

# Un nou detector per a experiments dinàmics amb llum de sincrotró

Inmaculada Ramos-Lerate\*, Ferran Fernández†, Joan Carles Martínez‡, David Beltrán§ i Bern Saló¶

## Introducció

Els primers detectors de raigs X van aparèixer al mateix temps que el descobriment de la radioactivitat el 1895 per Röntgen i consistien en pel·lícules fotogràfiques sensibles als raigs X. Les seves primeres aplicacions van ser la medicina i la biologia: els diferents teixits, amb diferents coeficients d'absorció, deixaven passar diferents intensitats que es recollien per la pel·lícula. Actualment, els detectors de raigs X són una eina indispensable per fer experiments amb llum de sincrotró.

La radiació de sincrotró es va observar per primer cop el 1947 i es va considerar un problema de pèrdua energètica en acceleradors de partícules. No obstant això, a principi dels seixanta, va començar a ser utilitzada per fer estudis en ciència de materials. Des de llavors, les instal·lacions dedicades exclusivament a la producció de llum de sincrotró han proliferat arreu del planeta. Actualment s'està construint una font de llum de sincrotró a prop de Barcelona (Campmany, 1997). La llum de sincrotró té les característiques següents:

\***Inmaculada Ramos-Lerate** (Cádiz, 1970) és doctora en Ciències Físiques per la Universitat de Cádiz. Va treballar en física nuclear experimental al CSIC i en radiació gamma a la Universitat de Cádiz. Actualment és la responsable del grup de detecció de raigs X del sincrotró ALBA.

†**Ferran Fernández** (Barcelona, 1980) és llicenciat en Ciències Físiques per la Universitat Autònoma de Barcelona. S'ha especialitzat en detectors de gas i en la seva simulació al grup de detectors de raigs X del sincrotró ALBA. Actualment està ultimant la tesi doctoral.

‡**Joan Carles Martínez** (Barcelona, 1974) és llicenciat en Ciències Físiques per la Universitat de Barcelona. S'ha especialitzat en enginyeria mecànica i en desenvolupament robòtic en el grup de detecció de raigs X del sincrotró ALBA.

§**David Beltrán** (Castelló de la Plana, 1972) és enginyer superior de Telecomunicacions per la Universitat Politècnica de València i doctor per la Universitat Politècnica de Catalunya. És especialista en sistemes de control i potència per a acceleradors, i en electrònica per a detectors de gas. Actualment és el responsable del grup de control del sincrotró.

¶**Bern Saló** (Barcelona, 1982) és tècnic de grau superior de sistemes de comunicació i equips informàtics per l'Institut Politècnic Escoles Professionals dels Salesians de Sarrià. Forma part del personal tècnic del grup de detecció de raigs X del sincrotró ALBA.

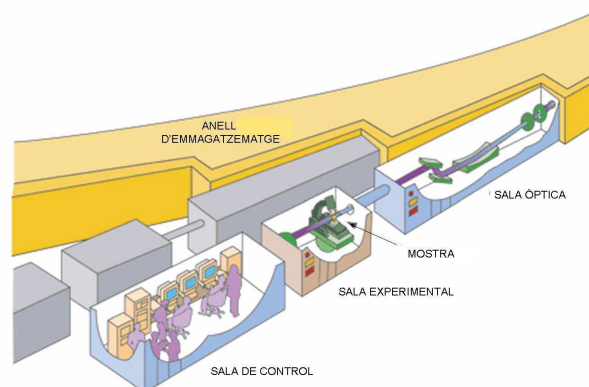


Figura 1: Esquema d'una línia de llum

1. Un espectre continu de longituds d'ona: des de microones fins a raigs X durs.
2. Molta intensitat: és sis ordres de magnitud superior a la intensitat obtinguda pels tubs de raigs X convencionals.
3. Llum polaritzada: la major part de la llum emesa és polaritzada. Algunes tecnologies permeten triar polaritzacions circulars i el·líptiques.
4. Estructura temporal: la llum és emesa en impulsos de picosegons en una estructura periòdica de microsegons.
5. Estabilitat: l'emissió és estable durant hores.

