Universiteit Utrecht

Informatieboekje experimenten met radioactieve bronnen en röntgenstraling

Ioniserende Stralen Practicum

Dit boekje is de proefdruk van een herziene versie. Hoewel deze met zorg is opgesteld, kan het zijn dat er nog fouten in staan of informatie ontbreekt. Mocht je een fout vinden of informatie missen, geef dit dan aan bij de practicumleider. Het is ook mogelijk wijzigingsvoorstellen te sturen naar: science.isp@uu.nl

Ioniserende Stralen Practicum | ISP
Experimenten met radioactieve bronnen en röntgenstraling
© 2025 – 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

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

Inleiding

Stel je voor: je staat buiten, genietend van de zon, en in de verte zie je een fikse regenbui. Een prachtige regenboog siert de lucht en je ogen vangen elk kleurdetail op, terwijl je oren het zachte geruis van de wind horen. Maar wat als er nog een wereld om je heen was, vol energie, die je niet kon zien of horen?

Ioniserende straling is zo'n onzichtbare kracht. Hoewel onze zintuigen ons in de steek laten, zijn we constant omringd door natuurlijke achtergrondstraling afkomstig van de aarde en het heelal.

Deze achtergrondstraling is niet de enige bron van ioniserende straling. Bekende andere toepassingen waarbij ioniserende straling wordt gebruikt zijn: medische therapieën in ziekenhuizen en dierenklinieken, röntgenfoto's, maar ook kerncentrales.

Door middel van experimenten willen we je de kennis die je al hebt over radioactiviteit en röntgenstraling tastbaar maken en er voor zorgen dat je de bekende concepten over straling kunt toepassen en daardoor nog beter begrijpen. Hiervoor kies je een aantal van de ruim 20 experimenten.

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. De kernbegrippen die van belang zijn bij een experiment, staan op het werkblad van dat experiment benoemd en zijn terug te vinden in dit boekje.

Omdat we het belangrijk vinden dat jij je bewust bent van de risico’s die ioniserende straling met zich meebrengt, beginnen we dit boekje met een kort stukje over stralingsrisico’s en stralingsbelasting.

In het algemeen mag je in laboratoria tijdens een practicum niet eten of drinken. Dat geldt dus ook voor het *Ioniserende Stralen Practicum*.

De practicumleiders:
Jeroen de Meij, Dagmar Jongenelen, Laura van Leeuwen, Rob van Rijn

Inhoudsopgave

Experimenten met radioactieve bronnen en röntgenstraling 6
Stralingsrisico 8
Stralingsbelasting..... 9
Achtergrondstraling..... 10
Alfastraling..... 11
Bètastraling..... 12
Brachytherapie..... 13
Bragg-reflectie 14
Dosis 16
Dracht..... 17
Elasticiteitsmodulus..... 18
Energie 19
Exposie 21
Fluorescentie 22
Gammastraling..... 23
Geiger-Müller telbuis..... 24
Halveringsdikte 25
Halveringstijd..... 26
Ionisatie en Ionisatiestroom..... 27
Ionisatiekromme..... 29
Isotopen 31
Isotopengenerator..... 32
Kansproces 34
Kwadratenwet 35
Logaritmes en logaritmisch grafiekpapier..... 36
Lorentzkracht 37
Massieke dracht..... 38
Ouderdomsbepaling van radioactieve stoffen 39
Radioactief verval..... 40

Relativiteitstheorie 41
Röntgenbuis 43
Spectrometrie 44
Statistische spreiding 46
Verbanden 47
Verstrooiing 49
Vervalreeksen en schema's 50
Wilsonvat 52
Begrippenlijst 54
Isotopenkaart 62

Experimenten met radioactieve bronnen en röntgenstraling

Experimenten

1	Dracht van α-deeltjes in lucht
2A en 2B	Radioactief verval van radon-220
3	Statistische spreiding
4	Terugstooing van β-deeltjes
5	Absorptie van β-deeltjes in aluminium en perspex
6	Geiger-Müller telbuis
7	Energie van β-deeltjes
8	Stralingsintensiteit en afstand
9	Wilsonvat
10	Herstel protactinium-234m
11	Opsporen van lood
12	Absorptie van γ-straling door lood
13	Kwalitatieve identificatie van radioactieve bronnen
14	Röntgenapparaat
15	Ionisatie van lucht door röntgenstraling
16	Bragg-reflectie
17	Gamma-spectometrie
18	Elasticiteitsmodulus van rubber
19	Dracht van α-deeltjes en luchtdruk
20	Radioactief verval van protactinium-234m
21	Ouderdomsbepaling van radioactieve bronnen
22	Halveringsdikten van aluminium voor γ-straling
23	Röntgen-computertomografie

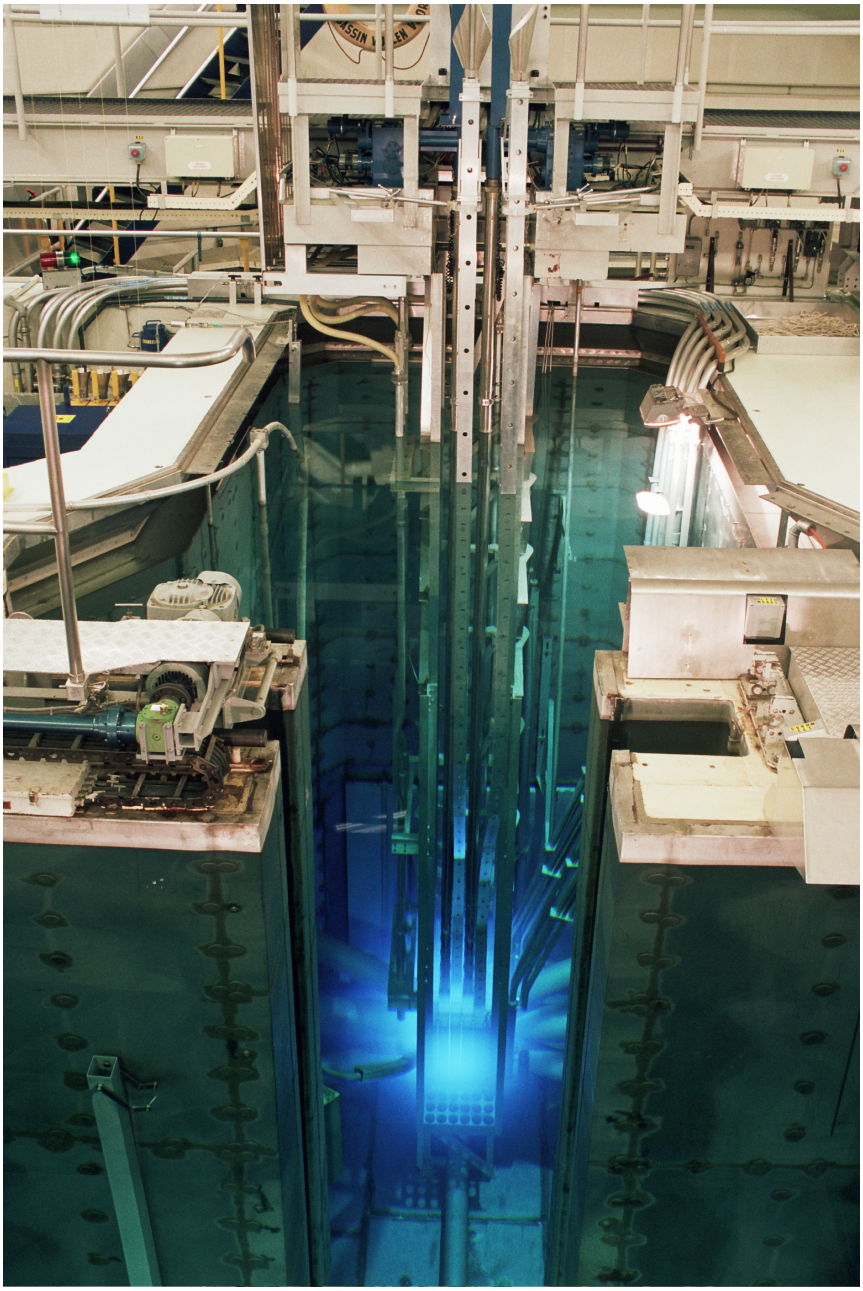
Categorieën

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

Beschikbaarheid

De drie mobiele practica zijn uitgerust met de experimenten 1 t/m 21. De experimenten 1 en 19 zijn niet beschikbaar in Utrecht. Experiment 17 is alleen op aanvraag beschikbaar.



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

Stralingsrisico

We worden voortdurend blootgesteld aan ioniserende straling met een natuurlijke oorzaak. Dit wordt de achtergrondstraling genoemd. Deze achtergrondstraling veroorzaakt in Nederland een gemiddelde effectieve dosis van zo'n 1,7 mSv per jaar. Deze dosis varieert, afhankelijk van de woon- en werkomgeving. Als gevolg van het gebruik van kunstmatige bronnen bij medische diagnostiek, komt hier een gemiddelde effectieve dosis van 1 mSv bij.
Een stralingsdosis kan schade aan het lichaam veroorzaken. 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 ioniserende 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 effectieve dosis een toename van de schade aan het lichaam tot gevolg heeft. In de tabel hieronder staan enkele risicogetallen: het aantal sterfgevallen per jaar per miljoen mensen door verschillende soorten kanker bij een extra opgelopen effectieve 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 17,8 miljoen inwoners) zal leiden tot het overlijden van 1,5 personen per jaar aan longkanker. Dit aantal is klein vergeleken met de vele duizenden mensen die jaarlijks aan kanker overlijden door andere oorzaken.
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 geborenen. Ook dit aantal is klein vergeleken met de 60 à 90 duizend per miljoen geborenen met genetische afwijkingen als gevolg van andere oorzaken.
Zeer hoge stralingsdoses zoals bij kernongevallen of kernbomexplosies tasten het natuurlijk afweermechanisme van de slachtoffers aan. Ze overlijden aan infectieziekten. De effectieve 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 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
	Drinkwater en voedsel	0,43	mSv/jaar
	Lucht buitenshuis	0,03	mSv/jaar
	Bouwmaterialen	0,34	mSv/jaar
Vrije tijd	Vliegreis europa retour	7	µSv/uur
	Wintersportvakantie (2 km hoogte)	30	µSv/week
Medisch	Röntgenfoto borstholte	0,04	mSv
	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

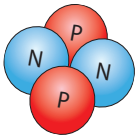
Op de ISP-website staat aanvullende informatie over stralingsbronnen, over de bijdrage die ze leveren aan de stralingsbelasting en over de effecten van ioniserende straling: www.stralenpracticum.nl > voorbereiden > achtergrondinformatie > effecten van ioniserende straling (pdf)

Achtergrondstraling

Experimenten: 5, 9, 13, 17

Vanuit het heelal en vanuit de aardbodem ontvangen we straling. Ook ons eigen lichaam is radioactief. Deze altijd aanwezige straling wordt achtergrondstraling genoemd. In Nederland is de gemiddelde effectieve dosis die we ontvangen als gevolg van de achtergrondstraling 1,7 mSv per jaar.
De achtergrondstraling heeft veel verschillende oorzaken. Zo hebben we te maken met kosmische straling. Dit is straling die vanuit het heelal de aarde bereikt. Dit kan afkomstig zijn van onze eigen zon, maar ook andere sterren, planeten, supernova's, enz. De atmosfeer beschermt ons tegen de meeste kosmische straling. Maar niet overal op aarde wordt er evenveel kosmische straling tegen gehouden. Door het magnetische veld rond om de aarde, wordt een deel van de kosmische straling afgebogen in zijn baan, waardoor er meer kosmische straling is op de polen dan op de evenaar.
Ook op aarde zelf zijn er bronnen die bijdragen aan de achtergrondstraling. Dat komt door de natuurlijke aanwezigheid van radioactieve isotopen in de natuur. Zo zijn er gebieden waar bijvoorbeeld veel uranium in de aardkorst zit, zoals Australië. Maar ook in Nederland zijn er radioactieve isotopen aanwezig in de bodem.
Het verbouwen van eten zorgt ervoor dat er stoffen uit de bodem worden opgenomen in ons voedsel, zo ook kleine hoeveelheden radioactieve isotopen. Zo bevatten bananen een zeer geringe hoeveelheid van de radioactieve isotoop kalium-40. Dit heeft er zelfs voor gezorgd dat de banaan kan worden gebruikt als eenheid voor de dosis. Dit wordt de 'Banana Equivalent Dose' (BED) genoemd. Een enkele banaan heeft een BED van 0,1 μSv. Dit is de helft van de achtergrondstraling die je per uur ontvangt in Nederland (0,2μSv). Je kunt dus gewoon bananen blijven eten.
Niet alleen in de aardbodem zijn radioactieve stoffen aanwezig. Ook in de lucht komen radioactieve isotopen voor. Zo ademen we elke dag wat in van het radioactieve radon-220. Dit is onder andere afkomstig uit beton. Dit komt omdat er van nature thorium-232 aanwezig is in de grondstoffen voor beton. Het thorium-232 is een vaste stof, en blijft dus in het beton zitten. Maar thorium-232 vervalt met wat tussenstappen naar radon-220, wat een gas is. Dit ontsnapt uit het beton, en komt dus in de lucht terecht. Volgens het RIVM is de gemiddelde stralingsdosis als gevolg van het inademen van radongas ongeveer 0,44 mSv per jaar. Deze waarde is inbegrepen bij de jaarlijkse dosis van 1,7 mSv.

