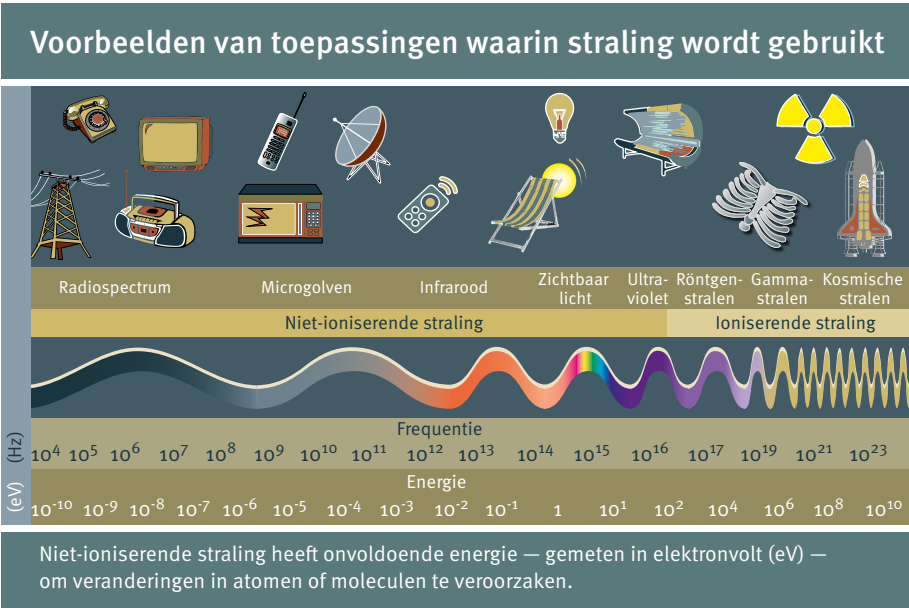


INLEIDING

Eerst en vooral moeten we onderscheid maken tussen ioniserende straling en niet-ioniserende straling. *Ioniserende straling* heeft voldoende energie om elektronen uit atomen te verwijderen; bij dit proces, ionisatie genoemd, blijven elektrisch geladen deeltjes (ionen) achter op atoomniveau. *Niet-ioniserende straling* daarentegen, zoals radiostraling (radiogolven), zichtbaar licht of ultraviolette straling, bevat onvoldoende energie om een ionisatieproces op gang te brengen. Deze brochure handelt over de effecten van blootstelling aan straling van natuurlijke en kunstmatige bronnen. Daarbij wordt met de term *straling* in deze brochure uitsluitend de ioniserende straling bedoeld.



Vandaag is over de bronnen en effecten van stralingsblootstelling meer bekend dan over de meeste andere gevaarlijke stoffen. De kennis ter zake wordt voortdurend geactualiseerd en verder uitgediept door wetenschappers. De meeste mensen weten dat straling wordt gebruikt in kerncentrales voor het opwekken van elektriciteit of in medische toepassingen. Over talloze andere toepassingen van nucleaire technologie, bijvoorbeeld in industrie, landbouw, bouwbedrijf, onderzoek en op diverse andere gebieden, is weinig of niets bekend. Wie voor het eerst iets over dit onderwerp leest, zal wellicht tot zijn grote verbazing vernemen dat de stralingsbronnen waaraan het publiek het meest is blootgesteld, niet noodzakelijkerwijs de bronnen zijn die de meeste aandacht krijgen. In werkelijkheid wordt de hoogste stralingsblootstelling veroorzaakt door natuurlijke bronnen die altijd en overal in ons

leefmilieu aanwezig zijn. Verder is de blootstelling aan kunstmatige bronnen overwegend het gevolg van het wijdverbreide gebruik van straling in de geneeskunde. Bovendien kan onze dagelijkse levensstijl, zoals reizen per vliegtuig en wonen in goed geïsoleerde huizen in bepaalde delen van de wereld, de stralingsblootstelling fors doen toenemen.

