
Nevelkamer gekoeld door Peltier-modules: Van ontwerp tot deeltjesdetectie

Dankbetuiging

Ik wil Raphaël Mosca en Rodolphe Valicon hartelijk bedanken. Ze toonden veel vindingrijkheid tijdens de realisatie van de nevelkamer. Ik bedank hen ook voor hun deelname aan de productie van de videopresentatie over het toestel.

Inhoudstafel

1.1 Inleiding	3
1.2. Volledige theoretische uitleg	3
1.2.1. Ioniserende deeltjes	3
1.2.2. Interactiemedium	5
1.2.3 Detectie	6
1.3 Materiaallijst	8
1.4 Het experiment opzetten	9
1.4.1 Deeltjes genereren	9
1.4.2 De nevel goed opsluiten	9
1.4.3 De bovenkant verwarmen	10
1.4.4 De onderkant koelen	11
1.5 Werkwijze	13
1.6 Experimentele resultaten	13
1.7 Suggesties voor ondervraging van de studenten	15
1.8 Besluit	16

1.1 Inleiding

De natuurkundige Charles Thomson Rees Wilson gebruikte een metastabiele dampstoestand om de passage van deeltjes met het blote oog te detecteren: het was de eerste nevelkamer. Deze uitvinding leverde hem de Nobelprijs voor Natuurkunde op in 1927. Deze uitvinding is historisch gezien van kapitaal belang omdat ze de ontdekking van nieuwe deeltjes en het aantonen van het bestaan van bepaalde interacties mogelijk maakte. Op zichzelf maakte de nevelkamer het bijvoorbeeld mogelijk om het bestaan van de Compton-verstrooiing aan te tonen (met wie Wilson in 1927 de Nobelprijs deelde), de ontdekking van het positron door Anderson (ontdekking die hem de Nobelprijs opleverde in 1936), de visuele demonstratie van het proces van paren en annihilatie van elektronen en positronen door Blackett en Occhialini, evenals de transmutatie van de atoomkern door Cockcroft en Walton. Geen wonder dus dat Ernest Rutherford, vaak beschouwd als de vader van de kernfysica, de nevelkamer beschreef als "het meest originele en wonderbaarlijk instrument in de wetenschappelijke geschiedenis" [1].

Ondanks deze grote successen wordt de nevelkamer nog te weinig gebruikt in de klas. De redenen zijn divers. De meeste nevelkamers die op internet in detail worden gepresenteerd, gebruiken bijvoorbeeld droogijs. Droogijs is echter niet erg lang houdbaar en moet daarom elke keer worden besteld en terug aangekocht, wat op de lange termijn tot hoge kosten leidt. Een eerste doel van het gerealiseerde project is dan ook om in detail de realisatie van een economische nevelkamer voor te stellen waarvan het gebruik geen droogijs vereist. Dit wordt mogelijk gemaakt door het alternatief gebruik van Peltier-modules om de nevelkamer te koelen.

Dit rapport biedt ook volledige theoretische uitleg over hoe een nevelkamer werkt, evenals suggesties om dit experiment op te nemen in lessen met studenten. Daarbij is een tweede doel van het project docenten aan te moedigen om meer gebruik te maken van dit toestel tijdens hun lessen over kernfysica en deeltjesfysica.

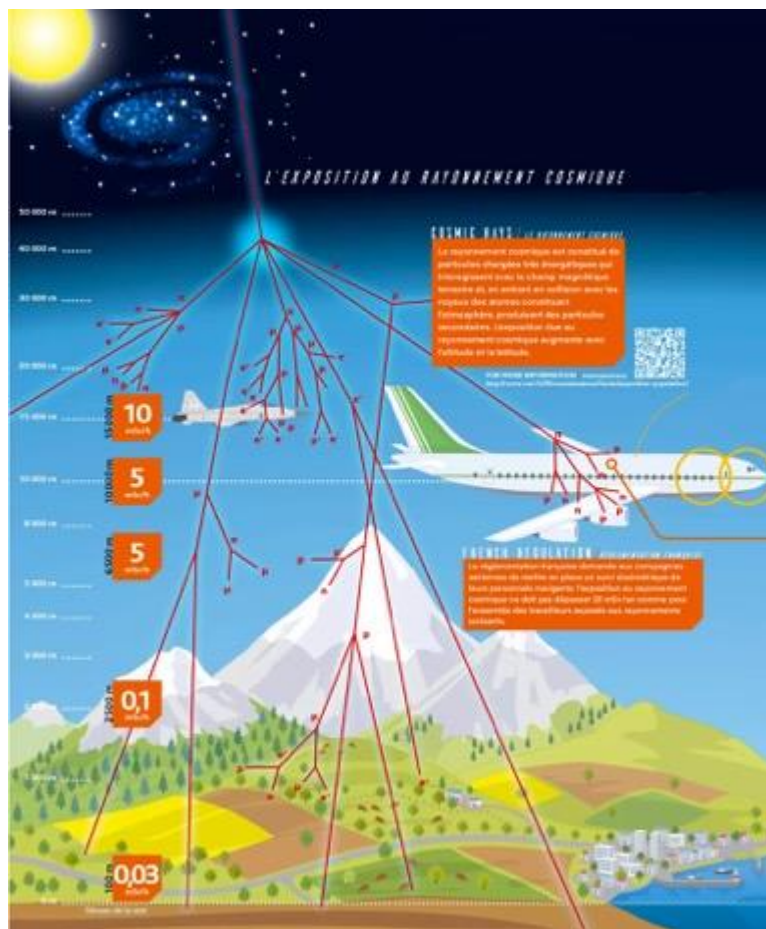
1.2. Volledige theoretische uitleg

Om deeltjes te detecteren, zullen we een metastabiele nevel creëren waarin de passage van de deeltjes met het blote oog zichtbaar zal zijn. Drie elementen zijn essentieel voor het waarnemen van deze sporen: de aanwezigheid van ioniserende deeltjes, een metastabiel interactiemedium en goede lichtomstandigheden.

