio Company Oscilloscope camera. The completed film was read on a micro-film reader

by moving the film through the viewing apparatus, stopping at random and visually counting a pre-determined time interval on the film. The boiler itself was run at delayed critical and the intensity was adjusted so that the scalar recorded about 500 counts per second.

Electronic Method

This time the signal from the discriminator was fed through a gate circuit and then fed into another discriminator scalar unit. The gate circuit[7] was so designed as to let pulses pass through it starting from the time the switch was closed till a predetermined time later, in particular 283 milliseconds. Thus by closing the switch and reading the scalar, one obtained the number of counts for a 283 millisecond interval.

[7] The gate circuit was kindly designed and built by C. P. Baker.

The boiler was run at critical and at an intensity of about 1000 counts/sec in the BF_3 chamber.

The true length of time of gate was determined by feeding 1000 cycles from a standard audio-oscillator into the input of the gate circuit and noting the number of counts recorded on the scalar. This also enabled one to make a check of constancy. Over a 12 hour run the gate reproduced to better than 2 percent.

III. EXPERIMENTAL DATA

Three 100 foot films were read for different gate-widths t. Since the average counting rate $\bar{c}$ was not the same on all three films

it was necessary to compute the Y + 1 for a particular gate-width from each film and then combine them properly so as not to get fictitious fluctuation due to variations in $\bar{c}$.

If on one film a number of gates n was counted for one particular gate-time it is shown in Appendix A that the computed Y + 1 from this film should be multiplied by the factor $m/(n-1)$ to give the correct value of Y + 1. The data from several films were then combined by taking the mean correct Y + 1, weighted according to the respective m's. The probable error in the quantity obtained can be shown to be $\sqrt{2/e}$ where $e = \Sigma m$. Results of Y versus t are shown in Fig. 2 and the probable error indicated.

A single point at a high gate-time, namely, t = 283 milliseconds, was determined by the electronic method. 2200 individual gates were taken over a period of some 12 hours. These 2200 gates were then broken up into 76 small sets of from 10 to 50 gates in such a way that the mean $\bar{c}$ did not change violently during one set. Again this was done to avoid a fictitious increase of the quantity Y + 1 due to violent variations in $\bar{c}$. These sets were combined in the same fashion as described for combination of data from different films. The result was that for a gate-width of 283 milliseconds

$$Y = 4.17 \pm 0.16 \qquad (6)$$

This point is plotted on Fig. 2.

The mean deviation of the 76 individual Y's from their mean was computed and found to be in complete agreement with the deviation

expected statistically. This instills confidence that the value of Y obtained does not contain fluctuations from other than statistical causes.

IV. INTERPRETATION OF DATA

We have pointed out that the electronic method used a gate time large enough so that $\alpha t \gg 1$. This we verify as follows: α is obtained from (3). Now the time between fissions always enters calculations as $1/\tau$ and therefore τ in (3) may be released by τ_p the average time between prompt fissions. The latter quantity has been determined[8] to be $\tau_p = 135 \pm 20$ microseconds for LOPO. Furthermore, the integral quantity γf for LOPO has been determined[8] as $8.5_5 \times 10^{-3}$. Making the replacement (4) in (3), and using $\overline{\nu} = 2.47$, we find

$$\alpha = 156 \pm \text{sec}^{-1} \qquad (7)$$

Thus indeed, for the electronic method the quantity $\alpha t = 44$; i.e. very large compared to 1, making $B = 0.98$.

[8] See Reference 4. It should be noted that the value of γf cited in this reference was based on a conversion factor between the amount of U235 in the LOPO solution and the resultant reactivity. This conversion factor was calculated in Reference 4 using the old 1944 cross-section for Boron and U235. A recomputation using a thermal absorption cross-section of 690 barns for U235 and 750 barns for Boron does not change the value of γf.

