

Institut Rovira-Forns

FÍSICA

CONSTRUCCIÓ D'UN DETECTOR DE
PARTÍCULES I ANÀLISI DE LA RADIACIÓ
DE DIFERENTS FONTS

Treball de Recerca

Autor:

Julen Camps Damas

Tutor:

Carlos Cruz Molina

Desembre del 2022

Vull agrair al meu tutor, Carlos Cruz, l'ajuda brindada durant tot el treball. Vull agrair també la col·laboració de la Irene Valle, que ens ha aconseguit alguns dels aparells de mesura emprats en el treball; de la meva tieta, Queralt Camps, per la revisió minuciosa del text; del Pau Sust, que ens ajudà amb la utilització de l'oscil·loscopi i del Dani Renau, que ens ha ajudat amb l'electrònica. Agrair per últim l'ajuda de totes aquelles persones que no he mencionat explícitament i que han donat petits consells per millorar el treball.

Resum

En aquest treball construïm un detector de partícules que utilitza un fotodíode per a fer les deteccions. Aquest detector, segons el seu creador, té la capacitat de distingir entre partícules α i β . L'objectiu és fer un estudi sobre la radiació de diferents mostres. Donem una mica de context al lector fent una petita revisió de la història de la radiació i explicant els conceptes més rellevants a l'hora d'entendre el treball. No aconseguim fer cap detecció amb l'aparell, segurament perquè no hem trobat objectes prou radioactius per fer les mesures. L'estudi sobre la radiació de les mostres el fem amb un comptador Geiger que comprarem per internet.

Paraules clau: Detector, díode, fotodíode, partícules, radiació, treball de recerca.

Abstract

In this paper, we build a particle detector that uses a photodiode in order to detect radiation. The detector, according to the information provided by the designer, is capable of distinguishing between α and β particles. We build this detector in order to study the radiation of different objects. An introduction to the history of radiation is made and an explanation of the main concepts needed to understand the paper is provided. As we were not able to detect anything with our detector, the study about the radiation of different objects was made with a Geiger counter that we bought online.

Keywords: Detector, diode, photodiode, particles, radiation.

Sumari

1 Pròleg	7
2 Context Històric	9
2.1 Història de la radiació	9
2.1.1 El descobriment dels raigs X	9
2.1.2 El descobriment de la radiació natural d'alguns minerals . .	10
2.1.3 El descobriment del poloni i del radi	11
2.1.4 La classificació de la radiació ionitzant	12
2.2 Història de les tècniques i aparells de detecció i mesura de la radiació	12
2.2.1 Els sentits humans	13
2.2.2 Plaques fotogràfiques	13
2.2.3 Cambres d'ionització	14
2.2.4 Comptadors Geiger	15
2.2.5 Semiconductors com a detectors de radiació	16
3 Marc Teòric	18
3.1 Radiació Ionitzant	18
3.1.1 Partícules α	18
3.1.2 Partícules β	19
3.2 Radiació ambiental	20
3.3 L'electró-volt	21
3.4 Unitats de mesura relacionades amb la radiació	21
3.5 Funcionament d'un fotodíode	23
4 Apartat experimental	25
4.1 Un detector de partícules casolà	25
4.1.1 Tria del model de detector de partícules	25
4.2 Anàlisi dels resultats obtinguts en les deteccions	27
4.3 Radiació en diferents objectes i compostos	29

5 Conclusió	32
Bibliografia	34
A Apèndix	37

1 Pròleg

La paraula "radiació" és un terme bastant utilitzat en la cultura popular. En l'imaginari col·lectiu la radiació és un fenomen perillós del qual cal mantenir-se allunyat i que provoca efectes estranys als éssers vius que hi estan en contacte. La imatge que dona el cinema sobre la radiació és la d'una "força" devastadora que arrasa amb la vida i que deixa paisatges àrids i inerts. Moltes entitats ecològiques protesten en contra de la utilització del fenomen de radiació espontània, que ocorre de manera natural en alguns elements, per l'obtenció d'energia. La utilització d'aquest fenomen per part dels exèrcits per crear armament i els accidents ocorreguts en les últimes dècades en centrals nuclears juntament amb la ignorància del públic general són, segurament, els factors que han contribuït al fet que es tingui aquesta idea distorsionada de què és la radiació.

Com és possible que siguem capaços de veure-hi i de transmetre missatges a la velocitat més alta a la que es pot transmetre informació per l'univers? Què és el que fa possible que es puguin fer exploracions anatòmiques que mai havíem pogut fer en una persona viva? Com som capaços de cobrir gran part de les nostres necessitats energètiques sense emetre grans quantitats de gasos d'efecte hivernacle a l'atmosfera? La resposta a totes aquestes preguntes és "la radiació". Però, què és realment la radiació? Com la podem detectar? Aquestes preguntes són algunes de les que respondrem en aquest treball.

La nostra intenció és muntar un aparell que, gràcies a un fotodíode, detecti la radiació emesa per diferents objectes i substàncies. L'aparell que volem muntar fou dissenyat per Oliver Keller, un físic que s'ha passat els últims anys de la seva vida estudiant els aparells de detecció de radiació. El projecte està publicat a Github sota una llicència lliure, cosa que vol dir que tothom el pot utilitzar i modificar de la manera que vulgui, sempre que citi al creador. El cost dels components necessaris per muntar el detector és d'uns 40€, un preu relativament baix si tenim en compte que els comptadors Geiger més barats tenen un preu

que ronda els 80€ i que aquests últims, a diferència del detector que muntarem, no són capaços de distingir entre diferents tipus de radiació. A més de tenir un preu raonable, el detector és senzill de muntar i els components són molt fàcils d'aconseguir (Keller et al., 2019).

Un cop tinguem el detector muntat volem dur a terme un estudi sobre la radiació de diferents objectes, diferenciant entre partícules α i β per tal de deduir, comparant les dades obtingudes amb les obtingudes per altres científics, quins elements són els que fan radioactius els objectes en qüestió. Això serà possible gràcies al fet que cada element radioactiu emet un percentatge determinat de cada tipus de radiació (Keller et al., 2019).

El treball es dividirà en quatre apartats principals, cadascun amb els pertinents subapartats. El primer apartat del treball serà el context històric, on pretenem donar al lector, com el títol de l'apartat indica, un breu resum de la història que envolta el descobriment de la radiació i la seva classificació, així com l'evolució de les tècniques utilitzades per detectar-la, des de les primeres observacions, fetes amb els sentits humans, fins a la utilització d'aparells basats en semiconductors. El segon apartat, el marc teòric, servirà per explicar tota la teoria que serà necessària per a entendre el treball. En el tercer apartat del treball, l'apartat experimental, explicarem com funciona el detector i com l'hem muntat. A més mostrarem i analitzarem totes les dades que hàgim aconseguit recopilar, comparant-les, com hem dit abans, amb les recollides per altres científics. L'últim apartat seran les conclusions.

2 Context Històric

Aquest apartat el dedicarem a fer un breu resum de la història de la radiació. Començarem parlant del seu descobriment, a finals del segle XIX, i de com, durant els anys immediatament posteriors, es va avançar en el coneixement d'aquesta. Després parlarem, ja que l'objectiu del treball és muntar un detector de partícules, de com han evolucionat les tècniques de detecció de la radiació. La finalitat d'aquesta contextualització històrica és donar al lector les eines necessàries per entendre perquè plantegem aquesta solució al problema de la detecció de radiació i, de manera molt superficial, perquè s'utilitzin determinats noms i termes que fan referència a la radiació i a fenòmens relacionats amb aquesta. Alguns dels conceptes que utilitzarem en aquest apartat es defineixen a l'apartat 3.

