

Radiační biofyzika 2

Martin Falk

Radiační biofyzika 2

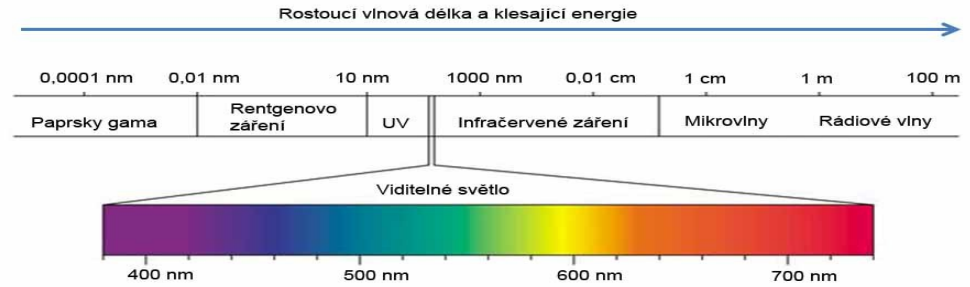
Objev přirozené radioaktivity a další vývoj

Martin Falk, falk-at-ibp.cz, Biofyzikální ústav AVČR, Brno



RADIOBIOLOG

- výzkum vlivu záření na biologické objekty
- v užším slova smyslu – vliv ionizujícího záření



Obr. Elektromagnetické spektrum

OBJEV RADIOAKTIVITY a PRVNÍ VÝZKUMY

Wilhelm Conrad Röntgen

8. listopadu 1895

„To, co vidíme, jsou kosti vaší ruky...“



Antoine Henri Becquerel

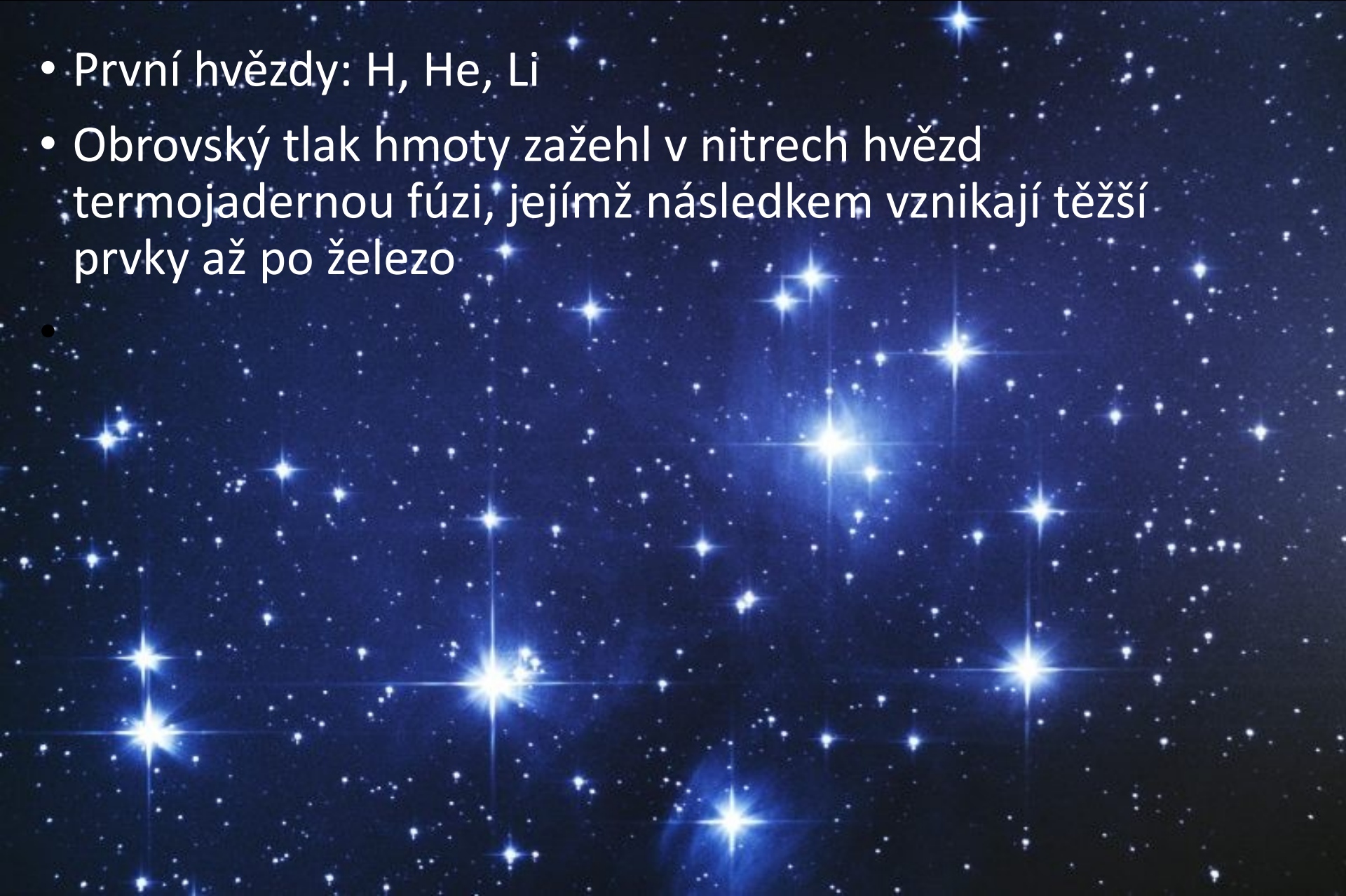
18. května 1896

1903 – spolu s Pierre a Marií Curie - Nobelova cena za fyziku za objev radioaktivity



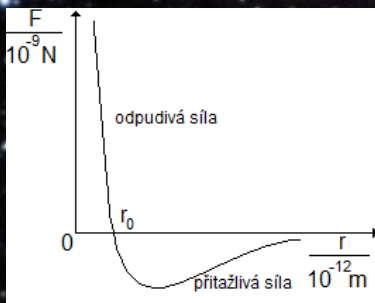
Vznik těžších prvků

- První hvězdy: H, He, Li
- Obrovský tlak hmoty zažehl v nitrech hvězd termojadernou fúzi, jejímž následkem vznikají těžší prvky až po železo



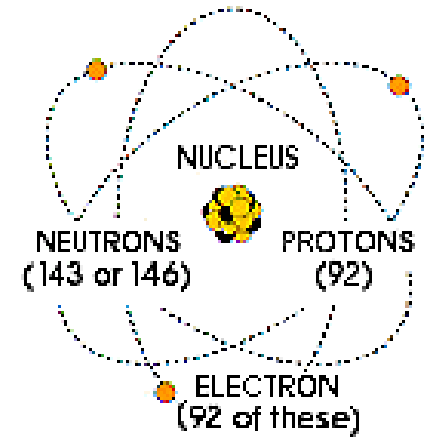
Vznik nejtěžších prvků → URAN

- Exploze prvních supernov
- Nepředstavitelně obrovská energie umožňující vznik jader v endotermických reakcích
- Vznik těžších prvků než Fe, včetně U (asi -6.6 mld. let)



URAN – nejtěžší přirozeně se vyskytující prvek na Zemi

Prvek, s nakumulovanou silou supernovy,
Prvek, jehož objev změnil svět od základu



Protonové číslo: 92

Teplota tání: 1 130 °C

Teplota varu: 3 900 °C

Molární hmotnost: 238,03 g·mol⁻¹

Hustota: 19 050 kg·m⁻³



- Před 4.5 mld let – vznik Země z hmoty, jež obsahuje uran vyprodukovaný erupcemi dávných supernov
- Dnes je již U ve Sluneční soustavě vzácný
- Nicméně, jeho pomalý rozpad je hlavním zdrojem zahřívání kůry Země, zodpovídá za kontinentální drift (asi ale i participace dalších fenoménů)



Jáchymov, dnešní ČR, kdysi dávno...



Quelle: Deutsche Fotothek

Stříbrné doly

Na začátku byly stříbrné mince, které byly raženy v Jáchymově v Krušných horách. Německý název pro Jáchymov byl **Joachimstal** a ta mince, která se tam razila, se nazývala **joachimstaler**. A protože to bylo dlouhé slovo, bylo zkracováno na **taler**. Z toho se pak vyvinulo české **tolar**. To se šířilo do různých zemí Evropy, protože tyto mince měly dobrý zvuk, a dostaly se i do Anglie, kde byly přijaty v podobě **dollar**. Když v 18. století hledaly Spojené státy získaly nezávislost, hledaly vhodný název pro svoje oficiální platidlo, protože se chtěly odlišit od Francie, Anglie atd., a sáhly po tomto pojmenování dollar, které od 16. století v Anglii žilo, ale nebylo prakticky využíváno. Takže v původu amerického dolaru je český tolar, který vznikl z jáchymovské mince na počátku 16. století." (etymolog z Ústavu českého jazyka a komunikace Filosofické fakulty UK PhDr. Jiří Rejsek).



PECHBLENDE (SMOLINEC)

Po roce 1515 těžba stříbra v Jachymově

V dolech se těžily nejdříve stříbrné rudy, později rudy kobaltu a arsenu

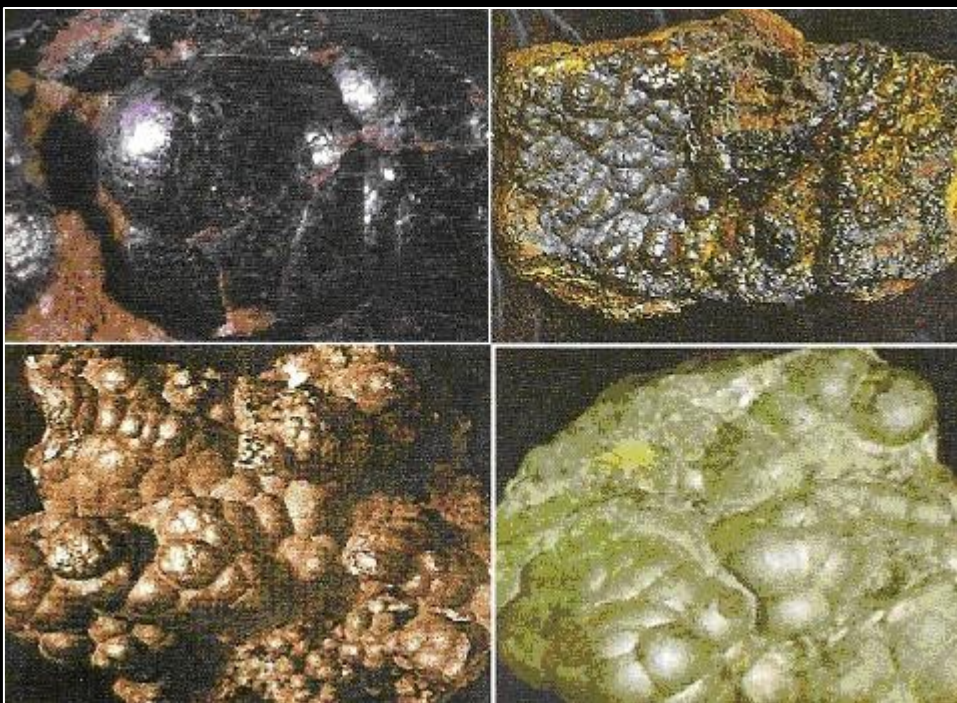
Během těžby někdy horníci narazily na žílu podivné horniny, jejíž nalezení znamenalo pro horníky smůlu – znamenalo to totiž, že zásoby stříbra byly vyčerpány

Nazvali ho proto **PECHBLENDE**

pech = smůla, blende = nekov

z toho **SMOLINEC** (nosící smůlu)

Později **URANIT**



PROČ „SMOLINEC“

- jednak vypadá jako pryskyřice (smůla),
- pak ho mohli takto označit horníci ve stříbrných dolech, protože se vyskytuje tam, kde se nevyskytuje stříbro, a mohl jim tak přinášet smůlu v těžbě.
- Jako třetí původ smolného označení se nabízí možnost, že si horníci spojili jeho nálezy se zvýšenou úmrtností kolegů, i když se v té době ještě nevědělo o rakovině plic a její spojitosti s touto horninou (a jejími štěpnými produkty).



„smolné blejno“
(typická jáchymovská uranová ruda –
ledvinitý smolinec v žíle s růžovým
dolomitem a tmavě fialovým fluoritem)



počátek větrání
smolince



směs síranů a uhličitánů
(uranopilit, zippeit, zellerit)



uranové karbonáty
(světle žlutý zellerit s liebigitem)



uranové sírany
(zelený johannit, žlutý zippeit)



tmavě zelený andersonit a světle
žlutý schröckerit (karbonáty)



uranophan,
(silikát uranu)



metatorbernit
(fosforečnan uranu)



žlutý autunit
(fosforečnan uranu)



metazeunerit
(arzeničnan uranu)

zvětráváním jáchymovského smolince vzniká pestrá škála nápadně barevných druhotných uranových minerálů, okrů a slíd, kterých si mj. povšimli i skláři

(Jáchymov, 2010)

PECHBLENDE (SMOLINEC)

Smolinec proto nejprve končil na haldách kolem dolů
jakožto naprosto bezcenný materiál...



SMOLINEC → Uranit

- jako první na světě uvádí popis smolince Brückmann (1727), a to z Jáchymova.
- O poznání vlastností smolince se významně zasloužil

M. H. Klaproth (1743-1817), který r. 1789 zkoumal smolinec z Johanngesengstadt a došel k názoru, že je to „samostatná polokovová látka“ pro kterou navrhl název **Uranit** podle tehdy Herschelem objevené planety (1781).

- Vlastní smolinec pokládal za sloučeninu tohoto „polokovu“ se sírou. Klaprothovi se ale podařilo připravit pouze oxid uraničitý, který pokládal za samostatný prvek. Stanovil i některé jeho vlastnosti, poznal jeho rozpustnost v kyselině dusičné i lučavce královské, připravil jeho nitrát, fosfát a acetát.
- Uvedl i důležitou vlastnost uranových sloučenin **barvit sklovinu žlutě a zeleně** a sloužit i jako barva na porcelán.
- Roku 1790 doporučil změnit název uranit na uranin.
- Klaprothova práce se stala základem pro další studium uranových minerálů.



Izolace URANu

- Eugène-Melchior Péligot
(1811–1890 Paříž)
- francouzský chemik
- 1841 jako první izoloval uran a použil termín „uranyl“ (pro označení žlutých solí uranu).
- Uran začal být zajímavý alespoň pro barvení skla, stále však trpělivě čekal, až přijde jeho čas...

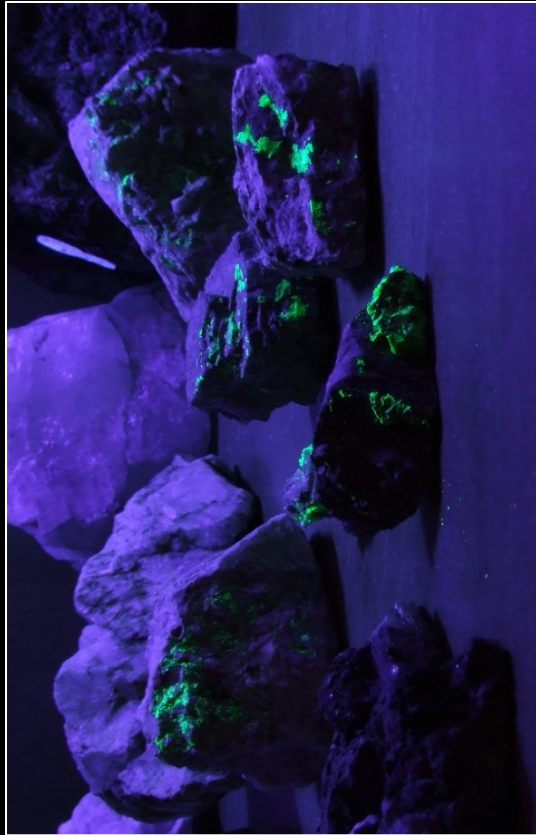


Paříž, Francie, Antoine Henri Becquerel



Antoine Henri Becquerel

1852, Paříž –1908, Le Croisic, francouzský fyzik



Uranové soli a sklo pod UV-světlem světélkují, to H. B. fascinovalo a dovedlo ho to k vykonání převratného experimentu...

Becquerel – OBJEV PŘIROZENÉ RADIOAKTIVITY

- 20. února 1895. Jako řádný člen francouzské Akademie věd se Becquerel spořádaně dostavil na zasedání této ctihodné instituce, aby tu vyslechl přednášku svého kolegy Henriho Poincarého o Röntgenových pokusech s katodovými paprsky.
- Wilhelm Conrad Röntgen krátce předtím zjistil, že záření vznikající při průchodu elektronů vakuovou trubicí dokáže pronikat pevnými látkami a zanechávat stopy na fotografické desce, stejně jako obyčejné světlo. Snímek kostí ruky i s kovovým prstenem jeho manželky obletěl svět a uvedl vědce do varu. Záření, které dokáže zobrazovat věci dosud neviditelné!
- Otec H.B. (Alexandre Edmond Becquerel, 1820-1891), též významný fyzik, studoval světélkování látek ve slunečním světle.
- H.B. tak napadlo, zdali světélkující nerosty také nevydávají paprsky X. Nejprve si však myslel, že nerosty mohou vydávat tajemné neviditelné záření jen tehdy, když viditelně světélkují.



