



Universiteit Utrecht

Informatieboekje experimenten
met radioactieve bronnen en
röntgenstraling



Ioniserende Stralen Practicum

Informatieboekje experimenten met
radioactieve bronnen en röntgenstraling

Ioniserende Stralen Practicum | ISP

Experimenten met radioactieve bronnen en röntgenstraling

© 2020 – Freudenthal Instituut (FI), www.freudenthalinstituut.nl

Faculteit Bètawetenschappen, Universiteit Utrecht

A Princetonplein 5, 3584 CC Utrecht

T 030 253 1178

E science.isp@uu.nl

W www.stralenpracticum.nl

Inleiding

Een regenboog zien we met onze ogen, en geluid horen we met onze oren. Maar voor het waarnemen van radioactiviteit of röntgenstraling hebben we geen zintuig. Zo merken we niet dat ons hele lichaam voortdurend aan ioniserende straling wordt blootgesteld.

Vanuit het heelal en vanuit de aardbodem ontvangen we straling. Ook ons eigen lichaam is radioactief. Deze altijd aanwezige straling noemen we *achtergrondstraling*. De dosis die we door deze achtergrondstraling oplopen wisselt nogal met de plaats op aarde. In Nederland gaat het om een gemiddelde equivalente dosis van zo'n 1,8 mSv/jaar.

In de natuurkundelessen heb je al het een en ander geleerd over de eigenschappen en wetmatigheden van radioactiviteit en röntgenstraling. Met het uitvoeren van enkele experimenten van het *Ioniserende Stralen Practicum* kun je die kennis verder uitbreiden. De gebruikte stralingsbronnen zijn zeer zwak en goed afgeschermd. Daardoor is de extra dosis van 0,2 μ Sv/uur die je bij dit practicum oploopt kleiner dan de variaties in de achtergrondstraling.

Het practicum bestaat uit ruim twintig verschillende experimenten. Bij het uitvoeren van deze experimenten zal je soms wat meer informatie nodig hebben. Voor specifieke informatie over het experiment kun je de QR code op het werkblad scannen met je telefoon*. Voor algemene informatie, zoals enkellogaritmisch papier, stralingsrisico, of stralingsbelasting, kun je dit boekje raadplegen. Ook zijn er een isotopenkaart en een begrippenlijst aanwezig.

Tijdens het practicum ligt bij elk experiment een werkblad met vragen en opdrachten over het verzamelen en verwerken van de meetgegevens. Als er iets niet duidelijk is in deze vragen en opdrachten, vraag dan hulp aan de practicumleider.

In het algemeen mag je in laboratoria tijdens een practicum niet eten of drinken. Dat geldt dus ook voor het *Ioniserende Stralen Practicum*. De meeste apparatuur waarmee je tijdens het practicum werkt zal onbekend voor je zijn. Daarom hebben we de knoppen waarmee je mag werken *geel* gemerkt. Als je de andere knoppen met rust laat, zijn de experimenten zonder problemen uit te voeren. Succes!

Utrecht, september 2020

De practicumleiders:

Jan Beks, Laura van Leeuwen, Rob van Rijn

Op de ISP-website staat aanvullende informatie over de eigenschappen en effecten van ioniserende straling en over praktijktoepassingen zoals koolstofdatering, neutronen-activeringsanalyse, kunsthistorisch onderzoek, medische beeldvorming, productie van medische isotopen en materiaalonderzoek met röntgendiffractie:

www.stralenpracticum.nl > voorbereiden > achtergrondinformatie

Experimenten met radioactieve bronnen en röntgenstraling

Inhoud

Enkellogaritmisch grafiekpapier	6
Isotopenkaart	8
Stralingsrisico	10
Stralingsbelasting	11
Begrippenlijst	12
Up ² en Quantumlab	16

De onderdelen 'isotopenkaart' en 'enkellogaritmisch grafiekpapier' heb je nodig bij sommige opdrachten op de werkbladen bij de experimenten. De 'begrippenlijst' is handig om snel te betekenis van onbekende woorden op te zoeken.

