



## Achtergrondinformatie

### Toepassingen van ioniserende straling

Toepassingen van ioniserende straling zijn te vinden in de gezondheidszorg, in de industrie en bij wetenschappelijk onderzoek. Daarbij gebruiken we de volgende eigenschappen van de straling van radioactieve stoffen of röntgenstraling:

- de *energie* van de uitgezonden straling
- het *doordringend vermogen* van de uitgezonden straling
- de *absorptie* van straling door materialen
- de *halveringstijd* van radioactieve isotopen
- het *ioniserend vermogen* van de uitgezonden straling

Hieronder staat een aantal toepassingen van ioniserende straling, gerangschikt naar de hierboven genoemde eigenschappen.

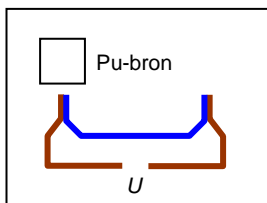
#### Energie

Een radioactieve bron is te gebruiken voor de productie van elektriciteit. Daarbij wordt de stralingsenergie omgezet in elektrische energie.

**Elektriciteitsgenerator** – De door de bron uitgezonden straling valt in op een *thermokoppel* (zie figuur 1). De geabsorbeerde energie veroorzaakt een temperatuurstijging, waardoor het thermokoppel een spanning afgeeft. Als radioactieve bronnen zijn  $\alpha$ - en  $\beta$ -stralers bruikbaar. Een uitgezonden  $\alpha$ - of  $\beta$ -deeltje dat op het materiaal van het thermokoppel invalt wordt volledig geabsorbeerd, en daarmee ook de energie van dat deeltje.

Deze energiebronnen worden gebruikt voor instrumenten in bijvoorbeeld *weerstations* in afgelegen gebieden (strontium-90) en in sommige *satellieten* (plutonium-239 en plutonium-241). Ook in een *pacemaker* wordt op deze manier plutonium als energiebron toegepast. Een alternatief voor de elektriciteitsvoorziening van weerstations en satellieten is een paneel met zonnecellen. Voor een satelliet in een baan richting de buitenplaneten in ons zonnestelsel levert zo'n zonnepaneel echter te weinig energie vanwege de toenemende afstand tot de Zon.

Het gebruik van plutonium als energiebron in satellieten is omstreden vanwege de kans dat er bij de lancering iets misgaat en het plutonium zich in de atmosfeer verspreidt.



Figuur 1 – Thermokoppel met plutoniumbron.

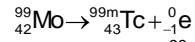
#### Doordringend vermogen

Een veel gebruikte toepassing van radioactieve isotopen is het *markeren* van bepaalde stoffen, die vervolgens tijdens reactieprocessen of transport in bijvoorbeeld een organisme worden gevolgd. De radioactieve isotoop wordt dan gebruikt als *tracer*. We maken hierbij gebruik van het doordringend vermogen van ioniserende straling, omdat de uitgezonden straling buiten het organisme moet worden gedetecteerd. Het gaat dan ook meestal om  $\gamma$ -stralers. Het gebruik van radioactieve isotopen als tracer heeft medische, industriële en wetenschappelijke toepassingen.

**Radiodiagnose** – Voor radiodiagnostisch onderzoek – het stellen van een diagnose met behulp van radioactief gemarkeerde stoffen – is tegenwoordig meestal de technetiumisotoop  $^{99m}\text{Tc}$  in gebruik. Deze isotoop ontstaat bij het verval van de molybdeenisotoop  $^{99}\text{Mo}$ . De letter *m* in het symbool  $^{99m}\text{Tc}$  geeft aan dat het technetium in een metastabiele toestand verkeert, en bij verval dus  $\gamma$ -straling uitzendt. De bruikbaarheid van  $^{99m}\text{Tc}$  heeft te maken met zijn geschikte halveringstijd van 6 uur – kort, maar niet te kort – en het feit dat het gemakkelijk te koppelen is aan een groot aantal verschillende stoffen. Voor het onderzoek aan een bepaald orgaan wordt dan een stof gekozen die zich in dat orgaan concentreert, bijvoorbeeld jodium ( $\text{I}_2$ ) voor een onderzoek van de schildklier. Deze stof wordt radioactief gemarkeerd met  $^{99m}\text{Tc}$  en in het lichaam geïnjecteerd. Enige tijd na deze injectie meet een detector buiten het lichaam de verdeling van de radioactief gemarkeerde stof over het orgaan. Als detector wordt een gamma-camera gebruikt: een groot aantal kleine scintillatiedetectoren (zie figuur 2). Het beeld van een dergelijke gamma-camera noemen we een *scintigram* (zie figuur 3, 4 en 5). Op zo'n scintigram is rechtstreeks de relatieve activiteit op verschillende plaatsen in het orgaan te zien. Een relatief hoge of juist lage activiteit wijst op afwijkingen in het functioneren van het orgaan.

