

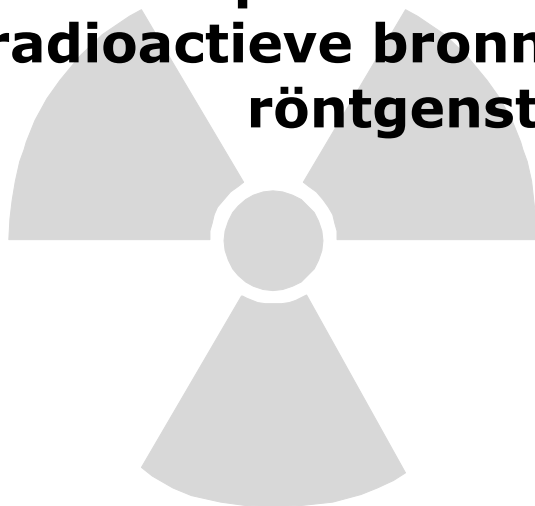


Universiteit Utrecht

Faculteit Bètawetenschappen

Freudenthal Instituut voor Didactiek van
Wiskunde en Natuurwetenschappen

Experimenten met radioactieve bronnen en röntgenstraling



**Ioniserende Stralen Practicum
ISP | 2013**

Informatie

Het *Ioniserende Stralen Practicum* (ISP) biedt leerlingen op scholen voor HAVO en VWO in Nederland de mogelijkheid tot het uitvoeren van experimenten met radioactieve bronnen en röntgenstraling die aansluiten op het examenprogramma natuurkunde. Daartoe beschikt het ISP over een drietal mobiele practica met experimenten die ter plaatse op de scholen worden opgebouwd. Daarnaast is er een practicumzaal in het Minnaertgebouw van de Universiteit Utrecht waar leerlingen van scholen uit de regio Utrecht de experimenten kunnen uitvoeren. De scholen uit de regio Zeeland kunnen daarvoor terecht op Het Goese Lyceum.

Stralingsveiligheid

Radioactieve bronnen en röntgentoestellen zenden straling uit, waardoor leerlingen in het ISP een stralingsdosis oplopen. Deze stralingsdosis is vele malen lager dan de wettelijke stralingsnorm.

De stralingsdosis bij het ISP is klein omdat er alleen gewerkt wordt met zwakke, afgeschermd radioactieve bronnen en röntgentoestellen. Bovendien is het radioactieve materiaal ingewalst in metaal of plastic, zodat het niet kan vrijkomen. De radioactieve bronnen en röntgentoestellen van het ISP voldoen aan de eisen van de Arbeidsinspectie, en worden regelmatig gecontroleerd op veiligheid.

Bij de start van het practicum krijgen de leerlingen van de practicumleider een instructie over veilig werken met radioactieve bronnen en röntgentoestellen: zorgen voor voldoende afstand, zorgen voor voldoende afscherming en beperken van de tijd dat de radioactieve bron of het röntgentoestel in gebruik is. Deze veiligheidsmaatregelen zijn terug te vinden op de werkbladen die de leerlingen gebruiken bij het uitvoeren van de experimenten. En de practicumleider let tijdens de uitvoering van het practicum goed op het naleven van die veiligheidsmaatregelen.

De practicumleider draagt een dosimeter. Daarop is af te lezen hoe groot de stralingsdosis tijdens het practicum geweest is.

Dankzij deze veiligheidsmaatregelen en de professionele begeleiding door de practicumleiders verzorgt het ISP al meer dan dertig jaar zonder problemen jaarlijks het stralingspracticum voor zo'n 18 duizend leerlingen op een groot aantal scholen voor voortgezet onderwijs in Nederland.

Ioniserende Stralen Practicum | ISP

Experimenten met radioactieve bronnen en röntgenstraling

© 2013 – Freudenthal Instituut voor Didactiek van Wiskunde en Natuurwetenschappen (Fisme), Faculteit Bètawetenschappen, Universiteit Utrecht

A Princetonplein 5, 3584 CC Utrecht

T 030 253 1178 | 4258

E science.isp@uu.nl

W www.fisme.science.uu.nl/isp

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. Met dit boekje kun je je op het uitvoeren van die experimenten voorbereiden. Bij elk experiment staat kort iets over de theorie, het doel, de meetopstelling en enkele praktijktoepassingen. Op de website van het ISP vind je via de pagina 'achtergrondinformatie' een samenvatting van de theorie over radioactiviteit en röntgenstraling, een overzicht van de effecten van ioniserende straling op het menselijk lichaam en meer informatie over de praktijktoepassingen van ioniserende straling.

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 practicum-leider.

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 daarmee.

Utrecht, september 2013

De practicumleiders: Ad Beune, Rob van Rijn, Koos Kortland en Ellen van Tilburg

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.fisme.science.uu.nl/isp > leerlingen > achtergrondinformatie

Inhoud

Experimenten

1	Dracht van α -deeltjes in lucht	3
2	Radioactief verval van radon-220 (experiment 2A en 2B)	4
3	Statistische spreiding	5
4	Terugstrooiing van β -deeltjes	6
5	Absorptie van β -deeltjes in aluminium en perspex	7
6	Geiger-Müller telbuis	8
7	Energie van β -deeltjes	9
8	Stralingsintensiteit en afstand	10
9	Wilsonvat	11
10	Minigenerator: de bariumkoe	12
11	Opsporen van lood	14
12	Absorptie van γ -straling door lood	15
13	Kwalitatieve identificatie van radioactieve bronnen	16
14	Röntgenapparaat	17
15	Ionisatie van lucht door röntgenstraling	18
16	Bragg-reflectie	19
17	Gamma-spectrometrie	20
18	Elasticiteitsmodulus van rubber	22
19	Dracht van α -deeltjes en luchtdruk	23
20	Radioactief verval van protactinium-234	24
21	Ouderdomsbepaling van radioactieve bronnen	25
22	Absorptiecoëfficiënten van aluminium voor γ -straling	26
23	Röntgen-computertomografie	28
	Isotopenkaart	30
	Enkellogaritmisch grafiekpapier	31
	Begrippenlijst	32
	Stralingsrisico	37
	Stralingsbelasting	38

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, 10 en 19 zijn niet beschikbaar in Utrecht. De experimenten 3, 4, 6, 11, 17, 18, 19, 22 en 23 zijn niet beschikbaar in Goes.

Indeling

De experimenten zijn ingedeeld in de volgende vier groepen:

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

Dracht van α -deeltjes in lucht

Inleiding

In lucht verliezen α -deeltjes (heliumkernen) geleidelijk hun energie bij interacties met stikstof- en zuurstofmoleculen. Bij zo'n interactie draagt een α -deeltje een deel van zijn energie over door het stikstof- of zuurstofmolecuul te ioniseren. De energie die nodig is om een elektron uit een stikstof- of zuurstofmolecuul vrij te maken bedraagt gemiddeld 32 eV. De door de α -deeltjes bij deze ionisaties gevormde lading (in de vorm van elektronen en ionen) is in een *ionisatiekamer* als een elektrische stroom te meten.

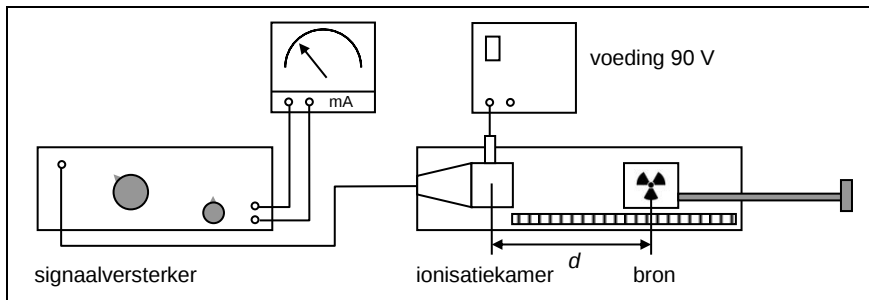
Na het afleggen van een bepaalde afstand heeft een α -deeltje al zijn energie overgedragen. Het vangt daarna twee vrije elektronen in, en wordt daarmee een neutraal heliumatoom. Het is dan zijn ioniserend vermogen kwijt geraakt. De afstand waarop dat het geval is noemen we de *dracht* van de α -deeltjes.

Doel

Metten van de dracht in lucht van α -deeltjes uit een bron met radium-226.

Opstelling

De opstelling bestaat uit een bron met radium-226 en een ionisatiekamer. De afstand tussen de bron en de ionisatiekamer is instelbaar. De stroomsterkte in de ionisatiekamer is via een signaalversterker af te lezen op een stroommeter.



Toepassingen

In de meest gebruikte soorten rookmelders zit een radioactieve bron die α -deeltjes uitzendt. De dracht van deze α -deeltjes in lucht neemt af bij rookontwikkeling. In dat geval geeft de rookmelder een alarmsignaal af.

Bij de productie van plastic artikelen (bijvoorbeeld kunstgarens) raken deze elektrostatisch geladen. Dat belemmert het productieproces. Dit is te verhelpen door de omringende lucht te ioniseren met een α -bron. De dracht van de α -deeltjes bepaalt waar deze bron moet komen te staan.

Radioactief verval van radon-220

Inleiding

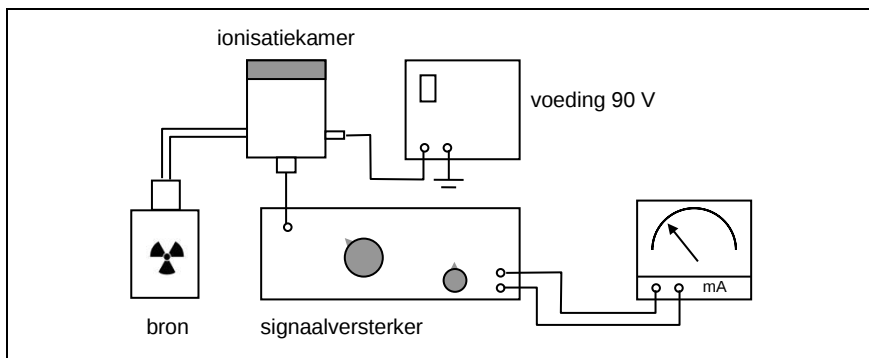
Sommige stoffen in de natuur zijn niet stabiel: ze vervallen onder uitzending van ioniserende straling tot andere stoffen. Zo vervalt radium-226 tot het stabiele lood-206. Het is niet te voorspellen wanneer een bepaalde instabiele atoomkern vervalt. Maar bij een groot aantal instabiele kernen ontstaat wel een regelmaat in het verval: in een bepaalde tijdsduur vervalt steeds de helft van de aanwezige instabiele kernen. Die tijdsduur noemen we de *halveringstijd*. De waarde van de halveringstijd hangt af van het nuclide, en loopt uiteen van onderdelen van een seconde tot miljoenen jaren.