Becquerelův experiment

- Dal vybrané kameny z otcovy sbírky na slunce, a když se dostatečně "nasvítily" a začaly samy pěkně zářit, položil je na světlotěsně zabalené fotografické desky a po čase je vyvolal
- Poté se nestačil divit: Většina desek zůstala naprosto nezměněná, **jen pod několika vzorky zčernaly.** Ukázalo se, že jde o fluoreskující soli uranu.
- Rok po Poincarého přednášce (24. února 1896) Becquerel informoval Akademii o svém objevu:

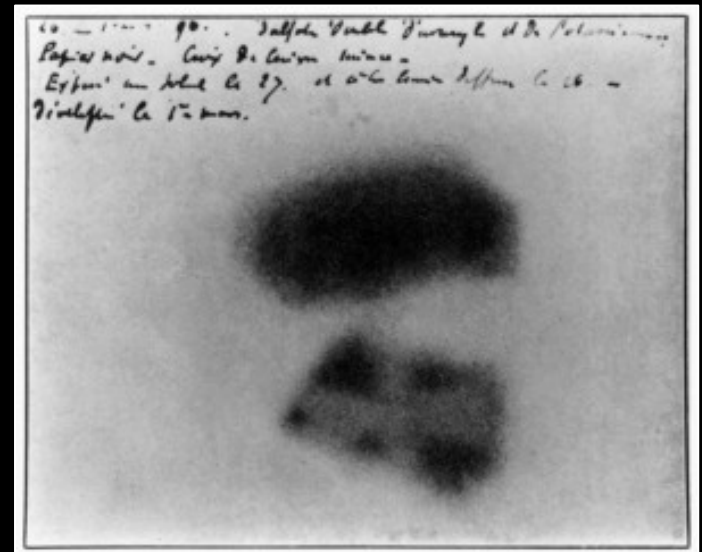
"Uran vydává záření pronikající hmotou i bez vysokého napětí katodové trubice."

To byl nepochybně významný poznatek, ale k objevu přirozené radioaktivity stále ještě nesměřoval. Becquerel se totiž stále ještě domníval, že záření souvisí s luminiscencí uranových solí.



Becquerelův experiment - pokračování

- Když chtěl pokus opakovat, **neočekávaně se zatáhlo**, a tak se Becquerel rozhodl experiment odložit a nechal několik neexponovaných desek po několik dní v šuplíku i s uranem
- **a byl udiven ještě více**, když zjistil, že fotografické desky opět ztmavly. Bylo zřejmé, že světélkování nebylo příčinou.
- Pokusy brzy ukázaly, že **zdrojem Becquerelova záření byl uran** přítomný v síranu.
- Už o několik dní později (2. března) po prvním dopise tak akademikové dostávají dopis s ještě neuvěřitelnějším sdělením:
Uran vydává záření i bez předchozího osvětlení!
- Vyvodil, že **"Tuto vlastnost má pouze uran a nezávisí na ničem jiném"**.



Becquerelovo záření

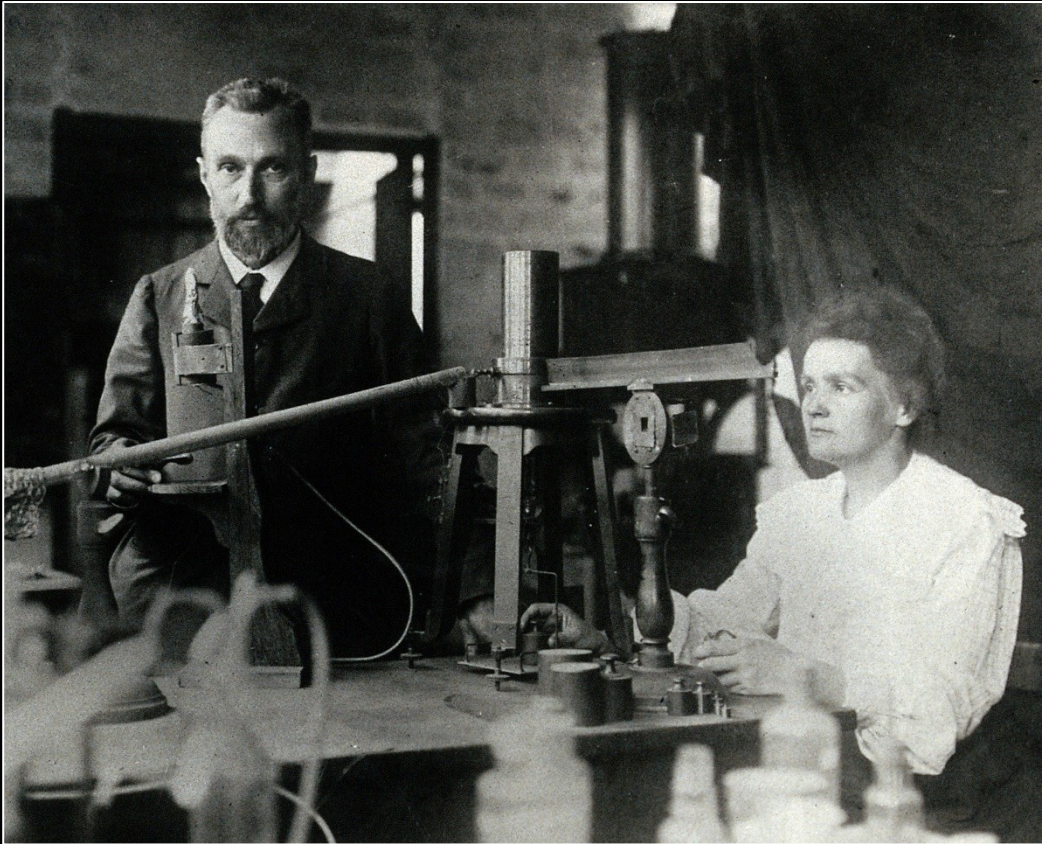
- Becquerel se podivným zářením z nitra uranu dál intenzivně zabýval:
- Zjistil že černání fotografických desek způsobují **všechny sloučeniny obsahující uran**, zatímco luminiscencí se vyznačují jen některé jeho soli
- Dále, že záhadné záření **ionizuje vzduch**
- a **lze jej odklonit pomocí magnetického pole.**
- Tento poznatek zveřejnil v roce 1899. Vyplývalo z něj, že se neznámé záření (přinejmenším z určité části) skládá z elektricky nabitých částic. Na jeho podstatu však přijít nedokázal.

RADIOAKTIVITA, Marie a Pierre Curieovi

- Štafetu od H.B. převzali manželé Marie a Pierre Curieovi
- mladá žena polského původu, Marie Curie, tehdy ještě Sklodovská, byla jednou z Becquerelových studentek a právě vdala za fyzika Pierra...



Radioaktivita, Marie a Pierre Curieovi



- Curieovi již v roce 1896 zjistili, že stejné záření jako uran vydávají také sloučeniny thoria - na světě tedy byl přinejmenším ještě jeden radioaktivní prvek
- Tehdy Marie Curieová pro tuto vlastnost (které se zpočátku říkalo **Becquerelovy paprsky**) poprvé použila název **radioaktivita**.
- Objevitel záření (H.B.) však o fyzikální zvěčnění svého jména nakonec přece jen nepřišel: byla po něm pojmenována **jednotka radioaktivity**:
- Jeden Becquerel [1 Bq] vyjadřuje takovou aktivitu zdroje při níž se za 1 sec rozpadne 1 atom

Radioaktivita, Marie a Pierre Curieovi

- Manželé Curieovi pak prováděli pečlivá měření v různých horninách. Hlavní roli zde hrál opět SMOLINEC Z JÁCHYMOVA
- Bádání bylo totiž dosti náročné na množství výchozího materiálu, a proto M.C. požádala vídeňského ministra orby, hraběte Buquoye, o zaslání vzorku smolince z Jáchymova. Ten jí nechal poslat několik tun odpadu z továrny na uranové barvy v Jáchymově. (nakonec M-C. získala 0.1g Po z několika tun smolince)
- M a P Curie brzy zjistili, že něco s horninami a radioaktivitou nesedí:
- radioaktivita těchto hornin byla mnohem vyšší, než by odpovídalo zastoupení uranu a thoria ve vzorcích.
- Jediným logickým vysvětlením bylo, že rudy obsahují další dosud neznámé prvky, jejichž radioaktivita je ještě výrazně vyšší.
- V červenci 1898 oznamují: "Domníváme se, že látka, kterou jsme vyloučili ze smolince, obsahuje dosud neobjevený kov... Navrhujeme, aby byl nazván **polonium**, na počest její rodné vlasti.
- Měli pravdu. **Polonium** bylo **150x** radioaktivnější než uran.
- Později ještě objevili **radium**, jehož aktivita byla dokonce **900x** vyšší než u uranu. Proto ho také pojmenovali „radium“ = zářící



- POLONIUM (Po)
- Objeveno 1898 Marií Curie, při výzkumu „pitchblende“ – uranové rudy z Jáchymova
- Existuje přibližně 30 isotopů polonia s atomovou hmotností 194 až 218 (isotopy = liší se počtem neutronů)

Radioaktivita, Marie a Pierre Curieovi

- Radium dostalo název z latinského radius – paprsek.

Malé množství radia vyelektrolyzované na tenký měděný plíšek a překryté polyurethanem k zabránění reakce se vzduchem (stříbřitý kov alkalických zemin)



Radium was discovered by **Marie Curie** and her husband **Pierre** in 1898. In 1903, the Royal Academy of Sciences awarded Marie and Pierre Curie and **Henri Becquerel** the Nobel Prize in Physics, making Marie the first woman to win the prize. Later, in 1911, she would win her second Nobel for isolating radium, discovering another element (polonium), and for her research into the new phenomenon of radioactivity, a word she coined herself.

By 1910, radium was manufactured synthetically in the U.S. But before the effects of radiation exposure were well understood, **radium ended up in a lot of crazy places for its purported magical healing properties and its glow-in-the-dark novelty.**

→ DOBA BEZUZDNÉHO OPOJENÍ RADIOADTIVITOU



Health, Well being & Entertainment



“Here’s Health!”

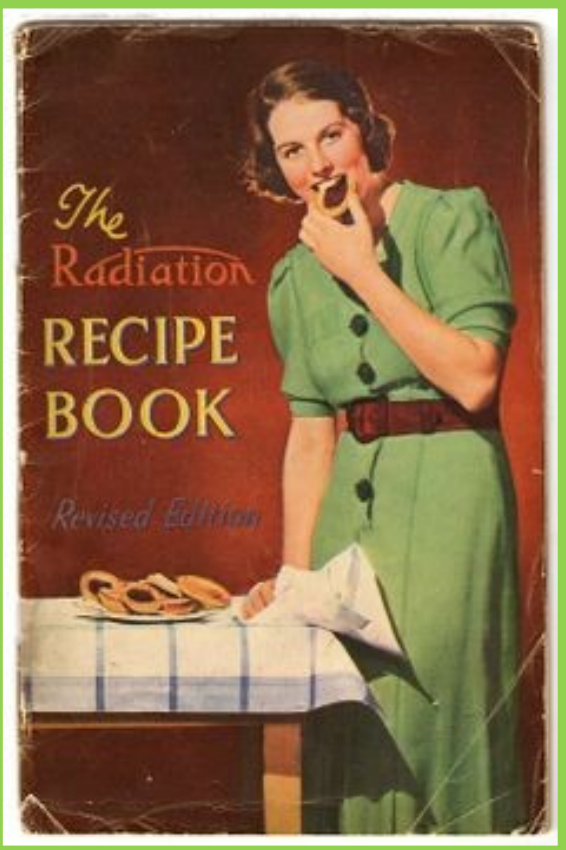
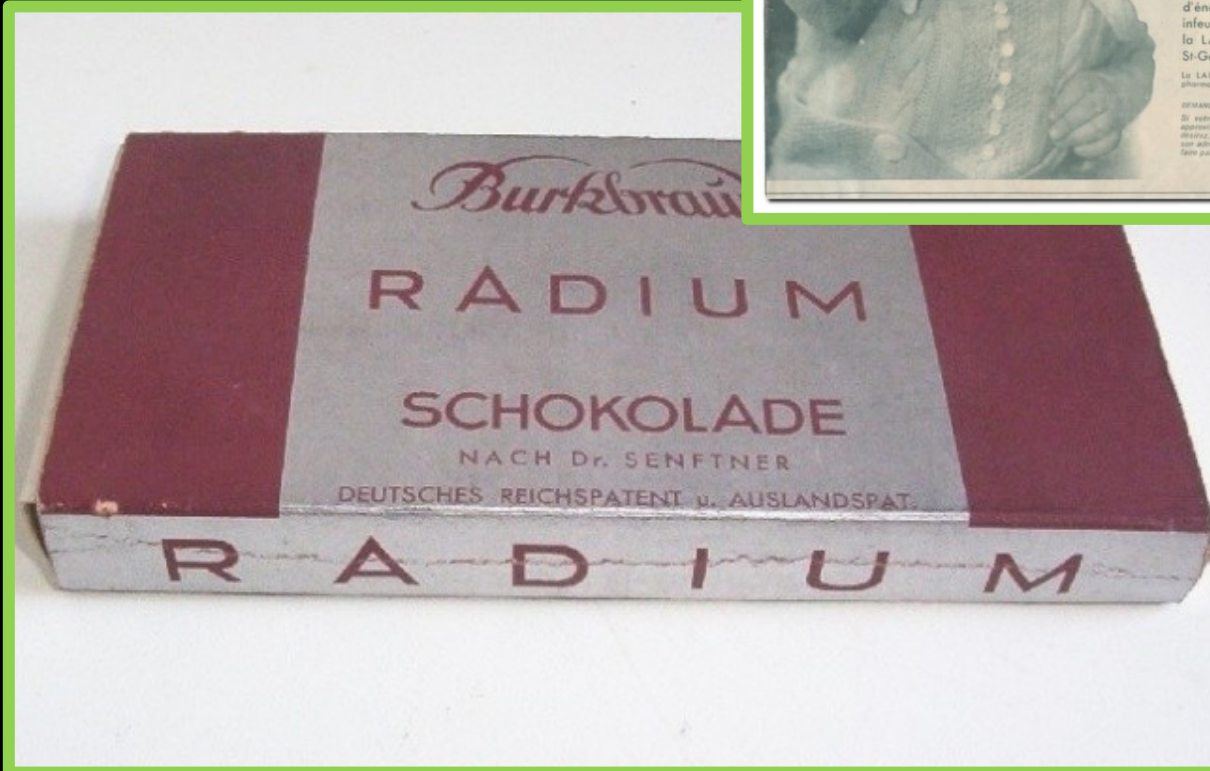
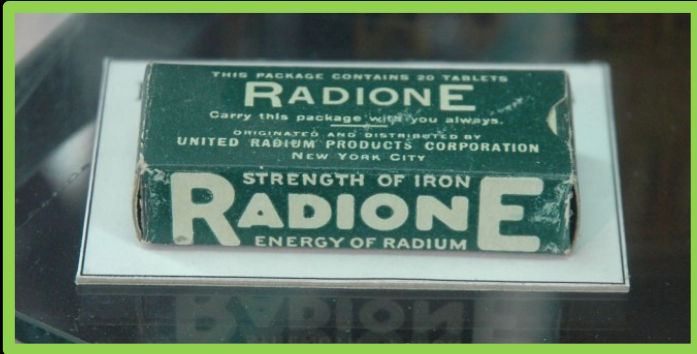
TO keep that health you must keep Nature’s laws. They are simple and easy to keep; but if they are broken Nature exacts a heavy penalty from each and every one. Get plenty of sleep, exercise and wholesome fun. Avoid overwork, all other excesses, eat fresh, natural foods, breathe fresh air, and drink plenty of fresh, invigorating, natural radioactive water from the Radium-Spa.

An advertisement for Doramad toothpaste. At the top, a small cartoon character is next to a box of toothpaste. Text reads: "Ich - der ganz feine Putzkörper - mache die Zähne blendend weiß, schone den Schmelz!". Below this, it says "Das ist die radioaktive biologisch wirksame Zahncreme". The brand name "Doramad" is written in a large, stylized font, with "Radioaktive Zahncreme" underneath. At the bottom, it says "KLEINE TUBE 45 GROSSE TUBE 75 G" and "EIN ERZEUGNIS DER AUERGESSELLSCHAFT A.G. BERLIN N.65". There is a small sunburst logo on the right.

