

Iniciació al Medipix

Estudi de la Radiació i les seves propietats. Comparació dels models clàssic i relativista en la radiació alfa i beta

Can nature possibly be so absurd as it seemed to us in these atomic experiments?"

— Werner Heisenberg

Índex

1	Introducció	3
2	Orientacions Didàctiques	4
3	Referències	7
4	Fitxes de treball per l'alumnat	8

1 Introducció

En aquest document podeu trobar l'activitat dissenyada com a introducció a l'ús del detector Timepix.

Es fa suposant que teniu accés al detector ja que és interessant que els alumnes puguin dur a terme tot el procés de mesura, des de la configuració del detector utilitzant el programa, fins a la mateixa manipulació de la font de radiació.

Malgrat tot, s'ha intentat que aquesta pràctica es pugui portar a terme sense detector, utilitzant el programa Pixetpro i algunes de les mostres de dades disponibles a la Web del projecte.

En primer lloc trobareu les orientacions didàctiques, tant si s'utilitza el detector com si no. A continuació teniu les referències que s'han utilitzat per a generar aquest document. Finalment trobareu les fitxes de treball per a imprimir per als alumnes.

2 Orientacions didàctiques

Una de les parts més importants en la formació de qualsevol alumne de les assignatures de ciències és el treball al laboratori. És en aquest espai i amb la realització d'activitats d'indagació que l'alumnat pot desenvolupar diferents habilitats i competències que li permetran aplicar el mètode científic en un futur. En aquest apartat es detallen els aspectes curriculars treballats a la pràctica d'introducció al Timepix, orientacions pràctiques de cara a la realització de l'activitat, tant amb detector com sense així com una petita introducció a l'aprenentatge per indagació (en anglès, "inquiry-based-learning" o IBL) que justifica la importància d'aquesta activitat.

2.1 Aspectes curriculars

Aquesta pràctica ha estat dissenyada amb dos objectius en ment. Per una banda, donar una visió general als alumnes de Treball de Recerca de les possibilitats que té el detector Timepix per a l'estudi quantitatiu de diferents fenòmens relacionats amb la radiació. Per una altra, fer que els alumnes de 2n de Batxillerat de l'assignatura de física tinguin una eina que els permeti treballar diferents aspectes del bloc de Física Moderna, format pels temes sobre Naturalesa de la Llum i Física Nuclear.

Es per tant una activitat dirigida a uns pocs alumnes de primer de Batxillerat (aquells que realitzin Treballs de Recerca dins el Programa ADMIRA) i tots els alumnes de 2n de Batxillerat que cursin Física II.

En ella, es treballen diferents aspectes com el reconeixement de l'equivalència massa-energia, les característiques de la radiació i les seves interaccions amb la matèria, o les diferències entre el model clàssic i els models quàntic i relativista.

Podeu trobar més informació sobre els objectius curriculars i competencials a la nostra pàgina Web, a la secció *Orientacions Didàctiques* dins de l'apartat *El Projecte*.

2.2 La pràctica d'introducció a l'ús del Timepix

Aquesta pràctica està pensada per a fer amb el detector Timepix i amb una font de material radioactiu de baixa intensitat i que produeixi els tres tipus de radiació: alfa, beta i gamma.

En cas que no tingueu el detector, podeu fer la pràctica igualment si us descarregueu el programa Pixetpro de la secció corresponent de la Web i les dades experimentals proporcionades pel Programa ADMIRA.

En cas que no tingueu cap font de radiació, podeu provar senzillament a captar la radiació de fons durant un temps suficient (aproximadament una hora) guardant les lectures en intervals d'uns quants minuts per tal d'assegurar que teniu prou mostres de totes les partícules, i que al mateix temps les mostres siguin prou "netes" com perquè les traces es puguin treballar individualment.

A més a més, una part important de la pràctica és l'anàlisi de les dades. En principi s'ha pensat que aquesta anàlisi es faci utilitzant un full de càlcul, però es pot utilitzar programari més sofisticat (R, OCTAVE, ...) o prescindir del full de càlcul i fer-ho tot amb calculadora.

En aquesta línia, s'han separat les fitxes de treball en dues parts, una que inclou la part teòrica de la pràctica (i que per tant es pot reutilitzar) i l'altre amb la realització de la pràctica i l'anàlisi de dades, per tal que l'alumnat pugui entregar-la. Existeix la possibilitat que, en lloc de fer-ho en paper, es faci tot en format electrònic sobre un document de word o de libreoffice, o directament presentant el full de càlcul. Es deixa a criteri del docent l'evidència d'aprenentatge final que han de presentar els alumnes.

