

Když někoho chcete zničit, nazvěte ho nepřítelem. Z milionů indiánů jich nakonec zbyla čtvrtina jediného.

Jaderná bomba

Při rozštěpení jádra se sice neutron, jež štěpnou reakci vyvolal, „spotřebuje“, avšak během reakce se emitují další dva (nebo tři) neutrony „druhé generace“, které jsou v principu schopny vyvolat štěpení dalších jader. Pokud se tak stane, vyvolají tyto nové neutrony rozštěpení dalších dvou jader za vzniku již celkem 4 neutronů, ty vyvolají další štěpení atd. – počet neutronů v jednotlivých „pokoleních“ se rychle násobí geometrickou řadou a rychlost rozvíjející se reakce štěpení jader lavinovitě roste – nastává řetězová jaderná reakce. Aby takováto řetězová reakce mohla nastat, je potřeba mít v určitém objemu soustředěno dostatečné množství štěpného materiálu – nejméně tzv. kritické množství (hmotnost).

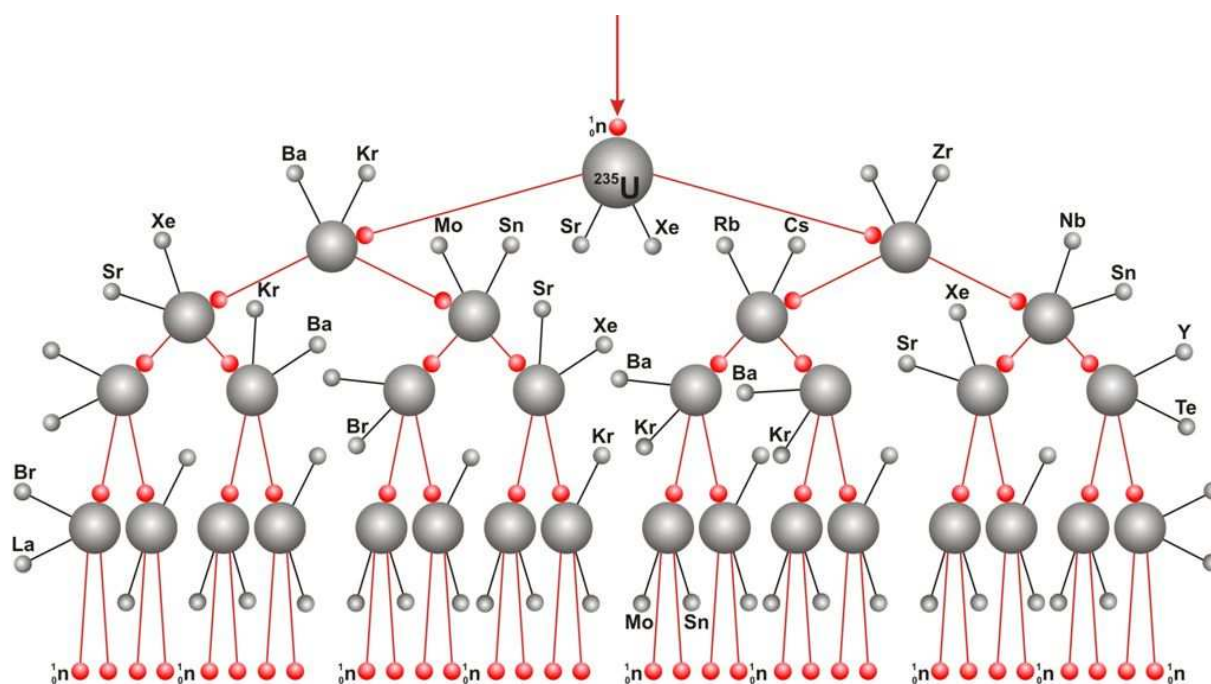


schéma řetězové reakce

(při rozpadu ^{235}U mohou vznikat Ba, Kr, Rb, Cs, Y, Te, Nb, Sn, Mo, Sr, Xe, Br, La, Zr, I, Sb)

Kritické množství štěpného materiálu závisí především na třech faktorech. Musí to být jádra štěpitelná pomalými neutrony a kritické množství je pak nepřímo úměrné druhé mocnině hustoty štěpného materiálu. Kritické množství je tím menší, čím kompaktnější je geometrické uspořádání. Nejnižší je pro uspořádání štěpného materiálu v objemu tvaru koule, kde je nejvyšší poměr objemu k velikosti povrchu (kterým mohou neutrony unikat). Nezanedbatelná je i přítomnost látek schopných odrazet vylétající neutrony (a vracet je tak do reakce), neboť snižuje kritické množství.

