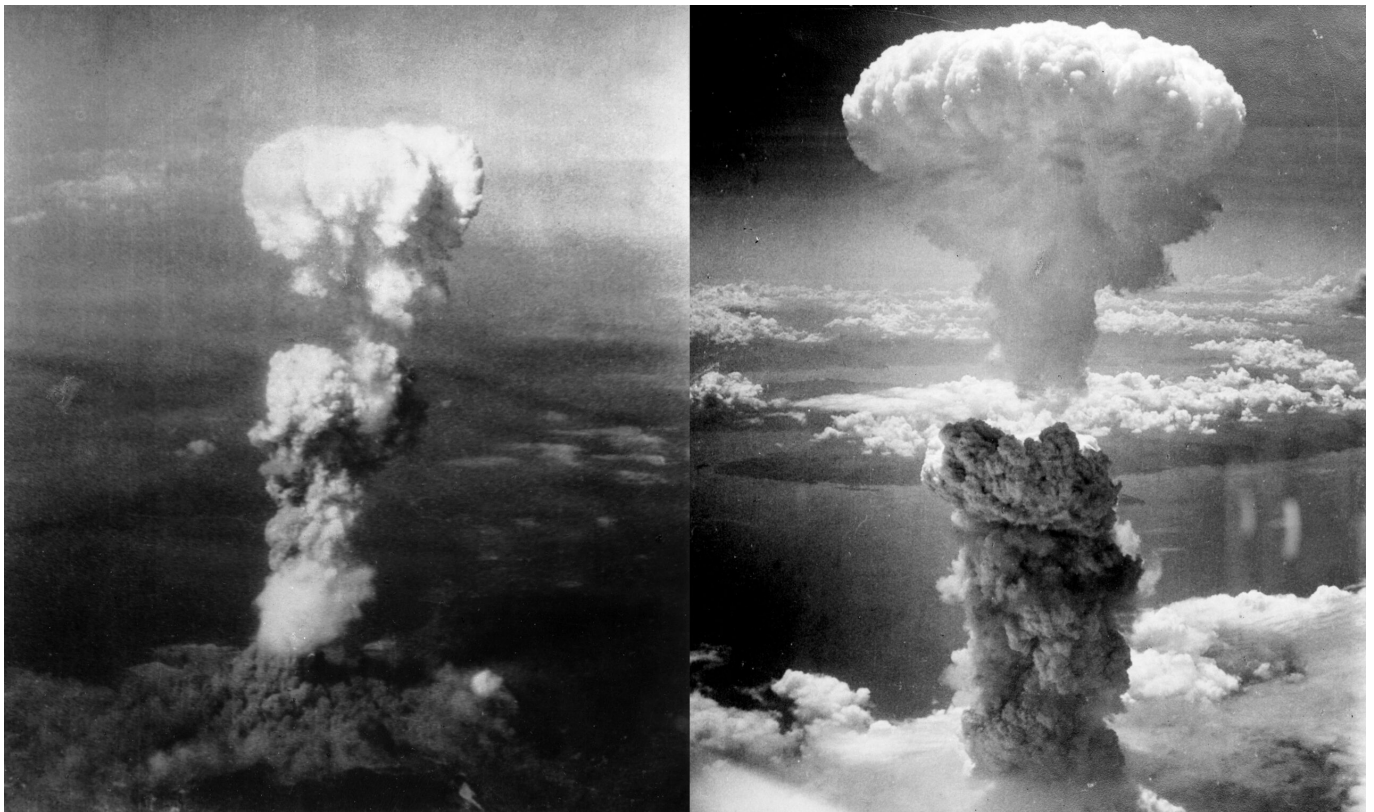


Hoe werkt een atoombom?

75 jaar geleden gooiden Amerikaanse bommenwerpers een atoombom op Hiroshima en een op Nagasaki. Na het ontploffen van deze verwoestende bommen gaf Japan zich over, wat het einde van de Tweede Wereldoorlog inluidde. De twee bommen waren gelukkig de enige twee kernwapens die ooit in een gewapend conflict zijn gebruikt. Wat is de natuurkunde achter atoombommen, en wat maakt ze zo gevaarlijk?