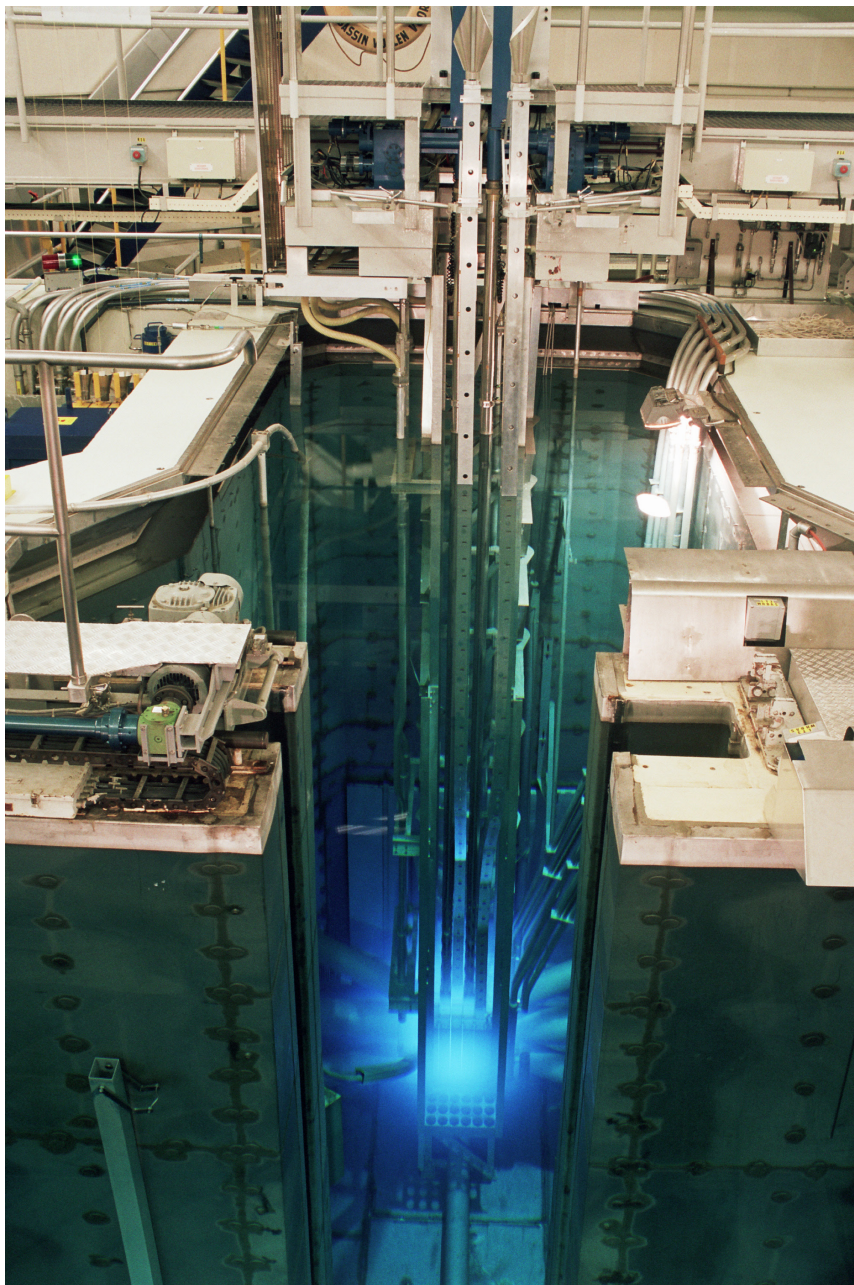
Beschikbaarheid

De drie mobiele practica zijn uitgerust met de experimenten 1 t/m 21. De experimenten 1 en 19 zijn niet beschikbaar in Utrecht.

Indeling

De experimenten zijn ingedeeld in de volgende drie groepen, te onderscheiden met een kleur:

Rood	Halveringstijd	2A – 2B – 10 – 20 – 21
Blauw	Absorptie	1 – 5 – 11 – 12 – 13 – 18 – 19 – 22
Groen	Diversen	3 – 4 – 6 – 7 – 8 – 9 – 14 – 15 – 16 – 17 – 23

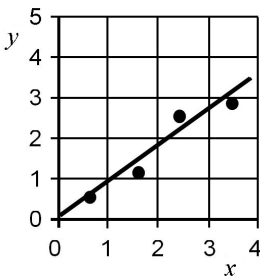


De kernreactor in het Reactor Instituut Delft. De baluwe gloed wordt veroorzaakt door het Tsjerenkof-effect. Bron: TU Delft

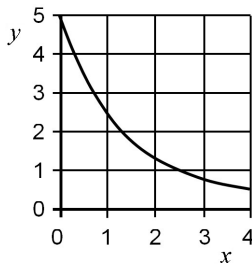
Enkellogaritmisch grafiekpapier

Lineair verband

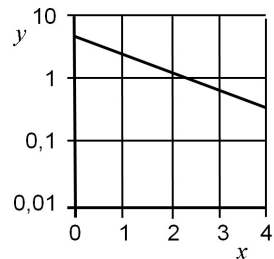
Om het verband tussen twee variabele grootheden te bepalen, zet je de meetresultaten uit in een diagram en teken je een vloeiende lijn die zo goed mogelijk bij de meetpunten aansluit. Dat laatste lukt het best als die lijn een rechte lijn is, zoals in figuur 1. In dit geval zijn de grootheden x en y recht evenredig: $y = a \cdot x$. Je kunt de grafiek nu gebruiken om te *interpoleren* en om de waarde van de evenredigheidsconstante a in de formule $y = a \cdot x$ zo nauwkeurig mogelijk te bepalen.



