

Hoofdstuk 1

Experiment: deeltjesdetectie

Waarschuwing



Wees goed op de hoogte van de veiligheidsvoorschriften opdat je weet op welke wijze je verantwoord met de radioactieve preparaten omgaat en opdat je je realiseert aan welke gevaren (hoe klein die ook mogen zijn) je tijdens het experimenteren blootgesteld wordt. Bij twijfel: **vragen!**

1.1 Inleiding

Met deze experimenten willen we enkele principes, verschijnselen en begrippen van de deeltjesfysica bij je introduceren en inzichtelijk maken. Met name kijken we naar de fysica van interactie van ioniserende straling met materie en daarmee naar detectiemethodes. De begrippen die aan de orde komen, spelen een belangrijke rol in de deeltjesfysica (hoge energie fysica). Omdat wij natuurlijk niet beschikken over hoogenergetische deeltjesversnellers, moeten we bij het experimenteren onze toevlucht nemen tot straling en geladen deeltjes die bij radioactieve processen vrijkomen of tot kosmische straling. We zullen experimentele technieken gebruiken die toegepast worden bij de detectie van deze straling en deeltjes, en bij de bestudering van de wisselwerking van deze straling en deeltjes met materie. Het is daarnaast ook de bedoeling dat je op veilige en verantwoorde wijze leert om te gaan met radioactieve preparaten en dat je aan deze preparaten metingen leert verrichten met behulp van daarvoor gebruikelijke apparatuur. Voor onze experimenten hebben we de beschikking over

- een aantal radioactieve preparaten van diverse aard en sterkte (alfa-, beta-, gamma-, röntgen-, neutronenbronnen en kosmische straling);
- verschillende types detectoren;

- elektronische apparatuur voor de verwerking van pulsvormige signalen;
- registratie-apparatuur zoals tellers en pulshoogte-analysatoren.

Bij de voorbereiding van de experimenten kan of moet gebruik gemaakt worden van de literatuur op Canvas. In deze handleiding komen de hierna volgende onderwerpen aan de orde:

- inleiding spectroscopie (interpretatie gammaspectrum);
- een keuze uit:
 - energie-absorptie van geladen deeltjes; bepaling "stopping power" voor alfadeeltjes van lucht, koolstofdioxide en helium;
 - karakterisering van onbekende bronnen;
 - coïncidentiemetingen; bestudering van het elektron-positron-annihilatieproces; bepaling van het vervalschema van natrium-22 en een rudimentaire PET-scan via de coïncidentietechniek.

1.2 Introductie-experiment: gammaspectroscopie

1.2.1 Doel

In dit experiment zullen we kennis maken met *proportionele* detectoren. Met behulp van deze apparatuur zullen we gammaspectra opnemen, die we kwalitatief en kwantitatief zullen leren interpreteren.

1.2.2 Inleiding

Elke radioactieve nuclide zendt straling uit waarvan de soort en de energie karakteristiek zijn voor die nuclide. We kunnen nucliden dus identificeren aan de hand van hun straling. Indien we de aanwezigheid van deze stralingssoorten (gammastraling is meestal voldoende) kunnen aantonen, dan hebben we de aanwezigheid van die nuclide bewezen. De detectoren waarover het practicum beschikt laten zich grofweg in twee categorieën indelen: deeltjestellers en proportionele detectoren. Tot de eerste soort behoren o.a. de Geiger-Müller-telbuizen. Zij registreren slechts de binnenkomst van een ioniserend deeltje, terwijl ze verder niets over de aard of energie van het deeltje onthullen: elke registratie, van welk deeltje dan ook, heeft één soort elektrische puls tot gevolg. De proportionele detectoren echter, zoals de scintillatiedetector, de proportionele gasbuis en de halfgeleiderdetector, geven een puls af waarvan de hoogte evenredig (proportioneel) is met de energie die de binnenkomende deeltjes aan de detector afgeven. Door ze op speciale wijze te construeren kan men de detectoren (on)gevoelig maken voor bepaalde soorten straling, zodat we behalve de energie vaak ook de soort van het deeltje kennen. We zullen ons

in dit experiment beperken tot een gammadetector en wel de NaI(Tl)-scintillatie-detector (raadpleeg zo nodig de literatuur). Een NaI(Tl)-kristal is gemonteerd op een fotomultiplicatorbuis (PMT), waarmee het als één geheel is te beschouwen.