1.2.1. Ioniserende deeltjes

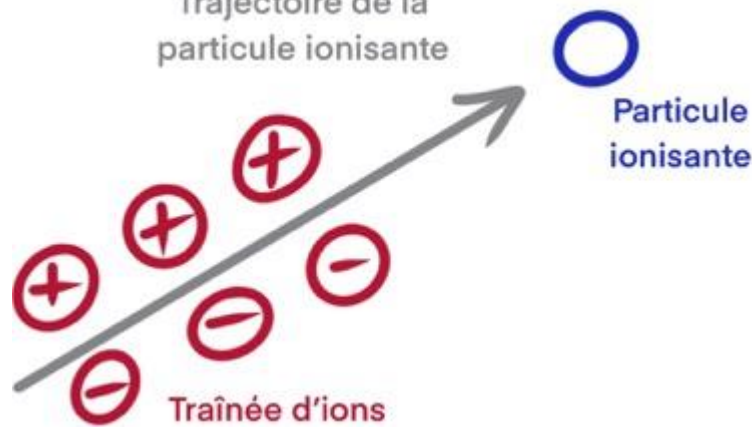
De deeltjes die door ons toestel kunnen worden gedetecteerd, zijn de ioniserende deeltjes die

invallen op de kamer en die voldoende energie hebben om het interactiemedium te ioniseren tijdens hun doorgang. Deze deeltjes kunnen van verschillende origine zijn. Wanneer ze uit de ruimte komen, wordt gezegd dat het **kosmische straling** is, zoals weergegeven in figuur 1.1. Deze straling interageert verschillende malen met de atmosfeer en ondergaat talloze desintegraties voordat ze het aardoppervlak bereikt onder de vorm van muonen, protonen, neutronen, elektronen of zelfs positronen. Wanneer ze van de aarde komen, wordt gezegd dat het **tellurische straling** is. Deze straling is het gevolg van de desintegratie van radioactieve elementen zoals thorium-232, uranium-235 en uranium-238 die in de bodem aanwezig zijn.



Figuur 1.1 - Kosmische straling is een voorbeeld van ioniserende deeltjes die kunnen worden gedetecteerd in een nevelkamer [2].

Tijdens de passage van een ioniserend deeltje in het interactiemedium, draagt het ioniserende deeltje een deel van zijn energie over aan het materiaal waar het doorheen gaat, waardoor dat geïoniseerd wordt: er wordt dan een ionenspoor gevormd, zoals weergegeven in figuur 1.2.



Figuur 1.2 - Ionenspoor gevormd door de passage van een ioniserend deeltje in het interactiemedium.

1.2.2. Interactiemedium

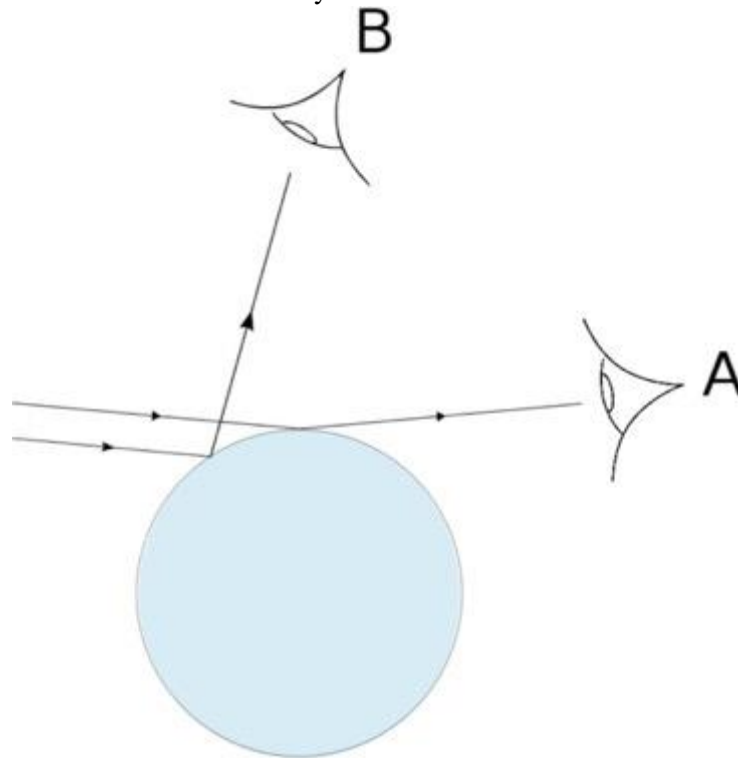
De huidige deeltjesdetectoren, zoals deze die bij CERN worden gebruikt, meten de baan van de deeltjes met hoge precisie via elektronische signalen die worden veroorzaakt door het opvangen van het ionenspoor. Aangezien het hier gepresenteerde project echter een educatief belang heeft, verdient het de voorkeur dat de sporen met het blote oog zichtbaar zijn. Deze voorwaarde zal in het bijzonder worden bereikt indien het interactiemedium zich in een toestand van metastabiele damp bevindt (men spreekt dan van een nevelkamer) of van een metastabiele vloeistof (men spreekt dan van een bellenkamer). Het belangrijkste is de toestand van metastabiliteit omdat deze toestand, wanneer verstoord door de aanwezigheid van het ionenspoor, dan een met het blote oog zichtbare toestandsverandering zal ondergaan rond het ionenspoor: er verschijnen dus zichtbare sporen. Bijvoorbeeld in een nevelkamer zal de metastabiele damp condenseren rond de deeltjes die geïoniseerd zijn door de passage van ioniserende deeltjes: er ontstaan dan condensatiesporen. In feite werken de ionen van het ionenspoor als condensatiekernen die de polaire moleculen van het interactiemedium aanmoedigen om te condenseren, en de metastabiele toestand maakt het mogelijk om de vereiste thermodynamische omstandigheden te hebben (oververzadigingstoestand, raadpleeg voor meer informatie de referentie [4]) opdat de aldus gevormde druppels groeien en een met het blote oog zichtbare grootte bereiken, wat ongeveer $3 \cdot 10^{-4}$ s duurt. Hoewel deze tijd kort lijkt, de ioniserende deeltjes reizen met snelheden die dicht bij die van het licht liggen en leggen gedurende deze tijd ongeveer 10 km af, zijn de sporen die we in de kamer waarnemen daarom geen "realtime-beelden" van de ioniserende deeltjes.