Afbeelding 1. Twee atoombommen. De paddenstoelwolken die opstegen boven Hiroshima (links) en Nagasaki (rechts) op 6 en 9 augustus 1945, als gevolg van de explosies van de atoombommen die daar zijn ontploft. Foto's: [George R. Caron en Charles Levy](#).

Allemachtig krachtig

Atoombommen of kernwapens zijn de krachtigste wapens die ooit door de mens gemaakt zijn. De enorme hoeveelheid energie die vrijkomt bij de ontploffing van een atoombom is

moeilijk te omvatten. Tijdens een dergelijke explosie kan de temperatuur in de kern van een atoombom oplopen tot wel honderd miljoen graden Celsius.

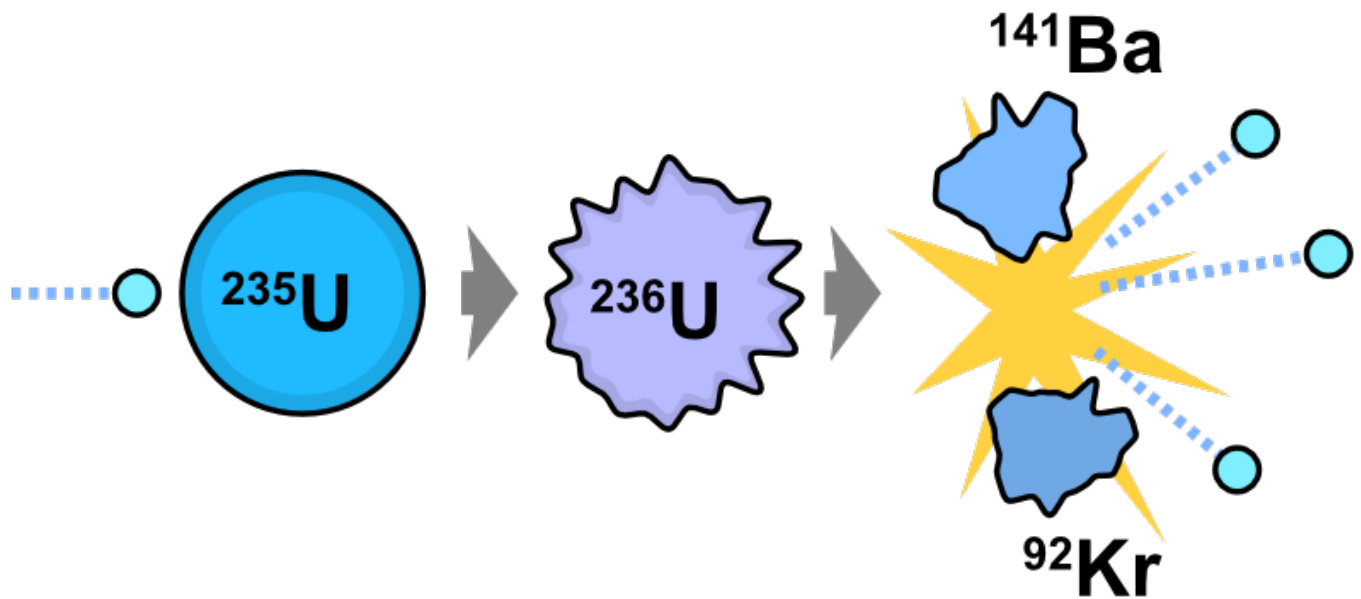
De kracht van kernwapens wordt normaal uitgedrukt in hoeveel gewicht van het conventionele explosief TNT een even grote explosie zou veroorzaken. Een kilogram TNT is genoeg om een kleine auto op te blazen. De atoombommen die op Hiroshima en Nagasaki vielen hadden een explosieve kracht van respectievelijk 15 en 21 kiloton (oftewel 15-21 miljoen kilogram) TNT.