Figuur 1 – De functie $y = a \cdot x$



Figuur 2 – De functie $y = 5 \cdot a^x$ met $a = 0,5$



Figuur 3 – De functie $y = 5 \cdot a^x$ op enkellogaritmisch papier

Exponentieel verband

Als het verband tussen de grootheden x en y de vorm $y = ax$ heeft (zoals in figuur 2), dan is het tekenen van een vloeiende lijn die zo goed mogelijk bij de meetpunten aansluit wat lastiger. Bij radioactiviteit komt een dergelijk *exponentieel verband* tussen de grootheden x en y voor bij radioactief verval en bij absorptie van straling door materialen.

Radioactief verval – Het exponentiële verband $y = a^x$ is herkenbaar in de formule voor de activiteit A_t van een radioactieve bron als functie van de tijd t :

$$A_t = A_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{t/t_{1/2}}$$

In deze formule is de activiteit A_t te vergelijken met de grootheid y en is de tijd t te vergelijken met de grootheid x . Voor het getal a geldt in dit geval: $a = 0,5$.

Absorptie van straling – Een vergelijkbaar exponentieel verband geldt voor de intensiteit I_d van de doorgelaten γ -straling als functie van de materiaaldikte d :

$$I_d = I_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{d/d_{1/2}}$$

In deze formule is de intensiteit I_d te vergelijken met de grootheid y en is de dikte d te vergelijken met de grootheid x . En ook hier geldt: $a = 0,5$.

In beide gevallen krijg je een grafiek in de vorm van een rechte lijn door het gebruik van *enkellogaritmisch* grafiekpapier.

Enkellogaritmisch grafiekpapier

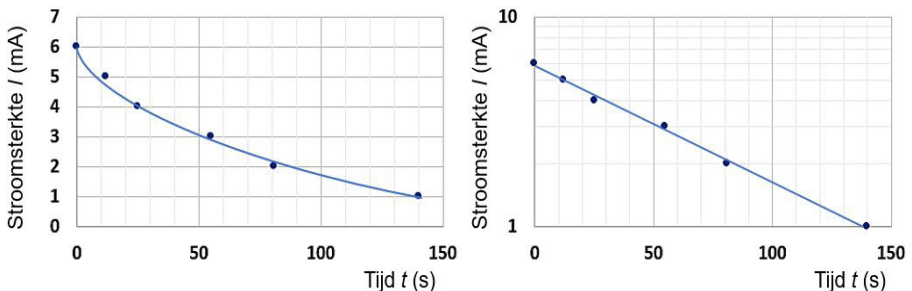
Als het verband tussen de grootheden x en y de vorm $y = a^x$ heeft (zie figuur 2), dan geldt volgens de logaritme-theorie in de wiskunde: $\log y = \log(ax) = x \cdot (\log a)$. Hierin is $(\log a)$ een getal: $(\log a) = \log(1/2) = -0,30$ als het gaat om radioactief verval of om absorptie van straling. Je kunt dus ook zeggen dat het verband tussen $\log y$ en x recht evenredig is: $\log y = -0,30 \cdot x$. Dat betekent: als we in een diagram langs de verticale as $\log y$ uitzetten (in plaats van y) en langs de horizontale as x , krijgen we een rechte lijn als grafiek.

Voor het maken van zo'n grafiek gebruik je *enkellogaritmisch* grafiekpapier: grafiekpapier met een logaritmische y -as. De grafiek van figuur 2 komt er dan uit te zien zoals in figuur 3: een (zo goed mogelijk bij de meetpunten aansluitende) dalende rechte lijn. Uit zo'n grafiek kun je door interpoleren vrij nauwkeurig de halveringstijd $t_{1/2}$ of de halveringsdikte $d_{1/2}$ bepalen.

In figuur 5 zie je een voorbeeld, waarbij de meetresultaten uit de tabel van figuur 4 zijn uitgezet op normaal en enkellogaritmisch grafiekpapier. De meetresultaten van figuur 4 geven het radioactief verval van radon-220 weer (zie experiment 2A). De halveringstijd van dit nuclide is uit de rechtergrafiek nauwkeuriger te bepalen dan uit de linkergrafiek.