Let op

De PMT-buis van de NaI-detector heeft een goed gestabiliseerde **positieve** voedingsspanning nodig die tussen **+500 V tot +1000 V** ligt. De spanning mag **niet meer bedragen dan +1100 V!** Het signaal kan uitgelezen worden met een PicoScope en de gammaspectroscopie applicatie [1].

De NaI-detector wordt aangesloten op een PicoScope die via USB verbonden wordt met de computer. Zie ook [1].

1.2.3 Experimenten

Apparatuurverkenning; Spectrum

Opdracht 1.1

Neem het gammaspectrum op van een cesium-137-bron of een natrium-22-bron. Bekijk wat de invloed op het spectrum is van verandering van de

- (a) hoogspanningsvoeding van de fotomultiplicatorbuis
- (b) meetbereik van de PicoScope

Interpreteer de karakteristieke vormen van een volledig opgenomen spectrum.

IJking

Het verband tussen kanaalnummer (pulshoogte) en gemeten energie ligt op voorhand bij een opstelling nooit vast; het wordt bepaald door de (al dan niet toevallige) instelling en gevoeligheid van de apparatuur. Afhankelijk van o.a. de hoogspanning op de fotomultiplicatorbuis kan het verband bovendien behoorlijk van een lineair verband afwijken. Ook de telsnelheid (opstapeling van pulsen) is van invloed op de lineariteit. Men wil daarom zoveel mogelijk ijkpunten hebben, die bovendien gemeten moeten worden onder de te verwachten telsnelheden. Het is gebruikelijk om de keV als eenheid bij het ijken te gebruiken.

Opdracht 1.2

Stel de apparatuur zo af, dat 2000 keV nog net in het spectrum meetbaar is (de meeste gammaspectra vallen binnen dit gebied). Gebruik hiervoor een natrium-22-bron, eventueel in combinatie met een cesium-137-bron. Exporteer de data en maak een energie-pulshoogtediagram en vergelijk deze met een lineair verband. Meet de energie van de gammastraling van een andere (willekeurige) bron op en vergelijk de gevonden waarde met de literatuur, of probeer uitgaande van de gevonden energie de isotoop te bepalen.

Scheidend vermogen

Bij dit type detectoren (scintillatiedetectoren) wordt het energie-scheidend vermogen (resolutie) aan de hand van het spectrum van cesium-137 gedefinieerd als

$$\frac{\Delta E}{E} \times 100 \% \quad (1.1)$$

waarbij ΔE de breedte van de foto-piek (full-energy-peak) op halve hoogte is en E de energie van de piek (662 keV). Deze ΔE heet ook wel FWHM (Full Width at Half Maximum) en kan door Origin bepaald worden.

Opdracht 1.3

Fit de fotopiek aan een geschikte functie en bepaal het energie-scheidend vermogen (resolutie) van het detectiesysteem.

Bronsterkte

De opstelling heeft een paar efficiënties waar rekening mee gehouden moet worden:

Halfwaarde: de activiteit van een bron neemt af naarmate de tijd verstrijkt.

Geometrische efficiëntie: de bron straalt gammastraling uit in alle richtingen, dus binnen een boloppervlak. Onze detector is een kleine cilinder binnen dit oppervlak. Van alle fotonen die worden uitgezonden, wordt dus maar een klein deel opgevangen.

Verhouding ϵ_p/T : Niet alle uitgezonden gammafotonen geven een signaal in de fotopiek; veel geven een signaal in de *comptonrug*. Uit het gemeten energie-spectrum is te bepalen hoeveel fotonen er in totaal gemeten zijn en hoeveel er in de fotopiek zitten.