2.1 Història de la radiació

2.1.1 El descobriment dels raigs X

El 8 de novembre del 1895 Wilhelm Conrad Röntgen¹ estava a l'Institut de Física de la universitat de Würzburg, Alemanya, experimentant amb un tub de Crookes —un tub de vidre a l'interior del qual s'hi ha fet el buit. A dins hi ha dos elèctrodes de manera que el corrent elèctric pot passar del càtode a l'ànode sense trobar la resistència, que en condicions normals, oferiria l'aire (Figura 1). El tub estava cobert amb una cartolina negra, de manera que la radiació electromagnètica en l'espectre de la llum visible no podia escapar. A la sala, que estava a les fosques per observar amb facilitat qualsevol efecte lluminós, hi havia un tros de cartó pintat amb un químic fluorescent que començà a brillar. Perquè això passés havia d'haver-hi algun tipus de radiació no visible que fos absorbida pel químic fluorescent i que permetés a aquest emetre llum visible. Röntgen havia

¹En alguns articles, com per exemple (P. Thompson, 1897a) i (P. Thompson, 1897b), el cognom "Röntgen" s'escriu "Roentgen", que és com l'autor decidí traduir-lo a l'anglès. "Röntgen" és el cognom en alemany (Kaye, 1934).

descobert un nou tipus de radiació electromagnètica, al que va anomenar raigs X (P. Thompson, 1897b).

Röntgen va adonar-se que els raigs tenien una alta capacitat de penetració en materials com el paper, la roba, la fusta i fins i tot les parets del laboratori. Els raigs tenien més dificultat per penetrar metalls com el coure, el ferro, el plom la plata o l'or. També va descobrir que encara que els músculs i la pell eren fàcilment travessats pels raigs, l'os era gairebé opac. Quan va posar la mà entre l'emissor de raigs X i el cartó fluorescent va poder veure l'ombra dels seus ossos projectada al cartó. Va comprovar també que els raigs no tenien càrrega elèctrica, ja que no es desviaven en passar per un camp magnètic. Quan una font de raigs X es col·locava al costat d'un electroscopi, aquest es descarregava. Röntgen no va poder explicar aquest fenomen, que ara sabem que es deu a la capacitat dels raigs X d'ionitzar les molècules de l'aire, fent que els àtoms carregats positivament neutralitzin la càrrega negativa de l'electroscopi (E. Turner, 2007).

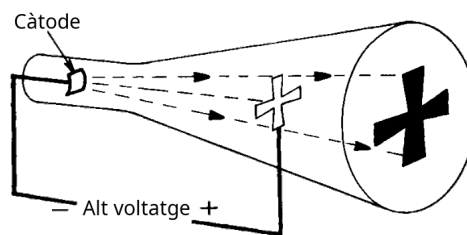


Figura 1: Dibuix esquemàtic d'un tub de Crookes. L'ànode, en forma de creu, projecta la seva ombra al fons del tub (E. Turner, 2007).

2.1.2 El descobriment de la radiació natural d'alguns minerals

Röntgen envià còpies de la primera radiografia que havia fet a diversos científics d'Europa. Henri Poincaré, un dels receptors de la radiografia, la mostrà en una sessió de l'*Académie des Sciences* el 20 de gener del 1896. Henri Becquerel va voler saber per quina part del tub de Crookes sortien els raigs X i Poincaré li va explicar que sortien de la mateixa part del vidre que emetia fluorescència —allà on impactaven els electrons. Becquerel, que coneixia els treballs del seu pare sobre la fluorescència d'alguns compostos d'urani, pensà que aquests compostos fluorescents potser emetien una radiació similar als raigs X (Allisy, 1996).

Exposant sulfat d'urani —un compost fluorescent— a la llum solar i utilitzant una placa fotogràfica, Becquerel feu una sèrie d'experiments que semblaven confirmar la seva hipòtesi. Presentà els resultats a l'*Académie des Sciences* el 24 de gener. El dia 26, quan va intentar repetir els experiments, es va trobar que no feia prou sol. Guardà en un armari el sulfat d'urani i la placa fotogràfica i el dia 1 de març, quan va obrir l'armari per repetir l'experiment, va veure que els efectes del sulfat d'urani sobre la placa fotogràfica havien estat similars als que s'haurien produït exposant el sulfat d'urani a la radiació solar. El 18 de maig del 1896, després d'estudiar sals d'urani no fluorescentes i urani pur, Becquerel va concloure que l'urani emetia un tipus de radiació desconegut fins aleshores (Allisy, 1996).

2.1.3 El descobriment del poloni i del radi

Utilitzant una cambra d'ionització i una balança de quars, Marie Curie-Sklodowska i Pierre Curie van desenvolupar un mètode per mesurar la quantitat de radiació emesa per l'urani i altres elements radioactius —podeu trobar una explicació detallada de com funciona una cambra d'ionització a la secció 2.2.3.

Emprant aquest mètode, Marie Curie va adonar-se que la quantitat de radiació detectada era proporcional a la quantitat d'urani que hi havia al mineral utilitzat per fer la mesura. Per tant, arribà a la conclusió que la radiació és una propietat atòmica que no canvia quan l'element radioactiu interactua químicament amb altres elements.

Els Curie també van observar que la torbernita i la uranita d'origen natural emetien una quantitat de radiació superior a l'esperada. Marie Curie va crear al laboratori torbernita sintètica i quan en va mesurar la quantitat de radiació emesa va veure que era l'esperada. Per tant, va arribar a la conclusió que a la torbernita i a la uranita d'origen natural s'hi trobaven traces d'un element radioactiu desconegut fins aleshores. Aquest element fou anomenat poloni. Més tard, els Curie van descobrir un altre element radioactiu, el radi. Aquests descobriments van fer que Marie Curie i Pierre Curie, juntament amb Becquerel, guanyessin el premi Nobel de física el 1903 (Mould, 1998).

2.1.4 La classificació de la radiació ionitzant

L'observació que la radiació no sempre es comporta de la mateixa manera feu palesa la necessitat de classificar-la en diferents tipus. Aquesta classificació va ser desenvolupada entre 1898 i 1902. Inicialment, basant-se en el seu poder de penetració, Ernest Rutherford va distingir entre dos tipus de radiació. El primer, amb un baix poder de penetració, va ser anomenat radiació α . El segon, amb més poder de penetració que el primer, va ser anomenat radiació β . Aquestes dues categories només s'aplicaven a la radiació emesa per l'urani.

Al principi la radiació es va designar segons el seu origen. La radiació emesa per l'urani s'anomenava raigs d'urani, l'emesa pel radi raigs de radi i així amb tots els elements identificats com a radioactius. Però aquesta manera d'anomenar els diferents tipus de radiació era poc útil. Els Curie havien descobert tres tipus de radiació només analitzant el radi. Van observar uns raigs amb baix poder de penetració i que semblava que no eren desviables per un camp magnètic², uns amb càrrega negativa i que, per tant, eren desviables per un camp magnètic i uns que tenien un poder de penetració molt alt i que no eren desviats per cap camp magnètic. Rutherford s'encarregà d'anomenar aquests raigs. Els primers reberen el nom de raigs α , els segons foren anomenats raigs β i els últims raigs γ . El 1904 s'adoptà definitivament aquesta nomenclatura que s'ha mantingut fins a l'actualitat. Encara que en els anys posteriors a l'acceptació del model de Rutherford es va descobrir la naturalesa corpuscular dels "raigs" α i β s'ha seguit anomenant-los de la mateixa manera (Trenn, 1976). A l'apartat 3.1 trobareu una explicació sobre aquests dos tipus de radiació.

2.2 Història de les tècniques i aparells de detecció i mesura de la radiació

En aquesta secció explicarem com han evolucionat els mètodes de detecció de radiació. Cal que el lector tingui en compte que no veurem tots els mètodes que han existit, sinó que explicarem els més rellevants, sigui perquè han estat

²Més endavant es descobrí que els raigs α sí que eren desviables per camps magnètics, però en la direcció contrària a la que es desviaven els raigs β (Trenn, 1976).

molt utilitzats o perquè són de gran importància per entendre com funciona el detector de partícules que construirem. Per una història més detallada podeu veure l'article (Frame, 2005) d'on hem extret la majoria de la informació d'aquest apartat.

2.2.1 Els sentits humans

Per parlar de mitjans de detecció de radiació hem de començar parlant dels sentits humans. Ja Röntgen en el seu article de 1899 descrigué "una feble sensació lumínica en tot el camp de visió" quan treballava amb raigs X. Alguns astronautes expliquen que estant a l'espai han experimentat flaixos de llum espontanis. Chris Hadfield, que fou comandant de la trenta-cinquena expedició a l'Estació Espacial Internacional, explica en una entrevista (Muller, 2021) com a l'hora d'anar a dormir, quan els astronautes tanquen els ulls, veuen aquests flaixos. Tot i que no en tenen cap prova concloent, tot apunta al fet que els flaixos es deuen a raigs còsmics que passen a través de l'ull o del nervi òptic.