Een van de voordelen van het gebruik van  $^{99m}\text{Tc}$  als tracer in medisch onderzoek is zijn relatief korte halveringstijd. Daardoor is de beginactiviteit van deze isotoop relatief hoog, zodat deze buiten het lichaam een goed meetbaar signaal oplevert bij een relatief kleine toegediende hoeveelheid. Dat beperkt de stralingsbelasting voor de patiënt. Een nadeel is

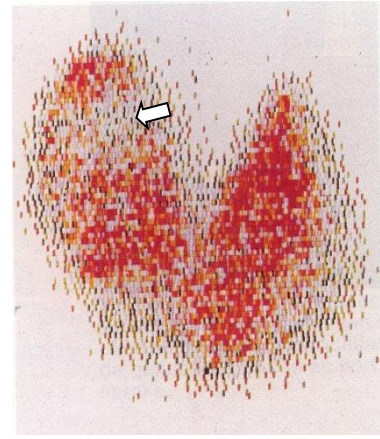
echter dat het onmogelijk is om zo'n relatief kortlevende isotoop in voorraad te hebben. Het ziekenhuis beschikt dan ook over een *radioactieve koe*: een bron met het relatief langlevende  $^{99}\text{Mo}$  die voortdurend  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  aanmaakt:



Het gevormde  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  kan aan de 'koe' worden onttrokken door deze te 'melken': met een vloeistofstroom waarin het  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  oplost komt deze isotoop naar buiten.

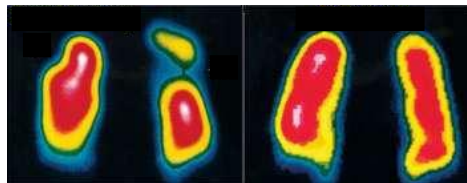


Figuur 2 – Gamma-camera voor het opnemen van een scintigram na toediening van een radioactief gemarkeerde stof.

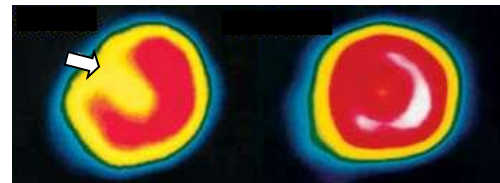


Figuur 3 – Scintigram van de schildklier. De pijl wijst op een slecht functionerend deel van dit orgaan.

Naast  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  worden ook andere isotopen als tracer gebruikt, zoals de jodiumisotoop  $^{131}\text{I}$  voor schildklieronderzoek, de thalliumisotoop  $^{201}\text{Tl}$  voor onderzoek naar de doorbloeding van organen en de xenonisotoop  $^{133}\text{Xe}$  voor onderzoek naar het functioneren van de longen.



Figuur 4 – Doorbloedingsscintigram van de longen door injectie van  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  in het bloed (links) en beluchtingsscintigram met behulp van  $^{133}\text{Xe}$  in de ingeademde lucht (rechts). Het verschil tussen de beide beelden wijst op longembolie.



Figuur 5 – Doorbloedingsscintigram van het hart door injectie van  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  in het bloed bij inspanning op een fietsergometer (links) en in rust (rechts). De pijl wijst op een goed zichtbare plaats met onvoldoende doorbloeding van de hartwand.

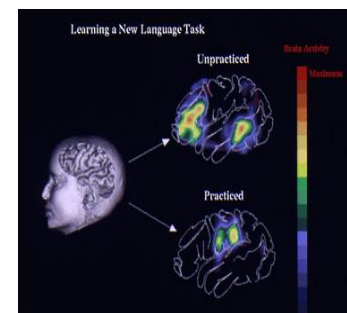
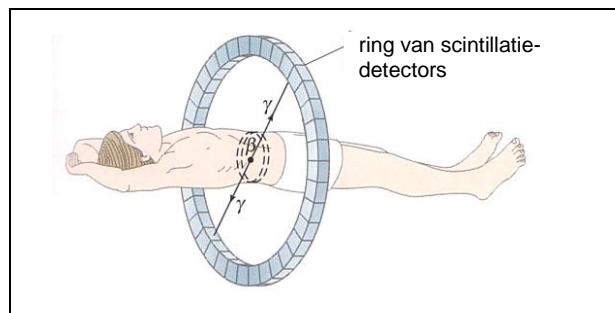


Figuur 6 – PET-scanner.

Op de pagina [Productie van medische isotopen](#) staan verschillende methoden voor de productie van isotopen voor medisch onderzoek en stralingstherapie.

**Positron Emissie Tomografie** – Een beeldvormingstechniek die lijkt op het gebruik van tracers is de *positron emissie tomografie* (afgekort: PET). Daarmee zijn veranderingen in de stofwisseling van cellen zichtbaar te maken. Bij het maken van een PET-scan wordt een radioactieve stof met een korte halveringstijd gekoppeld aan bijvoorbeeld glucose, dat met een infuus in de bloedbaan wordt gebracht waarna het wordt opgenomen in de cellen van het weefsel. Als radioactieve stof zijn  $^{11}\text{C}$ ,  $^{13}\text{N}$  of  $^{15}\text{O}$  bruikbaar. Dit zijn  $\beta^+$  of *positronstralers*.

Figuur 7 – Een PET-scan (rechts) wordt gemaakt door detectie van de  $\gamma$ -fotonen die ontstaan bij annihilatie van een positron en een elektron.



Het uitgezonden positron zal binnen een afstand van niet meer dan enkele mm een elektron tegenkomen, waarbij de massa van beide deeltjes door *annihilatie* wordt omgezet in twee  $\gamma$ -fotonen. Die twee  $\gamma$ -fotonen bewegen in precies tegengestelde richtingen, en vallen in op een ring van scintillatie-detectors om de patiënt heen (zie figuur 6 en 7). Daarmee is de bewegingsrichting en het verschil in looptijd van de twee  $\gamma$ -fotonen te meten. En daaruit is te berekenen vanaf welke plaats het oorspronkelijke positron werd uitgezonden. De computer kan zo een driedimensionaal beeld van het inwendige van de patiënt weergeven.