Om een damp te vormen die zich in een metastabiele toestand bevindt, zijn er verschillende mogelijkheden. Historisch gezien gebruikte Wilson een expanderende nevelkamer, maar het probleem met dit soort ontwerp is dat er niet continu sporen worden gegenereerd. Daarom nemen

we in plaats daarvan het ontwerp van Langsdorf over, die in 1939 de diffusienevelkamer uitvond. Het principe is vrij eenvoudig: het volstaat om een gesloten kamer te hebben waarin er een significante temperatuurgradiënt is tussen het bovenvlak en het ondervlak, en waarin aanvankelijk een vluchtige vloeistof zoals alcohol aanwezig is zoals weergegeven in figuur 1.4. De temperatuurgradiënt wordt bijvoorbeeld bereikt door het bovenvlak van de nevelkamer te verwarmen en het ondervlak van de nevelkamer te koelen. Het belangrijkste is eigenlijk om de onderkant voldoende af te koelen, want zelfs als de bovenkant op kamertemperatuur is, zijn de sporen nog steeds zichtbaar. De alcohol die aanvankelijk aanwezig is aan de kant van het bovenvlak die warm is, zal verdampen en zakken in de kamer waar hij snel zal afkoelen. In een gebied van enkele centimeters boven het ondervlak dat koud is, zal de alcohol zich dan in een staat van metastabiele damp bevinden waardoor sporen zichtbaar zullen zijn voor het blote oog, zoals uitgelegd in de vorige paragraaf. Dit gebied wordt de **gevoelige zone** van de nevelkamer genoemd. Buiten deze gevoelige zone zullen de voorwaarden niet vervuld zijn om druppels te vormen die zichtbaar zijn voor het blote oog, zelfs als er ionensporen gevormd worden bij de doorgang van ioniserende deeltjes.

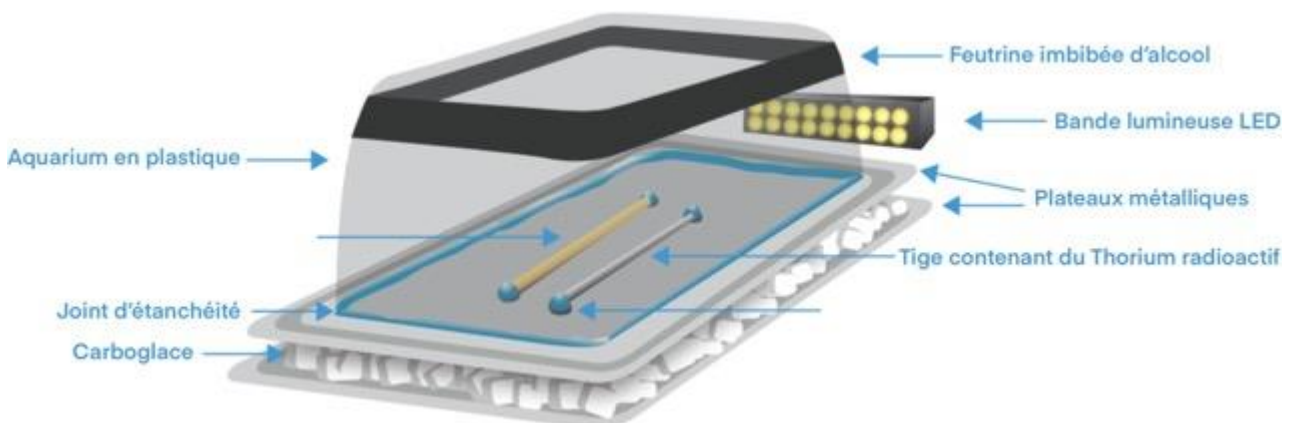
1.2.3 Detectie

Opdat de sporen met het blote oog zichtbaar zouden zijn, moet men zich idealiter in een donkere kamer bevinden waar alleen de nevel verlicht is. Wanneer een lichtstraal invalt op een van de druppels in de suspensie die de nevel vormen, verspreiden de verschillende transmissies en diffusies de energie van de straal in alle richtingen waardoor het spoor zichtbaar wordt ongeacht de waarnemingshoek, maar met een lage intensiteit. Het verdient daarom de voorkeur om in plaats daarvan de gereflecteerde stralen te observeren, waarvan de intensiteit groter zal zijn, vooral als de nevel rakelings wordt verlicht, omdat de Fresnel-reflectiecoëfficiënt groter is voor grotere invalshoeken, zoals weergegeven in figuur 1.3. Omdat de sporen witachtig zijn, is het beter dat de onderkant van de nevelkamer zwart van kleur is om voldoende contrast te hebben. Kortom, idealiter is een **donkere kamer** nodig waar **de nevel rakelings verlicht** wordt in een donkere kamer **met een zwarte onderkant**. Deze verschillende omstandigheden maken het mogelijk om de sporen gevormd in de nevel maximaal te zien.



Figuur 1.3 - Hoewel de twee waarnemers A en B de sporen zien die worden gevormd door de passage van de deeltjes, zal waarnemer A ze duidelijker zien vanwege de rakelingse inval van de stralen op de druppels in de suspensie, wat de reflectie bevordert [4].

Nu de fundamentele fysische principes in detail zijn uitgelegd, is het voortaan gemakkelijker om de rol van de verschillende aanwezige elementen te begrijpen, evenals hun locatie in een conventionele diffusienevelkamer, zoals weergegeven in figuur 1.4.



Figuur 1.4 - Voorbeeld van ontwerp van een diffusienevelkamer waarvan het gebruik droogijs vereist om de onderkant af te koelen. De bovenzijde is op kamertemperatuur [3].

1.3 Materiaallijst

De nevelkamer die in dit rapport en in de video wordt getoond, is ontworpen met behulp van het materiaal in tabel 1.2, voor een totaal budget van 113 €. Dit is echter slechts één specifiek ontwerp van nevelkamer en de kosten zouden verder verlaagd kunnen worden. Sommige componenten zijn inderdaad niet essentieel voor de werking van de nevelkamer. Het is volledig optioneel om deeltjes te genereren of de bovenzijde te verwarmen, omdat de kosmische en tellurische deeltjes altijd aanwezig zijn en een aanzienlijk aantal sporen zichtbaar blijven, zelfs als de bovenzijde op kamertemperatuur is. Het is ook mogelijk om de kosten te verlagen door sommige componenten te vervangen door andere met vergelijkbare efficiëntie en lagere kosten. Tot slot zou er bespaard kunnen worden door gerecycleerd materiaal te gebruiken, bijvoorbeeld van een oude computer.