De krachtigste atoombom die ooit getest is, de Russische waterstofbom “Tsar Bomba”, had een kracht van maar liefst 50 megaton TNT, oftewel 50.000 kiloton TNT. Wil je zelf zien hoe groot de explosie van een kernwapen kan zijn? Kijk dan op [deze website](#).

Dat kernwapens zoveel energie kunnen vrijmaken komt omdat ze werken op basis van de *sterke kernkracht*, de sterkste van de [vier fundamentele natuurkrachten](#). Over heel korte afstanden, van de orde van 0,0000000000000001 meter, is deze kracht meer dan honderd keer zo sterk als de elektromagnetische kracht die verantwoordelijk is voor de aantrekking en afstoting tussen elektrisch geladen deeltjes, en wel 10^{38} keer (een 1 gevolgd door 38 nullen, oftewel honderd miljard miljard miljard miljard) zo sterk als de zwaartekracht.

We hebben het aan de sterke kernkracht te danken dat protonen en neutronen aan elkaar kunnen binden om atoomkernen te vormen. Dit lukt ondanks dat de positief geladen protonen elkaar onderling afstoten – de sterke kernkracht overwint daarbij dus de elektromagnetische kracht.

Het enige ‘zwakke’ punt aan de sterke kernkracht is dat die alleen over heel korte afstanden werkt, vele malen korter dan de reikwijdte van de elektromagnetische kracht. Dit betekent dat grotere atoomkernen onstabiel kunnen worden, waardoor ze uiteenvallen in twee of meerdere kleinere atoomkernen en losse neutronen. Bij zo’n kernsplijting breken veel van de bindingen die de kern bijeen hielden, waardoor er een grote hoeveelheid [bindingsenergie](#) vrijkomt. Een voorbeeld van zo’n splijtingsproces is te zien in afbeelding 2 hieronder.



Afbeelding 2. Een kernsplijtingsproces Een uraniumkern absorbeert een vrije neutron, waardoor de kern instabiel wordt. De instabiele kern vervalst in twee kleinere atoomkernen en meer vrije neutronen. Bij het splijten komt veel bindingsenergie vrij. Afbeelding: [Fastfission](#).