Doel

Bepalen van de halveringstijd van het gasvormige radon-220.

Opstelling

De opstelling bestaat uit een ionisatiekamer die via een slang verbonden is met een plastic flesje met thorium-232. In het flesje zit het gasvormige radon-220: een vervalproduct van het thorium-232. Het radongas wordt in de ionisatiekamer gespoten. De door het radon uitgezonden α -straling ioniseert daar de lucht. De bij deze ionisaties gevormde lading is als een elektrische stroom via een signaalversterker te meten met een stroommeter (experiment 2A) of een x,t -schrijver (experiment 2B).



Toepassingen

Bij *ouderdomsbepaling* met de *koolstofdateringsmethode* wordt de activiteit van het radioactieve koolstof-14 in een voorwerp gemeten. De halveringstijd van deze koolstofisotoop is 5730 jaar. De gemeten activiteit van het koolstof-14 levert samen met de bekende halveringstijd de ouderdom van het voorwerp. Dit is een veel gebruikte dateringsmethode in de archeologie (zie ook experiment 21).

Radioactieve nucliden met een korte halveringstijd worden als *tracer* (spoorzoeker) gebruikt bij medisch onderzoek naar bijvoorbeeld hartafwijkingen, hersentumoren en schildklierandoeningen (zie ook experiment 10).

Statistische spreiding

Inleiding

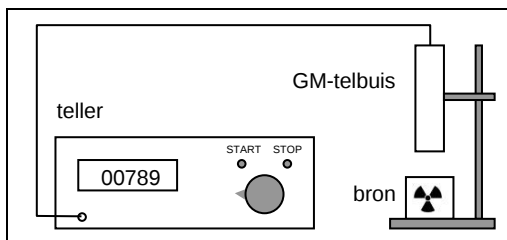
Bij een radioactieve bron met een lange halveringstijd is het aantal instabiele kernen dat per tijdseenheid verval (vrijwel) constant in de loop van de tijd. Maar radioactiviteit is een statistisch verschijnsel. Het is niet te voorspellen welke instabiele atoomkern wanneer verval. Elke kern heeft een bepaalde kans om te vervallen. Het aantal kernen dat per tijdseenheid verval is daarom niet echt constant, maar varieert rond een bepaald gemiddelde. Als dit gemiddelde de waarde N heeft, dan is de grootte van de variaties volgens de statistiek-theorie ongeveer $\sqrt{N}$. Het met een telbuis gemeten aantal pulsen per tijdseenheid zal dan eenzelfde statistisch karakter hebben.

Doel

- Aantonen van het statistisch karakter van het aantal gemeten pulsen per tijdseenheid.
- Nagaan of de variatie in het gemiddelde aantal gemeten pulsen per tijdseenheid N de waarde $\sqrt{N}$ heeft.

Opstelling

De opstelling bestaat uit een Geiger-Müller telbuis met pulsenteller en een bron met radium-226.



Toepassingen

Er zijn geen praktijktoepassingen van het statistisch karakter van radioactiviteit. Dit experiment laat echter wel zien dat je een voldoende groot aantal pulsen moet tellen om een bepaalde meetnauwkeurigheid te bereiken. Dat blijkt uit het volgende voorbeeld. Bij een gemeten aantal van 100 pulsen zal de afwijking $\sqrt{100} = 10$ pulsen zijn. Dat levert een meetnauwkeurigheid van $10/100 = 0,10$ ofwel 10%. Bij een meting van 10.000 pulsen bereken je op dezelfde manier een meetnauwkeurigheid van 1%. Dus: hoe groter het gemeten aantal pulsen is, des te nauwkeuriger is het meetresultaat.

Terugstrooiing van β -deeltjes

Inleiding

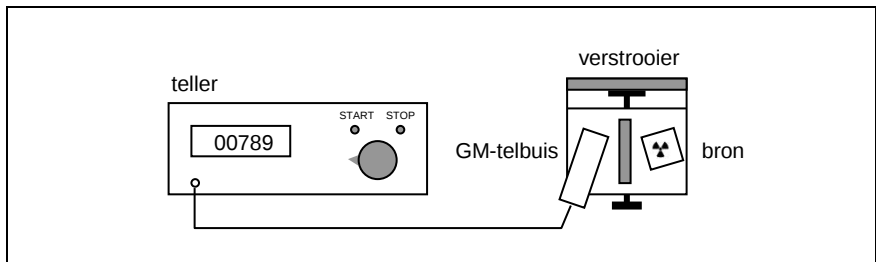
Als β -deeltjes op een materiaal invallen, kan absorptie optreden. Een andere mogelijkheid is het optreden van *verstrooiing* door elastische botsingen van de β -deeltjes tegen de elektronen in het materiaal. Bij zo'n botsing veranderen de snelheid en de bewegingsrichting van de β -deeltjes. Hoe hoger het atoomnummer Z van het materiaal is, des te groter is de kans dat het elektron tegen een atoom botst en verstrooid wordt. Als de bewegingsrichting van het β -deeltje daarbij ruwweg omkeert, is sprake van *terugstrooiing*.

Doel

Bepalen van het verband tussen het aantal teruggestrooide β -deeltjes en het atoomnummer van het materiaal dat voor verstrooiing zorgt.

Opstelling

De opstelling bestaat uit een Geiger-Müller telbuis met pulsenteller en een bron met de β -straler strontium-90. Tussen de bron en de telbuis staat een metalen scheidingswand. Als verstrooier zijn platen van verschillend materiaal in de opstelling te plaatsen.



Toepassingen

Met deze terugstrooiing of *back-scattering* van β -deeltjes aan materialen is onder andere de dikte van de oppervlaktelaag op een vinyl vloerbedekking te meten. Deze meting kan continu plaatsvinden. Het productieproces wordt gestuurd door een signaal dat afhangt van het aantal teruggestrooide deeltjes. Dit aantal verandert als de dikte van de oppervlaktelaag verandert. Het productieproces wordt dan automatisch bijgesteld tot het aantal teruggestrooide deeltjes weer dezelfde waarde heeft.

Op een vergelijkbare manier is zo de dikte van de asfaltlaag bij wegwerkzaamheden te meten.

Absorptie van β -deeltjes in aluminium en perspex

Inleiding

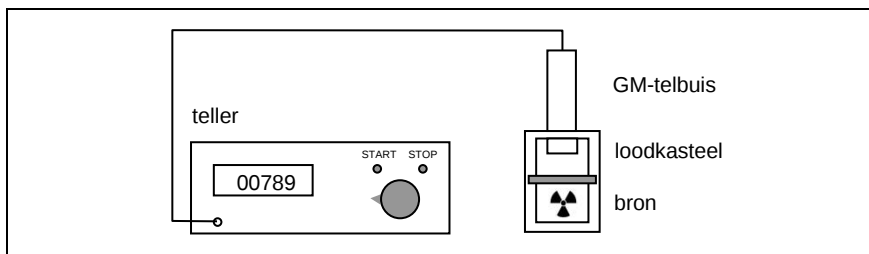
In materie verliezen β -deeltjes hun energie door wisselwerking met de atomen van het materiaal, bijvoorbeeld doordat ze deze atomen ioniseren. De door een radioactieve stof uitgezonden β -deeltjes hebben niet allemaal dezelfde energie. Hoe groter hun energie is, des te dieper kunnen ze in het materiaal doordringen. Maar deze 'indringdiepte' hangt ook af van de dichtheid van het materiaal. De maximale afstand waarover ze in het materiaal kunnen doordringen noemen we de *dracht* van de β -deeltjes. Als de dikte van het materiaal kleiner is dan die dracht, wordt een deel van de β -deeltjes doorgelaten.

Doel

- Meten van het verband tussen de massa per oppervlakte-eenheid (het product van de dikte en de dichtheid) van het absorberend materiaal en de intensiteit van de doorgelaten β -straling.
- Bepalen van de universele dracht en de dracht van β -deeltjes in aluminium en perspex.
- Bepalen van de maximale energie van β -deeltjes uit een bron met strontium-90.

Opstelling

De opstelling bestaat uit een Geiger-Müller telbuis met pulsenteller. De telbuis is ingebouwd in een loodkasteel met een strontium-90 bron. Tussen de bron en de telbuis zijn plaatjes aluminium en perspex in het loodkasteel te schuiven.



Toepassingen

Het verband tussen materiaaldikte en de intensiteit van de doorgelaten β -straling is bruikbaar in de industrie bij onder andere het vullen van flessen met vloeistof en het meten en regelen van de dikte van papier en plasticfolie tijdens het productieproces.

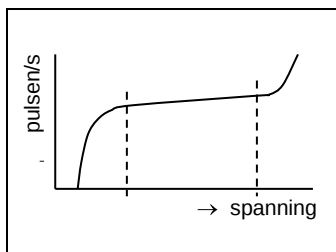
Daarnaast maakt de beperkte dracht van β -deeltjes in aluminium en perspex deze lichte materialen geschikt voor gebruik als afscherming van β -bronnen in het kader van stralingsbescherming.

Geiger-Müller telbuis

Inleiding

De Geiger-Müller telbuis bestaat uit een cilinder die gevuld is met gas onder een lage druk. In de cilinder zit, geïsoleerd van de wand, een metalen draad. De draad is aangesloten op de positieve pool van een spanningsbron, de cilinderwand is aangesloten op de negatieve pool.

Als een stralingsdeeltje door een dun venster de cilinder binnenkomt, veroorzaakt het ionisatie van een aantal gasatomen. Er ontstaan dan positieve ionen en vrije elektronen. De ionen worden aangetrokken door de cilinderwand. De elektronen bewegen naar de positief geladen draad. Daarbij krijgen de elektronen een grote snelheid, waardoor ze in staat zijn om door botsingen met gasatomen nieuwe ionen en elektronen te vormen. Dit ionisatie-proces herhaalt zich vele malen, zodat een lawine- of sneeuwbaaleffect optreedt. Dat levert een elektrische puls op de uitgang van de telbuis. Die puls is te registreren met een teller.



Het teltempo van een Geiger-Müller telbuis is als functie van de buisspanning weergegeven in het diagram hiernaast. 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*.