2.2.2 Plaques fotogràfiques

El primer a utilitzar plaques fotogràfiques per detectar la radiació i en aprofitar-la per obtenir imatges fou Röntgen quan experimentava amb els raigs X. Les plaques que es feien servir solien ser de cartó o vidre recoberts amb una substància gelatinosa i cristalls de bromur d'argent, que presenten una estructura cúbica com es veu a la figura 2 (Frame, 2005). Durant el procés de fabricació dels cristalls de bromur d'argent es genera també un compost químic contaminant que fa que els cristalls no siguin perfectes. És gràcies a aquest compost químic que als cristalls es crea una regió, anomenada en anglès "sensitivity speck", capaç de capturar electrons i és on es forma la taca d'argent que dona el color negre a les imatges. El procés de la formació de la taca d'argent funciona de la següent manera:

1. Els fotons dels raigs X travessen els cristalls de bromur d'argent. Alguns d'aquests fotons són absorbits.

2. S'alliberen electrons dels anions de brom que formen el cristall. Alguns d'aquests electrons queden atrapats a la regió anomenada "sensitivity speck". Els àtoms de brom, que tenen càrrega neutra després d'haver perdut un electró, queden atrapats a la substància gelatinosa.
3. Els cations d'argent són atrets cap als electrons que han quedat atrapats i els dos s'ajunten formant un àtom d'argent amb càrrega neutra.
4. Al final del procés s'hauran ajuntat uns quants àtoms d'argent, que ennegreixen la regió travessada pels raigs X.

La figura 3 il·lustra aquest procés. Qualsevol partícula ionitzant que impacti amb els cristalls de bromur d'argent pot desencadenar aquest procés (Meredith & Massey, 1977).

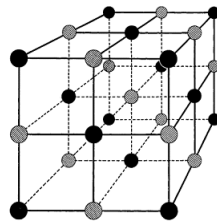


Figura 2: Estructura dels cristalls de bromur d'argent (Meredith & Massey, 1977).

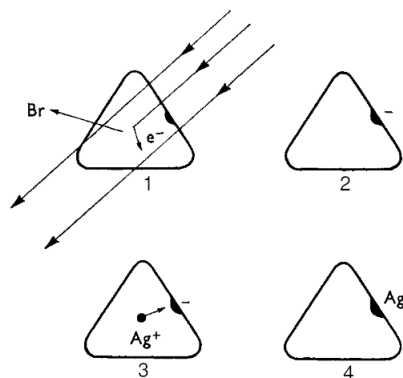


Figura 3: Procés de formació de la imatge en una placa fotogràfica (Meredith & Massey, 1977).

2.2.3 Cambres d'ionització

J.J Thomson va descriure el 1896 com els raigs X podien convertir un medi aïllant en conductor (Thompson, 1896). Ell i Ernest Rutherford van suposar que

això es devia al fet que quan els raigs X travessaven un material conductor n'arrancaven petites partícules de càrrega negativa³. Sabent això van poder construir les primeres cambres d'ionització. Tot connectant dues plaques d'un material conductor a una font de voltatge i posant-ne una al costat de l'altre —sense que s'arribessin a tocar— induïen un camp elèctric. Després, emetent raigs X que ionitzaven l'aire, aconseguien que es creés un corrent elèctric. Mesurant aquest corrent podien saber la quantitat de radiació emesa. Més endavant Rutherford aplicà aquesta tècnica per mesurar també altres tipus de radiació ionitzant (Frame, 2005).

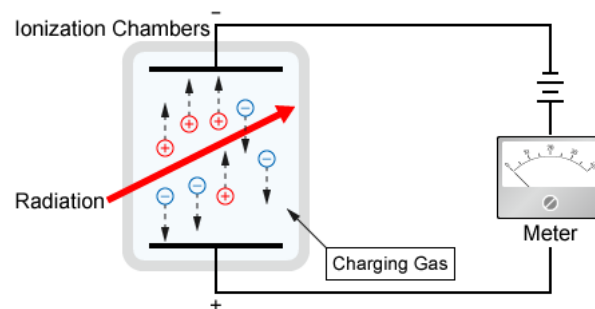


Figura 4: Dibuix esquemàtic d'una cambra d'ionització (Matsusada, 2022).

2.2.4 Comptadors Geiger

Encara que les cambres d'ionització suposaren un gran avenç en l'estudi de la radiació, ben aviat fou necessari un mètode per detectar les partícules d'una en una. El 1908, Hans Geiger i Ernest Rutherford construïren el primer detector capaç de fer això. Consistia en un tub de llautó, que actuava com a ànode, amb un fil conductor al centre que actuava com a càtode. L'aire dins del tub s'evacuava fins a aconseguir una pressió d'entre 2,6 kPa i 6,6 kPa. Quan una partícula α entrava al detector produïa una ionització en cadena de les poques molècules d'aire que quedaven a la cambra. Aquesta ionització en cadena generava un pols elèctric prou gran per ser detectat. Observant com es movia l'agulla de l'electròmetre es podia distingir cada partícula individualment. El 1928 Geiger i Otto Klemper aconseguiren construir un detector que, valgui la redundància, també detectava partícules β . En funció de la magnitud del pols podien distingir les partícules β de les α (Frame, 2005).

³Avui en dia anomenem a aquestes partícules electrons.

L'inconvenient d'aquests primers detectors era que quan els cations arribaven al càtode n'arrancaven electrons, produint deteccions falses. Per posar remei a aquest problema, el 1937 Adolf Trost afegí etanol dins del detector, de tal manera que quan els cations es dirigien cap al càtode topaven primer amb les molècules d'etanol. El xoc feia que un electró de la molècula d'etanol es transferís al catió, de tal manera que la molècula d'etanol passava a tenir càrrega positiva i era atreta pel càtode. En la col·lisió amb aquest últim es trencava la molècula, dissipant gran part de l'energia cinètica i cap electró era arrancat del càtode. Més endavant es van començar a utilitzar halògens en comptes d'etanol, ja que després del seu trencament les molècules d'etanol no es tornaven a formar, i això feia que els detectors tinguessin una vida útil determinada. Amb l'ús d'halògens la vida útil dels detectors passava a ser, teòricament, infinita (Frame, 2005).

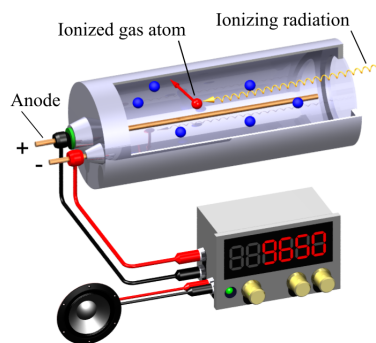


Figura 5: Dibuix esquemàtic d'un comptador Geiger modern. Imatge creada per Svjo-2, usuari de la Viquipèdia.

2.2.5 Semiconductors com a detectors de radiació

Els detectors que utilitzen semiconductors han estat utilitzats en espectroscòpies d'alta resolució des dels anys 60 del segle XX. A partir de la dècada dels 80 va començar a ser utilitzat en física nuclear (Wermes & Kolanoski, 2020b). Durant la segona dècada del segle XX han sorgit diversos projectes que han utilitzat semiconductors com a detectors de radiació. L'objectiu d'aquests projectes és que, de manera fàcil i assequible, qualsevol persona pugui muntar un detector de partícules casolà. Un d'aquests projectes, ara mateix extingit, va ser una aplicació per a telèfons mòbils que permetia, gràcies als fotodíodes que formen el sensor de la càmera, detectar diferents tipus de radiació. La necessitat de re-

configurar aquesta aplicació amb cada actualització del programari dels telèfons mòbils feu que deixés de fer-se servir. Un altre d'aquests projectes és el del detector de partícules que muntarem (Keller et al., 2019).

3 Marc Teòric

3.1 Radiació Ionitzant

Començàvem el treball amb una pregunta: "que és la radiació?". És fonamental donar al lector una descripció d'aquest terme. La radiació és la propagació d'energia mitjançant ones electromagnètiques o partícules subatòmiques. La radiació ionitzant és aquella que transporta suficient energia per a ionitzar⁴ els àtoms dels elements que travessa. El detector que construïrem té l'objectiu de detectar partícules α i partícules β , dos tipus de radiació ionitzant.

