

Kernenergie

Energie en massa; massadefect

Bij het verval van radioactieve kernen via α -, β - of γ -straling, komt spontaan energie vrij. Sommige kernen zijn niet stabiel, ze vallen uiteen en hebben na afloop dus minder energie. De vrijkomende energie ontstaat niet uit niets. De vraag is dus waar de energie bij kernreacties vandaan komt.

Volgens Einstein is er bij de vervalreactie massa verdwenen.

Het verschil in massa wordt het 'massadefect' genoemd.

Einstein had al in 1905 gesteld dat massa een speciale vorm van energie is. Met andere woorden: als massa verdwijnt, moet je daar energie voor terugvinden. In plaats van twee aparte behoudswetten (voor massa en energie) stelde Einstein dus één behoudswet voor: *de wet van behoud van energie!*

Volgens die wet is massa één van de vormen waarin energie kan voorkomen. Anders gezegd: de kg is ook een eenheid van energie en de joule is ook een eenheid van massa.

De beroemde wet van Einstein luidt:

$$E = m \cdot c^2$$

Einstein

Hierin stelt m de massa voor en c de lichtsnelheid in vacuüm.

De (mega)elektronvolt

In de kernfysica is het de gewoonte om de energie van deeltjes niet in joule op te geven maar in (mega)elektronvolt (MeV). In de tabellen 5 en 25 van *Binas* vind je:

$$1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J} \text{ en}$$

$$1 \text{ MeV} = 1,602 \cdot 10^{-13} \text{ J}$$

Voorbeeld *De bommen op Japan*

- Bij de bommen op Japan in 1945 verdween ongeveer 1 g massa.
- a** Hoeveel energie kwam daarbij vrij (in de vorm van hitte en straling)?
- b** Hoeveel kg steenkool moet je verbranden om evenveel energie vrij te krijgen?

Oplossing

$$\mathbf{a} \quad E = 1 \cdot 10^{-3} \cdot (3 \cdot 10^8)^2 = 9 \cdot 10^{13} \text{ J.}$$

- b** In tabel 28A van *Binas* vind je voor de stookwaarde van steenkool $29 \cdot 10^6 \text{ J/kg}$. De massa die je moet verbranden is dus:

$$m = \frac{9 \cdot 10^{13}}{29 \cdot 10^6} = 3 \cdot 10^6 \text{ kg}$$

Een nieuwe eenheid voor massa

In de kernfysica is het de gewoonte om de massa's van deeltjes niet in kg op te geven maar in *atomaire massa-eenheden*, u.

In tabel 7 van *Binas* vind je de waarde van u uitgedrukt in kg en in MeV:

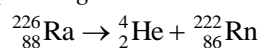
$$1 \text{ u} = 1,66054 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 931,49 \text{ MeV}$$

Per definitie is de massa van één compleet atoom ^{12}C gelijk aan 12 u (zie tabel 25).

Voorbeeld *De energie van een α uit ^{226}Ra*

- Controleer dat het α -deeltje dat ^{226}Ra uitstoot 4,79 MeV meeneemt. In tabel 25 staan de massa's van de complete atomen.

Oplossing



Als we dit kernverval omzetten in een *atoomverval* door er overal de elektronen bij te rekenen, kunnen we tabel 25 gebruiken.

$$m_{\text{links}} = 226,02541 \text{ u} \text{ en}$$

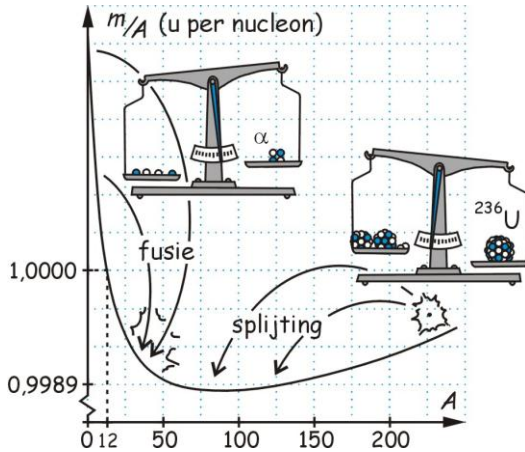
$$\Sigma m_{\text{rechts}} = 226,02017 \text{ u} \Rightarrow$$

$$\text{verschil} = 0,00524 \text{ u} = 4,88 \text{ MeV}$$

Het α -deeltje krijgt hier 98% van en 2% is voor de radonkern.