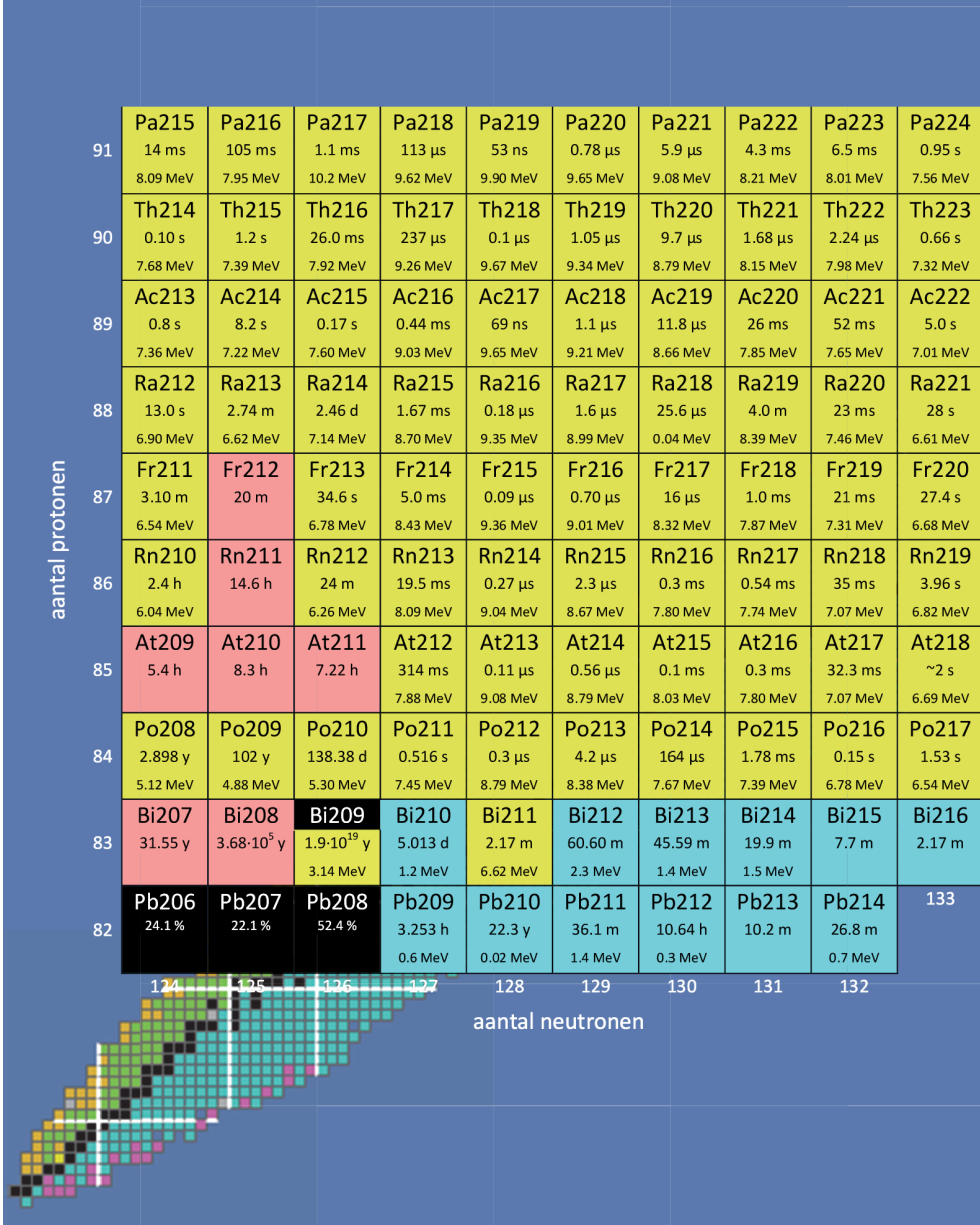
stroomsterkte I (mA)	6	5	4	3	2	1
meetijd t (s)	0	12	25	55	81	140

