

Implementación de un detector MCP en un simulador de imagen para misiones espaciales.

Seminario en el grupo de Investigación AEGORA
12/04/2018

Mauro González Otero
Correo UCM: maurgonz@ucm.es

Supervisado por: Pablo Marcos Arenal
Correo UCM: pablmarc@ucm.es

Máster en Astrofísica
Curso 2018/2019



Contenidos:

- 1) Introducción: WSO-UV
- 2) El MCP
- 3) El software
- 4) Centroiding



Introducción. WSO-UV. *"World Space Observatory for Ultra Violet"*

- Telescopio espacial (órbita geosíncrona, 51.6°).
- Primario de 170 cm.
- Misión de 5 años (+5).
- Imagen y espectroscopía UV (1150-3100 Å)
+ ampliación espectroscopía hasta el visible (~6000 Å)
- Espectrómetros de alta resolución:

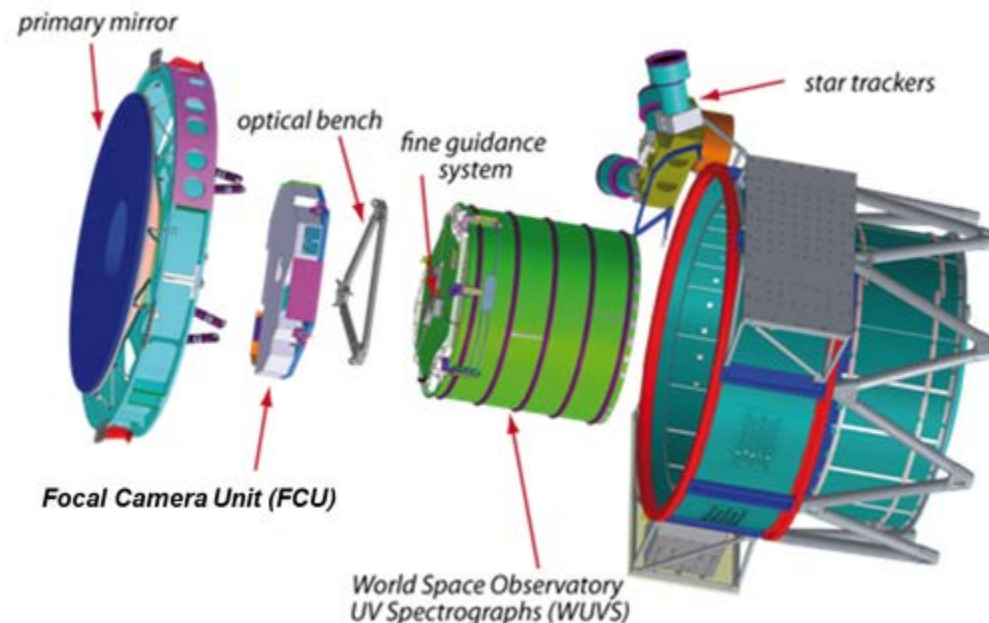
$$R = 55.000 \rightarrow R = \frac{\lambda}{\delta\lambda} \rightarrow \delta\lambda(\lambda = 3000\text{\AA}) \sim 0.06\text{\AA}$$

- Colaboración Ruso-Española. Aportación española: detector de la FCU, software y soporte para la ciencia.



Introducción. WSO-UV. *"World Space Observatory for Ultra Violet"*

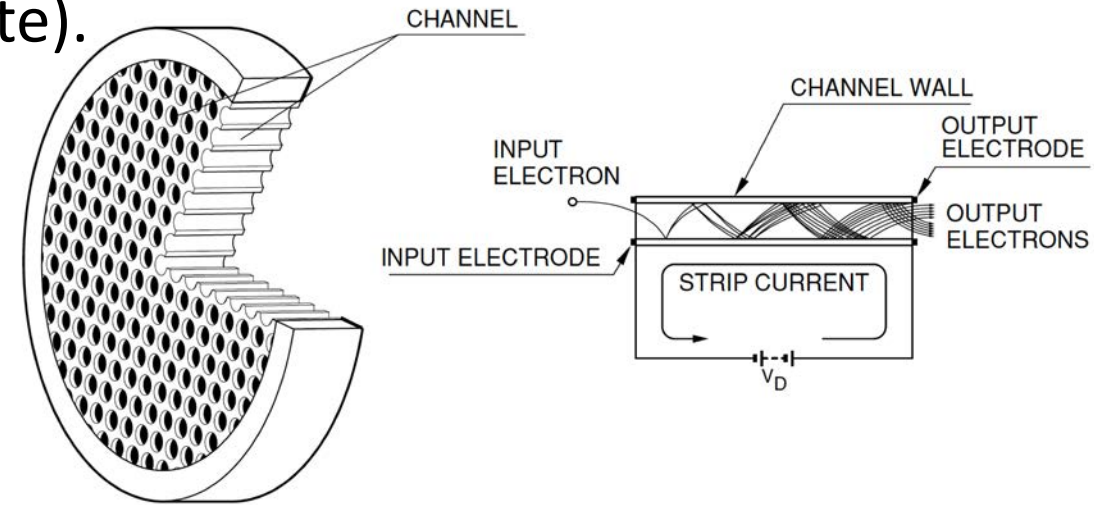
- Dentro del satélite tenemos 2 instrumentos principales:
 - WSO-UV Spectrographs (WUVS): espectroscopía de alta resolución y espectroscopía de rendija larga de baja resolución.
 - Field Camera Unit (FCU): obtención de imágenes en UV en Near UV (NUV) y Far UV (FUV).



Introducción. WSO-UV. *"World Space Observatory for Ultra Violet"*

Far Ultra Violet (FUV):

- Detector MCP (Micro Channel Plate).
- Diámetro poro.
- Diámetro Stack, material y L.
- Lectura en CMOS.