Spontaan verval en splijting

Een kern bestaat uit nucleonen: protonen en neutronen. Als je de massa van de losse nucleonen vergelijkt met de massa van een kern, dan blijkt de massa van de kern altijd kleiner te zijn. In de volgende grafiek staat horizontaal het aantal nucleonen en verticaal de massa per nucleon. Hoe meer massa verdwenen is, hoe steviger een kern in elkaar zit.



• **Kernfusie**

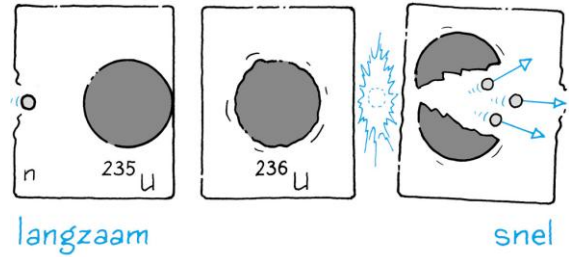
Uit de grafiek volgt dat het voor de lichtste kernen voordelig is om samen te smelten tot één zwaardere kern: kernfusie. Met fusie wordt geëxperimenteerd, maar het is nog niet gelukt om hiermee energie in beheerste vorm vrij te maken. De massa van een α -deeltje is véél kleiner dan de massa van twee protonen en twee neutronen; het is dus zeer stabiel. Bij veel fusieprocessen is het eindproduct een α -deeltje.

• **Kernsplijting**

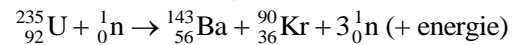
Protonen worden in een kern aan elkaar ‘gelijmd’ door neutronen, maar in zeer zware kernen is zelfs een groot aantal neutronen niet genoeg om de kern bij elkaar te houden. Daarom is het voor zeer zware kernen energetisch voordelig om zich te splijten in twee lichtere kernen en wat losse neutronen. Kernsplijting wordt in de praktijk gebracht in kernreactoren. Bij kernsplijting en spontaan kernverval verdwijnt altijd massa. Deze verdwenen massa wordt omgezet in kinetische energie van de brokstukken.

Kettingreactie

Vlak voor de tweede wereldoorlog ontdekten Hahn en Strassmann iets vreemds toen ze uranium beschoten met langzame neutronen. Hun bedoeling was ‘transuranen’ te maken: elementen die zwaarder zijn dan uranium. Maar ze vonden een veel lichtere kernsoort, namelijk een radioactieve isotoop van barium! De voor Hitler uitgeweken Meitner gaf samen met haar neef Frisch een gedurfde verklaring: de uraniumkern moest in twee stukken zijn gebarsten; zij noemden dat kernsplijting.

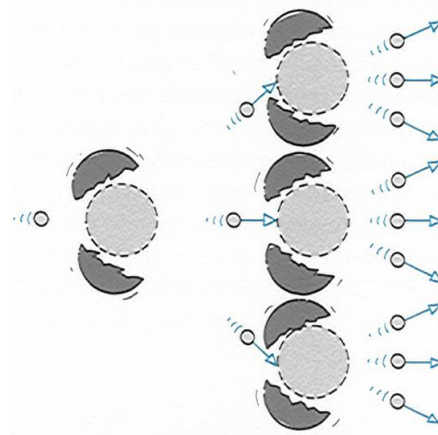


Later bleek het om deze reactie te gaan waarbij snelle neutronen vrijkomen:



Joliot zag het belang in van deze ontdekking:

- Er komt energie vrij en wel véél en véél meer dan bij chemische reacties (ongeveer 200 MeV in plaats van zo’n 10 eV).
- Er komen opnieuw neutronen vrij. Er kan dus een kettingreactie ontstaan.

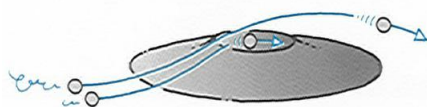


Kernreactoren

Nog in het begin van de jaren '30 wezen Einstein en Rutherford de gedachte van de hand dat men energie uit atoomkernen zou kunnen halen. 'Talking moonshine' zei Rutherford. Na de experimenten van Hahn en Strassmann werd het echter duidelijk dat het wél zou kunnen lukken hoewel de technische problemen groot waren. De enige grondstof voor reactoren die in de natuur voorkomt is namelijk ^{235}U , maar deze isotoop vormt slechts 0,7 % van het natuurlijke uranium. Daar komt bij, dat de isotoop ^{238}U (99,3 %) de eigenschap heeft neutronen te absorberen en die neutronen zijn juist nodig om de reactie op gang te houden.