La presa de dades a la pràctica és força ràpida. Els alumnes només han de seguir les instruccions per a configurar el dispositiu i fer dues tandes de mesures de pocs minuts. Es pot fer que els alumnes preparin els fulls de càlcul mentre els altres fan les mesures i anar avançant feina, compartir mesures entre diversos grups, o senzillament, combinar aquesta pràctica amb altres i que la vagin fent de manera rotativa.

2.3 Introducció a l'aprenentatge per indagació

En l'aprenentatge per indagació o IBL l'estudiant ha de trobar solucions a una situació/problema a partir d'un procés de recerca. Aquesta metodologia se centra en l'afrontament de problemes i en el treball cooperatiu per part de l'estudiant (UPF, *Aprenentatge per indagació*) i forma part del currículum de totes les ciències, i especialment, la física.

L'aprenentatge per indagació potencia el treball d'habilitats requerides per a un treballador en un món canviant: una persona resolutiva, que sàpiga treballar en equip i tingui un pensament crític. Alhora és una metodologia que aporta major habilitat en processos científics i matemàtics.

Aquesta metodologia constructivista es basa en els treballs de Piaget, Dewey, Vygotsky, i Freire entre altres. Alguns dels processos d'aprenentatge específics que es desenvolupen amb aquesta metodologia (Bell, 2010) i que pretenem que els alumnes treballin durant el projecte inclouen:

- Creació de preguntes pròpies
- Respondre a la (s) pregunta (es) obtenint proves que hi donin suport
- Explicar les evidències recollides
- La connexió de l'explicació al coneixement obtingut del procés d'investigació
- Creació d'arguments i justificacions per a l'explicació

Així, l'aprenentatge per indagació implica (NIH, 2005) desenvolupar preguntes, fer observacions, fer investigacions per esbrinar quina informació ja està registrada, desenvolupar mètodes per a experiments, desenvolupar instruments per a la recopilació de dades, recollir, analitzar i interpretar dades, donar explicacions possibles i generar prediccions per a futurs estudis. Totes aquestes activitats són de caràcter creatiu i l'encarregat de realitzar-les ha de ser l'alumnat, assolint alguns dels objectius que marca el currículum competencial de l'ESO i del batxillerat, especialment aquells que presenten més dificultats pel seu caire integrador de coneixements o pel seu caire de tipus competencial.

3 Referències

BELL, T.; URHAHNE, D.; SCHANZE, S.; PLOETZNER, R. (2010). "Collaborative inquiry learning: Models, tools, and challenges". *International Journal of Science Education*.

UPF. Unitat de Suport a la Qualitat i la Innovació Docent ESUP/DTIC. UPF. *Aprentatge per indagació*. [en línia]
<<https://www.upf.edu/web/usquid-etic/aprenentatge-indagacio>> [Consulta: gener 2018]

National Institute for Health. (2005). *Doing Science: The Process of Science Inquiry*

4 Fitxes de treball per l'alumnat

Les fitxes de treball per l'alumnat es presenten en un document a part, en format word o libreoffice per a que els alumnes el puguin modificar.

De tota manera, s'han separat en dos grups per a facilitar la seva impressió. Per una banda, trobareu la part teòrica de la pràctica, que inclou els Objectius, la Introducció teòrica sobre detectors, física relativista, radioactivitat i el programari Pixetpro i la realització de la pràctica. Per l'altra, trobareu les fitxes que inclouen les mesures i l'anàlisi de les dades. Això hauria de facilitar la reutilització d'aquelles fotocòpies que no és necessari que siguin escrites per l'alumne, suposant que es treballi sobre paper.

FITXES DE TREBALL

Iniciació al Medipix

Estudi de la Radiació i les seves propietats. Comparació dels models clàssic i relativista en la radiació alfa i beta

Objectius

- Iniciar-se en l'ús d'un detector de partícules TimePix i del programari PixetPro.
- Identificar els diferents tipus de radiació pel rastre que deixen en el detector, i relacionar aquests rastres amb les característiques que presenten les partícules que el formen.
- Mesurar l'energia cinètica de les partícules absorbides al detector.
- Comprovar la importància de la desviació relativista en el càlcul de la velocitat de les partícules per a la radiació beta.
- Calcular la longitud d'ona de partícules alfa i beta.
- Determinar les característiques dels fotons constituents de la radiació gamma.