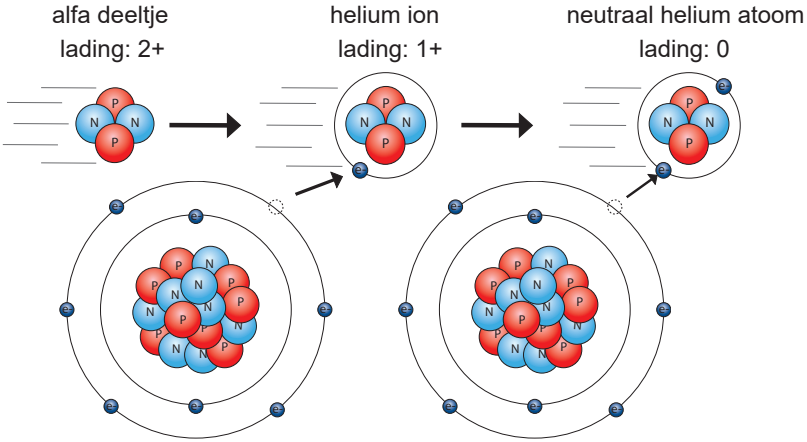
Alfastraling



Experimenten: 1, 2A, 2B, 9, 13, 19

Symbool	α
Bouwstenen	Een bundel heliumkernen. Een α-deeltje bestaat uit twee protonen en twee neutronen
Dracht	afhankelijk van energie, maximaal enkele cm
Stralingsweegfactor	20
Lading	2+

Alfastraling of α-straling is een vorm van ioniserende straling bestaande uit een bundel α-deeltjes. Deze α-deeltjes bestaan uit twee protonen en twee neutronen, en is dus de atoomkern van het element helium. α-deeltjes zijn afkomstig uit de kern van een radioactieve stof. Een α-deeltje mist twee elektronen, en is dus een ion. Door de positieve lading van dit atoom trekt het vrije elektronen, of elektronen van andere atomen aan. Een α-deeltje is mono-energetisch. Dit betekent dat alfadeeltjes uit dezelfde isotoop altijd dezelfde energie hebben*.

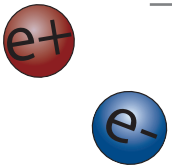


Twee zuurstof atomen in de lucht. Er worden elektronen uit de buitenste schil van verschillende atomen aangetrokken door het positieve alfa deeltje, totdat deze neutraal is geworden. De zuurstofatomen zijn nu ionen geworden: ze zijn door het α-deeltje geïoniseerd.

**Lees meer over de energie van α-deeltjes bij het kernbegrip ‘Energie’.

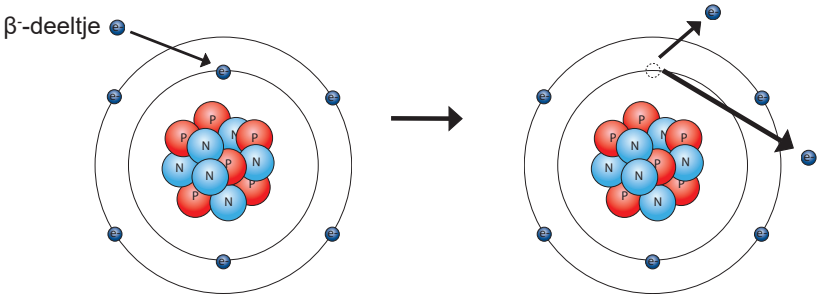
Bètastraling

Experimenten: 4, 5, 7, 9, 13, 18



Symbool	β^- of β^+
Bouwstenen	Een bundel elektronen of positronen
Dracht	Afhankelijk van energie, maximaal enkele meters
Stralingsweegfactor	1
Lading	1- (elektron) of 1+ (positron)

Betastraling of β-straling is een vorm van ioniserende straling bestaande uit een bundel elektronen (β^-) of positronen (β^+). Een β-deeltje is ongeveer 7500 keer zo klein als een α-deeltje. Naast ionisatie kunnen β-deeltjes ook remstraling veroorzaken*. β-deeltjes zijn niet mono-energetisch. Dit betekent dat ze een energie mee kunnen krijgen van de kern die varieert tussen nul en een maximum**.
Een β^--deeltje is afkomstig uit de kern van een radioactieve stof, en ontstaat wanneer een neutron wordt omgezet in een proton. Een β^--deeltje kan een elektron uit een schil van een willekeurig atoom stoten, waardoor het atoom dat elektron verliest, en een ion wordt. Het β^--deeltje heeft het atoom dus geïoniseerd.



Een neutraal koolstof atoom

Een geïoniseerd koolstof atoom na botsing met een β--deeltje

Een β+-deeltje ontstaat als een proton wordt omgezet in een neutron. Wanneer een β+-deeltje zijn energie heeft afgegeven zal het samenkomen met een elektron, waarbij twee fotonen van 511 keV vrijkomen. Dit wordt annihilatie genoemd.

*Lees meer over remstraling bij het kernbegrip 'Röntgenbuis'.
**Lees meer over de energie van β-deeltjes bij het kernbegrip 'Energie'.

Brachytherapie

Experimenten: 5

Bij radiotherapie kunnen patiënten op twee manieren bestraald worden: van buitenaf (uitwendig) of van binnenuit (inwendig) met ioniserende straling. Aangezien deze straling schadelijk kan zijn voor het lichaam, is het belangrijk om alleen het gebied dat behandeld moet worden te bestralen.

Inwendige Bestraling (Brachytherapie)
Bij inwendige bestraling, ook wel brachytherapie genoemd, wordt een stralingsbron in of nabij de tumor geplaatst. Er zijn verschillende methodes van brachytherapie:

Buisjes
Bij deze methode worden er een of meerdere buisjes op de plek van de tumor aangebracht. In deze buisjes zit een radioactieve stof die de tumor van dichtbij bestraalt. Hierdoor wordt gezond weefsel zo min mogelijk beschadigd. Na de behandeling worden de buisjes weer verwijderd, zodat er geen radioactieve stof achterblijft in het lichaam van de patiënt.

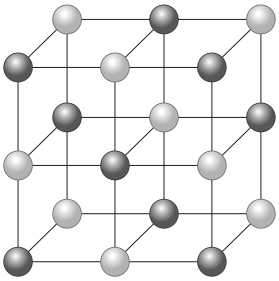
Directe plaatsing
In dit geval worden de stralingsbronnen direct in de tumor geplaatst. Deze bronnen blijven in het lichaam en worden niet verwijderd. Na verloop van tijd neemt de straling van deze bronnen af tot een laag niveau. Patiënten die deze behandeling krijgen, blijven licht radioactief en krijgen daarom speciale leefregels mee naar huis om veilig om te gaan met de straling.

Bragg-reflectie

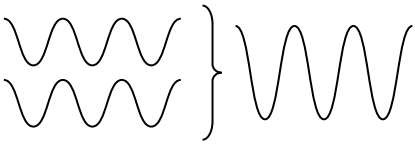
Experimenten: 16

Bragg-reflectie is de interferentie van röntgenstraling aan de roostervlakken van een kristal. Om verder in te gaan op Bragg-reflectie, zijn de volgende begrippen van belang:

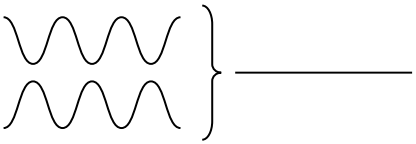
Kristalstructuur: Sommige vaste stoffen hebben een kristalstructuur. Dit betekent dat de atomen in die stof in een regelmatig patroon zijn geordend. Een voorbeeld van zo een kristalstructuur is hiernaast te zien.



Interferentie: Golven, zoals die van geluid of röntgenstraling, kunnen met elkaar interfereren. Zo worden twee golven die gelijk aan elkaar lopen versterkt, en worden golven die een halve periode van elkaar verschillen uitgedoofd. Zie ook onderstaande afbeelding.



Deze golven hebben constructieve interferentie

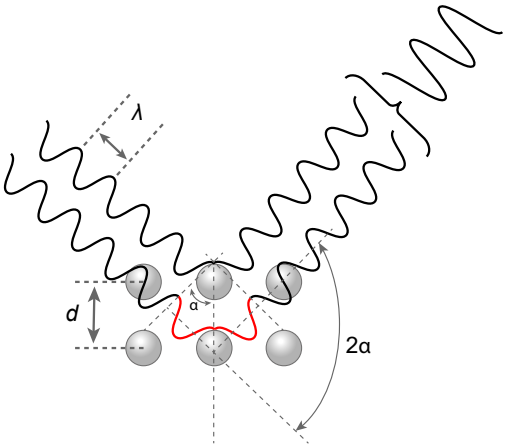


Deze golven hebben destructieve interferentie

Bragg-reflectie gaat dus over de constructieve interferentie die plaats vindt als röntgenstraling reflecteert via de atomen in een kristalstructuur. Deze constructieve interferentie vindt alleen plaats bij specifieke hoeken van inval. Welke hoek dat is, hangt af van de golflengte van de straling, en van de afstand tussen de atomen in het kristal. Zie ook de afbeelding op de volgende pagina.

Lees verder op de volgende pagina

Bragg-reflectie



Er zijn meerdere hoeken waarbij constructieve interferentie optreedt. Maar niet bij elke hoek is de intensiteit even sterk. De hoek waarbij de intensiteit maximaal is, wordt het eerste orde maximum genoemd. De eerstvolgende hoek waarbij constructieve interferentie optreedt, is het tweede orde maximum. De intensiteit van de tweede orde is lager dan die van de eerste orde. Zo gaat dit door met de derde orde, de vierde orde, etc.
Met behulp van metingen kan worden bepaald onder welke hoeken er constructieve interferentie plaatsvindt. Onder deze hoeken wordt er namelijk een hogere intensiteit gemeten dan bij de omliggende hoeken. Als deze hoek bekend is, dan kan met behulp van de volgende formule de afstand d tussen de roostervlakken worden berekend. Deze afstand heeft ook wel de roosterconstante.

$$n \cdot \lambda = 2 \cdot d \cdot \sin(\alpha) \qquad [1]$$

In deze formule geeft n de orde van het maximum aan. Zo is bij het eerste orde maximum n gelijk aan 1, bij de tweede is n geijk aan 2, etc. λ is de golflengte van de invallende straling, en α is de hoek waaronder het maximum is gemeten.
Omdat de roosterconstante uniek is voor elk materiaal, kan hiermee worden achterhaald van welk materiaal het kristal is gemaakt. Het achterhalen van stofeigenschappen met behulp van röntgenstraling wordt röntgendiffractie genoemd.

Dosis

Experimenten: 15

Dosis is een maat voor de hoeveelheid straling die door een weefsel wordt geabsorbeerd, en de schade die het aan kan richten. Er kan onderscheid worden gemaakt tussen verschillende vormen van dosis:

Geabsorbeerde dosis (*D*): De stralingsdosis is de hoeveelheid energie die is geabsorbeerd per eenheid van massa. De eenheid van de geabsorbeerde dosis is gray (Gy). Waarbij 1 Gy overeen komt met 1 J/kg. In de praktijk wordt er vaak gesproken over dosis wanneer de geabsorbeerde dosis wordt bedoeld.

Equivalente dosis (H_T): De equivalente dosis is een maat voor de schade die ioniserende straling kan doen in weefsel. Omdat α-straling een hogere ionisatie dichtheid heeft, is er bij een gelijke stralingsdosis van α-, β-, en γ-straling meer schade aangericht door de α-straling. Met behulp van een stralingsweegfactor w_R kan hiervoor worden gecompenseerd. De equivalente dosis kan als volgt worden berekend:

$$H_T = w_R \cdot D \qquad [1]$$

Waarin H_T de equivalente dosis is, w_R de stralingsweegfactor, en D de geabsorbeerde dosis in gray (Gy). De equivalente dosis heeft als eenheid sievert (Sv) .

Weefselweegfactor (w_T): Een gelijke equivalente dosis is schadelijker voor bijvoorbeeld je lever dan voor je hand. Hiervoor kan rekening worden gehouden met behulp van een weefselweegfactor.

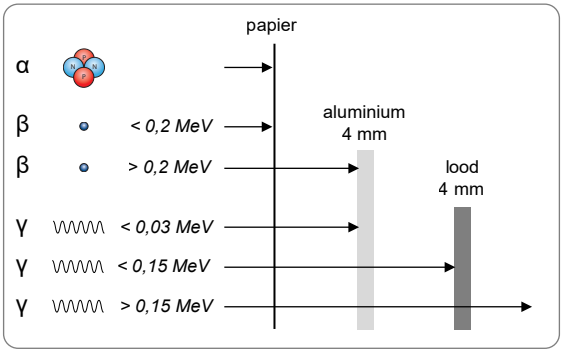
Effectieve dosis (*E*): De effectieve dosis geeft het risico op kanker door de blootstelling aan ioniserende straling weer. De bijbehorende eenheid is de sievert (Sv).
De effectieve dosis bereken je door de equivalente dosis (H_T) van elk orgaan te vermenigvuldigen met de weefselweegfactor en deze vervolgens bij elkaar op te tellen:

$$E = \sum w_T \cdot H_T \qquad [2]$$

Dracht

Experimenten: 1, 5, 9, 13, 19

De dracht van een deeltje is de maximale afstand die het aflegt in materie. De dracht is afhankelijk van meerdere factoren: de kinetische energie van het deeltje, de grootte van het deeltje, en de dichtheid van de materie waar het doorheen reist. In onderstaande afbeelding is een overzicht te zien van stralingssoorten met verschillende energie, en bij welke materialen en diktes deze volledig worden geabsorbeerd.



Lucht: α-straling heeft een dracht van enkele cm (<10 cm) in lucht. Deze stralingssoort kan dus alleen worden gemeten als de afstand tussen de detector en de bron niet groter is dan deze dracht.

Papier: absorbeert alle α-straling en laag-energetische (<0,2 MeV) β-straling. Je kunt mits aanwezig alleen nog hoog energetische β-straling en γ-straling meten.

Aluminium 4 mm: absorbeert alle α- en β-straling, en laag energetische γ-straling (<0,03 MeV). Je kunt mits aanwezig alleen nog γ-straling van meer dan 0,03 MeV meten.

Lood 4 mm: absorbeert alle laag-energetische γ-straling, en minder dan de helft van eventueel aanwezige hoog-energetische γ-straling.

Wat wellicht opvalt is dat de γ-straling nooit volledig wordt geabsorbeerd. Dit komt omdat er bij γ-straling sprake is van een halveringsdikte. Dit is de dikte van het materiaal wat nodig is om de helft van de γ-straling te absorberen.