De twee uraniumisotopen zijn zeer moeilijk te scheiden vanwege het geringe relatieve massa-verschil. Tegenwoordig wordt dat gedaan met diffusieleidingen en ultracentrifuges. Bij diffusie maakt men gebruik van het feit dat ^{235}U iets sneller door een poreuze wand gaat dan ^{238}U . Een kunstmatige isotoop met dezelfde eigenschappen als ^{235}U is ^{239}Pu : door het invangen van een neutron kan de kern splijten in twee middel-zware kernen en ook hier komt energie bij vrij. Deze isotoop wordt 'gekweekt' in speciale reactoren.

Een kernsplijting begint niet vanzelf, maar moet eerst met een neutron op gang worden geholpen. Uranium is als hout, dat ontbrandt niet vanzelf hoewel er zuurstof in de lucht aanwezig is. Je moet er eerst een brandende lucifer bij houden. Buskruit help je over de drempel met een tik of een vonk. Bij ^{235}U wordt de drempel overschreden door een *langzaam* neutron. Je kunt de kern met een knikkerpot vergelijken. De oplopende rand – de drempel – moet eerst worden overwonnen.



Langzame 'knickers' hebben daarna meer kans om in de kuil terecht te komen, de snelle schieten er overheen.

Om een ^{235}U -kern met een neutron te splijten, moet het neutron een kleine kinetische energie hebben, ongeveer 0,05 eV. Dat is de kinetische energie die moleculen en atomen bij 'normale' temperaturen hebben. Het is dan in 'thermisch evenwicht' met de omgeving. De neutronen die bij een splijting vrijkomen, hebben echter een kinetische energie van ongeveer 1 MeV. Die schieten dwars door de kern en daardoor ontbreekt de tijd om de tussenkern ^{236}U te vormen.

• De moderator

In een *thermische kernreactor* die op uranium werkt, zijn dus langzame neutronen nodig. Om de vrijkomende snelle neutronen te vertragen tot lage snelheden gebruikt men een *moderator*. Dat is een stof die bij botsingen makkelijk kinetische energie van de neutronen opneemt. De atomen van zo'n stof moeten liefst net zo zwaar zijn als neutronen. Vergelijk dat met biljarten: de aangespeelde bal neemt energie op, maar als je hem vervangt door een loden bal, dan kaatst de speelbal terug en is er weinig energie overgedragen.

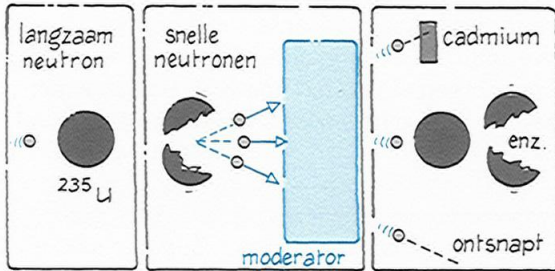
Gewoon water bevat veel protonen, zodat deze stof een goede moderator zou kunnen zijn; de massa's van protonen en neutronen zijn immers ongeveer gelijk. Protonen zijn echter ook goede neutronenvangers, zodat vaak andere stoffen als moderator worden gebruikt, zoals zwaar water (D_2O) of grafiet (C). In reactoren die op verrijkt uranium (3% ^{235}U in plaats van 0,7%) werken, kan wel gewoon water als moderator dienst doen.

• De vermenigvuldigingsfactor

Een kernreactor werkt goed als er gemiddeld bij iedere splijting weer één langzaam neutron overblijft; hij wordt dan *kritiek* genoemd. Als dit aantal kleiner is dan 1, dan sterft de reactie uit. Als het groter is dan 1, dan loopt de reactie uit de hand. Stel dat de 'vermenigvuldigingsfactor' 1,1 zou zijn, dan had je na één splijting 1,1 keer zoveel nieuwe splijtingen, vervolgens $1,1^2$, daarna $1,1^3$, enzovoort. Binnen de kortste tijd zou al het uranium 'verspleten' zijn in één grote ontploffing. Dat is dus wat er in een kernbom gebeurt.