En una instal·lació de llum de sincrotró, la radiació es dirigeix a la sala òptica on, gràcies a diferents cristalls i miralls, la llum és focalitzada i la seva energia seleccionada. A continuació la radiació passa a la sala experimental, on es produeix la interacció amb la mostra i la detecció dels raigs X. Finalment, els paràmetres de l'experiment són regulats des de la sala de control. Les tres sales formen el que s'anomena una *línia de llum* (figura 1).

Espanya va començar a gestionar la línia de llum BM16 de l'European Synchrotron Radiation Facility (ESRF) el gener de l'any 2003. BM16 consta de dues estacions experimentals, una de dedicada a cristal·lografia de proteïnes i l'altra a dispersió i difracció de material no cristal·lí (fibres o polímers). En la primera estació s'empra com a sistema de detecció una càmera CCD (vegeu la secció 2) amb una resolució temporal de 100 ms, dels quals hi ha una àmplia gamma de productes en el mercat.

En la segona estació les tècniques utilitzades s'anomenen *dispersió de raigs X a angles baixos o alts* (SAXS/WAXS). La intensitat del feix és de  $10^{14}$  fotons/s i el factor d'atenuació per a la dispersió és, en experiments típics, de  $10^6$  fotons/s, cosa que permetrà l'elaboració d'interessants estudis d'experiments dinàmics com ara l'empaquetament de proteïnes, la polimerització de l'actina, la contracció i relaxació musculars o el procés de manufactura de diversos polímers. Tots aquests processos tenen escales temporals des de centenars de microsegons fins a segons.

Per als experiments de dispersió a BM16 les característiques o requeriments per al sistema de detecció són: àrea gran ( $> 200 \times 200 \text{ mm}^2$ ), possibilitat de comptar fotons de manera individual, baix soroll electrònic, resolució temporal de l'ordre dels microsegons, ritme d'imatges major que 1000 imatges/s i alt rang dinàmic ( $> 10^5$ ), ja que es volen detectar pics de molta intensitat i de molt poca intensitat simultàniament. Actualment no hi ha detectors comercials que compleixin aquestes característiques i els únics capaços de satisfer aquests requeriments són els *multi wire proportional counters* (MWPC).

## Detectors per radiació de sincrotró

No es coneix el detector ideal que pugui ser usat per a qualsevol tècnica o en qualsevol línia de llum en un sincrotró. En general, el funcionament dels detectors s'avalua d'acord amb les seves propietats. Les més rellevants són: rang energètic, àrea activa (per a detectors lineals 1D o d'àrea 2D), uniformitat, resolució espacial, eficiència quàntica, sensibilitat, rang dinàmic, soroll, velocitat d'adquisició i cost. A continuació presentem els quatre tipus de detectors més usats en línies de llum:

**1. Placa imatge.** Consisteix en una pantalla fluorescent amb materials dopats. La presència d'aquests materials crea nivells intermedis metaestables entre la banda de valència i la banda de conducció. Els raigs X interaccionen amb el detector i creen parelles electró/forat. En finalitzar l'experiment, les plaques s'irradien amb llum infraroja (o visible) i emeten llum ultraviolada, la intensitat de la qual és proporcional a la densitat de parelles electró/forat. Aquesta proporcionalitat es conserva per a deteccions menors a  $4 \times 10^4$

fotons/píxel. La llum emesa és recollida i digitalitzada formant una imatge. El temps de vida mitjana dels centres és d'unes quantes hores a temperatura ambient, cosa que en facilita l'ús.

A continuació oferim les característiques actuals d'aquests detectors. La mida dels píxels és típicament  $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ , tot i que pot arribar a  $50 \times 50 \mu\text{m}^2$ . L'eficiència d'una pantalla de BaFBr :  $\text{Eu}^{2+}$  és del 100 % per a energies menors de 12 keV i d'un 85 % per a fotons de 20 keV, però es pot augmentar incrementant l'espessor de la pantalla, en detriment de la resolució espacial. La sensibilitat té variacions d'un 10 % en la superfície a causa d'imperficcions.