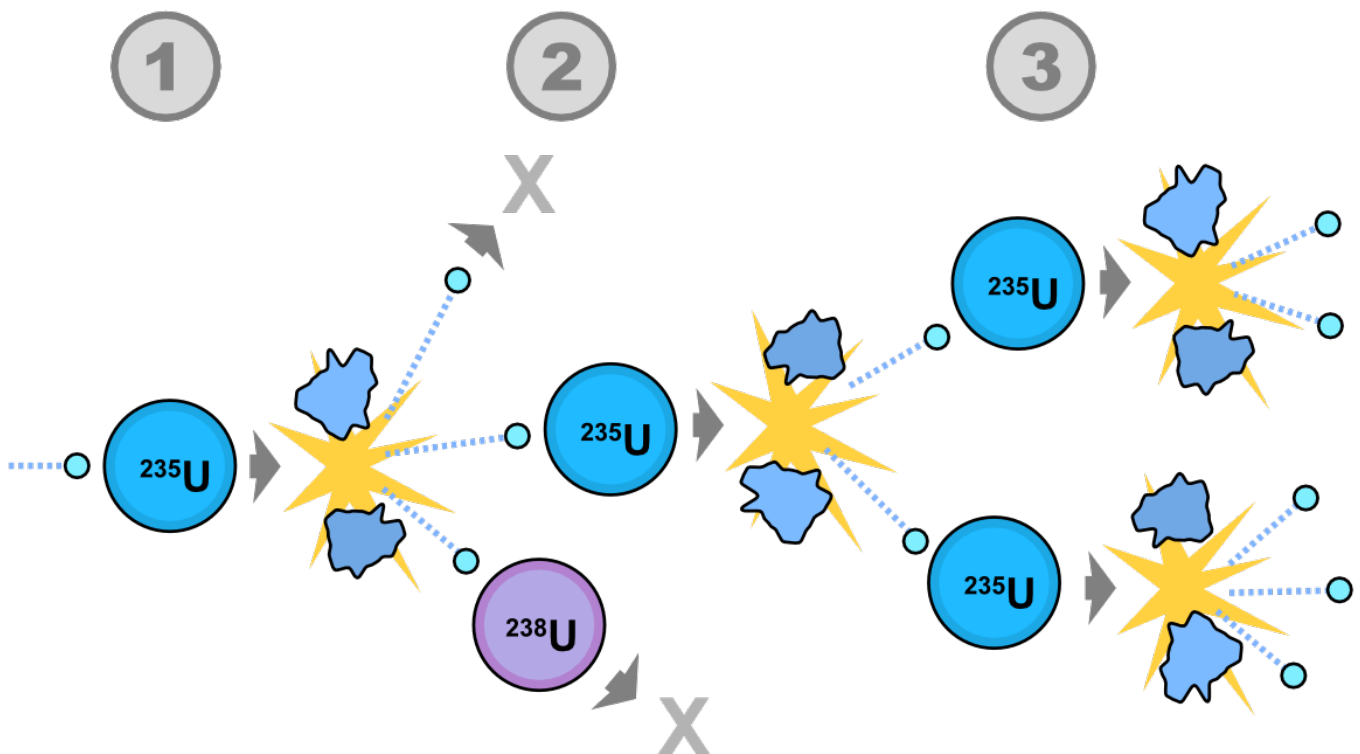
Explosieve kettingreacties

Wanneer er één atoomkern splijt heb je natuurlijk nog geen bom. Om met de energie die vrijkomt bij een kernsplijting een bom te maken, heb je twee ingrediënten nodig: (1) veel atomen die tegelijkertijd een kernsplijting ondergaan, en (2) een manier om te zorgen dat dit alleen gebeurt wanneer jij dat wilt.

Je doet dit, overigens net als in een kernreactor, door een nucleaire kettingreactie op gang te brengen. Bij het splijtingsproces komen vaak extra losse neutronen vrij, die met heel veel energie wegvliegen. Wordt een van deze neutronen geabsorbeerd door een nabijge zware atoomkern, dan kan dit ervoor zorgen dat die tweede atoomkern ook een kernsplijting ondergaat, waardoor er meer neutronen vrijkomen, enzovoort.

Hoe makkelijk het opnemen van neutronen leidt tot een nieuwe kernsplijting, hangt af van de aantallen protonen en neutronen die zich in een atoomkern bevinden. De isotoop uranium-235, waar het getal 235 het totale aantal protonen en neutronen aangeeft, is bijvoorbeeld bijzonder goed in het voortzetten van een kettingreactie, omdat het relatief makkelijk een extra neutron absorbeert om een zeer onstabiele uranium-236-atoomkern te vormen. Deze kern vervalst dan snel naar twee kleinere atoomkernen, waarbij een of meerdere neutronen vrijkomen. De isotoop plutonium-239 is een ander voorbeeld van een

'goede' isotoop om dit proces mee te starten.



Afbeelding 3. Een explosieve kettingreactie. (1) Een uranium-235-kern absorbeert een neutron en splitst in twee nieuwe atoomkernen, waarbij drie nieuwe neutronen en de nodige bindingsenergie vrijkomen. (2) Een van de neutronen wordt geabsorbeerd door een atoom van uranium-238; daar zet de reactie zich niet voort. Een ander neutron gaat gewoon verloren en botst nergens mee, ook de reactie zet zich dus niet voort. Een derde neutron botst echter met een atoom van uranium-235, dat vervolgens splitst en twee neutronen en wat bindingsenergie vrijgeeft. (3) Beide neutronen komen in botsing met uranium-235-atoomkernen, die elk splijten, waarbij weer tussen de één en drie neutronen vrijkomen, enzovoort. Afbeelding: [FastFission](#), aangepast.