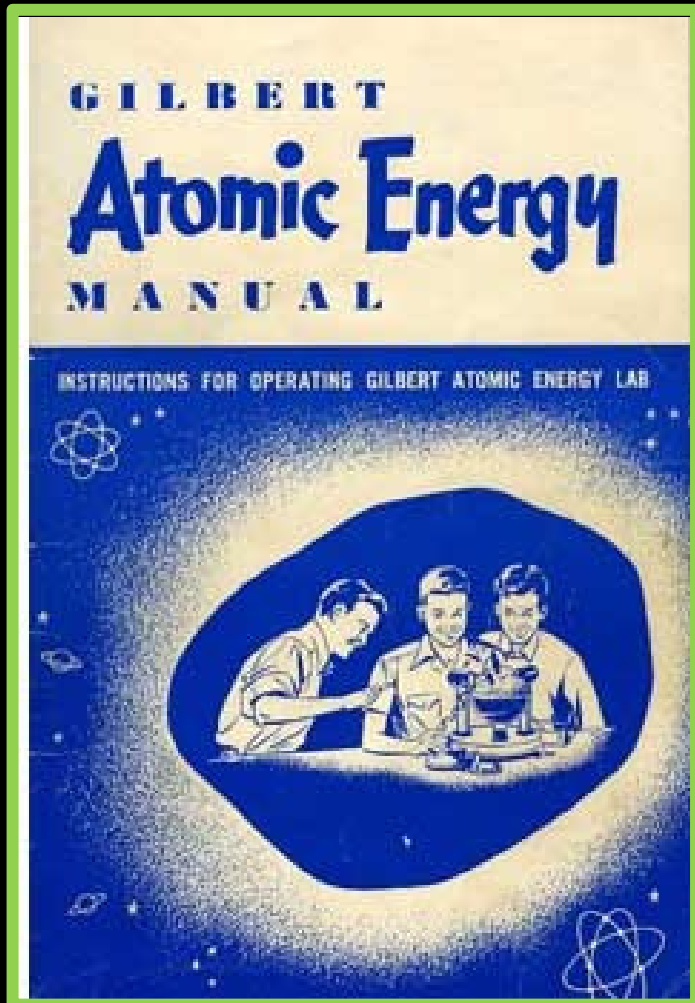


Miss X-Ray

Sweets & Food...



Children toys...



Princess Radium Lingerie & cosmetics

I want to **Pay You**
\$85 a week



Man or Woman
 Send for my proposition, I pay men and women \$85.00 weekly to as high as \$36.00 per day for either all or spare time help. No experience necessary.

Sell PRINCESS RADIUM LINGERIE

Charming ladies lingerie and hosiery, pretty, low priced, sells on sight, actually. Miss Grace James averaged \$38 a day, spare time; R. G. Thompson earned \$38 in one day. You can do as well, we tell you how.

Profits in Advance
 Your profits in advance, we ship and collect. You show goods and mail us the orders. Nothing in any store compares in beauty and value to "Princess Radium" lingerie and hosiery.

High Grade-Steady
 Unusual opportunity for big cash quick, write for plan and exclusive territory, build a steady income for life. District managers wanted. Territorial rights going fast, don't delay, write now.

Free
 Handsome photos from actual models and samples of genuine "Princess Radium" silk, free.

ROBERTS-FRANK & CO
 1733 Irving Park Blvd
 DEPT E288 CHICAGO

MÉTODE
THO-RADIA
 EMBELLISSANTE PARCE QUE CURATIVE




DENTIFRICE THO-RADIA
 A BASE DE SELS DE THORIUM
 FORMULE du Docteur Alfred CURIE

Astringent et bactéricide, il stérilise la cavité buccale, évite et combat les gingivites, prévient la carie et les pyorrhées alvéolaires. Il assainit les dents, laisse dans la bouche une délicieuse impression de fraîcheur, conserve l'éclat, la blancheur et l'intégrité de la dentition.

Pas de jolii sourire sans de jolies dents

CRÈME THO-RADIA
POUDRE THO-RADIA
 EMBELLISSANTES PARCE QUE CURATIVES
 à base de Thorium et de radium selon la formule du DOCTEUR ALFRED CURIE

Radium and Beauty



Rador Toilet Requisites

HERE are the first toilet preparations to embody Actual Radium, an astonishing new force for betterment, applied as an aid to Beauty. Learn how the amazing Energy of Radium has proved a boon to the human skin. Learn what Radium actually means to Beauty and how its power is employed in "Rador" Preparations. Study our \$5,000 guarantee. Then turn to "Rador" Toilet Requisites. When you have used, enjoyed and tested them you will adopt them as your own first aid to Beauty.

PREHISTORIC woman first discovered her image in some quiet jungle pool. Ever since Beauty has engaged the world's attention. Radium, though new to the world, is no less of a shining mirror. Its mirror has amazed and thrilled us all. Who would have imagined that this new substance would ever get so close to Beauty? Yes, Radium, indeed, has discovered a wonderful beauty secret. Science knows no Radium-Beauty. Any one who knows it will use it. Radium promises an evermore perfect beauty for evermore.

The finest particle of Radium known of a million parts of Energy Rays, the Energy never diminishing, never moving, day or night, ever in your cell. A Ray's a million times more and exclusive Radium all their own, a perfume and for sale in any market. They are the best and only preparation for the toilet to contain Actual Radium-Beauty's power will be Beauty.

Every "Rador" Preparation is guaranteed, under Radium power, to remove a definite amount of Actual Radium and to retain its Radiant Beauty for at least three years. In England, "Rador" Preparations are a matter of great public pride. They are used by world women of title and fashion. They are the best and most effective. We ground them in the United States as the greatest beauty and health aid in the world. They are perfect in complexion, smooth, youthful facial features, a healthy skin and beautiful hair. Each and every "Rador" Beauty aid is the

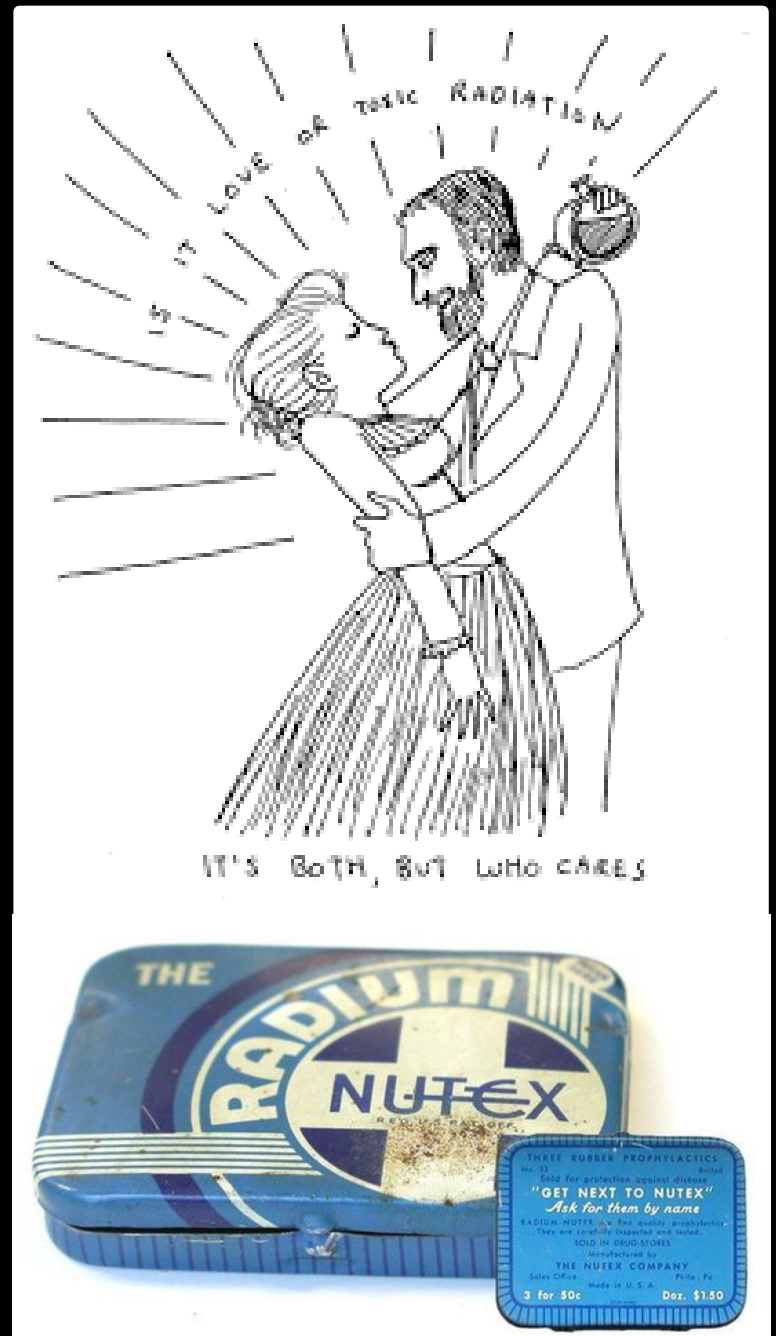
Rador Toilet Requisites
 "Rador" Toilet Requisites are necessarily lighter in price. This must be expected in preparations containing the finest ingredients only, plus a definite quantity of Actual Radium. But the greater benefits obtained from "Rador" Preparations would justify an even higher price. The best is always the cheapest and gives further:
 It is easy to prove the superiority of "Rador" Preparations. Try them. See how smoothly the "Yankee" Cream

GUARANTEED
 Rador Artistic
 1733 Irving Park Blvd. Chicago

Radium (Undark) Girls



"Hey, baby, you're looking radioactive!"

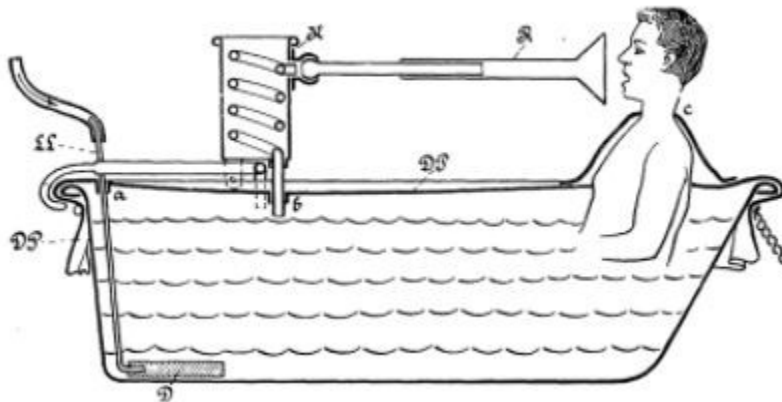


Radium v lékařství, raiotherapie

- Pierre Curie si povšiml, že když přiložil skleněnou nádobku s rádiem ke kůži, pocítil pálení a došlo ke spálení podobnému silnému spálení od slunce
- Tehdy se nádory léčily vypalováním, a tak zde byl jen krůček k nápadu využít radium pro terapii nádorů
- Skleněné nádoby s rádiem všité do bandáží se přímo přikládaly k nádorům
- Radium ale velice drahé: 1 g Ra = 7 tun uranové rudy (1908 – 1 g Au = 66 centů, 1 g Ra = 88 tis USD)

RADIUM V LÉKAŘSTVÍ

- Počátky radioterapie nádorů
- Jáchymov – radioaktivní koupele



Mask for radium treatment for cancer of the neck and face.

<http://t.co/Yf52s5yAKE>

První procitnutí – nebezpečí IZ

- Radioaktivita, ale není z těch džinů, které jde snadno vyvolat a stejně snadno také zapudit zpět do láhve.
- Už v roce 1901 Becquerel - patrně jako vůbec první člověk - doslova na vlastní kůži zjistil, že radioaktivita není jen úžasná ale i zhoubná. Když v dubnu toho roku nosil nějaká čas vzorek uranové sloučeniny v kapse u vesty, krátce na to se mu v těch místech na těle objevila spálenina. Rána se nehojila a nakonec pomohl jen radikální chirurgický zákrok.
- Pravděpodobně i proto se Antoine Henri Becquerel ze svých úspěchů příliš dlouho netěšil. Zemřel v Le Croisic 25. srpna roku 1908 ve věku pouhých 55 let. Mnohé nasvědčuje tomu, že na jeho předčasné smrti se podepsala především radioaktivita - jako ďábel, který za úpis zařídí úspěch, ale nikdy nezapomene na řádné splacení dluhu.
- Marie Curie-Skłodovská kvůli dlouhodobému styku s radioaktivními prvky zemřela na anémii roku 1934.

SMRTÍČÍ POLONIUM

- Polonium is one of the [most toxic substances](#) known.
- According to some sources, it is up to a [trillion times](#) more toxic than hydrogen cyanide.
- It is radioactive because it emits alpha particles (helium ions). Because these are easily absorbed by other materials, even by a few thin sheets of paper or by a few centimetres of air, polonium has to be inside your body to damage you.
- Alexander Litvinenko is not the first casualty of polonium. In 1956, Marie Curie's scientist daughter [Irène Joliot-Curie](#) died of leukaemia that she is believed to have contracted through exposure to polonium years before.
- 17. března 1956 zemřela na leukémii způsobenou zářením, kterému byla celý život vystavena.
- There [have also been claims](#) that Palestinian leader Yasser Arafat may have been exposed to it in a similar way to which Litvinenko was.



Radium Girls



Between 1917 and 1926, the *US Radium Corporation* hired women to paint the faces of watches with **Undark**, a revolutionary luminescent paint made from radium salt.

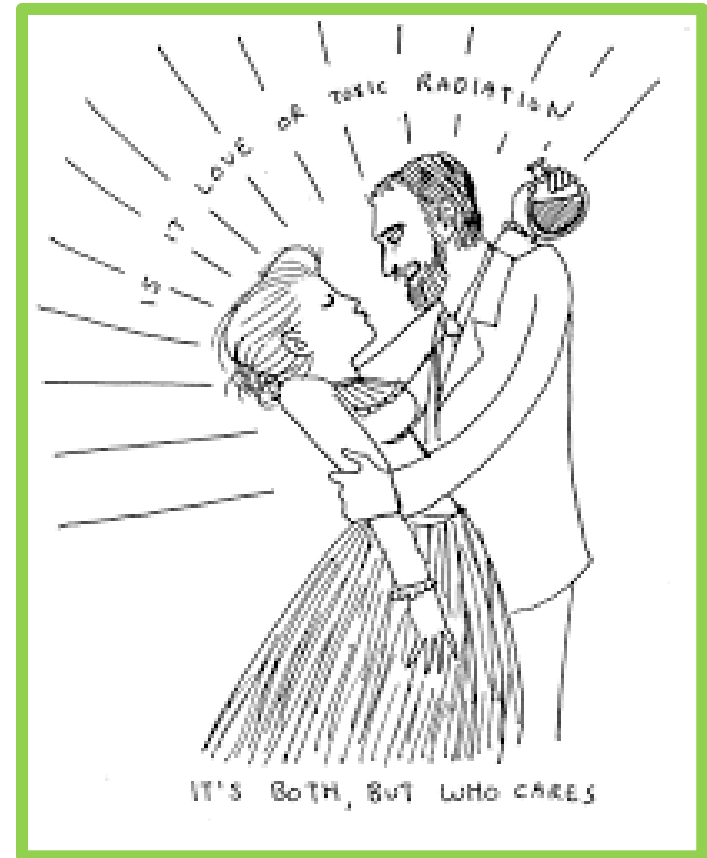
...they **shape and clean the tips with their tongues and lips**. They repeated this mechanical action several hundred times a day, ..., unaware of the extreme toxicity of the radium Sometimes **they would paint their fingernails and teeth glow-in-the-dark** to surprise their boyfriends after work.



Ra biologicky podobné
Ca (akumulace v
kostech)

RADIOAKTIVITA = energie uvolněná při přeměně prvků

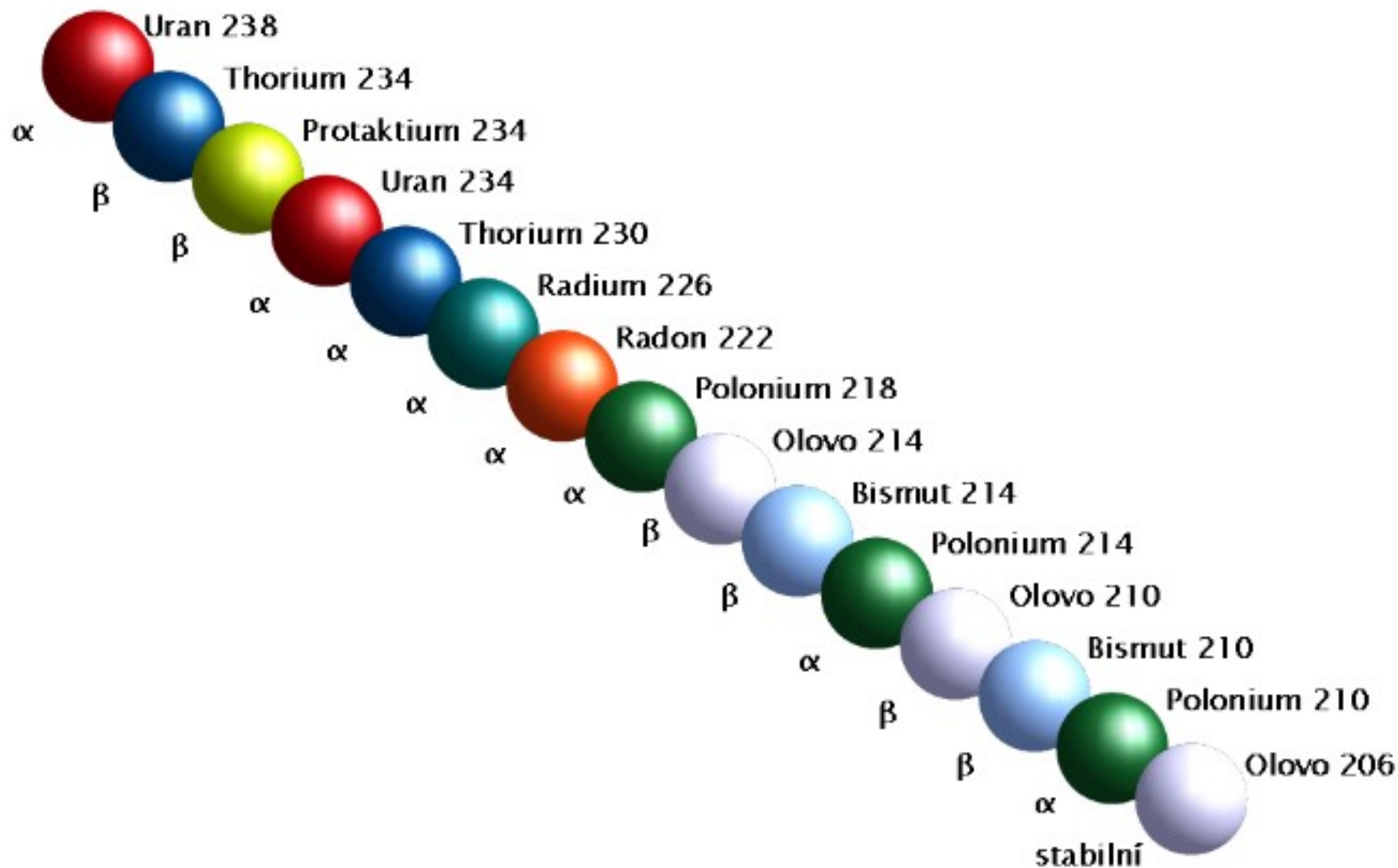
- v roce 1899 Marie Curieová objasnila podstatu radioaktivního záření:
- Radioaktivní záření považovala za vedlejší produkt rozpadu atomových jader.
- Usoudila, že jádra těžkých atomů se zbavují vyzařováním svých částí, čímž se tyto prvky mění na jednodušší.