Els tres tipus de radiació ionitzant més comuns són les partícules α , les partícules β i els raigs γ . Tot i que només parlarem dels dos primers tipus de radiació cal dir que qualsevol partícula amb càrrega i amb massa té el poder d'ionitzar àtoms si té prou energia.

3.1.1 Partícules α

Un nucli atòmic està format per protons i neutrons (nucleons). La força nuclear forta manté els nucleons units entre ells, però només és efectiva en distàncies molt curtes. Quan el nucli d'un àtom és molt gran, la força nuclear forta no és prou gran per a evitar que els protons se separin a causa de la força repulsiva que existeix entre ells pel fet d'estar carregats positivament. Aquesta força repulsiva està descrita per la llei de Coulomb. Per tal de guanyar estabilitat, els àtoms acaben alliberant una partícula α —un nucli d'heli, ${}^4_2\text{He}$ —, de tal manera que perden dos protons i dos neutrons i es converteixen en un altre element.

Podem representar de la següent manera el procés d'emissió d'una partícula α :



⁴Segons el Termcat, un ió és: [un] "àtom o molècula que ha adquirit una càrrega elèctrica neta en perdre o guanyar un o més electrons."

Si considerem que el sistema està en repòs, la seva energia és la següent:

$$E_X = m_x c^2 \quad (2)$$

Com que l'energia s'ha de conservar, l'energia del sistema serà la mateixa abans i després d'alliberar la partícula α . E_c és l'energia cinètica de les partícules. Per tant:

$$m_X c^2 = (m_{X'} + m_\alpha) c^2 + E_{cX} + E_{c\alpha} \quad (3)$$

L'energia alliberada per l'emissió de la partícula α s'anomena valor Q i és la següent:

$$Q = (m_X - m_\alpha - m_{X'}) c^2 = E_{cX} + E_{c\alpha} \quad (4)$$

El moment lineal també s'ha de conservar. Com que la velocitat inicial del nucli atòmic era zero, el moment també era zero. Per tant, perquè el moment lineal del sistema segueixi sent zero després d'alliberar la partícula α cal que el moment d' X' i el de la partícula α tinguin el mateix mòdul, la mateixa direcció i sentits oposats (Krane & Halliday, 1988). Les partícules α tenen un poder de penetració molt baix, només cal un full de paper o la capa exterior de la pell per parar-les ("Penetration abilities of different types of radiation", n.d.).

3.1.2 Partícules β

Els electrons i positrons emesos per un nucli atòmic s'anomenen partícules β . A diferència de les partícules α , que ja existien al nucli, les partícules β es creen a partir d'un protó que es converteix en un neutró o a partir d'un neutró que es converteix en un protó.

Al contrari que les partícules α l'energia amb la qual s'emeten les partícules β no és sempre l'energia que perd l'àtom. L'energia que poden tenir les partícules β va de zero fins a l'energia perduda per l'àtom. Per exemple, seria d'esperar que les partícules β emeses pel $^{210}_{83}\text{Bi}$ tinguessin una energia cinètica d'1,16 MeV, però, si fem l'experiment veurem que l'energia amb la qual s'emeten va dels 0 als 1,16 MeV com podem observar a la figura 6.

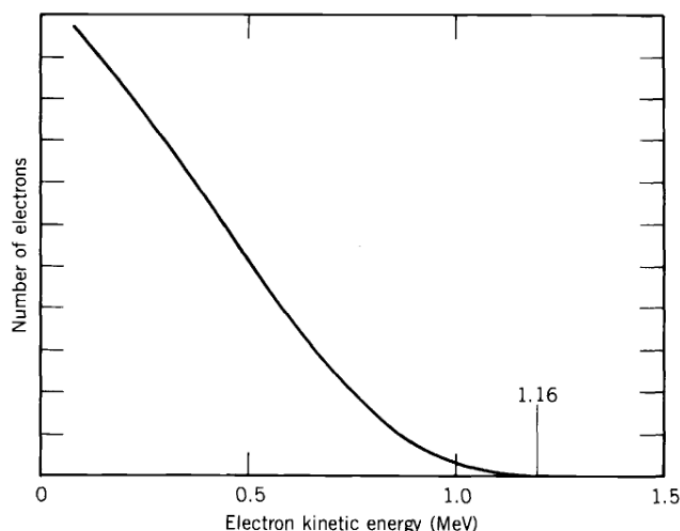


Figura 6: Distribució dels electrons emesos pel $^{210}_{83}\text{Bi}$ segons la seva energia cinètica (Krane & Halliday, 1988).

Per explicar aquest fenomen Pauli hipotetitzà que una segona partícula, que més tard fou anomenada *neutrí* per Fermi, era la que s'enduia l'energia que faltava a la partícula β . Perquè es complís el principi de conservació de la càrrega aquesta partícula havia de tenir càrrega neutra. Existeixen dos tipus de neutrins que participen en el procés d'emissió de les partícules β , als neutrins, emesos amb les partícules β^+ i els antineutrins, emesos amb les partícules β^- (Krane & Halliday, 1988). El poder de penetració de les partícules β és superior al de les partícules α . Calen gairebé tres centímetres d'un material com el plàstic per parar-les ("Penetration abilities of different types of radiation", n.d.).

3.2 Radiació ambiental

La radiació ambiental, "background radiation" en anglès, es defineix, segons l'Agència Internacional d'Energia Atòmica com l'energia emesa per totes les fonts que no són una especificada, és a dir, tota aquella radiació que es troba present en un determinat lloc i que és emesa per diverses fonts que no són la o les que estem estudiant. Es calcula que la dosi de radiació ambiental que rep una persona a l'any als Estats Units és d'entre 1 i 3 *mSV*. Les fonts que més contribueixen a la radiació ambiental són el radó i els raigs còsmics, com es pot veure en la figura 7.

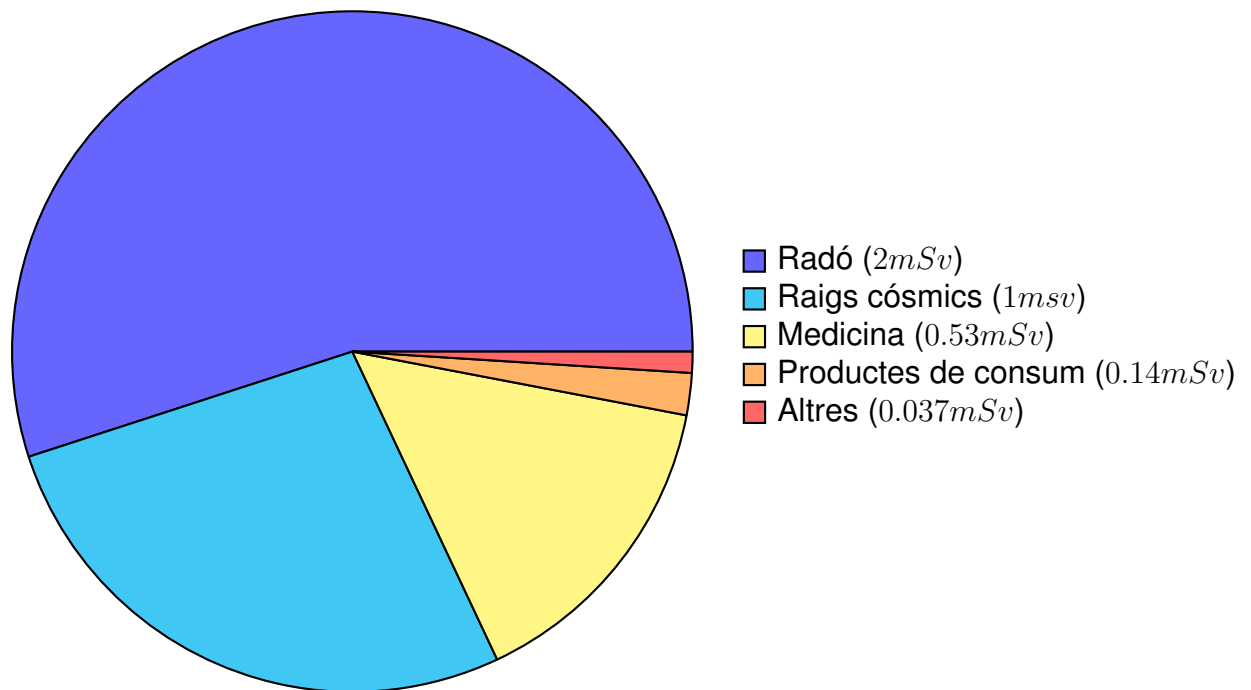


Figura 7: Gràfic que mostra les diferents fonts de les quals emana la radiació que absorbeix una persona en un any als Estats Units (RERF, 2011).