Superkritisch

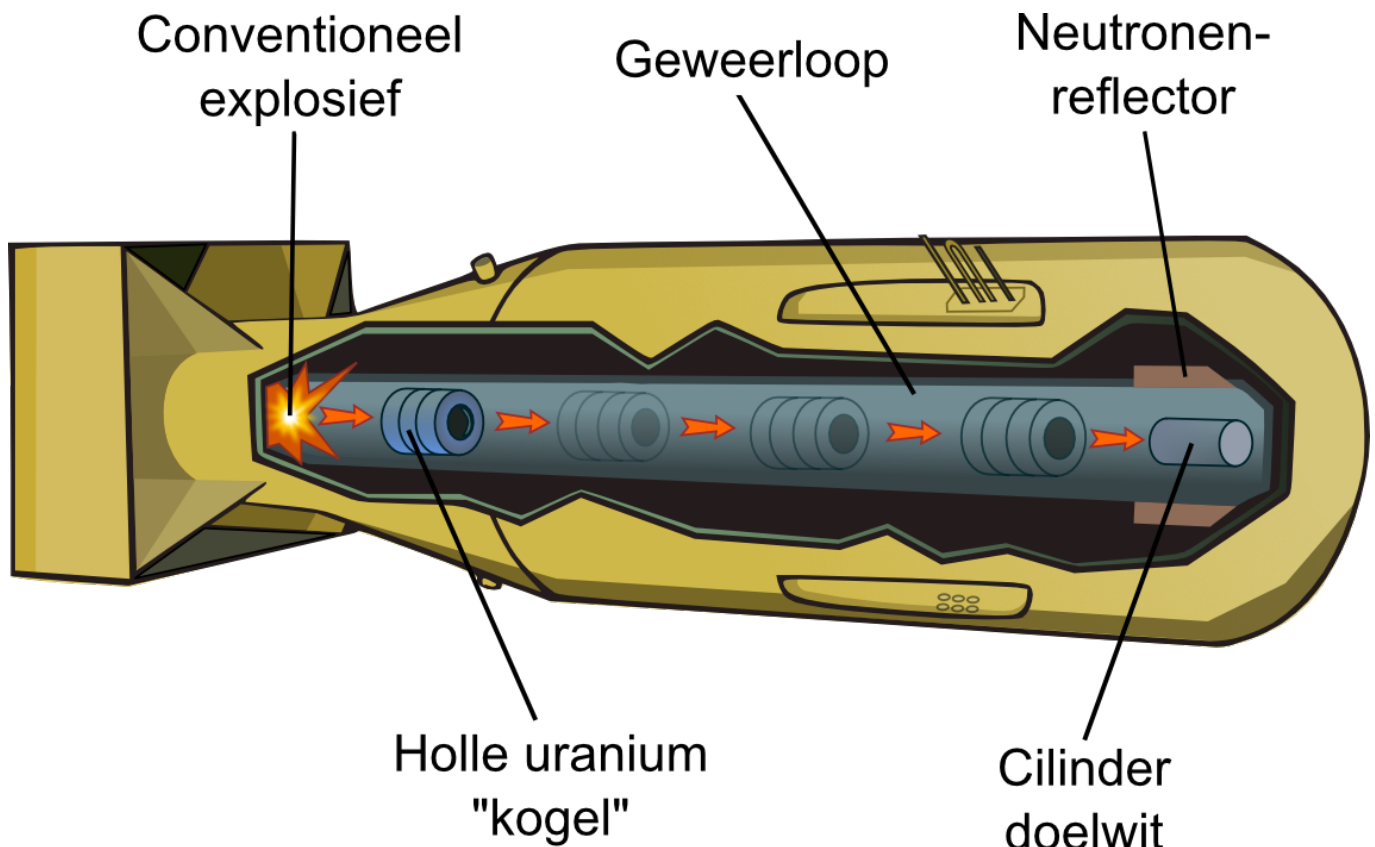
Een ware kettingreactie ontstaat alleen wanneer iedere kernsplijting gemiddeld ten minste één vervolgreactie veroorzaakt. Een bepaalde massa aan splijtstof wordt *kritisch* genoemd, wanneer iedere kernsplijting gemiddeld leidt tot precies één volgende splijting. Dit wordt uitgedrukt in wat de *effectieve neutronen-vermenigvuldigingsfactor* (k) heet, $k = 1$. Een massa splijtstof is *superkritisch* wanneer deze zelfde k groter is dan 1: in dit geval krijg je per splijttingsproces meer dan één vervolproces, waardoor het aantal kernsplijtingen snel kan oplopen. In een *subkritische* massa is k kleiner dan 1, en dooft de kettingreactie juist uit.