• *Regelstaven*

Om de vermenigvuldigingsfactor op 1 te houden, wordt cadmium gebruikt dat neutronen goed absorbeert. Als er teveel neutronen vrijkomen, laat men *regelstaven* met cadmium tussen het uranium zakken; als er te weinig neutronen overblijven, haalt men de staven weer omhoog. De bediening van de staven gaat automatisch. In geval van nood worden ze helemaal naar binnen geschoven zodat de kettingreactie uitsterft.



In 1942 bouwden Fermi en zijn medewerkers een grote bolvormige blokkendoos die gemaakt was uit 40 ton natuurlijk uranium en 400 ton zuiver grafiet. Tussen het uranium waren houten staven, bekleed met cadmium aangebracht. Van Fermi's kernreactor is vanwege militaire geheimhouding nooit een foto gemaakt, maar wel een schilderij.



Op 2 december 1942 trok Fermi langzaam een cadmiumstaaf uit de reactor zodat die kritiek werd en een beheerste kettingreactie op gang kwam. Eén verkeerde beweging en ze waren er met z'n allen geweest! Compton was erbij en rapporteerde aan het Witte huis door de telefoon: 'The Italian navigator has just landed in the new world'.

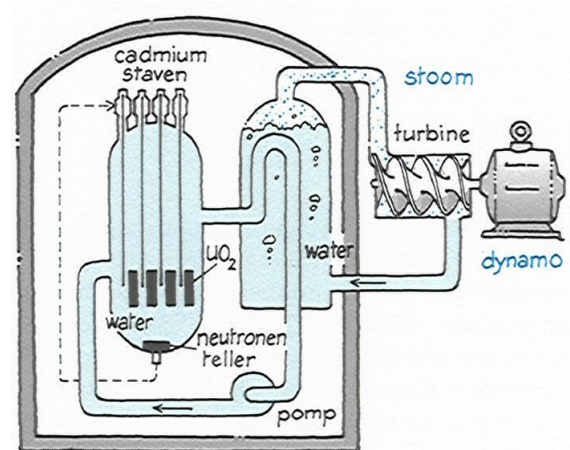
Hij vergeleek daarmee de Italiaan Fermi met de Italiaan Columbus die ook een nieuwe wereld ontdekt had.

De installatie was voorzien van een stuursysteem dat automatisch een regelstaaf in de bol moest laten vallen zodra de dichtheid van de neutronen te groot zou worden – en dat gebeurde ook op zeker moment. Voor de zekerheid was er ook zo'n staaf aan een touw opgehangen en stond er iemand met een mes klaar om, in geval van nood, dat touw door te snijden.

Fermi koos voor een bolvorm omdat een bol in verhouding tot een kubus een kleiner oppervlak heeft; de kans dat neutronen ontsnappen wordt zo verkleind. Ieder neutron dat ontsnapt, doet tenslotte niet mee aan de kettingreactie. Als er bij een reactie drie neutronen vrijkomen, mogen er twee ontsnappen of worden weggevangen. Ook als de uraniumbol zélf te klein is, zullen te veel neutronen ontsnappen. Een kleine bol heeft naar verhouding een groter oppervlak dan een grote bol.

Als de uraniumbol echter té groot is, ontsnappen er te weinig neutronen en slaat de kettingreactie op hol, zoals in een kernbom. De hoeveelheid massa waarbij dit gebeurt, heet de *kritieke massa* (bij uranium zo'n 25 kg).

De volgende figuur toont het schema van een 'drukwaterreactor' – zoals in Borssele. De splijtstof is verrijkt uranium in de vorm van UO_2 . Het water dat de geproduceerde warmte afvoert, functioneert tegelijk als moderator.



Uranium, van erts tot afval

Het erts dat in een uraniummijn gewonnen wordt, bevat naast uranium veel andere mineralen. Nadat het uranium er in de vorm van UO_2 zoveel mogelijk uitgehaald is, blijft een radioactieve afvalberg over. De activiteit van dit afval is weliswaar laag, maar door de grote hoeveelheid is het gevaar niet te verwaarlozen.