Doel	Apparatuur	Prijs [€]
Deeltjes genereren	Thoriumkousje	
De nevel goed opsluiten	Buis (PMMA)	25
	Aluminium plaat	
	Stukjes PLA	3
De bovenkant verwarmen	Nichroomdraad	5
	Mica plaat	1
De onderkant koelen	Peltier (TEC1 ≠ 12706)	16
	Koelpasta	12
	Waterblokken	15
	Flexibele buizen	3
	Pomp-reservoir	22
	Polyurethaanschuim	2
De sporen met het blote oog observeren	LED-strip	7
	Vinylfilm	2

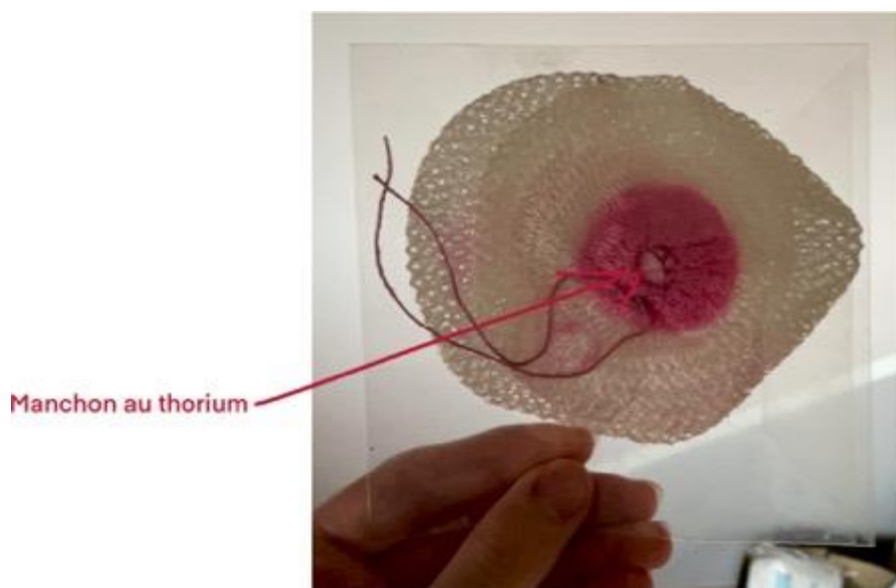
Tabel 1.1 - Materiaallijst voor het ontwerp van de voorgestelde nevelkamer.

Aangezien de kosten vooral te maken hebben met het koelen van de onderkant, zou het verleidelijk zijn in plaats daarvan droogijs te gebruiken om geld te besparen. Het is trouwens deze optie die wordt gebruikt in de meeste toestellen die op internet worden gepresenteerd. Zoals in de inleiding al vermeld, is droogijs echter niet erg lang houdbaar en moet het daarom elke keer worden besteld en terug aangekocht. Dit is de reden waarom het hier voorgestelde toestel, naast het feit dat het praktischer is omdat het alleen een stopcontact nodig heeft om te starten, in de loop van de tijd goedkoper is.

1.4 Het experiment opzetten

1.4.1 Deeltjes genereren

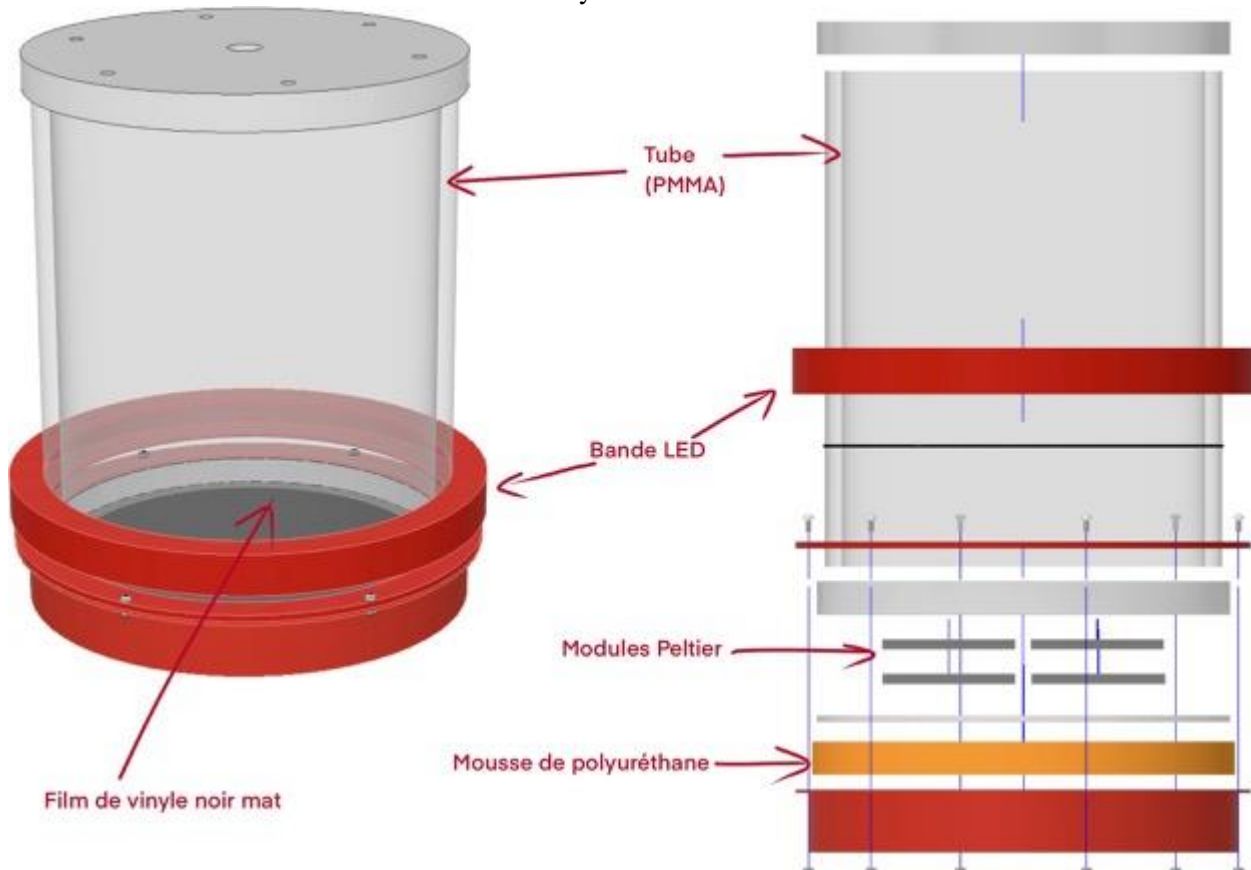
Hoewel optioneel, werd een thoriumkousje, zoals weergegeven in figuur 1.5, in de kamer ingebracht in de hoop meer sporen te zien omdat het thorium in het kousje radioactief is. Het was echter niet meer mogelijk om sporen waar te nemen omdat het kousje te groot en onregelmatig was, waardoor de nevel condenseerde op het kousje in plaats van op de ionensporen van de ioniserende deeltjes. Dit is de reden waarom uiteindelijk het gloeikousje niet is gebruikt en dat de sporen van de volgende secties zijn gemaakt in afwezigheid ervan.