In tegenstelling tot in een kernreactor, waarin men ervoor wil zorgen dat de [kettingreactie niet uit de hand loopt](#), zijn atoombommen ontworpen om dit proces juist te versnellen. Een techniek die helpt om dit voor elkaar te krijgen, is het gebruiken van *verrijkt* uranium of plutonium. Dit houdt in dat je een zo hoog mogelijke concentratie van de juiste isotoop gebruikt. In atoombommen op basis van uranium wordt er bijvoorbeeld voor gezorgd dat tenminste 85% van het materiaal uit uranium-235 bestaat, in tegenstelling tot de grofweg 3% die gebruikt wordt in kernreactoren. Ook bevatten atoombommen neutron-reflecterende lagen die vrije neutronen terugkaatsen naar de splijtingsstof, om de kans nog verder te vergroten dat de neutronen geabsorbeerd worden.

De ontsteker

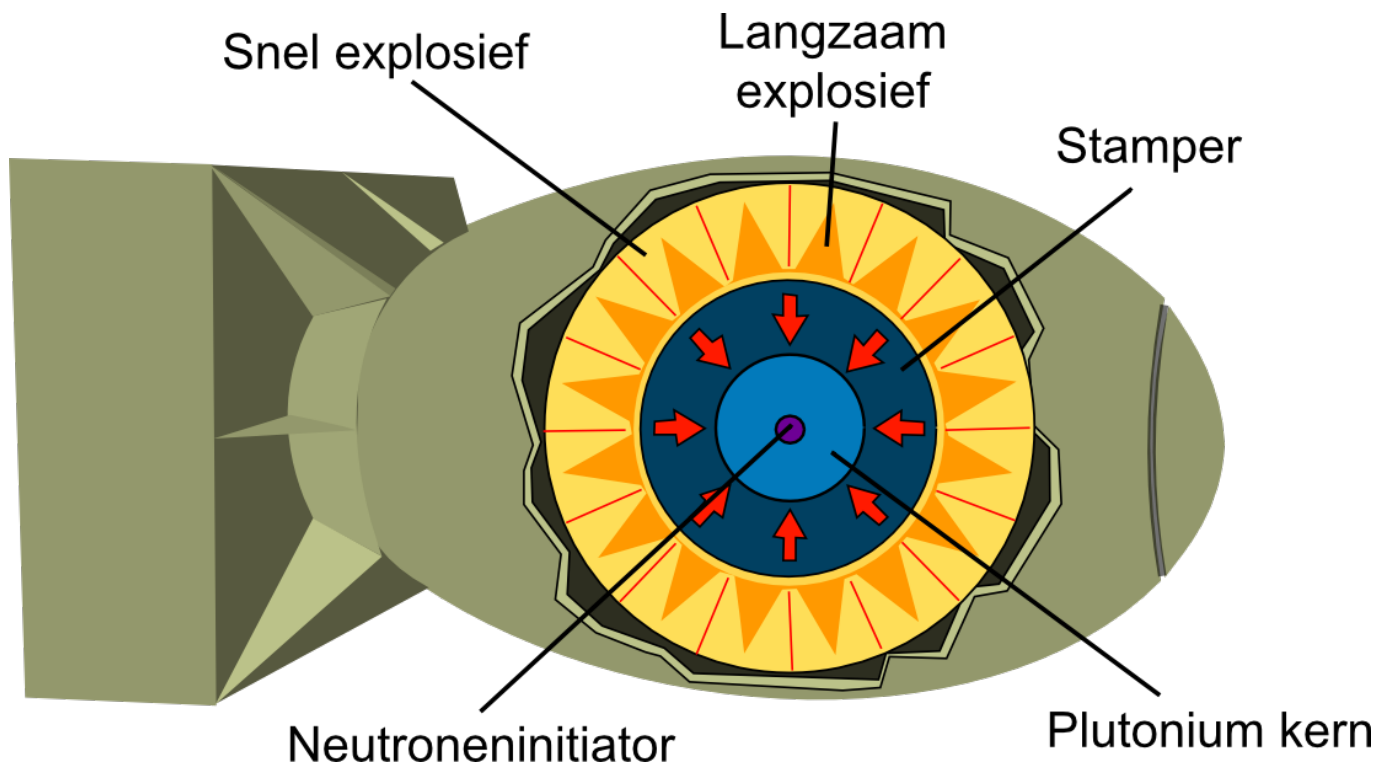
Heb je een klomp van verrijkte splijtstof, dan moet je er wel voor zorgen dat die alleen een explosieve kettingreactie ondergaat wanneer jij dat wilt. Dat houdt in dat je wilt kunnen aansturen wanneer de splijtingsstof overgaat van subkritisch naar superkritisch. Er zijn verschillende manieren om dit te doen.