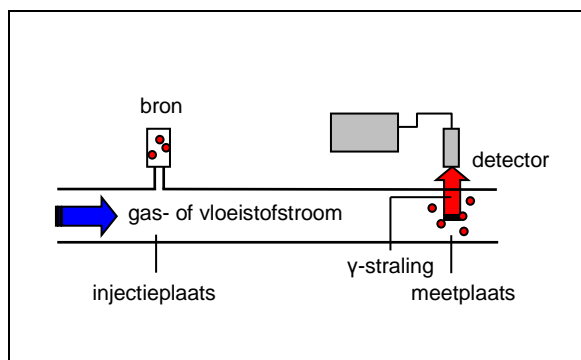
**Biologisch onderzoek** – Tracers zijn onder andere gebruikt bij het onderzoek naar de stofwisseling van een organisme, bijvoorbeeld de synthese van aminozuren en andere essentiële verbindingen in het menselijk lichaam, de doorlaatbaarheid van celmembranen, de replicatie van DNA enzovoort. Ook het proces van de fotosynthese in planten is op deze manier in kaart gebracht met behulp van de koolstofisotoop  $^{14}\text{C}$  als tracer. Onderzoek met behulp van de fosforisotoop  $^{32}\text{P}$  heeft geleid tot inzicht in de manier waarop virussen zich in een cel vermenigvuldigen.

**Verplaatsing van zand, baggerslib en rioolwater** – Een heel andere toepassing is het gebruik van radioactieve isotopen voor onderzoek naar de verplaatsing van zandbanken voor de kust, de verspreiding van baggerslib dat op grote afstand vanuit de kust in zee wordt gestort en de verspreiding van het afvalwater van rioolzuiveringsinstallaties dat in de rivieren wordt geloosd. Bij dit soort onderzoek werd in het verleden het afval gemerkt met de scandiumisotoop  $^{46}\text{Sc}$  en op de gebruikelijke plaats geloosd. De verplaatsing van het afval werd gevolgd door detectoren langs de bodem te slepen. Deze onderzoeksmethode was nogal omstreten. De vraag was of men niet beter niet-radioactieve tracers zou kunnen gebruiken. In plaats van een gevaarlijke hoeveelheid van een radioactieve tracer als  $^{46}\text{Sc}$ , zou men bijvoorbeeld een oplossing van natuurlijk scandium in het stromende afval kunnen brengen. Het natuurlijke scandium bestaat voor 100% uit  $^{45}\text{Sc}$  en komt in het betreffende afval niet voor. Bij toepassing van deze werkwijze wordt de verspreiding van het afval gevonden door na bepaalde tijden op een groot aantal plaatsen monsters te nemen en daarin het scandiumgehalte te bepalen met *neutronen-activeringsanalyse*.

Op de pagina [Neutronen-activeringsanalyse](#) staat deze techniek beschreven, samen met enkele toepassingen. Zie daarvoor ook de pagina's [Straling bij kunsthistorisch onderzoek](#).

**Transport via pijpleidingen** – In de olieindustrie worden pijpleidingen vaak gebruikt om verschillende soorten olie of olieproducten achter elkaar – zonder onderbreking – door dezelfde pijpleiding te transporteren. Bij het beginpunt schakelt men van de ene op de andere vloeistof over, terwijl tegelijkertijd bijvoorbeeld de antimoonisotoop  $^{124}\text{Sb}$  in de leiding wordt geïnjecteerd. De  $\gamma$ -straling van deze isotoop is buiten de pijpleiding te detecteren (zie figuur 8). Bij detectie van het passeren van deze gemarkeerde grens tussen de twee vloeistoffen kan de vloeistofstroom naar een andere afdeling van het bedrijf worden geleid. Op een vergelijkbare manier is ook de transportsnelheid van gas- en vloeistofstromen in pijpleidingen te meten.

Een dergelijk gebruik van tracers beperkt zich niet tot de olieindustrie. Het kan ook gaan om het transport van water en pulp in de papierindustrie, met de natriumisotoop  $^{24}\text{Na}$  of de broomisotoop  $^{82}\text{Br}$  als tracer. Voor het volgen van gasstromen is de kryptonisotoop  $^{85}\text{Kr}$  in gebruik.



Figuur 8 – Door injectie van een  $\gamma$ -straler als tracer is het transport van gas- en vloeistofstromen in pijpleidingen te volgen en te regelen.



Figuur 9 – Stralingsbron op een olieraffinaderij voor het injecteren van de tracer in de pijpleiding.

**Slijtage** – Overal waar onderdelen van een machine zich ten opzichte van elkaar bewegen treedt slijtage op door wrijving. Deze wrijving wordt beperkt door het gebruik van smeermiddelen. Bij het onderzoek naar slijtage van machineonderdelen wordt een deel van het



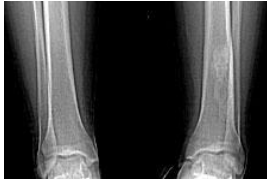
materiaal radioactief gemaakt door beschieting met bijvoorbeeld protonen. Bij slijtage van de onderdelen komt dit radioactief gemerkte materiaal in het gebruikte smeermiddel terecht. Door het meten van de activiteit van het smeermiddel is de mate van slijtage van de onderdelen vast te stellen.