Figuur 1.5 - Thoriumkousje.

1.4.2 De nevel goed opsluiten

Om de nevel goed op te sluiten, werd een cilindrische behuizing gefabriceerd, zoals weergegeven in figuur 1.6. De zijkant is een buis in PMMA omdat dit materiaal niet alleen transparant is, maar ook bestand tegen het temperatuurbereik van de nevelkamer. Ook is de thermische geleidingscoëfficiënt laag, waardoor de warmte-uitwisseling met de omgeving geminimaliseerd kan worden. Deze cilinder wordt afgesloten door een bovenvlak dat wordt verwarmd en een ondervlak dat wordt gekoeld door Peltier-modules.

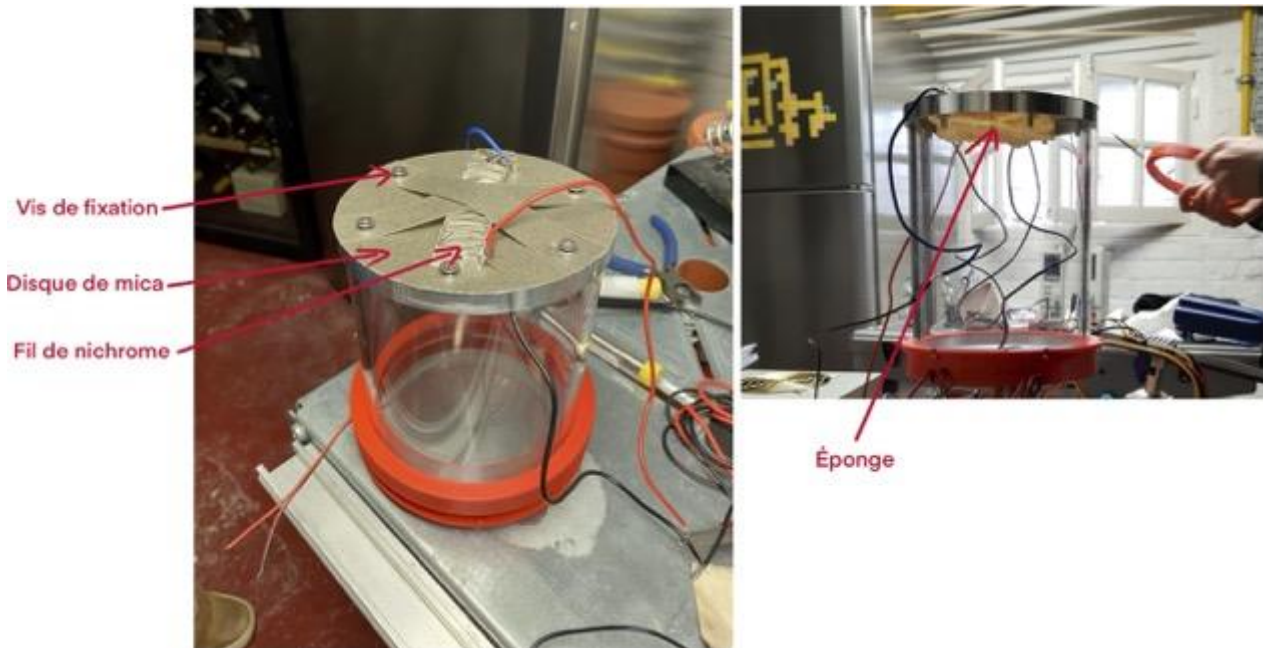


Figuur 1.6 - Geassembleerde weergave en uitgerold schema van de uitgewerkte nevelkamer.

1.4.3 De bovenkant verwarmen

Hoewel dit optioneel is, is het bovenzak van de geproduceerde kamer een verwijderbaar deksel dat wordt verwarmd via een systeem van verwarmingsweerstand zoals weergegeven in figuur 1.7. In feite wordt de nichroomdraad die aan de bovenzijde is gehecht, door een stroom doorlopen en wordt hij dus verwarmd door het Joule-effect. Om een temperatuur van rond de 60°C te bereiken en te behouden, is de weerstand van de nichroomdraad zo berekend dat het door het Joule-effect gedissipeerde vermogen de verliezen door natuurlijke convectie compenseert. Op de nichroomdraad zijn aansluitdraden gesoldeerd om de weerstand te kunnen aansluiten op een spanningsbron. Om kortsluiting te voorkomen en de warmte efficiënt doorheen de bovenplaat te geleiden, werd een micaplaat gebruikt, omdat dit een materiaal is dat een elektrische isolator is maar ook een warmtegeleider. De bevestigingsschroeven worden zowel gebruikt om mica-lamellen te bevestigen waarmee de nichroomdraad op de micaplaat kan worden gedrukt om een betere warmte-uitwisseling mogelijk te maken, alsook om een spons aan de binnenkant van het bovenzak te hangen. Deze spons wordt bij gebruik van de nevelkamer in alcohol gedrenkt. Voor wat betreft de alcohol zijn methanol, ethanol en isopropanol geschikt, maar methanol is giftig en moet met zorg worden behandeld. Uiteindelijk is voor isopropanol