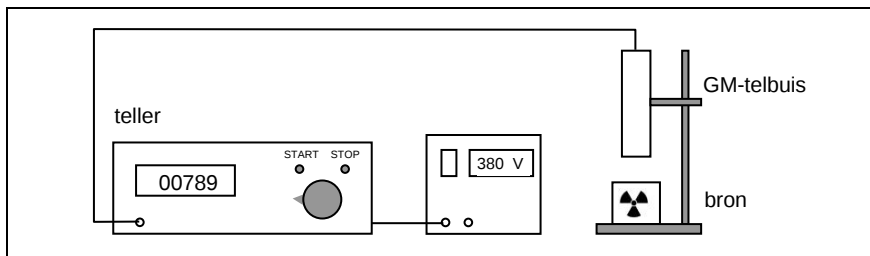
De telbuis detecteert slechts een deel van de invallende straling. Het *tel-rendement* van de telbuis geeft aan hoe groot dat deel is.

Doel

Bepalen van de werkspanning en het tel-rendement van een Geiger-Müller telbuis.

Opstelling

De opstelling bestaat uit een Geiger-Müller telbuis met pulsenteller en een bron met strontium-90. De telbuis is aangesloten op een variabele hoogspanningsbron.



Toepassingen

De Geiger-Müller telbuis is een veel gebruikt meetinstrument voor het opsporen van radioactieve besmettingen.

Op de ISP website staat aanvullende informatie over de werking van deze stralingsdetector:
www.fisme.science.uu.nl/isp > leerlingen > achtergrondinformatie > Geiger-Müller telbuis

Energie van β -deeltjes

Inleiding

Bewegende geladen deeltjes ondervinden in een magnetisch veld een kracht: de *lorentzkracht*. Deze lorentzkracht veroorzaakt een kromming van de baan waarlangs de deeltjes bewegen. Bij een bewegingsrichting loodrecht op de richting van een homogeen magnetisch veld is deze baan cirkelvormig. De lorentzkracht F_L levert de voor deze cirkelbeweging benodigde middelpuntzoekende kracht F_{mpz} . Met dat gegeven is de snelheid v , en daarmee de energie van de deeltjes te bepalen uit de straal r van de cirkelbaan:

$$F_L = F_{mpz} \rightarrow B \cdot q \cdot v = \frac{m \cdot v^2}{r} \rightarrow v = \frac{B \cdot q \cdot r}{m}$$

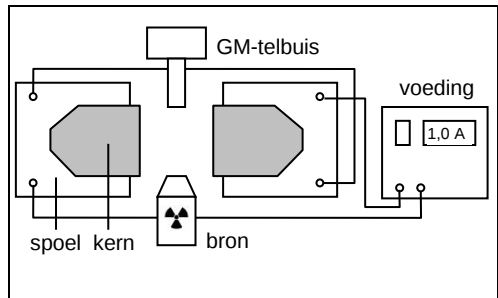
In deze formule is B de sterkte van het magnetisch veld, q de lading en m de massa van de deeltjes.

Doel

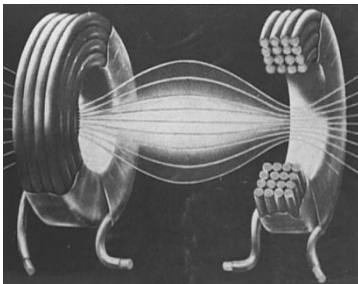
Bepalen van de meest voorkomende snelheid en de maximale energie van de β -deeltjes uit een bron met strontium-90.

Opstelling

De opstelling bestaat uit een tweetal spoelen op een kern met een U-vorm. Een stroom door de spoelen zorgt voor een homogeen magnetisch veld tussen de polen van deze kern. De bron met strontium-90 stuurt een bundel β -deeltjes dit magnetisch veld in.



Toepassingen



De afbuiging van geladen deeltjes in een magnetisch veld heeft veel toepassingen, onder andere in het cyclotron, de massaspectrograaf en de 'magnetische fles' (zie de figuur hiernaast). In zo'n fles zijn geladen deeltjes voor een korte periode op te sluiten. Hetzelfde opsluitingsprincipe wordt gebruikt in een kernfusiereactor om het plasma van geladen deeltjes (deuterium- en tritiumkernen) binnen de reactor te houden.

Stralingsintensiteit en afstand

Inleiding

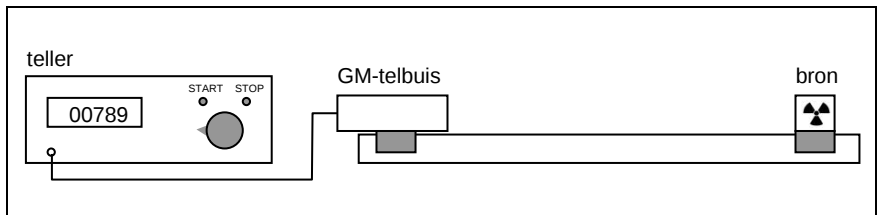
Als de afstand tussen een stralingsbron en een ontvanger toeneemt, neemt de stralingsintensiteit op de plaats van de ontvanger af. Dit geldt voor bijvoorbeeld licht- en geluidbronnen, en ook voor radioactieve bronnen.

Doel

Metten van het verband tussen de stralingsintensiteit en de afstand tot een puntvormige radioactieve bron.

Opstelling

De opstelling bestaat uit een Geiger-Müller telbuis met pulsenteller en een bron met strontium-90. De afstand tussen de telbuis en de bron is instelbaar.



Toepassingen

De stralingsdosis die iemand oploopt bij het werken met radioactieve stoffen blijft zo laag mogelijk door de verblijftijd in de buurt van de bron te verkleinen en/of door de afstand tot de bron te vergroten. Bij het werken met radioactieve stoffen gebruikt een stralingswerker daarom vaak *handling tools* (mechanische handen).

Wilsonvat

Inleiding

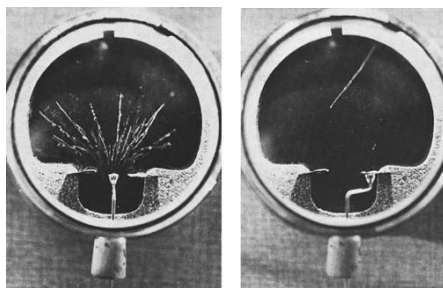
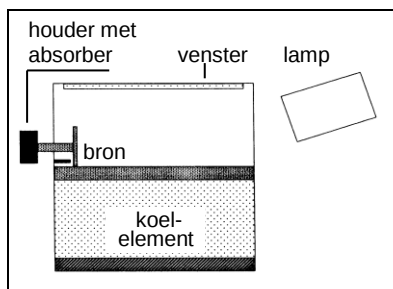
Met onze zintuigen kunnen we geen ioniserende straling waarnemen. Met een expansievat of met een Wilsonvat kan dat wel: α - en β -deeltjes laten daarin zichtbare sporen achter. Die deeltjes ioniseren langs hun baan stikstof- en zuurstofmoleculen in de lucht. Deze ionen doen dienst als condensatiekernen voor de oververzadigde water- of alcohol damp in het vat. De baan van de deeltjes is dan zichtbaar als een condensatiespoor. In een expansievat ontstaat een dergelijke oververzadiging door plotselinge uitzetting van de lucht in het vat. Daarbij koelt de lucht snel af, waardoor de damp in die lucht oververzadigd raakt en rond de geïoniseerde stikstof- en zuurstofmoleculen condenseert tot kleine druppels. Bij een juiste manier van belichten zijn die druppeltjes goed zichtbaar. Bij het continue Wilsonvat ontstaat de oververzadiging door de bodem te koelen met een thermo-elektrisch koelelement.

Doel

Waarnemen van de condensatiesporen veroorzaakt door de α - en β -deeltjes uit een bron met radium-226 en de vervalproducten daarvan.

Opstelling

De opstelling bestaat uit een continu Wilsonvat met een radium-226 bron. Een lamp buiten het Wilsonvat zorgt voor een goede belichting.



Radium-226 zendt α - en β -deeltjes uit. Op de linkerfoto van het Wilsonvat zijn de sporen van de α -deeltjes goed zichtbaar. Op de rechterfoto is de bron afgeschermd door een dun plaatje aluminium (dikte 0,2 mm). De sporen van de β -deeltjes zijn zo zwak dat ze niet meer op de foto te zien zijn. Het op deze foto wel zichtbare spoor wordt veroorzaakt door achtergrondstraling.

Toepassingen

Foto's van deeltjessporen in detectoren als een expansievat of bellenvat leveren informatie over de bouw van atoomkernen en over de wisselwerking tussen elementaire deeltjes bij onderlinge botsingen. Uit de lengte van het condensatiespoor en uit de kromming van de baan in een magnetisch veld is af te leiden om welk soort deeltje het gaat en welke eigenschappen het heeft.

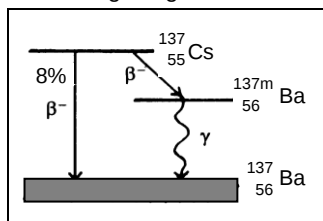
Op de ISP website staat een foto van de condensatiesporen in een wilsonvat:
www.fisme.science.uu.nl/isp > leerlingen > achtergrondinformatie > wilsonvat

Minigenerator: de bariumkoe

Inleiding

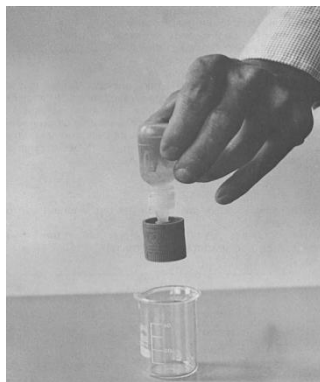
Het vervalproduct van sommige radioactieve nucliden is zelf ook weer radioactief. Dit verschijnsel wordt gebruikt in de minigenerator met cesium-137.

Van de instabiele cesiumkernen vervalft 8% rechtstreeks onder uitzenden van β -straling tot het stabiele barium-137. Voor de andere 92% van de kernen vervalft cesium-137 in twee stappen. Eerst vervalft het onder uitzenden van β -straling tot barium-137m. De letter 'm' geeft aan dat het hier om een *isomere* toestand van de bariumnucleus gaat. Dat is een toestand waarin de kern aangeslagen is: de kern bezit meer energie dan in de normale grondtoestand het geval is. Daarna raakt de kern in een tweede vervalstap deze energie kwijt door het uitzenden van γ -straling (een γ -foton), en vervalft daarmee tot het stabiele barium-137. Het volledige vervalproces van cesium-137 is weergegeven in het vervalschema hiernaast.



De halveringstijd van cesium-137 is 30 jaar. Tijdens het uitvoeren van het experiment is daardoor de hoeveelheid cesium-137 (vrijwel) constant. In de minigenerator heerst onder normale omstandigheden een evenwicht. Dan worden er per seconde evenveel atomen barium-137m gevormd (uit cesium-137) als er vervallen (naar barium-137). De minigenerator zendt dan β - en γ -straling uit.