Substituting Eq. (6), i.e. the value Y obtained from the electronic method into (5), we may now solve for $\overline{\nu^2}$ and find

$$\overline{\nu^2} = 7.8 \pm 0.6 \qquad (8)$$

The film data as shown on Fig. 2 does confirm the theoretical prediction that the fluctuations should rise with increasing gate-widths. The dotted curve in Fig. 2 was constructed by assuming $\alpha = 156$ sec^{-1} is correctly given by (7) and normalizing the curve to the electronic method point at 283 milliseconds. It will be seen that the agreement of the dotted curve with the film method experiment is only qualitative. It would appear that a fit to experiment calls for a lower value of α than (7). In particular the solid curve which gives a reasonably good fit to the data was constructed with $\alpha = 115$ sec^{-1}. This discrepancy does not reflect on the value of $\overline{\nu^2}$ deduced from (5) and (6) where α enters only very insensitively through B. Putting it another way, for the electronic method at 283 milliseconds we need only know the value of the integral quantity $\alpha\tau$ which is directly related to the measured γf, whereas for the variation of Y with t, an independent knowledge of both α and τ are called for.

V. DISCUSSION OF RESULT

Our experiment, performed in 1944, has determined the second moment in the distribution of the number of neutrons in the thermal fission of U235 as being 7.8 ± 0.6. To familiarize ourselves with the

meaning of this number we might note that if ν were always 2.5, a physical impossibility, then $\overline{\nu^2} = 6.25$. If ν were to divide equally between 2 and 3, then $\overline{\nu^2} = 6.5$. It can be seen that if ν divided say between 2, 3 and 4 in such a way as to give $\overline{\nu} = 2.5$ the quantity $\overline{\nu^2}$ would vary between about 6.6 and 6.9. A Poisson distribution of $\overline{\nu}$ would lead to a value of $\overline{\nu^2} = 8.75$.

Since the work reported above was performed, the dispersion in the number of fissions from U235 has been determined directly[9] by Diven et al at Los Alamos. They do not determine the second moment, but rather obtained full information about the relative probability of the emission 1, 2, 3 --- neutrons per fission. They find that at 80 kev their data yields $\overline{\nu^2} = 7.32$. Furthermore, Leachman[10] has estimated on theoretical grounds that at thermal one would expect a value of $\overline{\nu^2} = 7.2$, which is allowed by our limit of error on (8).

[9] Diven, B. C., et al, to be submitted to Phys. Rev.

[10] Leachman, R. B., to be submitted to Phys. Rev.

APPENDIX A. Derivation of the Correction Factor m/(m - 1)

In order to compute Y + 1 we have to compute the quantity $\overline{c^2} - (\bar{c})^2$, i.e., $(1/m) \sum_i (c_i - \bar{c})^2$. Experimentally however, we measure the quantity

$$(1/m) \sum \left[c_i - (1/m) \sum_i c_i\right]^2 \qquad (9)$$

Now

$$(1/m) \sum (c_i - \tfrac{1}{m} \sum_i c_i)^2 = (1/m) \sum (c_i - \bar{c} + \bar{c} - \tfrac{1}{m} \sum_i c_i)^2$$

$$= (1/m) \sum_i (c_i - \bar{c})^2 - \left[(1/m) \sum (c_i - \bar{c})\right]^2 \qquad (10)$$

Thus we have to evaluate the expected value of $(1/m \sum_i (c_i - \bar{c})$ to obtain the most probable difference between the two quantities. Now

$$\left[(1/m) \sum (c_i - \bar{c})\right]^2 = (1/m^2) \sum_i \sum_j (c_i - \bar{c})(c_j - \bar{c}) \qquad (11)$$

In this sum the terms with $i \neq j$ are just as likely to be positive as negative and therefore on the average cancel out. This leaves only the terms with $i = j$ and hence the expected value of this quantity is:

$$(1/m^2) \sum_i (c_i - \bar{c})^2 \quad e \qquad (12)$$

Therefore

$$(1/m)\sum\left[c_i - (1/m)\sum_i c_i\right]^2 = \left[(1/m) - (1/m^2)\right]\sum_i (c_i - \bar{c})^2$$
$$= \left[(m-1)/m\right](1/m)\sum_i (c_i - \bar{c})^2 \qquad (13)$$

or consequently

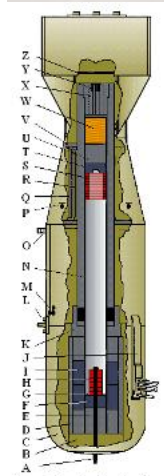
Expected true value of $(Y + 1) = [m/(m-1)].[\text{measured value}]$.