Op een vergelijkbare manier is de slijtage van autobanden te onderzoeken. De banden worden zo gemaakt dat op een bekende afstand onder het loopvlak een laagje rubber met de zwavelisotoop  $^{35}\text{S}$  zit. Als gevolg van slijtage zal de stralingsintensiteit aan het loopvlak toenemen. Na gebruik van de banden tijdens een proefrit levert een meting van die stralingsintensiteit de mate van slijtage.

### Absorptie

De meest bekende toepassing van ioniserende straling is de röntgenfotografie. Hierbij maken we gebruik van het verschil in absorptie van röntgenstraling door verschillende materialen. Deze eigenschap van ioniserende straling heeft echter ook veel industriële toepassingen.

**Röntgenfotografie** – Bij de gebruikelijke vorm van röntgenfotografie ligt de patiënt tussen een röntgenbuis en een fotografische film of een fluorescentiescherm. Het beeld op de film of het scherm ontstaat door verschil in absorptie van de röntgenstraling door de verschillende weefsels in het lichaam, waardoor bijvoorbeeld botbreuken zichtbaar worden (zie figuur 10).

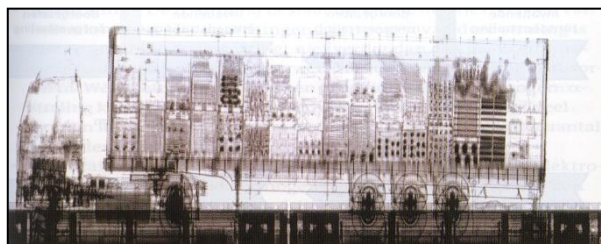


Figuur 10 – Röntgenfoto voor de diagnose van botbreuken.

Op een vergelijkbare manier wordt röntgenstraling gebruikt voor bagagecontrole op vliegvelden, voor controle van de lading van vrachtwagens en containers in havens (zie figuur 11 en 12), voor onderzoek aan mummies en schilderijen enzovoort. Op de pagina [Straling bij kunsthistorisch onderzoek](#) staat van dat laatste een voorbeeld.

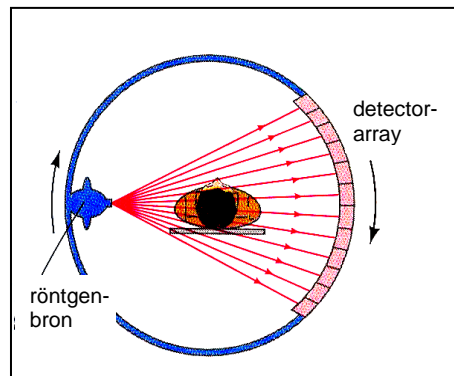


Figuur 11 – Container-scanner in de haven van Rotterdam.

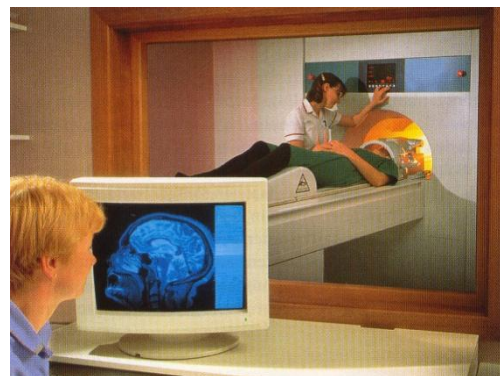


Figuur 12 – Controle van een vrachtwagen op gebruik voor mensensmokkel.

**Computertomografie** – Een röntgenfoto heeft het nadeel dat allerlei verschillende structuren in het lichaam over elkaar heen worden afgebeeld. Bij *computertomografie* (afgekort: CT) gebeurt dat niet. De installatie bestaat uit een draaibaar statief met de bron en de detectoren. Deze draaien om de patiënt heen (zie figuur 13). De detectoren meten bij een groot aantal invalshoeken de stralingsabsorptie door het lichaam. Deze gegevens worden in een computer opgeslagen. De computer berekent daaruit de verdeling van de weefsel dichtheid in elke gewenste doorsnede van het lichaam en geeft die op een beeldscherm weer. Het resultaat is een *CT-scan* of *tomogram* (zie figuur 14).



Figuur 13 – Bij computertomografie draaien de röntgenbron en de detectoren rond het lichaam van de patiënt.



Figuur 14 – Het resultaat van computertomografie is een beeld van elke gewenste dwarsdoorsnede van het lichaam, in dit geval het hoofd van de patiënt.