Als we echter – zoals op de foto hiernaast – een zoutzuuroplossing door de minigenerator persen, lost het aanwezige barium-137m en barium-137 op, en verdwijnt met het zoutzuur uit de minigenerator. De 'koe' met cesium-137 staat dus zijn 'melk' met barium-137m en barium-137 af. De 'melk' is vanwege het barium-137m radioactief, en zendt bij verval γ -straling uit. De 'koe' zendt na het melken eerst alleen β -straling uit door het verval van cesium-137. Het uitzenden van γ -straling door de 'koe' is namelijk gestopt, want het barium-137m is eruit verdwenen. Daardoor is de activiteit van de 'koe' afgenomen. Uit het β -verval van cesium-137 ontstaat in de 'koe' weer nieuw barium-137m, dat weer γ -straling gaat uitzenden. De 'koe' herstelt zich en maakt weer 'melk' aan tot het oude evenwicht bereikt is.

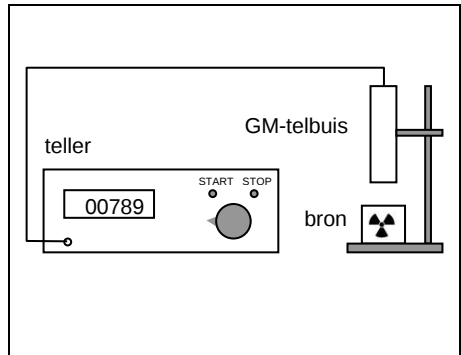


Doel

- Bepalen van de halveringstijd van barium-137m uit het afnemen van de activiteit van de 'melk'.
- Bepalen van de hersteltijd van de minigenerator uit het toenemen van de activiteit van de 'koe' nadat hij gemolken is.

Opstelling

De opstelling bestaat uit een Geiger-Müller telbuis met pulsen-teller, een minigenerator met cesium-137 (de 'koe'), een flesje met een zoutzuuroplossing voor het melken van de 'koe' en een opvangbakje voor de 'melk'. Op de eerdere foto zie je van boven naar beneden het flesje met de zoutzuuroplossing, de minigenerator en het opvangbakje tijdens het melken van de 'koe'.



Toepassingen

Voor wetenschappelijk en medisch onderzoek bij planten, mensen en andere dieren gebruikt men liefst radioactieve nucliden met een korte halveringstijd. Door deze korte halveringstijd is de activiteit van deze nucliden relatief hoog. Het onderzoek is dan uit te voeren met een vrij kleine hoeveelheid radioactief materiaal. Daardoor blijft de stralingsbelasting van het organisme laag. Dit soort radioactieve nucliden zijn echter – vanwege het snelle verval – moeilijk verkrijgbaar. De minigenerator of 'radioactieve koe' biedt dan een oplossing. Deze 'koe' is op elk gewenst moment kort voor de uitvoering van het onderzoek te melken en levert dan het radioactieve nuclide met de gewenste eigenschappen.

Het cesium-137 in de minigenerator bij dit experiment heeft een halveringstijd van 30 jaar. Deze minigenerator is dus lange tijd bruikbaar als bron van het kortlevende barium-137m. Op eenzelfde manier is het langlevende molybdeen-99 bruikbaar als bron van de kortlevende γ -straler technetium-99m. Dit soort γ -straling uitzendende nucliden met een korte halveringstijd zijn in gebruik als *tracer* (spoorzoeker) bij onderzoek naar bijvoorbeeld hartafwijkingen (thallium-201), hersentumoren (technetium-99m) en schildklieraandoeningen (jood-123).

Op de ISP website staat aanvullende informatie en een computermodel waarmee je de activiteit van het moeder-nuclide (de 'koe') en het dochter-nuclide (de 'melk') bij zo'n generator van kortlevende nucliden kunt onderzoeken:

www.fisme.science.uu.nl/isp > leerlingen > achtergrondinformatie > moeder-dochterverval

Opsporen van lood

Inleiding

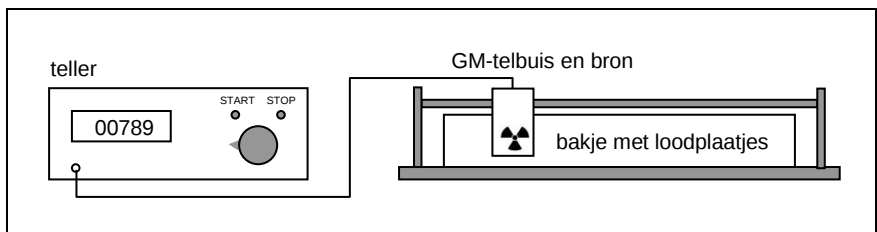
Een bundel γ -straling die invalt op een plaatje lood wordt gedeeltelijk geabsorbeerd. Hoe groter de dikte van de plaat is, des te groter is de absorptie in het lood en des te kleiner is de intensiteit van de doorgelaten straling. Door de intensiteit van de invallende en doorgelaten straling te vergelijken, is de plaats en de dikte van het absorberende materiaal te bepalen.

Doel

- Bepalen van de plaats van enkele in een voorwerp verborgen loodplaatjes.
- Schatten en berekenen van de dikte van deze loodplaatjes.

Opstelling

De opstelling bestaat uit een rechthoekig zwart bakje waarin enkele loodplaatjes zijn verborgen. In de verschuifbare bronhouder zit aan de ene kant van het bakje een bron met kobalt-60 en aan de andere kant een Geiger-Müller telbuis. De telbuis is aangesloten op een pulsenteller.



Toepassingen

Absorptie van γ -straling door materialen wordt in de industrie gebruikt voor het meten en regelen van de dikte van bijvoorbeeld staalplaten tijdens het productieproces, het meten van het vloeistofniveau in vaten, het vullen van flessen, het opsporen van verstoppingen in pijpleidingen, het controleren van de kwaliteit van lasnaden in constructies enzovoort. Bij al deze toepassingen leidt een veranderende materiaaldikte tot een detecteerbare verandering in de intensiteit van de doorgelaten straling.

Absorptie van γ -straling door lood

Inleiding

Na het invallen van een bundel γ -straling op materie (bijvoorbeeld lood) is sprake van een wisselwerking tussen straling en materie. Bij die wisselwerking neemt de intensiteit van de γ -straling geleidelijk af. Naast ionisatie van atomen speelt daarbij het *compton-effect* een belangrijke rol.

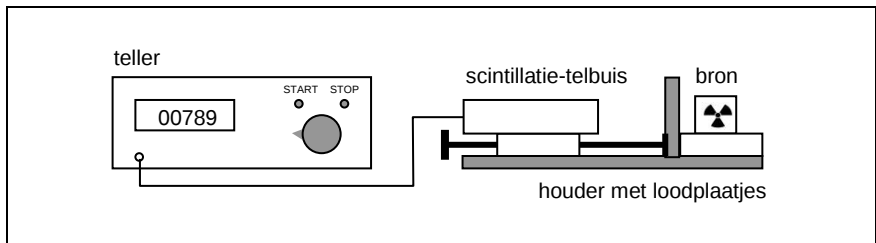
Een maat voor de absorptie van γ -straling door materie is de materiaaldikte waar bij de stralingsintensiteit tot de helft van de oorspronkelijke waarde is afgenomen. We noemen deze materiaaldikte de *halveringsdikte*.

Doel

- Meten van het verband tussen de dikte van het absorberende materiaal en de intensiteit van de doorgelaten straling.
- Bepalen van de halveringsdikte van lood voor de γ -straling uit een bron met kobalt-60.

Opstelling

De opstelling bestaat uit een scintillatie-telbuis met pulsenteller en een bron met kobalt-60. Tussen de bron en de telbuis zijn loodplaatjes van verschillende dikte in de opstelling te klemmen.



Toepassingen

De absorptie van γ -straling door lood maakt dit zware materiaal geschikt voor gebruik als afscherming van γ -bronnen in het kader van stralingsbescherming. Anders dan bij α - en β -bronnen zal deze afscherming nooit volledig zijn: bij een toenemende materiaaldikte neemt de intensiteit van de doorgelaten γ -straling steeds verder af, maar in principe niet tot nul. Afscherming van een γ -bron betekent dus het terugbrengen van de stralingsintensiteit tot een aanvaardbare waarde.

Andere toepassingen van de absorptie van γ -straling door materialen zijn te vinden bij experiment 11.

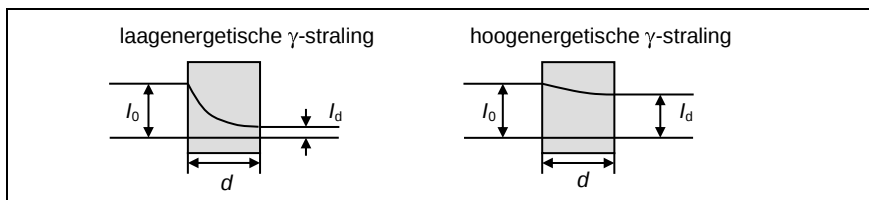
Kwalitatieve identificatie van radioactieve bronnen

Inleiding

De drie soorten ioniserende straling (α , β en γ) hebben een verschillend ioniserend vermogen en daardoor een verschillend doordringend vermogen. Zo hebben de α -deeltjes een groot ioniserend vermogen, maar slechts een klein doordringend vermogen. Voor de γ -fotonen geldt precies het omgekeerde. Met het verschil in doordringend vermogen is het mogelijk om met eenvoudige middelen de verschillende stralingssoorten van elkaar te onderscheiden.

- De α -deeltjes worden door een blad papier of enkele cm lucht tegengehouden.
- De β -deeltjes worden door een plaatje aluminium van zo'n 4 mm dikte tegengehouden.
- De γ -fotonen gaan nog door een stalen plaat van 30 cm dikte. Bij deze soort straling gebruikt men de grootheid *halveringsdikte*. Voor lood heeft deze een waarde van ongeveer 1 cm. Dat betekent: een loden plaat van 1 cm dikte absorbeert ongeveer de helft van de invallende γ -straling.

De absorptie van γ -straling wordt niet alleen bepaald door het absorptiemateriaal en de dikte daarvan, maar ook door de energie van de γ -straling. In de figuur hieronder is te zien dat de absorptie van laagenergetische (of: zachte) γ -straling groter is dan de absorptie van hoogenergetische (of: harde) γ -straling.