Objetivo:

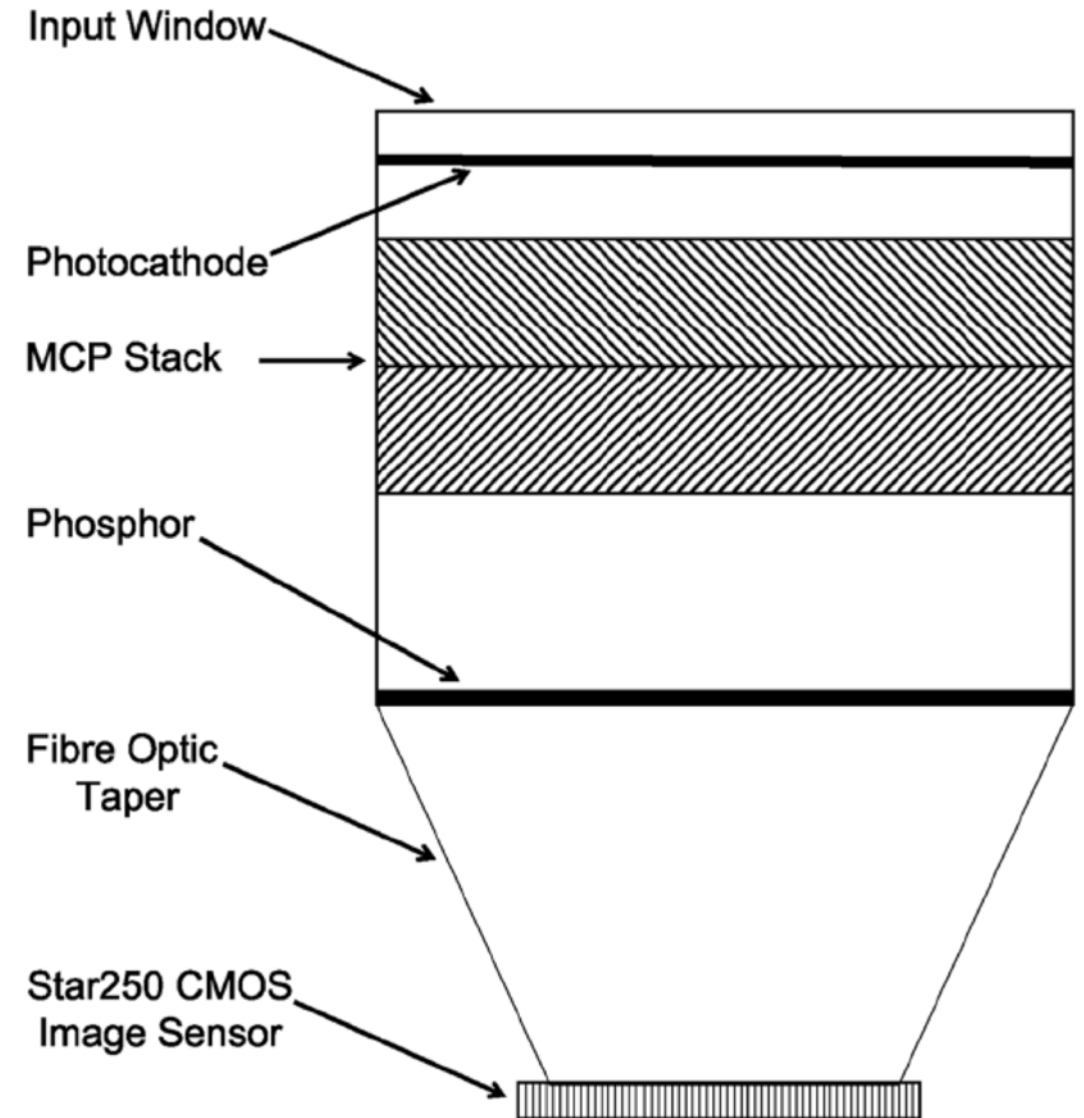
- Implementación del código necesario para la simulación de este MCP en la cámara de FUV que se implementará en el simulador del WSO-UV.

El MCP. *"Micro Channel Plate"*

Estructura:

- Ventana de entrada
- Fotocátodo
- MCP stack
- Foto ánodo
- Fibras ópticas

+
CMOS



El MCP. *"Micro Channel Plate"*

Funcionamiento:

- Ventana de entrada: filtrado.

- Fotocátodo:

$$\gamma \rightarrow e^{-}$$

- MCP stack:

$$1 e^{-} \rightarrow N e^{-}$$

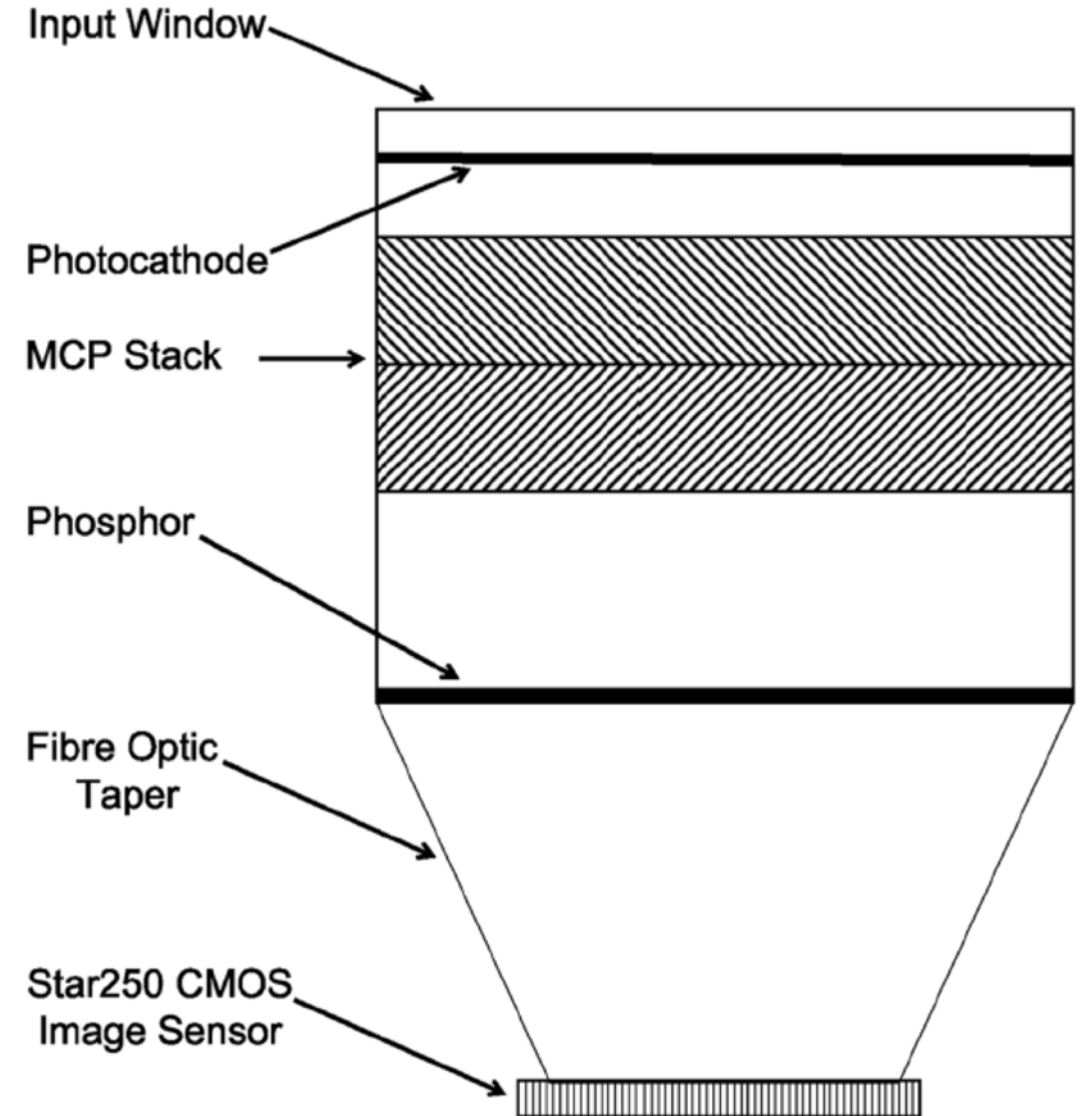
- Foto ánodo:

$$e^{-} \rightarrow \gamma$$

- Fibras ópticas

+

CMOS



El MCP. "Micro Channel Plate"

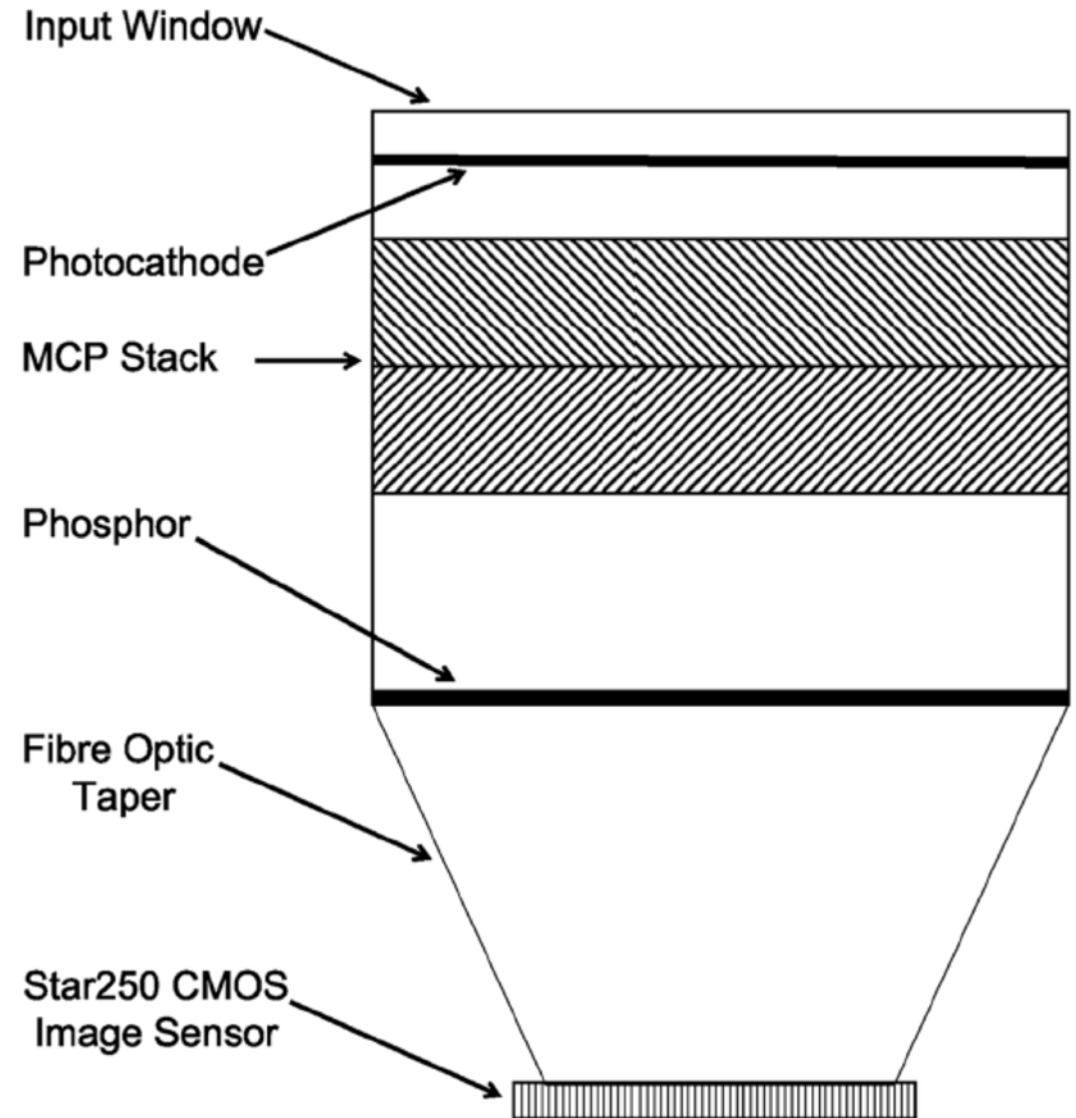
Por partes:

- Ventana de entrada: filtrado.
 - Se regula con diferentes materiales la transmisión y reflectividad para filtrar en longitud de onda.
(T, R \rightarrow (1-T), Q.E)
- Fotocátodo: $\gamma \rightarrow e^-$.
 - Paso de fotones en el UV a fotoelectrones (efecto fotoeléctrico).

$$\eta(\nu) = (1 - R) \frac{P_\nu}{k} \left(\frac{1}{1 + \frac{1}{kL}} \right) P_S \sim cte$$

R=reflexión; k=coef. absorción; P_ν = prob. Excitar electrón;

L=recorrido libre medio; P_S =prob de escapar del fotón



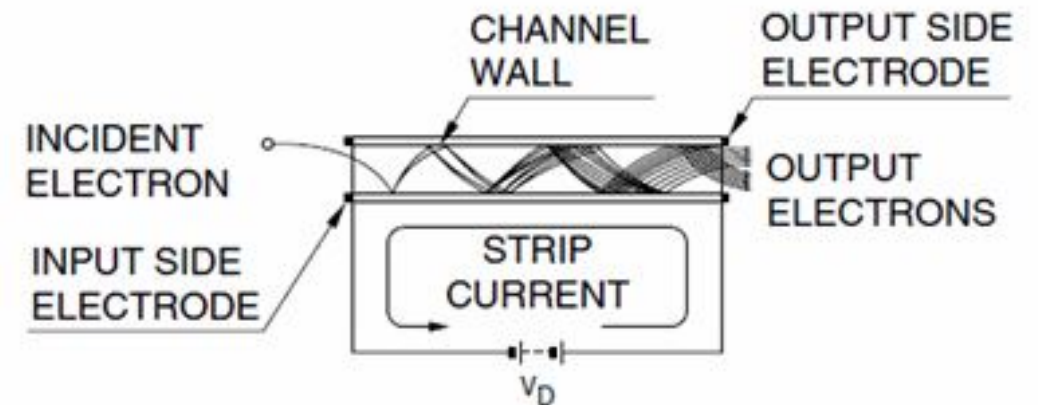
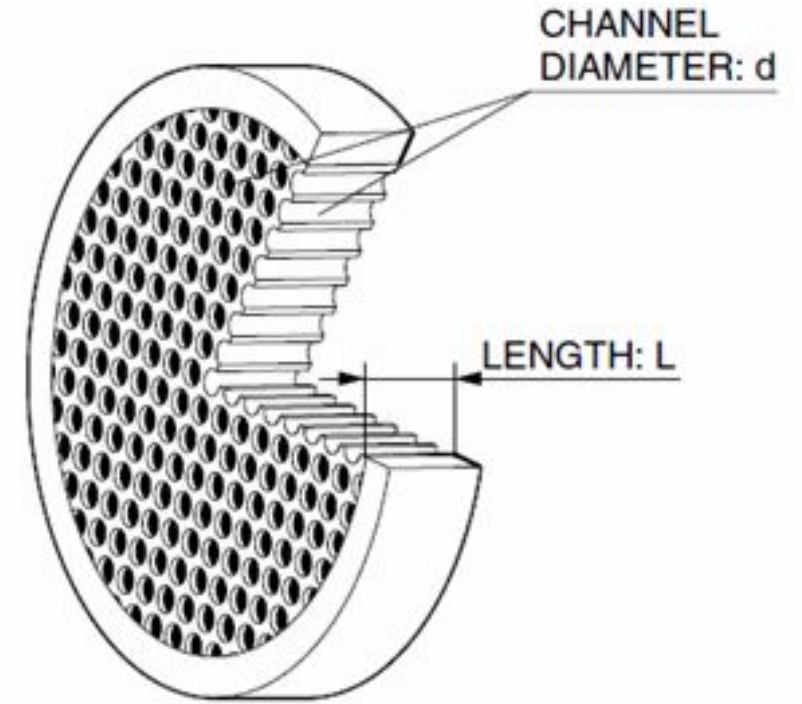
El MCP. "Micro Channel Plate"

Por partes:

- MCP stack: $1 e^- \rightarrow N e^-$
 - Paso de fotoelectrones a una cascada de electrones.
 - Los fotoelectrones penetran el MCP por los canales. Ahí son acelerados por una diferencia de potencial haciéndolos chocar con las paredes del Stack.
 - Estos choques producen una emisión secundaria de electrones dando lugar a una cascada a la salida del Stack.

$$\frac{\sigma}{\sigma_m} = \exp\left(-\frac{\left(\ln\left(\frac{E_p}{E_m}\right)\right)^2}{2\sigma^2}\right)$$

σ_m =valor máximo del haz secundario; E_m =energía del máximo;



EI MCP. "Micro Channel Plate"