Introducció teòrica

Física nuclear. Les radiacions. Energia relativista.

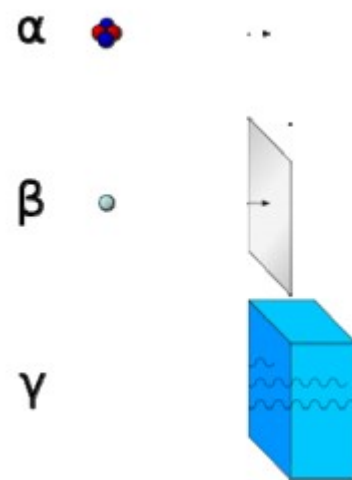
La radioactivitat és un procés natural i espontani en el qual àtoms inestables d'un element emeten o irradien l'excés d'energia del seu nucli i, així, canvien (o decauen) a àtoms d'un element diferent o un estat d'energia menor del mateix element. Els àtoms aconseguen ser inestables variant l'energia dels seus electrons, dels seus nucleons o variant d'isòtop. Aleshores, els elements o cossos anomenats radioactius, emeten radiacions que tenen la propietat d'impressionar plaques fotogràfiques, ionitzar gasos, produir fluorescència...

Els nuclis dels elements radioactius primaris es van formar, juntament amb nuclis estables d'elements, per síntesi nuclear en els nuclis d'estrelles o per nucleogènesi durant explosions de supernoves. Si aquests nuclis tenien una vida mitjana curta (en comparació amb l'edat de la Terra), van decaure i ja no estan presents en el medi ambient. Solament aquells amb una vida mitjana de 10^8 anys com a mínim es poden trobar al nostre voltant. Els radionúclids primaris més importants són el potassi ^{40}K (vida mitjana d' $1,26 \times 10^9$ anys), tori ^{232}Th (vida mitjana $1,40 \times 10^{10}$ anys), ^{238}U d'urani (vida mitjana de $4,47 \times 10^9$ anys) i ^{235}U d'urani (vida mitjana $7,04 \times 10^8$ anys). Tori i urani formen una sèrie de decaïment característica, al contrari que el potassi.

Les radiacions que emeten els nuclis radioactius es divideixen en 3 tipus ben diferenciats amb naturalesa i comportament ben diferenciats:

- radiació alfa (α): formada per nuclis d'heli. En emetre una partícula alfa, el nucli perd dos protons i dos neutrons. Es tracta d'una partícula relativament pesada, amb una càrrega positiva de $+2|e|$ i que interacciona fortament amb la matèria. És molt ionitzant i, per tant, poc penetrant.

- radiació beta (β): formada per electrons (β^-) o positrons (β^+) emesos pel nucli. En emetre una partícula beta, un neutró del nucli es converteix en un protó (en el cas de l'emissió β^-), o un protó del nucli es converteix en un neutró (en el cas de l'emissió β^+). Es tracta de partícules unes 1800 vegades més lleugeres que l'anterior i amb una càrrega de valor $|e|$ (la meitat de l'anterior) i per tant molt menys ionitzant, que interaccionen menys amb la matèria i i en conseqüència tenen molta més penetració.



- radiació gamma (γ): formada per fotons (ones EM) d'alta energia. En emetre fotons el nucli no canvia la seva naturalesa, sinó que només s'allibera d'energia sobrant. Es tracta de la partícula més lleugera (un fotó no té massa) i per tant interacciona molt menys amb la matèria, cosa que la fa molt més penetrant (no obstant això els fotons interactuen amb la matèria via l'efecte fotoelèctric, l'absorció/re-emissió (scattering de Compton i de Rayleigh), i la generació de parells electró/positró).

Figura 1: Característiques i capacitat de penetració dels diferents tipus de radiació

Com ja saps, les radiacions ionitzants poden ser molt perilloses perquè poden trencar els enllaços de l'ADN i produir mutacions a escala cel·lular. Les mostres amb què treballarem nosaltres són de baixa activitat i no tenen riscos elevats. Malgrat tot, no les toquis amb les mans. Si ho fas, vés a rentar-te-les sense tocar-te la boca ni els ulls.

Per la seva naturalesa, l'estudi d'aquestes partícules ha de tenir en compte el seu comportament quàntic i relativista. Així la radiació gamma es comporta com a partícules (fotons) quan interaccionen amb els àtoms de Si del sensor. Aquests fotons tenen una quantitat de moviment donada per $p = E/c$, on $c = 2,99792 \cdot 10^8$ m/s és la velocitat de la llum.