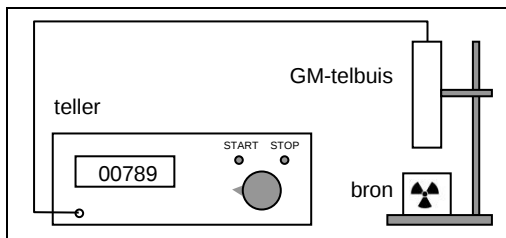


Doel

Identificeren van de straling uit onbekende radioactieve bronnen.

Opstelling

De opstelling bestaat uit een Geiger-Müller telbuis met pulsenteller, enkele absorptieplaatjes van bekende materialen en drie bronnen met een onbekende radioactieve stof.



Toepassingen

Om in het kader van stralingsbescherming bij een bron de juiste afschermingsmaatregelen te kunnen nemen, is het nodig om te weten welke soorten straling een onbekende bron uitzendt. Een eerste stap daarbij is een kwalitatieve identificatie: om welke (combinatie van) soorten straling gaat het bij deze bron?

Röntgenapparaat

Inleiding

Een deel van het elektromagnetisch spectrum is het gebied van de röntgenstraling. Dit ligt tussen het gebied van de ultravioletstraling en het gebied van de γ -straling. De golflengtes in het röntgengebied liggen tussen 0,001 nm en 10 nm. De röntgenstraling wordt opgewekt in een hoogvacuüm gepompte buis, waarin elektronen vanuit de kathode met behulp van een spanning over de buis in de richting van de anode worden versneld. Hun kinetische energie wordt bij botsing met de atomen van het anodemateriaal voor 99,5% omgezet in warmte en voor 0,5% in röntgenstraling. De maximale waarde van de versnelspanning bij de röntgenbuis in dit experiment is 60 kV, zodat de minimale golflengte van de uitgezonden röntgenfotonen 0,021 nm is.

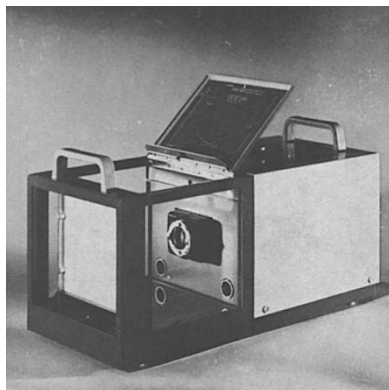
Doel

Kennismaken met enkele eigenschappen van röntgenstraling.

Opstelling

De röntgenbuis zit in een kast met een voorkant van loodglas dat de geproduceerde röntgenstraling vrijwel volledig absorbeert. Bovendien is de röntgenbuis automatisch uitgeschakeld als deze kast open staat.

In de voorkant van de kast zijn voorwerpen te plaatsen. Op het fluorescentiescherm is de absorptie van röntgenstraling door deze voorwerpen zichtbaar.



Toepassingen

Het röntgenapparaat staat in ziekenhuizen onder andere voor de diagnose van botbreuken. Meestal gaat het daarbij om het maken van tweedimensionale beelden. Bij *computertomografie* met röntgenstraling ontstaat een driedimensionaal beeld: een *CT-scan*. Daarmee is een doorsnede van het lichaam vanuit elke gewenste richting zichtbaar te maken.

Bij wetenschappelijk, medisch en industrieel onderzoek wordt röntgendiffractie (zie experiment 16) gebruikt voor het vaststellen van de bouw van complexe moleculen (zoals eiwit- en DNA-moleculen), de kristalstructuur van materialen enzovoort. Röntgenbronnen worden ook gebruikt voor bijvoorbeeld het controleren van de kwaliteit van de pijpleidingen in het aardgasnet.

Op de ISP website staat een applet waarmee je een röntgenfoto van een hand kunt maken:
www.fisme.science.uu.nl/isp > leerlingen > achtergrondinformatie > röntgenfoto

Ionisatie van lucht door röntgenstraling

Inleiding

Als we over twee in lucht opgestelde metalen platen een spanning zetten, dan loopt er geen stroom. De lucht tussen de platen is namelijk niet geleidend. Dit verandert als we de lucht ioniseren door er röntgenstraling doorheen te sturen. De gevormde ionen kunnen natuurlijk 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: $1 \text{ R} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ C/kg}$. Het aantal röntgen dat per tijdseenheid uit de röntgenbuis komt noemen we het *exposietempo*.

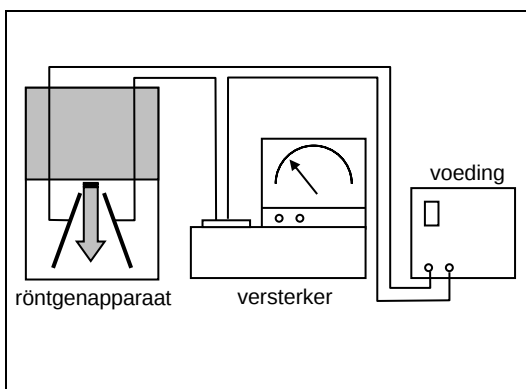
Doel

- Bepalen van het verband tussen de ionisatiestroom en de spanning over de platen.
- Bepalen van het exposietempo van de röntgenbuis.

Opstelling

De röntgenbuis zit in een kast met een voorkant van loodglas dat de geproduceerde röntgenstraling vrijwel volledig absorbeert.

In de voorkant van de kast staan twee condensatorplaten, aangesloten op een variabele spanningsbron. De ionisatiestroom in de lucht tussen de twee platen is na versterking te meten met een stroommeter.



Toepassingen

Metten van het exposietempo op verschillende plaatsen rondom een röntgenapparaat is een manier om de kwaliteit van de afscherming van het apparaat te bepalen in het kader van stralingsbescherming.

Toepassingen van röntgenstraling zijn te vinden bij experiment 14.

Bragg-reflectie

Inleiding

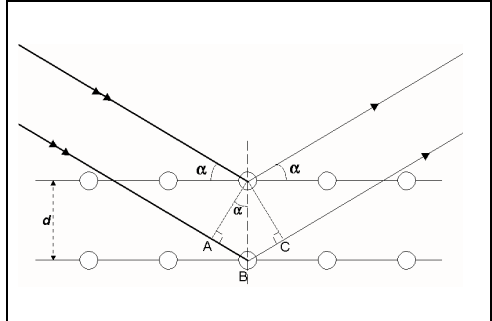
De atomen in een kristal zijn regelmatig gerangschikt. Hun onderlinge afstand heeft een grootte-orde van 10^{-10} m. Dat is vergelijkbaar met de golflengte van röntgenstraling. Met het verschijnsel *röntgendiffractie* is het mogelijk om de afstand tussen de kristalvlakken te bepalen.

In de figuur hiernaast valt een bundel röntgenstraling in op een kristal (waarvan slechts twee vlakken getekend zijn). Voor het weglengteverschil Δs tussen de twee getekende röntgenstralen geldt:

$$\Delta s = AB + BC = 2 \cdot d \cdot \sin \alpha$$

De twee teruggekaatste röntgenstralen zullen elkaar maximaal versterken als dit weglengteverschil gelijk is aan $n \cdot \lambda$. In dat geval geldt: $n \cdot \lambda = 2 \cdot d \cdot \sin \alpha$.

In deze formule is λ de golflengte van de invallende röntgenstraling en n de orde van de reflectie. Door de richting α waarin maximale versterking optreedt te meten, is de afstand d tussen de kristalvlakken te berekenen.

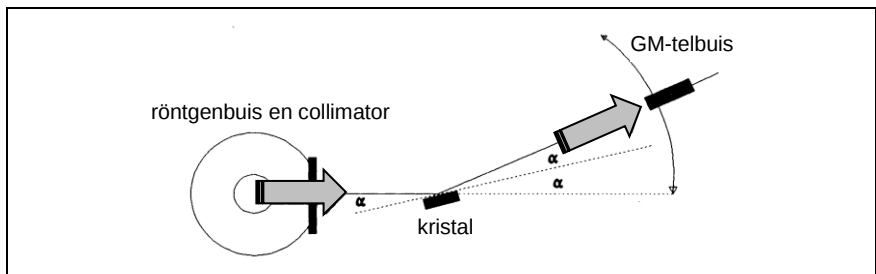


Doel

Bepalen van de afstand tussen de kristalvlakken met röntgendiffractie.

Opstelling

De opstelling bestaat uit een kristal dat draaibaar is opgesteld tussen een röntgenbron en een Geiger-Müller telbuis met pulsenteller.



Toepassingen

Röntgendiffractie wordt gebruikt bij materiaalonderzoek. Uit het diffractiepatroon (met de plaatsen van maximale versterking) is de structuur van het kristal af te leiden.

Op de ISP website staat een applet waarmee je röntgendiffractie kunt onderzoeken:

www.fisme.science.uu.nl/isp > leerlingen > achtergrondinformatie > bragg-reflectie

Gamma-spectrometrie

Inleiding

Als een instabiele kern vervalt onder uitzenden van een α - of β -deeltje of beschoten wordt met neutronen of andere snelle deeltjes, blijft de nieuw ontstane kern vaak achter in een aangeslagen toestand – een toestand met extra energie. Deze kern zal dan na verloop van (meestal zeer korte) tijd vervallen naar zijn grondtoestand – de toestand met minimale energie – door het uitzenden van een γ -foton.

Bij dit experiment gebruiken we onder andere het instabiele kobalt-60. Dit nuclide vervalt in drie stappen naar nikkel-60, zoals weergegeven in het vervalschema hieronder.

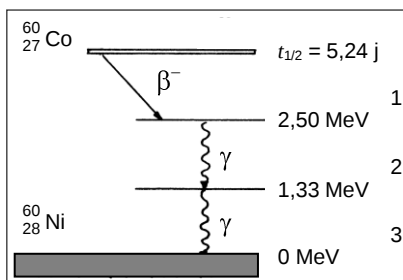
- Bij de eerste stap vervalt kobalt-60 onder uitzenden van β -straling tot nikkel-60 in een aangeslagen toestand met een extra energie van 2,50 MeV.

- Bij de tweede stap vervalt het aangeslagen nikkel-60 naar een lagere aangeslagen toestand met een energie van 1,33 MeV onder uitzenden van γ -straling. Voor de energie E_f van dit γ -foton geldt dus: $E_f = 2,50 - 1,33 = 1,17$ MeV.

- Bij de derde stap vervalt het nog steeds wat aangeslagen nikkel-60 naar zijn stabiele grondtoestand zonder extra energie onder uitzenden van γ -straling. Dit γ -foton heeft een energie E_f van 1,33 MeV.