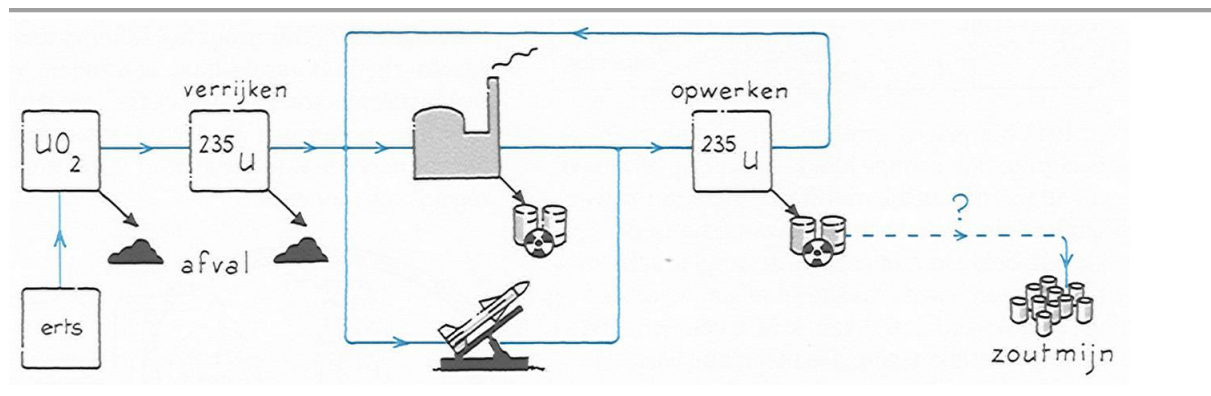
De volgende stap bestaat uit het verrijken van het uranium, het scheiden van ^{235}U en ^{238}U . Het verarmde uranium vormt de tweede radioactieve afvalberg. Ook hier is sprake van een lage activiteit, die voornamelijk veroorzaakt wordt door α -stralers.

Verarmd uranium wordt vanwege zijn grote dichtheid ($19,1 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$) wel gebruikt om

granaten en tanks te verzwaren .

Als een 'verse' uraniumstaaf in een reactor wordt geschoven, is hij zwak radioactief, maar 'opgebrand' zit hij vol sterk radioactieve splijtingsproducten. Bovendien worden de wanden van de reactor bestraald door rondvliegende neutronen, zodat er radioactieve isotopen ontstaan. Het afbreken van een centrale wordt daardoor een kostbaar karwei.

In opwerkingsfabrieken worden waardevolle bestanddelen uit afgewerkte staven en gesloopte centrales gehaald. Maar wat er dan nog overblijft moet zorgvuldig en gekoeld worden opgeborgen omdat het nog vele eeuwen actief zal blijven. De hele cyclus van winning tot afval ziet er zo uit:



Opslag van afval

Zoals wij van beschavingen van een paar duizend jaar geleden weinig weten, zullen mensen over een paar duizend jaar misschien weinig van ons weten. Zij mogen niet opeens geconfronteerd worden met bijvoorbeeld een stortplaats die plutonium bevat met een halveringstijd van 10 000 jaar.

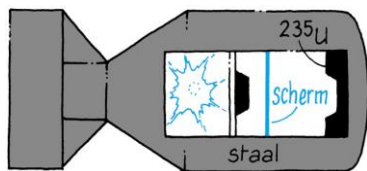
Bij opslag van afval in oude zoutmijnen moet worden gezorgd dat het afval geïsoleerd wordt van de 'biosfeer'. Het grootste gevaar komt in Nederland van water dat als transportmiddel voor radioactieve isotopen zou kunnen dienen.

Maar ook mijnbouw, een meteorietinslag of een aardbeving kunnen niet helemaal worden uitgesloten.

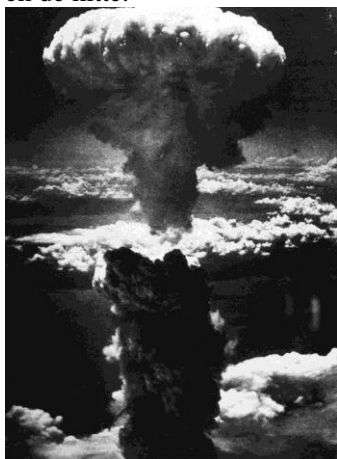
De Nederlandse politiek heeft tot nu toe gekozen voor langdurige bovengrondse opslag zolang internationaal onderzoek niet bewezen heeft dat ondergrondse opslag in mijnen verantwoord is. Intussen worden plannen uitgewerkt waarbij het afval in staal of glas wordt verpakt en daarna in mijnen wordt opgeborgen.