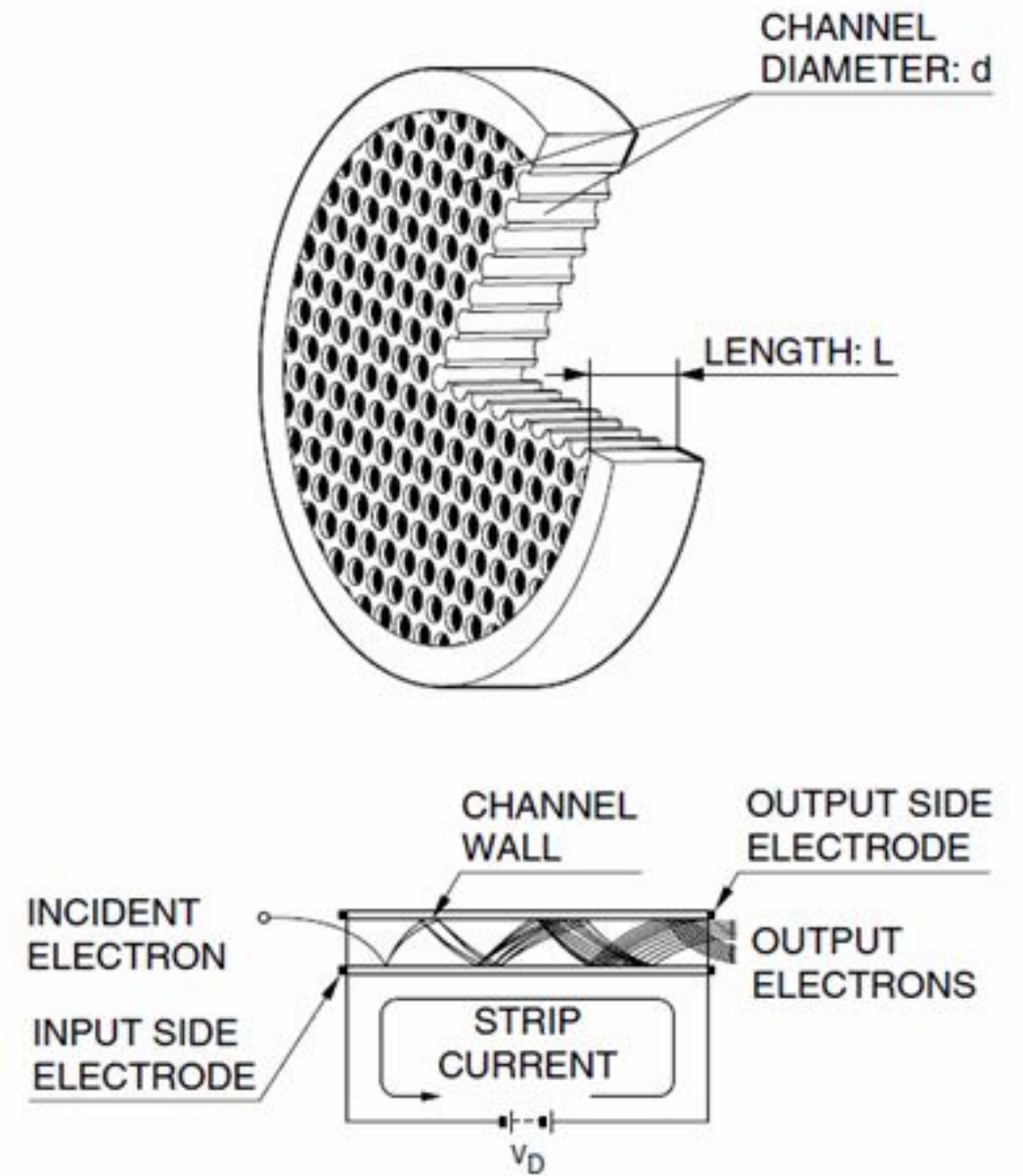
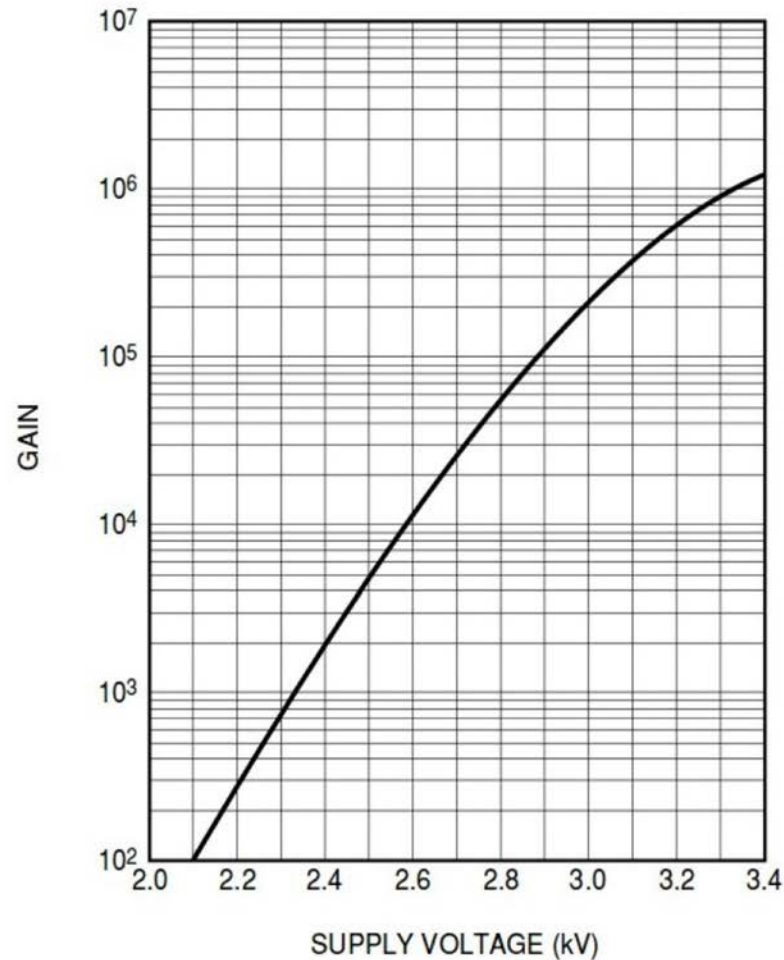


Fig. 8. Typical gain obtained from a MCP-PMT, using a two-stage MCP (Chevron configuration) with $6\mu m$ of channel diameter from Hamamatsu [3].