## 2. Dispositiu d'acoblament de càrregues (CCD).

(Gruner, 2002) Aquests dispositius són àmpliament coneguts i emprats per a la detecció de llum visible. Tot i que hi ha CCD que detecten raigs X, la seva eficiència és molt baixa. En conseqüència, en instal·lacions de llum de sincrotró s'utilitza la conversió de raigs X a llum visible a través d'una pantalla de fòsfor. Normalment, l'àrea del CCD és menor que la de la pantalla de fòsfor. Per tant, s'utilitza un sistema de fibra òptica per conduir la llum emesa de la pantalla al CCD, de manera que la imatge es concentra en una àrea menor; desmagnificació.

El funcionament d'un CCD es basa en una estructura de sensors en què els fotons dipositen la seva energia en forma d'electrons. Aplicant el voltatge adequat, una sèrie d'elèctrodes situats al darrere dels sensors generen uns pous de potencial on els electrons són emmagatzemats. Variant aquest voltatge, la càrrega es transfereix d'un pou a un altre fins a arribar a l'extrem del CCD, on la càrrega és amplificada, digitalitzada i mesurada. La lectura es duu a terme, doncs, per files i/o columnes.

La construcció de CCD de grans àrees és un procés complex i costós econòmicament, i això comporta que els CCD tinguin normalment una àrea limitada a uns quants centímetres. Un altre problema usual que tenen aquests dispositius és el soroll tèrmic, que es pot solucionar amb un sistema de refrigeració. Tot i que són més ràpids que les plaques imatge, el seu rang dinàmic és menor i la resolució espacial és pitjor, especialment si s'usa una forta desmagnificació.

## 3. Detectors semiconductors (semiconductors array detectors).

Aquests detectors estan formats per un semiconductor intrínsec situat entre dos elèctrodes altament dopats  $n+$  i  $p+$  sotmesos a una diferència de potencial. Els raigs X interaccionen amb el semiconductor intrínsec dipositant la seva energia en forma de parelles electró/forat. Els electrons migren cap a l'ànode on són col·lectats (figura 2). En cas que els elèctrodes estiguin segmentats, és possible determinar la posició d'interacció del raig X amb el detector.

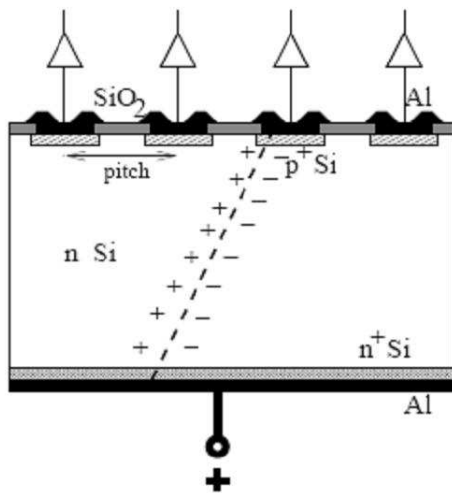


Figura 2: Detectors semiconductors

L'energia del fotó detectat és proporcional al nombre de parelles electró/forat, la fluctuació del qual és inversament proporcional a la seva arrel quadrada. Per tant, la resolució en energia millora quan augmenta el nombre de parelles electró/forat. A causa de la petita diferència d'energia entre la banda de valència i la de conducció, l'energia necessària per crear una parella electró/forat és molt petita (3,61 eV per al Si i 2,98 per al Ge). En conseqüència, aquests detectors tenen molt bona resolució en energia i això els fa adequats per a tècniques com ara l'espectroscòpia d'absorció de raigs X (EXAFS).

**4. Comptadors de gas.** En els comptadors de gas, els fotons dipositen la seva energia en forma de parelles electró/ió en un volum sensible de gas sotmès a una diferència de potencial. Els electrons ionitzats migren cap a l'ànode on, en la majoria dels casos, el camp elèctric és molt alt. Prop de l'ànode els electrons són accelerats fins que adquireixen energies que els permeten ionitzar els àtoms del gas. Aquest procés es repeteix successivament amplificant el nombre d'electrons. Finalment, la càrrega és detectada en els elèctrodes. Els comptadors de gas poden fer deteccions en dues dimensions, depenent de la disposició i el nombre dels elèctrodes; el MWPC és el dispositiu més estès en aquest camp. Més endavant descriurem aquest dispositiu amb més detalls.