Rutherford + Soddy

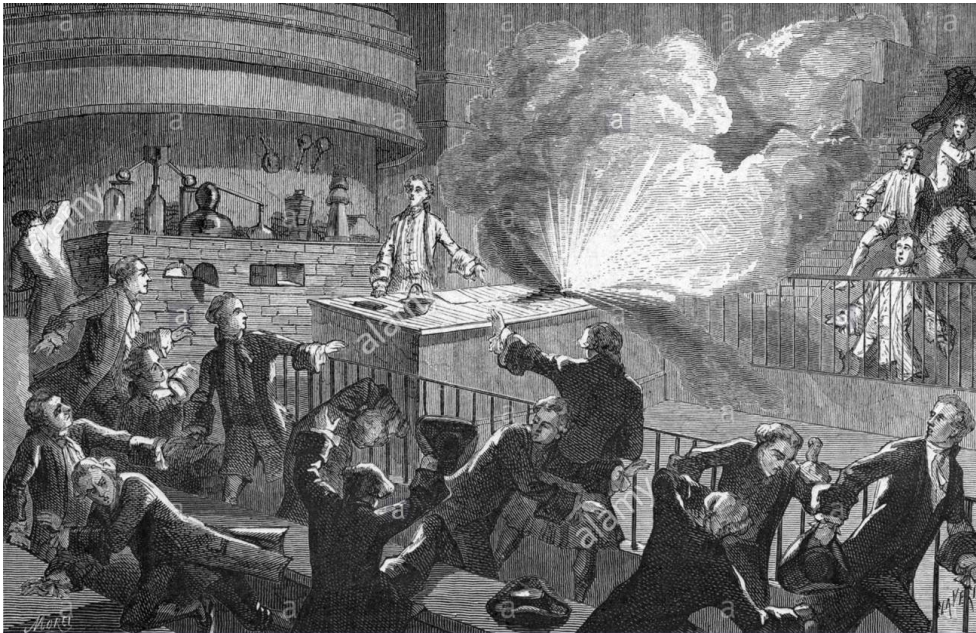
- M + P Curie – na oslavu Nobelovy ceny uspořádali zahradní párty, kde Pierre ukázal lahvičku s radiem - mezi přítomnými Ernest Rutherford – podívoval se, proč tato látka září
- Ernest Rutherford se „spolčil“ s Frederickem Soddy (chemik) a studovali uran → model atomu, prvek záleží na počtu protonů v jádře (vodík – 1, ale U – 92!!). U je tak těžký, že tím „trpí“ a zbavuje se proto svých částí (alfa částice), čímž se mění na prvek jiný
- U → Thorium → Protaktinium → ..Radium → Radon → Polonium → celkem 14 generací „dcer“ – poslední je olovo
- Soddy: „Rutherforde, tohle je transmutace“
- Rutherford: „Proboha, nenazývej to transmutací. Nebo nám nechají setnout hlavy jako alchymistům“
- Rozpadem U se postupně uvolňuje energie – kdyby ji někdo dokázal z atomu dostat najednou, měl by v rukách ohromnou moc

Rozpad uranu 238



RADIOAKTIVITA = energie uvolněná při přeměně prvků

- Svým způsobem tak Marie Curie rehabilitovala dávné alchymisty, kteří usilovali o transmutaci prvků - jen poněkud nestandardními metodami.



Maria Curie-Skłodowska, 7. 11. 1867 - 4. 7. 1934

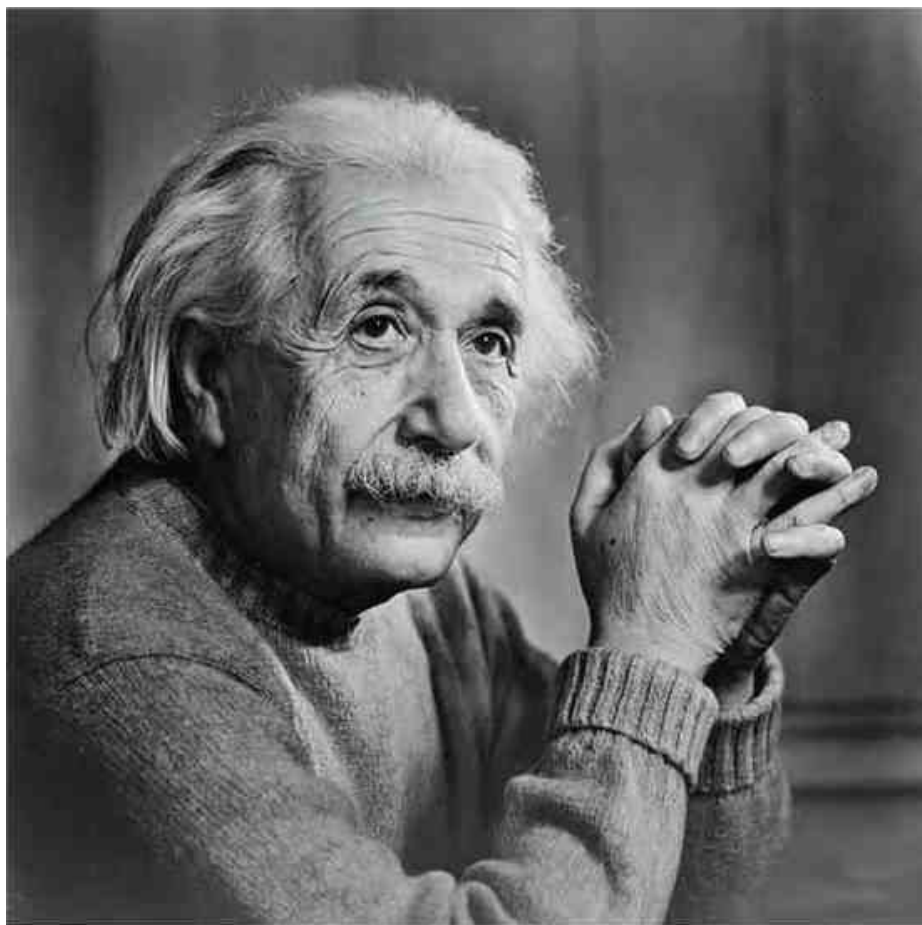
- Z Polska odešla do Francie, kde v roce 1891 složila **jako první žena v historii přijímací zkoušky na fakultu fyziky a chemie pařížské Sorbonny.**
- Pierra Curie. Ten pracoval jako doktorand u prof. Becquerela. Sňatek uzavřeli o rok později.
- Becquerel na doporučení Pierra nabídl Marii doktorandské studium ve své laboratoři.
- Díky své práci byla jako první žena na světě dvakrát oceněna Nobelovo cenou, navíc ve dvou oborech. **Nejprve v roce 1903 obdržela společně s Becquerelem Nobelovo cenu za fyziku za zkoumání radiačních jevů a v roce 1911**
- **za objev a izolaci polonia a radia obdržela společně s Pierrem Curie Nobelovo cenu za chemii.**
- V roce 1903 jako první žena na světě obdržela i titul doktora fyziky na Sorbonně.
- jmenována na místo svého zesnulého manžela a stala se tak historicky první **profesorkou na Sorbonně.**
- V roce 1925 navštívila Jáchymov a některé její připomínky k lázeňským procedurám se používají dodnes. Dnes její jméno nese lázeňský hotel Curie.



Maria Curie-Skłodowska

- Během I. sv. války prosadila zřízení **polních rentgenologických stanic**, které z pozice vedoucího vojenské lékařské buňky organizovala a řídila. Tyto stanice vyšetřily více než 3.000.000 miliony případů zranění vojáků.
- Po válce cestovala po světě a iniciovala zakládání Ústavů pro léčbu rakoviny. V této době patří mezi její žáky František Běhounek – zakladatel československé atomové fyziky. V roce **1925** Marie Curie-Skłodovská **navštěvuje město, které stálo na počátku její vědecké kariéry – Jáchymov**. Zde sfárala do dolu Svornost a navštívila i lázně. Zde prokázala neúčinnost pitných kúr a naopak vhodnost koupelí v radiové vodě.
- Zemřela v nemocnici Sallanches v Savoy u Paříže **na aplastickou anémii, kterou si pravděpodobně přivodila absolutní absencí ochranných opatření při práci s radioaktivními látkami**.
- Pro zásluhy na poli vědy byly její ostatky v roce 1995 slavnostně přeneseny do pařížského Panteonu.

Albert Einstein



$$E = mc^2$$

- Hmota a energie jsou zaměnitelné!
- Nebo též: malé množství hmoty nám dá (protože c^2) obrovské množství energie

Opět Frederick Soddy

- Prvním, kdo spekuloval o využití jaderné energie byl Frederick Soddy:
- „Člověk, který dostane do rukou tuto energii, jako by vlastnil zbraň, kterou by mohl zničit Zemi, kyby chtěl.“
- Herbert George Wells (Sci Fi spisovatel): 1914: Osvobozený svět – novela, kde se lidé naučili ovládnout sílu atomové energie – rok 2036, věnoval knihu právě F. Soddymu. Poprvé se zde objevuje znepokojivý výraz – ATOMOVÁ BOMBA



OSVOBOZENÝ
SVĚT

HERBERT GEORGE WELLS

Leo Szilard v kontextu událostí

- 1933 – Londýn, Leo Szilard – dočetl Osvobozený svět, což mu vniklo myšlenku – co kdyby šlo přimět atomy uvolnit energii v exponenciální kaskádě – myšlenka **RETĚZOVÉ REAKCE** (12. 9. 1933)
- V Německu byl toho času kancléřem **Adolf Hitler** a Německo bylo vědeckou mocností
- Albert Einstein a Leo Szilard (maďarský žid) prchají do USA
- Szilard věděl, že Německo má vysokou šanci vyrobit atomovou bombu jako první (Otto Hahn – Kaiser Wilhelm Institut)

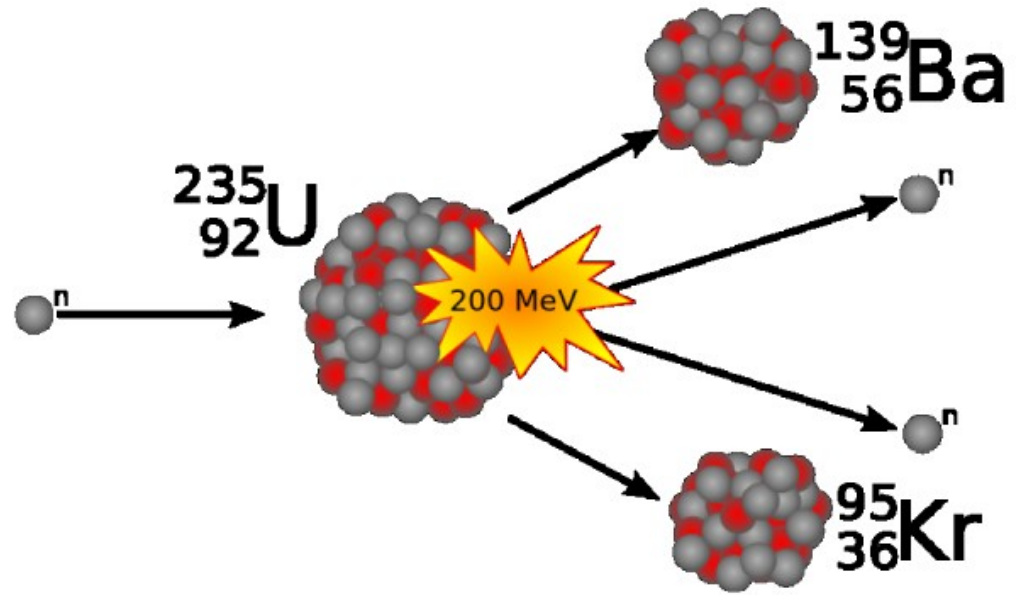


Otto Hahn & Lise Meitner

- Otto Hahn – brilantní německý chemik, který studoval u Rutherforda, právě v době, kdy se Soddy zjistil, že uran se štěpí
- Snažil se uran uměle přimět ke štěpení s nejasnými výsledky → poslal je své kolegyni Lise Meitnerové (též židovka, musela uprchnout z Německa)



Lise Meintnerová

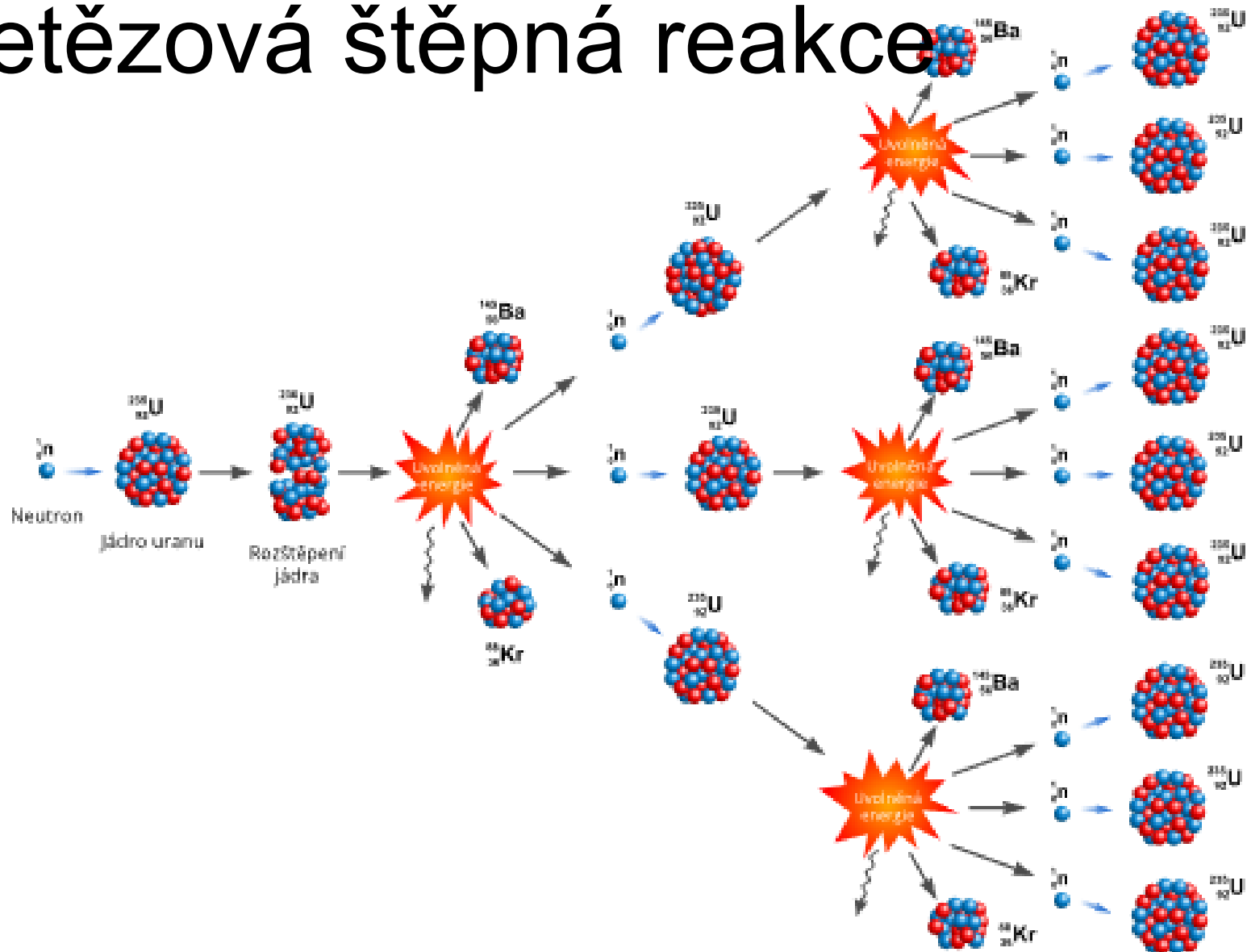


- Zjistila, čeho Otto Hahn dosáhl → rozštěpil atom uranu
- To do té doby bylo považováno za nemožné
- Štěpí se pouze ${}^{235}\text{U}$ (92 protonů 143 neutronů)



- Silná jaderná síla – nejsilnější síla ve vesmíru, drží pohromadě atomová jádra
- Přesto je jádro uranu tak nestabilní, že pronikne-li do něj další neutron, štěpí se
- Hmotu uvolněných (rozštěpených) částí uranu je silnou jadernou interakcí více zhušťována než v původním jádru uranu → jejich celková hmota je proto menší → rozdíl se uvolní ve formě (obrovské) energie
- Zároveň se uvolňují další 2 až 3 neutrony, ty mohou štěpit dále (Szilard → řetězová reakce)

Řetězová štěpná reakce



Ve stopách svých rodičů dále pokračovala Iréne Joliot-Curie, která ostřelovala atomy hliníku, hořčíku a boru částicemi α (kladně nabitá jádra helia). Zjistila, že tyto prvky začaly vyzařovat neviditelné radioaktivní záření až na základě jejich ostřelování. Tento jev byl označen jako **umělá radioaktivita**, neboť byl vznik radioaktivního záření uměle vyvolán.