Elasticiteitsmodulus

Experimenten: 18

In de industrie wordt veel gebruik gemaakt van ioniserende straling. Zo ook om de dikte van een materiaal te bepalen. Hoe dikker een materiaal, hoe minder straling er wordt doorgelaten. Door het verband tussen de stralingsintensiteit en de dikte in kaart te brengen, kan worden bepaald hoe dik het materiaal precies is. Deze informatie kan vervolgens worden gebruikt om bepaalde materiaaleigenschappen te achterhalen, zoals de elasticiteitsmodulus van rubber.
De elasticiteitsmodulus van rubber heeft een verband met uitrekking van het rubber $\Delta\ell$ en de kracht F die is gebruikt voor die uitrekking. Omdat het uitrekken van rubber lijkt op de uitrekking van een veer, kan de wet van Hooke worden gebruikt: $F = C \cdot \Delta\ell$. Hierin is C de veerconstante van de veer.
Voor het verband tussen de kracht F en de uitrekking $\Delta\ell$ voor een rubberen strook geldt:

$$F = \frac{E \cdot A \cdot \Delta l}{l_0} \qquad [1]$$

In deze formule is E de elasticiteitsmodulus van rubber, A de oppervlakte van de dwarsdoorsnede en ℓ_0 de oorspronkelijke lengte van de rubberstrook. Bij het uitrekken van de rubberstrook verandert zowel de breedte als de dikte, en daarmee de oppervlakte A van de dwarsdoorsnede van de strook.

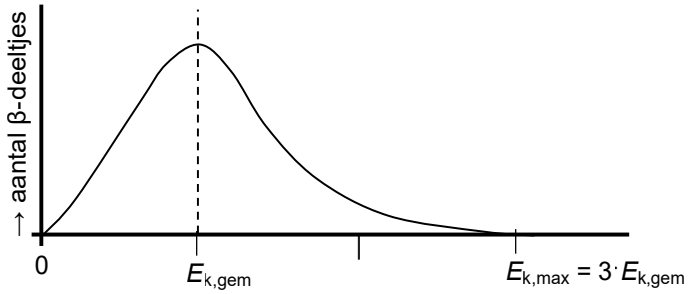
Energie

Experimenten: 1, 5, 7, 9, 13, 17

Straling heeft energie. Hoeveel energie kan afhankelijk zijn van welke isotoop de straling heeft uitgezonden, en welke interactie de straling heeft met diens omgeving.

α-straling: α-straling is mono-energetisch. Dat betekent dat bij het verval van een specifieke isotoop, de uitgezonden α-straling altijd dezelfde kinetische energie heeft. Maar, een α-deeltje uitgezonden door bijvoorbeeld Ra-226 heeft een andere kinetische energie dan een α-deeltje uitgezonden door Po-210.

β-straling: β-straling is niet mono-energetisch. Dat betekent dat, in tegenstelling tot een α-deeltje, een β-deeltje niet altijd dezelfde kinetische energie heeft wanneer het wordt uitgezonden door een atoom, zelfs als het gaat om dezelfde isotopen. Dat betekent niet dat een β-deeltje elke mogelijke energie kan hebben. Er is een bepaalde kans op welke energie het deeltje heeft. Zo is het wel per isotoop verschillend wat de maximale gemiddelde energie van het uitgezonden β-deeltje kan zijn, en welke energie het β-deeltje gemiddeld heeft. De waarde die is te vinden in BINAS tabel 25A is altijd de maximale energie van het β-deeltje.
De gemiddelde energie van een β-deeltje $E_{k,gem}$ ligt niet netjes in het midden tussen 0 en de maximum energie $E_{k,max}$. In plaats daarvan is de gemiddelde energie ongeveer 1/3 van de maximale energie. Dit is weer te geven in een diagram:



Lees verder op de volgende pagina

Energie

γ-straling: γ-straling wordt uitgezonden als gevolg van een aangelsagen toestand van een atoom. De uitgezonden energie kan daardoor variëren van enkele keV, tot ongeveer 10 MeV. Elke isotoop heeft een eigen karakteristiek spectrum van de energie van de uitgezonden γ-fotonen. Door het spectrum* van de uitgezonden γ-straling te bekijken, is dus te zien om welke isotoop het gaat.

*Lees meer over de energie van γ-straling bij het kernbegrip 'spectrometrie'

Exposie

Experimenten: 15

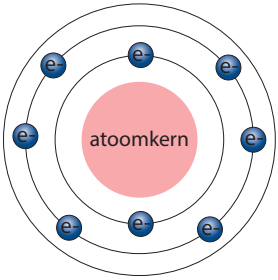
Lucht is van zichzelf niet geleidend. Dit verandert als we de lucht ioniseren door er röntgenstraling doorheen te sturen. De hoeveelheid lading van de gevormde ionen is bruikbaar als maat voor de hoeveelheid röntgenstraling. Dit noemen we de exposie. De eenheid van exposie is de röntgen (R). Uitgedrukt in de SI-eenheden coulomb (C) voor lading en kilogram (kg) voor massa is de waarde van de röntgen op te geven als: 1 R = $2{,}58 \cdot 10^{-4}$ C/kg.

Exposietempo
Het aantal röntgen dat per tijdseenheid uit de röntgenbuis komt, noemen we het exposietempo.

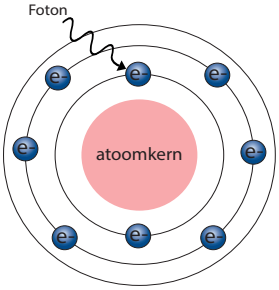
Fluorescentie

Experimenten: 14

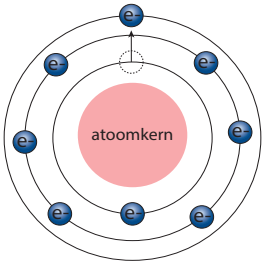
Fluorescentie is gedefinieerd als het vermogen van bepaalde stoffen om geabsorbeerde energie om te zetten in licht. Het uitzenden van dit licht is het gevolg van het terugvallen van een atoom vanuit een aangeslagen toestand naar de grondtoestand. Via een versimpeld model ziet dit er als volgt uit:



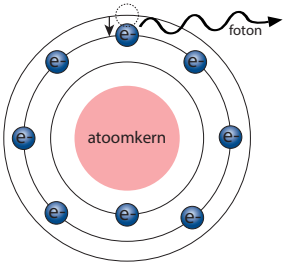
Een foton, bijvoorbeeld een gamma- of röntgenfoton, botst op een elektron van het atoom.

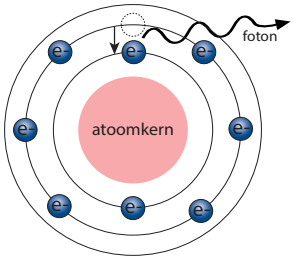


Het atoom wat hier te zien is, bevindt zich in de grondtoestand.



Het foton zorgt ervoor dat het atoom naar een aangeslagen toestand overgaat. Het elektron heeft zich naar een hogere baan verplaatst.

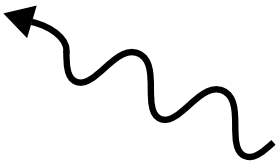




Het atoom wilt weer terug naar de neutrale grondtoestand. Dit gebeurt doordat het elektron weer terugvalt. Bij dit terugvallen verliest het energie, in de vorm van een foton. Bij fluorescentie is dit een foton in het zichtbare spectrum.

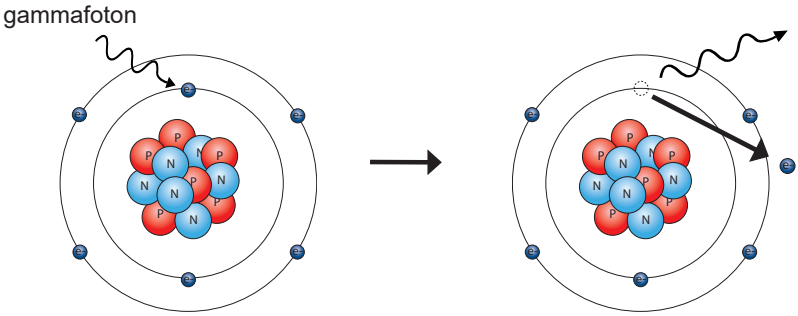
Gammastraling

Experimenten: 11, 12, 13, 17



Symbool	γ
Bouwstenen	bundel fotonen
Dracht	oneindig, bij γ-straling wordt gesproken over halveringsdikte
Stralingsweegfactor	1
Lading	0

Gammastraling of γ-straling is een vorm van ioniserende straling bestaande uit een bundel gammafotonen. γ-straling is afkomstig uit de kern van een radioactieve stof. Een gammafoton kan een elektron uit een schil van een willekeurig atoom stoten, waardoor dit atoom dat elektron verliest, en een ion wordt. Het gammafoton heeft het atoom dus geïoniseerd.



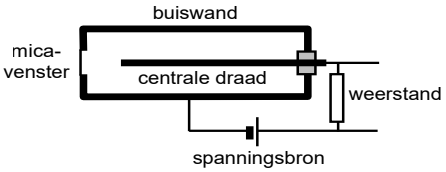
Een neutraal koolstof atoom

Een geïoniseerd koolstof atoom na botsing met een gammafoton

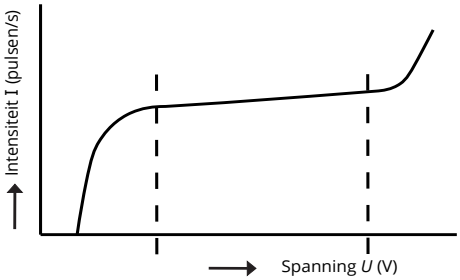
Geiger-Müller telbuis

Experimenten: 6

Een Geiger-Müller telbuis, ofwel een GM-buis, is in staat om ioniserende straling te detecteren. Het signaal wat hierdoor ontstaat wordt doorgegeven aan de pulsenteller. Het doorgegeven signaal wordt op de pulsenteller weergegeven als een puls. In de afbeelding is schematisch de binnenkant van een GM-buis weergegeven.



In de GM-buis is een edelgas aanwezig. Als ioniserende straling de GM-buis binnenkomt, kan het daar een klein deel van de atomen van het edelgas ioniseren. Er ontstaan daardoor vrije elektronen, en gas-ionen. Het aantal ionen dat ontstaat is echter te klein om stroom te genereren en een puls te registreren op de pulsenteller. Er wordt dan geen straling gemeten.
Om een puls te kunnen registreren moet de spanning over de GM-buis hoog genoeg zijn. De spanning zorgt ervoor dat de vrije elektronen worden versnelt, en op hun beurt meer ionisaties veroorzaken, waardoor er meer vrije elektronen en gas-ionen ontstaan. De spanning moet dus hoog genoeg zijn om voldoende elektronen en gas-ionen vrij te maken voor het registreren van een puls. De vrije elektronen worden aangetrokken door de centrale draad, terwijl de positieve gas-ionen worden aangetrokken door de buiswand. Via de weerstand zullen ze recombineren, waardoor de teller een puls registreert.



Het teltempo van een Geiger-Müller telbuis is als functie van de buisspanning weergegeven in het diagram hierboven. Voor een goede werking van de telbuis moet de ingestelde spanning liggen in het horizontale deel van de grafiek. Deze spanning noemen we de werkspanning.

Halveringsdikte

Experimenten: 11, 12, 13

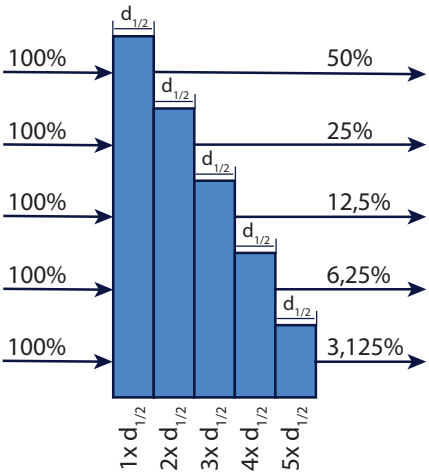
De halveringsdikte is gedefinieerd als de dikte van een materiaal waarbij de helft van de invallende γ-fotonen wordt geabsorbeerd. Deze dikte is afhankelijk van de energie van de invallende γ-fotonen, en de dichtheid van het materiaal.
Als de invallende straling I_0 en de doorgelaten straling I_d bekend zijn, kan de halveringsdikte van het materiaal worden berekend met de volgende formule:

$$I_d = I_0 \cdot (½)^n \qquad [3]$$

Waarin voor n geldt:

$$n = \frac{d}{d_{½}} \qquad [2]$$

In deze formules is I_d de intensiteit van de doorgelaten straling, I_0 de intensiteit van de invallende straling, d de dikte van het absorberende materiaal, en $d_{½}$ de halveringsdikte van het absorberende materiaal.
De halveringsdikte van een aantal materialen is ook te vinden in BINAS tabel 28F. In dat geval moet wel de energie van de straling bekend zijn.



In de afbeelding hierboven is te zien hoe de invallende straling wordt verminderd als het op verschillende hoeveelheden halveringsdiktes valt.

Halveringstijd

Experimenten: 2A, 2B, 10, 20, 21

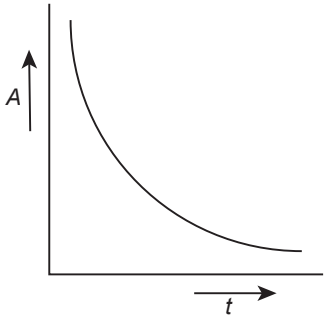
De halveringstijd is gedefinieerd als de tijdsduur waarin de helft van een hoeveelheid radioactieve stof vervalt. De halveringstijd is een eigenschap van een isotoop. Elke radioactieve isotoop heeft een eigen halveringstijd. Deze kunnen variëren van enkele fracties van een seconde, tot miljarden jaren.
Met behulp van de halveringstijd kan de beginactiviteit of juist de huidige activiteit van een radioactieve bron worden berekend. Dat kan met de volgende formule:

$$A_t = A_0 \cdot (½)^n \qquad [1]$$

Waarin voor n geldt:

$$n = \frac{t}{t_{½}} \qquad [2]$$

In deze formules is A_t de activiteit op tijdstip t, A_0 de activiteit op tijdstip = 0, en $t_{½}$ de halveringstijd van de stof.
De halveringstijden van verschillende isotopen zijn te vinden in BINAS tabel 25A.
Als de activiteit van de bron wordt uitgezet tegen de tijd in een diagram, ziet dat er als volgt uit:



Ionisatie en Ionisatiestroom

Experimenten: 1, 2A, 2B, 6, 9, 14, 15, 19

Ionisatie betekent letterlijk: het maken van een ion. Een ion is een atoom met een positieve of negatieve lading. Heeft het atoom meer elektronen dan protonen? Dan is het een negatief geladen ion. Heeft het atoom meer protonen dan elektronen? Dan is het een positief geladen ion.
Een atoom kan een ion worden als gevolg van interactie met straling. Straling die in staat is om van een atoom een ion te maken, wordt ioniserende straling genoemd. Verschillende vormen van ioniserende straling zijn α-, β-, en γ-straling. Hoe deze stralingssoorten ioniseren is beschreven bij de hoofdstukken over deze stralingssoorten.
Een manier om deze ionisaties te meten is met behulp van een ionisatiekamer of condensatorplaten. Ionisaties kunnen visueel worden gemaakt met behulp van een Wilsonvat. Hierover is meer te lezen in het hoofdstuk over het Wilsonvat.