Escollint el gas i la pressió adequats, aquests dispositius es poden utilitzar per detectar fotons de qualsevol energia. Altres avantatges són que tenen una bona eficiència, poden ser construïts amb grans àrees i tenen un temps d'adquisició molt reduït, cosa que els fa adequats per a experiments dinàmics. En contra, que tenen una resolució espacial modesta.

Durant els darrers anys, han aparegut uns dispositius anomenats *detectors gasosos microestructurats*

## DETECTOR DE PÍXELS DE SILICI (2D)

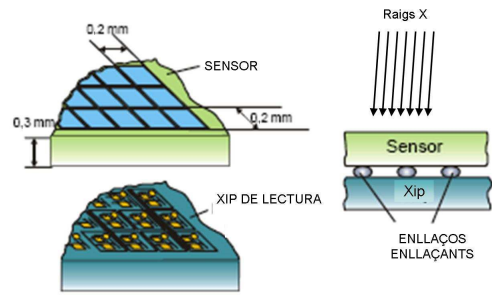


Figura 3: Esquema d'un detector de píxels

(MPGD) que es caracteritzen perquè les estructures dels elèctrodes són de dimensions reduïdes, que en milloren la resolució espacial i la capacitat de comptatge. Actualment s'estan investigant noves tecnologies per a la detecció de raigs X. Les principals són:

- *Panell pla.* En la dècada dels noranta es van començar a desenvolupar per a la detecció de raigs X i actualment s'han començat a comercialitzar en el camp de la medicina. Aquests dispositius consten d'un sensor semiconductor de seleni amorf en contacte amb una matriu de píxels formats per un condensador i un transistor de capa prima (TFT). En interaccionar un raig X amb el sensor, es generen parelles electró/forat i els electrons són recollits pel condensador. Un sistema de lectura seqüencial llegeix la càrrega a través del TFT. Els panells plans també poden funcionar en mode indirecte, usant una làmina de fòsfor prèvia al sensor que converteix l'energia dels raigs X en llum visible. L'eficiència d'aquests dispositius ve determinada pel gruix de la capa de seleni. Actualment el rang dinàmic és de dotze bits. Comparats amb els CCD, de funcionament similar, es poden construir els panells plans de més gran àrea, però també de majors dimensions de píxel (de 50  $\mu\text{m}$  a 150  $\mu\text{m}$ ).
- *Detectors de píxels de silici per a comptatge de fotons.* Aquests dispositius s'estan desenvolupant en diferents sincrotrons del món. Estan formats per un sensor semiconductor que converteix els raigs X en càrrega i un xip CMOS que processa la càrrega en format electrònic (figura 3). En l'actualitat s'està destinant un gran esforç en inversió, temps i personal per tal de desenvolupar detectors d'aquest tipus de gran àrea, bona resolució espacial i gran ritme de comptes.
- *Fotodíodes d'allau.* Aquests detectors consisteixen en un volum sensible semiconductor al qual s'aplica

un camp elèctric invers. Els raigs X en interaccionar amb el semiconductor dipositen la seva energia en forma de parelles electró/forat. El camp elèctric dins el volum és tan elevat que, quan els electrons migren, són accelerats fins al punt de generar més parelles electró/forat. Aquest procés es repeteix consecutivament, cosa que provoca una allau de càrregues. La seva característica principal és una bona resolució temporal. En l'actualitat, aquests dispositius s'usen com a detectors puntuals, però la detecció en dues dimensions és possible utilitzant una disposició de fotodíodes d'allau.