Fotonen die door de detector heen gaan: net zoals straling soms door ons lichaam heen gaat zonder interactie, kan de gammastraling ook door de detector heen gaan zonder energie te verliezen, en dus zonder signaal te genereren. In de documentatie is te vinden wat hiervoor de factor is.

Opdracht 1.4

Bepaal aan de hand van het aantal counts de activiteit van de bron (gebruik hierbij de gegeven efficiënties) en vergelijk deze met de gecalibreerde activiteit. Noteer de verschillen.

1.3 Keuze-experiment 1: energie-absorptie van geladen deeltjes; stopping power; dracht

1.3.1 Doel

In dit experiment wordt nader ingegaan op de interactie van alfadeeltjes met materie. We zullen de *stopping power* en de dracht in lucht, koolstofdioxide en helium meten.

1.3.2 Inleiding

Doordat het alfadeeltje sterk geladen is en een grote massa heeft, zal zijn gedrag in materie afwijken van dat van het elektron. Wanneer het alfadeeltje met een zekere kinetische energie in materie binnendringt, zal het vanwege zijn lading voornamelijk energie verliezen door ionisaties en excitaties van de atomen. Er vindt dus voornamelijk een wisselwerking plaats met elektronen. Een maat voor het energieverlies van de deeltjes is de *stopping power* van de absorber (ref. [2], hoofdstuk 7). Wanneer het deeltje al zijn energie heeft afgestaan, dan heet de afstand die het door de absorber heeft afgelegd de *dracht* (range). N.B. In de praktijk bestaan er verschillende criteria om uit een absorptiecurve (aantal getelde deeltjes versus absorber-dikte) de dracht te bepalen.

1.3.3 Bron

Voor dit experiment wordt een alfabron gebruikt. Omdat alfadeeltjes niet door een afscherming heen komen gaat het hier om een ‘kale’ bron die je absoluut niet mag aanraken. Anders is de kans erg groot dat je een kleine hoeveelheid radioactieve stof binnenkrijgt.

Let op

Gebruik voor dit experiment de americium-241-bron met een sterkte van 1,3 MBq. **Vraag een bevoegd staflid om deze bron te hanteren en doe dat *niet* zelf.**

1.3.4 Absorber

De dracht van alfadeeltjes is erg klein. Voor alfadeeltjes van 5 MeV is zelfs een blad papier al voldoende om ze te absorberen. Om toch enige variatie in de absorberdikte te verkrijgen, gebruiken we een gas (lucht, koolstofdioxide of helium) als absorber. Bij 1 bar gasdruk blijkt de dracht in lucht toch nog maar slechts enkele cm te bedragen. We zouden de afstand van de bron tot de detector kunnen variëren om de absorberdikte te kunnen regelen. Dan verandert echter ook de *geometrie* van de opstelling en deze verandering heeft invloed op de eigenschappen van het

detectiesysteem en daarmee op de telsnelheid.¹ Een veel betere methode is de volgende. Plaats de bron op een vaste afstand tot de detector en varieer de druk van het gas, zodat men de dichtheid van het gas in de hand heeft en de geometrie constant houdt. De dracht wordt bepaald door de hoeveelheid materie waar het deeltje doorheen beweegt en niet zozeer de afstand die het aflegt. Je kunt dus de *variabele druk bij vaste afstand* omrekenen naar een *variabele afstand bij vaste druk*. Op het practicum is een opstelling beschikbaar waarbij de bron en de detector geplaatst kunnen worden in een cilinder die is verbonden met een vacuümpomp. De gasdruk is regelbaar van enige mbar tot atmosferische druk.

1.3.5 Detector

Als detector wordt een *surface barrier detector* gebruikt (ref. [2], paragraaf 7.6, ref. [5] hoofdstuk 4 en paragraaf 2.4).