De ionisatiekamer
Een ionisatiekamer, welke wordt gebruikt bij experimenten 1, 2A en 2B, kan worden gebruikt om ionisaties te meten. Een Geiger-Müller telbuis maakt ook gebruik van een ionisatiekamer, maar bij een GM-telbuis is de spanning over de buis hoger dan bij een ionisatiekamer. In het hoofdstuk over de GM-telbuis wordt uitgebreid uitgelegd hoe een ionisatiekamer werkt.

Lees verder op de volgende pagina

Ionisatie en Ionisatiestroom

Vervolg van vorige pagina

Condensatorplaten (experiment 15)
Ionisaties kunnen ook worden gemeten met behulp van condensatorplaten, zoals is te zien bij experiment 15. In dit experiment zijn twee metalen platen tegenover elkaar opgesteld. Wanneer hier spanning over wordt gezet, loopt er geen stroom. De lucht tussen de platen is namelijk niet geleidend. Dit veranderd als de röntgenstraling wordt ingeschakeld: de röntgenstraling ioniseert de lucht.
De gevormde ionen kunnen in principe weer met de vrije elektronen recombineren tot neutrale atomen. Maar als de spanning over de platen voldoende hoog is, bewegen de gevormde ionen en vrije elektronen naar de platen. Er treedt dan een ionisatiestroom op, net als in een ionisatiekamer. Bij een bepaalde waarde van de spanning bereiken alle gevormde ionen en vrije elektronen de platen, en is de ionisatiestroom maximaal.

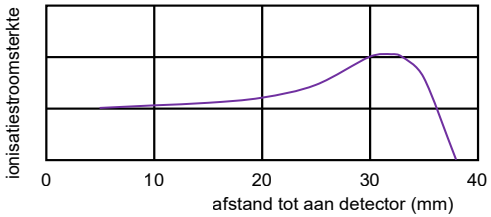
De hoeveelheid lading van de gevormde ionen is dan bruikbaar als maat voor de hoeveelheid röntgenstraling. Dit noemen we de exposie. De eenheid van exposie is de röntgen (afgekort: R). Uitgedrukt in de SI-eenheden coulomb (C) voor lading en kilogram (kg) voor massa is de waarde van de röntgen op te geven als: 1 R = 2,58·10–4 C/kg. Het aantal röntgen dat per tijdseenheid uit de röntgenbuis komt, noemen we het exposietempo.

Begrippen uitgelegd

Ionisatiekromme

Experimenten: 1

Straling neemt af met het kwadraat van de afstand (zie ook: Kwadratenwet). Echter wanneer wordt onderzocht wat het verband is tussen de afstand van een α-deeltje of proton tot aan een detector en de gemeten ionisatiestroom op korte afstand, levert dit geen duidelijk verband op. Als de ionisatiestroom wordt uitgezet tegen de afstand in een grafiek, wordt er een ionisatiekromme zichtbaar. De stroomsterkte neemt eerst iets toe, voordat deze afneemt. Voor een enkel α-deeltje ziet dat er zo uit:



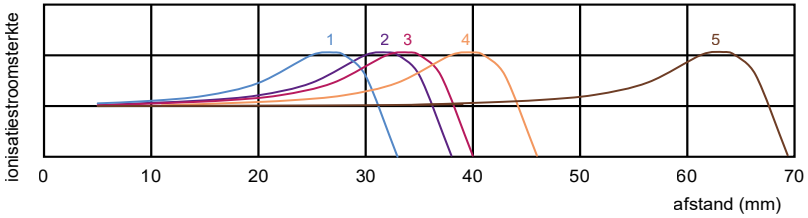
Bij het verlaten van de atoomkern krijgt een α-deeltje energie mee. Hoe hoger deze energie, hoe sneller het α-deeltje beweegt en hoe groter de afstand die het kan afleggen, ook wel de dracht genoemd. Bij hoge snelheden is de interactie van het α-deeltje met de omringende atomen laag, wat resulteert in een lagere ionisatiestroom. Naarmate het deeltje zich verder van de bron verwijdert, vermindert zijn snelheid, waardoor de interactie met de omgeving toeneemt. Dit leidt tot een hogere ionisatiestroom in de ionisatiekamer. Een α-deeltje kan echter slechts een beperkte afstand van enkele centimeters afleggen. Als de afstand tot de detector groter is dan deze dracht, bereikt het deeltje de detector niet en is de ionisatiestroom nul.

Lees verder op de volgende pagina

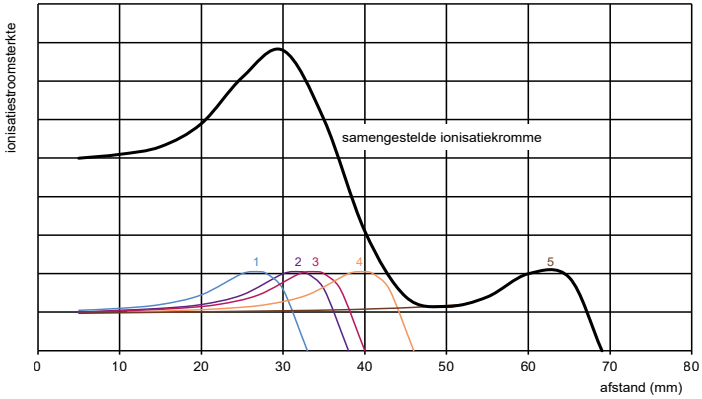
Ionisatiekromme

Vervolg van vorige pagina

Er zijn radioactieve stoffen die na verval niet gelijk stabiel zijn maar in meerdere stappen vervallen. Bij deze verschillende vervalstappen kan dus ook weer een α-deeltje worden uitgezonden. Een voorbeeld hiervan is Ra-226. De α-deeltjes die uit de dochternucliden van deze stoffen worden uitgezonden, komen ook in de ionisatiekamer terecht. Afhankelijk van de energie die deze α-deeltjes meekrijgen vanuit hun moederkern, zal de ionisatiekromme er anders uit zien. Een hogere energie zorgt ervoor dat de ionisatiepiek zich verder van de ionisatiekamer zal bevinden. Hoe deze verschillende ionisatiekrommes eruit kunnen zien, is zichtbaar gemaakt in onderstaande afbeelding:



Dat er sprake is van vijf verschillende ionisatiekrommes, zal echter niet blijken uit het meten van de stroomsterkte. De ionisaties van deze verschillende α-deeltjes zorgen voor een gezamenlijke stroomsterkte, waardoor de uiteindelijke grafiek een samenstelling zal zijn van deze verschillende ionisatiekrommes. Voor de bovenstaande vijf krommes zal de grafiek er ongeveer zo uit komen te zien:



Begrippen uitgelegd

Isotopen

Experimenten: 1, 2A, 2B, 7, 9, 10, 13, 20

Isotopen zijn nucliden met hetzelfde aantal protonen, maar met een verschillend aantal neutronen. Het atoomnummer blijft dus hetzelfde, maar het massagetal verschilt. Hieronder staan een aantal isotopen van het element radium weergegeven:

$$^{223}_{88}\mathrm{Ra} \qquad ^{224}_{88}\mathrm{Ra} \qquad ^{225}_{88}\mathrm{Ra} \qquad ^{226}_{88}\mathrm{Ra}$$

Nucliden met hetzelfde aantal protonen en neutronen, maar met een verschillende energietoestand van de kern, worden metastabiel genoemd. Denk dan bijvoorbeeld aan de grondtoestand en aangeslagen toestanden waarin een atoom zich kan bevinden. Een metastabiel atoom wordt aangegeven met een kleine letter 'm' naast het massagetal. Dat ziet er dan zo uit:

$$^{234}_{91}\mathrm{Pa} \qquad ^{234\mathrm{m}}_{91}\mathrm{Pa}$$

Begrippen uitgelegd

Isotopengenerator

Experimenten: 10, 20

Voorkennis: isotopen, metastabiel, radioactief verval, vervalreeksen

Een isotopengenerator kan worden gebruikt wanneer het gewenst is om isotopen met een korte halveringstijd te gebruiken. Isotopen met een korte halveringstijd zijn moeilijk verkrijgbaar, omdat ze zo snel vervallen. Daarom wordt niet de benodigde isotoop zelf aangeschaft, maar een van de moedernuclides van deze isotoop. Het scheiden van de moeder- en dochternuclides kan via verschillende methoden. Zo kan er gebruik worden gemaakt van de hechting van de nuclides aan stoffen met een verschil in dichtheid, zoals bij een protactiniumgenerator.
De moedernuclide zit in een houder, de generator. De moedernuclide genereert namelijk continu dochternuclides. De generatoren die worden gebruikt bij experimenten 10 en 20 bevatten ^{238}U (uranium) als moedernuclide. Deze vervalt naar dochter ^{234}Th (thorium), welke vervolgens vervalt naar dochter ^{234m}Pa (protactinium). Dit is weergegeven in onderstaande vervalreeks:

$$^{238}_{92}U \longrightarrow {}^{234}_{90}Th \longrightarrow {}^{234m}_{92}Pa$$

^{238}U heeft een halveringstijd van $4{,}5 \times 10^{9}$ jaar. ^{234m}Pa heeft een veel kortere halveringstijd, namelijk 1,17 minuut. Dit betekent dat de generator voor een lange tijd ^{234m}Pa kan blijven genereren.
Bij de experimenten wordt alleen de activiteit van het protactinium gemeten, en niet die van het uranium of het thorium.
In de generator kan het ^{234m}Pa van het ^{238}U gescheiden worden door te schudden. Het ^{234m}Pa hecht zich aan het amylacetaat bovenin de generator, terwijl het zware ^{238}U onderin de generator blijft zitten.
Na het schudden bevind al het ontstane ^{234m}Pa zich bovenin de generator. Dit heeft twee gevolgen:

1. Door het schudden is het ^{234m}Pa onderin de generator grotendeels weggenomen, waardoor de intensiteit aan de onderkant van de generator laag is. Echter blijft het uranium vervallen, waardoor de hoeveelheid protactinium weer wordt aangevuld. De intensiteit aan de onderkant van de generator neemt dus toe.

Lees verder op de volgende pagina

Isotopengenerator

Vervolg van vorige pagina

2. Ongeveer 10 seconden na het schudden is de meeste intensiteit boven in de generator te meten. Maar, het ^{234m}Pa wat daar zit vervalt, waardoor de intensiteit van de straling aan de bovenkant van de generator afneemt.

De onderzijde van de generator - experiment 10
Door het schudden is het ^{234m}Pa van onderin de generator naar boven verplaatst, waardoor de hoeveelheid ^{234m}Pa onderin lager is. Dit wordt weer aangevuld door het vervallende ^{238}U en ^{234}Th. Na een bepaalde tijd is de hoeveelheid ^{234m}Pa weer aangevuld, en blijft dit rond hetzelfde niveau, er is een balans ontstaan. Er vervalt namelijk evenveel ^{234m}Pa als er door het ^{238}U wordt aangemaakt. Wanneer deze balans is bereikt, wordt dat ook wel herstel genoemd.
Hoelang het duurt voordat de herstelwaarde is bereikt, is afhankelijk van de halveringstijden van de moeder ($t_{½}M$) en dochter ($t_{½}D$) nuclide.
De hersteltijd t_{max} is te bepalen door het uitvoeren van metingen aan de onderzijde van de generator, maar deze is ook te berekenen met behulp van een formule:

$$t_{max} = \frac{1}{\ln(2)} \cdot \frac{t_{½}M \cdot t_{½}D}{t_{½}M - t_{½}D} \cdot \ln\left(\frac{t_{½}M}{t_{½}D}\right) \qquad [1]$$

Omdat bij de generator van dit experiment geldt dat $t^{½}M$ meerdere ordegroottes groter is dan $t^{½}D$ kan de formule worden vereenvoudigd:

$$t_{max} = \frac{1}{\ln(2)} \cdot \ln\left(\frac{t_{½}M}{t_{½}D}\right) \qquad [2]$$

In deze formule staat ln voor de natuurlijke logaritme: de logaritme met grondtal e

De bovenzijde van de generator - experiment 20
Door het schudden is het protactinium van onderin de generator naar boven verplaatst, waardoor de hoeveelheid protactinium bovenin hoger is. Dit protactinium vervalt, dus door aan de bovenzijde van de generator te meten, kan de halveringstijd van het ^{234m}Pa worden bepaald.
Naast ^{234m}Pa ontstaat er ook ^{234}Pa, met een langere halveringstijd.

Kansproces

Experimenten: 3

Het verval van radioactieve stoffen verloopt via een kansproces. Het is niet mogelijk om aan te wijzen op welk moment een specifiek atoom gaat vervallen. Hoelang het duurt voordat de helft van de atomen is vervallen is wel te bepalen. Dit wordt de halveringstijd genoemd. Vergelijk dit met het laten vallen van een M&M. Van te voren is niet te voorspellen of de M&M met de logokant naar beneden of naar boven landt. Maar, wat wel is te voorspellen, is dat ongeveer de helft van het aantal keer laten vallen, de landing met het logo naar boven zal zijn, en de andere helft met het logo naar beneden.

De halveringstijd is een indicatie. Ongeveer de helft van de stof zal zijn vervallen. Maar dat zal niet exact de helft zijn. Net als met de M&M's, zal ook niet exact de helft met de logozijde naar boven landen. Omdat het vervallen van een atoom een kans is, kan de hoeveelheid vervallen atomen per meting anders zijn. Zowel bij radioactieve stoffen met een korte als een lange halveringstijd is dit kansproces te zien.

Korte halveringstijd:
Met een korte halveringstijd wordt hier een halveringstijd van maximaal enkele minuten bedoeld. Deze halveringstijd is dus tijdens het practicum te bepalen. Wanneer de intensiteit wordt uitgezet tegen de tijd, zal er een dalende lijn zichtbaar worden. Deze lijn is echter niet perfect. Omdat het gaat om een kansproces, zal de lijn wat 'schommelen'. Bij een tweede meting zal de trendlijn ongeveer hetzelfde zijn, maar zullen de schommelingen net iets anders liggen. Dit is waarom de meetpunten niet direct met elkaar verbonden mogen worden, maar er in plaats daarvan een trendlijn moet worden getekend.