Pro jednotlivé druhy štěpných materiálů se udává tato jejich kritická hmotnost čistého materiálu v kulovém homogenním uspořádání o kritickém poloměru:

uran ^{235}U = 48 kg, kritický poloměr = 9 cm;

plutonium ^{239}Pu = 17 kg, kritický poloměr = 6 cm;

uran ^{233}U = 16 kg, kritický poloměr = 6 cm

Pokud je štěpný materiál obklopen látkou odrazující neutrony (tzv. reflektorem či neutronovým pláštěm), kritické množství se zmenšuje 2-3krát. Pro nízké koncentrace štěpného materiálu již zpravidla žádné kritické množství neexistuje a řetězová štěpná reakce nemůže sa-

movolně vzniknout. Možné by to bylo pouze pomocí moderace neutronů či technologií ADTT (viz dále).

Skladování nadkritického množství štěpného materiálu je značně delikátní záležitost. Může totiž dojít k překročení kritického množství, čímž by došlo k lavinovitému rozběhnutí řetězové štěpné reakce s velmi nebezpečnými radiačními následky. Osoby, nacházející se v místě nehody, by obdržely velmi vysoké dávky záření, načež by následovala značná kontaminace prostředí radioaktivními štěpnými produkty. Aby k tomu nedošlo, je nutno štěpný materiál skladovat v uspořádání či nádobách s tzv. bezpečnostní geometrií, tedy s co největším povrchem v poměru k objemu (na rozdíl od kulového uspořádání, kde je tomu opačně), aby většina neutronů snadno unikla mimo objem štěpného materiálu a nemohla tak způsobovat další štěpení.

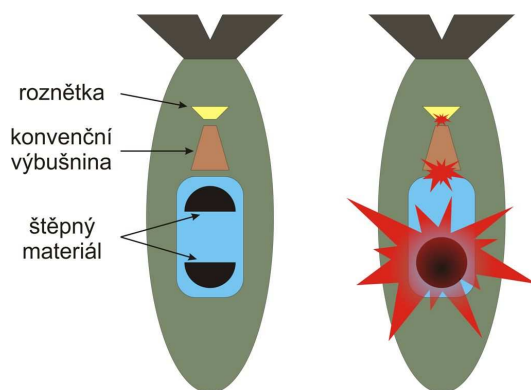
Průběh štěpení může být *podkritický*, kdy se jádro rozpadne, ale každý neutron je zachycen (přirozený rozpad), *kritický*, kdy jeden neutron není zachycen, takže štěpí další jádra (řízená řetězová reakce, např. v jaderných elektrárnách), *nadkritický*, kdy nejsou zachyceny dva neutrony a *superkritický*, kdy nastává neřízená řetězová reakce. Při neřízené řetězové reakci tedy reagují všechny vzniklé neutrony a neřízená řetězová reakce končí výbuchem například tzv. „atomové“ bomby (používají se izotopy ^{235}U , ^{233}U , ^{239}Pu).

Materiál, schopný řetězové štěpné reakce, může být přírodního původu, nebo vyráběný uměle. V přírodě se vyskytuje jediný nuklid přímo použitelný pro řetězovou štěpnou reakci. Je to uran ^{235}U , o kterém víme, že je obsažen v uranové rudě v množství 0,7 %, což pro většinu technologií není dostatečné množství pro nastartování a udržení řetězové štěpné reakce. Proto je potřeba jeho obsah uměle zvýšit – provést tzv. obohacení uranu izotopem ^{235}U .