Met deze brochure willen het Milieuprogramma van de Verenigde Naties (UNEP) en het secretariaat van het Wetenschappelijk comité van de Verenigde Naties inzake de gevolgen van atoomstraling (UNSCEAR) bijdragen aan een betere voorlichting over en een grotere bewustwording van bronnen, niveaus en effecten van blootstelling aan ioniserende straling. UNSCEAR werd in 1955 opgericht door de Algemene Vergadering van de Verenigde Naties en brengt vooraanstaande wetenschappers uit zevenentwintig VN-lidstaten samen om op wereldschaal onderzoek te verrichten naar stralingsblootstelling en de daarmee samenhangende effecten en risico's. UNSCEAR legt zelf geen veiligheidsnormen vast en doet evenmin aanbevelingen op dat gebied, maar wil wetenschappelijke informatie aanreiken zodat nationale autoriteiten en andere bevoegde instanties normerend kunnen optreden. De wetenschappelijke evaluaties die UNSCEAR de afgelopen zestig jaar heeft uitgevoerd, vormen de belangrijkste bron van informatie voor deze brochure.

1. WAT IS STRALING?

Voordat we kunnen spreken over niveaus, effecten en risico's van stralingsbloomstelling, moeten we enkele basisbegrippen uit de stralingswetenschap verduidelijken. Radioactiviteit en de straling die daarvan het gevolg is, bestonden al lang voordat er leven op aarde was. Zij waren in de ruimte aanwezig sinds het begin van het heelal. Al van bij het prille begin komt radioactief materiaal van nature op aarde voor. De mens heeft dit universele natuurverschijnsel pas aan het eind van de negentiende eeuw ontdekt, en tot op vandaag worden nog nieuwe gebruikswijzen ervan gevonden.

1.1. Een beetje geschiedenis

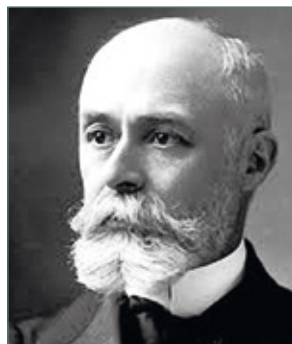
In 1895 ontdekte de Duitse natuurkundige **Wilhelm Conrad Röntgen** röntgenstraling. Hij noemde die X-stralen en zag de mogelijkheid om daarmee binnen in het menselijk lichaam te kijken. Deze ontdekking betekende meteen het begin van het gebruik van straling in de geneeskunde. Sindsdien zijn de medische toepassingen ervan gestaag toegenomen. Als blijk van erkenning ontving Röntgen in 1901 de Nobelprijs voor natuurkunde omdat hij zich in buitengewone mate verdienstelijk had gemaakt voor de mensheid. Eén jaar na de ontdekking van Röntgen borg de Franse natuurkundige **Henri Becquerel** enkele fotografische platen samen met uraniumhoudende mineraalmonsters veilig in een lade op. Toen hij later de fotografische platen ontwikkelde, ontdekte hij tot zijn verbazing dat ze door straling waren aangetast. Dit verschijnsel, radioactiviteit genoemd, treedt op wanneer energie spontaan vrijkomt uit atomen. Vandaag wordt **radioactiviteit** uitgedrukt in becquerel (Bq), genoemd naar Henri Becquerel. Het onderzoek werd kort daarop voortgezet door een jonge scheikundige, **Marie Skłodowska-Curie**, die als eerste de naam « radioactiviteit » gaf aan het door Becquerel ontdekte stralingsfenomeen. In 1898 ontdekte zij samen met haar echtgenoot, **Pierre Curie**, dat uranium door straling af te geven op mysterieuze wijze in andere elementen veranderde, waarvan zij het eerste polonium noemden, naar haar geboorteland Polen, en het tweede radium, naar het Latijnse woord voor straling.