3.3 L'electró-volt

Com bé sabrà el lector, la unitat del Sistema Internacional (SI) per l'energia és el joule (Nm). Quan tractem amb objectes molt petits, com ho són les partícules que estem buscant detectar, parlar de Joules deixa de ser pràctic. Per això, per a descriure l'energia de cossos d'escala subatòmica s'utilitza una unitat de mesura alternativa, l'electró-volt, que es defineix, segons el Termcat, com "la quantitat d'energia cinètica que adquireix un electró que es desplaça pel buit entre dos punts amb una diferència de potencial d'1V".

$$1eV = 1,602176565 \cdot 10^{-19} J \quad (5)$$

3.4 Unitats de mesura relacionades amb la radiació

L'objectiu del treball és mesurar radiació, i, per mesurar qualsevol magnitud, ens cal definir la seva unitat. La radiació pot ser mesurada basant-se en diferents criteris. A continuació s'expliquen els més rellevants. Tota la informació d'aquest

apartat ha estat extreta de la pàgina web de l'Agència de Protecció Ambiental dels Estats units (EPA, 2022). Radioactivitat: La radioactivitat⁵ és el nombre de desintegracions que ocorren per segon. En el SI la radioactivitat es mesura en becquerels (Bq). Un becquerel equival a una desintegració per segon.

$$1Bq = 1s^{-1} \quad (6)$$

Una altra unitat que mesura la radioactivitat és el curie (Ci). Un curie equival a $3,7 \cdot 10^{10}$ desintegracions per segon.

$$1Ci = 3,7 \cdot 10^{10}s^{-1} = 37GBq \quad (7)$$

Dosi absorbida: La dosi absorbida es defineix com la quantitat d'energia provinent de la radiació absorbida per una persona per unitat de massa. En el SI la dosi absorbida es mesura en gray (Gy). Un gray equival a un joule per kilogram.

$$1Gy = 1J/Kg \quad (8)$$

Dosi efectiva: La dosi efectiva és un indicador dels potencials efectes en la salut que té una quantitat determinada de radiació. Un sievert equival a un joule per kilogram.

$$1Sv = 1J/Kg \quad (9)$$

⁵Durant tot el treball hem fet servir aquest terme per a referir-nos al fenomen de la radiació, ja que és el terme utilitzat normalment per a aquest fi.

3.5 Funcionament d'un fotodíode

L'element més important de l'aparell que muntarem, el que detectarà les partícules α i β , és un fotodíode. És per això que cal explicar que és i com funciona aquest component electrònic. Per entendre com funciona un fotodíode hem de saber primer com funciona un díode. Utilitzant la unió de dues capes de silici, una amb càrrega positiva i l'altra amb càrrega negativa, els díodes aconseguen que el corrent elèctric només pugui circular en un sentit. Per aconseguir dues capes de silici amb càrrega oposada s'afegeixen al silici diferents materials, de tal manera que en una capa queda un excés de càrregues negatives i en l'altra un excés de forats⁶. En el lloc on les dues capes s'ajunten es crea un camp elèctric, amb un potencial que ronda els 0,7 V, que fa que cap electró pugui travessar la unió. Quan connectem el càtode d'una font de corrent —una bateria, per exemple— a la capa negativa i l'ànode a la capa positiva es crea un camp elèctric de sentit contrari al que es crea espontàniament a la unió de les capes —anomenada zona d'esgotament, "depletion zone" en anglès, de manera que si el voltatge de la bateria supera el de la unió, els electrons circulen a través del díode (Agarwal, 2022).

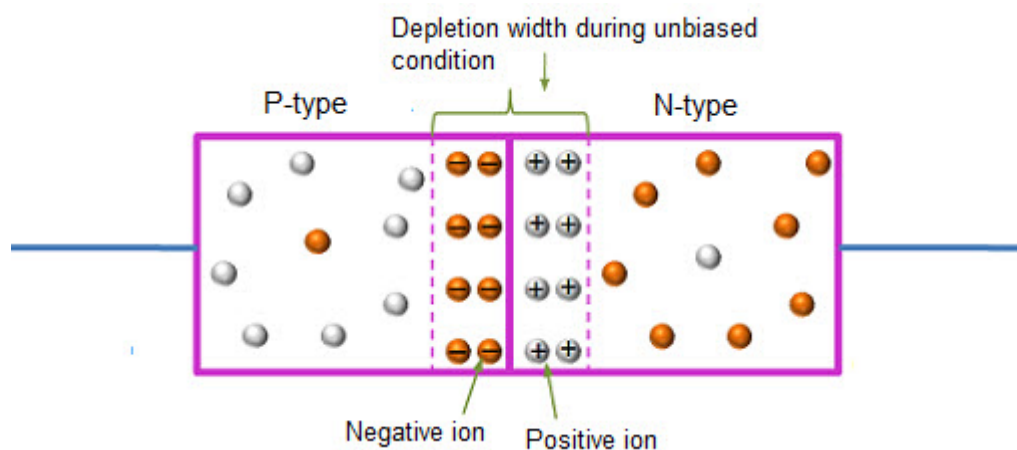


Figura 8: Dibuix esquemàtic d'un díode que no està connectat a cap camp elèctric extern (Agarwal, 2022).

Si connectem el díode del revés, els forats de la capa positiva seran atrets

⁶En física *forat* es defineix com a: "lloc buit mòbil que deixa un electró a la banda de valència d'un sòlid, particularment un semiconductor, en passar a la banda de conducció", segons el Termcat.

pel càtode i el mateix ocorrerà amb els electrons de la capa negativa, que es veuran atretes per l'ànode. Això farà que la zona d'esgotament del díode s'eixampli. Si a la zona d'esgotament hi impacten partícules, com per exemple fotons, que tinguin prou energia per excitar els electrons, aquests es poden separar del nucli atòmic, és a dir, els àtoms del semiconductor s'ionitzen, i es crea un corrent elèctric. En un fotodíode la zona d'esgotament s'exposa a llum, de manera que en presència d'aquesta es crea un camp elèctric (Agarwal, 2021). En el cas del detector que muntarem exposarem la zona d'esgotament a radiació α i β .

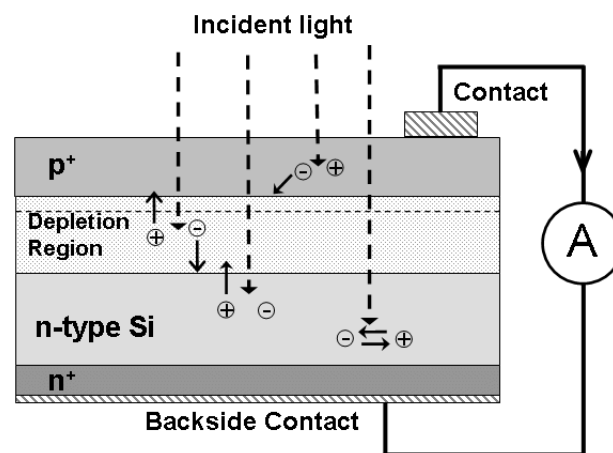


Figura 9: Dibuix esquemàtic d'un fotodíode (Andersson, 2008).

4 Apartat experimental

4.1 Un detector de partícules casolà

Com hem explicat al pròleg, el detector de partícules que hem muntat utilitza un fotodíode (figura 11a) per detectar partícules α i β . Un circuit amplificador, l'esquema del qual es pot trobar a la figura 10, s'encarrega, com el seu nom indica, d'amplificar el senyal del fotodíode. Tant el fotodíode com el circuit amplificador estan soldats en un circuit imprès.