De atoombom die op Hiroshima viel, “Little Boy”, was een kernwapen van het ‘pistooltype’. Zo’n wapen bevat twee stukken verrijkt uranium, beide met een subkritische massa, en gebruikt een conventioneel explosief om het ene deel op de andere af te schieten. De “kogel” in Little Boy had de vorm van een holle cilinder, waar het andere stuk uranium netjes inpaste, zoals afgebeeld in afbeelding 3. Rond het uraniumdoelwit zat ook hier een laag van neutronen-reflecterend materiaal, om ervoor te zorgen dat er zo min mogelijk neutronen konden ontsnappen. Toen de twee uranium-massa’s samenkwamen, vormden ze samen een superkritische massa, wat leidde tot de explosie die Hiroshima verwoestte.



Afbeelding 4. Schematische werking van de “Little Boy”-atoombom. Een pistooltype atoombom zoals in deze afbeelding werkt door een massa verrijkt uranium af te schieten op een tweede uranium-doelwit. Een neutronenreflector rond het doelwit zorgt ervoor dat er zo weinig mogelijk vrije neutronen kunnen ontsnappen. Afbeelding: [Wikipedia](#), aangepast.

De “Fat Man”-atoombom die op Nagasaki viel, werkte op basis van compressie van zijn kern van plutonium. Deze sferische kern was omringd door een neutronen-reflecterende stamper, met daarbuiten een laag conventionele explosieven. Door de buitenste laag te ontsteken, werd de bol van plutonium onder hoge druk gezet. Hiermee veranderde deze van een subkritische naar een superkritische massa, terwijl in het midden van de kern een legering van polonium en beryllium onder de plotselinge hoge druk een heleboel vrije neutronen uitzond om het kernsplijtingsproces te starten.



Afbeelding 5. De schematische werking van de “Fat Man”-atoombom. Wanneer de buitenste laag explosieven afgaan, duwen ze de stamper-laag naar binnen. Dit maakt de plutoniumkern superkritisch, terwijl een neutroneninitiator het kernsplijtingsproces op gang brengt door een groot aantal vrije neutronen uit te zenden. Afbeelding: [Wikipedia](#), aangepast.