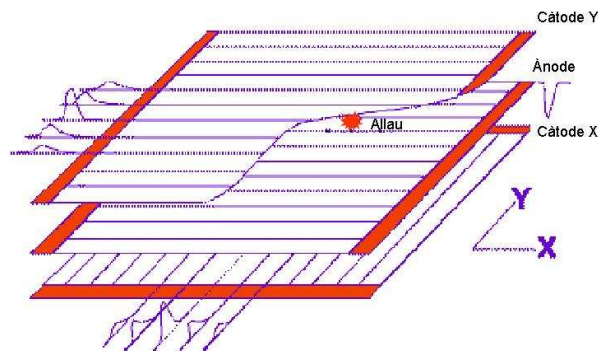


Figura 4: Ànode i càtodes d'un MWPC

## Un nou detector per a experiments dinàmics

Per tal de proveir un detector que complís els requeriments de la línia de llum BM16 de l'ESRF, el Ministerio de Educación y Ciencia va aprovar el projecte: Diseño y desarrollo de sistemas rápidos de detección de rayos-X para experimentos dinámicos en líneas de luz sincrotrón FPA2003-05050, de tres anys de duració, que finalitza el novembre del 2006. En aquest projecte es va proposar la construcció d'un sistema complet de detecció de raigs X bidimensional consistent en un detector de gas. Aquests tipus de detectors eren els únics que s'havia demostrat que eren adequats per als requeriments de la línia. El detector s'ha desenvolupat i construït a Barcelona, i s'està posant a punt a la línia espanyola BM16 a l'ESRF. El sistema d'adquisició de dades s'ha desenvolupat en col·laboració amb la Universitat Politècnica de València. Aquest projecte també inclou la investigació d'altres sistemes de detecció de gas en els quals també estem treballant (Fernández, 2007).

### Funcionament

En el MWPC, l'ànode consisteix en un pla format per fils metàl·lics disposats paral·lelament que està situat entre dos càtodes, que també són plans formats per fils (figura 4). Els electrons alliberats durant la interacció amb el raig X migren cap als fils de l'ànode atrets per un camp elèctric (*drift field*). Aquest es genera aplicant un voltatge a la part interior de la finestra d'entrada. Prop dels fils, el camp elèctric creix proporcionalment a l'invers de la distància al centre del fil. Aquest intens camp elèctric provoca que els electrons siguin accelerats fins al punt que ionitzin àtoms del gas. Els electrons alliberats en aquest procés també seran accelerats i ionitzaran altres àtoms. Aquest fenomen, anomenat *allau*, multiplica la càrrega inicial en un factor que típicament oscil·la entre  $10^3$  i  $10^5$ . La càrrega final és detectada als fils dels càtodes més propers a l'allau. Els fils de cada pla estan soldats a uns marcs especials anomenats *frames* que contenen les connexions elèctriques necessàries.

L'orientació dels fils d'un càtode és perpendicular respecte a l'altre i això permet la resolució de la posició en les dues coordenades. La determinació de la posició

de l'allau pot fer-se a través d'una lectura en paral·lel o a través d'una línia de retard. La lectura en paral·lel és molt més complexa i costosa econòmicament, però la velocitat d'adquisició és molt més alta. Cada fil del càtode hi té adaptada una electrònica independent que envia la informació a un dispositiu encarregat de determinar la posició mitjana en cada coordenada. En el cas de la línia de retard, un extrem dels fils de cada càtode estan units per un dispositiu (una línia de retard) que transmet els senyals amb un cert retard. Quan un impuls és generat en un fil el senyal es transmet a través de la línia de retard als dos extrems del càtode, i el retard total és proporcional a la distància a cada extrem. Cada coordenada es determina a partir dels temps d'arribada de l'impuls a cada extrem de cada càtode.

Actualment, el ritme total de comptes al qual poden treballar els MWPC està determinat per l'electrònica de lectura i el sistema d'adquisició de dades. A ritmes locals superiors, el problema de la càrrega espacial començarà a limitar la velocitat del detector. La càrrega espacial és la distorsió del camp elèctric per la càrrega dels ions en la zona de l'allau.

### Disseny i construcció

El disseny d'aquest detector parteix d'un model d'MWPC construït prèviament per aquest grup. En la taula 1 es mostren les característiques principals del nostre MWPC.