Igualment, les partícules β es mouen a una fracció significativa de la velocitat de la llum i pertant l'expressió clàssica de la energia cinètica, $E_k = \frac{1}{2} m v^2$, no és vàlida i cal emprar les expressions de la relativitat especial.

Així, l'energia de les partícules ve donada per la relació d'Einstein $E = E_0 + E_k$ on E és l'energia total de la partícula, E_0 l'energia en repòs i E_k l'energia cinètica. Tenint en compte l'equivalència massa-energia, $E_0 = m_0 c^2$, i $E = \gamma m_0 c^2$ i substituint

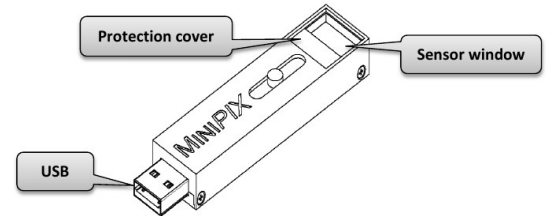
$$E = \frac{E_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (1)$$

podem expressar la velocitat d'una partícula alfa o beta com

$$v = c \sqrt{1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{E_k}{E_0}\right)^2}} \quad (2)$$

El detector

MINIPIX és una solució de càmera de radiació de detector Timepix amb recompte de partícules individuals (o seguiment de partícules), miniaturitzada i de baixa potència, desenvolupat al CERN. El sistema estàndard MINIPIX incorpora un detector Single Timepix (256 x 256 píxels amb una superfície de $55 \mu\text{m}^2$ cada un) amb un sensor de silici estàndard de 300 micres de gruix. Utilitza la interfície USB 2.0. i és capaç de llegir fins a 30 fotogrames per segon (amb un temps d'exposició d'1 ms). El detector Timepix és sensible a l'energia, cosa que aporta una nova dimensió a les imatges radiogràfiques.



Un sensor com aquest (entre altres dispositius) és el que utilitzen els astronautes de la NASA a la ISS per a detectar radiació còsmica.

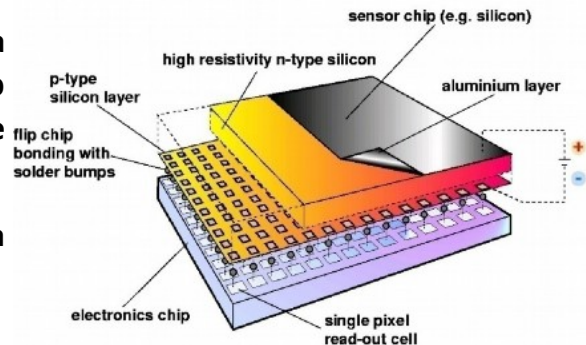
<https://home.cern/about/updates/2012/08/timepix-detectors-track-cosmic-radiation-iss>

IMPORTANT:

No toqueu la superfície de la finestra del sensor ni amb els dits ni amb qualsevol altre objecte. La làmina de silici de 0,3 mm és molt delicada.

Mantenir allunyat de l'aigua i la humitat.

No desmuntar el dispositiu.



La detecció de radiació ionitzant es produeix al xip detector, dissenyat com un díode semiconductor pla de 14mm x 14mm i un gruix de 300 micròmetres. El díode està connectat en polarització inversa, l'usuari pot triar el voltatge de la polarització (anomenat bias) fins a 100 V. Això crea una zona lliure de càrregues en la junció P-N i el díode només transmet una petita quantitat de corrent (anomenada dark current) que pot ignorar-se triant un valor llindar (treshold) apropiat.

Quan la radiació ionitzant impacta sobre el Si, genera parells d'electró-forat (l'energia mínima necessària és de 3,62 eV) que són atrets pels elèctrodes, produint un pols de corrent detectable. Com el detector no és un únic díode sinó

que la superfície està configurada com una graella de 65536 segments (256x256 díodes), el detector és capaç de mostrar en quins píxels s'ha produït el senyal. Segons el tipus de partícula que formi la radiació (i segons els paràmetres de configuració del detector), la interacció amb els àtoms dels díodes de silici serà diferent i per tant el senyal produït també, podent distingir el tipus de partícula a partir del senyal que produeix en el sensor.