Wilhelm C. Röntgen (1845–1923)



Marie Curie (1867–1934)



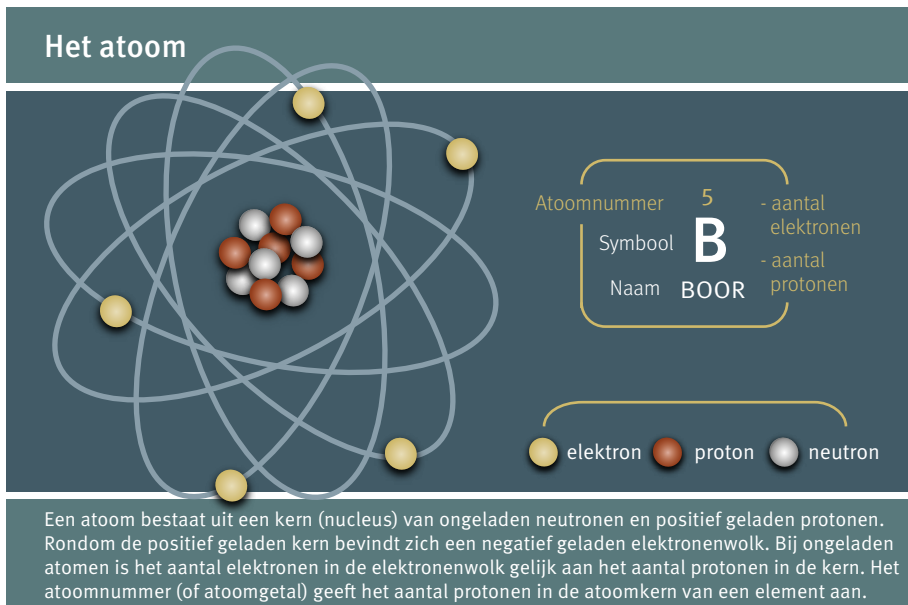
Henri Becquerel (1852–1908)

Marie Curie deelde in 1903 de Nobelprijs voor natuurkunde met haar man Pierre en met Henri Becquerel. Zij was de eerste vrouw die de Nobelprijs voor een tweede keer in ontvangst mocht nemen in 1911 voor haar verdiensten op het gebied van stralingschemie.

1.2. Enkele basisbegrippen

Sinds mensenheugenis proberen wetenschappers het *atoom* en meer in het bijzonder de structuur ervan te doorgronden. Het is bekend dat een atoom uit een uiterst kleine, positief geladen kern (nucleus) bestaat, met daaromheen een wolk van negatief geladen *elektronen*. De atoomkern is ongeveer honderdduizend keer kleiner dan het atoom zelf. Vanwege de dichtheid is vrijwel de volledige atoom-massa in de kern vervat.