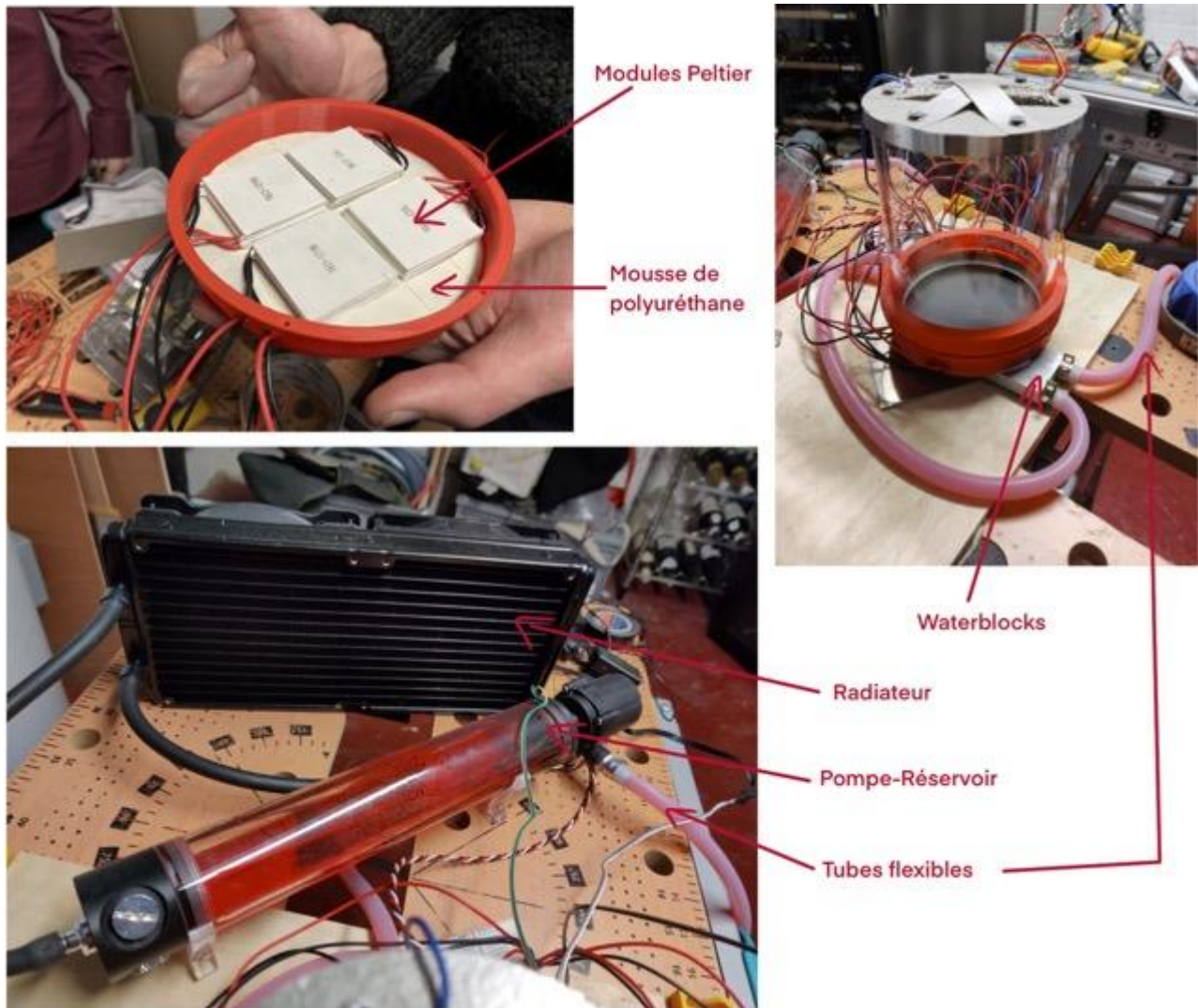
gekozen omdat het goedkoop is en zijn lage ionisatie-energie het mogelijk maakt om meer ionensporen te genereren.



Figuur 1.7 - Bovenkant van de uitgewerkte kamer.