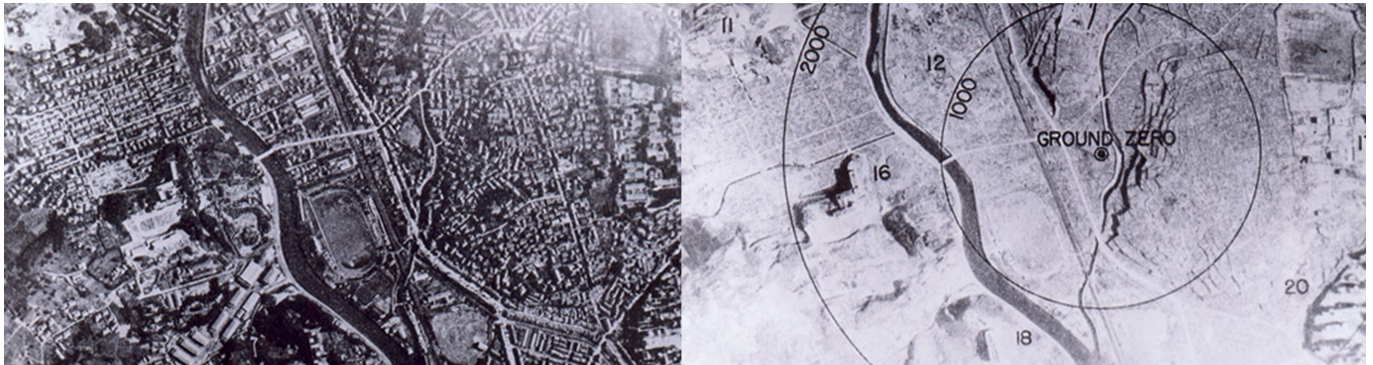
Groot, groter, grootst

Sinds de jaren veertig zijn er nieuwe modellen kernwapens ontwikkeld, die in het algemeen ook veel krachtiger zijn. Een reden hiervoor is simpelweg verbeterde techniek. Little Boy en Fat Man waren dan wel ongekend verwoestend, maar eigenlijk niet heel efficiënt. Little Boy bevatte bijvoorbeeld in totaal 64 kg verrijkt uranium, waarvan naar schatting maar 1,38% (minder dan 1 kg) echt kernsplijting heeft ondergaan. Van de 6,4 kg verrijkt plutonium die Fat Man bevatte, is ongeveer 1 kg gespleten, wat nog steeds maar neerkomt op zo’n 16%.

De eerder genoemde Tsar Bomba was een atoombom van een heel ander soort. Waterstofbommen, zoals de Tsar, gebruiken ook kernsplijting, maar alleen om de temperatuur en druk te verkrijgen die nodig is om een [kernfusieproces](#) te starten. Dit houdt in dat waterstofkernen juist samensmelten tot heliumkernen, een proces waar veel meer energie bij vrijkomt dan bij kernsplijting.

Hopelijk nooit meer

Dat kernwapens bestaan, is beangstigend. Hiroshima en Nagasaki werden in een oogwenk platgelegd, en er kwamen naar schatting zo'n 200.000 mensen om het leven. Sommige van deze mensen waren in één klap verdampt, anderen stierven aan de gevolgen van derdegraads brandwonden, en velen bezweken aan de gevolgen van radioactieve straling.



Afbeelding 6. Luchtfoto's van Nagasaki vóór en na de atoombom-aanval. Foto's: [Wikipedia](#).

Dat de vernietigende kracht van kernwapens nu overtuigend gedemonstreerd was, bracht helaas nog geen einde aan hun productie. Niet veel later speelden ze ook een grote rol in de Koude Oorlog tussen de Verenigde Staten en de Sovjet-Unie. De nucleaire wapenwedloop tussen de twee supermachten zorgde ervoor dat de landen in 1986 gezamenlijk zo'n 70.300 kernwapens hadden. Dit aantal is inmiddels weer teruggedrongen naar een geschat aantal van [13.410 kernwapens wereldwijd](#), inclusief waarschijnlijk 22 (Amerikaanse) kernwapens hier in Nederland.

Ondanks dat er in totaal minder wapens zijn, zijn de huidige wapens gemiddeld veel krachtiger dan ze vroeger waren, en zijn ze in handen van meer verschillende landen met verschillende belangen. Het is dan ook niet gek dat ook vandaag de dag steeds meer mensen zich zorgen maken over het reële risico van nucleaire oorlogsvoering. Laten we hopen dat ons gezamenlijke belang van daar-niet-aan-beginnen genoeg is om die toekomst tegen te houden!