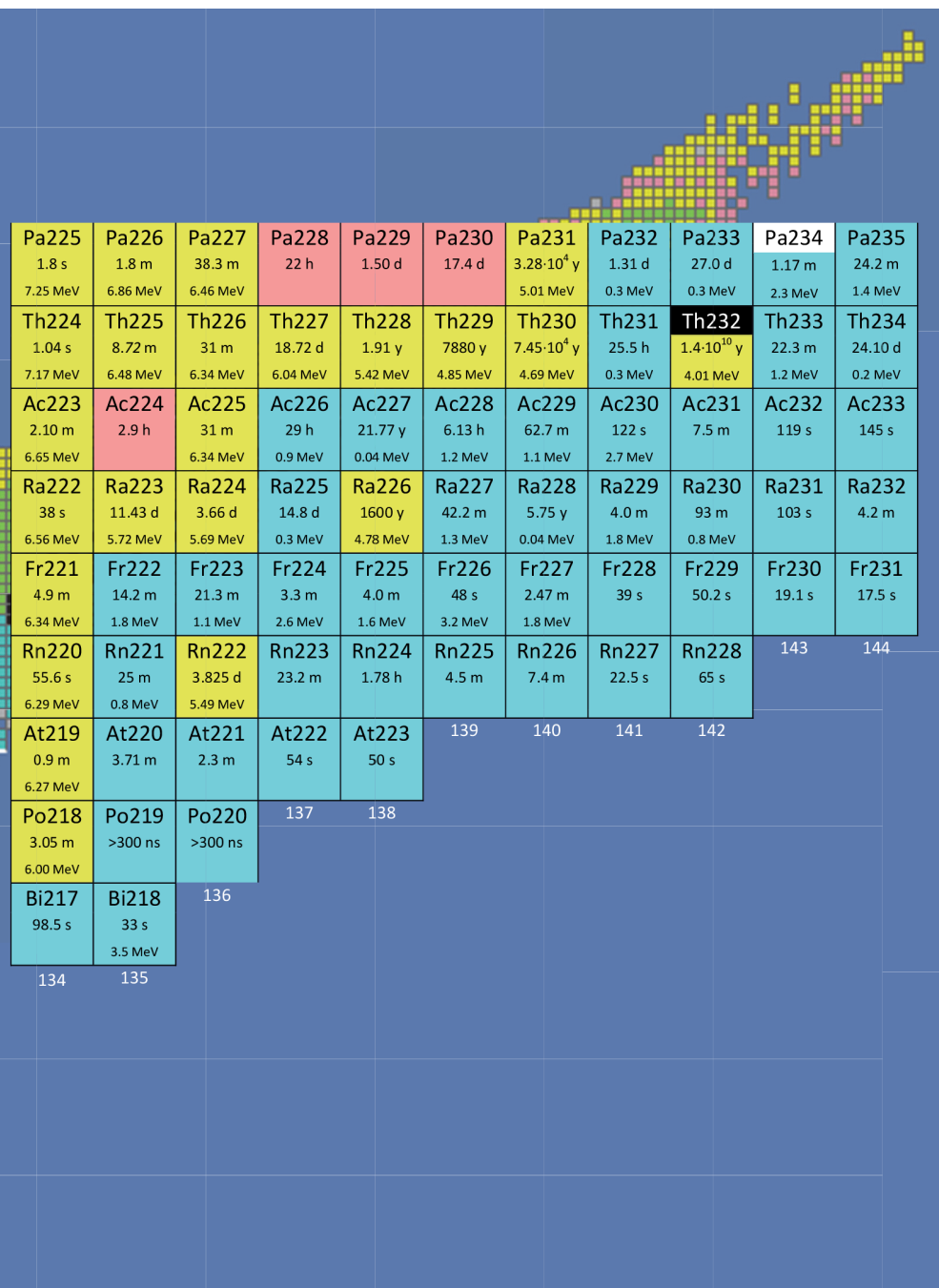
Figuur 1. De meetresultaten bij experiment 2A over het radioactief verval van radon-220.



Figuur 2. De meetresultaten uit de tabel van figuur 4, uitgezet op normaal (links) en enkellogaritmisch (rechts) grafiekpapier.

Isotopenkaart





Stralingsrisico

De mens staat voortdurend bloot aan ioniserende straling uit natuurlijke bronnen. Dit veroorzaakt een gemiddelde equivalente dosis van zo'n 1,67 mSv per jaar. Maar deze dosis varieert in Nederland met een factor drie, afhankelijk van de woon- en werkomgeving. Daar komt dan nog een gemiddelde equivalente dosis van 1,24 mSv per jaar bij door het gebruik van kunstmatige bronnen bij medische diagnostiek.

Een stralingsdosis kan schade aan het lichaam veroorzaken, zoals het op termijn optreden van leukemie en de vorming van tumoren. Daarom moet de extra stralingsbelasting door kunstmatige bronnen zo laag mogelijk blijven, onder andere door het afwegen van de voor- en nadelen van het gebruik van straling. Zo zal men bij een beenbreuk toch een röntgenfoto maken om te zien of de botdelen weer goed tegen elkaar aan zijn gezet. Het voordeel van een goed genezen beenbreuk weegt op tegen het nadeel van de extra opgelopen dosis.

Uit onderzoek is bekend dat een toename van de equivalente dosis een toename van de schade aan het lichaam tot gevolg heeft. In de tabel hieronder staan enkele risicogedaten: het aantal sterfgevallen per jaar per miljoen mensen door verschillende soorten kanker bij een extra opgelopen equivalente dosis van 10 mSv.

Weefsel/orgaan	Aantal per jaar per miljoen mensen	Risicotijd (jaar)
Beenmerg	1,0	20
Longen	0,5	40
Bot	0,1	40
Borst (vrouwen)	1,6	40
Schildklier	0,1	40
Totaal (man)	2,5	40
Totaal (vrouw)	3,5	40

Met de getallen in de tabel is te berekenen dat een toename van het 'natuurlijke' stralingsniveau van zo'n 2 naar 4 mSv per jaar in Nederland (met 17,5 miljoen inwoners) zal leiden tot het overlijden van 1,5 personen per jaar aan longkanker. Dit aantal is klein vergeleken met de vele duizenden die jaarlijks aan kanker overlijden.

Naast deze effecten op lange termijn kan er ook sprake zijn van genetische effecten. Zo neemt men aan dat iedere mSv die de bevolking oploopt leidt tot de geboorte van twee kinderen met genetische afwijkingen per miljoen levend geboren. Ook dit aantal is klein vergeleken met de 60 à 90 duizend per miljoen geboren met genetische afwijkingen als gevolg van andere oorzaken.