LEGEND FOR FIG. 2

The variation of Y as a function of gate-width t. All points shown were obtained by the film method except for the point at 283 milliseconds which was obtained by the electronic method. The dotted and solid curves were constructed as explained in section IV.

- Jáchymovský uran se prokazatelně dostal prostřednictvím německého jaderného programu do rukou Spojených států. Dochované uranové kostky z německých reaktorových experimentů byly nukleární forenzní analýzou identifikovány jako materiál pocházející z oblasti Jáchymova. Většina kostek byla po válce převezena do USA a část materiálu byla později začleněna do amerických jaderných zásob. Přímý důkaz, že jáchymovský uran tvořil část štěpného materiálu první atomové bomby Trinity nebo bomby Little Boy, však dosud znám není.
- Nelze zcela vyloučit, že se malé množství uranu jáchymovského původu, získaného Spojenými státy z německého jaderného programu, mohlo ještě v roce 1945 dostat do amerického jaderného materiálového systému. Přímý doklad, že tvořilo část uranu bomby Little Boy svržené na Hirošimu, však znám není. U plutoniové bomby Fat Man svržené na Nagasaki je taková souvislost ještě méně pravděpodobná, protože plutonium pro ni bylo vyráběno v Hanfordu z paliva zaváženého do reaktorů již od roku 1944.

- Jáchymovský uran sehrál mimořádnou úlohu v počátcích jaderného věku. Po připojení Sudet k Německé říši v roce 1938 se jáchymovský revír dostal **pod německou kontrolu** a zdejší uran byl využíván v německém jaderném výzkumu. Moderní nukleární forenzní analýzy dochovaných Heisenbergových uranových kostek a Wirtzovy uranové desky prokázaly, že **analyzovaný materiál pocházel z oblasti Jáchymova**. Jáchymovský uran tak lze přímo spojit s německými pokusy o uskutečnění štěpné řetězové reakce.
- Na jaře 1945 získala část německého jaderného materiálu americko-britská **mise Alsos**. Uranové kostky z Haigerlochu se tak dostaly do amerických rukou. Přímý důkaz, že některý z těchto jáchymovských uranových materiálů byl použit v bombách Little Boy nebo Fat Man, však znám není. Spojené státy měly v té době vlastní zavedené zdroje uranu, především z Belgického Konga, Kanady a amerických nalezišť. Jáchymovský uran se však prostřednictvím německého programu nepochybně **dostal do amerického jaderného materiálového systému**.
- Po válce začal Sovětský svaz získávat uran přímo z Československa a současně převzal část německých uranových zásob a technologií. Od roku 1946 se k tomu přidala nová těžba v Sasku. Uran pro první sovětský produkční reaktor A v Majaku, v němž bylo vyrobeno plutonium pro bombu RDS-1, proto pocházel z více zdrojů. Přesný podíl jáchymovského uranu nelze dnes určit, ale **československé dodávky patřily k významným raným zdrojům sovětského atomového programu**.
- **Jáchymovský uran tak vytvořil pozoruhodnou historickou spojnici mezi třemi soupeřícími jadernými programy**. Prokazatelně vstoupil do německého jaderného výzkumu, jeho část se dostala do amerických rukou a poválečné československé dodávky se významně podílely na rozvoji sovětského atomového projektu. Přesný podíl jáchymovského uranu na konkrétních prvních jaderných zbraních zůstává u amerického i sovětského programu jen částečně doložitelný.