A més a més, el processament del senyal ens permet treballar en mode comptador, per tal de comptar el nombre de díodes activats per la partícula, en mode temps per tal de determinar la durada de la interacció, o en mode energia, que ens permet mesurar l'energia de la partícula irradiant si el detector està calibrat convenientment.

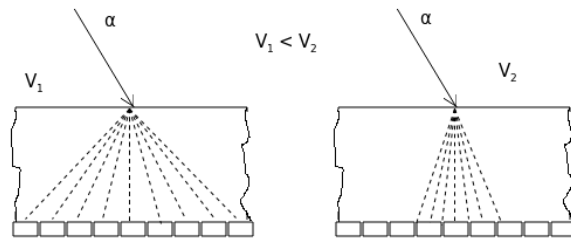


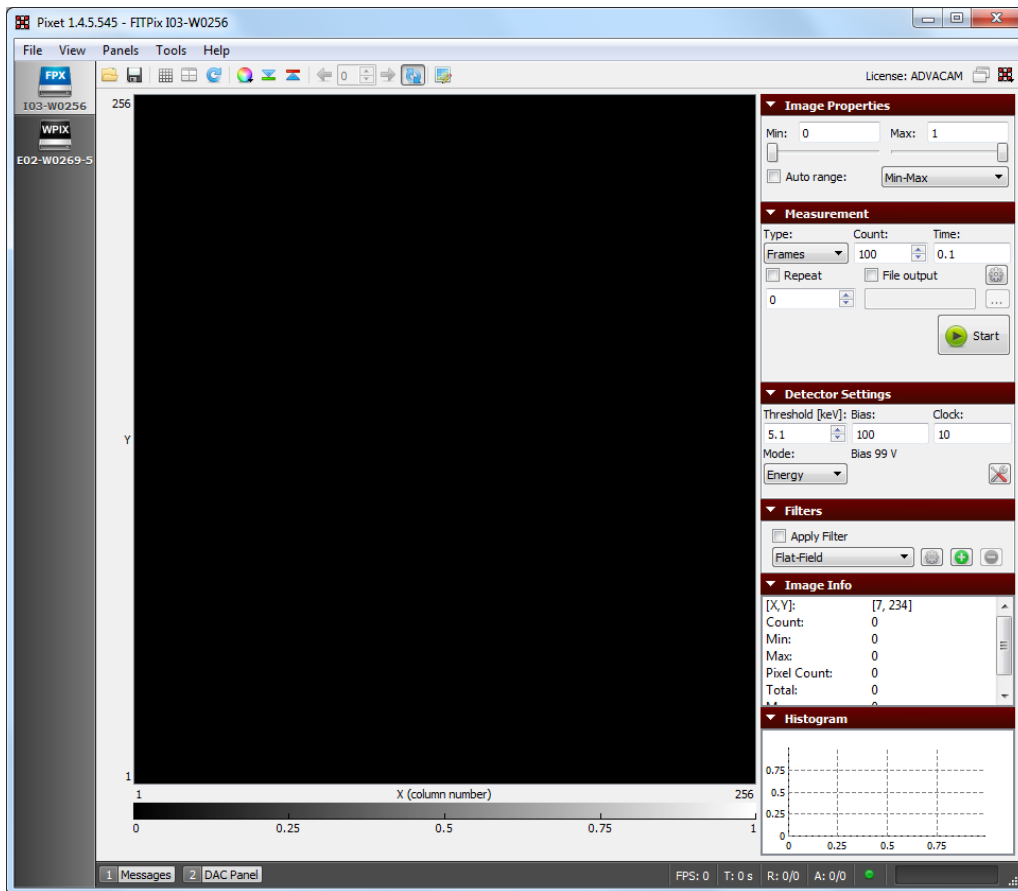
Figura 2: Difusió de càrregues en píxels adjacents després de que una partícula alfa penetri al detector. Es mostra com la dispersió de la traça depèn del Bias Voltage

El programari

El *PIXET Pro* és un programari multiplataforma desenvolupat a l'empresa ADVACAM. És un paquet de programari per al control d'adquisició de dades per a xips de la família Medipix. Pixet proporciona moltes eines per a l'optimització de paràmetres del detector, processament de dades, correccions d'imatges i scripting.

La finestra principal

La finestra principal del programari consisteix en la barra lateral del dispositiu, el quadre (imatge) on es visualitzen les dades mesurades, el tauler de control al costat dret, la barra d'eines, la barra de menú i el panell d'estat abaix. Els panells al costat dret es poden minimitzar fent clic a la fletxa cap avall del panell corresponent o es pot amagar / mostrar a través dels panells de menú



Barra de dispositius

Mostra el dispositiu connectat. Si no apareix el dispositiu en colors, aviseu al professor.