Lange halveringstijd:
Met een lange halveringstijd wordt hier een halveringstijd bedoeld, die zo lang is dat tijdens het practicum geen daling te zien is in het aantal gemeten deeltjes. Dat zou betekenen dat er elke seconde evenveel deeltjes vervallen. In de praktijk blijkt dat er toch bij elke meting een andere hoevelheid deeltjes wordt gemeten. Maar deze waardes liggen wel allemaal bij elkaar in de buurt. De variaties in het aantal gemeten deeltjes zijn te verklaren door het kansproces van radioactief verval. Hoe dit zich verdeelt is te lezen bij het kernbegrip 'Statistische verdeling'.

Kwadratenwet

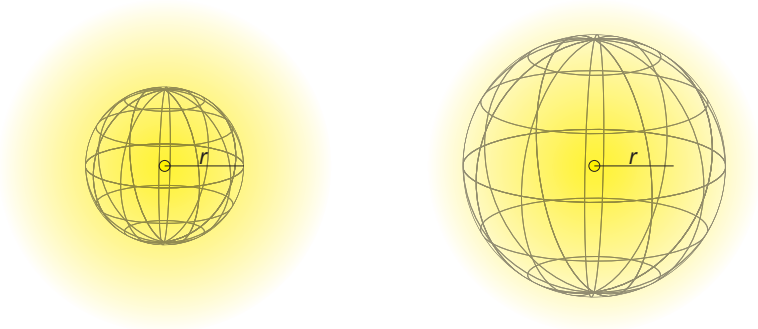
Experimenten: 8

Een manier om een lagere stralingsdosis te ontvangen is het vergroten van de afstand tot de bron. De stralingsintensiteit neemt namelijk snel af wanneer de afstand wordt vergroot. Het precieze verband tussen de stralingsintensiteit en de afstand kan worden beschreven met behulp van de kwadratenwet. Deze geldt alleen als de radioactieve bron een puntbron is: een kleine bron waarvanuit de straling zich evenredig verspreit naar de omgeving.

Een voorbeeld van een puntbron is een ster (met uitzondering van de zon, aangezien die te dichtbij de aarde staat om als puntbron te kunnen beschouwen). Het licht van een ster schijnt alle richtingen op, waarbij er evenveel licht naar elke richting toegaat. Op een gelijke afstand *r* van de ster zal de lichtintensiteit op een willekeurige plek hetzelfde zijn. Maar, hoe groter *r*, hoe kleiner de lichtintensiteit. Het aantal fotonen dat de ster verlaat, verdeelt zich over een steeds groter wordend boloppervlak.

De formule voor de kwadratenwet is:

$$I = \frac{P_{bron}}{4\pi r^2} \qquad [1]$$



Logaritmes en logaritmisch grafiekpapier

Experimenten: 2A, 2B, 5, 11, 12, 13, 20, 21

Als het verband tussen de grootheden x en y exponentieel is, ziet dat er in formulevorm zo uit:

$$y = a^x$$

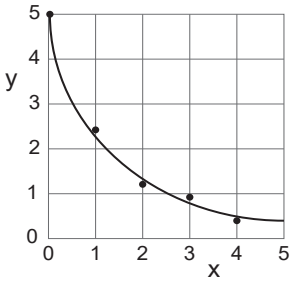
Om x uit de macht te halen, kan de formule worden omgeschreven met behulp van een logaritme (ziek ook BINAS 36D):

$$y = a^x$$
$$\log(y) = x \cdot \log(a)$$

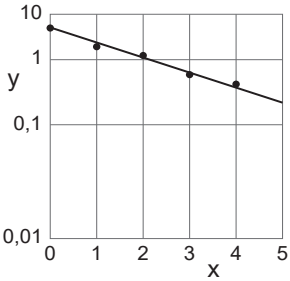
Bij radioactief verval geldt dat a = 0,5. Log(a) kan dus worden opgeschreven als een getal: log(0,5) = -0,30. Dan geldt:

$$\log(y) = -0{,}30x$$

Hiermee is het exponentiële verband omgezet naar een rechtevenredig verband: y = ax. Dit betekent dat als in een grafiek log(y) wordt uitgezet tegen x er een rechte lijn ontstaat. Dit is weergegeven in het voorbeeld hieronder. Grafiekpapier met een enkele logaritmische as wordt enkellogaritmisch grafiekpapier genoemd. Door het gebruik van enkellogaritmisch grafiekpapier bij exponentiele verbanden kun je, zonder te rekenen, toch makkelijk je gegevens invullen waarbij er, volgens bovenstaande regels, een rechte trendlijn door de gegevens getekend kan worden.



De functie $y = 5 \cdot a^x$, met a = 0,5 weergegeven in een grafiek met reguliere assen.

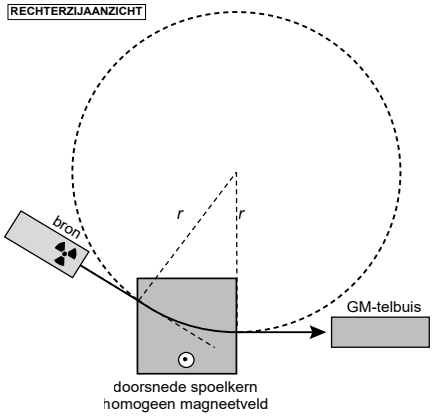


De functie $y = 5 \cdot a^x$, met a = 0,5 weergegeven in enkellogaritmisch grafiekpapier

Lorentzkracht

Experimenten: 7

De lorentzkracht is de kracht die op een lading wordt uitgeoefend door een elektromagnetisch veld. Een dergelijk veld kan worden gemaakt met behulp van een spoel. Wanneer twee spoelen tegenover elkaar worden geplaatst, kan er een homogeen magnetisch veld worden gecreëerd. Wanneer geladen deeltjes in de buurt van dit veld komen, zal hun baan worden beïnvloed. De richting waarin de deeltjes van hun baan afwijken is afhankelijk van de richting van het veld, en de lading van de deeltjes. Zo zal een positieve lading een tegenovergestelde kracht ervaren van een negatieve lading in hetzelfde veld.
De mate waarin de deeltjes worden afgebogen is afhankelijk van de sterkte van het elektromagnetische veld, en de snelheid van de deeltjes. Als de afbuiging van de deeltjes doorgetrokken zou worden, zoals te zien in de figuur hieronder, dan is te zien dat er sprake is van een cirkelbaan.



Met deze kennis kan de snelheid v_0 van de geladen deeltjes worden berekend. Omdat er sprake is van een cirkelbaan, kan de formule voor de middelpuntzoekende kracht gelijk worden gesteld aan de formule voor de lorentzkracht. Hieruit volgt de volgende formule voor de snelheid v_0:

$$v_0 = \frac{B \cdot q \cdot r}{m_0} \qquad [1]$$

Hierin is B de veldsterkte van het magnetisch veld, q de lading van het deeltje, r de straal van de cirkelbaan, en m_0 de massa van het deeltje.

Massieke dracht

Experimenten: 5

Afhankelijk van hun energie leggen β-deeltjes een bepaalde afstand af waarin ze al hun energie aan het absorberende materiaal afgeven. Deze afstand is de dracht *R*. De waarde van *R* is voor elk materiaal verschillend. Neem je echter de massa per oppervlakte-eenheid m/A van het absorberende materiaal, dan zal opvallen dat deze waarde voor verschillende materialen nagenoeg gelijk zijn voor gelijke waardes van de maximale energie *E* (in MeV) van het β-deeltje. Dit is de massieke dracht R_m (in mg/cm^2).

Bepalen van de massieke dracht R_m
De massieke dracht kan uit meetwaardes worden bepaald. Wanneer de intensisteit van de β-straling wordt uitgezet tegen de dikte van het absorberende materiaal, ontstaat er een trendlijn. Omdat voor een gelijke energie van de β-deeltjes de massieke dracht in verschillende materialen gelijk is, zouden de trendlijnen van verschillende materialen ongeveer gelijk moeten zijn. De massieke dracht kan vervolgens bepaald worden door het gemiddelde te nemen van de snijpunten van de trendlijnen met de achtergrondstraling. Deze waarde is af te lezen op de x-as, waar R_m op is uitgezet.

De massieke dracht R_m (in mg/cm^2) is ook te berekenen, mits de maximale energie E_{max} (in MeV) bekend is. De massieke dracht is dus niet afhankelijk van het absorberende materiaal, maar wel van de energie van het β-deeltje. Voor R_m geldt de volgende formule:

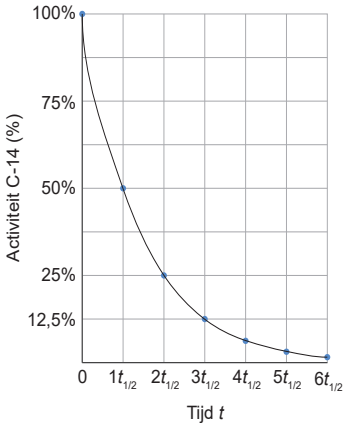
$$R_m = 500 \cdot E_{max} \qquad [1]$$

Ouderdomsbepaling van radioactieve stoffen

Experimenten: 21

Radioactiviteit kan gebruikt worden bij het bepalen van de ouderdom van bepaalde materialen. Als bekend is welke activiteit van een bepaalde radioactieve stof aanwezig was in de beginsituatie, en hoeveel daar nu van over is, kan met behulp van de halveringstijd de ouderdom worden bepaald. Denk dan bijvoorbeeld aan koolstofdatering.

Koolstofdatering wordt gebruikt voor het dateren van ooit levende organismen, zoals mensen en dieren, maar ook plantenresten. Deze organismen nemen gedurende hun leven atomen op uit de atmosfeer, waaronder het radioactieve C-14 ($t_{1/2}$ = 5736 jaar). Voor een grove schatting* kan er van uit worden gegaan dat de hoeveelheid C-14 in de atmosfeer de afgelopen 60.000 jaar ongeveer gelijk is gebleven. Door verval en nieuwe aanmaak van C-14 is deze hoeveelheid in balans. Wanneer een organisme stopt met het opnemen van stoffen uit diens omgeving (het dier overlijdt of de plant is dood), neemt het ook geen nieuw C-14 op. Dit betekent dat de hoeveelheid C-14 in de resten van dat organisme langzaam afneemt, omdat het vervalt. Door te meten hoeveel C-14 nu in de resten van dat organisme nog aanwezig is, kan een schatting worden gemaakt van de ouderdom. Dit kan worden gedaan met behulp van een grafiek. In onderstaande grafiek is de activiteit uitgezet tegen de tijd.



Omdat de hoeveelheid C-14 in de atmosfeer tegenwoordig ongeveer gelijk is aan de hoeveelheid in de afgelopen 60.000 jaar, kan op t = 0 de huidige activiteit worden gebruikt. Dit wordt gezien als 100%.
Als bij een sample bijvoorbeeld 12,5% van de activiteit wordt gemeten, kan worden afgelezen dat dit sample drie halveringstijden oud is. In het geval van C-14 is dat een leeftijd van 17.208 jaar.

*De hoeveelheid C-14 in de atmosfeer heeft wel degelijk gefluctueerd. Bij koolstofdatering wordt er rekening gehouden met deze fluctuaties voor een nauwkeurigere bepaling.

Meer weten over koolstofdatering? Kijk dan op stralenpracticum.nl > Voorbereiden > Achtergrondinformatie > Koolstofdatering

Radioactief verval

Experimenten: 1, 2A, 2B, 3, 6, 10, 20, 21

Radioactiviteit is het vermogen van bepaalde kernen om spontaan α-, β-, of γ-straling uit te zenden. Hierbij transformeert de kern in een andere kern of naar een ander energieniveau. Deze transformatie wordt radioactief verval genoemd. De kern die is ontstaan is het vervalproduct, en wordt de dochter isotoop of dochter nuclide genoemd.

De natuurlijke staat van een atoom is in rust. Wanneer een atoom een overschot aan energie of massa heeft is het instabiel, en dus niet in rust. Door het uitzenden van straling verliest het atoom (een deel van) dit overschot. Dit zal het blijven doen totdat het atoom weer in rust is: er is dan een stabiele kern ontstaan die niet verder zal vervallen. Het kan dus zijn dat een atoomkern eerst in een aantal andere instabiele kernen verandert, voordat het een stabiele kern is geworden. De 'route' die de atoomkern aflegt is vast te leggen in een vervalreeks. In de vervalreeks wordt het soort straling en de energie van die straling vermeld.

Hoe snel atoomkernen veranderen is afhankelijk van welk atoom ze op dat moment zijn. Elke radioactieve stof heeft namelijk een eigen halveringstijd. Dit is de tijd waarin de helft van het aantal atoomkernen is vervallen. Dit kan variëren van enkele fracties van een seconde, tot miljarden jaren.

Relativiteitstheorie

Experimenten: 7

Voorkennis: Lorentzkracht

Voor het berekenen van de snelheid van een voorwerp gebruiken we de wetten van Newton. Zo geldt voor de snelheid *v* van een voorwerp dat dit gelijk is aan de afgelegde afstand *x* gedeeld door de tijd *t* waarin die afstand is afgelegd. Echter, wanneer deze formule wordt toegepast op voorwerpen die in de buurt komen van de snelheid van het licht, zoals elementaire deeltjes, blijkt de uitkomst af te wijken. Zo kan de snelheid van deze deeltjes hoger uitkomen dan de snelheid van het licht, wat niet mogelijk is.

Albert Einstein kwam in zijn speciale relativiteitstheorie met een verklaring. In zijn speciale relativiteitstheorie stelde hij dat de energie van een deeltje afhankelijk is van diens massa. Omdat de snelheid van elementaire deeltjes dicht bij de snelheid van het licht kan liggen, moet in het berekenen van de snelheid de relativistische massa *m* worden gebruikt, en niet de rustmassa m_0 zoals die wordt gebruikt in de wetten van Newton. De relativistische massa *m* kan worden berekend met de volgende formule:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \qquad [1]$$

Als *v* veel kleiner is dan *c*, dan is *m* ongeveer gelijk aan m_0. Dat betekent dat dit soort relativiteitseffecten in het dagelijks leven nauwelijks een rol spelen. Maar voor elementaire deeltjes zoals β-deeltjes is dat dus wel het geval. De formule voor het berekenen van de werkelijke, relativistische snelheid van de β-deeltjes kan op de volgende manier worden afgeleid.