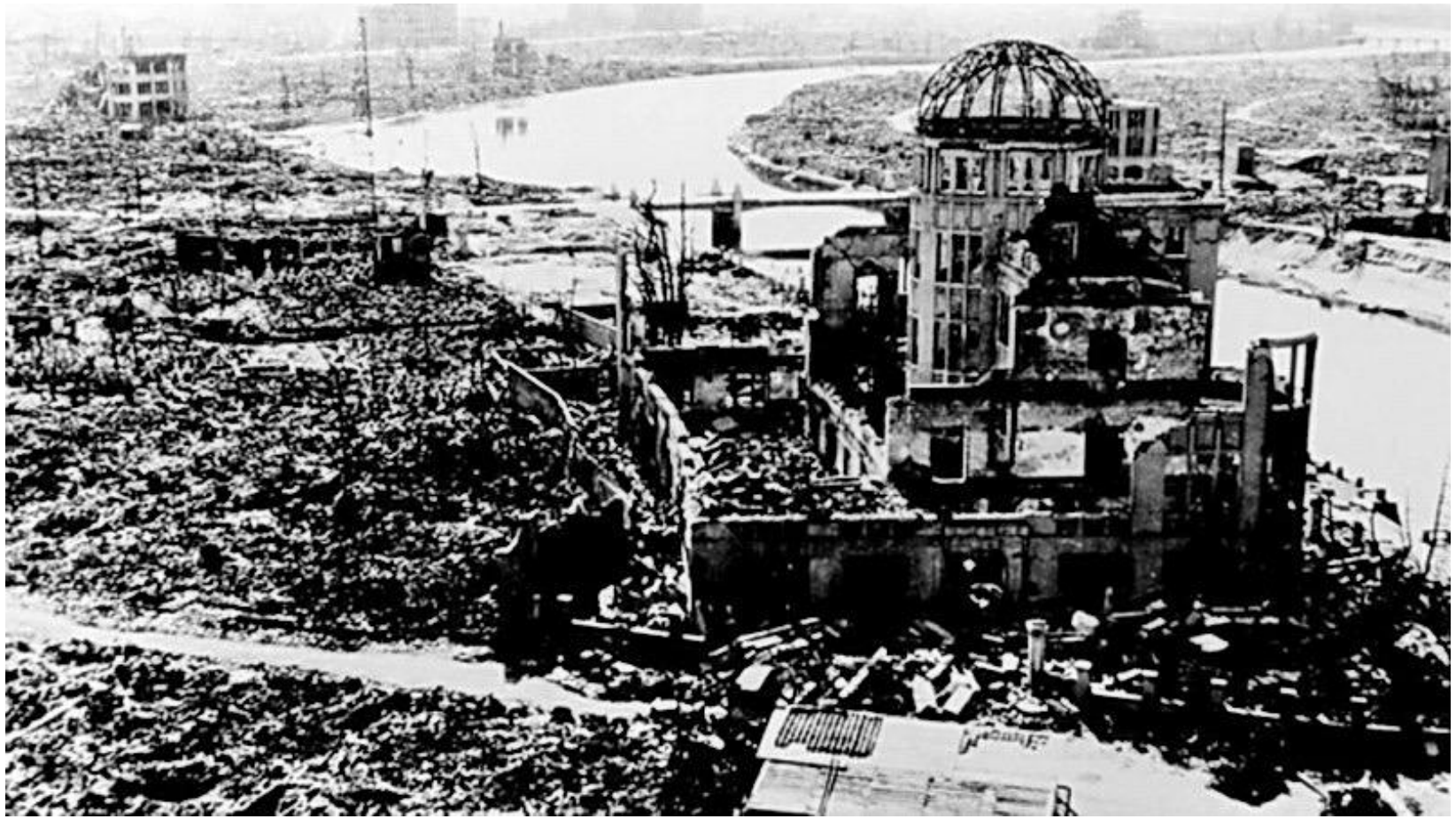


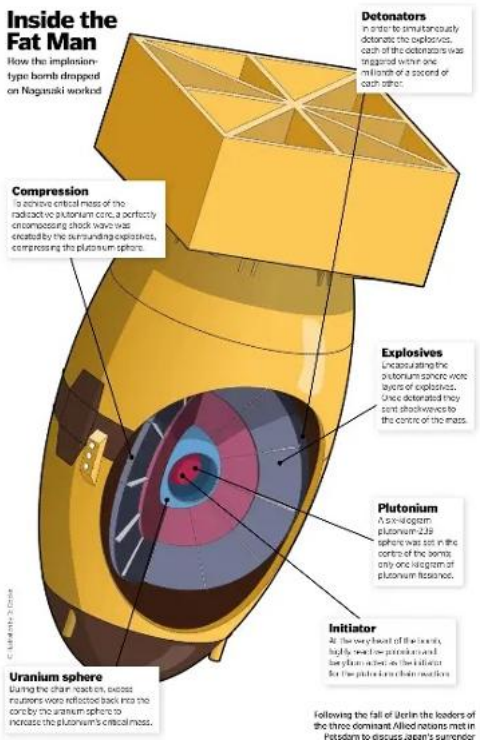
Cross-section drawing of Y-1852 Little Boy showing major mechanical component placement. Drawing is shown to scale. Numbers in ( ) indicate quantity of identical components. Not shown are the APS-13 radar units, clock box with pullout wires, baro switches and tubing, batteries, and electrical wiring. (John Coster-Mullen)