Het kobalt-60 zendt dus γ -straling uit met twee waarden van de fotonenergie: 1,33 MeV en 1,17 MeV. We noemen dit het γ -spectrum van kobalt-60.

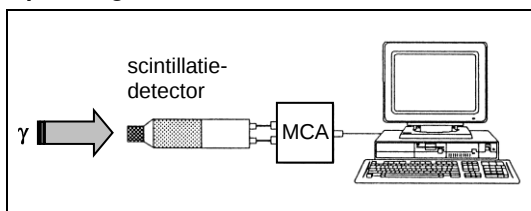
Elk nuclide heeft zijn eigen kenmerkende aangeslagen toestanden van de kern met de daarbij behorende waarden van de extra energie. Daardoor is uit een meting van de energie van de uitgezonden γ -fotonen – of korter: uit een meting van het γ -spectrum – te bepalen om welk nuclide het gaat. Deze methode noemen we *gamma-spectrometrie*.



Doel

- Meten van het γ -spectrum van een onbekende bron met behulp van het bekende γ -spectrum van een ijkbron met kobalt-60.
- Identificeren van de onbekende bron aan de hand van zijn gemeten γ -spectrum.

Opstelling



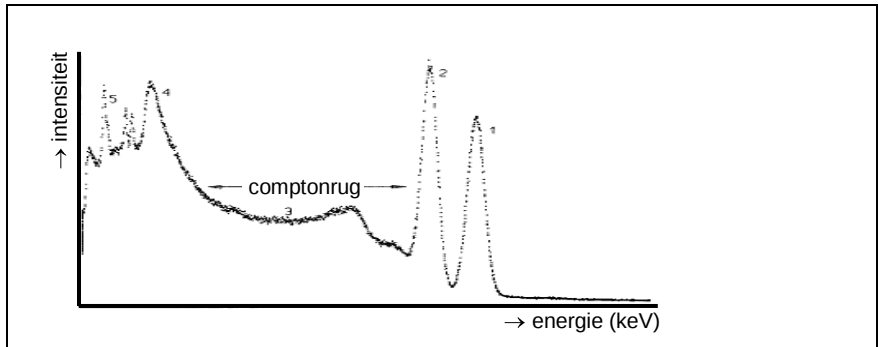
De opstelling bestaat uit een *scintillatiedetector*, die via een *multichannel analyser (MCA)* is aangesloten op een computer. Bij de opstelling hoort een ijkbron met kobalt-60 en een onbekende bron.

Toepassingen

Gamma-spectrometrie wordt gebruikt voor het identificeren van radioactieve bronnen aan de hand van het uitgezonden γ -spectrum, bijvoorbeeld bij *neutronen-activeringsanalyse*. Bij deze techniek wordt een materiaal bestraald met neutronen, waardoor in het materiaal radioactieve nucliden ontstaan. Met gamma-spectrometrie kan men daarna de ontstane radioactieve nucliden identificeren en daarmee bijvoorbeeld verontreinigingen of vervalsingen (van schilderijen) aantonen.

Gamma-spectrogram

In een gamma-spectrogram is meer te zien dan de energie van de γ -fotonen die bij terugval naar een lagere energietoestand door de kern worden uitgezonden. Hieronder staat als voorbeeld het spectrogram van kobalt-60. Daarin is de intensiteit van de γ -straling uitgezet tegen de foton-energie.



Fotopieken – De karakteristieke fotopieken van ^{60}Co liggen bij 1173 keV (piek 2) en 1332 keV (piek 1).

Comptonrug – De comptonrug (3) ontstaat doordat sommige fotonen een deel van hun energie door botsing overdragen aan vrije elektronen in het scintillatiekristal van de detector. De overgedragen energie kan elke waarde bezitten tussen nul en een zeker maximum. Dat verklaart dan ook de breedte van de comptonrug.

Terugstrooi piek – De terugstrooi piek (4) ontstaat doordat in het materiaal dat het scintillatiekristal van de detector omringt ook comptonverstrooiing optreedt. Nadat deze fotonen daarbij een deel van hun energie hebben overgedragen, komen ze door terugstrooiing weer in het scintillatiekristal terecht.

Loodpiek – De loodpiek (5) bij 75 keV is röntgenstraling, afkomstig van het loden omhulsel van de bron. Een door ^{60}Co uitgezonden foton kan een elektron vrijmaken uit de K-schil van een loodatoom. Het opengevallen 'gat' wordt gevuld met een elektron uit de L-schil of de M-schil. De daarbij vrijkomende energie wordt uitgezonden als een röntgenfoton, dat door het scintillatiekristal wordt gedetecteerd.

Op de ISP website staat aanvullende informatie over het meten van γ -straling met een scintillatiedetector:

www.fisme.science.uu.nl/isp > leerlingen > achtergrondinformatie > gamma-spectrometrie

Elasticiteitsmodulus van rubber

Inleiding

Voor het uitrekken van een veer is een kracht nodig. Het verband tussen de kracht F en de uitrekking $\Delta \ell$ wordt gegeven door de wet van Hooke: $F = C \cdot \Delta \ell$. Hierin is C de veerconstante van de veer. Het uitrekken van een strook rubber is vergelijkbaar met het uitrekken van een veer. Voor het verband tussen de kracht F en de uitrekking $\Delta \ell$ geldt in dit geval de volgende formule:

$$F = \frac{E \cdot A \cdot \Delta \ell}{\ell_0}$$

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. Om de elasticiteitsmodulus E van rubber te bepalen zijn dus ook metingen van de breedte en de dikte van de rubberstrook nodig. Die dikte is te meten met behulp van een radioactieve bron die β -straling uitzendt.

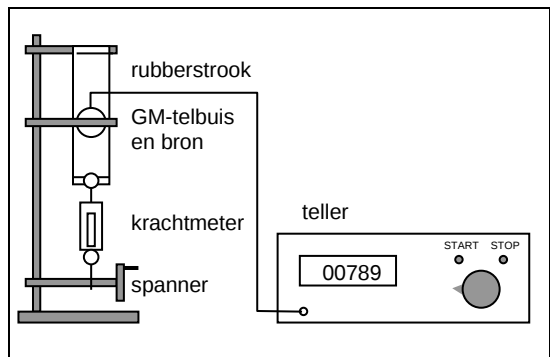
Doel

Bepalen van de elasticiteitsmodulus van rubber.

Opstelling

De opstelling bestaat uit een rubberstrook, via een krachtmeter vastgemaakt aan een spanner voor het uitrekken van de rubberstrook.

Aan de ene kant van de rubberstrook staat een bron met strontium-90 en daar tegenover aan de andere kant van de strook een Geiger-Müller telbuis met pulsenteller.



Toepassingen

Het verband tussen materiaaldikte en de intensiteit van de doorgelaten β -straling is bruikbaar in de industrie bij onder andere het vullen van flessen met vloeistof en het meten en regelen van de dikte van papier en plasticfolie tijdens het productieproces.

Dracht van α -deeltjes en luchtdruk

Inleiding

Een α -deeltje veroorzaakt ionisatie in de materie waarin het zich beweegt. Bij elke ionisatie verliest het een deel van zijn kinetische energie. Na het afleggen van een bepaalde afstand heeft het α -deeltje al zijn energie overgedragen. Deze afstand noemen we de *dracht*. De waarde van deze dracht hangt af van de dichtheid van de materie. Zo is de dracht van α -deeltjes in weefsel of water enkele μm . In lucht is die dracht veel langer, vanwege de veel kleinere dichtheid van lucht in vergelijking met die van weefsel of water. Het verband tussen de dracht en de dichtheid wijst er ook op dat de dracht van α -deeltjes in lucht afhankelijk zal zijn van de waarde van de luchtdruk.

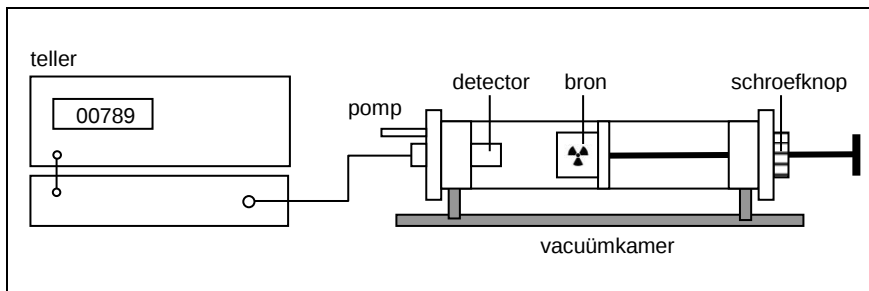
De dracht van α -deeltjes hangt ook af van de energie waarmee ze de bron verlaten. In dit experiment gebruiken we een bron met americium-241. Deze bron levert α -deeltjes met allemaal dezelfde energie (5,5 MeV), die dan ook dezelfde dracht zouden moeten hebben. De α -deeltjes worden echter in de bron enigszins afgeremd, zodat ze de bron met ongelijke snelheid verlaten. In dit experiment zullen we steeds naar de snelste α -deeltjes kijken.

Doel

Bepalen van het verband tussen de dracht van α -deeltjes in lucht en de waarde van de luchtdruk.

Opstelling

De opstelling bestaat uit een detector met pulsenteller, een vacuümkamer en een bron met americium-241. De vacuümkamer is met een schroefknop af te sluiten. De luchtdruk in de vacuümkamer is in te stellen met een handvacuümpomp en af te lezen op een drukmeter.



Toepassingen

Het verband tussen de dracht van α -deeltjes en de luchtdruk (of, meer algemeen: de druk van een gas) is onder andere bruikbaar voor het meten en regelen van de druk in een gasopslagtank.

Radioactief verval van protactinium-234

Inleiding

Uranium-238 vervalt via een groot aantal stappen uiteindelijk naar lood-206. In deze vervalreeks is protactinium-234 één van de vervalproducten. In dit experiment bepalen we de halveringstijd van dit nuclide. Hierbij maken we gebruik van de protactinium-generator.

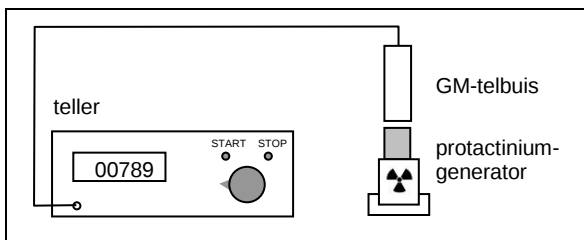
In deze generator bevinden zich twee vloeistoffen met verschillende dichtheid: bovenin een organische vloeistof (amylacetaat) en onderin een zoutzuuroplossing met uranium-238 en zijn vervalproducten. Eén van die vervalproducten is protactinium-234. Door de generator te schudden komt het protactinium bovenin de generator terecht, terwijl het uranium en alle andere vervalproducten onderin blijven zitten. Dit komt door een verschil in oplosbaarheid: protactinium lost beter op in amylacetaat (de bovenste vloeistof) in vergelijking met uranium en de andere vervalproducten. Daardoor is het protactinium te isoleren en de halveringstijd te meten.