Iréne Joliot-Curie

- Dokázali, že **neutrony mají o něco větší hmotnost než protony**.
- Při dalším výzkumu vlastností neutronů **objevili v roce 1934 umělou radioaktivitu**, když bombardovali hliník, hořčík a bór alfa částicemi.
- V roce 1935 společně se svým manželem Frédéricem obdržela **Nobelovu cenu za chemii za společné práce na syntéze nových radioaktivních prvků**.
- ve stejném roce objevila také **neptuniovou radioaktivní řadu**. Kompletně byla ale tato rozpadová řada prozkoumána až v roce 1947.
- V roce 1938 Irene Joliot-Curie a Pavel Savic zjistili, že jeden z produktů vytvořených při ozáření uranu neutrony nebyl transuran, jak se očekávalo, ale prvek ze skupiny vzácných zemin. Znamenalo to, že **objevili nový druh jaderných reakcí**.
- Tento výsledek byl v říjnu 1938 na Solvayovském kongresu přijat s velkým skepticizmem. Bylo oběma doporučeno experimenty zopakovat s větší přesností a důkladností, protože takový výsledek nebyl podle teorie možný. Proto prvenství objevu štěpení uranu bylo přiznáno až Otto Hahnovi, Fritzi Strassmanovi a Lise Meitner na základě jejich prací publikovaných v roce 1939.



CESTA K ATOMOVÉ BOMBĚ

- Szilard nyní ví, že uran může vytvořit bombu a Němci vědí, jak to udělat
- Okupace Československa – nyní má Hitler přístup k jedinému nalezišti uranu v Evropě (U je ještě více i v Německu, tenkrát ale nebyl objeven)
- Kdyby Němci měli atomovou bombu první, vyhráli by válku. Szilard proto přes Alberta Einsteina apeluje na presidenta Franklina Roosevelta, aby USA začaly s vývojem atomové bomby
- Albert Einstein byl v té době nejznámějším vědcem na světě, ale myšlenka na atomovou bombu ho nikdy předtím nenapadla. Nyní měl však také ihned jasno a byl vyděšen. Podepsal proto Szilardův dopis Rooseveltovi, kde ho varovali, že Německo patrně vyvíjí uranovou bombu
- Roosevelt ihned nařídil aby USA začaly urychleně pracovat na uranové bombě

**ATOMOVÝ DŽIN BYL
VYPUŠTĚN Z LÁHVE
a už se do ní nikdy nevrátí...**



Project Manhattan

1921 Robert Oppenheimer – navštívil Jáchymovské lázně, fascinovala ho uranová ruda
O 21 let (1942) později učinil z uranu nejděsivější horninu na světě – udělal z něj atomovou bombu
Byl to fyzik se slabostí pro Martini, ženy a dávnou indickou poezii
Vybudováno městečko v poušti v Novém Mexiku - Los Alamos
Vynaloženy 2 mld USD a povolání nejvýznamnější vědci. Tenkrát zde největší koncentrace nositelů Nobelovy ceny.

Německo kapitulovalo ještě před dokončením bomby – USA zadržely německé fyziky – též Otto Hahna.
Zjistilo se, že Německo s vývojem bomby vlastně nikam nepokročilo



Louis Slotin

Tahání draka za ocas "tickling the dragon's tail"

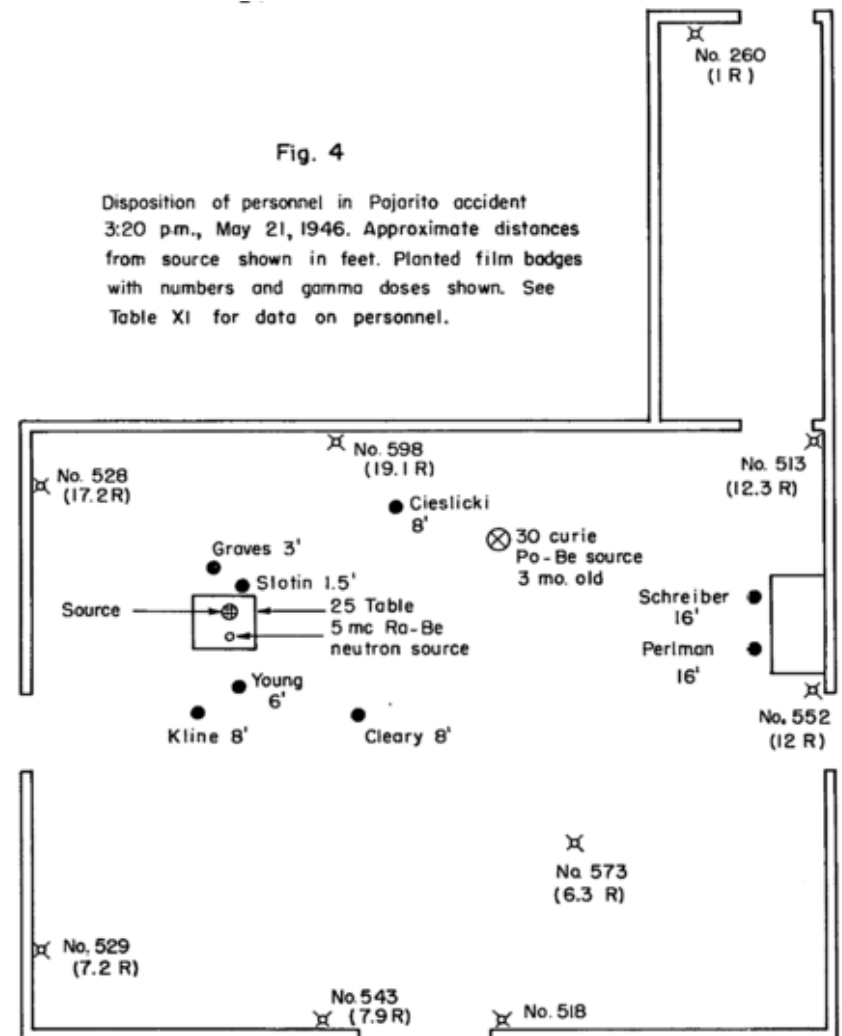


Hledání kritického množství jaderného materiálu a studování reakcí přibližováním hemisfér s podkritickým množstvím k sobě s pomocí šroubováku
Jednou Louisovi Slotinovi šroubovák sklouzl a obě hemisféry se na chvíli zcela spojily, než je Slotin rychle odtrhl. Tím zachránil spoustu lidí, sám byl však exponován smrtelné dávce neutronů a záření gama

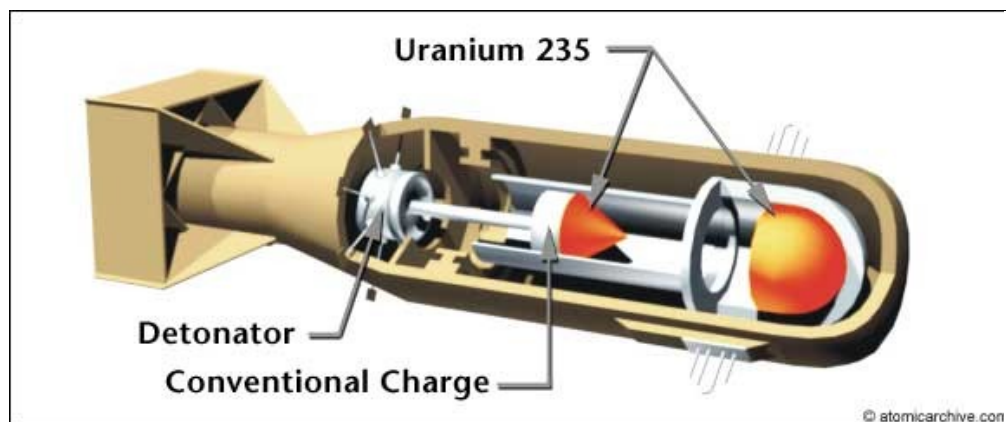
Louis Slotin

Tahání draka za ocas "tickling the dragon's tail"

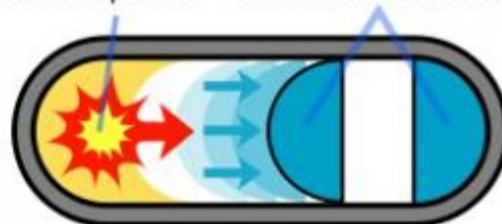
- Na projektu se podílel i mladý vědec **Louis Slotin**. Již předtím pracoval na stavbě prvního funkčního jaderného reaktoru a přes své mládí byl v oblasti jaderné fyziky považován za experta. Zvláště byl ceněn pro své schopnosti montáže odpalovacích zařízení.
- Po přílišném přiblížení kovových hemisfér v jejichž středu byla umístěna podkritická množství plutonia došlo ke krátké řetězové reakci
- Laboratoř osvítil modrý záblesk a radiace vystoupala nad kritické hodnoty.
- Slotin následně zakreslil pozice jednotlivých pracovníků pro odhad jejich ozáření
- „Vy budete O. K., ale já jsem nejspíš vyřízený,“ řekl obraceje se k ostatním vyděšeným vědcům. Měl bohužel pravdu, za pouhých devět dní v nemocnici zemřel.



Little Boy a Fat Man

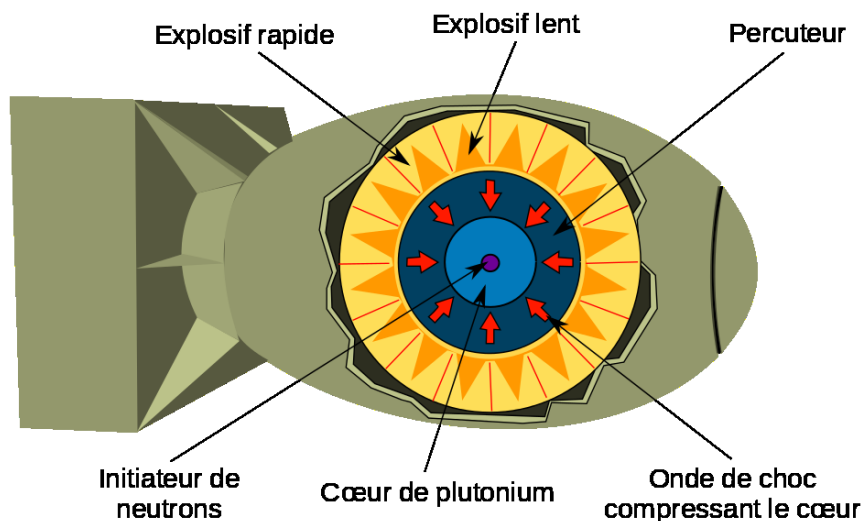


Conventional chemical explosive Sub-critical pieces of uranium-235 combined

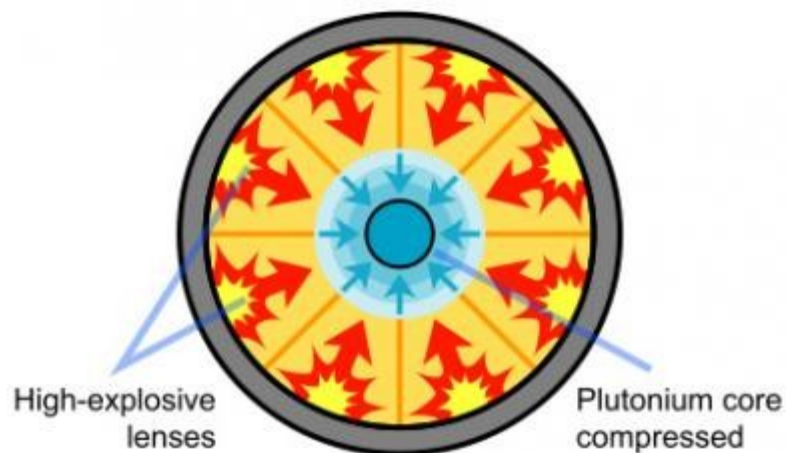


Gun-type assembly method

Little Boy: A Gun-Type Bomb

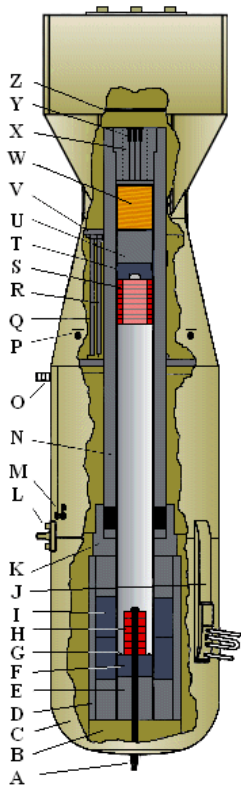


Fat Man: Implosion Nuclear weapon



Implosion assembly method

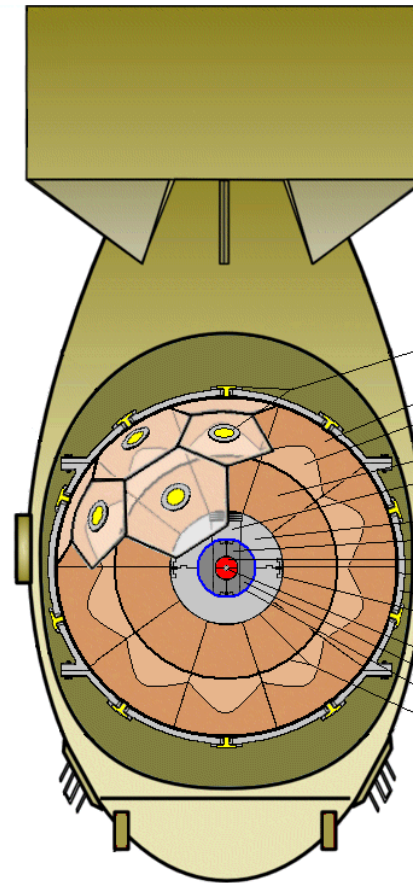
Little Boy a Fat Man



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-46 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

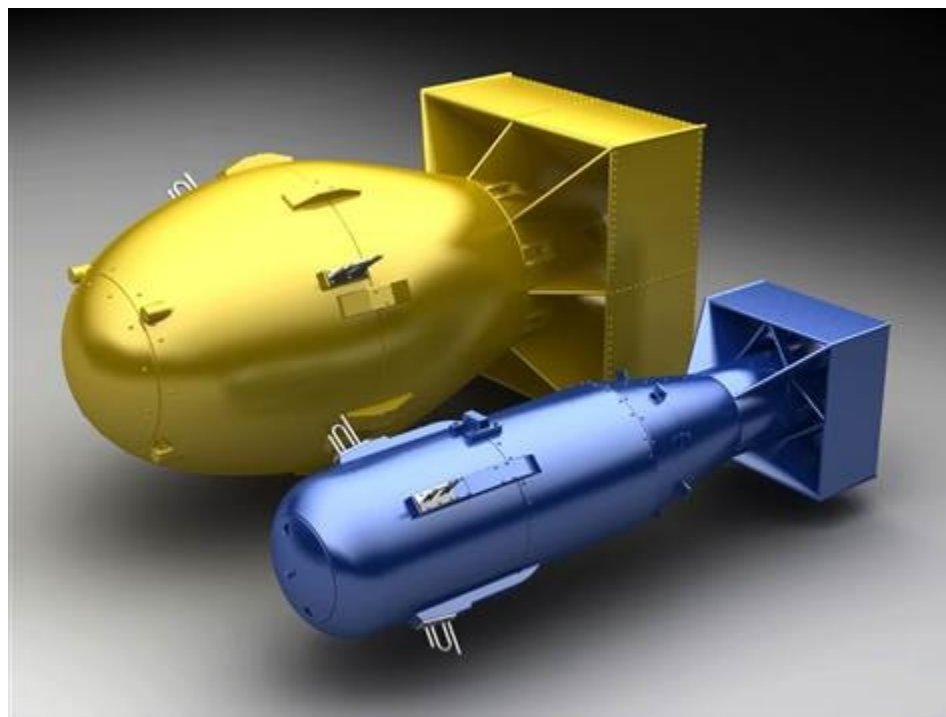
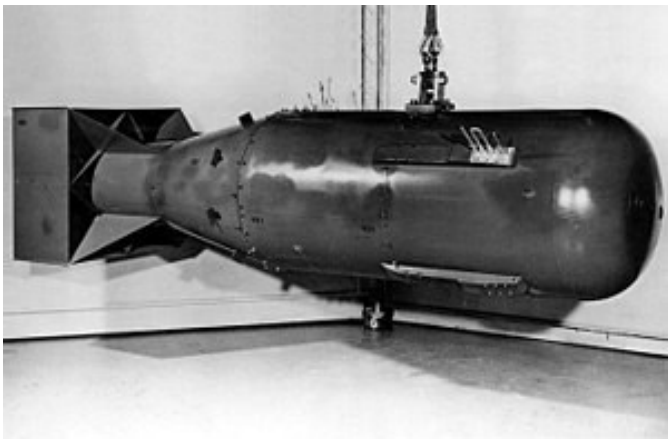


Cross-section drawing of the Y-1561 implosion sphere showing component placement. Numbers in () indicate quantity of identical components. Drawing is shown to scale. (Author)

- A) 1773 EBW detonators inserted into brass chimney sleeves (32)
- B) Comp B component of outer lens (32)
- C) Cone-shaped Baratol component of outer lens (32)
- D) Comp B inner charge (32)
- E) Removable aluminum pusher trap-door plug screwed into upper pusher hemisphere
- F) Aluminum pusher hemispheres (2)
- G) Tuballoy (U-238) two-piece tamper plug
- H) Pu-239 hemispheres (2)
- I) Cork lining
- J) 7-piece Duralumin sphere
- K) Aluminum cups holding pusher hemispheres together (4)
- L) Polonium-Beryllium initiator
- M) Tuballoy (U-238) tamper sphere
- N) Boron plastic shell
- O) Felt padding layer under lenses and inner charges

"Atom Bombs: The Top Secret Inside Story of Little Boy and Fat Man," 2003, p 140. John Coster-Mullen drawing used with permission.