Quadre

El quadre mostra les dades mesurades (quadres)

Zoom: Prement el botó esquerre i arrossegant el ratolí per crear un marc rectangular es farà zoom a la zona emmarcada. Aquesta zona pot ajustar-se per les barres de scroll o movent la imatge amb el botó dret del ratolí. Fent doble clic, el zoom es desfà

Image Properties

Permet modificar les propietats de la imatge que es mostrarà al quadre.

Measurement

Permet determinar els paràmetres de la mesura, com nombre de quadres, temps, ... També permet escollir el mode: *frames*, que mesura un quadre cada vegada, i *integral*, que acumula cada quadre sobre els anteriors.

El botó *Start* Inicia la mesura i el botó *Stop* l'atura.

Detector Settings

Aquest panell permet modificar els paràmetres del dispositiu.

Filters

Permet aplicar diferents filtres i correccions de la visualització de les dades mesurades, sense modificar les pròpies dades.

Image Info

Mostra informació estadística de la imatge actual en el quadre.

Histogram

Mostra l'histograma de valors del pixel per al quadre actual.

Toolbar

Té alguns botons força útils.
D'esquerra a dreta



Open Frame - Save Measured Data - Show Grid - Rotate Image - Color map - Under warning - Over warning - Previous frame - Frame - Next frame - Auto update - Edit Pixel Configuration - Measurements - Python scripting

Realització de la pràctica

Material

- Detector TimePix.
- Ordinador.
- Programari Pixet Pro.
- Full de càlcul.
- Mostra radioactiva.
- Guants de plàstic.
- Cullereta.
- Pincès.

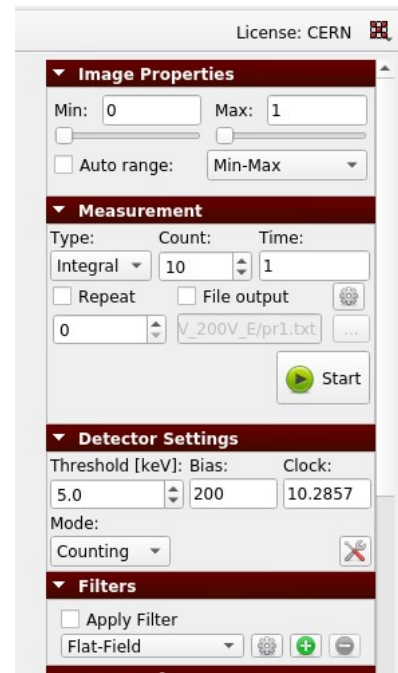


Figura 3: Configuració del detector per a determinar les trajectòries

Muntatge de l'experiència

En aquesta experiència utilitzarem el detector en dos modes diferents i per tant caldrà fer dues mesures amb parametritzacions diferents del programa. Quan acabis la primera, completa la secció «adquisició i enregistrament de les dades».

Connecta el detector a un port USB de l'ordinador, sense obrir la protecció. En primer lloc ens assegurarem que el programa connecta amb el detector, seleccionant el botó Show Chip Numbers de la Toolbar. Al quadre ha d'aparèixer en gran, G08-W0253. **Si no és així, avisar al professor abans de continuar.**

1. Determinació de les trajectòries

Un cop estiguis segur que el detector es comunica correctament amb el programa, fixa la ràtio de la imatge al menú View i selecciona el color Jet White a la Toolbar. Val la pena que premis el botó *grid* per a una millor visualització dels píxels del sensor.

Per a fer aquestes mesures, cal que configuris el detector amb la parametrització que es mostra a la Figura 3: Configuració del detector per a determinar les trajectòries.

Obriu la porta de protecció del detector.

Apropeu la mostra radioactiva al sensor i premeu el botó *Start* per iniciar la captura de dades. Com hem seleccionat el mode integral, els quadres que detecta es van acumulant. A mesura que es van obtenint dades veureu 3 tipus de trajectòries, una per a cada tipus de radiació. En cas contrari, modifiqueu els valors del màxim d'energia detectat (Max) fent lliscar el selector a *Image Properties*

Veureu trajectòries grans i arrodonides, anomenades *Blobs* (gotes) causades per les partícules alfa. Més comunes són unes trajectòries llargues i sovint corbades, anomenades *Worms* (cucs), produïdes per la radiació beta d'alta energia. Finalment, la radiació beta de baixa energia i la radiació gamma produeixen trajectòries petites i curtes, normalment d'un (o pocs) píxels. No és possible distingir quin tipus de radiació ha produït aquestes trajectòries amb el nostre detector.