1.4.4 De onderkant koelen

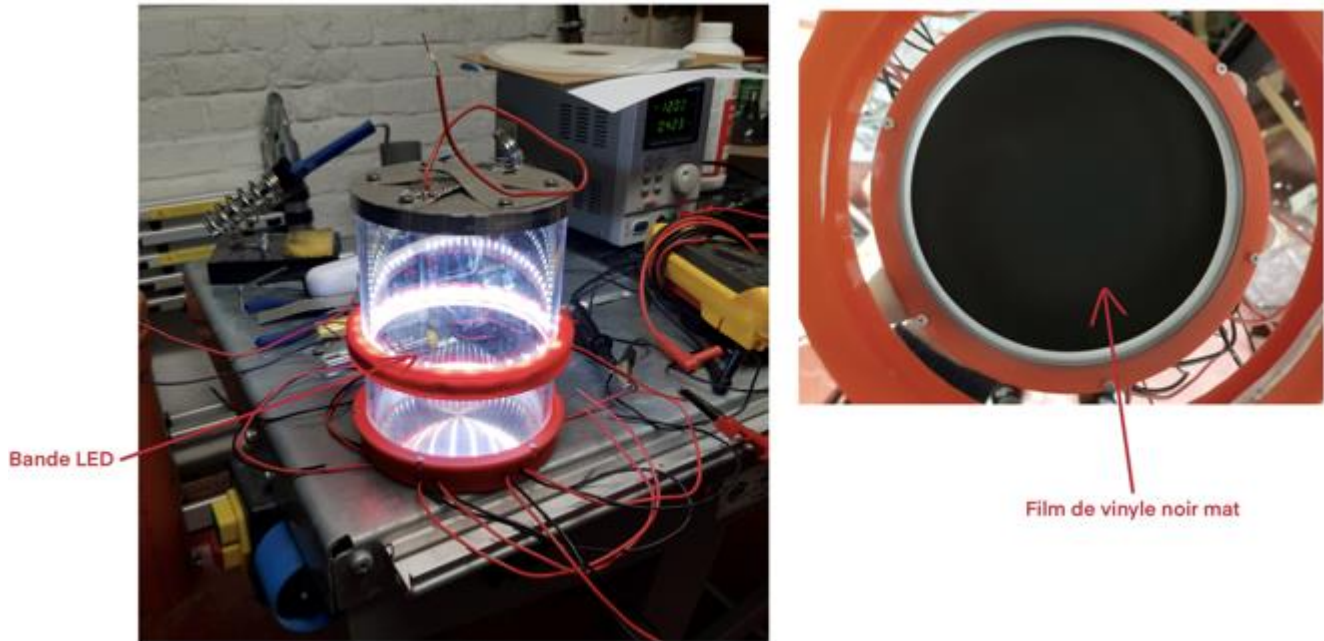
Het koelen van de onderkant is zonder twijfel het meest complexe onderdeel van het toestel. De onderkant staat in contact met 8 Peltier-modules, zoals weergegeven in figuur 1.8. We kunnen twee verdiepen zien die elk 4 Peltier-modules bevatten. Er werd thermische pasta gebruikt tussen Peltier-modules van een verschillend verdiep om warmte-uitwisseling tussen de twee verdiepen mogelijk te maken. De Peltiers-modules zijn bedekt met polyurethaanschuim zodat ze geen warmte uitwisselen met de buitenmuren en koud blijven. Aangezien deze modules echter dienen om de bodemplaat te koelen, moet de onttrokken warmte buiten de nevelkamer worden afgevoerd, anders zal ze daar terugkeren en zal de koeling niet effectief zijn. Hier komt het warmteafvoersysteem om de hoek kijken. Inderdaad, de waterblokken, in contact met de Peltier-modules, absorberen de warmte die dan getransporteerd wordt naar een radiator door een vloeistof, die circuleert in de flexibele buizen dankzij een pomp, wat toelaat om de warmte af te voeren buiten de nevelkamer en dus een effectieve koeling te hebben.



Figuur 1.8 - Onderkant van de uitgewerkte kamer evenals het warmteafvoersysteem.

1.4.5 De sporen met het blote oog observeren

Zoals te zien is in figuur 1.9 is over de ganse omtrek van de PMMA-buis een LED-strip geplaatst en is de hoogte van deze LED-strips instelbaar om het gevoelige gebied van de nevelkamer raketings te verlichten. Daarnaast is aan de onderkant een matzwarte vinylfilm bevestigd die voldoende contrast geeft om de sporen waar te nemen.



Figuur 1.9 - LED-strip en matzwarte vinylfilm voor optimale kijkomstandigheden.

1.5 Werkwijze

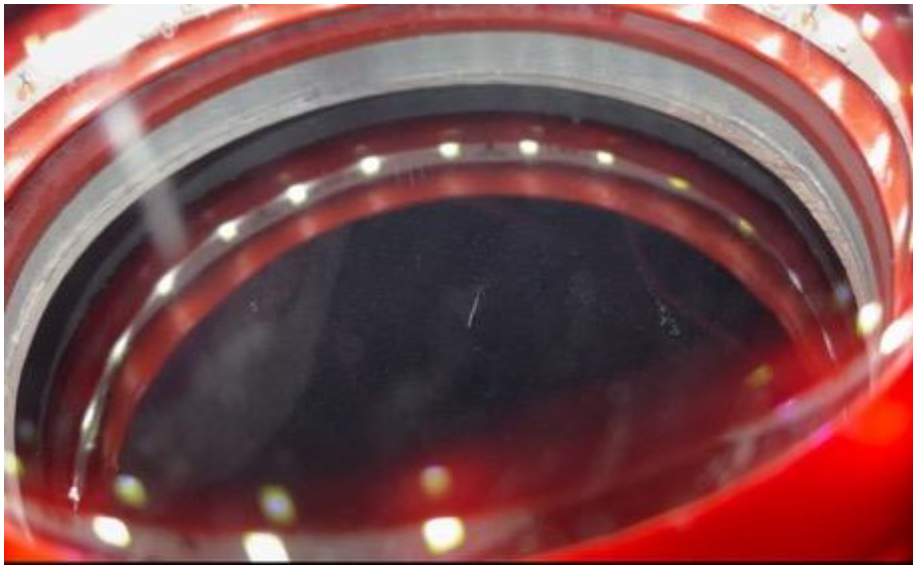
Eenmaal gebouwd, is de nevelkamer heel gemakkelijk te starten. Het enige wat men moet doen is het deksel optillen om de spons in alcohol te drenken voor het sluiten van de nevelkamer, en vervolgens de stroom van het koelsysteem (en optioneel het verwarmingssysteem) in te schakelen. Het duurt ongeveer vijf minuten, de tijd die de metastabiele nevel nodig heeft om zich te vormen, om de eerste sporen waar te nemen. Vanaf dan blijven de sporen zichtbaar totdat er niet meer genoeg alcohol in de nevelkamer zit. De afdichting van de voorgestelde nevelkamer was voldoende om gedurende ongeveer 45 minuten sporen waar te nemen.

Het is ook mogelijk een radioactieve bron in de nevelkamer te plaatsen alvorens deze te starten om meer sporen waar te nemen. Dit is echter niet nodig omdat de kosmische en tellurische straling voldoende is voor een demonstratie voor studenten.