A l'apartat 3.5 hem explicat com els fotons en entrar a la zona d'esgotament d'un fotodíode n'ionitzen els àtoms de silici, creant un corrent elèctric que podem mesurar. Quan el que entra a zona d'esgotament són partícules α o β es desencadena un procés anàleg. El gruix de la zona d'esgotament del fotodíode és d'uns $(50 \pm 8)\mu m$. Amb aquest gruix hauríem de poder detectar partícules β que tinguin una energia d'entre $33keV$ i $200keV$ i partícules α de fins a $8MeV$. Considerem qualsevol pols amb una energia inferior a $33keV$ com a soroll. Com el fotodíode és sensible a la llum l'hem allotjat dins d'una capsa metàl·lica, que, a més de prevenir l'entrada de fotons, redueix la quantitat de radiació ambiental que arriba al fotodíode. A través d'un connector BNC i amb l'adaptador pertinent el detector es pot connectar a un ordinador o un oscil·loscopi. (Keller, 2014) (Keller et al., 2019).

4.1.1 Tria del model de detector de partícules

El creador del projecte, Oliver Keller, proposa dos models de detector de partícules, els dos amb un circuit similar. De fet el circuit imprès per als dos models de detector és el mateix i el que canvia són els díodes i el valor de les resistències i condensadors. El model que hem escollit, com acabem d'explicar, és el que és capaç de diferenciar entre radiació α i β , ja que pretenem fer un estudi sobre el tipus de radiació que emeten diferents objectes. L'altra versió només és capaç de detectar partícules β (Keller, 2014) (Keller et al., 2019).

Aquesta decisió ens complicà la feina de muntatge, ja que a diferència de la versió que només detecta partícules β , la versió que escollírem funciona amb un fotodíode i, per tant, vam haver d'aïllar el detector de la llum ambiental. Per entendre perquè un dels models funciona amb un fotodíode i l'altre amb un díode hem de recordar el que hem explicat a l'apartat 3 sobre el poder de penetració de les partícules α i β . Les primeres tenen un poder de penetració més baix que les segones i la carcassa d'un díode les aturaria abans que arribessin a la zona d'esgotament. En un fotodíode la zona d'esgotament està exposada a la llum, protegida normalment per un vidre o un plàstic transparent. Si trenquem aquest vidre protector, com hem fet nosaltres, aconseguim que tant les partícules α com les β puguin arribar a la zona d'esgotament i ser detectades (Keller et al., 2019).

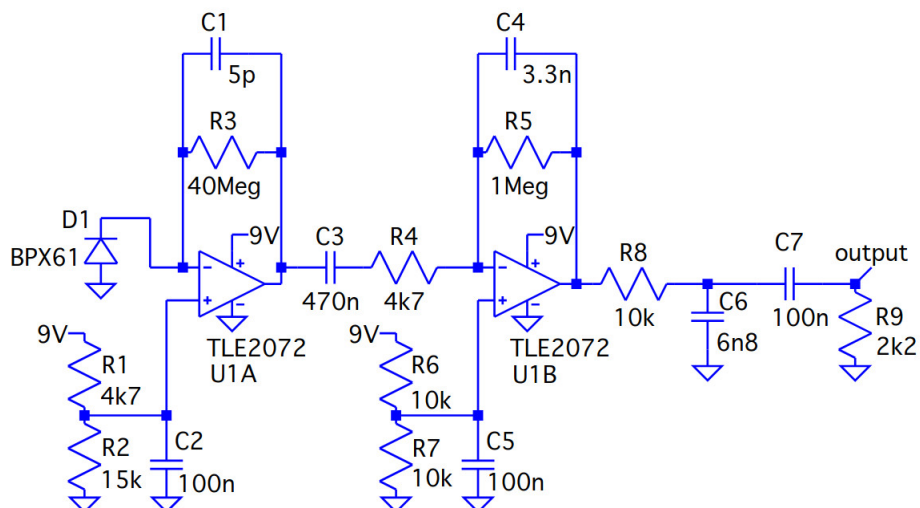
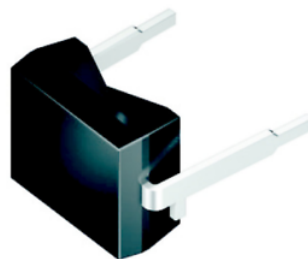


Figura 10: Esquema del circuit amplificador del detector de partícules (Keller et al., 2019).



(a) BPX61



(b) BPW34F

Figura 11: Díodes.

4.2 Anàlisi dels resultats obtinguts en les deteccions

Un cop tinguérem el detector muntat vam provar de mesurar la radiació d'una mostra de nitrat de potassi i la d'unes bales de vidre que, segons el venedor, contenen òxid d'urani. També vam provar d'exposar el detector a diferents tipus de llum. L'únic cas en què el detector va funcionar de la manera esperada fou quan l'exposarem a la llum.

Quan començàrem a intentar fer mesures amb el detector —exposant-lo a la llum, ja que encara no teníem cap objecte radioactiu— ens trobàrem amb una sèrie de problemes. El primer problema que identificàrem fou que no tots els ordinadors rebien senyal del detector. Al principi pensàvem que això es devia al sistema operatiu, ja que els ordinadors amb Linux, que eren els que havíem utilitzat per fer les primeres proves, no detectaven res. Descartàrem aquesta hipòtesi, ja que després de provar el detector en ordinadors amb Windows tampoc obtinguérem cap resultat. Una altra possibilitat era que la targeta de so dels ordinadors no fos l'adequada, i és per això que compràrem una targeta de so externa —la que recomana el creador del projecte— que es connecta per USB a l'ordinador. Amb aquesta targeta de so, que funciona, ja que l'utilitzàrem per gravar so, tampoc aconseguírem rebre cap senyal.

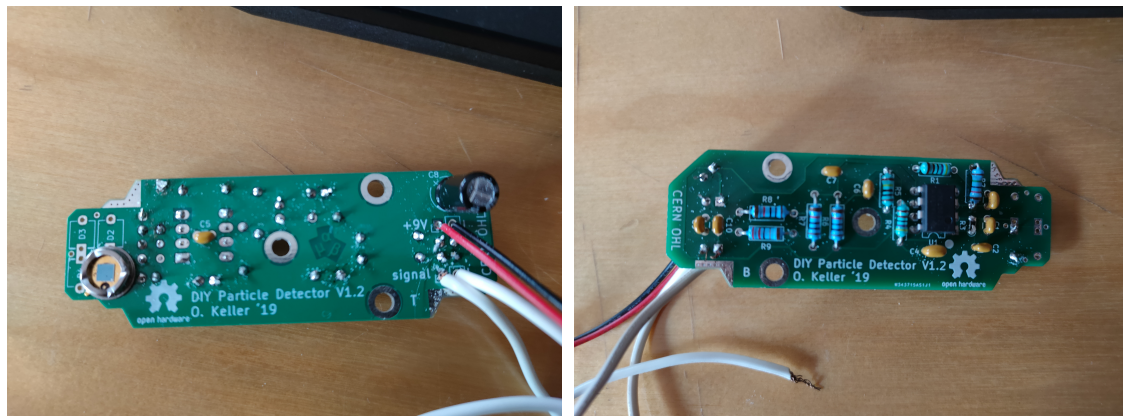
Per casualitat, en un dels ordinadors que provàrem vam rebre senyal. No hem aconseguit determinar perquè en aquest ordinador poguérem utilitzar el detector, mentre que la resta d'ordinadors no el detectaven, però sospitem que el problema erradica en el model de les targetes de so.

El senyal que rebia el detector era l'esperat: quan apropàvem el detector a la font de llum, en l'oscil·loscopi digital apareixia una ona sinusoidal, amb la mateixa freqüència que la del circuit de corrent altern que alimentava la bombeta. Si la font de llum s'alimentava amb de corrent continu, el que s'observava era un senyal amb potencial, valgui la redundància, continu. A l'apèndix A trobareu el vídeo on es veu com el detector envia un senyal gairebé sinusoidal al detector quan s'engega una bombeta que s'alimenta amb corrent altern. El soroll que es

veu, que fa que l'ona no sigui exactament sinusoidal, es deu a la llum ambiental.