Quan el procés d'obtenció de dades finalitzi, tanqueu el protector del xip.

2. Energia cinètica absorbida pel sensor i velocitat de les partícules en els models clàssic i relativista.

A continuació anem a treballar en mode energia. Una partícula detectada en el xip pot ser absorbida al sensor i dipositar-hi tota la seva energia cinètica (com passa en el cas de les partícules alfa i les beta de baixa energia) o travessa tot el detector dipositant només una part de la seva energia (cas de les partícules beta d'alta energia).

Parametritzeu el detector com es veu a la Figura 4: Configuració del detector per mesurar l'energia cinètica.

Pot ser interessant seleccionar l'opció *Auto range*, que ajustarà el color de l'energia detectada a cada pixel mostrat a la imatge. Si no ho veieu bé, moveu manualment el selector Max de *Image Properties*

Obriu la porta de protecció del detector.

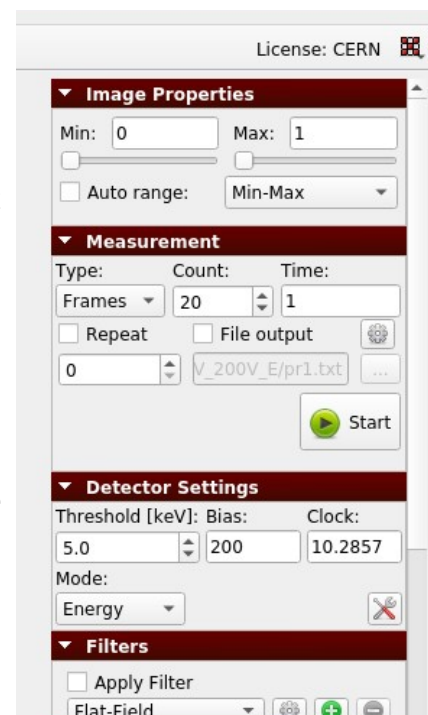


Figura 4: Configuració del detector per mesurar l'energia cinètica

Apropeu la mostra radioactiva al sensor i premeu el botó Start per iniciar la captura de dades. Com hem seleccionat el mode *Frames*, cada quadre detectat substitueix el quadre anterior.

Quan el procés d'obtenció de dades finalitzi, tanqueu el protector del xip.

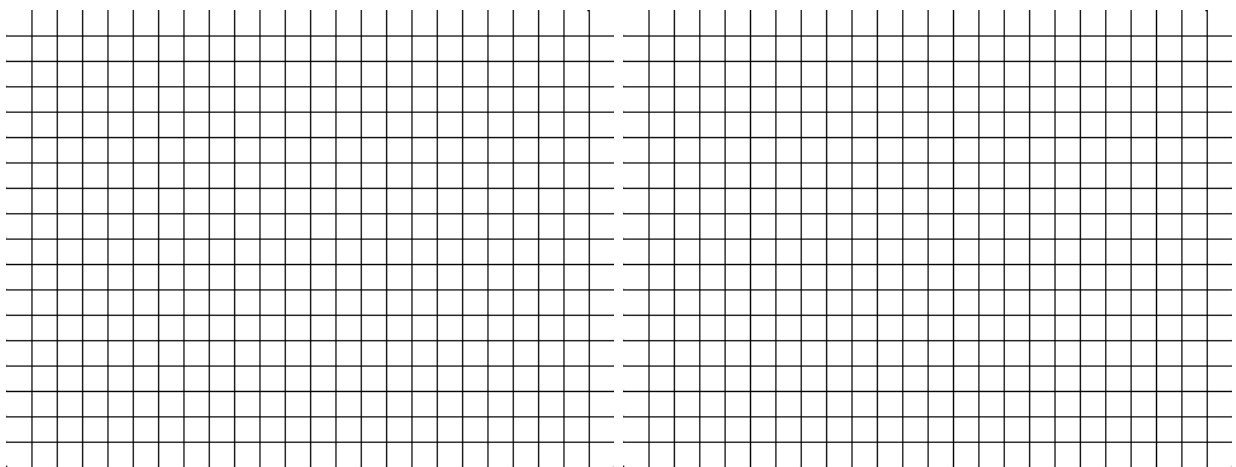
Si observeu el panell *Image Info*, veureu una sèrie de valors interessants, com el valor màxim d'energia detectada i el total d'energia que s'ha dipositat en les partícules detectades al quadre que es mostra. Aquest és el valor d'energia cinètica que tenia la partícula en entrar al detector.