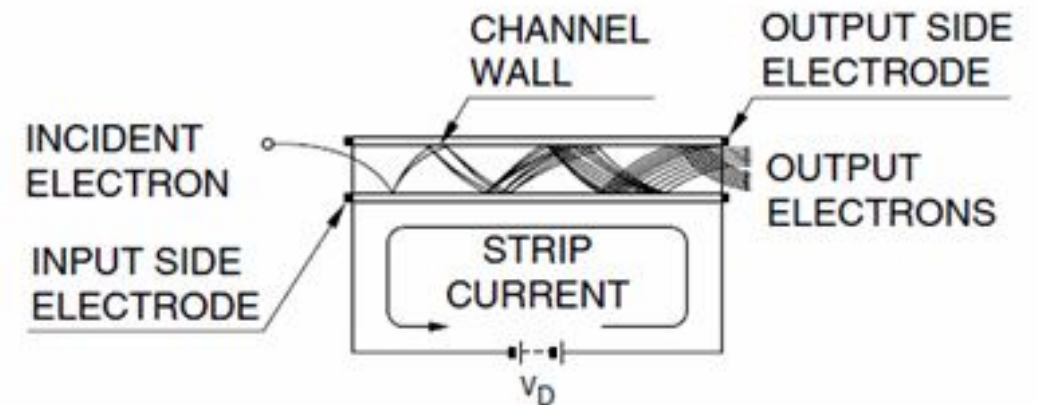
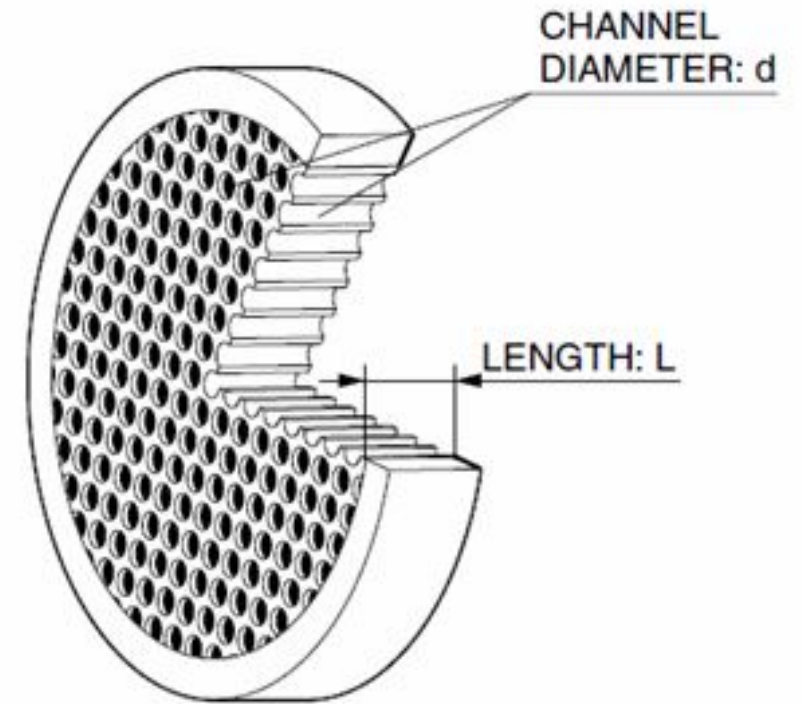
El MCP. "Micro Channel Plate"

Por partes:

- MCP stack: $1 e^- \rightarrow \sim 20 e^-$
 - Paso de fotoelectrones a una cascada de electrones.
 - Los fotoelectrones penetran el MCP por los canales. Ahí son acelerados por una diferencia de potencial haciéndolos chocar con las paredes del Stack.
 - Estos choques producen una emisión secundaria de electrones dando lugar a una cascada a la salida del Stack.

$$\frac{\sigma}{\sigma_m} = \exp\left(-\frac{\left(\ln\left(\frac{E_p}{E_m}\right)\right)^2}{2\sigma^2}\right)$$

σ_m =valor máximo del haz secundario; E_m =energía del máximo;



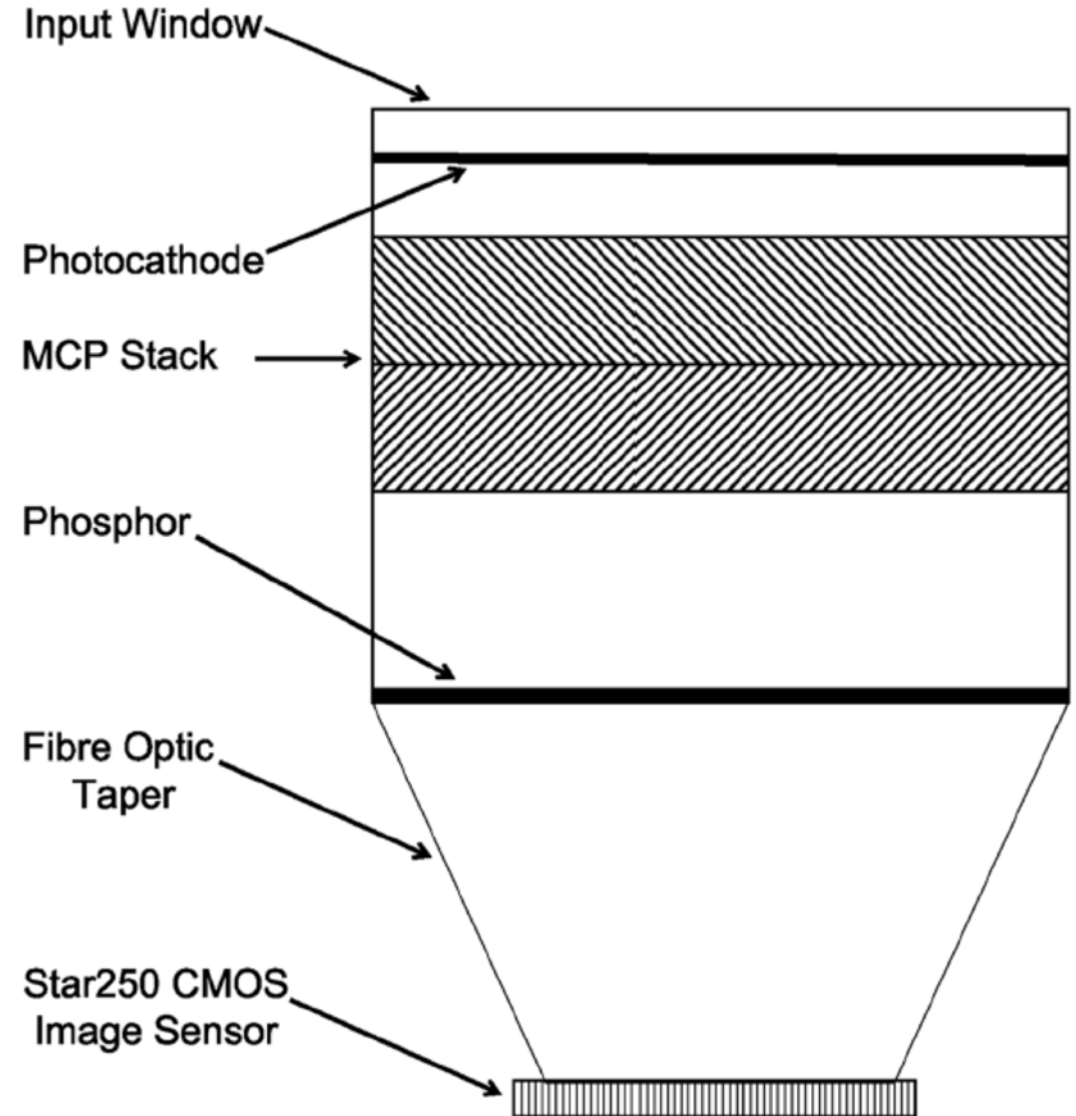
El MCP. *"Micro Channel Plate"*

Por partes:

- Foto ánodo: $e^- \rightarrow \gamma$
 - Salida del Stack \rightarrow distribución de Poisson de electrones.
 - Salida del foto ánodo \rightarrow distribución de Poisson de fotones.
- Fibras ópticas
- Detector CMOS.

Dos modos de trabajo:

- Acumulación.
- Time Tag

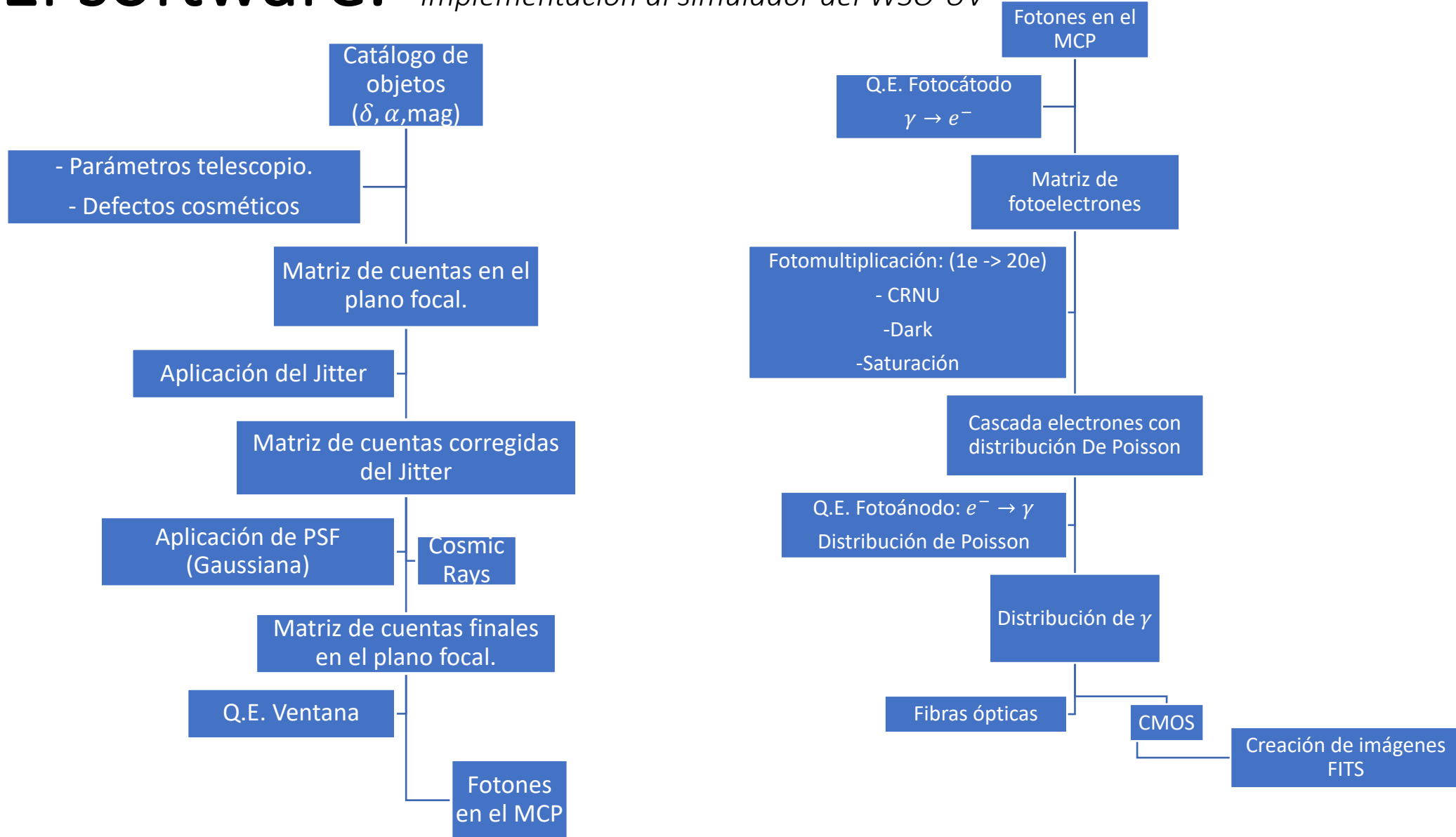




M31 por el por el satélite Swift en UV:

https://www.nasa.gov/mission_pages/swift/bursts/uv_andromeda.html

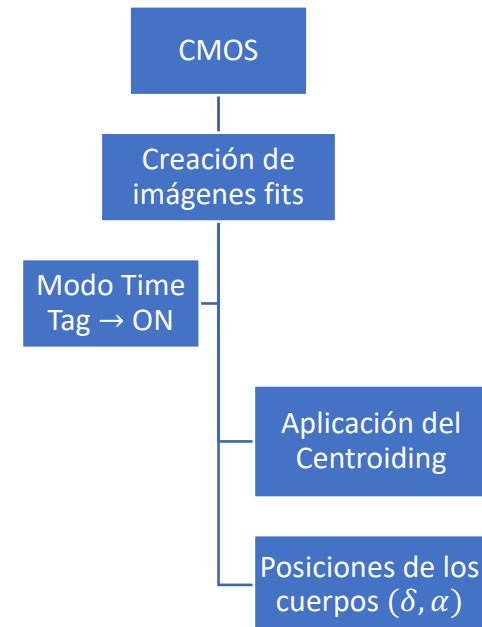
El software. *"Implementación al simulador del WSO-UV"*



El centroiding. *"Estudio de la posición de los cuerpos"*

Dos modos de trabajo:

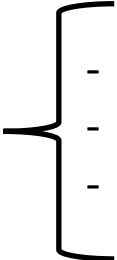
- Modo acumulación:
 - Toma de imágenes con tiempos de exposición largos.
 - Modo común de operación.
- Modo Time Tag:
 - Tiempos de exposición muy cortos.
 - Se genera una tabla en la que se dan la posición y la fecha-tiempo de los eventos detectados.
 - Se utiliza un algoritmo de centroiding para el cálculo del centro de los eventos detectados y de esto podemos obtener la posición de la fuente en el cielo.