Kernbommen

De bom die in 1945 op Hiroshima werd gegooid, Little Boy, was een uraniumbom. Het zeer zuivere ^{235}U was verdeeld over twee stukken die elk kleiner maar samen groter waren dan de kritieke massa. Met een conventionele ontploffing werd de ene helft tegen de andere geschoten. Zo ontstond in een fractie van een seconde een stuk uranium van meer dan de kritieke massa.

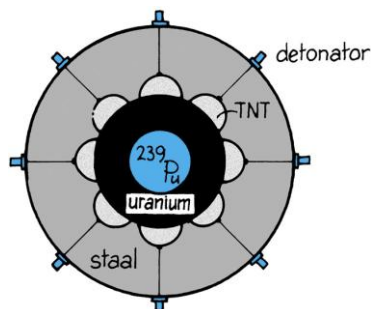


Tijdens het contact van de twee uraniumhelften werden bovendien kleine hoeveelheden beryllium en een α -straler met elkaar in contact gebracht. In de reactie $^9\text{Be}(\alpha, n)^{12}\text{C}$ werden neutronen geproduceerd om de kettingreactie snel op gang te brengen. In een tijd van 10^{-8} s werd een temperatuur van 10^8 K bereikt en ging de bom over in een radioactieve vuurbal. Na de lichtflits en de ioniserende straling kwamen de schokgolf en de hitte.



Drie dagen later viel op Nagasaki een plutoniumbom, Fat Man (foto). Hierin zat 7 kg ^{239}Pu ter grootte van een flinke sinaasappel. Alleen doordat de bom niet precies boven de stad ontplofte, waren er minder mensen onmiddellijk dood: 27 000 in plaats van 80 000 bij de eerste bom.

Bij de plutoniumbom moest men een andere techniek toepassen omdat ^{239}Pu verontreinigd is met de α -straler ^{240}Pu . Met lichte kernen geven de α 's een reactie waarbij neutronen ontstaan, zodat het gevaar van spontane explosie bestond. In deze bom werd het plutonium kritisch gemaakt door het samen te persen tot 80% van zijn volume. Dat gebeurde door een aantal springladingen precies tegelijk te ontsteken.



Het uranium om het plutonium heen diende als neutronenreflector. Deze bom was – natuurkundig gezien – ‘beter’: de explosietijd was iets langer. In beide gevallen werd ongeveer 1 kg gespleten. In grootte is dat een flinke stuiterbal. Daarbij werd 1 g in energie omgezet.

De ‘atoombommen’ (A-bommen) op Japan leidden tot het einde van de tweede wereldoorlog, maar ook tot het begin van de kernwapenwedloop. Ze hadden een sterkte van 15 à 20 kiloton TNT – in 1940 werd Rotterdam met minder dan 100 ton TNT platgegooid.

De eerste waterstofbom (H-bom) werd in 1952 beproefd. Deze bom dankt zijn naam aan de fusie die optreedt tussen twee waterstofisotopen, ^2H en ^3H . Om de fusiebom zit een mantel van ^{238}U dat door de snelle neutronen gespleten wordt, zodat er nog meer energie vrijkomt.

In een ‘neutronengranaat’ (een mini fusiebom) laat men dat achterwege; tot 30 % van de energie komt hier vrij via neutronen en α 's. Officieel wordt deze bom aangeduid met de term ERRB (Enhanced Radiation, Reduced Blast). De bedoeling is namelijk zoveel mogelijk mensen uit te schakelen door straling en zo weinig mogelijk schade te veroorzaken aan gebouwen. Overigens is dat laatste zeer betrekkelijk, want de ‘lichtste’ neutronenbom is zwaarder dan alle bommen op Rotterdam bij elkaar. Het woord granaat is dus tamelijk misleidend.

Het menselijk lichaam is erg gevoelig voor neutronenstraling doordat we voor het grootste deel uit water bestaan en dus veel protonen bevatten. Deze protonen kunnen vanwege hun massa vrijwel alle energie van aanstormende neutronen overnemen en dan begint de vernietigende werking op de cellen.

Bij een kernexplosie valt de radioactieve neerslag (fall out) nog op honderden km afstand; deze kan op wat langere duur dodelijk zijn. De hoeveelheid fall out hangt niet alleen af van de soort bom, maar ook van de hoogte waarop de ontploffing plaatsvindt. De vuurbal zal opstijgen als een hete luchtballon en kan daarbij zelfs een deel van de aarde ‘opzuigen’ in de steel van de paddestoel.