### Simulatie

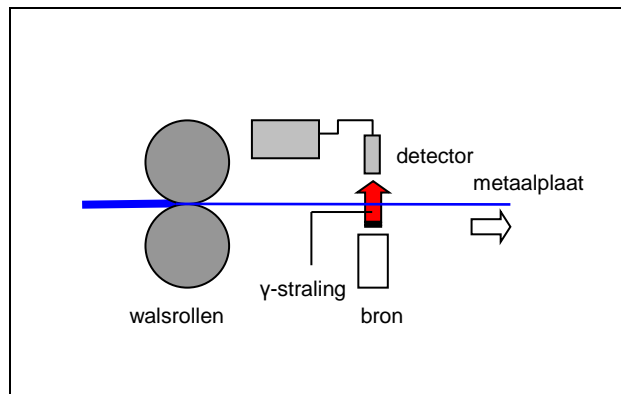
Een simulatie van de werking van computertomografie is te vinden op de volgende website:

<http://www.colorado.edu/physics/2000/index.pl> > Einstein's legacy > CAT scans

**Diktemeting** – Met een  $\beta$ - of  $\gamma$ -bron is de dikte van bijvoorbeeld papier, rubber, kunststof-folie, spaanplaat, aluminiumfolie en staalplaat tijdens het productieproces te meten en te regelen. De door de bron boven het materiaal uitgezonden straling wordt gedeeltelijk geabsorbeerd, afhankelijk van de dikte van het materiaal. Een detector onder het materiaal meet de intensiteit van de doorgelaten straling (zie figuur 16). Uit het meetresultaat is de dikte van het materiaal af te leiden. Op grond van dit meetresultaat is zo nodig het productieproces automatisch bij te stellen door de afstand tussen de walsrollen te veranderen. Voor de diktecontrole van metaalplaat wordt meestal  $\gamma$ -straling gebruikt. Voor papier en kunststoffolie is deze soort straling niet geschikt vanwege de geringe absorptie als gevolg van de kleine dichtheid en dikte van deze materialen. In dat geval is  $\beta$ -straling wel bruikbaar.



Figuur 15 – Diktecontrole met een radioactieve bron.



Figuur 16 – Het principe van diktecontrole bij het walsen van metaalplaat.

Een vergelijkbare toepassing is de controle op de kwaliteit van lasnaden in bijvoorbeeld de scheepsbouw en bij de aanleg van pijpleidingen met röntgen- of  $\gamma$ -straling. In het geval van een pijpleiding zit de bron of de detector op een robotvoertuig dat zich door de leiding kan verplaatsen (zie figuur 17).



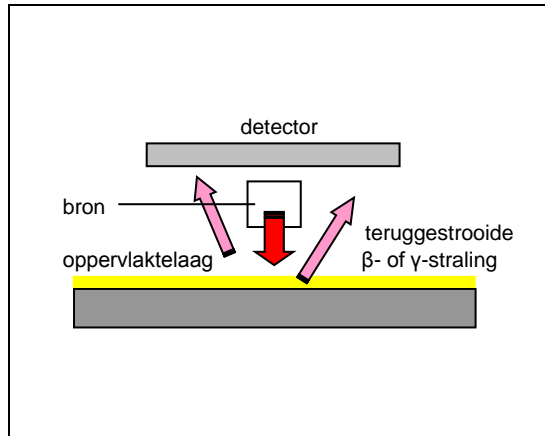
Figuur 17 – De kwaliteit van de lasnaden bij het aanleggen van een pijpleiding is te controleren met een  $\gamma$ -bron. Deze bron zit op een robotvoertuig (dat nu nog op de voorgrond buiten de pijpleiding staat) dat door de pijpleiding kan bewegen. De door de lasnaad doorgelaten  $\gamma$ -straling wordt buiten de pijpleiding gedetecteerd.

**Dichtheidsmeting** – In plaats van de dikte is ook de dichtheid van materialen te meten en te regelen. Een  $\gamma$ -bron en een detector aan weerskanten van een pijpleiding meten de dichtheid van het materiaal dat door de leiding stroomt: hoe groter de dichtheid is, des te kleiner is de intensiteit van de doorgelaten straling. In de aluminiumindustrie gebruikt men deze methode voor het bepalen van de dichtheid van de 'slurry' van bauxiet in water, in de olieindustrie om verschillende kwaliteiten olie van elkaar te kunnen onderscheiden en in andere chemische industrieën om de concentratie van oplossingen in water te kunnen controleren. In een rioolwaterzuiveringsinstallatie is zo de slibconcentratie in het afvalwater te meten.

Een extreem voorbeeld van een dichtheidsmeting is het bepalen van het *vloeistofniveau* in

een tank met ondoorzichtige wanden. De  $\gamma$ -bron en de detector zitten aan weerskanten van de tank. Als de vloeistof tot boven de hoogte van de bron en de detector stijgt, neemt de intensiteit van de doorgelaten straling plotseling af tot vrijwel nul. Dit signaal is bruikbaar om de vloeistofhoogte in de tank constant te houden.

**Laagdiktemeting** – Voor het meten van de dikte van een oppervlaktelaag op een vinyl vloerbedekking is de gangbare methode van diktemeting niet bruikbaar. In dat geval maakt men geen gebruik van de absorptie van ioniserende straling maar van *terugstrooiing*. Met een  $\beta$ - of  $\gamma$ -bron en een detector boven het materiaal is de intensiteit van de teruggestrooide straling te meten (zie figuur 18 en 19). Deze intensiteit hangt af van de dikte van de oppervlaktelaag.

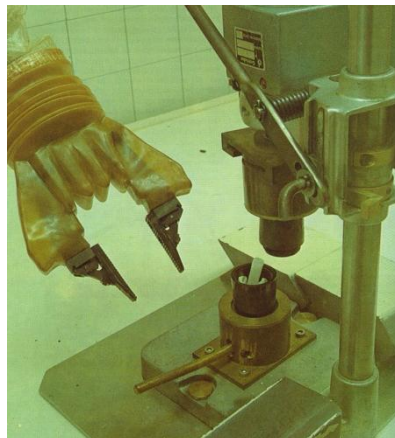


Figuur 18 – Het principe van laagdiktemeting door detectie van teruggestrooide  $\beta$ - of  $\gamma$ -straling.