Als er sprake is van een Lorentzkracht waardoor de deeltjes een cirkelvormige baan volgen, geldt voor de snelheid van deze deeltjes:

$$v_0 = \frac{B \cdot q \cdot r}{m_0} \qquad [2]$$

Lees verder op de volgende pagina

Relativiteitstheorie

Maar we willen niet v_0 berekenen, maar de relativistische snelheid v. In plaats van de rustmassa m_0 vullen we de relativistische massa m in, welke wordt gegeven door formule 1. Dit levert het volgende resultaat:

$$v = \frac{B \cdot q \cdot r}{m_0} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \qquad [3]$$

Omdat uit formule 2 blijkt dat v_0 gelijk is aan $B \cdot q \cdot r / m_0$, kan formule 3 worden geschreven als:

$$v = v_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \qquad [4]$$

Welke herschreven kan worden naar:

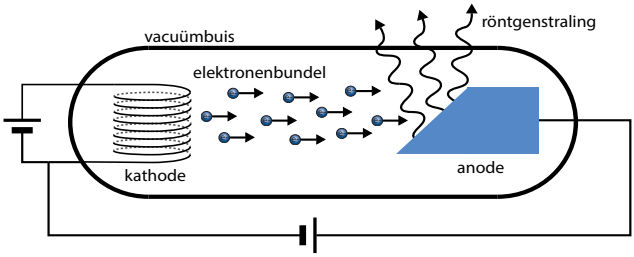
$$\frac{1}{v^2} = \frac{1}{v_0^2} + \frac{1}{c^2} \qquad [5]$$

In deze formule is v de werkelijke snelheid van de β-deeltjes, v_0 de snelheid zoals deze is berekend met de rustmassa, en is c de lichtsnelheid.

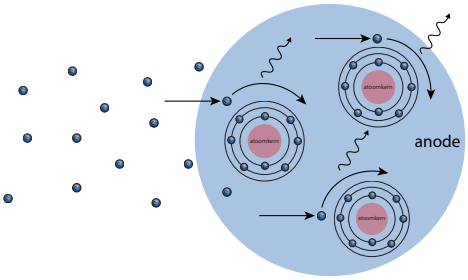
Röntgenbuis

Experimenten: 14, 15, 16

Röntgenstraling is een vorm van ioniserende straling. Het voordeel van röntgenstraling is dat het kan worden aan- en uitgezet, in tegenstelling tot de straling die van een radioactieve stof komt. Ook kunnen bepaalde eigenschappen van de röntgenstraling worden aangepast door de instellingen van de röntgenbuis te veranderen.
Een röntgenbuis bestaat uit een vacuüm buis met een kathode en anode, zoals hieronder afgebeeld. De anode is gemaakt van een metaal, bijvoorbeeld koper.



In de buis worden elektronen versneld van de kathode naar de anode door middel van hoogspanning. Wanneer de elektronen in de anode terecht komen, produceren ze röntgenstraling. Dit komt doordat de elektronen worden aangetrokken door de positieve atoomkernen in de anode. Dit is te zien in onderstaande afbeelding:



Door de aantrekkingskracht van de elektronen naar de positieve atoomkernen, verandert het elektron van baan, waarbij het afremt. Afremmen betekent dat het elektron energie verliest, in dit geval is dat in de vorm van een röntgenfoton. Deze soort straling wordt ook wel remstraling genoemd.

Spectrometrie

Experimenten: 17

Voorkennis: gammastraling, fluorescentie

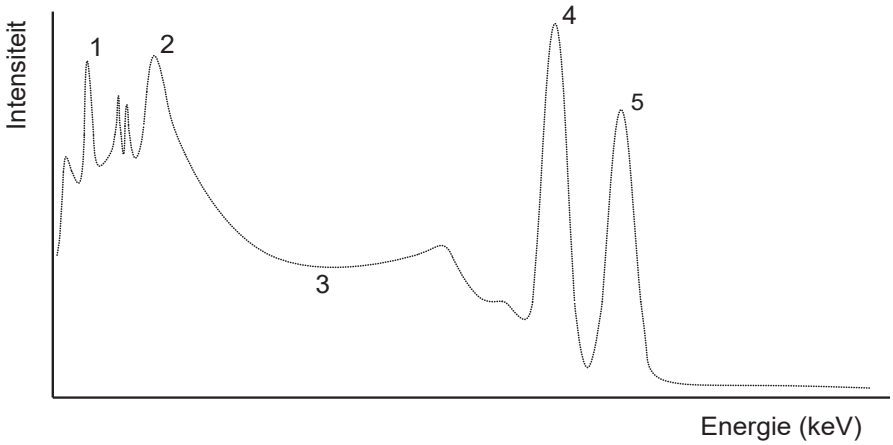
Spectrometrie is het analyseren van straling naar bijvoorbeeld golflengte, energie, of frequentie. Dit kan veel informatie geven over de samenstelling van het gemeten materiaal. Elke radioactieve stof heeft namelijk een uniek spectrum, een soort vingerafdruk van die isotoop.

Gamma-spectrometrie focust zich op het analyseren van de gammafotonen afkomstig van radioactieve stoffen. Voor dit voorbeeld wordt gekeken naar kobalt-60 (Co-60), een radioactieve isotoop die naast β-straling twee verschillende gammafotonen uitzendt: een gammafoton met een energie van 1332 keV, en een gammafoton met een energie van 1173 keV. Deze energiewaardes zijn dus uniek voor Co-60. Door deze energie te meten is dus te bepalen om welke radioactieve stof het gaat.

Om een spectrum te kunnen meten is een spectrometer nodig. De metingen van deze spectrometer kunnen worden verwerkt in een software programma. Het software programma zet de intensiteit van de gemeten straling uit tegen de energie van die straling in een grafiek. Het spectrum van Co-60 is op de volgende pagina te zien.

Lees verder op de volgende pagina

Spectrometrie



In bovenstaand spectrum valt op dat er meer is te zien dan alleen de twee specifieke energieën van de Co-60 gammafotonen. Door interactie met andere materialen in en rond de detector ontstaan namelijk ook fotonen met een andere energie.

(1) Loodpiek: De loodpiek ligt rond de 75 keV, en is afkomstig uit het loden omhulsel van de bron. Een gammafoton uitgezonden door Co-60 kan een elektron vrijmaken uit de schil van een loodatoom. Hierdoor ontstaat een gat, dat weer opgevuld wordt door een elektron uit een hogere schil. De energie die daarbij vrijkomt is het foton dat hier wordt gemeten.

(2) Terugstrooipiek: De terugstrooipiek ontstaat door verstrooiing van de γ-straling in het materiaal rond het kristal in de detector. Daar dragen zij een deel van hun energie over. Door terugstrooiing komen ze weer in het scintillatiekristal terecht.

(3) Comptonrug: De comptonrug ontstaat omdat in het scintillatiekristal verstrooiing optreedt. Bij deze verstrooiing dragen de gammafotonen een deel van hun energie over aan het materiaal van het kristal. Dit heet het comptoneffect. De overgedragen energie kan een waarde hebben tussen nul en een maximum. Dat verklaart de breedte van de comptonrug.

(4+5) Fotopieken: Deze twee pieken zijn de twee specifieke fotonenergieën van Co-60, met piek 4 op 1173 keV en piek 5 op 1332 keV.

Begrippen uitgelegd

S

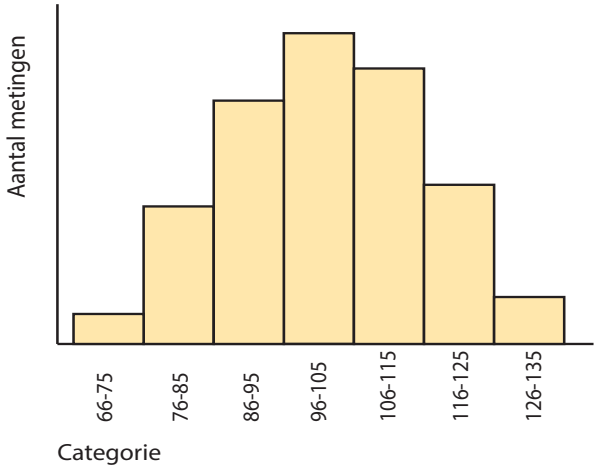
Statistische spreiding

Experimenten: 3

Voorkennis: Kansproces

Het verval van een radioactieve stof is een kansproces. De halveringstijd geeft aan dat na een bepaalde tijd de helft van de deeltjes van de radioactieve stof is vervallen, maar dit is niet exact. Er zit een kleine variatie in de hoeveelheid deeltjes die na een halveringstijd zijn vervallen. Voor dit voorbeeld kijken we naar radioactieve stoffen met een lange halveringstijd, dus een halveringstijd die niet meetbaar is tijdens de duur van het practicum.

Wanneer aan deze stof meerdere korte metingen worden gedaan, zal zichtbaar worden dat het aantal gemeten deeltjes per meting varieert, maar wel rond dezelfde waarde zitten. De spreiding van deze metingen kan in kaart worden gebracht met behulp van een staafdiagram. Zie de afbeelding hieronder.



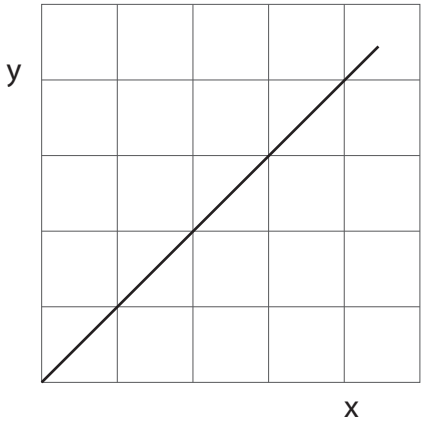
Het staafdiagram geeft weer hoeveel metingen er zijn binnen een bepaalde categorie. Wat opvalt is dat de vorm van het staafdiagram een kromme is. Dit wordt een Gauss kromme of normaal kromme genoemd. De verdeling van de metingen heet dus ook een Gauss- of normaalverdeling. Wanneer je meer metingen doet, zal de kromme vloeiender verlopen. Als je langere metingen doet, zal de statische afwijking minder worden.

Verbanden

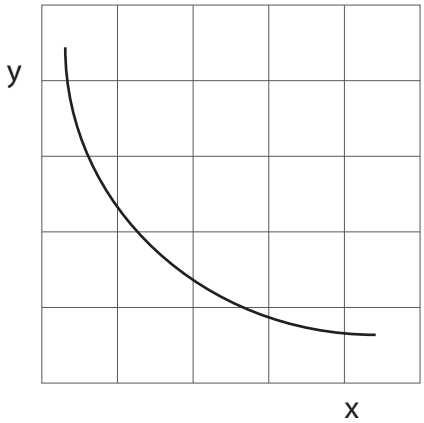
Experimenten: 2A, 2B, 5, 8, 12, 18, 19, 20

Om natuurkundige verschijnselen te kunnen interpreteren en verklaren, wordt vaak gekeken naar het verband tussen twee grootheden. Een verband leggen kan helpen bij het begrijpen van deze verschijnselen. Maar welke verbanden kunnen er tussen twee grootheden bestaan, en wat houden ze precies in? Op deze twee bladzijdes staan een aantal verbanden op een rij, met de daarbij horende formule en grafiek.

Recht evenredig verband
Een recht evenredigverband betekent: als x twee keer zo groot wordt, wordt y ook twee keer zo groot. De formule die bij een rechtevenredig verband hoort is:
$y = a \cdot x$



Omgekeerd evenredig verband
Een omgekeerd evenredig verband betekent: als x twee keer zo groot wordt, wordt y twee keer zo klein. De formule die bij een omgekeerd evenredig verband hoort is:
$y = a/x$

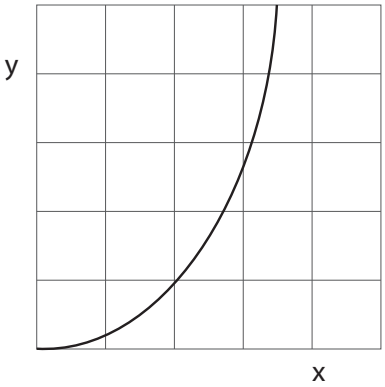


Lees verder op de volgende pagina

Verbanden

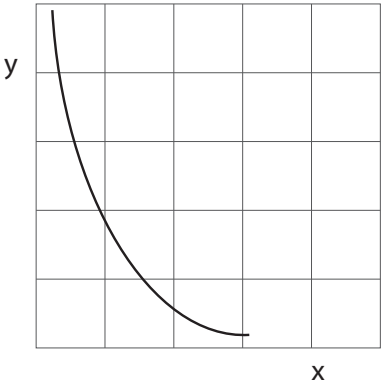
Kwadratisch verband

Een kwadratisch verband betekent: als x twee keer zo groot wordt, wordt y twee in het kwadraat keer zo groot. De formule die bij een kwadratisch verband hoort is:
$y = a \cdot x^2$



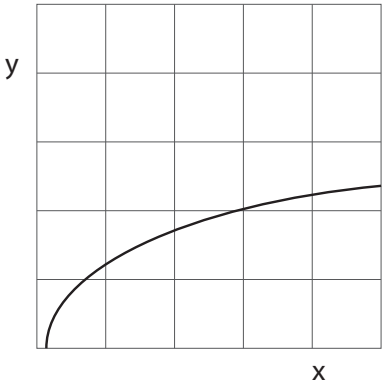
Omgekeerd kwadratisch verband

Een omgekeerd kwadratisch verband betekent: als x twee keer zo groot wordt, wordt y twee in het kwadraat keer zo klein. De formule die bij een omgekeerd kwadratisch verband hoort is:
$y = a/x^2$



Logaritmisch verband

Een logaritmisch verband betekent: als x twee keer zo groot wordt, wordt y twee keer zo klein. De formule die bij een logaritmisch verband hoort is:
$y = a \cdot \log(x)$



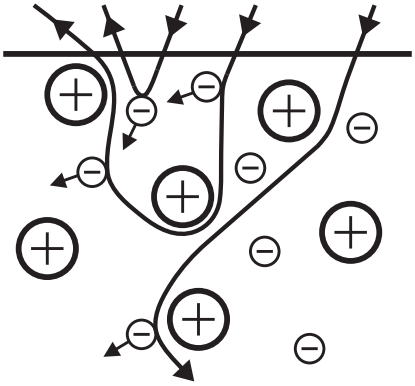
Zie ook Binas tabel 36A

Verstrooiing

Experimenten: 4

Straling kan op verschillende manieren interactie aangaan met materie. Een daarvan is het botsen van de straling met de elektronen rond de atoomkernen van die materie. De botsing zorgt ervoor dat de straling een andere richting krijgt. Dit wordt verstrooiing genoemd. De mate van verstrooiing is afhankelijk van de soort straling (α-, β-, of γ-straling) en het materiaal waarin de verstrooiing plaats vind.