Distància finestra-càtode	1,9 cm
Distància ànode-càtodes	0,3 cm
Distància entre fils d'un pla	0,1 cm
Diàmetre dels fils del càtode	30 $\mu\text{m}$
Diàmetre dels fils de l'ànode	10 $\mu\text{m}$
Voltatge de l'ànode	2850 V
Voltatge de la finestra	-2000 V
Gas	90 % Ar + 10 % CO <sub>2</sub>
Retard total (línia de retard)	150 ns

Taula 1: Característiques del nostre MWPC

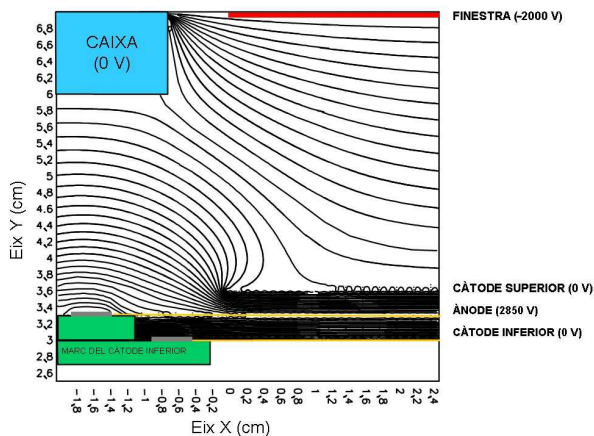


Figura 5: Simulació de les línies de camp en un extrem del detector previ al nostre MWPC

Prèviament al disseny i a la construcció del detector, es va fer un treball de simulació i optimització (Fernández, 2006). S’hi van estudiar les relacions entre els paràmetres del detector i la seva resposta per poder-ne optimitzar les característiques. També es va estudiar l’efecte de les pertorbacions reals que sofreix el detector com ara la contaminació del gas, la posició dels fils o la seva tensió per poder determinar la tolerància d’alguns dels paràmetres de la construcció. Finalment, també s’han fet simulacions sobre la velocitat de l’electrònica.

Aquest estudi va servir, per exemple, per optimitzar els efectes de vora. Aquest efecte es produeix quan el camp elèctric entre la finestra del detector i els plans de fils es distorsiona als extrems del detector (figura 5), cosa que s’anomena *efectes de vora*. En aquestes circumstàncies, quan els electrons es dirigeixen cap a l’ànode després de la interacció del raig X amb el gas, es desvien de la seva projecció en el pla de detecció. Aquest fet obliga a prescindir de les dades dels extrems de les imatges i redueix l’àrea real de detecció. En la figura 6 presentem els dissenys anterior i posterior a l’optimització, que es va fer emprant un simulador de camp electrostàtic d’elements finits (Opera, 1998) i un simulador de detectors de gas (Veenhoff, 2001).

Els MWPC presenten dos problemes quan operen en instal·lacions de llum de sincrotró. El primer consisteix en el dipòsit de substàncies a la superfície dels fils, i això implica la necessitat de canviar els ànodes i càtodes regularment. El segon inconvenient són les descàrregues als fils de l’ànode a causa dels grans camps elèctrics presents en la zona de multiplicació de la càrrega. Aquestes guspines, tot i que no gaire freqüents, poden trencar els fils de l’ànode, més delicats, i provocar-ne el canvi.

El mètode tradicional de soldadura dels fils als marcs és manual i requereix molt temps i habilitat. De l’estudi de toleràncies, es va deduir que tampoc és suficientment

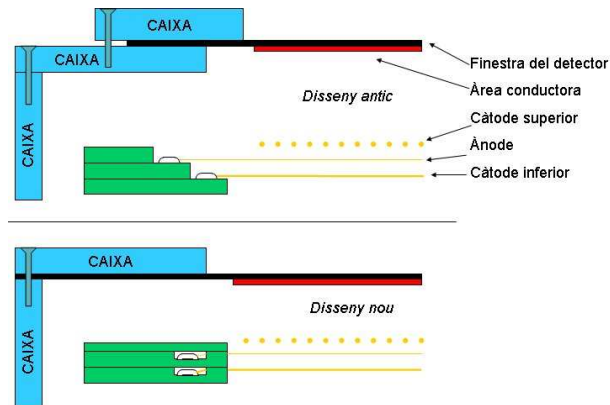


Figura 6: Esquema dels dissenys antic i modern del detector en la regió dels extrems

precís en la posició dels fils i les seves tensions. Pel que fa a les soldadures, el mètode tradicional deixa puntes en la seva superfície, cosa que facilita l’aparició de guspines. És per aquests motius que es va dissenyar i construir un sistema semiautomàtic de posicionament i soldadura dels fils als marcs (Martínez, 2006). Un robot posiciona i bobina els fils al marc aplicant una tensió que ve regulada per un sistema de politges que subjecten un pes (figura 7).