Figuur 19 – Bij de aanleg van een weg is de dikte van de asfaltlaag te meten met behulp van terugstrooiing van  $\gamma$ -straling.

**Afscherming** – De absorptie van  $\alpha$ -,  $\beta$ - en  $\gamma$ -straling en röntgenstraling door materialen wordt gebruikt voor afscherming van stralingsbronnen, zodat de door stralingswerkers opgelopen dosis zo klein mogelijk blijft – zie de pagina [Effecten van ioniserende straling](#). Bij het manipuleren van radioactieve bronnen wordt dan vaak gewerkt met een afscherming van loodglas, waardoor een stralingswerker toch zicht kan houden op de handelingen die hij of zij met de mechanische armen (of *handling tools*) van achter die afscherming uitvoert (zie figuur 20).



Figuur 20 – Manipuleren van radioactieve bronnen met mechanische armen of handling tools (links) van achter een afscherming van loodglas (rechts).

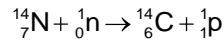
### Halveringstijd

De bekende halveringstijd van het verval van radioactieve isotopen maakt het mogelijk om de ouderdom van organische materialen en gesteenten te bepalen.

**Koolstofdatering** – De ouderdom van een voorwerp gemaakt van organisch materiaal zoals hout, papier of linnen is te bepalen met behulp van het verval van de koolstofisotoop  $^{14}\text{C}$ . Levende planten nemen koolstofdioxide ( $\text{CO}_2$ ) op uit de atmosfeer en gebruiken dit voor de synthese van organische moleculen. De overgrote meerderheid van deze koolstofatomen



bestaat uit  $^{12}\text{C}$ , maar een klein deel daarvan is het radioactieve  $^{14}\text{C}$ . De verhouding tussen de isotopen  $^{14}\text{C}$  en  $^{12}\text{C}$  in de atmosfeer heeft een waarde van  $1,2 \cdot 10^{-12}$ . Deze isotopenverhouding is over een periode van vele duizenden jaren ruwweg constant geweest, ondanks het feit dat  $^{14}\text{C}$  vervalst met een halveringstijd van 5730 jaar. Er wordt namelijk in de atmosfeer voortdurend nieuw  $^{14}\text{C}$  geproduceerd door botsingen van neutronen uit kosmische straling met stikstofkernen:



Deze voortdurende productie van  $^{14}\text{C}$  in de atmosfeer compenseert het verlies van deze isotoop door radioactief verval. Bij het opnemen van koolstofdioxide uit de atmosfeer maakt een plant geen onderscheid tussen de verschillende isotopen. Zo lang de plant leeft zal de isotopenverhouding  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  in het organisme dus even groot zijn als de verhouding van deze koolstofisotopen in de atmosfeer. Hetzelfde geldt dan voor plantenetende dieren, en daardoor ook voor dierenetende dieren. Maar als het organisme doodgaat stopt de inname van koolstofdioxide. Door het radioactief verval van  $^{14}\text{C}$  neemt nu de isotopenverhouding  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  in het organisme af in de loop van de tijd: de waarde van deze verhouding halveert elke 5730 jaar. Meten van de isotopenverhouding  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  levert dan – samen met de bekende verhouding van deze isotopen in de atmosfeer en de bekende halveringstijd van  $^{14}\text{C}$  – de ouderdom van het materiaal.

Bij het gebruik van deze koolstofdateringsmethode moet wel rekening worden gehouden met het feit dat de isotopenverhouding  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  in de atmosfeer in de loop van de eeuwen niet helemaal constant is geweest. Het verloop van deze isotopenverhouding is gereconstrueerd door het vergelijken van de verwachte en de gemeten isotopenverhouding in voorwerpen waarvan de ouderdom bekend is. Dat zijn dan bijvoorbeeld oude bomen waarvan de leeftijd te bepalen is door het tellen van de jaarringen. Zie ook de pagina [Koolstofdatering](#).

Met de koolstofdateringsmethode is bij archeologisch onderzoek de ouderdom van botten en voorwerpen gemaakt van organisch materiaal te bepalen. De methode werkt bij voorwerpen die niet ouder zijn dan ruwweg 60 duizend jaar. In nog oudere voorwerpen is de hoeveelheid  $^{14}\text{C}$  te laag om de activiteit ervan voldoende nauwkeurig te kunnen meten.

**Uraan-looddatering** – Het verval van de uraniumisotoop  $^{238}\text{U}$  tot de stabiele loodisotoop  $^{206}\text{Pb}$  wordt gebruikt voor de datering van gesteenten. De lange halveringstijd van  $4,5 \cdot 10^9$  jaar bij het verval van  $^{238}\text{U}$  maakt het bepalen van de ouderdom van uraniumhoudend gesteente op een geologische tijdschaal mogelijk. Bij het stollen van het gesteente kwam het uranium vast te zitten, en hetzelfde geldt dan ook voor het uiteindelijke vervalproduct  $^{206}\text{Pb}$ . Met behulp van *massaspectroscopie* zijn de huidige gehalten  $^{238}\text{U}$  en  $^{206}\text{Pb}$  in een gesteentemonster te meten. Daaruit is dan het oorspronkelijke gehalte  $^{238}\text{U}$  af te leiden. Het oorspronkelijke en het huidige gehalte  $^{238}\text{U}$  leveren samen met de bekende halveringstijd een schatting van het tijdstip waarop het gesteente is gestold. Op een vergelijkbare manier werkt de thorium-looddatering die gebruik maakt van het verval van de thoriumisotoop  $^{232}\text{Th}$  tot de stabiele loodisotoop  $^{208}\text{Pb}$  met een halveringstijd van  $1,4 \cdot 10^{10}$  jaar.