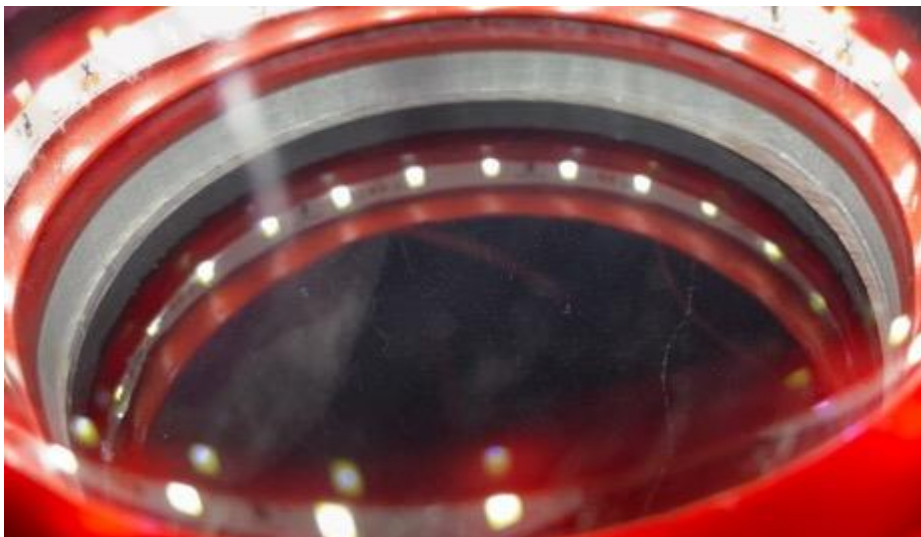
1.6 Experimentele resultaten

1.6.1 Waargenomen deeltjes

Afhankelijk van het deeltje dat door de kamer gaat, ziet het spoor er anders uit. Figuren 1.10 en 1.11 tonen respectievelijk de sporen tijdens de doorgang van een alfadeeltje of een elektron.



Figuur 1.10 - Zeer dik, zeer kort en recht spoor: kenmerkend voor een alfadeeltje.



Figuur 1.11 - Zeer fijn, kort en zigzagspoor: kenmerkend voor een elektron.

De volgende tabel maakt het mogelijk om het type waargenomen deeltje te identificeren aan de hand van de vorm van het spoor.

Deeltje	Paddikte:	Pad lengte	Trajectvorm
Alfa	Heel dik	Zeer kort	Recht
Proton	Dik	Lang	Recht
Muon	Fijn	Lang	Recht
Elektron	Zeer fijn	Kort	Zigzag

Tabel 1.2 - Type baan waarneembaar in de nevelkamer als functie van het deeltje dat door de nevelkamer gaat.

De dikte van de baan hangt af van het ioniserend vermogen van het deeltje, dit ioniserend vermogen is des te groter naarmate de massa en de lading van het ioniserende deeltje groot is. Het alfadeeltje heeft de grootste lading en de grootste massa van de deeltjes die in de vorige tabel zijn genoemd, het ioniserende vermogen is daarom hoger, wat de dikte van de sporen verklaart die door zijn passage worden gevormd.

Wat betreft de lengte van het pad: deze hangt af van de energie waarmee het ioniserende deeltje de kamer binnenkwam. De waargenomen protonen en muonen zijn van kosmische oorsprong en hebben zeer hoge energieën, zodat ze volledig door de kamer gaan en de waargenomen banen zijn daarom minstens zo lang als de dikte van de gevoelige zone van de kamer. Aan de andere kant zijn de waargenomen alfadeeltjes en de elektronen niet van kosmische oorsprong, maar afkomstig van radioactieve elementen die in de kamer aanwezig zijn. Hun energie is dus lager en ze worden reeds gestopt na relatief korte afstanden. Inderdaad, de alfadeeltjes zouden de nevelkamer niet kunnen binnendringen als ze van buiten zouden komen, omdat ze al worden tegengehouden door een blad papier en daarom ook worden tegengehouden door de PMMA-buis. Alfadeeltjes komen eigenlijk van het verval van Radon in de kamer, de concentratie van dit radioactieve gas in de lucht hangt vooral af van de geografische locatie.

Ten slotte hangt de vorm van het traject in se af van de massa en de energie van het ioniserende deeltje. De waargenomen elektronen zijn erg licht en hebben een lage energie, dus hun baan heeft een zigzagvorm.

1.7 Suggesties voor ondervraging van de studenten

Bij de presentatie van het experiment zou het interessant zijn om de leerlingen te vragen de kenmerken van de verschillende sporen die ze waarnemen op te merken. Ze zouden moeten ontdekken dat sommige sporen fijn, lang en soms zigzaggend zijn, terwijl andere dikker, recht en soms kort zijn. Vervolgens moet hen worden gevraagd de oorsprong van dit verschil uit te leggen. Ze moeten in staat zijn om, indien nodig met hulp van de leraar, een deel van de uitleg in de vorige paragraaf af te leiden en het verband te begrijpen tussen het type ioniserend deeltje en het spoor dat in de kamer wordt gegenereerd. De leraar zou de leerlingen ook kunnen vragen na te denken over wat men zou waarnemen als men zou experimenteren in geografische gebieden met hogere radonconcentraties, of als men zou experimenteren op grotere hoogte.

1.8 Besluit

De nevelkamer heeft het historisch mogelijk gemaakt om het universum om ons heen beter te begrijpen door de ontdekking mogelijk te maken van talloze deeltjes en de interacties ertussen, waardoor het een onmisbaar toestel is in de studie van de natuurkunde. Daarnaast is voor de werking van een nevelkamer een veelheid aan disciplines nodig: thermodynamica, vloeistofmechanica, kernfysica en deeltjesfysica. Het is ook de moeite waard en leuker om de banen van deeltjes zichtbaar te maken in plaats van deze verschijnselen op een theoretische manier te bestuderen. Deze drie factoren maken het mogelijk om overtuigd te raken van de educatieve waarde van een dergelijk toestel. Ten slotte heeft dit project aangetoond dat een nevelkamer niet per se ingewikkeld of duur is om te maken, wat leraren zou kunnen aanmoedigen om dit toestel te maken en te gebruiken in de klas.

Bibliografie

- [1] C.T.R. Wilson *Biographical*. 1e6 . URL : <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/19> /wilson/biographical/> (bezocht op 19/04/2021).
- [2] *Cosmic radiation under world-wide surveillance*. 2018. URL : <https://www.observatoiredeparis.psl.eu/le-rayonnement-cosmique-sous.html?lang=en> (bezocht op 19/04/2021).
- [3] ESA. *Cloud Chamber*. 2016. URL : https://esamultimedia.esa.int/docs/edu/Po3b_Cloud_chamber_student_activities.pdf (bezocht op 19/04/2021).
- [4] Iván Esteban MUÑOZ. *Detection of particles with a cloud chamber*. 201 . URL : https://addi.ehu.es/bitstream/handle/10810/1990/Colour_blind.pdf?sequence=4 (bezocht op 19/04/2021).