Figura 12: Caixa metàl·lica que aïlla el detector de la radiació ambiental. El piu de metall que sobresurt és un connector BNC que serveix per endollar el detector a un oscil·loscopi o a un ordinador.



(a) Costat frontal

(b) Part de darrere.

Figura 13: Detector de partícules.

Veient que el detector reaccionava com esperàvem al ser exposat a la llum vam provar d'exposar-lo a una mostra de nitrat de potassi, compost que presenta una radiació natural causada per un dels seus isòtops, ^{40}K (Keller et al., 2019). La primera prova que férem tingué una durada d'aproximadament cinc minuts, durant els quals el detector no va rebre cap senyal. Aleshores decidírem fer una prova més llarga, deixant el detector exposat al nitrat de potassi durant tota la nit —aproximadament vuit hores. Aquesta segona mesura tampoc va ser exitosa i pensàrem potser havíem escollit un material poc radioactiu.

Vam pensar en altres objectes que continguessin radiació. Sabíem que,

antigament, els compostos de l'urani s'empraven en la fabricació de pintures, vidres i altres objectes fluorescents. De fet, el creador del detector de partícules mesurà la radiació d'una d'aquestes pintures fluorescents, concretament la d'unes busques d'un rellotge antic (Keller, 2014). El problema que ens trobàrem fou que els objectes d'urani deixaren de fabricar-se durant la dècada dels 40, ja que, en plena guerra mundial, aquest element començà a ser emprat en la fabricació d'armes (Boot, 2017). Com el vidre d'urani és tan escàs ens costà molt trobar-ne, però, finalment, compràrem en una botiga en línia unes bales de vidre que, segons el venedor, contenen òxid d'urani i intentarem mesurar-ne la radiació amb el detector. Férem uns quants intents, però cap d'aquests resultà exitós. O bé el detector no estava ben muntat —cosa poc probable, ja que detectava la llum—, o bé les bales d'urani no eren prou radioactives. Per descartar un problema en la construcció del detector el tornàrem a muntar en una placa nova. Els resultats que aconseguírem amb el nou detector foren els mateixos que amb la versió anterior.

També férem proves amb un oscil·loscopi, ja que teníem la sospita que potser l'error podia ser del programa que desxifrava els senyals —sospita raonable, ja que, com hem explicat, tinguérem problemes amb les targetes de so, i podia ser que el programa estigués pensat per a un altre model de targeta. En aquestes proves obtinguérem el mateix resultat, cosa que volia dir que els resultats que vèiem a l'ordinador eren correctes.

Que les dues plaques fossin defectuoses era poc probable. A més els detectors, com hem dit abans, funcionaven de la manera esperada quan s'exposaven a la llum. La resistència total del circuit també era la que indicava el creador del projecte, raó de pes per pensar que el circuit estava ben muntat.

4.3 Radiació en diferents objectes i compostos

Per demostrar que els objectes eren radioactius —ja que amb el detector que havíem muntat que no poguérem demostrar res— utilitzàrem un comptador Geiger. Aquest, com hem explicat abans, no és capaç de diferenciar entre partícules α

Dosi radioactiva				
Substància	Quantitat de radiació		Substància	Quantitat de radiació
Bales de vidre fluorescents que contenen òxid d'urani	0,1 $\mu Sv/h$		Hidròxid de potassi	0,04 $\mu Sv/h$
Bromur de potassi	0,03 $\mu Sv/h$		Iodur de potassi	0,02 $\mu Sv/h$
Nitrat de potassi	0,05 $\mu Sv/h$		Dicromat de potassi	0 $\mu Sv/h$
Sulfur de sodi	0 $\mu Sv/h$		Nitrat de plom II	0 $\mu Sv/h$
Potassi sodi tetrat 4-hidrat	0 $\mu Sv/h$			

Taula 1: Radiació emesa per diferents mostres del laboratori.

i partícules β , però ens serví per demostrar que els objectes eren radioactius. Férem proves amb les bales de vidre i amb diferents compostos químics que hi havia al laboratori, i, com esperàvem, les bales i la majoria d'aquells compostos que contenien potassi emetien radiació, encara que molt poca. Per fer les mesures vam haver de tenir en compte que no les fèiem en un ambient completament aïllat de la radiació i que, per tant, havíem de discernir entre la radiació ambiental i la radiació que volíem mesurar. Per tant, abans de fer cap mesura de les mostres mesuràrem la radiació ambiental, que al laboratori era de 0,11 $\mu Sv/h$. Restant la radiació ambiental de la mesurada de la mostra obtinguérem la radiació emesa per la mostra. Els resultats es mostren a la taula 1 i a la figura 14. Com es pot veure la totes les radiacions són molt baixes, les més altes amb prou feines igualen la radiació ambiental.

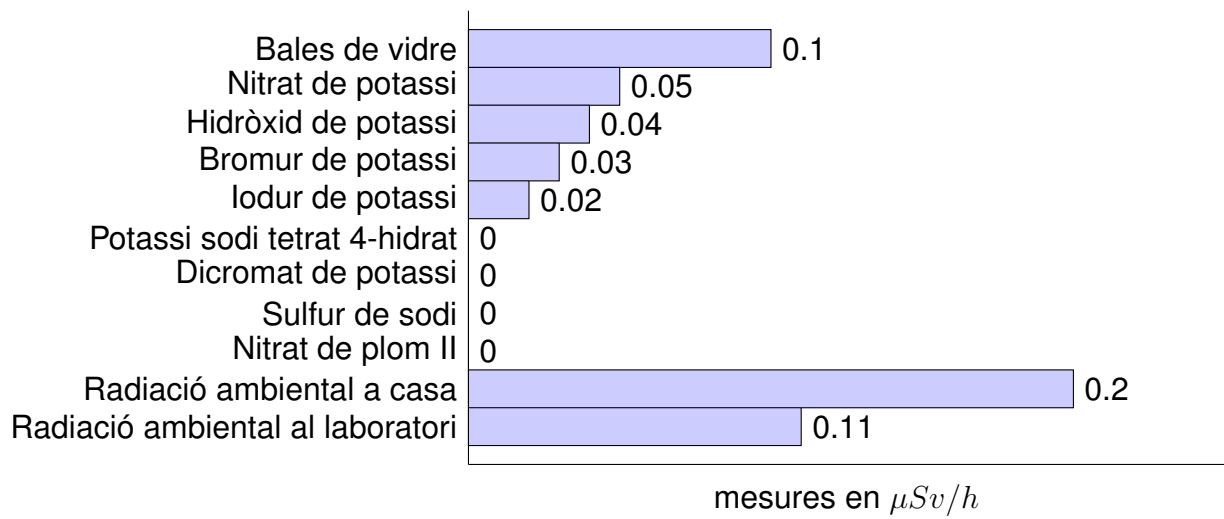
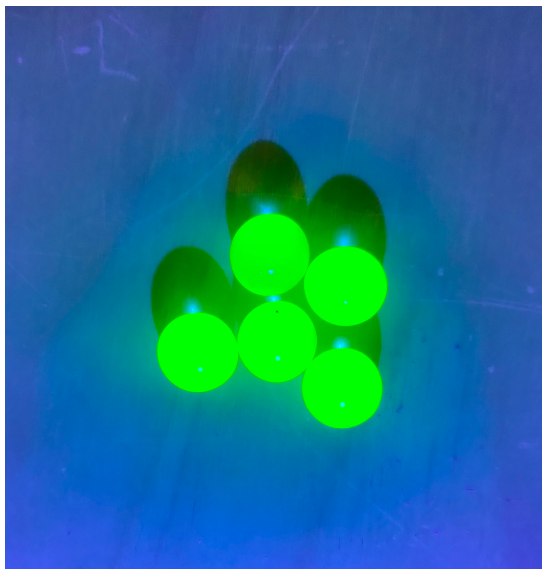


Figura 14: Comparació de la radiació emesa pels diferents compostos analitzats.



(a) Bales de vidre exposades a radiació ultraviolada.



(b) Bales de vidre exposades a llum de l'espectre visible.

Figura 15: Bales de vidre que contenen òxid d'urani.