Little Boy a Fat Man



Approval To Bomb

- On July 25, 1945, the use of a “special bomb” was approved.
- The criteria for targets were:
 - 3 Mile target zone
 - Large Urban zone
 - Unlikely to be reached via an “Island Hopping” campaign before August 1945
- The selected targets were Kokura, Hiroshima, Yokohama, Niigata and Nagasaki
- There was discussion about warning the Japanese about the bomb, however it was decided that would make the psychological impact of the weapon inefficient and would reduce the chance of a Japanese surrender.

18 June 1945
No objection to declassification by AFSWP [Signature] HQ USAF

SECRET

WAR DEPARTMENT
OFFICE OF THE CHIEF OF STAFF
WASHINGTON 25, D. C.

SAVE

25 July 1945

SECRET
CONFIDENTIAL
1 DEC 1945

TO: General Carl Spaatz
Commanding General
United States Army Strategic Air Forces

1. The 509 Composite Group, 20th Air Force will deliver its first special bomb as soon as weather will permit visual bombing after about 3 August 1945 on one of the targets: Hiroshima, Kokura, Niigata and Nagasaki. To carry military and civilian scientific personnel from the War Department to observe and record the effects of the explosion of the bomb, additional aircraft will accompany the airplane carrying the bomb. The observing planes will stay several miles distant from the point of impact of the bomb.

2. Additional bombs will be delivered on the above targets as soon as made ready by the project staff. Further instructions will be issued concerning targets other than those listed above.

3. Dissemination of any and all information concerning the use of the weapon against Japan is reserved to the Secretary of War and the President of the United States. No communique on the subject or releases of information will be issued by commanders in the field without specific prior authority. Any news stories will be sent to the War Department for special clearance.

4. The foregoing directive is issued to you by direction and with the approval of the Secretary of War and of the Chief of Staff, USA. It is desired that you personally deliver one copy of this directive to General MacArthur and one copy to Admiral Nimitz for their information.

This Handy
THOS. T. HANDY
General, G.S.C.
Acting Chief of Staff

End #1

CONFIDENTIAL

SECRET

DECLASSIFIED
BY TAG MKR
8 F 324
LE

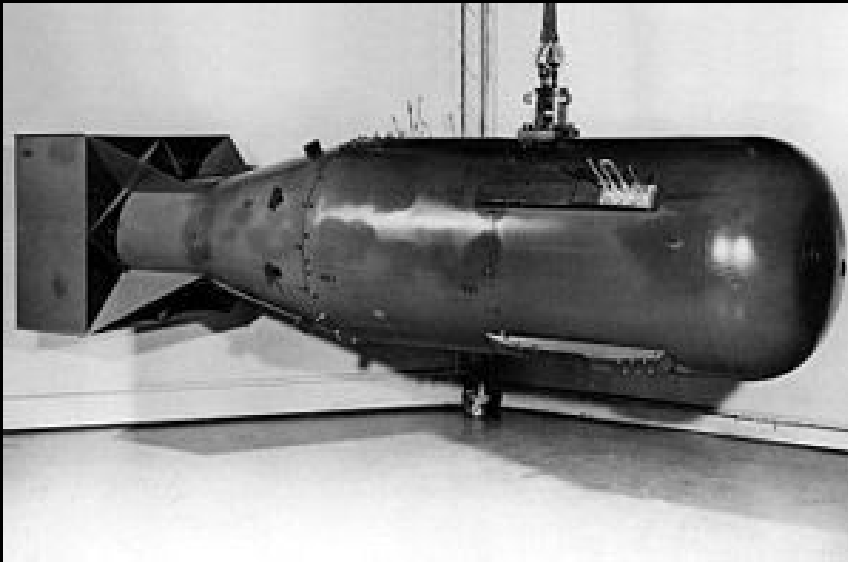
70226AC

The Bombs

Little Boy

Little Boy was the bomb used on Hiroshima. It used a different detonation method, that did not result in large amounts of radioactive fallout.

It exploded with a force of 16 Kilotonnes (16,000 tonnes) of TNT. Or the equivalent of 200 bombing runs. The blast radius was about 3 kilometers wide and had an impact which caused fires 6 and a half kilometres away. It was regarded as being inefficient and not powerful enough.



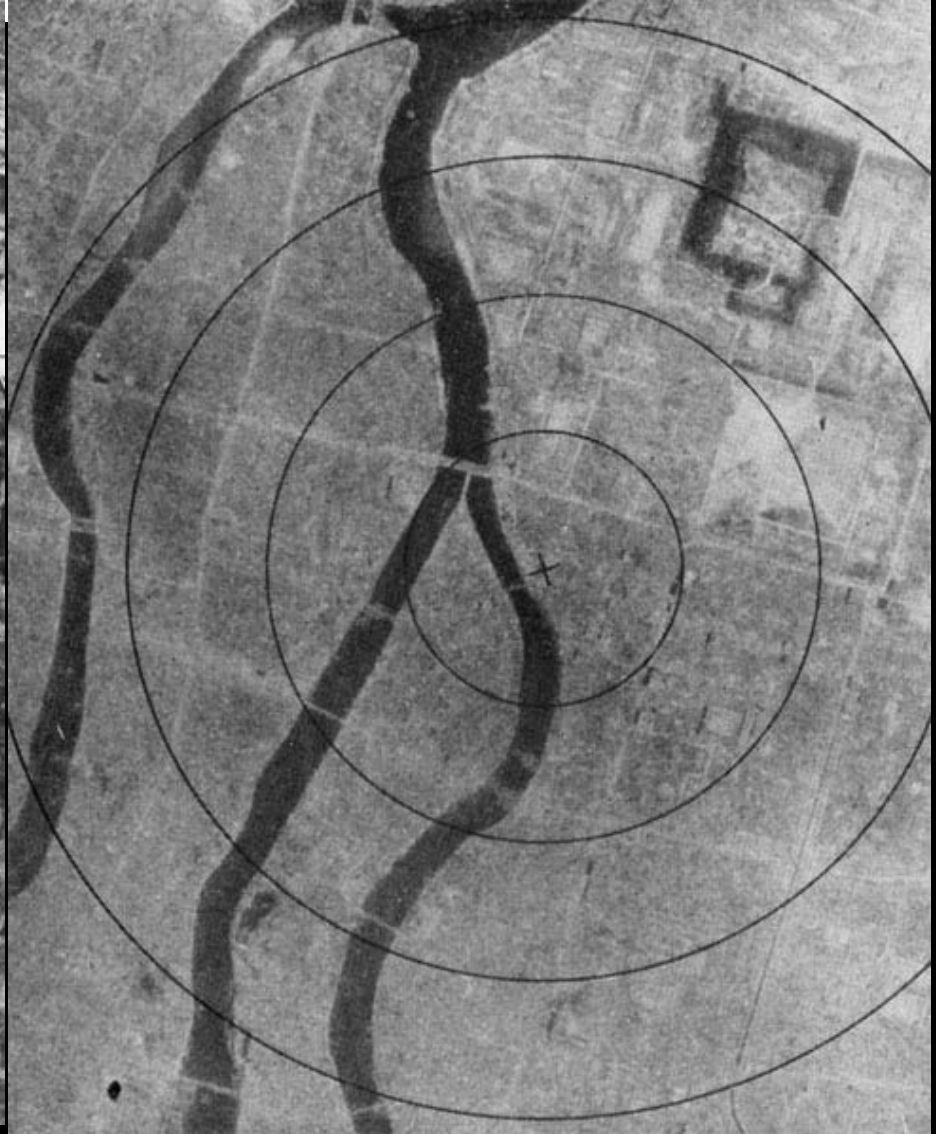
Fat Man

Fat Man was the bomb used on Nagasaki. It used a detonation method that resulted in a larger explosion from a similar amount of radioactive material. It resulted in large amounts of radioactive fallout.

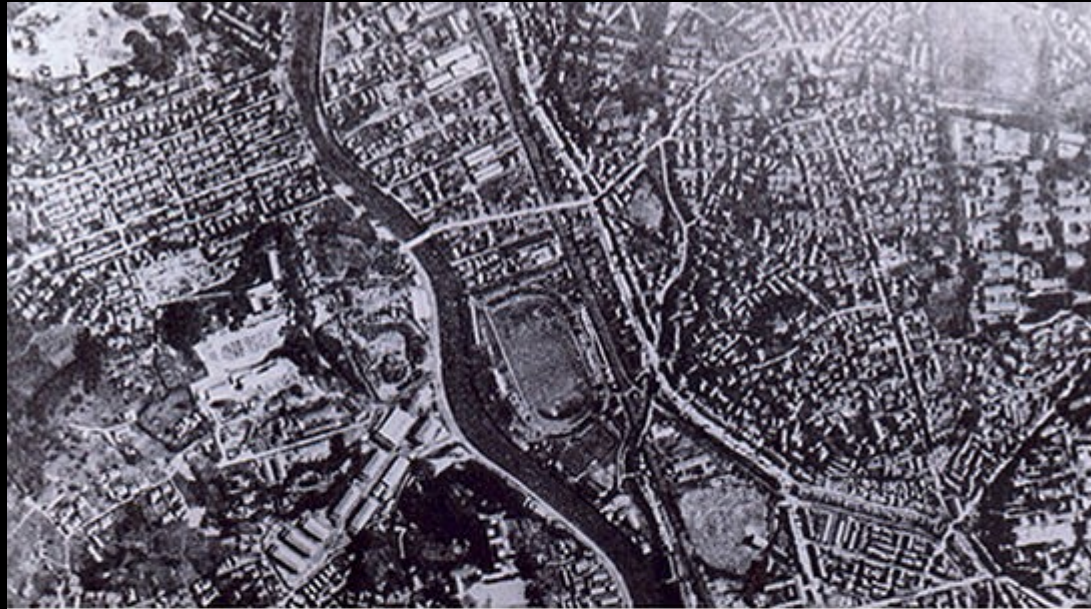
It exploded with the force of 21 Kilotonnes of TNT. It had a blast radius of about 5 kilometers. It “missed” its target zone, but still managed to wipe out 70% of the industrial zone.



Hiroshima Before\After

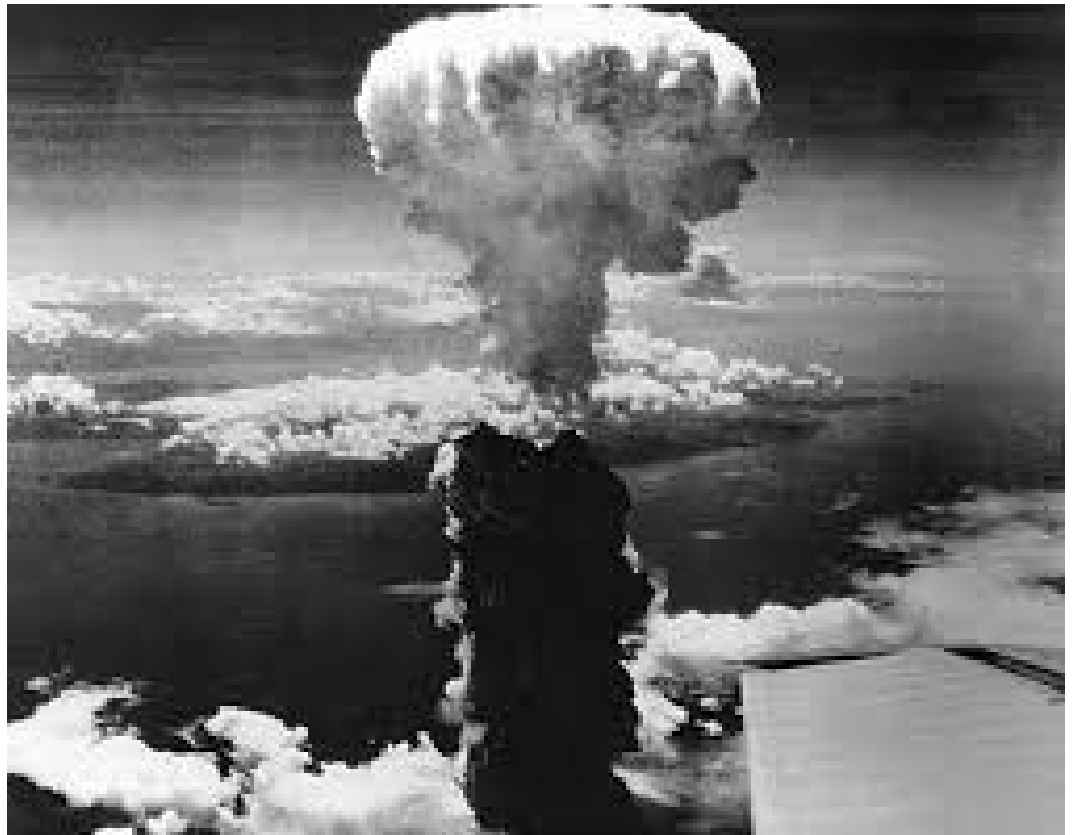


Nagasaki Before\After



Hirošima, 6. srpna 1945

V prvních dvou až čtyřech měsících po shození bomb zemřelo v Hirošimě 90 000 – 166 000 lidí, ½ v prvním dni





Nagasaki, 9. srpna 1945

V prvních dvou až čtyřech měsících po shoení bomb zemřelo v Nagasaki 60 000 – 80 000 lidí, ½ v prvním dni



- Původně měla být cílem Kokura – ale bylo zataženo, takže by shoení bomby bylo problematické, Nagasaki vybráno jako náhradní cíl. (Stejně jako u objevu H Bcquerela se tak ukazuje, že zataženo má své kouzlo)

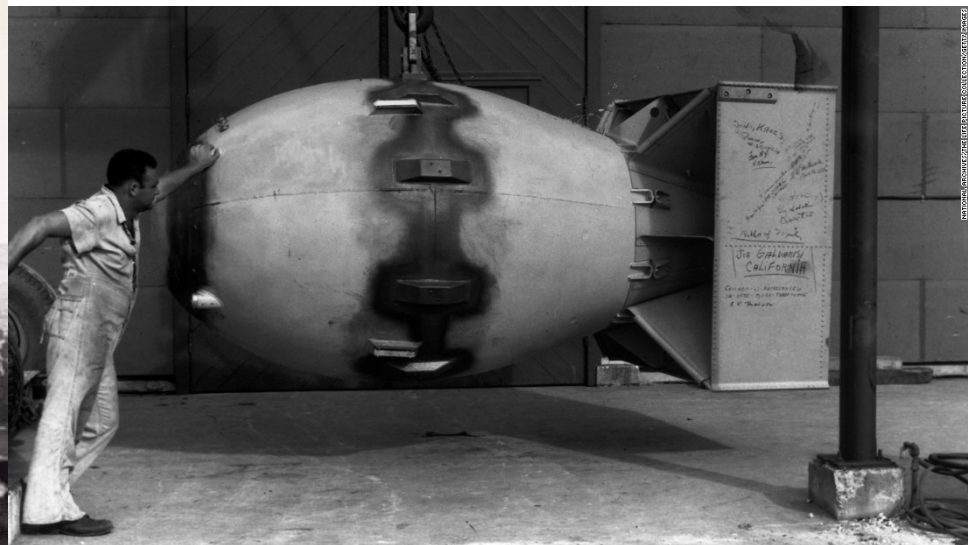
Strom na obrázku (japonská borovice bílá) byl zasazen v roce 1625. V roce 1945 se nacházel nedaleko epicentra výbuchu atomové bomby v japonské Hirošimě, ale přežil. Jako dar putoval před 40 lety do Amerického národního arboreta ve Washingtonu. K radosti všech tato unikátní bonsaj nevyčísitelné hodnoty pořád roste.