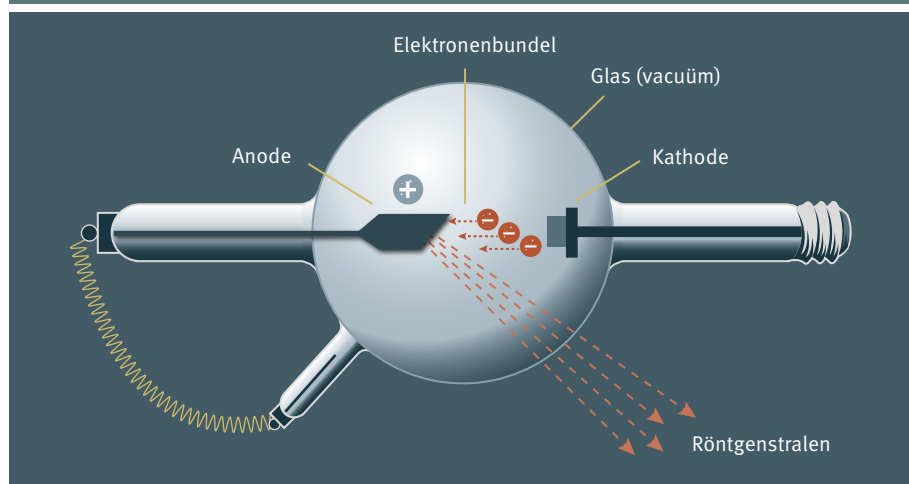
De atoomkern of nucleus bestaat doorgaans uit een cluster van deeltjes, *protonen* en *neutronen*, die sterk met elkaar verbonden zijn. Protonen hebben een positieve elektrische lading, terwijl de neutronen ladingloos zijn. Het atoomnummer van chemische elementen wordt bepaald door het aantal protonen in de atoomkern. Zo heeft boor bijvoorbeeld het atoomnummer 5, wat betekent dat het 5 protonen heeft, terwijl uranium het atoomnummer 92 heeft (= 92 protonen). Elementen met hetzelfde aantal protonen, maar een verschillend aantal neutronen worden *isotopen* genoemd (zo heeft uranium-235 bijvoorbeeld drie neutronen minder dan uranium-238). Normaal gezien heeft het atoom in zijn geheel geen lading: het is elektrisch neutraal omdat het aantal negatief geladen elektronen gelijk is aan het aantal positief geladen protonen.



Sommige atomen zijn van nature stabiel. Andere atomen zijn instabiel. Atomen met een instabiele kern – die spontaan uiteenvallen en daarbij stralingsenergie afgeven – worden **radionucliden** genoemd en het spontaan uiteenvallen heet **radioactief verval**. De bij dit radioactief verval vrijkomende stralingsenergie kan inwerken op andere atomen en die ioniseren. **Ionisatie** is het proces waarbij een atoom positief of negatief geladen wordt door elektronen op te nemen of af te staan. Bij ioniserende straling is voldoende energie beschikbaar om elektronen van andere atomen uit hun baan rond de kern te stoten, waardoor elektrisch geladen atomen ontstaan die **ionen** worden genoemd. Het radioactief verval kan op verschillende manieren plaatsvinden, maar voor eenzelfde radionuclide gebeurt het volgens een vast patroon. **Alfaverval** (ook wel alfadesintegratie genoemd) is het proces waarbij tegelijk twee protonen en twee neutronen worden uitgezonden. **Bètaverval** (ook wel bekend als bètadesintegratie) is het proces waarbij elektronen worden uitgezonden. Doorgaans moet het instabiele nuclide naast het alfaverval of betaverval nog meer energie kwijt. Dat gebeurt door elektromagnetische golven uit te zenden in de vorm een hoog-energetisch foton (golfpakket), de gammastraling.

Net als gammastralen zijn **röntgenstralen** ook een vorm van elektromagnetische straling, zij het dan met minder hoog-energetische fotonen. Een polyenergetisch röntgenspectrum wordt opgewekt in een glazen vacuümbuis door elektronen die vrijkomen uit de **kathode** te versnellen en als elektronenstraal af te vuren op het trefmateriaal, **anode** genoemd. Het röntgenspectrum hangt af van het anodemateriaal en van de versnellingsenergie van de elektronenstraal. Zo kunnen röntgenstralen op kunstmatige wijze worden gegenereerd precies daar waar ze nodig zijn, wat handig is voor industriële en medische toepassingen.