Doel

Bepalen van de halveringstijd van protactinium-234.

Opstelling

De opstelling bestaat uit een Geiger-Müller telbuis met pulsenteller en een protactinium-generator.



Toepassingen

Met behulp van de bekende halveringstijd van radioactieve nucliden is de ouderdom van voorwerpen te bepalen. Een bekend voorbeeld daarvan is de *koolstofdateringsmethode*. Die methode is gebaseerd op het verval van koolstof-14 in voorwerpen waarin organisch materiaal verwerkt is, zoals linnen, papier en de verf op oude schilderijen (zie ook experiment 21).

Voor de datering van gesteenten is de *uraan-lood-methode* in gebruik. Die methode is gebaseerd op het verval van uranium-238 tot lood-206.

Ouderdomsbepaling van radioactieve bronnen

Inleiding

De ouderdom van een radioactieve bron met bekende halveringstijd is te bepalen als de activiteit van de bron bij het begin van zijn levensduur bekend is. Uit een meting van de tegenwoordige activiteit van die bron volgt het aantal halveringstijden dat sinds die tijd is verstreken. En daarmee is de ouderdom van de bron bekend.

Dit experiment is een simulatie van ouderdomsbepaling met de *koolstofdateringsmethode*. Materialen als papier en linnen zijn gemaakt van organisch materiaal. Dit organisch materiaal (van planten en dieren) bestaat voor een groot deel uit koolstof, het meeste in de vorm van het stabiele koolstof-12 (^{12}C). Een klein, vrijwel constant en bekend percentage van dat koolstof bestaat echter uit het radioactieve koolstof-14 (^{14}C) dat het organisme tijdens zijn leven opneemt uit de atmosfeer. Na de dood van het organisme stopt deze opname. Vanaf dat moment neemt het percentage ^{14}C in het organisme af door radioactief verval. Meting van het tegenwoordige percentage ^{14}C in het organisch materiaal levert dan, samen met het bekende beginpercentage en de bekende halveringstijd van 5730 jaar, de ouderdom van dat materiaal.

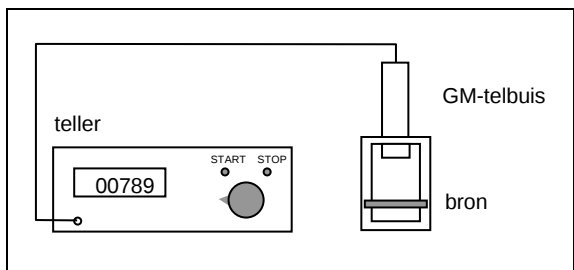
Doel

Bepalen van de ouderdom van een aantal radioactieve bronnen.

Opstelling

De opstelling bestaat uit een Geiger-Müller telbuis met pulssteller en enkele kobalt-60 bronnen.

De telbuis is ingebouwd in een houder. De bronnen hebben de vorm van een plaatje dat in de houder kan worden geschoven.



Toepassingen

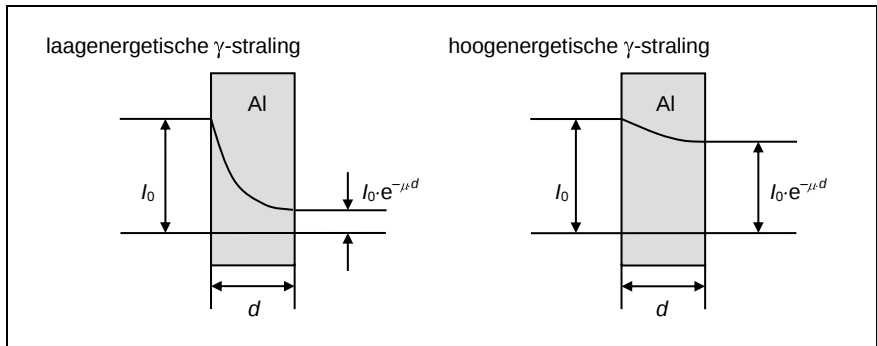
Met de bekende halveringstijd van radioactieve nucliden is de ouderdom van voorwerpen te bepalen. Van kunstvoorwerpen uit een bepaalde cultuurperiode willen we graag weten of ze ook inderdaad in die periode gemaakt zijn. Ook in de wetenschap is kennis over de ouderdom van voorwerpen en materialen van belang. Zo zijn uit de ouderdom van ijslagen in de poolstreken conclusies te trekken over klimaatveranderingen in het verre verleden. Die kennis is bruikbaar om de tegenwoordige computermodellen voor klimaatvoorspelling op betrouwbaarheid te controleren.

Absorptiecoëfficiënten van aluminium voor γ -straling

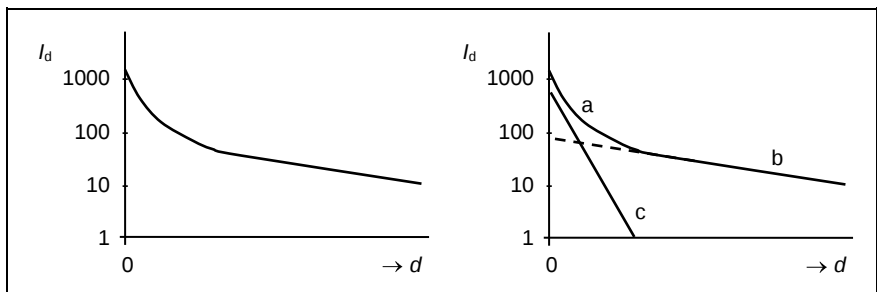
Inleiding

Na het invallen van een bundel γ -straling op materie (bijvoorbeeld aluminium) is sprake van een wisselwerking tussen straling en materie. Bij die wisselwerking neemt de intensiteit van de γ -straling geleidelijk af. Naast ionisatie van atomen speelt daarbij het *compton-effect* een belangrijke rol.

De absorptie van γ -straling wordt niet alleen bepaald door het absorptiemateriaal en de dikte daarvan, maar ook door de energie van de γ -straling. In de figuur hieronder is te zien dat de absorptie van laagenergetische (of: zachte) γ -straling groter is dan de absorptie van hoogenergetische (of: harde) γ -straling.



De bron met americium-241 bij dit experiment zendt naast α -straling ook γ -straling uit met een foton-energie van 27 en 60 keV. De intensiteit I_d van de doorgelaten straling als functie van de dikte d is weergegeven in het diagram hieronder (links) met een logaritmische verticale as. De 27 keV γ -straling is al bij een relatief kleine dikte volledig geabsorbeerd. Het laatste deel van de kromme – de rechte lijn (b) – geeft dus de absorptie van alleen de 60 keV γ -straling weer. Deze rechte lijn (b) kunnen we extrapoleren naar een dikte nul. De bijdrage van de 27 keV γ -straling (c) is nu te vinden door deze geëxtrapoleerde lijn (b) af te trekken van de oorspronkelijke kromme (a). Uit de twee rechte lijnen (b en c) is de halveringsdikte $d_{1/2}$ – en daaruit de absorptiecoëfficiënt μ – voor de twee energieën γ -straling te bepalen.

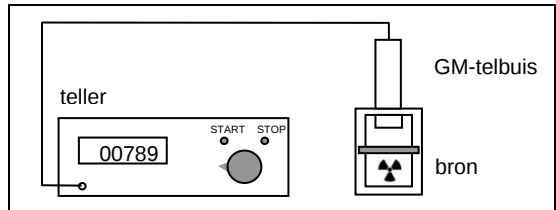


Doel

Bepalen van de absorptiecoëfficiënten van aluminium voor hoog- en laagenergetische γ -straling.

Opstelling

De opstelling bestaat uit een Geiger-Müller telbuis met pulsenteller, een bron met americium-241 en enkele plaatjes aluminium van verschillende dikte.



Toepassingen

De toepassingen van de absorptie van γ -straling door materialen zijn te vinden bij experiment 11.

Röntgen-computertomografie

Inleiding

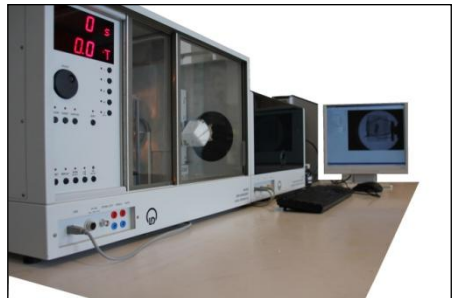
Bij röntgen-computertomografie (of korter: röntgen-CT) wordt röntgenstraling gebruikt voor het maken van beelden van het menselijk lichaam. Het verschil met het maken van een normale röntgenfoto is dat de patiënt horizontaal ligt terwijl de röntgenbuis en de detector rond het lichaam draaien en vanuit een groot aantal hoeken foto's nemen. De beelden gaan naar een computer, die daaruit elke gewenste doorsnede van de verschillende weefsels en organen in het lichaam kan berekenen en op het beeldscherm kan laten zien.

Doel

Kennismaken met enkele eigenschappen van röntgen-computertomografie.

Opstelling

De röntgenbuis zit in een kast met een voorkant van loodglas dat de geproduceerde röntgenstraling vrijwel volledig absorbeert. Bovendien is de röntgenbuis automatisch uitgeschakeld als deze kast open staat. In de kast zit een houder om voorwerpen in te schuiven. Deze houder kan met instelbare stappen draaien over 360° . Op het beeldscherm is het tomogram van het voorwerp zichtbaar in 3D (met een speciale 3D-bril) of in 2D. In beide gevallen is met de computer de gewenste doorsnede van het voorwerp te selecteren.

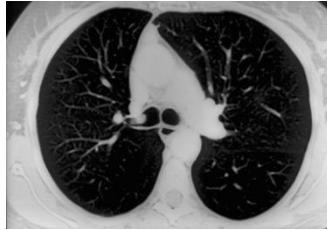


Links: scanner voor röntgen-CT. Rechts: de meetopstelling, waarin – anders dan bij de CT-scanner in het ziekenhuis – niet de röntgenbuis en de detector om het te onderzoeken voorwerp ronddraaien, maar waarin het voorwerp zelf ronddraait. Voor de geproduceerde beelden maakt dat geen verschil.