Zeerge hoge stralingsdoses zoals bij kernongevallen of kernbomexplosies tasten het natuurlijk afweermecanisme van de slachtoffers aan. Ze overlijden aan infectieziekten. De equivalente dosis waarbij 50% van de slachtoffers overlijdt is naar schatting 3,5 à 4 Sv. Bij een dosis van meer dan 10 respectievelijk 50 Sv ontstaat onherstelbare schade aan het darmstelsel en het centraal zenuwstelsel, met overlijden binnen enkele dagen of uren. Dergelijke hoge doses komen voor bij een kernbomexplosie. Maar in dat geval overlijden de slachtoffers meestal direct aan de gevolgen van de hoge temperatuur en de schokgolf.

Stralingsbelasting

Je leeft in een omgeving waarin je blootgesteld wordt aan ioniserende straling. Door het invullen van de tabel hieronder krijg je een indruk van de equivalente dosis (in mSv/jaar) die je daarbij oploopt. Bedenk daarbij wel dat het gaat om niet meer dan een indruk, want met name de stralingsbelasting door radon in de lucht (afkomstig uit de bodem en uit bouwmaterialen) is sterk afhankelijk van je woon- en werkomgeving.

Bijdrage uit	Stralingsbronnen	Waarde	Eenheid
Leefomgeving	Kosmische straling (op zeeniveau)	0,22	mSv/jaar
	Bodem	0,04	mSv/jaar
	Water en voedsel	0,15	mSv/jaar
	Lucht	0,66	mSv/jaar
	Bouwmaterialen	0,35	mSv/jaar
Vrije tijd	Vliegreis (10 km hoogte)	5	μSv/uur
	Wintersportvakantie (2 km hoogte)	30	μSv/week
Medisch	Röntgenfoto borstholte	90	μSv
	Röntgenfoto gebit	0,01	mSv
	Röntgenfoto borsten (mammografie)	0,84	mSv
	Röntgenfoto hoofd-nekgebied	0,2	mSv
	Röntgenfoto heup	0,8	mSv
	Röntgenfoto beenbreuk	1	mSv
	CT-scan hoofd	1,3	mSv
	CT-scan abdomein (gehele buik)	11,2	mSv
	Scintigram schildklier met ¹³¹ I	4,3	mSv
	Scintigram skelet met ^{99m} T	6	mSv
	Petscan	4,8	mSv
Onderwijs	Ioniserende Stralen Practicum:	0,2	μSv/uur
	Totale equivalente dosis in mSv/jaar		mSv/jaar

Op de ISP-website staat aanvullende informatie over stralingsbronnen, over de bijdrage die ze leveren aan de stralingsbelasting en over de effecten van ioniserende straling: www.stralenpracticum.nl > voorbereiden > achtergrondinformatie > effecten van ioniserende straling (pdf)

Begrippenlijst

Absorber	Materiaal dat straling absorbeert
Absorptie	Verschijsel waarbij straling door materie verzwakt wordt
Achtergrondstraling	Straling afkomstig van radioactieve stoffen uit de natuur, zowel van binnen als buiten het menselijk lichaam – ook wel natuurlijke radioactiviteit genoemd
Activiteit (A)	Aantal desintegraties per seconde in een radioactieve bron, uitgedrukt in de eenheid becquerel (Bq)
Alfa-deeltje (α)	Positief geladen heliumkern, bestaande uit twee protonen en twee neutronen
Alfa-straling (α)	Bundel α -deeltjes
Annihilatie	Proces waarbij een positron en een elektron worden omgezet in twee fotonen
Atoomnummer (Z)	Aantal protonen in een atoomkern
Becquerel (Bq)	Sleenheid van activiteit: 1 Bq = 1 desintegratie per seconde
Bèta⁻-deeltje (β^-)	Negatief geladen deeltje met een massa van 1/1837 van een protonmassa. Het is als deeltje gelijk aan een elektron
Bèta⁺-deeltje (β^+)	Positief geladen deeltje met een massa van 1/1837 van een protonmassa. Het is als deeltje gelijk aan een positron
Bètastraling (β)	Bundel β -deeltjes of β^+ -deeltjes
Bragg-reflectie	Interferentie van röntgenstraling aan de roostervlakken van een kristal
Collimator	Diafragma voor een bundel deeltjes of straling
Comptoneffect	Elastische wisselwerking tussen een γ -foton en een elektron: het γ -foton draagt een deel van zijn energie over aan het elektron – één van de manieren waarop γ -straling zijn energie in materie verliest
Curie (Ci)	Oude eenheid van activiteit: 1 Ci = $3,7 \cdot 10^{10}$ Bq. Bij benadering is dit de activiteit van 1 g radium
Detector	Materiaal of instrument dat gevoelig is voor straling
Dosis (D)	Geabsorbeerde stralingsenergie per kg materie, uitgedrukt in de eenheid gray (Gy)
Dosismeter	Instrument dat de ontvangen dosis registreert
Dosistempo	Dosis per tijdseenheid