Aneu passant pels diferents quadres amb el selector de la Toolbar i feu zoom sobre diferents trajectòries de les partícules alfa, beta i gamma de manera que apareguin soles a la imatge. Anoteu l'energia que apareix al panell Imatge Info per a cada una de les partícules. Aquest valor està calibrat en keV.

Adquisició i anàlisi de les dades

1 Determinació de trajectòries.

1.1 Dibuixa a continuació una de les trajectòries d'una partícula alfa, una partícula beta i una partícula gamma i etiqueta cada un dels tipus.



1.2 Busca a internet la massa en repòs i calcula l'energia en repòs que tenen les partícules alfa i beta, amb la relació d'equivalència massa-energia.

$$m_{\alpha} = \qquad \qquad \qquad E_{\alpha} =$$

$$m_{\beta} = \qquad \qquad \qquad E_{\beta} =$$

1.3 A partir de les característiques que tenen les partícules de cada tipus de radiació, fes hipòtesis de com aquestes partícules interaccionen amb els àtoms de silici i són detectades pel sensor, donant lloc als diferents tipus de trajectòries (aprox. 50 paraules)

2 Energia cinètica absorbida pel sensor i velocitat de les partícules alfa en els models clàssic i relativista.

Per a fer els càlculs, crea un full de càlcul a drive de nom P_TIMEPIX_COGNOM_NOM i comparteix-lo amb el/la professor/a. Crea una taula com la següent. Anota els resultats en aquesta taula. Per a fer els càlculs caldrà fer canvis d'unitats.

E_k [keV]					
E_k [J]					
v [ms^{-1}] (relat.)					
v [ms^{-1}] (class.)					
v/c (relat.)					
v/c (classica)					
Desviació (%) $100 \cdot (V_{\text{class}} - V_{\text{rel}}) / V_{\text{rel}}$					
Longitud d'ona					

- 2.1 Anota en el full de càlcul el valor de les energies cinètiques que has mesurat per a les partícules alfa.
- 2.2 Calcula el valor de la velocitat de les partícules, tant amb el model clàssic com amb el model relativista.
- 2.3 Valora a continuació la correcció, o no, dels dos models per a descriure l'energia d'aquest tipus de partícules.
- 2.4 Valora a continuació si la partícula alfa té un comportament principalment ondulatori o principalment corpuscular.

NOM I COGNOMS: NUM:

DATA: CURS: ETAPA: GRUP:



3 Energia cinètica absorbida pel sensor i velocitat de les partícules beta en els models clàssic i relativista.

En una nova pàgina del full de càlcul a drive crea una taula com la següent. Anota els resultats en aquesta taula.

E_k [keV]					
E_k [J]					
v [ms^{-1}] (relat.)					
v [ms^{-1}] (class.)					
v/c (relat.)					
v/c (classica)					
Desviació (%) $100 \cdot (V_{\text{class}} - V_{\text{rel}}) / V_{\text{rel}}$					
Longitud d'ona					

- 3.1 Anota en el full de càlcul el valor de les energies cinètiques que has mesurat per a les partícules beta.
- 3.2 Calcula el valor de la velocitat de les partícules, tant amb el model clàssic com amb el model relativista.
- 3.3 Valora a continuació la correcció, o no, dels dos models per a descriure l'energia d'aquest tipus de partícules.

- 3.4 Valora a continuació si la partícula alfa té un comportament principalment ondulatori o principalment corpuscular.

4 Energia cinètica absorbida pel sensor i característiques de les partícules gamma.

En una nova pàgina del full de càlcul a drive crea una taula com la següent. Anota els resultats dels càlculs a continuació

E_k [keV]					
E_k [J]					
f (Hz)					
λ (m)					
p (kg·m/s)					

- 4.1 Anota en el full de càlcul, en una nova pàgina, el valor de les energies cinètiques que has mesurat per a 5 partícules gamma.
- 4.2 Calcula el valor de la freqüència del fotó, de la seva longitud d'ona i de la quantitat de moviment que ha cedit el fotó a l'àtom de silici.