Toepassingen

Röntgen-CT wordt in het ziekenhuis gebruikt voor het stellen van diagnoses. Bij het maken van een 'normale' röntgenfoto worden de verschillende structuren in het lichaam over elkaar heen afgebeeld, en zijn daardoor moeilijk van elkaar te onderscheiden. Eén van de problemen is het gebrek aan informatie over de precieze plaats van bijvoorbeeld een tumor. Met een CT-scan kan de computer een dwarsdoorsnede van het lichaam leveren, waarop de precieze plaats van zo'n tumor wel zichtbaar is.

Met röntgen-CT zijn bovendien verschillende soorten weefsels zichtbaar te maken: longen, beenderen, zachte weefsels en bloedvaten.



Links: normale röntgenfoto van de longen, waarop de structuren op verschillende diepte in het lichaam over elkaar heen worden afgebeeld. Rechts: dwarsdoorsnede van de longen na een CT-scan.

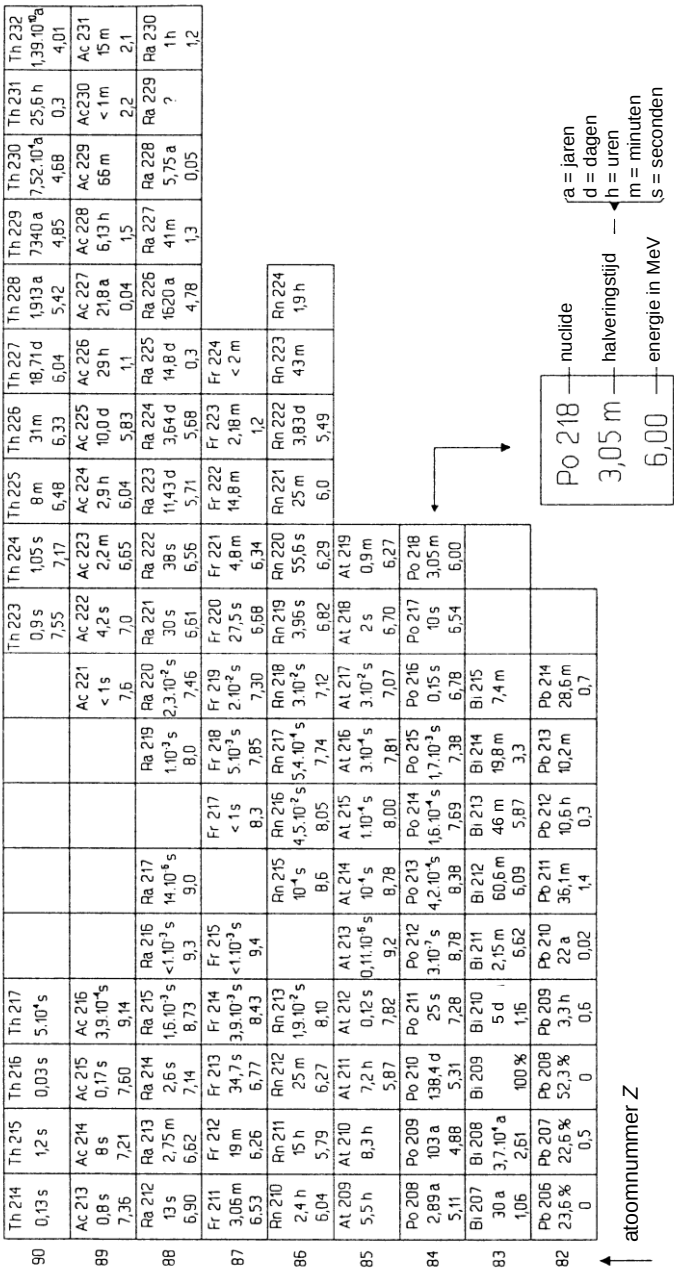
Computertomografie wordt ook toegepast bij echoscopie, magnetic resonance imaging (MRI) en diagnostisch onderzoek met radioactieve tracers.

Op de ISP website staat aanvullende informatie over de manier waarop de computer uit de opeenvolgende röntgenopnamen het beeld van het voorwerp berekent:

www.fisme.science.uu.nl/isp > leerlingen > achtergrondinformatie > röntgen-computertomografie

Isotopenkaart

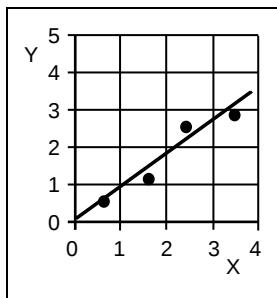
gedeelte van de nuclidenkaart



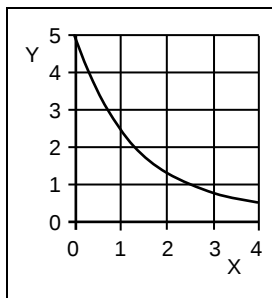
Enkellogaritmisch grafiekpapier

Lineair verband

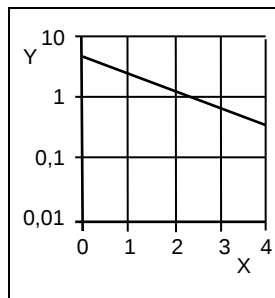
Om het verband tussen twee variabele grootheden te bepalen, zet je de meetresultaten uit in een diagram en teken je een vloeiende lijn die zo goed mogelijk bij de meetpunten aansluit. Dat laatste lukt het best als die lijn een rechte lijn is, zoals in figuur 1. In dit geval zijn de grootheden x en y 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 $y = a^x$ 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 :

$$A_t = A_0 \cdot \frac{1}{2}^{t/t_{1/2}}$$

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 :

$$I_d = I_0 \cdot \frac{1}{2}^{d/d_{1/2}}$$

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),

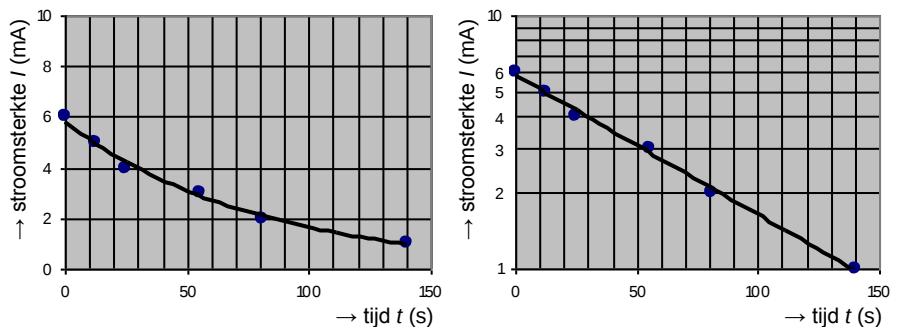
dan geldt volgens de logaritme-theorie in de wiskunde: $\log y = \log (a^x) = x \cdot (\log a)$. Hierin is $(\log a)$ een getal: $\log a = \log (1/2) = -0,30$ als het gaat om radioactief verval of om absorptie van straling. Je kunt dus ook zeggen dat het verband tussen $\log y$ en x recht evenredig is: $\log y = -0,30 \cdot x$. 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 / (mA)	6	5	4	3	2	1
meettijd t (s)	0	12	25	55	81	140

Figuur 4 – De meetresultaten bij experiment 2A over het radioactief verval van radon-220.



Figuur 5 – De meetresultaten uit de tabel van figuur 4, uitgezet op normaal (links) en enkellogaritmisch (rechts) grafiekpapier.

Begrippenlijst

Absorber	Materiaal dat straling absorbeert
Absorptie	Verschuinsel 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)	SI-eenheid 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
Bèta-straling (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
Compton-effect	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
Equivalentente 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
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 hoogenergetische elektromagnetische straling
Gamma-straling (γ)	Bundel γ -fotonen
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: $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$
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 verval
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: $I = c/r^2$.
Massagetal (A)	Aantal protonen en neutronen in een atoomkern
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
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 = $2,58 \cdot 10^{-4}$ C/kg
Röntgenstraling	Elektromagnetische straling met een golflengte van rond de 0,1 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

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 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
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

Stralingsrisico

De mens staat voortdurend bloot aan ioniserende straling uit natuurlijke bronnen. Dit veroorzaakt een gemiddelde equivalente dosis van zo'n 1,8 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 0,6 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 risicotellingen: 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 15 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.

Zeer 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	mSv/jaar
Leefomgeving	Kosmische straling (op zeeniveau)	0,25
	Bodem	0,05
	Water en voedsel	0,35
	Lucht	0,8
	Bouwmaterialen	0,35
Vrije tijd	Vliegreis (10 km hoogte): 5 μ Sv per uur	.....
	Wintersportvakantie (2 km hoogte): 30 μ Sv/week	.....
Gezondheidszorg	Röntgenfoto borstholte: 90 μ Sv	.....
	Röntgenfoto gebit: 0,1 mSv	.....
	Röntgenfoto borsten (mammografie): 0,1 mSv	.....
	Röntgenfoto hoofd-nekgebied: 0,2 mSv	.....
	Röntgenfoto heup: 0,8 mSv	.....
	Röntgenfoto beenbreuk: 1 mSv	.....
	CT-scan hoofd: 1,2 mSv	.....
	CT-scan lichaam: 1,2 mSv	.....
	Scintigram schildklier met ^{131}I : 4,3 mSv	.....
	Scintigram skelet met $^{99\text{m}}\text{Tc}$: 6 mSv	.....
	Scintigram hartspier met ^{201}Tl : 17 mSv	.....
Onderwijs	Ioniserende Stralen Practicum: 0,2 μ Sv/uur	.....
Totale equivalente dosis in 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.fisme.science.uu.nl/isp > leerlingen > achtergrondinformatie > effecten



Bètastudie

Met een bètastudie kun je alle kanten op. Informatie over de bètastudies aan de Universiteit Utrecht is te vinden op de website www.betainutrecht.nl. Daar is ook te zien welke masteropleidingen op de bètabachelor aansluiten, en in welke beroepen je terecht kunt komen.



Het Minnaertgebouw is één van de gebouwen van de Faculteit Bètawetenschappen, Universiteit Utrecht.

Bètasteunpunt

Het Bètasteunpunt van de Universiteit Utrecht biedt activiteiten aan voor havo- en vwo-leerlingen, zoals hulp bij profielwerkstukken en deelname aan masterclasses. Informatie over deze activiteiten is te vinden op de website www.betasteunpunt-utrecht.nl.

Ook bètadocenten in het voortgezet onderwijs kunnen daar terecht voor informatie over lesmodules, nascholingsactiviteiten en netwerkbijeenkomsten, voor didactische en vakinhoudelijke vragen en voor praktische ondersteuning.