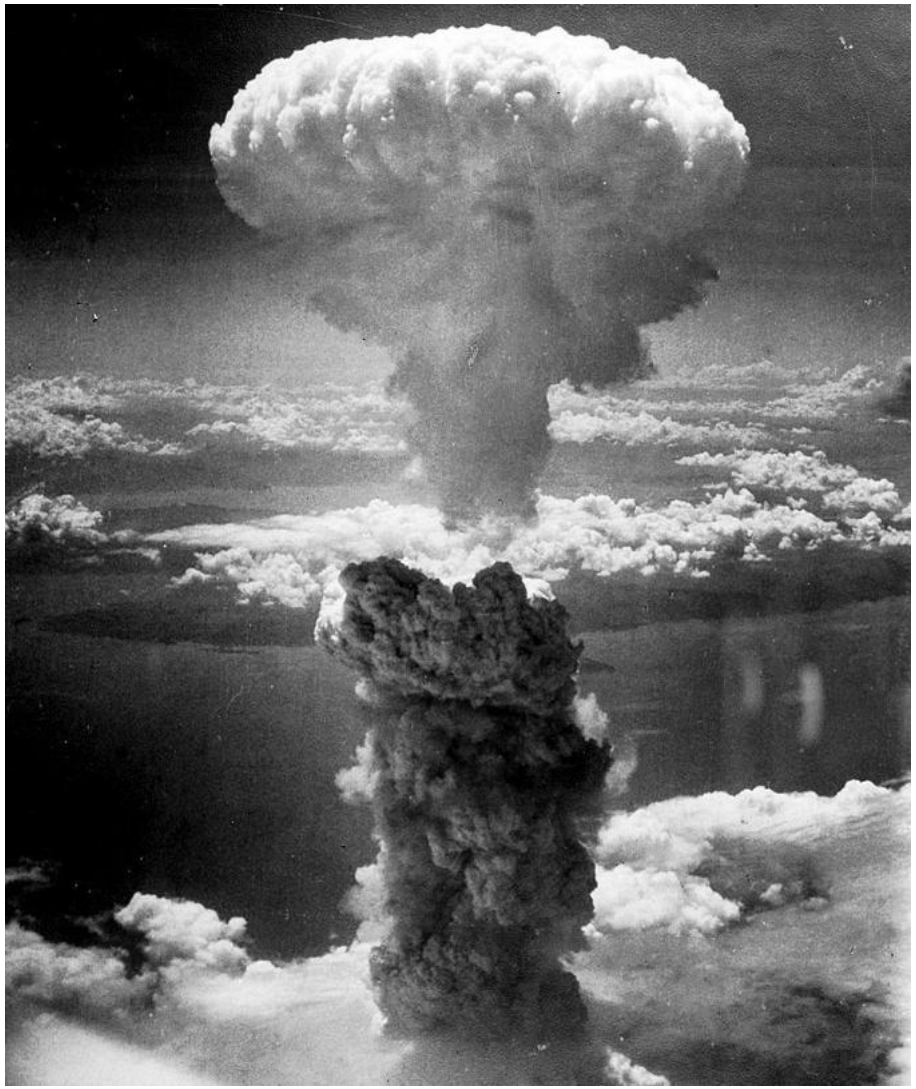
Z) Armor Plate
Y) Mark XV electric gun primers (3)
X) Gun breech with removable inner plug
W) Cordite powder bags (4)
V) Gun tube reinforcing sleeve
U) Projectile steel back
T) Projectile Tungsten-Carbide disk
S) U-235 projectile rings (9)
R) Alignment rod (3)
Q) Armored tube containing primer wiring (3)
P) Baro ports (8)
O) Electrical plugs (3)
N) 6.5" bore gun tube
M) Safing/arming plugs (3)
L) Lift lug
K) Target case gun tube adapter
J) Yagi antenna assembly (4)
I) Four-section 13" diameter Tungsten-Carbide tamper cylinder sleeve
H) U-235 target rings (6)
G) Polonium-Beryllium initiators (4)
F) Tungsten-Carbide tamper plug
E) Impact absorbing anvil
D) K-40 steel target liner sleeve
C) Target case forging
B) 15" diameter steel nose plug forging
A) Front nose locknut attached to 1" diameter main steel rod holding target components