Projekt Manhattan



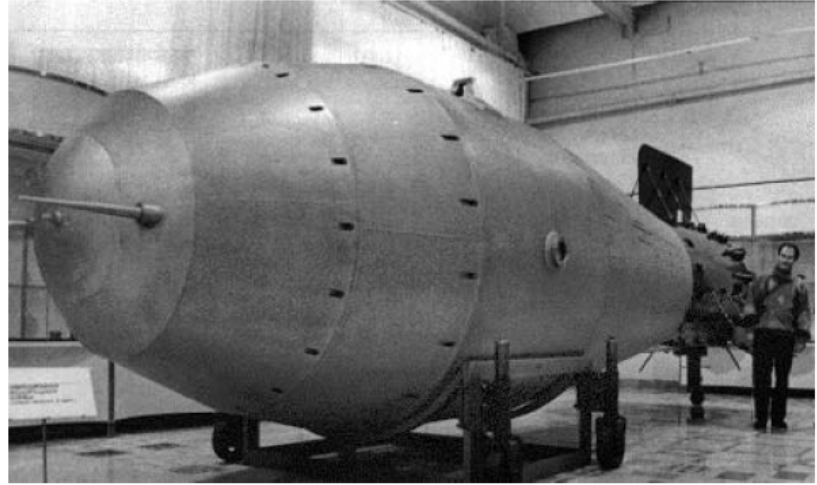
II. SV. VÁLKA a STUDENÁ VÁLKA



Ridiculous Dimensions

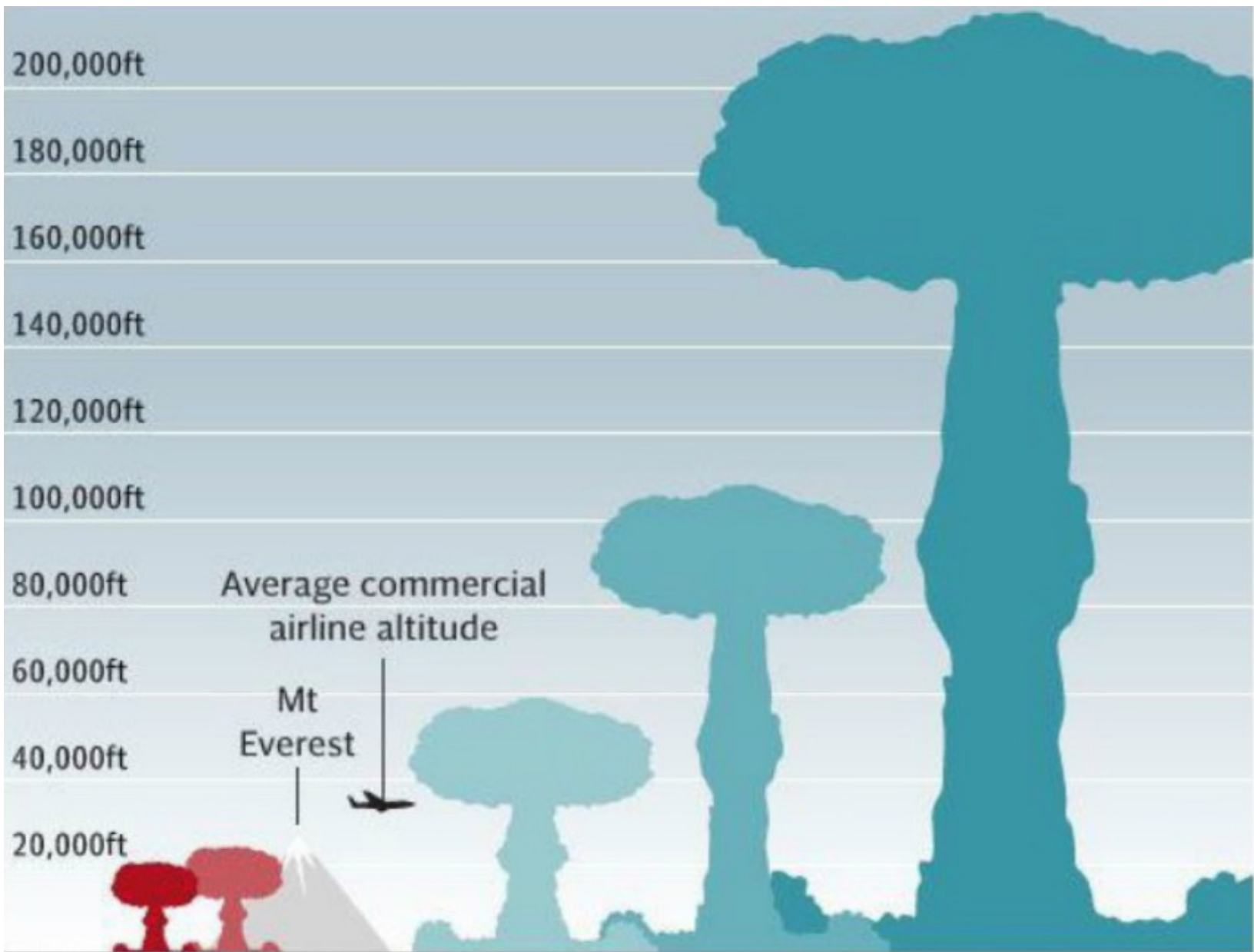


Biggest US bomb:
1MT TNT MARK-17

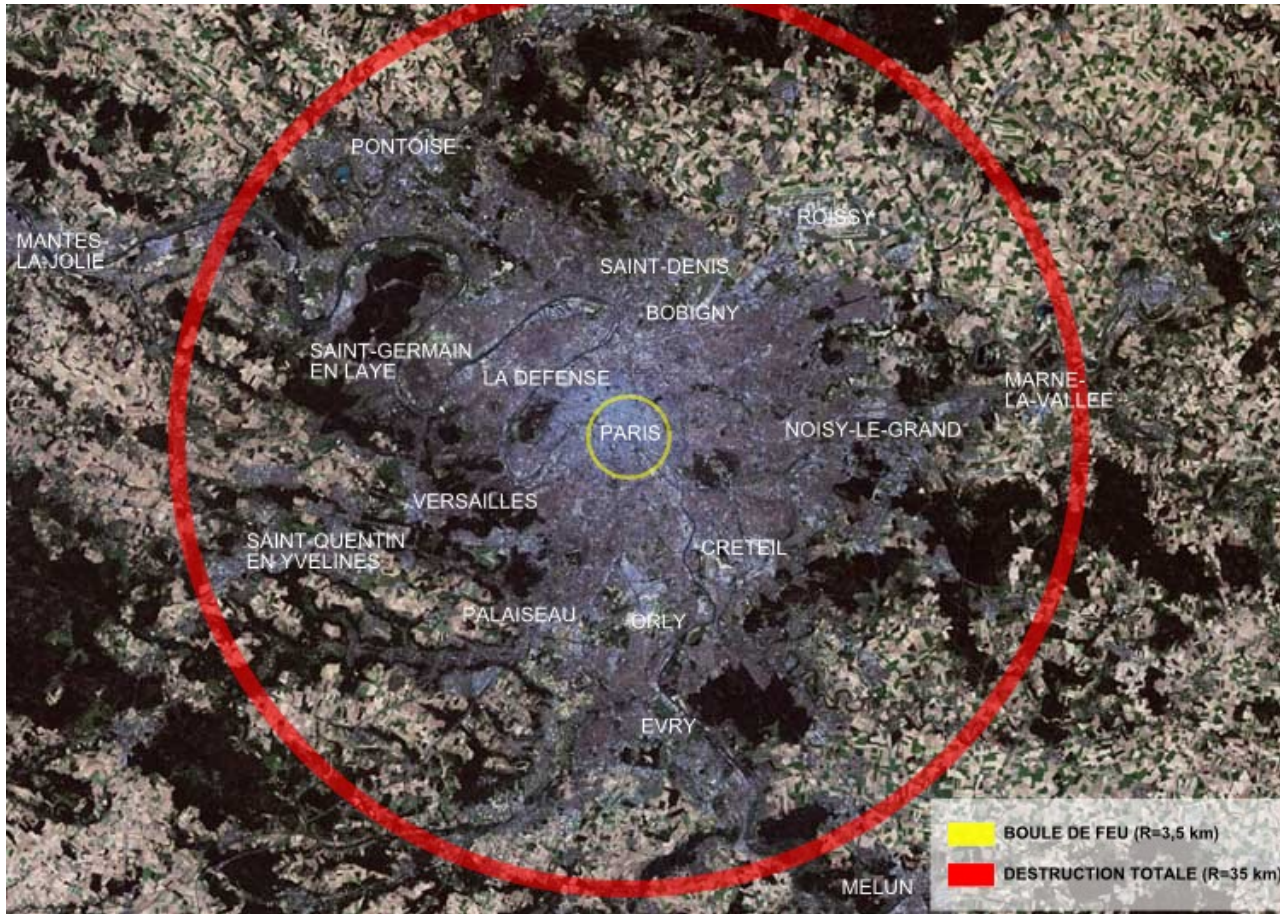


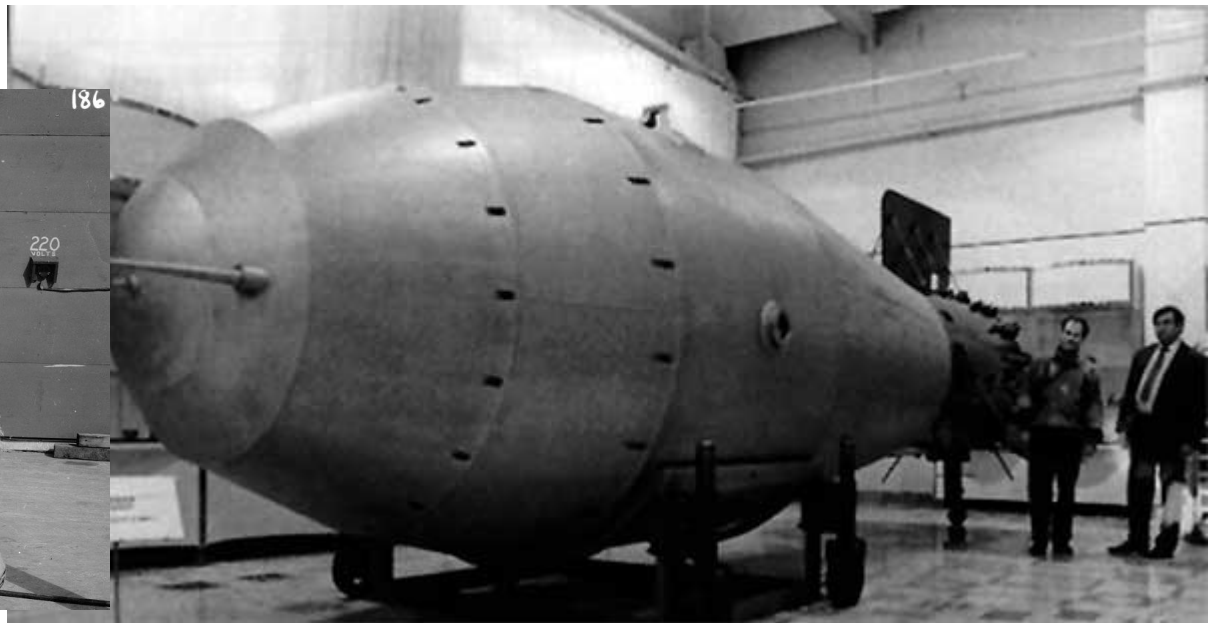
Biggest Soviet Bomb:
50 MT Tsar Bomb

The big bomb never had any military significance. It was a demonstration of force, part of the superpower game of mutual intimidation. This was the main goal of the unprecedented test. Super-weapons are rejected by contemporary military doctrine, and the proposition that “now we have even more powerful warheads” is simply ridiculous.



15 kiloton Hiroshima <i>Japan, 1945</i>	21 kiloton Nagasaki <i>Japan, 1945</i>	1 megaton Licorne <i>France, 1970</i>	15 megaton Castle Bravo <i>USA, 1951</i>	50 megaton Tsar Bomb <i>Russia, 1961</i>
--	---	--	---	---







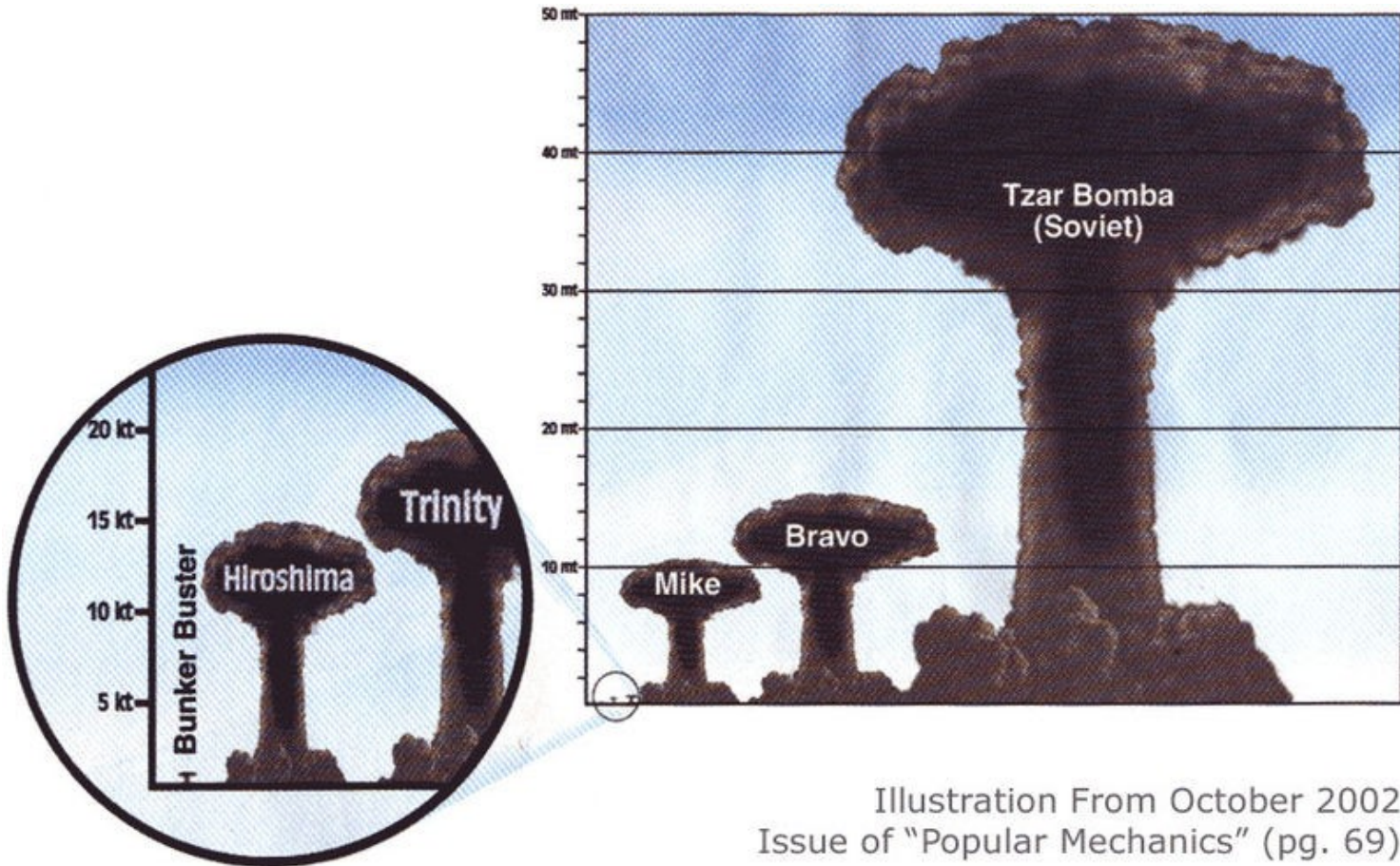
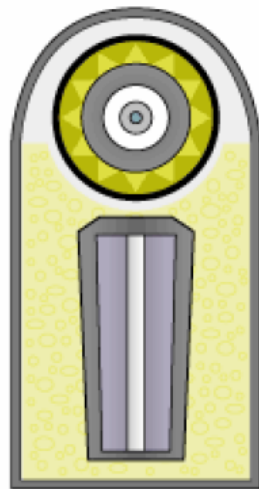


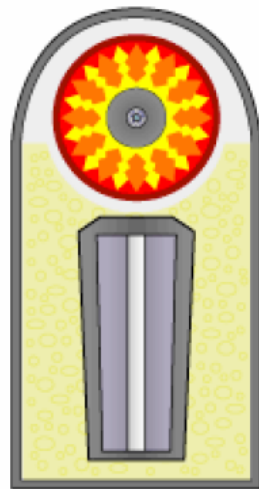
Illustration From October 2002 Issue of "Popular Mechanics" (pg. 69)

Event Sequence

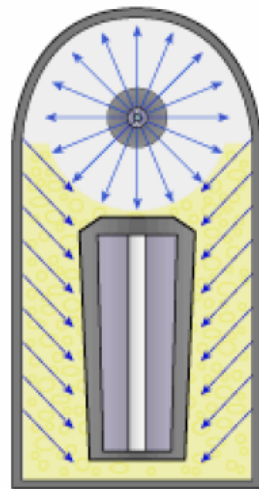
The two devices are surrounded by radiation case to contain (temporarily) the energy released in primary fission driven explosion for efficient conversion into compression shock



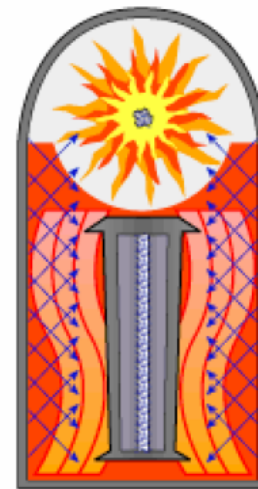
1. Warhead before firing; primary (fission bomb) at top, secondary (fusion fuel) at bottom, all suspended in polystyrene foam.