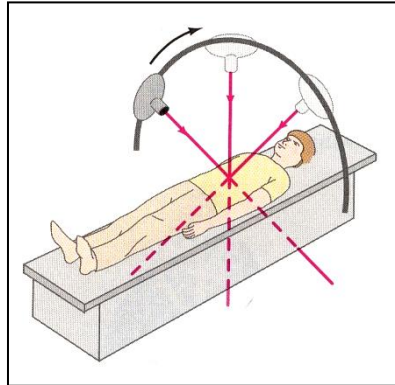
Met deze dateringsmethoden is de ouderdom van de oudste gesteenten op aarde bepaald op ruwweg 4,5 miljard jaar. De ouderdom van gesteenten waarin de oudste gefossiliseerde resten van organismen zijn gevonden wijst op het verschijnen van leven ruwweg 1 miljard jaar later, dus 3,5 miljard jaar geleden. De oudste gefossiliseerde resten van zoogdieren zijn gevonden in gesteenten van zo'n 200 miljoen jaar oud, en het lijkt erop dat de eerste mensachtige wezens zo'n 2 miljoen jaar geleden op aarde verschenen. Op deze manier draagt datering met behulp van radioactieve isotopen bij aan de reconstructie van de geschiedenis van de aarde en de evolutie van de levensvormen op haar oppervlak.

### Ioniserend vermogen

Het ioniserend vermogen van straling heeft vooral medische en industriële toepassingen, uiteenlopend van stralingstherapie tot voedselconservering. In die gevallen wordt het ioniserend vermogen van straling bewust gebruikt om levend weefsel te vernietigen. Maar er zijn ook toepassingen waarin het gaat om niet meer dan het ioniseren van lucht.

**Radiotherapie** – Straling kan kanker veroorzaken. Maar straling is ook bruikbaar om het te behandelen. We noemen dat stralings- of *radiotherapie*. Snel delende tumorcellen zijn extra gevoelig voor ioniserende straling, en kunnen zo worden gedood. Daarvoor is wel een vrij grote dosis nodig, en het is onvermijdelijk dat daarbij ook normale cellen worden gedood. Bestraalde patiënten hebben dan ook last van bijwerkingen die vergelijkbaar zijn met de symptomen van *stralingsziekte* – zie de pagina [Effecten van ioniserende straling](#). Om de vernietiging van normale cellen zoveel mogelijk te beperken wordt gewerkt met een smalle bundel  $\gamma$ - of röntgenstraling. De stralingsbundel wordt op de tumor gericht, en de bron

roteert rond het lichaam van de patiënt. Daardoor blijft de dosis op alle plaatsen van het lichaam zo laag mogelijk, behalve op de plaats van de tumor en zijn directe omgeving (zie figuur 21). Voor deze bestraling wordt  $\gamma$ -straling van de kobaltisotoop  $^{60}\text{Co}$  gebruikt, of röntgenstraling met een foton-energie van 200 keV tot 5 MeV. Daarnaast gebruikt men bij bepaalde vormen van stralingstherapie ook protonen, neutronen, elektronen of pionen afkomstig uit *deeltjesversnellers*.



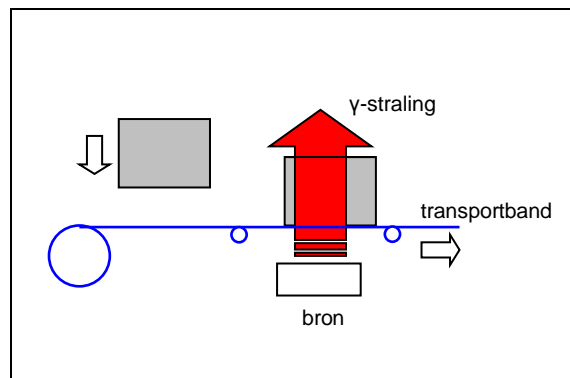
Figuur 21 – Bij stralingstherapie draait de radioactieve bron of de röntgenbron rond het lichaam van de patiënt, zodat de bundel steeds door het gebied van de tumor gaat. De dosis in de tumor is dan maximaal, terwijl de dosis in de rest van het lichaam zo laag mogelijk blijft.

In al deze gevallen is sprake van bestraling van buitenaf: de straling is afkomstig van een bron *buiten* het lichaam. Maar de stralingsbron kan ook *in* het lichaam zitten. Soms wordt een radioactieve bron in de vorm van een kleine capsule in de tumor geplaatst. Zo'n capsule is een *gesloten bron* die de tumor van binnenuit bestraalt. Een enigszins vergelijkbare methode is de behandeling van schildklierkanker met de radioactieve joodisotoop  $^{131}\text{I}$ . De schildklier heeft de eigenschap om jood vanuit het bloed op te nemen. Als  $^{131}\text{I}$  dus in de bloedbaan wordt geïnjecteerd, concentreert het zich in de schildklier. De door het  $^{131}\text{I}$  uitgezonden  $\beta$ -straling vernietigt dan de tumorcellen. In dit geval is sprake van een *open bron*: de radioactieve stof wordt 'los' in het lichaam gebracht. Het voordeel van deze vorm van stralingstherapie is het gebruik van  $\beta$ -straling, met een groter ioniserend vermogen dan dat van  $\gamma$ - of röntgenstraling.