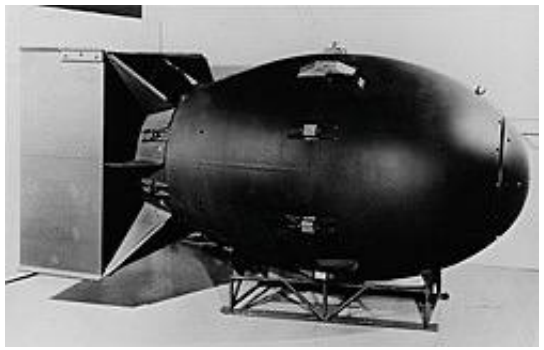
"Atom Bombs: The Top Secret Inside Story of Little Boy and Fat Man," 2003, p 112.
John Coster-Mullen drawing used with permission






Inside the Fat Man
How the implosion-type bomb dropped on Nagasaki worked
Detonators
In order to simultaneously detonate the explosives, each of the detonators was triggered within one millionth of a second of each other.
Compression
To achieve critical mass of the radioactive plutonium core, a perfectly circumpassing shock wave was created by the surrounding explosives, compressing the plutonium sphere.
Explosives
Encapsulating the plutonium sphere were layers of explosives. Once detonated they sent shockwaves to the centre of the mass.
Plutonium
A six-kilogram plutonium-239 sphere was set in the centre of the bomb; only one kilogram of plutonium fissioned.
Initiator
Uranium sphere
During the chain reaction, excess neutrons were reflected back into the core by the uranium sphere to increase the plutonium's critical mass.
Following the fall of Berlin the leaders of the three dominant Allied nations met in Potsdam to discuss Japan's surrender







Looking back at Hiroshima

Seventy years ago, the U.S. dropped the first atomic bombs on Japan.



Hiroshima, Aug. 6, 1945

Uranium bomb dubbed "Little Boy" detonates 1,890 ft. (576 m) above the city at 8:15 a.m.

Explosion by gun-barrel method

Little Boy

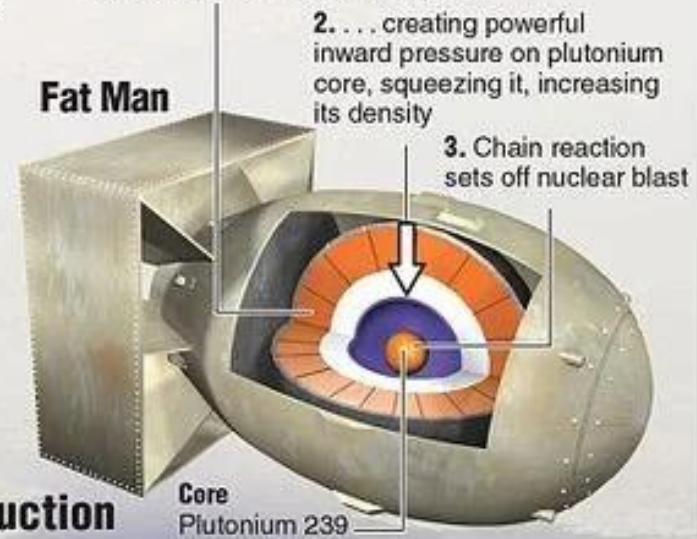


Nagasaki, Aug. 9, 1945

Plutonium bomb dubbed "Fat Man" detonates 1,800 ft. (549 m) above the city at 11:02 a.m.

Explosion by implosion

Fat Man



Destruction