Dracht (R)	Maximale afstand die een deeltje in materie aflegt
Elektromagnetische straling	Gecombineerde verandering van een elektrisch veld en een magnetisch veld, die zich voortplant met de lichtsnelheid – bijvoorbeeld radiogolven, licht, röntgen- en γ -straling
Elementair deeltje	Materiedeeltje zoals het neutron, proton, elektron, neutrino en muon
Equivalente dosis (H)	Dosis vermenigvuldigd met een weegfactor afhankelijk van de soort straling (weegfactor 1 voor β -, γ - en röntgenstraling, weegfactor 20 voor α -straling), uitgedrukt in de eenheid sievert (Sv)
Exposie	Gevormde lading per kg lucht bij ionisatie door röntgenstraling, uitgedrukt in de eenheid röntgen (R)
Exposietempo	Exposie per tijdseenheid
Extrapoleren	Een lijn in een grafiek in gedachten verlengen
Filmbadge	Dosimeter met een fotografische film. De ontvangen dosis wordt bepaald uit de zwarting van de film
Fluorescentie	Vermogen van bepaalde stoffen om geabsorbeerde energie (van bijvoorbeeld röntgenstraling) om te zetten in licht
Gamma-foton (γ)	Energiepakketje $E_f = h \cdot f$ in hoogenenergetische elektromagnetische straling
Gammastraling (γ)	Bundel γ -fotonen
GeigerMüller telbuis	Detector voor ioniserende straling (vooral gevoelig voor α - en β -deeltjes): door ionisatie van het gas in de buis ontstaat een elektrische ontlading, die als elektrische puls te meten is
Gray (Gy)	SI-eenheid van dosis: $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$
Halveringsdikte ($d_{1/2}$)	Dikte van een materiaal waarbij de helft van de invallende γ -straling wordt geabsorbeerd
Halveringstijd ($t_{1/2}$)	Tijdsduur waarin de helft van een hoeveelheid radioactieve stof vervalst
Ionisatie	Proces waarbij ionen worden gevormd
Ionisatiekamer	Detector voor ioniserende straling: door ionisatie wordt het gas in de kamer geleidend, wat te meten is in de vorm van een elektrische stroom
Ioniserende straling	Straling die atomen of moleculen ioniseert, zoals röntgenstraling en α -, β - en γ -straling
Isomeren	Nucliden met hetzelfde aantal protonen en neutronen, maar met een verschillende energietoestand van de kern (grondtoestand en aangeslagen toestanden van de kern)

Isotopen	Nucliden met hetzelfde aantal protonen, maar met een verschillend aantal neutronen (het atoomnummer is hetzelfde, het massanummer verschilt)
Kosmische straling	Hoogenergetische straling uit het heelal
Kwadratenwet	Afname van de stralingsintensiteit I met het kwadraat van de afstand r tot de (punt)bron: $I \sim 1/r^2$.
Massagetal (A)	Aantal protonen en neutronen in een atoomkern
Metastabiel	Aangeslagen toestand van een atoom. Het atoom heeft een hogere energie dan in zijn grondtoestand.
Multichannel analyser (MCA)	Elektronische schakeling die de spanningspulsen van een scintillatiedetector telt en op pulshoogte sorteert
Neutrino	Ongeladen elementair deeltje met een verwaarloosbaar kleine massa – zeer moeilijk waar te nemen vanwege de zeer geringe wisselwerking met materie
Nuclide	Algemene term voor atoomkernen
Paarvorming	Omzetting van energie (bijvoorbeeld een γ -foton) in materie onder invloed van een elektrisch of magnetisch veld, zodat een deeltje met zijn anti-deeltje ontstaat (bijvoorbeeld een elektron en een positron)
Positron	Zie β^+ -deeltje
Puls	Kortdurend elektrisch signaal
Pulsenteller	Instrument dat elektrische pulsen van bijvoorbeeld een GM-telbuis telt
Rad	Oude eenheid van dosis: $1 \text{ rad} = 0,01 \text{ J/kg}$
Radioactief verval	Spontane transformatie van een instabiele kern in een andere kern of in een andere energietoestand
Radioactieve bron	Hoeveelheid radioactief materiaal, meestal in een gesloten omhulsel
Radioactiviteit	Vermogen van bepaalde kernen om spontaan een α - of β -deeltje of een γ -foton uit te zenden
Rem	Oude eenheid van equivalente dosis (röntgen equivalent man)
Remstraling	Röntgenstraling die ontstaat als versnelde elektronen worden afgeremd door het elektrisch veld van een atoomkern
Röntgen (R)	Eenheid van exposie: $1 \text{ R} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ C/kg}$
Röntgenstraling	Elektromagnetische straling met een golflengte van rond de $0,1 \text{ nm}$. Deze straling ontstaat als remstraling of wanneer een 'gat' in een binnenschil van een atoom door een elektron uit een hogere schil wordt opgevuld