Let op

De surface barrier detector werkt op een **positieve** spanning van **+120 V tot +130 V**. Er mag geen hogere spanning aangeboden worden. De voorversterker wordt gevoed met 12 V via een DB9-connector (lijkt op een VGA-connector). Deze kan aangesloten worden op de achterkant van een NIM-module. Het signaal kan uitgelezen worden met een PicoScope en de gammaspectroscopie applicatie [1].

Deze detector is erg gevoelig voor licht en zal dus moeten worden afgedekt met de metalen omhulling. Dit is echter niet afdoende en het signaal dat direct van de detector afkomstig is zal erg fluctueren. Het is dus lastig om een goede trigger in te stellen waarbij alleen de pieken worden gedetecteerd. Nu zijn de frequentiecomponenten van de ruis veel lager dan de frequentiecomponenten van de pieken. Het is dus mogelijk om een *high-pass filter* te bouwen waarbij de ruis wordt weggefilterd (zie Figuur 1.1). De zogenoemde *cut-off frequentie* f_c wordt gegeven door

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}, \quad (1.2)$$

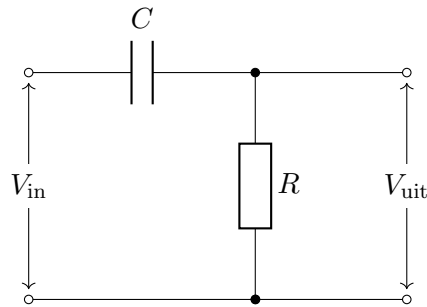
met de weerstand R en de capaciteit C van de componenten in het circuit.

Let op

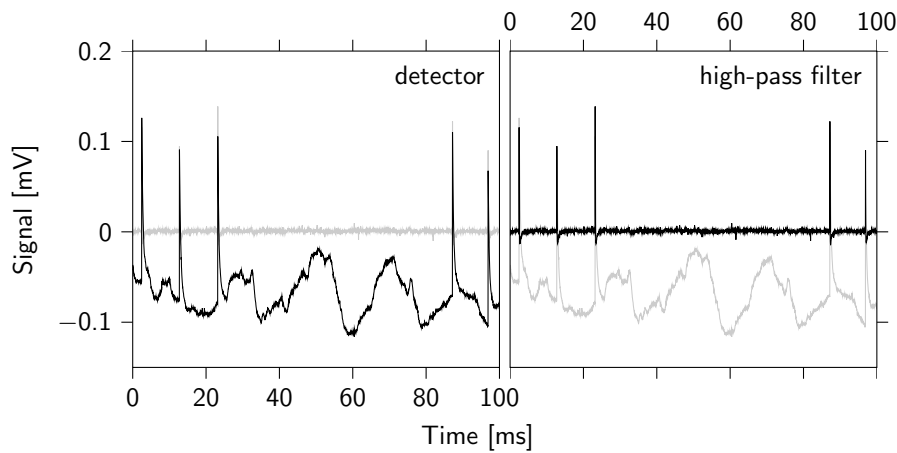
Als je gebruik maakt van een **high-pass filter**, zorg er dan voor dat de **weerstand R groot is** zodat de stroomsterkte door de detector erg laag blijft. Anders kan de detector beschadigd raken.

Het resultaat van het gebruik van een geschikt filter is weergegeven in de metingen in Figuur 1.2. Zonder filter is de sterk fluctuerende ruis duidelijk zichtbaar.

¹Denk aan de hoek waarmee de deeltjes de detector raken of het percentage deeltjes dat gemeten wordt of juist langs de detector vliegt.



Figuur 1.1: Het schema van een passief high-pass filter met een condensator C en een weerstand R .



Figuur 1.2: Het signaal van een surface barrier detector ten gevolge van alfadeeltjes afkomstig van een americium-241 bron. Het linkerpaneel geeft het signaal weer dat direct van de detector afkomstig is. Het rechterpaneel laat het signaal zien nadat het door een high-pass filter is geleid.