L’error màxim en la posició dels fils és de  $40 \mu\text{m}$ . Posteriorment, s’aplica el material de soldadura sobre la regió indicada i es fon per radiació. Aquest mètode de soldadura és molt més ràpid que el tradicional i les soldadures són molt més uniformes (figura 8). El posicionament dels fils també millora ja que aquests no es toquen durant el procés.

### L’electrònica

El sistema de lectura empra una línia de retard, que transmet els impulsos de cada fil de cada càtode a l’extrem del seu marc. Com que es tracta de senyals molt

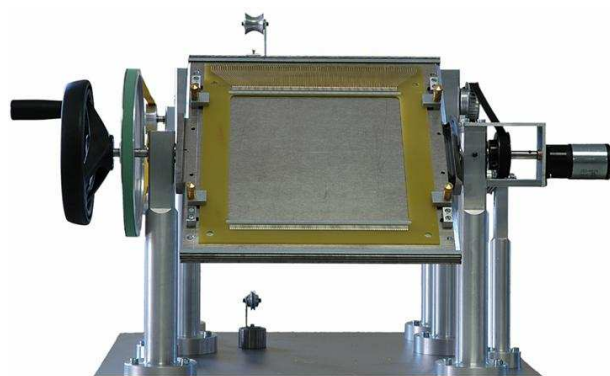


Figura 7: Fotografia del robot posicionador i bobinador

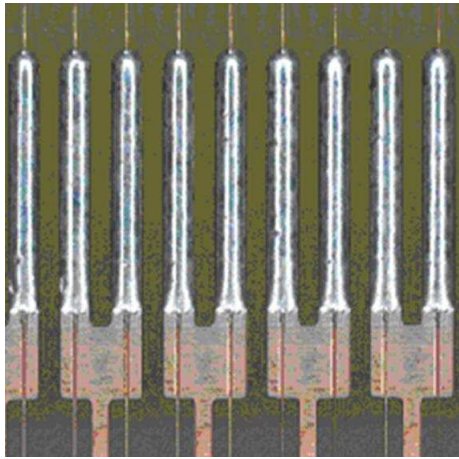


Figura 8: Detall de les soldadures dutes a terme amb el nou mètode

poc intensos, aquests impulsos són amplificats per uns preamplificadors de càrrega. Tot seguit, el senyal de cada preamplificador és recollit pel discriminador de fracció constant (CFD), que determina el temps d'arribada de cada impuls emprant un algoritme que disminueix l'efecte del soroll o l'amplitud de l'impuls. A continuació els senyals són enviats al convertidor temps-digital (TDC) que determina a partir dels senyals digitals del CFD la posició de l'esdeveniment i l'envia a la targeta d'histogramació.

Els preamplificadors són de disseny i construcció propis, ja que no se'n va trobar cap de comercial que satisfés els nostres requeriments. L'impuls de sortida té un temps de sortida menor a 10 ns, una relació senyal/soroll major que 20 dB i un guany major que 0,3  $\mu$ V per electró detectat. Les impedàncies d'entrada i sortida s'han adaptat a 50  $\Omega$  (la de cada element del sistema) per tal d'evitar reflexions als senyals.

La targeta d'histogramació (figura 9) ha estat dis-



Figura 9: Fotografia de la targeta d'histogramació

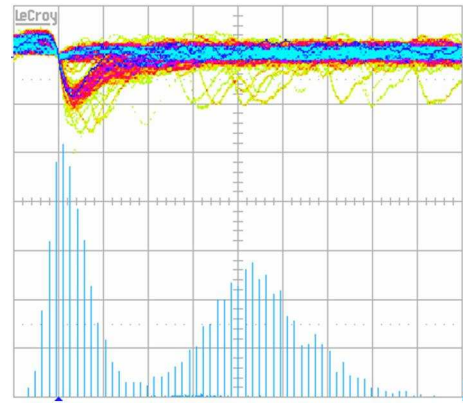


Figura 10: Senyal del preamplificador d'un càtode (part superior) i el seu espectre d'amplituds (histograma inferior). L'escala horitzontal/vertical del senyal és de 50 ns/50 mV