De Engelse natuurkundige Ernest Rutherford ontdekte ruim een eeuw geleden dat er ook verstrooiing optreedt als gevolg van elektrische krachten tussen (negatief of positief) geladen β-deeltjes, en de positief geladen atoomkernen in het vertrooiingsmateriaal. Door deze elektrische krachten treedt een sterke verandering van de bewegingsrichting op.



In deze afbeelding is weergegeven hoe verstrooiing eruit kan zien. De pijlen geven de baan van het geladen β-deeltje aan. In deze tekening gaat het om β-deeltjes met een negatieve lading, omdat ze in hun baan worden aangetrokken richting de positieve atoomkernen. In hetzelfde materiaal komen ze elektronen tegen waar ze door worden afgestoten, waardoor hun baan ook weer van richting verandert.

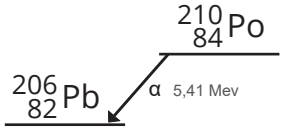
Vervalreeksen en schema's

Experimenten: 1, 2A, 2B, 9, 10, 20

Bij radioactief verval verandert een moederisotoop in een andere dochterisotoop of isomeer. Als deze dochterisotoop of isomeer stabiel is, houdt de vervalreeks op. De dochterisotoop wordt ook wel het vervalproduct genoemd.De vervalreeks kan er dan bijvoorbeeld zo uitzien:

$$^{210}_{84}\mathrm{Po} \xrightarrow[5{,}4\ \mathrm{MeV}]{\alpha} {}^{206}_{82}\mathrm{Pb}\ \text{(stabiel)}$$

In de vervalreeks staat de soort straling (α of β) boven de pijl, en kan de halveringstijd of de energie van de straling onder de pijl staan.
Een vervalreeks kan ook worden weergegeven in een schema. In dat geval ziet de hierboven genoemde reeks er zo uit:

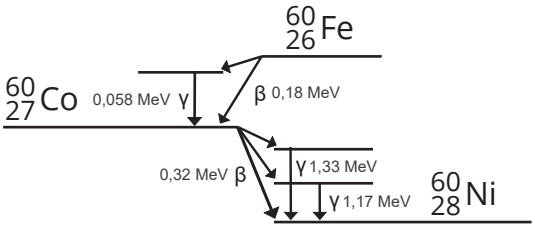


Voor het verval van Po-210 is de vervalreeks kort, omdat de dochterisotoop stabiel is. In het geval dat de dochterisotoop ook radioactief is, wordt de vervalreeks langer. De vervalreeks kan doorgaan totdat er een stabiele isotoop is ontstaan. Zodra de vervalreeks isotopen bevat die verschillende soorten straling uitzenden met ook verschillende energieën, kan het overzichtelijker zijn om een schema te gebruiken.
De vervalreeks van Fe-60 ziet er bijvoorbeeld zo uit:

$$^{60}_{26}\mathrm{Fe} \xrightarrow[0{,}18\ \mathrm{MeV}]{\beta^-} {}^{60}_{27}\mathrm{Co} \xrightarrow[0{,}32\ \mathrm{MeV}]{\beta^-} {}^{60}_{28}\mathrm{Ni}$$

Vervalreeksen en schema's

In het vervalschema van Fe-60 is te zien welke stralingssoorten nog meer aanwezig zijn, en welke energie deze hebben. Het vervalschema van Fe-60 ziet er als volgt uit:



Bij het invullen van een vervalreeks of -schema moet goed worden gekeken naar welke vervalproducten er ontstaan. Afhankelijk van welke stralingssoort wordt uitgezonden ontstaat er ook een ander vervalproduct. Zo kan bijvoorbeeld Po-218 zowel α- als β-straling uitzenden. De vervalreeks kan dus zo verlopen:

$$^{212}_{83}\text{Bi} \xrightarrow[6{,}1\ \text{MeV}]{\alpha} {}^{208}_{81}\text{Ti} \quad \text{... (vervalreeks gaat verder)}$$

Maar ook zo:

$$^{212}_{83}\text{Bi} \xrightarrow[2{,}3\ \text{MeV}]{\beta} {}^{212}_{84}\text{Po} \quad \text{... (vervalreeks gaat verder)}$$

Wilsonvat

Experimenten: 9

Ioniserende straling is met het blote oog niet zichtbaar. Echter kunnen we de ioniserende werking wel zichtbaar maken door middel van een Wilsonvat.

In een wilsonvat koelen we alcohol af tot -30oC. Alcohol van deze temperatuur is oververzadigd. Dat betekend dat de damp op het punt staat van condenseren; echter gebeurt dit nog net niet.
Heb je wel eens een pvc pijpje statisch gemaakt en dit naast een straaltje water gehouden? Je ziet dan dat het water wordt afgebogen door de statische lading. Dit is ook wat er met de alcohol gebeurt in het Wilsonvat.

De ioniserende straling die vanuit de radioactieve bron in het vat komt ioniseert de zuurstof- en stikstof moleculen in het vat. Deze geladen deeltjes trekken de alcholdamp naar zich toe waardoor een condensdruppel ontstaat.
Aangezien zowel α- als β-deeltje miljoenen keren botsen, ontstaan er dus miljoenen condensdruppels, wat er voor zorgt dat je in het vat witte lijnen ziet.

Het ioniserende vermogen van γ-straling is zo laag dat dit geen zichtbaar spoor oplevert.

Begrippenlijst

In deze begrippenlijst staan een aantal begrippen kort uitgelegd. Sommige van deze begrippen staan wat uitgebreider uitgelegd in dit boekje. De definities van de begrippen in deze lijst liggen allemaal binnen de context van het onderwerp radioactiviteit en ioniserende straling. Het kan dus zijn dat sommige begrippen een iets andere betekenis hebben wanneer ze betrekking hebben op een ander onderwerp.

Absorber	Materiaal dat straling absorbeert
Absorptie	Verschijnsel 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)
Alfadeeltje (α)	Positief geladen heliumkern, bestaande uit twee protonen en twee neutronen
Alfastraling (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)	Sl-eenheid van activiteit: 1 Bq = 1 desintegratie per seconde
Besmetting	Zolang een radioactieve stof verpakt is, hoeft alleen rekening te worden gehouden met de straling die wordt uitgezonden. Wanneer de radioactieve stof zich echter kan verspreiden kan dit op andere plekken terecht komen en wordt er gesproken van een besmetting.
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
Condensatiesporen	Sporten welke worden gecreëerd door het proces waarbij de geïoniseerde moleculen condensatiekernen vormen, waardoor het gas condenseert en kleine druppeltjes vormt langs het pad van het deeltje.
Condensatorplaten	Elektrisch geleidende oppervlakken binnen een condensator waarop elektrische lading wordt opgeslagen
Curie (Ci)	Oude eenheid van activiteit: 1 Ci = 3,7□1010 Bq. Bij benadering is dit de activiteit van 1 g radium
Convergente bundel	Een bundel van straling dat zich concentreert naar een punt
Detector	Materiaal of instrument dat gevoelig is voor straling
Dichtheid	Een maat voor de hoeveelheid massa per volume-eenheid van een stof.
Divergente bundel	Een bundel van straling die zich verspreid vanuit een smal punt naar een breder gebied
Dochter isotoop	De isotoop die ontstaat wanneer een radioactieve stof is vervallen
Doordringend vermogen	Het vermogen van dat deeltje om door materie te dringen zonder daarbij te worden gestopt of sterk afgeremd
Dosis (*D*)	Geabsorbeerde stralingsenergie per kg materie, uitgedrukt in de eenheid gray (Gy)
Dosimeter	Instrument dat de ontvangen dosis registreert
Dosistempo	Dosis per tijdseenheid

Dracht (R)	Maximale afstand die een deeltje in materie aflegt
Effectieve dosis (Sv)	De stralingsdosis waarbij rekening wordt gehouden met de gevoeligheid van het weefsel waar de straling op terecht komt
Elasticiteitsmodulus	Een maat voor de stijfheid van rubber
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
Elektromagnetisch veld	Een fysiek veld dat wordt veroorzaakt door elektrisch geladen deeltjes in beweging, zoals elektrische stromen of veranderende elektrische velden
Elementair deeltje	Materiedeeltje zoals het neutron, proton, elektron, neutrino en muon
Equivalente dosis	Dosis (op orgaan/weefsel) 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	Dosismeter 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
Fluorescentiescherm	Een scherm gemaakt van fluoriserend materiaal.
Gamma-foton (γ)	Energiepakketje $E_f = h \cdot f$ in hoogenergetische elektromagnetische straling
Gammastraling (γ)	Bundel γ-fotonen

Gammaspectrum	Overzicht van de energie van de verschillende gammafotonen afkomstig uit het meten van een radioactieve stof
Geiger-Müller 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 Gy = 1 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 vervalt
Herstel	Wanneer een radioactieve stof weer in balans is
Hersteltijd	De tijd die verstrijkt voordat een radioactieve stof een balans heeft bereikt. In deze balans ontstaat er net zo veel van deze stof, als er vervalt.
Interferentie	De samen- of tegenwerking van golven op een bepaalde plaats en tijd
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
Ionisatiestroom	De stroom die ontstaat in een ionisatiekamer als gevolg van ionisaties.
Ioniserend vermogen	Het vermogen om atomen te ioniseren
Ioniserende straling	Straling die atomen of moleculen ioniseert, zoals röntgenstraling en α-, β- en γ–straling
Isotoop	Nucliden met hetzelfde aantal protonen, maar met een verschillend aantal neutronen (het atoomnummer is hetzelfde, het massanummer verschilt)

Isotopengenerator	Een isotopengenerator is een apparaat dat een langlevende radionuclide (de moederisotoop) bevat, die door verval een kortlevende radionuclide (de dochterisotoop) produceert. De kortlevende radionuclide wordt vervolgens gebruikt voor verschillende toepassingen, zoals in de nucleaire geneeskunde voor diagnostische beeldvorming en therapie
Kansproces	De gemiddelde tijd voor het verval van een instabiele atoomkern kan worden voorspeld door halfwaardetijden. Echter is de exacte tijd van verval voor individuele atoomkernen niet voorspelbaar
Kinetische energie	De energie die een deeltje heeft vanwege zijn beweging
Kosmische straling	Hoogenergetische straling uit het heelal
Kristalrooster	De regelmatige structuur waarin atomen geordend kunnen zijn
Kwadratenwet	Afname van de stralingsintensiteit I met het kwadraat van de afstand r tot de (punt)bron: $I \sim 1/r^2$.
Lading	Lading is een eigenschap van deeltjes, zoals protonen en elektronen, die verantwoordelijk is voor elektromagnetische interacties
Logaritmisch grafiekpapier	In tegenstelling tot gewoon (lineair) grafiekpapier, waarbij de afstanden op de assen lineair toenemen, neemt de afstand tussen opeenvolgende markeringen op logaritmisch grafiekpapier exponentieel toe
Lorentzkracht	De kracht van een elektromagnetisch veld op een bewegende lading

Magnetisch veld	Een fysiek veld dat wordt veroorzaakt door bewegende elektrische ladingen (zoals stroom in een draad) of door magnetische materialen zoals permanente magneten. Het magnetisch veld oefent een kracht uit op andere magnetische materialen en bewegende elektrische ladingen zoals α-deeltjes of β-deeltjes
Massagetal (A)	Aantal protonen en neutronen in een atoomkern
Massieke dracht	De dracht van een deeltje onafhankelijk van de dichtheid van een materiaal.
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 rad = 0,01 J/kg
Radioactief verval	Spontane transformatie van een instabiele kern in een andere kern of in een andere energietoestand