Met filter is de baseline (nulniveau) mooi vlak maar blijven de pieken duidelijk zichtbaar. Het resultaat is een nauwkeuriger spectrum.

1.3.6 Experimenten

Stopping power voor alfadeeltjes in lucht

Met de detector kan de (overgebleven) kinetische energie T van de alfadeeltjes gemeten worden die de detector raken. De *stopping power* is gedefinieerd als

$$\text{stopping power} \equiv -\frac{dT}{dx}, \quad (1.3)$$

en beschrijft de hoeveelheid energie die het deeltje verliest als het een stukje absorber doorkruist. Je kunt je afvragen of het fysische proces afhankelijk is van de

positie x van het deeltje, of de kinetische energie T en een handige grootte kiezen om de stopping power tegen uit te zetten in een grafiek. Theoretische waarden kunnen gevonden worden in ref. [2], hoofdstuk 7.

Bragg-curve, dracht in lucht, helium en koolstofdioxide

Het alfadeeltje verliest energie door ionisaties te veroorzaken in het materiaal dat geraakt wordt. Een ionisatie kost een gemiddelde energie ε . Voor lucht geldt $\varepsilon = 32,5$ eV. Je kunt een indruk krijgen van het aantal gevormde ionen n per eenheid van weglengte door te bedenken dat

$$n = -\frac{dT}{dx} \cdot \frac{1}{\varepsilon}. \quad (1.4)$$

In de zogenaamde *Bragg-curve* (ref. [4]) wordt n uitgezet tegen de weglengte x die het alfadeeltje in de absorber heeft afgelegd. Met deze curve kan ook een schatting gemaakt worden van de *dracht*, ofwel de afgelegde afstand in de absorber. De dracht kan ook bepaald worden door deeltjes te tellen, in plaats van naar de energie te kijken. Je kunt dan een grafiek maken van het aantal gemeten deeltjes uitgezet tegen de afstand in de absorber. Je kunt onderzoeken in hoeverre deze verschillen voor drie verschillende gassen. Vergelijk ook met literatuurwaarden.

1.4 Keuze-experiment 2: karakteriseren van onbekende bronnen

1.4.1 Doel

In dit experiment wordt de straling afkomstig van onbekende bronnen gemeten met een HPGe-detector. Vervolgens kan op grond van het karakter van deze straling de aard van de radioactieve stoffen bepaald worden.

1.4.2 Inleiding

HPGe-detectoren zijn halfgeleiderdetectoren met een P-I-N-configuratie. Evenals in NaI worden gamma's in germanium volgens de drie bekende interacties geabsorbeerd: foto-effect, Comptoneffect en paarvormingseffect. We kunnen dus ook nu karakteristieken in het spectrum aantreffen die door deze effecten veroorzaakt zijn. De waarschijnlijkheden voor het optreden van deze effecten zijn bij beide soorten detectoren verschillend. Daarom zal de verhouding van bijvoorbeeld het aantal deeltjes in de fotopiek en het aantal onder de Comptonrug bij beide soorten detectoren ook verschillend zijn.

Eén van de in het oog springende eigenschappen van de halfgeleiderdetector is zijn grote oplossend vermogen (resolutie). Een andere eigenschap, die de bruikbaarheid van de detector bepaalt, is de efficiency waarmee de fotopiek geregistreerd wordt.

De hoge resolutie van de HPGe-detector maakt het mogelijk de verschillende fotopieken goed te onderscheiden. Op grond hiervan kan bepaald worden van welke radioactieve stof de straling afkomstig is.

1.4.3 Detector

Om zo weinig mogelijk last te hebben van vrije ladingsdragers als gevolg van thermische excitaties, worden de HPGe-detectoren tijdens gebruik met vloeibare stikstof gekoeld. Dit type detector mag alleen tot kamertemperatuur worden opgewarmd, als hij niet gebruikt wordt.