Scintillatiedetector	Detector voor ioniserende straling (vooral gevoelig voor γ -straling): door fotonen veroorzaakte lichtflitsjes (scintillaties) in een scintillatiekristal worden omgezet in spanningspulsen
Sievert (Sv)	SI-eenheid van equivalente dosis: $1 \text{ Gy} = 1 \text{ Sv}$ voor β -, γ - en röntgenstraling, $1 \text{ Gy} = 20 \text{ Sv}$ voor α -straling
Spectrometrie	Analyseren van straling naar bijvoorbeeld golflengte, energie of frequentie
Terugstrooiing	Wisselwerking van deeltjes met materie, waarbij de bewegingsrichting van de deeltjes min of meer omkeert (reflectie)
Tracer (spoorzoeker)	Radioactieve isotoop die gebruikt wordt om chemische of biologische processen in bijvoorbeeld het menselijk lichaam te volgen.
Verstrooiing	Wisselwerking van deeltjes met materie, waarbij de bewegingsrichting van de deeltjes willekeurig verandert
Vervalreeks	Opeenvolgend verval van een radioactief nuclide (de moedernuclide), waarbij steeds nieuwe radioactieve nucliden (de dochternucliden) ontstaan
Weegfactor	Een maat voor de schadelijkheid van de soort ioniserende straling in het menselijk lichaam.

Up² en Quantumlab

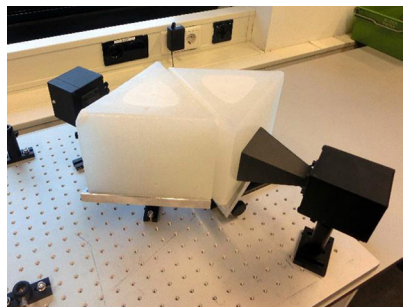
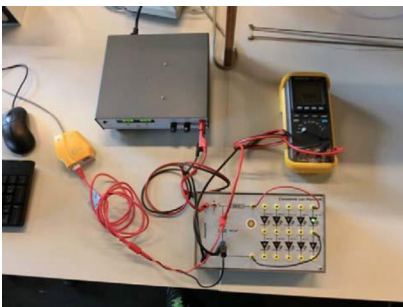
Als gebruiker van het Ioniserende Stralen Practicum bent u mogelijk ook geïnteresseerd in twee andere collecties proeven die de Universiteit Utrecht aanbiedt: Up², Utrechtse Proeven Parade, waarvan het Quantumlab een onderdeel is. Wat structuur betreft zijn ze gelijkwaardig aan het ISP, hoewel van Up² en het Quantumlab geen mobiele varianten bestaan. Alle experimenten uit deze collecties zijn bij goede voorbereiding van de beschikbare handleiding in max. twee uur uit te voeren. Als school is het dus mogelijk om op een dag met twee klassen langs te komen of een bezoek aan het ISP te combineren met Up². Ook kunnen de experimenten worden gebruikt voor profielwerkstukken. Aan het gebruik van Up² zijn overigens geen kosten verbonden.

Up²

Up² bestaat uit een breed aanbod van circa 15 experimenten voor 5 en 6 VWO en 5 HAVO leerlingen die aansluiten bij het eindexamenprogramma. Daarnaast bieden sommige experimenten verbreding op deze stof en geven ze een beeld van de studierichtingen waarin de natuurkunde een rol speelt. Zo is er onder andere een windtunnel, een bepaling van licht- en een geluidssnelheid experiment, een model van de bloedsomloop, en zonnecellen. Up² is gericht op complete klassen die met hun docent naar de Universiteit Utrecht komen en daar met wat ingewikkeldere en uitgebreidere experimenten kennis kunnen maken. Daarnaast is er gelegenheid voor leerlingen om van de experimenten gebruik te maken voor hun profielwerkstuk. De begeleiding ligt in dat geval bij de docent op school. Kijk voor meer informatie op de (voorlopige) website: www.fi.uu.nl/bbp/

Quantumlab

Als onderdeel van Up² zijn we bezig met het opzetten van een Quantumlab met experimenten die aansluiten bij de nieuwe examenstof over quantumfysica. Voor dit doeleinde kunnen de reeds bestaande experimenten uit Up² over elektronendiffractie en over de lading/massaverhouding van het elektron worden ingezet. Onlangs ontwikkeld voor het Quantumlab zijn de experimenten: het Bepalen van de Constante van Planck en Tunnelen met 3cm Golven.



Links: Opstelling Bepalen van de Constante van Planck. Rechts: (deel) Opstelling Tunnelen met 3 cm Golven.

Interesse?

Heeft u interesse in het aanbod van Up² of verdere vragen, neem dan contact op met science.outreach.phys@uu.nl.

Ioniserende Stralen Practicum | ISP

Experimenteren met radioactieve bronnen en röntgenstraling

© 2021 - Freudenthal Instituut (FI)

www.freudenthalinstituut.nl

Faculteit Bètawetenschappen, Universiteit Utrecht