Röntgenbuis

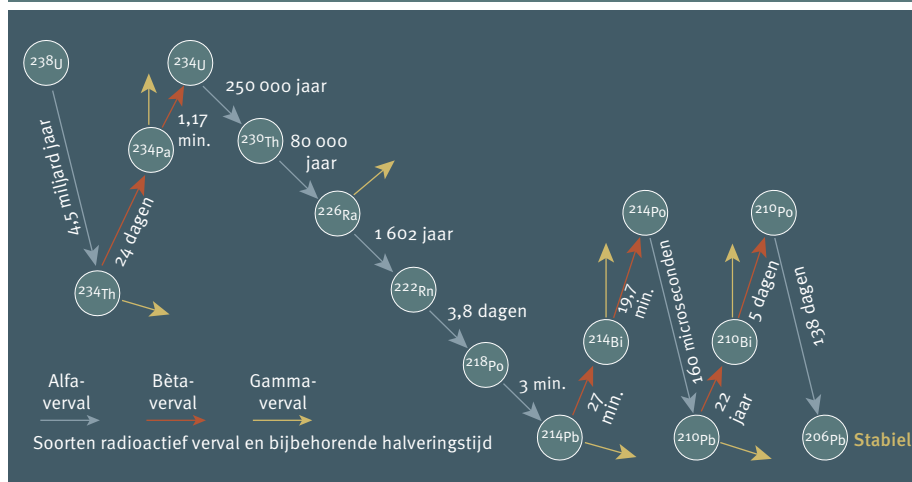


Radioactief verval en halveringstijd

Alle radionucliden zijn instabiel, maar sommige zijn instabieler dan andere. Zo hebben de deeltjes in een uranium-238 atoomkern (met 92 protonen en 146 neutronen) nog maar net genoeg bindingsenergie om niet uiteen te vallen. Uiteindelijk komen twee protonen en twee neutronen los. Zij verlaten het atoom als alfadeeltje, waardoor uranium-238 vervalt naar thorium-234 (met 90 protonen en 144 neutronen). Thorium-234 is echter ook instabiel en ondergaat een ander verval- of desintegratieproces. Door hoogenergetische elektronen uit te zenden als bètadeeltjes en een neutron om te zetten in een proton, vervalt het naar protactinium-234, met 91 protonen en 143 neutronen. Dit verval- of desintegratieproduct is echter ook uiterst instabiel en vervalt op zijn beurt naar uranium-234. Het vervalproces door deeltjesemissie gaat verder en eindigt bij de stabiele isotoop lood-206, met 82 protonen en 124 neutronen. Er bestaan heel wat van deze desintegratiereeksen die men *radioactieve vervalreeksen* noemt.

De *halveringstijd* (ook wel halfwaardetijd genoemd) is de tijd waarna van een oorspronkelijke hoeveelheid stof nog precies de helft over is; in de kernfysica geeft de halveringstijd aan hoe lang het duurt om de helft van de atomen te laten vervallen. Zijn er op een bepaald moment één miljoen atomen, dan blijven er na één halveringstijd nog gemiddeld 500 000 over. Na de tweede halveringstijd zijn er nog ongeveer 250 000 atomen over; dit gaat zo door totdat alle atomen vervallen zijn. Na tien halveringstijden blijft er nog slechts één duizendste (0,1%) over van het oorspronkelijke miljoen. In het bovenstaande voorbeeld zou het iets meer dan één minuut

Uranium-238 — radioactieve vervalreeks



duren om de helft van de atomen van protactinium-234 te laten vervallen naar uranium-234. Voor uranium-238 daarentegen, zou het 4,5 miljard (4 500 000 000) jaar duren om de helft van de atomen te laten vervallen naar thorium-234. Dit gezegd hebbende, komen er relatief weinig radionucliden van nature in het milieu voor.

Eenheden van straling

We weten vandaag dat stralingsenergie schadelijk is voor levend weefsel. De hoeveelheid energie die wordt overgedragen op levend weefsel wordt uitgedrukt als *dosis*. De stralingsdosis kan afkomstig zijn van één of meer radionucliden die zich buiten het lichaam bevinden (uitwendige bestraling). Er kan ook sprake zijn van inwendige bestraling wanneer radionucliden worden opgenomen bijvoorbeeld via inhalatie of ingestie. Dosimetrische grootheden worden op verschillende manieren uitgedrukt, afhankelijk van het bestraalde lichaamsoppervlak en de bestraalde lichaamsdelen, het aantal blootgestelde personen en de blootstellingsduur (bijvoorbeeld acute bestraling).