Let op

De HPGe-detector mag dus nooit zonder **stikstofkoeling** aangesloten worden, omdat bij deze hoge temperatuur de geleidbaarheid van het halfgeleiderkristal te groot is. Hierdoor kan er dus een te grote stroom gaan lopen, waardoor de detector onherstelbaar beschadigd wordt. Let goed op de **polariteit** en de **maximale waarde van de biasspanning**. Omdat de voorversterker geen grote spanningsvariaties aan de ingang kan verdragen, wordt de biasspanning via een filter met een zeer grote RC-tijd (ca. 100 sec) op de detector aangesloten. Desondanks mag de biasspanning niet in één keer op de maximale waarde worden aangeschakeld, maar moet het met de hand of met een externe spanningssturing van 0 V af *langzaam* opgedraaid worden. Draai op met een snelheid van **maximaal 100 V/s**, vooral in het gebied 0 V tot 1000 V. Dit geldt óók voor het weer afbreken van de biasspanning! De voorversterker wordt gevoed met 12 V via een DB9-connector (lijkt op een VGA-connector). Deze kan aangesloten worden op de achterkant van een NIM-module. Het signaal kan uitgelezen worden met een PicoScope en de gammaspectroscopie applicatie [1].

1.4.4 Experimenten

Energie-resolutie (oplossend vermogen)

De resolutie van een halfgeleiderdetector is veel hoger dan die van een scintillatiedetector. Gebruik een aantal verschillende bronnen om de energieresolutie te vergelijken tussen de germanium- en natriumjodidedetectoren. Is deze resolutie nog ergens van afhankelijk? Denk aan precieze biasspanning, geometrie van de opstelling, energie van de gammafotonen, etc.

Efficiency

Bepaal de relatieve fotopiek-efficiency van de halfgeleiderdetector en van de scintillatiedetector. Geef een verklaring voor het verschil. Onderzoek of de efficiency afhangt van de energie van de gammafotonen.

Karakterisering van onbekende bronnen

Neem met de halfgeleiderdetector een spectrum op van enkele onbekende bronnen (vraag de practicumstaf). We hebben onder andere een aantal radioactieve boeken en paddenstoelen in bezit. Onderzoek met welke stoffen de bronnen besmet zijn.

1.5 Keuze-experiment 3: coïncidentiemetingen; positron-elektron-annihilatie

1.5.1 Doel

Met dit experiment wordt door middel van de coïncidentietechniek het positron-elektron-annihilatieproces onderzocht. Als bron van positronen dient een natrium-22-preparaat. Uit dezelfde meetgegevens kan men bovendien het *vervalschema* van natrium-22 bepalen. Ook is het mogelijk een rudimentaire PET-scan uit te voeren.

1.5.2 Inleiding

Een coïncidentie is het gelijktijdig optreden van twee gebeurtenissen. In ons geval betreft het de gelijktijdige detectie van twee fotonen die als gevolg van een radioactief proces gevormd worden en die in twee verschillende detectoren gemeten worden. Natrium-22 vertoont β^+ -activiteit en zendt positronen uit die in de bron-afscherming met elektronen kunnen annihilieren. Hierbij komen twee fotonen vrij, elk van 0,51 MeV, die met een onderlinge hoek van 180° uitgezonden worden.