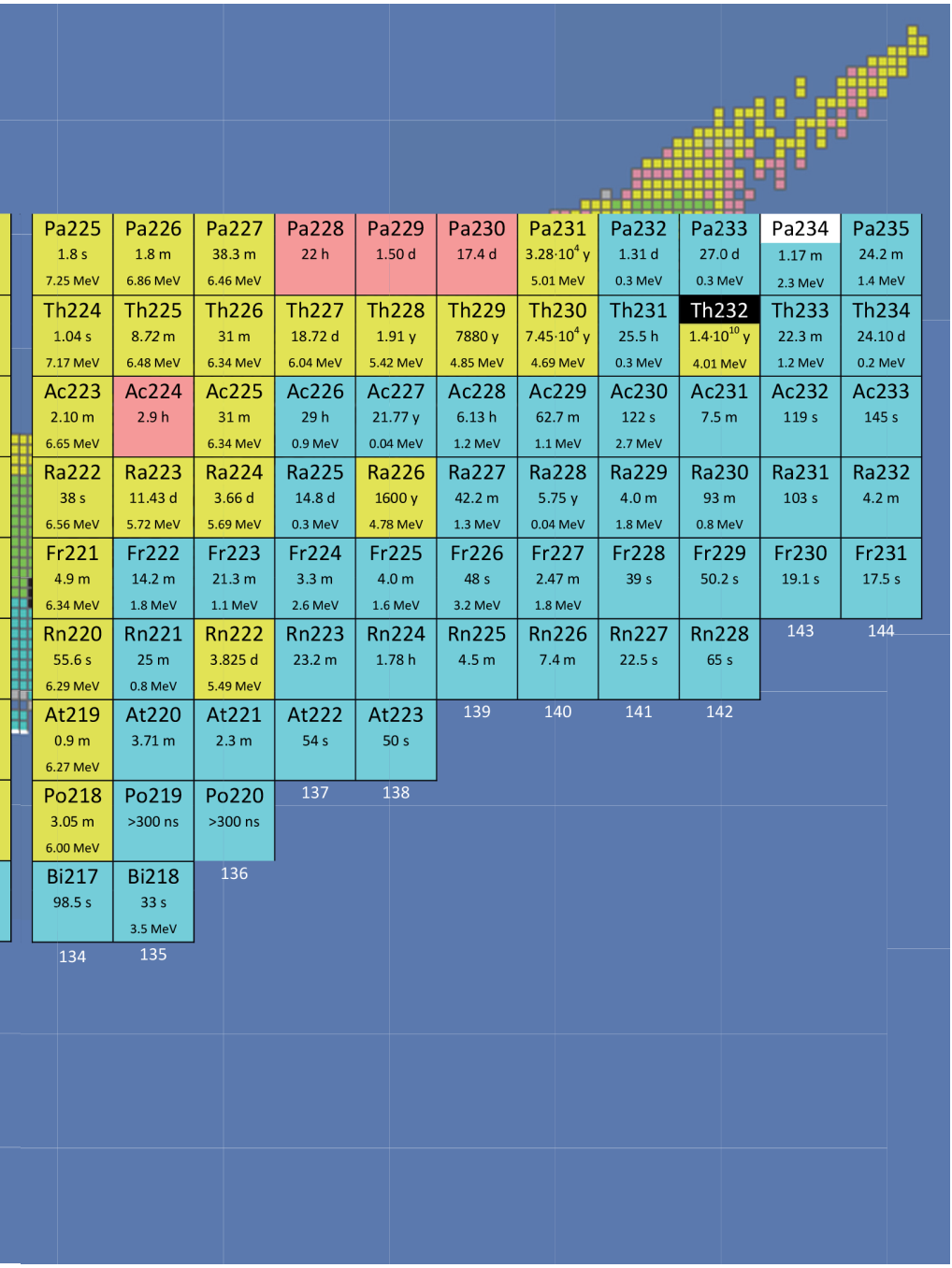
Radioactieve bron	Hoeveelheid radioactief materiaal, meestal in een gesloten omhulsel
Radioactiviteit	Vermogen van bepaalde kernen om spontaan een α- of β- deeltje of een γ-foton uit te zenden
Relativistische massa	Beschrijft hoe de massa van een object toeneemt naarmate de snelheid ervan dichter bij de lichtsnelheid komt
Relativistische snelheid	Snelheden in de buurt van lichtsnelheid waarij de klassieke wetten van Newton niet meer gelden
Relativistisch effect	Effecten die plaatsvinden doordat de klassieke wetten van Newon niet meer gelden.
Relativiteitstheorie	Beschrijft hoe ruimte, tijd en zwaartekracht werken op snelheden in de buurt van lichtsnelheid,
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 R = 2,58 x 10-4 C/kg
Röntgendiffractie	Techniek waarbij aan de hand van de verstrooiing van röntgenstraling de structuur van vaste stoffen kan worden bepaald.
Röntgenstraling	Elektromagnetische straling met een golflengte van rond de 1 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
Roosterconstante	De afstand tussen atomen geordend in een kristalrooster
Rustmassa	De massa van een object zoals gemeten wanneer het in rust is, oftewel wanneer het geen beweging heeft.

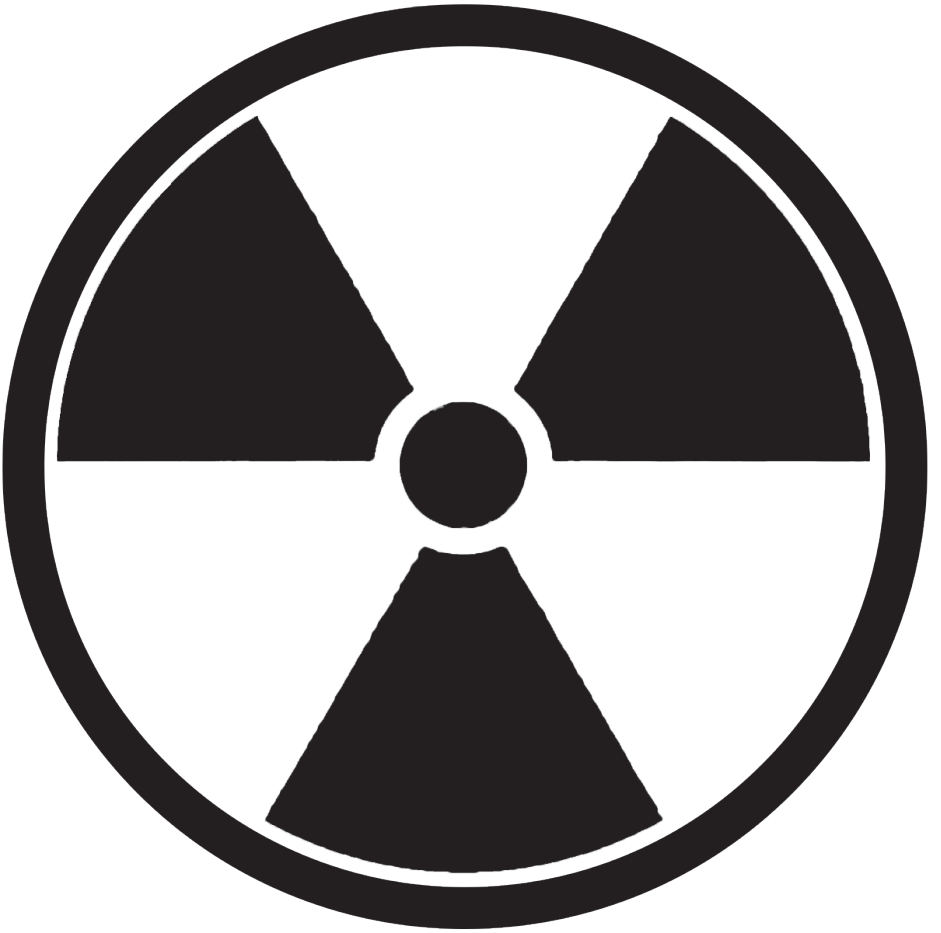
Scintillatiedetector	Detector voor ioniserende straling (vooral gevoelig voor γ-straling): door fotonen veroorzaakte lichtflitsjes (scintillaties) in een scintillatiekristal worden omgezet in spanningspulsen
Sievert (Sv)	SI-eenheid van equivalente en effectieve dosis: 1 Gy = 1 Sv voor β-, γ- en röntgenstraling, 1 Gy = 20 Sv voor α-straling
Spectrometrie	Analyseren van straling naar bijvoorbeeld golflengte, energie of frequentie
Statistische spreiding	Verwijst naar de mate waarin de waarden van verschillende metingen van elkaar verschillen.
Stralingsintensiteit	Van de activiteit van een bron meet je, door de verschillende rendementen zoals het detectorrendement en het goniometrisch rendement, nooit alles. Het deel dat je detector wel meet en registreert noem je de stralingsintensiteit.
Telrendement	De verhouding tussen het aantal deeltjes die in de detector terecht komen, en het aantal deeltjes die worden geregistreerd
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.
Veldsterkte	Sterkte van een elektrisch of magnetisch veld op een bepaald punt in dat veld

Isotopenkaart

aantal protonen										
91	Pa215 14 ms 8.09 MeV	Pa216 105 ms 7.95 MeV	Pa217 1.1 ms 10.2 MeV	Pa218 113 µs 9.62 MeV	Pa219 53 ns 9.90 MeV	Pa220 0.78 µs 9.65 MeV	Pa221 5.9 µs 9.08 MeV	Pa222 4.3 ms 8.21 MeV	Pa223 6.5 ms 8.01 MeV	Pa224 0.95 s 7.56 MeV
90	Th214 0.10 s 7.68 MeV	Th215 1.2 s 7.39 MeV	Th216 26.0 ms 7.92 MeV	Th217 237 µs 9.26 MeV	Th218 0.1 µs 9.67 MeV	Th219 1.05 µs 9.34 MeV	Th220 9.7 µs 8.79 MeV	Th221 1.68 µs 8.15 MeV	Th222 2.24 µs 7.98 MeV	Th223 0.66 s 7.32 MeV
89	Ac213 0.8 s 7.36 MeV	Ac214 8.2 s 7.22 MeV	Ac215 0.17 s 7.60 MeV	Ac216 0.44 ms 9.03 MeV	Ac217 69 ns 9.65 MeV	Ac218 1.1 µs 9.21 MeV	Ac219 11.8 µs 8.66 MeV	Ac220 26 ms 7.85 MeV	Ac221 52 ms 7.65 MeV	Ac222 5.0 s 7.01 MeV
88	Ra212 13.0 s 6.90 MeV	Ra213 2.74 m 6.62 MeV	Ra214 2.46 d 7.14 MeV	Ra215 1.67 ms 8.70 MeV	Ra216 0.18 µs 9.35 MeV	Ra217 1.6 µs 8.99 MeV	Ra218 25.6 µs 0.04 MeV	Ra219 4.0 m 8.39 MeV	Ra220 23 ms 7.46 MeV	Ra221 28 s 6.61 MeV
87	Fr211 3.10 m 6.54 MeV	Fr212 20 m	Fr213 34.6 s 6.78 MeV	Fr214 5.0 ms 8.43 MeV	Fr215 0.09 µs 9.36 MeV	Fr216 0.70 µs 9.01 MeV	Fr217 16 µs 8.32 MeV	Fr218 1.0 ms 7.87 MeV	Fr219 21 ms 7.31 MeV	Fr220 27.4 s 6.68 MeV
86	Rn210 2.4 h 6.04 MeV	Rn211 14.6 h	Rn212 24 m 6.26 MeV	Rn213 19.5 ms 8.09 MeV	Rn214 0.27 µs 9.04 MeV	Rn215 2.3 µs 8.67 MeV	Rn216 0.3 ms 7.80 MeV	Rn217 0.54 ms 7.74 MeV	Rn218 35 ms 7.07 MeV	Rn219 3.96 s 6.82 MeV
85	At209 5.4 h	At210 8.3 h	At211 7.22 h	At212 314 ms 7.88 MeV	At213 0.11 µs 9.08 MeV	At214 0.56 µs 8.79 MeV	At215 0.1 ms 8.03 MeV	At216 0.3 ms 7.80 MeV	At217 32.3 ms 7.07 MeV	At218 ~2 s 6.69 MeV
84	Po208 2.898 y 5.12 MeV	Po209 102 y 4.88 MeV	Po210 138.38 d 5.30 MeV	Po211 0.516 s 7.45 MeV	Po212 0.3 µs 8.79 MeV	Po213 4.2 µs 8.38 MeV	Po214 164 µs 7.67 MeV	Po215 1.78 ms 7.39 MeV	Po216 0.15 s 6.78 MeV	Po217 1.53 s 6.54 MeV
83	Bi207 31.55 y	Bi208 $3.68 \cdot 10^5$ y	Bi209 $1.9 \cdot 10^{19}$ y 3.14 MeV	Bi210 5.013 d 1.2 MeV	Bi211 2.17 m 6.62 MeV	Bi212 60.60 m 2.3 MeV	Bi213 45.59 m 1.4 MeV	Bi214 19.9 m 1.5 MeV	Bi215 7.7 m	Bi216 2.17 m
82	Pb206 24.1 %	Pb207 22.1 %	Pb208 52.4 %	Pb209 3.253 h 0.6 MeV	Pb210 22.3 y 0.02 MeV	Pb211 36.1 m 1.4 MeV	Pb212 10.64 h 0.3 MeV	Pb213 10.2 m	Pb214 26.8 m 0.7 MeV	
	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133

aantal neutronen


Pa225 1.8 s 7.25 MeV
Pa226 1.8 m 6.86 MeV
Pa227 38.3 m 6.46 MeV
Pa228 22 h
Pa229 1.50 d
Pa230 17.4 d
Pa231 3.28·10^4 y 5.01 MeV
Pa232 1.31 d 0.3 MeV
Pa233 27.0 d 0.3 MeV
Pa234 1.17 m 2.3 MeV
Pa235 24.2 m 1.4 MeV
Th224 1.04 s 7.17 MeV
Th225 8.72 m 6.48 MeV
Th226 31 m 6.34 MeV
Th227 18.72 d 6.04 MeV
Th228 1.91 y 5.42 MeV
Th229 7880 y 4.85 MeV
Th230 7.45·10^4 y 4.69 MeV
Th231 25.5 h 0.3 MeV
Th232 1.4·10^10 y 4.01 MeV
Th233 22.3 m 1.2 MeV
Th234 24.10 d 0.2 MeV
Ac223 2.10 m 6.65 MeV
Ac224 2.9 h
Ac225 31 m 6.34 MeV
Ac226 29 h 0.9 MeV
Ac227 21.77 y 0.04 MeV
Ac228 6.13 h 1.2 MeV
Ac229 62.7 m 1.1 MeV
Ac230 122 s 2.7 MeV
Ac231 7.5 m
Ac232 119 s
Ac233 145 s
Ra222 38 s 6.56 MeV
Ra223 11.43 d 5.72 MeV
Ra224 3.66 d 5.69 MeV
Ra225 14.8 d 0.3 MeV
Ra226 1600 y 4.78 MeV
Ra227 42.2 m 1.3 MeV
Ra228 5.75 y 0.04 MeV
Ra229 4.0 m 1.8 MeV
Ra230 93 m 0.8 MeV
Ra231 103 s
Ra232 4.2 m
Fr221 4.9 m 6.34 MeV
Fr222 14.2 m 1.8 MeV
Fr223 21.3 m 1.1 MeV
Fr224 3.3 m 2.6 MeV
Fr225 4.0 m 1.6 MeV
Fr226 48 s 3.2 MeV
Fr227 2.47 m 1.8 MeV
Fr228 39 s
Fr229 50.2 s
Fr230 19.1 s
Fr231 17.5 s
143
144
Rn220 55.6 s 6.29 MeV
Rn221 25 m 0.8 MeV
Rn222 3.825 d 5.49 MeV
Rn223 23.2 m
Rn224 1.78 h
Rn225 4.5 m
Rn226 7.4 m
Rn227 22.5 s
Rn228 65 s
139
140
141
142
At219 0.9 m 6.27 MeV
At220 3.71 m
At221 2.3 m
At222 54 s
At223 50 s
137
138
Po218 3.05 m 6.00 MeV
Po219 >300 ns
Po220 >300 ns
136
Bi217 98.5 s
Bi218 33 s 3.5 MeV
134
135



www.stralenpracticum.nl