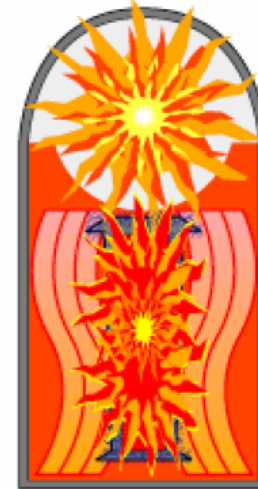
2. HE fires in primary, compressing plutonium core into supercriticality and beginning a fission reaction.



3. Fissioning primary emits X-rays which reflect along the inside of the casing, irradiating the polystyrene foam.



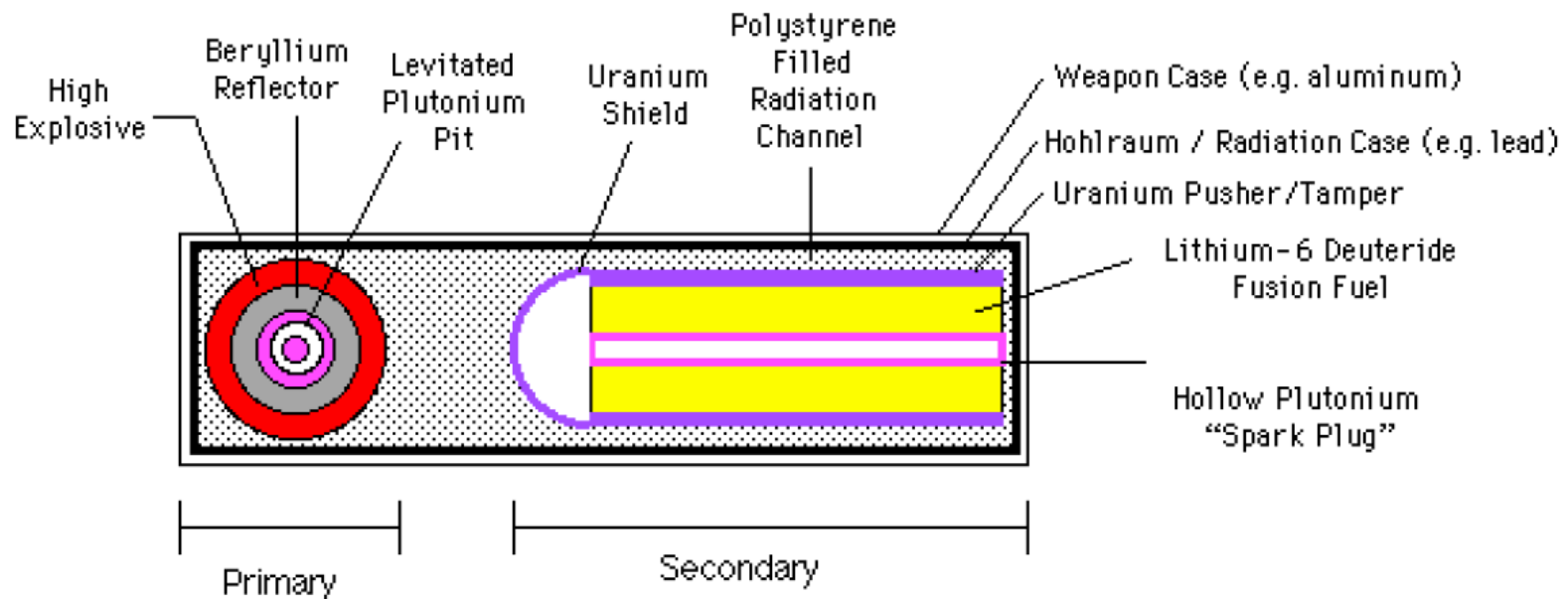
4. Polystyrene foam becomes plasma, compressing secondary, and plutonium sparkplug begins to fission.



5. Compressed and heated, lithium-6 deuteride fuel begins fusion reaction, neutron flux causes tamper to fission. A fireball is starting to form...

Additional pressure from recoil of exploding shell (ablation)!

Modern Thermonuclear Warhead



The bomb design is based on a bomb casing containing implosion fission bomb and a cylinder casing of ^{238}U (tamper). Within the tamper is the ^6LiD (fuel) and a hollow rod of ^{239}Pu in the center of the cylinder. Separating the cylinder from the implosion bomb is a shield of ^{238}U and plastic foam that fills the remaining space in the bomb casing.

Generace jaderných zbraní

- **1. generace**

- Jednalo se o zbraně určené výhradně pro letectvo. Znakem těchto zbraní byla vysoká hmotnost a velké rozměry. Velkým problémem byly neutronové iniciátory, které byly tvořeny poloniem 210. To mělo poločas rozpadu pouhých 140 dnů, což obnášelo jejich obměnu. Zbraně byly skladovány v rozloženém stavu a jejich smontování vyžadovalo vždy alespoň 72 hodin. Tyto jaderné zbraně se přestaly používat v roce 1961 a fungovaly na principu štěpení těžkého jádra.

- **2. generace**

- Prioritou zbraní této generace bylo efektivnější využití štěpných materiálů, ale i snížení hmotnosti a rozměrů. Jaderné zbraně druhé generace se označují jako termonukleární a byly vyráběny od roku 1952. Díky snížení velikosti bylo možné tyto zbraně rozšířit do jiných typů vojsk, než jen letectva. Místo neutronového iniciátoru se začal používat neutronový generátor. Zbraně musely být stále skladovány v rozloženém stavu, což prodlužovalo dobu jejich přípravy. Princip jaderných zbraní druhé generace je založen na slučování atomů vodíku v hélium, což je proces probíhající ve hvězdách. Tato reakce je daleko efektivnější než štěpení. Pro její zahájení je ale nutná obrovská energie, kterou lze získat pouze jaderným výbuchem. Termonukleární hlavice tedy potřebuje malou štěpnou nálož jako „spoušť“.

Generace jaderných zbraní

- **3. generace**

- Jednalo se vlastně o modifikované termonukleární zbraně. Zbraně bylo možno skladovat zkompletované, stačilo pouze vložit neutronovou trubici a připojit elektronické obvody hlavice na baterie. Za pomoci různých úprav bylo taktéž možné využít nebo naopak potlačit účinky jaderné zbraně. Tyto zbraně se začaly vyrábět od roku 1961 a známé jsou tři základní typy.
- **Neutronová bomba** – Jde o dvofázovou termonukleární zbraň, u níž asi 90 % energie připadá na druhou fázi (slučování). Neutronová puma využívá neutrony s vysokou energií, které vznikají při tomto slučování a vysokou rychlostí se šíří do okolí a dobře proniká i do kovových předmětů. Uvádí se, neutronová hlavice o síle 1 kilotony zlikviduje osádku tanku T-72 ještě 690 metrů od místa výbuchu, kdežto klasická štěpná hlavice to dokáže jen na 360 m. Dávka záření 600 radů se považuje za normálně smrtelnou (tj. usmrtí nejméně polovinu zasažených osob), ovšem příznaky nemoci z ozáření se projeví až za několik hodin. Neutronové bomby jsou však schopné způsobit ozáření až 8000 radů, což znamená vyřazení z boje v několika sekundách a smrt do několika minut.
- **Zbraně se zesíleným zamořením** – mají obaly zhotovené z kovů, které se vlivem rychlých neutronů mění v radioaktivní izotopy a zamořují terén. Takovým kovem je především kobalt (odtud název „kobaltová puma“), který může učinit oblast neobyvatelnou na desítky let. Pro střednědobé zamoření (týdny až měsíce) lze použít zinek nebo tantal, pro krátkodobé (dny) je nejvhodnější zlato a pro velmi krátké (pouze hodiny) sodík.
- **Zbraně s potlačeným radioaktivním zamořením** – vycházejí ze stejné úvahy jako předchozí typ, ale jejich obaly jsou vyrobeny naopak z kovů, které neutrony pohlcují a přitom se samy nestávají radioaktivními (např. bór). Navíc je první fáze (štěpná) co nejslabší, aby se omezilo její radioaktivní působení. Výsledkem je podstatné snížení zamoření okolí exploze. Uvádí se, že USA mají k dispozici hlavice, jejichž místo výbuchu přestává být nebezpečné už za několik desítek hodin.

Generace jaderných zbraní

- **4. generace**

- Všechny nukleární zbraně 3. generace však mají jednu společnou nevýhodu. Obsahují malou štěpnou bombu jako „spoušť“ pro zahájení termonukleární reakce. Štěpné zařízení je rozměrné, těžké, složité, křehké a velice drahé. Vědci se tedy od 80. let snažili přijít na způsob, jak štěpnou nálož nahradit. Znamenalo by to další snížení hmotnosti a velikosti celé bomby. Objevené způsoby se ovšem nikdy neuplatnily. Buďto byly velmi neekonomické nebo nebyl účinek 100%. To však po roce 1991 změnil nález červené rtuti, která se vyrábí chemickou syntézou a následným ozařováním v jaderném reaktoru. Tento prvek se dokáže nabíjet a kumulovat energii např. z rentgenového záření. Bylo by tedy možné z něj vyrobit vysoce precizní rozbušku, která by zařídila současnou iniciaci celé zásoby uranu nebo plutonia, zatímco v termonukleární zbraní by dokázala spustit vodíkovou fúzi.

Jisté je, že červené rtuti se bojí i samotní vědci. Jeden z tvůrců termonukleární bomby Sam Cohen tvrdí, že po rozpadu Sovětského svazu se červená rtuť dostala na černý trh se zbraněmi, a také varoval, že pomocí ní by bylo možné vyrobit neutronovou pumu o velikosti baseballového míčku, jejíž výbuch by usmrtil vše živé v okruhu nejméně 600 metrů

The Cold War and Nuclear Arms Race

I remember President Kennedy once stated... that the United States had the nuclear missile capacity to wipe out the Soviet Union two times over, while the Soviet Union had enough atomic weapons to wipe out the United States only once... When journalists asked me to comment... I responded, "Yes, I know what Kennedy claims, and he's quite right. But I'm not complaining... We're satisfied to be able to finish off the United States first time round. Once is quite enough. What good does it do to annihilate a country twice? We're not a bloodthirsty people."

Nikita Khrushchev - 1974

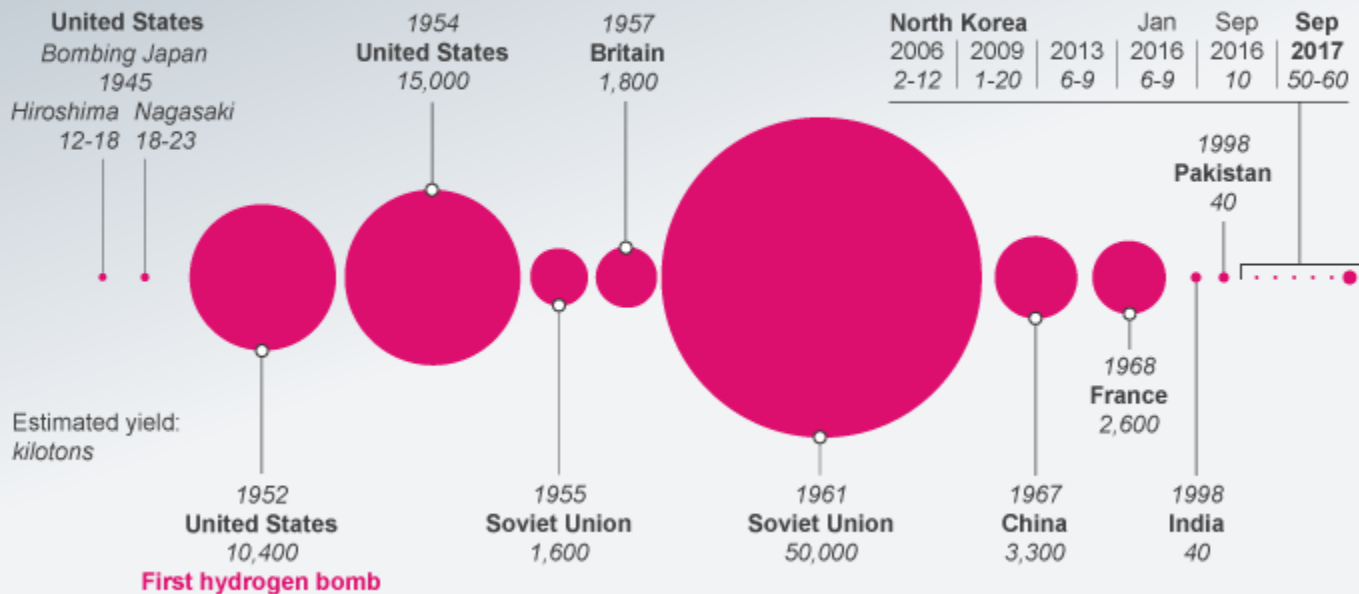
MY BUTTON



IS BIGGER THAN YOUR BUTTON.



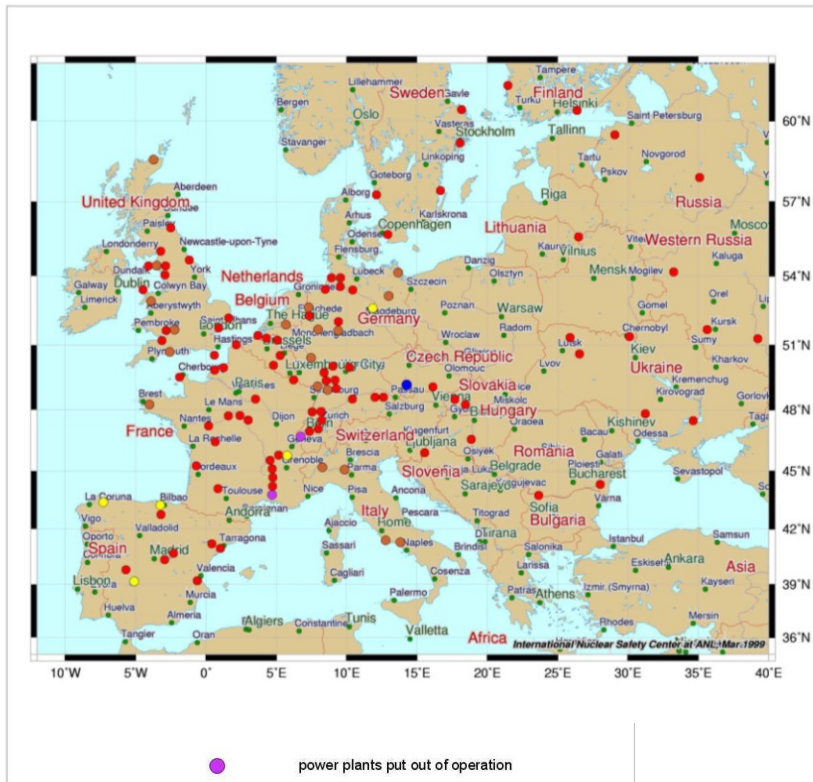
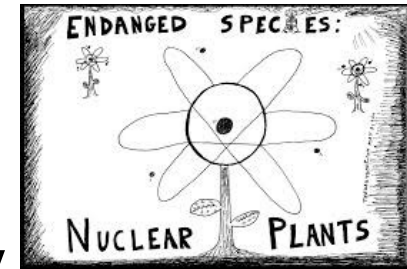
Nuclear explosions compared



Source: CTBTO/nuclearweaponarchive.org/Army/Technology.com/FAS

© DW

Mírový rozvoj jaderné energetiky



- power plants put out of operation
- power plants designed, and temporarily stopped
- power plants permanently stopped
- power plants operated
- Temelin power plant

Note: This overview is only for general information, and focussed on the locations of the power plants, not on the individual power generation blocks.

NO SCALE

Appendix 8.1 NUCLEAR POWER PLANTS IN EUROPE