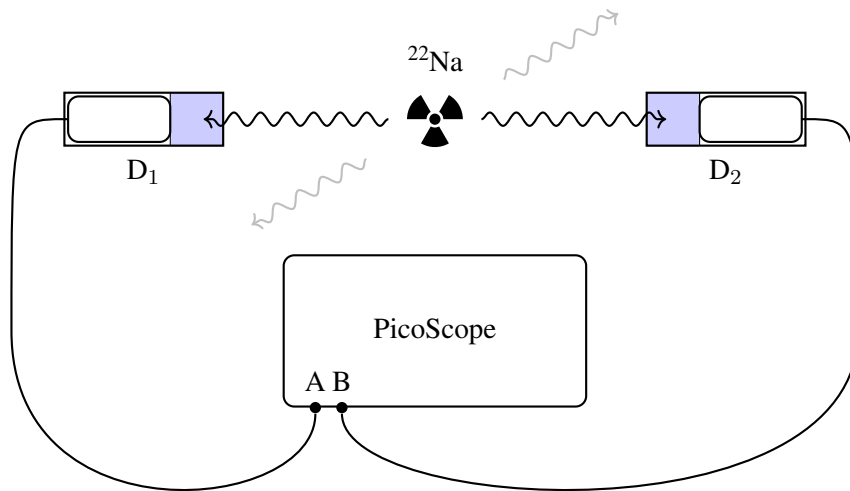
1.5.3 Opstelling

Om dit verschijnsel te meten kan gebruik gemaakt worden van een opstelling als in Figuur 1.3. Twee detectoren D_1 en D_2 worden onder variabele meethoek opgesteld. Daar tussen wordt een natrium-22-bron met een voldoende omhulling geplaatst. (*Maak een schatting van de minimale dikte die de omhulling moet hebben om het annihilatieproces mogelijk te maken.*) Beide detectoren worden aangesloten op een PicoScope [1]. Met gebruik van een handige triggerinstelling kan de annihilatiepiek geselecteerd worden en kan het (mogelijk gelijktijdige) signaal in de andere detector bestudeerd worden.

Bij voorkeur dienen er twee gelijksoortige detectoren gebruikt te worden i.v.m. elektronische vertragingen en de daarmee samenhangende tijdsrelatie tussen de signalen. Het ligt dus voor de hand om twee scintillatiedetectoren te gebruiken; die zijn ruim voorhanden. Gebruik ook signaalkabels van gelijke lengte.

Let op

De PMT-buis van de NaI-detector heeft een goed gestabiliseerde **positieve** voedingsspanning nodig die tussen **+500 V tot +1000 V** ligt. De spanning mag **niet meer bedragen dan +1100 V!** Het signaal kan uitgelezen worden



Figuur 1.3: Twee detectoren D_1 en D_2 worden onder variabele meethoek opgesteld. Daar tussen wordt een natrium-22-bron met een voldoende omhulling geplaatst. Beide detectoren worden aangesloten op een PicoScope [1]. Met gebruik van een handige triggerinstelling kan de annihilatiepiek geselecteerd worden en kan het (mogelijk gelijktijdige) signaal in de andere detector bestudeerd worden.

met een PicoScope en de gammaspectroscopie applicatie [1].

1.5.4 Experimenten

Annihilatiestraling

Onderzoek de eigenschappen van annihilatiestraling (timing, hoekafhankelijkheid, etc.).

PET-scan

We plaatsen drie β^+ -bronnetjes op verschillende plekken in een kartonnen doos. Door middel van het meten van coïncidenties is het duidelijk dat de gedetecteerde straling afkomstig moet zijn van een positie op de verbindingslijn tussen de detectoren. Door de detectoren te verplaatsen langs de doos maak je als het ware een lijnscan van de doos. Als de scan vervolgens vanuit verschillende hoeken wordt uitgevoerd is het goed mogelijk om te bepalen op welke posities in de doos de bronnen zich bevinden.

Vervalschema

Bepaal het vervalschema van natrium-22. Denk hierbij aan de soorten van verval die mogelijk zijn, aan de intensiteitsverhoudingen, de energieën en de levensduur van de niveaus.

Bibliografie

- [1] A graphical user interface for gamma spectroscopy using a Pico-Scope <https://gamma-spectroscopy.readthedocs.io/en/latest/>
- [2] Introduction to Nuclear Physics (H.A. Enge)
- [3] Scintillation Spectrometry, Gamma-ray Spectrum Catalogue (R.L. Heath)
- [4] Experimental Nucleonics (E. Bleuler and G.J. Goldsmith)
- [5] Nuclear and Particle Physics (E.B. Paul)
- [6] Table of Isotopes (Lederer, Hollander en Perlman)