Obohacování uranu je proces technologicky velmi náročný a nákladný. Čistě chemicky jej nelze provést (všechny izotopy uranu mají chemické vlastnosti stejné), takže je nutno využít nepatrně odlišných fyzikálních vlastností různých izotopů uranu (nepatrně rozdílné molekulové hmotnosti sloučenin $^{235}\text{UF}_6$ a $^{238}\text{UF}_6$). V první fázi se uran chemicky sloučí s fluorem na plynný hexafluorid uranu UF_6 , který se pak separuje opakovaným difúzním oddělováním ve speciálních separačních kolonách nebo v ultracentrifugách s vysokými otáčkami, které jsou seřazeny v kaskádách. Nejde přímo o separaci izotopů, nýbrž o obohacování jednoho vůči druhému. Plyny procházejí několika tisíci stupni, takže celé zařízení vyžaduje tisíce komor a tisíce pump. Frakce fluoridu s patřičně zvýšeným obsahem ^{235}U se pak opět chemicky převádí na jiné vhodné sloučeniny, popř. na kovový obohacený uran. Konečný koncentrát $^{235}\text{UF}_6$ bývá přibližně 90%. Stoprocentního zahuštění se dosahuje po změně chemického složení v elektromagnetickém separátoru. Nově se zkouší laserová metoda obohacování uranu. Směs uranu ^{235}U a ^{238}U v plynném skupenství se ozáří přesně naladěnými lasery, které excitují pouze molekuly s ^{235}U , což umožňuje jejich následnou separaci.

Další štěpný materiál, plutonium ^{239}Pu , v přírodě se prakticky nevyskytuje (naprosto nepatrné množství plutonia se vyskytuje v uranových rudách, kde vzniká z ^{238}U účinkem neutronů emitovaných z jaderných reakcí), se vyrábí uměle z uranu ^{238}U neutronovou fúzí v jaderném reaktoru.

Patřičně obohacený štěpný materiál se pak již jen upravuje do vhodné formy, použitelné v palivových článcích jaderných reaktorů. Při zločinném zneužití v jaderných zbraních je štěpný materiál v bombě rozdělen do několika částí (segmentů), z nichž každá obsahuje ve svém objemu podkritické množství. Exploze se vyvolá tím, že tyto segmenty se k sobě rychle přiblíží (výbuchem vhodné chemické výbušniny se „vstřelí“ do sebe), čímž se vytvoří nadkritické množství. Nadkritického množství se dosáhne i stlačením kulově uspořádaného štěpného materiálu výbuchem vnější kulové slupky.



Nejjednodušší atomová bomba se skládá ze dvou oddělených podkritických množství štěpného materiálu, která v součtu tvoří množství nadkritické. Exploze klasické výbušniny vymrští obě oddělené podkritické části proti sobě takovou silou, která zajistí, že zůstanou během několika prvních milisekund spojeny. V nadkritickém množství štěpného materiálu se odstartuje řetězová reakce, která uvolní velké množství různých druhů energie:

- 1) tlakovou vlnu — 40-60 % celkové uvolněné energie
- 2) tepelné záření — 30-50 % celkové uvolněné energie
- 3) ionizující záření — 5 % celkové uvolněné energie
- 4) radioaktivní látky — 5-10 % celkové uvolněné energie (část ve formě tzv. radioaktivního spadu)
- 5) elektromagnetický impuls

Přestože zastoupení radioaktivity na celkově uvolněné energii není příliš velké, dávka záření, které jsou oběti atomového útoku vystaveny, má devastující účinky.

Při rychlém dosažení kritického množství dojde ihned k jadernému výbuchu, neboť malé množství neutronů, které je vždy v materiálu přítomno (vzniká spontánním štěpením jader a působením kosmického záření) iniciuje lavinovitý rozběh řetězové reakce, při níž se během cca 10^{-6} sekundy rozštěpí téměř všechna jádra a explozivně se uvolní velké množství energie (z 1 kg uranu se uvolní energie asi $2 \cdot 10^7$ kJ, což odpovídá výbuchu asi 20 000 tun klasické výbušniny trinitrotoluenu).

Štěpný materiál je v jaderné bombě obklopen masivním obalem, který slouží jednak jako reflektor neutronů, jednak svou mechanickou pevností udržuje štěpící se materiál co nejdéle pohromadě, aby se naráz stačilo rozštěpit co největší množství štěpného materiálu. Při explozi se část štěpného materiálu rozptýlí do podkritického množství, čímž se štěpná reakce sama zastaví. Teplota při výbuchu dosahuje řádově 10^7 °C a výbuch je doprovázen intenzívním ionizujícím zářením a rozsáhlou radioaktivní kontaminací štěpnými produkty, což násobí ničivé a smrtící účinky vlastní exploze.