5 Conclusió

Començàvem el treball parlant de radiació i plantejàvem una pregunta al lector: "que és la radiació?". Bé, crec que hem aconseguit respondre, a un nivell superficial, aquesta pregunta. Hem fet un passeig pels primers anys després del descobriment d'aquesta i hem vist com evolucionà el coneixement sobre ella durant aquests primers anys. Hem aprofundit, ja que l'objectiu principal del treball era construir un detector de partícules, en la història dels principals aparells de detecció de radiació que s'han utilitzat durant el segle XX i el començament del segle XXI. Després hem introduït al lector conceptes relacionats amb la radiació que han calgut per entendre el treball. Finalment hem narrat el procés de construcció d'un detector de partícules casolà, que no hem pogut fer servir per detectar radiació ionitzant.

Quan començàrem a treballar en aquest projecte sabíem que corríem el risc que no ens funcionés, però les ganes de muntar un aparell que cap altre alumne de l'institut havia muntat abans ens van animar a arriscar-nos. Decidírem, per poder fer un estudi del tipus de radiació emesa per diferents mostres, que d'entre les dues versions del detector muntaríem la que era capaç de detectar i diferenciar entre partícules α i β .

Encara que hem aconseguit muntar el detector, només hem aconseguit rebre senyal exposant el detector a la llum. Això pot voler dir dues coses: que els objectes que hem escollit no són prou radioactius o que el detector no està ben muntat encara que, com hem vist, tot sembla indicar que sí que ho està. No descartem completament la idea que un error de muntatge sigui la causa de la fallida de l'experiment, però si analitzem les dades obtingudes observem que els compostos amb els quals hem treballat són molt poc radioactius. De fet la radiació ambiental que hem mesurat tant a casa com al laboratori és superior a la radioactivitat de qualsevol de les mostres.

D'haver rebut senyal a l'exposar el detector a alguna cosa que no fos llum hauríem pogut dur a terme un dels objectius principals del treball, el de fer una anàlisi de quins elements són els responsables de l'emissió de radiació en certs objectes basant-nos en la quantitat de radiació α i β que emeten. Amb el comptador Geiger, tot i que hem pogut confirmar que algunes de les mostres eren radioactives, no hem pogut fer aquest estudi, ja que aquest tipus de detectors de radiació no són capaços de distingir entre diferents tipus d'aquesta.

Si tinguéssim més temps i més recursos miraríem d'aconseguir algun material més radioactiu. D'aquesta manera podríem comprovar si realment el problema erradica en la baixa radioactivitat dels compostos utilitzats. Una altra cosa que no hem provat i que ens podria ajudar a determinar el problema és muntar la segona versió del detector. Encara que amb aquesta no podríem distingir entre partícules α i β podríem descartar un problema en la fabricació dels circuits impresos. Si no hem muntat aquesta segona versió ha sigut en part per falta de temps, però sobretot perquè suposava fer una despesa extraordinària per aconseguir els components necessaris.

Bibliografia

- Agarwal, T. (2021). Photodiode : Construction, types, working & its applications. <https://www.elprocus.com/photodiode-working-principle-applications/>
- Agarwal, T. (2022). P-n junction diode biasing and its vi characteristics. <https://www.elprocus.com/p-n-junction-diode-theory-and-working/>
- Allisy, A. (1996). Henri becquerel: The discovery of radioactivity. *Radiation Protection Dosimetry*, 68.
- Andersson, H. (2008). *Position sensitive detectors: Device technology and applications in spectroscopy* (Doctoral dissertation). Institutionen för informationsteknologi och medier.
- Asimov, I. (2010). *Breve historia de la química*. Alianza Editorial.
- Boot, R. (2017). Uranium glass: A glowing alternative to conventional sources of radioactivity. *The Physics Teacher*, 55(2), 76–78. <https://doi.org/10.1119/1.4974115>
- Centre de terminologia de la llengua catalana. (2022). <https://www.termcat.cat/ca>
- E. Turner, J. (2007). *Atoms, radiation, and radiation protection*. Wiley-VCH.
- EPA. (2022). Radiation terms and units. <https://www.epa.gov/radiation/radiation-terms-and-units>
- Frame, P. W. (2005). A history of radiation detection instrumentation. *Health Physics*, 88(6), 613–637. <https://doi.org/10.1097/00004032-200506000-00008>
- Glasser, O. (1995). *W. C. Roentgen and the discovery of the roentgen rays*. *American Journal of Roentgenology*, 165(5), 1022–1040. <https://doi.org/https://doi.org/10.2214/ajr.165.5.7572472>
- IAEA. (2007). *laea safety glossary: Terminology used in nuclear safety and radiation protection*.
- Karmakar, A., Wang, J., Prinzie, J., De Smedt, V., & Leroux, P. (2021). A review of semiconductor based ionising radiation sensors used in harsh radiation environments and their applications. *Radiation*, 1(3), 194–217. <https://doi.org/10.3390/radiation1030018>

- Kaye, G. W. (1934). Wilhelm conrad röntgen: And the early history of the roentgen rays. *Nature*, 133(3362), 511–513. <https://doi.org/10.1038/133511a0>
- Keller, O. (2014). Energy spectra · ozel/diy_particle_detector wiki. https://github.com/ozel/DIY%5C_particle%5C_detector/wiki/Energy-Spectra
- Keller, O., Benoit, M., Müller, A., & Schmeling, S. (2019). *Smartphone and Tablet-Based Sensing of Environmental Radioactivity: Mobile Low-Cost Measurements for Monitoring, Citizen Science, and Educational Purposes*. *Sensors*, 19(19). <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/s19194264>
- Krane, K. S., & Halliday, D. (1988). *Introductory nuclear physics*. J. Wiley.
- Langevin-Joliot, H. (1998). Radium, marie curie and modern science. *Radiation Research*, 150(5). <https://doi.org/10.2307/3579803>
- Matsusada. (2022). Ionization chamber. https://www.matsusada.com/application/ps/ionization_chambers/
- Meredith, W. J., & Massey, J. B. (1977). *Fundamental physics of radiology (third edition)*. Butterworth-Heinemann.
- Mould, R. F. (1998). The discovery of radium in 1898 by maria sklodowska-curie (1867-1934) and pierre curie (1859-1906) with commentary on their life and times. *The British Journal of Radiology*, 71(852), 1229–1254. <https://doi.org/10.1259/bjr.71.852.10318996>
- Muller, D. A. (2021). The universe is hostile to computers. https://www.youtube.com/watch?v=AaZ%5C_RSt0KP8
- P. Thompson, S. (1897a). *On the nature of Roentgen's rays*. *Archives of The Roentgen Ray*, 2(1), 3–4. <https://doi.org/https://doi.org/10.1259/arr.1897.0003>
- P. Thompson, S. (1897b). *The Roentgen Society*. *Archives of The Roentgen Ray*, 2(2), 22–31. <https://doi.org/https://doi.org/10.1259/arr.1897.0016>
- Penetration abilities of different types of radiation. (n.d.). <https://www.cdc.gov/training/products/RN/page4976.html>
- RERF. (2011). <https://www.rerf.or.jp/en/glossary/>
- Roentgen, W. C. (1899). Further observations on the properties of x rays. *Archives of The Roentgen Ray*, 3(3), 80–88. <https://doi.org/10.1259/arr.1899.0050>

- Thompson, J. J. (1896). lli. on the discharge of electricity produced by the röntgen rays, and the effects produced by these rays on dielectrics through which they pass. *Proceedings of the Royal Society of London*, 59(353-358), 274–276. <https://doi.org/10.1098/rspl.1895.0088>
- Trenn, T. J. (1976). Rutherford on the alpha-beta-gamma classification of radioactive rays. *Isis*, 67(1), 61–75. <https://doi.org/10.1086/351545>
- Wermes, N., & Kolanoski, H. (2020a). Chapter 8: Semiconductor detectors. In *Particle detectors: Fundamentals and applications* (pp. 255–372). Oxford University Press.
- Wermes, N., & Kolanoski, H. (2020b). Section 2.1: On the history of detectors. In *Particle detectors: Fundamentals and applications* (pp. 3–9). Oxford University Press.

A Apèndix

Vídeo del senyal que és enviat a l'ordinador pel detector quan aquest s'exposa a la llum d'una bombeta:

https://drive.google.com/file/d/1Nh4488YfKME6vnzgvUL1CYrxwA9ZHQon/view?usp=share_link