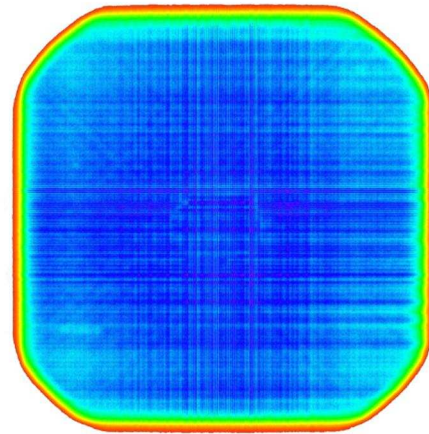


Figura 11: Imatge adquirida amb la font radioactiva  $\text{Fe}^{55}$  a una distància de 35 cm. Es pot observar una petita modulació (< 12%) dels fils en diferents tons de blau

senyada pel grup en col·laboració amb la Universitat Politècnica de València. La targeta construeix els histogrames i els emmagatzema en la memòria intermèdia (*buffer*) local per generar un màxim de 1024 imatges. La velocitat d'adquisició és de 5 MHz; d'aquí el seu nom *memòria d'histogramació 5 MHz (HM5)*. La targeta incorpora un generador de temps per a experiments dinàmics i pot començar l'adquisició, la durada de la qual és programable, o bé per una ordre de programa per part de l'usuari o bé a través d'un senyal extern. Les imatges generades tenen una dimensió de  $1024 \times 1024$  píxels, amb una profunditat de 32 bits. La targeta també permet la selecció d'una regió d'interès per tal d'histogramar només la zona desitjada.

## Resultats

Els primers tests es van dur a terme al laboratori de Barcelona amb una font radioactiva  $\text{Fe}^{55}$  que emet raigs X de 5,9 keV d'energia. En la figura 10 es mostra el senyal del preamplificador d'un extrem d'un càtode, així com el seu espectre d'amplituds adquirit per un analitzador multicanal (MCA). En l'espectre d'amplituds s'observa com el pic de senyal (dreta) està clarament separat del de soroll (esquerra). Aquest és un indicador del bon funcionament del detector, ja que permet ajustar els nivells d'adquisició de l'electrònica minimitzant l'adquisició del soroll.

La figura 11 és la imatge adquirida pel sistema d'adquisició amb la font radioactiva situada a 35 cm del detector.

La caracterització completa del detector s'ha de fer de manera exhaustiva a BM16, on es disposa de suficient intensitat i col·limació per estudiar la capacitat de comptatge i la resolució espacial del nostre MWPC. En la taula 2 presentem els resultats preliminars de les primeres proves dutes a terme en aquesta línia de llum. Cal remarcar que el màxim comptatge global està limitat per l'electrònica i el TDC és l'element limitant.

## Bibliografia

- CAMPANY J., El sincrotró de Barcelona, *Revista de Física*, **2(2)**, 14–21 (1997).
- GRUNER S.M., TATE M.W. I EIKENBERRY E.F., Charge-coupled device area x-ray detectors, *Review of Scientific Instruments*, **73(8)**, 2815-2892 (2002).
- FERNÁNDEZ F. ET AL, New micro-pattern gas detector based on a 2D position readout mesh, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, , (2007).
- FERNÁNDEZ F., RAMOS-LERATE I., KOCSIS M., MARTÍNEZ J.C., BELTRÁN D., BORDAS J. I TOLEDO J., Study and Optimization of Multiwire Proportional Chambers for Synchrotron Facilities, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, **53(2)**, 544-548 (2006).
- OPERA, *Vector Fields*, Inc. 1700 N. Farnsworth Ave., Aurora, IL 60505, (1998).
- VEENHOF I GARFIELD, *A drift-chamber simulation program*, CERN Program Library, entry W5050, (2001).
- MARTÍNEZ J., RAMOS-LERATE I., FERNÁNDEZ F., BELTRÁN D. I BORDAS J., Automatic Method to Manufacture 2D Multiwire Proportional Counter Frames, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, **Acceptat**, (2006).