Harold Gray (1905–1965)
Rolf Sievert (1896–1966)

De *geabsorbeerde dosis* is de hoeveelheid opgenomen stralingsenergie per kilogram weefsel en wordt uitgedrukt in gray (Gy). Deze eenheid is vernoemd naar Harold Gray, Brits natuurkundige en pionier van de stralingsbiologie. Hiermee krijgen we echter geen volledig beeld om de eenvoudige reden dat dezelfde geabsorbeerde dosis alfastraling veel schadelijker is dan dezelfde dosis bèta- of gammastraling. Om de bij verschillende stralingssoorten geabsorbeerde doses vergelijkbaar te maken, moeten we een stralingsweegfactor toepassen, die afhangt van de mate waarin elke dosis schadelijke biologische effecten kan veroorzaken. Deze met de stralingsweegfactor gecorrigeerde dosis wordt *equivalente dosis* (of soms ook wel dosisequivalent) genoemd en uitgedrukt in sievert (Sv). Deze eenheid is vernoemd naar de Zweedse medisch fysicus Rolf Sievert. Een millisievert (mSv) is één duizendste van een sievert, net zoals een milliliter één duizendste van een liter is of een millimeter één duizendste van een meter.

Sommige lichaamsdelen zijn meer stralingsgevoelig dan andere. Zo is de kans op longkanker bij een bepaalde equivalente stralingsdosis bijvoor-

beeld groter dan die op leverkanker. Bijzondere aandacht is er voor de geslachtsorganen vanwege de mogelijkheid van erfelijke schade. Om de doses bij bestraling van verschillende weefsels en organen vergelijkbaar te maken, wordt de equivalente dosis voor ieder lichaamsdeel vermenigvuldigd met een weefselweegfactor. Het resultaat is de *effectieve dosis*, die ook in sievert (Sv) wordt uitgedrukt. De effectieve dosis geeft een indicatie van de kans op stralingsschade in de vorm van kanker en genetische effecten bij lagere stralingsdoses en is niet geschikt als maat voor de ernst van stralingseffecten bij hogere doses.

Dit complexe stelsel van dosimetrische grootheden is nodig om een samenhangend geheel te krijgen. Op die manier kunnen stralingsbeschermingsdeskundigen de individuele doses op een consistente en vergelijkbare wijze registreren. Dit is van het allergrootste belang voor iedereen die met straling werkt en in het bijzonder voor personen die *beroepshalve aan straling worden blootgesteld*.