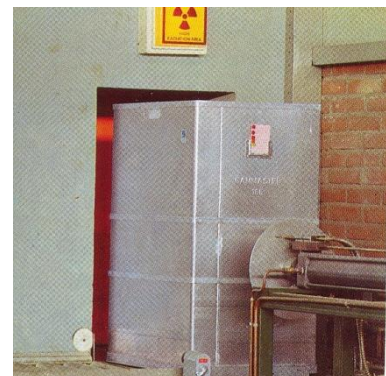
Hoewel ioniserende straling de levensduur van veel patiënten kan verlengen, is de behandeling niet altijd effectief. Als het niet lukt om alle tumorcellen te vernietigen, kan de ziekte terugkomen. En in veel gevallen – met name als de tumorcellen over een groot gebied verspreid zitten – is stralingstherapie moeilijk toe te passen zonder de rest van het organisme te beschadigen.

**Steriliseren** – Voor het steriliseren van verbandmiddelen, chirurgische instrumenten, injectiespuiten enzovoort is  $\gamma$ -straling een mogelijkheid. Een hoge dosis  $\gamma$ -straling doodt de aanwezige bacteriën en virussen. Het voordeel van het gebruik van  $\gamma$ -straling is het doordringend vermogen van deze soort straling, zodat voorwerpen in hun verpakking te steriliseren zijn. Er is dus geen kans op nieuwe besmetting bij het verpakken van al gesteriliseerde instrumenten.

**Voedselconservering** – Het doden van bacteriën, virussen en schimmels met  $\gamma$ -straling is ook in gebruik voor voedselconservering (zie figuur 22 en 23).



Figuur 22 – Het principe van doorstraling voor voedselconservering met  $\gamma$ -straling.



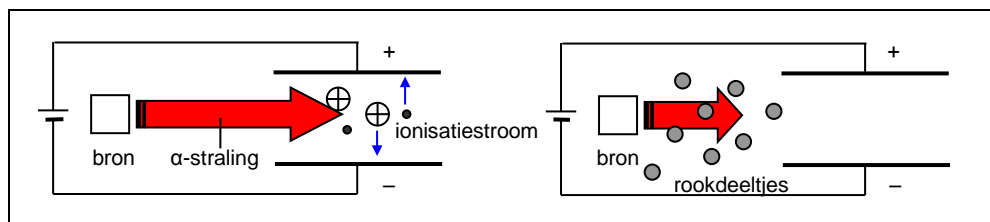
Figuur 23 – De doorstraalde artikelen verlaten de bestralingsruimte.

Bij het bedrijf Gammaster in Ede wordt hiervoor een plaatvormige bron met de kobaltisotoop



$^{60}\text{Co}$  gebruikt. De te steriliseren artikelen bewegen in standaardverpakkingen op een lopende band langs de stralingsbron. Het doorstraalde voedsel is langer houdbaar.

**Rookmelder** – De werking van een rookmelder is gebaseerd op de ionisatie van lucht door radioactief verval (zie figuur 24). Zo'n rookmelder bevat de radioactieve americiumisotoop  $^{241}\text{Am}$ . De uitgezonden  $\alpha$ -straling ioniseert de stikstof- en zuurstofmoleculen in de lucht tussen twee tegengesteld geladen platen. De lucht tussen de platen is daardoor een geleider, zodat er tussen de platen constant een elektrische stroom loopt. Bij rookontwikkeling neemt de dracht van de  $\alpha$ -deeltjes af door de grotere dichtheid van de rookdeeltjes. De ionisatie van de lucht tussen de platen neemt dus af, waardoor ook de stroomsterkte afneemt. De elektronica in de rookmelder detecteert deze stroomsterktedaling en laat het alarm afgaan. De dosis die je oploopt door zo'n rookmelder is vele malen kleiner dan die van de natuurlijke achtergrondstraling. Bij normaal gebruik is het apparaat dus ongevaarlijk. Maar na verloop van tijd is natuurlijk wel sprake van radioactief afval dat zorgvuldig moet worden verwerkt en opgeslagen. Een alternatief is een rookmelder met een bron van en een detector voor infraroodstraling. Bij aanwezigheid van rookdeeltjes neemt de absorptie van infraroodstraling sterk toe.



Figuur 24 – Het principe van een rookmelder met een  $\alpha$ -bron. De  $\alpha$ -deeltjes ioniseren de lucht tussen twee geladen platen, waardoor er een ionisatiestroom loopt (links). Bij aanwezigheid van rookdeeltjes is de dracht van de  $\alpha$ -deeltjes kleiner, waardoor de ionisatie van de lucht tussen de platen en daarmee de ionisatiestroom stopt (rechts).

**Anti-statica** – Bij de productie van kunststoffolie worden radioactieve anti-statica gebruikt om hinderlijke elektrostatische ladingen op het folie te verwijderen. De  $\alpha$ -deeltjes uit een bron vlak boven het folie ioniseren de stikstof- en zuurstofmoleculen in de lucht. Via deze geleidende lucht kan de lading op het folie wegstromen.