V čistém štěpném materiálu je střední doba neutronového cyklu velmi krátká, $\tau_n \approx 10^{-8}$ s, takže i při mírně nadkritickém poměru jediný počáteční neutron způsobí za pouhé 4 μ s vznik cca 10^{25} neutronů a téhož počtu rozštěpení jader, což odpovídá rozštěpení cca 50 kg uranu za dobu 4 mikrosekundy! Rychlost narůstání řetězové reakce je tedy neobyčejně vysoká – má charakter prudké exploze.

Vlivem stlačení vyvolaného klasickou chemickou explozí se zvýší hustota materiálu a postačující kritické množství štěpného materiálu je o něco menší než výše uvedené hodnoty pro uran či plutonium za normálních podmínek. Toto potřebné minimální množství lze ještě snížit vhodným obalem sloužícím jako neutronový reflektor a dále použitím neutronového iniciátoru – dodatečného radioizotopového zdroje neutronů

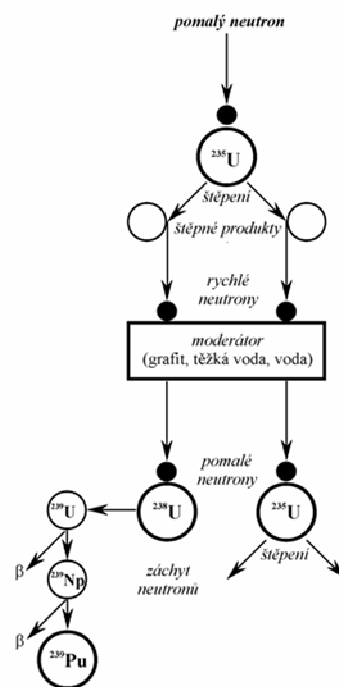
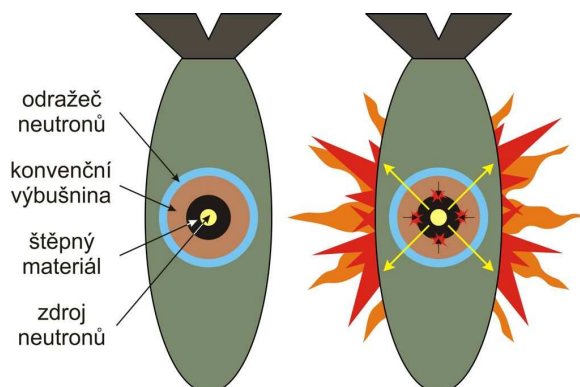


schéma přípravy plutonia

(např. ^{210}Po -beryllium) umístěného v centru nálože. Stlačením se α -zářič (^{210}Po) a terčíkový materiál (beryllium) dostanou do těsného kontaktu a uvolňované neutrony poslouží jako „roznětka“ štěpné reakce. Neutronový iniciátor urychlí dynamiku řetězové reakce, která nemusí začínat z několika málo počátečních neutronů, ale je rychle dodáno velké množství neutronů, které vyvolají řetězovou reakci v celém objemu štěpného materiálu. Kritické množství se snižuje i moderačním účinkem látek schopných zpomalovat neutrony. Kombinací různých způsobů lze dosáhnout nejmenšího kritického množství pro uran asi 15 kg, pro plutonium cca 5 kg.



Nejpoužívanějším typem jaderné bomby je implozní puma (např. Fat Man). Obvykle zde bývá použito plutonium namísto ^{235}U . Po výbuchu konvenční výbušniny je podkritické množství plutonia stlačeno tak, aby se dosáhlo kritického stavu. Výbuch zároveň udrží masu plutonia déle u sebe, takže řetězová reakce může probíhat déle, čímž se uvolní podstatně větší množství energie (rychlý průběh samotného jaderného výbuchu by jinak příliš rychle rozmetal masu plutonia na podkritické části). Uvnitř jaderné zbraně je zdroj neutronů, které ve vhodném okamžiku zahájí řetězovou reakci. Vylepšení pláštěm z odražeče neutronů (beryliový reflektor) brání úniku neutronů mimo štěpný materiál. Tento typ bomby využívá mnohem menší množství štěpného materiálu.