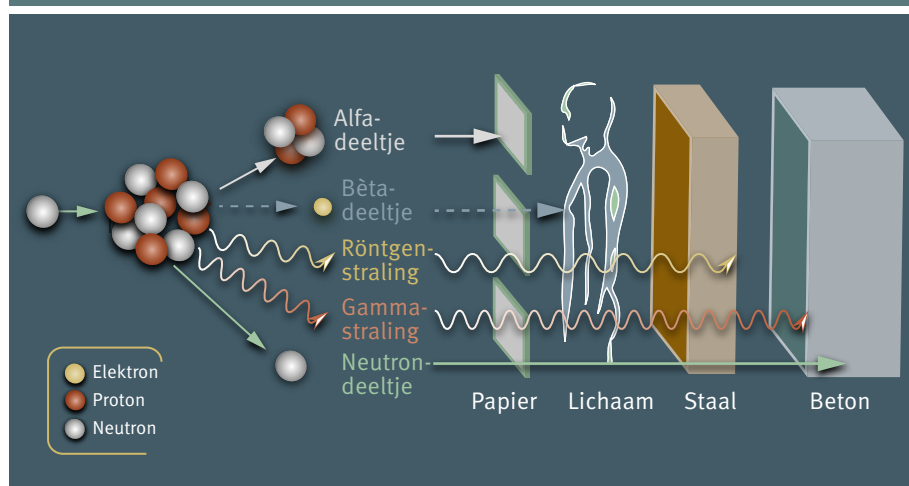
Stralingsgrootheden	
Fysische grootheid	
Activiteit	Het aantal nucleaire energieovergangen per tijdseenheid, gemeten in aantal desintegraties per seconde en uitgedrukt in becquerel (Bq).
Geabsorbeerde dosis	De hoeveelheid stralingsenergie die per massa-eenheid wordt opgenomen, bijvoorbeeld in een weefsel of orgaan. De eenheid voor geabsorbeerde dosis is de gray (Gy), waarbij één gray gelijk is aan één joule per kilogram (J/kg).
Berekende grootheid	
Dosisequivalent	De geabsorbeerde dosis vermenigvuldigd met een stralingsweegfactor (w_R) die rekening houdt met de mate waarin verschillende soorten straling biologische schade veroorzaken in een weefsel of orgaan. De eenheid voor equivalente dosis is de sievert (Sv), waarbij één sievert gelijk is aan één joule per kilogram (J/kg).
Effectieve dosis	De equivalente dosis vermenigvuldigd met de weefselweegfactor (w_T) die rekening houdt met de stralingsgevoeligheid van weefsels en organen. De effectieve dosis wordt uitgedrukt in sievert (Sv), waarbij één sievert gelijk is aan één joule per kilogram (J/kg).
Collectieve effectieve dosis	Som van alle effectieve doses van een aan straling blootgestelde populatie/bevolking of groep personen. De collectieve effectieve dosis wordt uitgedrukt in mens-sievert (mensSv).

Deze beschrijven evenwel enkel individuele doses. Tellen we alle door elk lid van een populatie ontvangen effectieve doses samen, dan krijgen we de *collectieve effectieve dosis* (soms ook gewoon *collectieve dosis* genoemd). De eenheid daarvan wordt meestal aangeduid als mens-sievert (mens Sv). Zo bedraagt de collectieve jaardosis van de wereldbevolking bijvoorbeeld meer dan 19 miljoen mens Sv, wat neerkomt op een jaargemiddelde dosis van 3 mSv per persoon.

1.3. Doordringingsvermogen van straling

Kort samengevat kan worden gesteld dat straling de vorm kan aannemen van deeltjes (waaronder alfa- en bètadeeltjes en neutronen) of van elektromagnetische golven (gammastralen en röntgenstralen) met verschillende energieën. De verschillende energieën en soorten deeltjes die worden uitgezonden hebben een wisselend doordringend vermogen en dus ook uiteenlopende effecten op levende materie. Van alle soorten straling hebben alfadeeltjes de hoogste lading omdat zij uit twee positief geladen protonen en twee neutronen bestaan. Deze hogere lading betekent dat zij in hogere mate inwerken op omgevende atomen. Door deze wisselwerking neemt de energie van de alfadeeltjes – en daardoor ook het doordringend vermogen ervan – snel af. Alfastraling kan bijvoorbeeld al worden tegengehouden door een vel papier. Bètadeeltjes bestaan uit negatief geladen elektronen: zij hebben een kleinere lading en dus een hoger doordringingsvermogen dan alfadeeltjes. Bètadeeltjes kunnen door een paar centimeter levende materie dringen. Gammastralen en röntgenstralen zijn bijzonder doordringend en worden pas tegengehouden door een dikke staalplaat. Kunstmatig opgewekte neutronen worden uitgezonden door

Doordringend vermogen van verschillende soorten straling



instabiele kernen als gevolg van een atoomsplitsing of kernfusiereactie. Neutronen komen ook van nature voor als component van kosmische straling. Neutronen zijn elektrisch neutraal en hebben daardoor een zeer hoog doordringend vermogen wanneer ze inwerken op materie of weefsel.