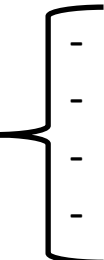


El centroiding. *"Estudio de los diferentes algoritmos"*

Diferentes tipos de algoritmos:

2 tipos principales:

- Algoritmos de centro de gravedad. 
 - 3-cross
 - 3-square
 - 5-square

- Ajuste a funciones analíticas. 
 - Gaussiana
 - Parábola
 - Lorentziana
 - Hiperbólica

El centroiding. *"Estudio de los diferentes algoritmos"*

- 3-cross
- 3-square
- 5-square

Algoritmos de centro de gravedad:

- Estos algoritmos escanean todos los pixels y los comparan con sus alrededores.
- La definición de alrededores depende del tipo de algoritmo.
- Proceso de detección:
 1. Búsqueda de candidatos.
 2. Se establece un límite de energía para evitar falsos positivos tanto en la energía del pixel central como de la suma total de los pixels usados en el algoritmo.
- Dos pixels adyacentes con el mismo número de cuentas pueden no ser considerados como evento (0.6%)
- Permite tomar el background como el mínimo de las cuatro esquinas.
- Permite solucionar el problema del evento con dos fotones.
- Todos tienen partes positivas y negativas.

El centroiding. *"Estudio de los diferentes algoritmos"*

- 3-cross
- 3-square
- 5-square

Algoritmos de centro de gravedad:

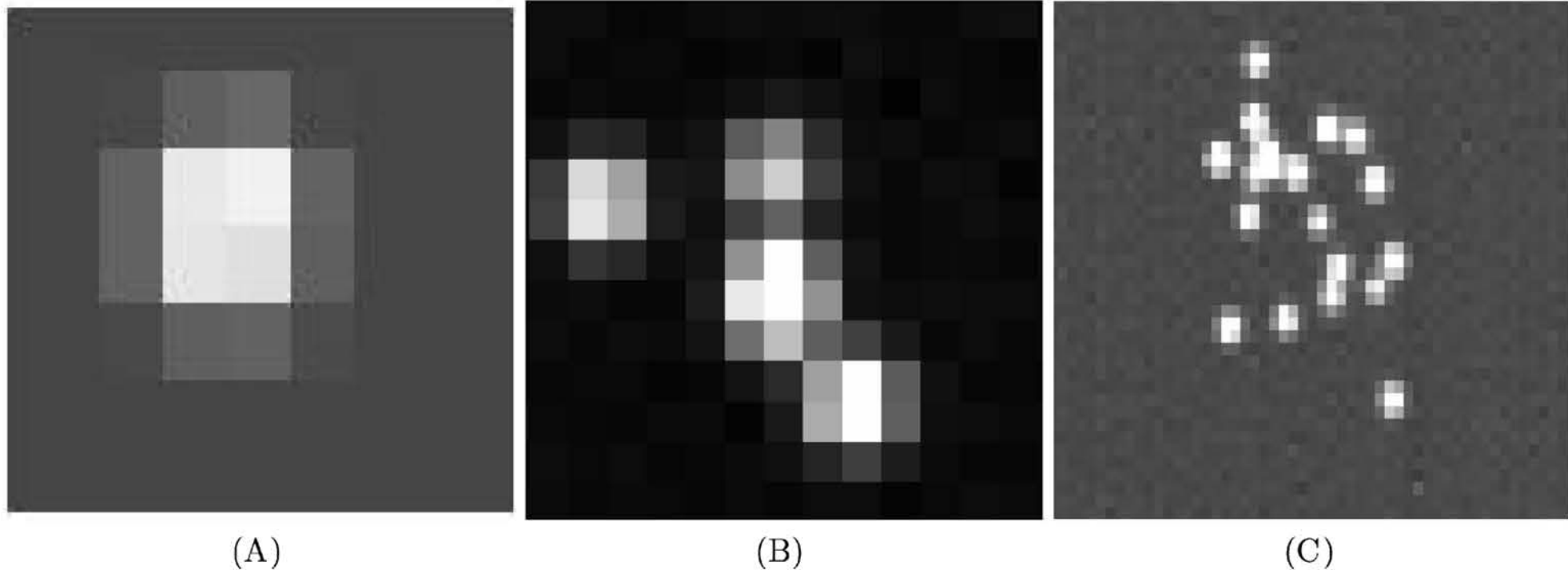


FIG. 4.—Simulated photon-event footprints on CMOS detector. (A) A single photon event; (B) configuration of few overlapping photon events; (C) section of simulated UVIT data frame corresponding to a sky region of high count rate. The overlapping photon events would lead to incorrect determination of the event centroids and possibly the incorrect number of detected events in a frame. Each pixel in these images corresponds to 3×3 arcsec² on the sky.

El centroiding. *"Estudio de los diferentes algoritmos"*

- 3-cross
- 3-square
- 5-square

Algoritmos de centro de gravedad: (otros problemas)

- Rejilla:

- Aparición de un patrón con forma rejilla.
 - Debido al corte de las alas de los eventos por los algoritmos. Menor medida en el 5-square.
- Corrección: flats fields.

El centroiding. *"Estudio de los diferentes algoritmos"*

- 3-cross
- 3-square
- 5-square

Algoritmos de centro de gravedad: (otros problemas)

- Bias y errores aleatorios:

- La precisión del centroid dependerá de la posición en la que caiga el fotón en el CMOS.
- Corrección: simulaciones.

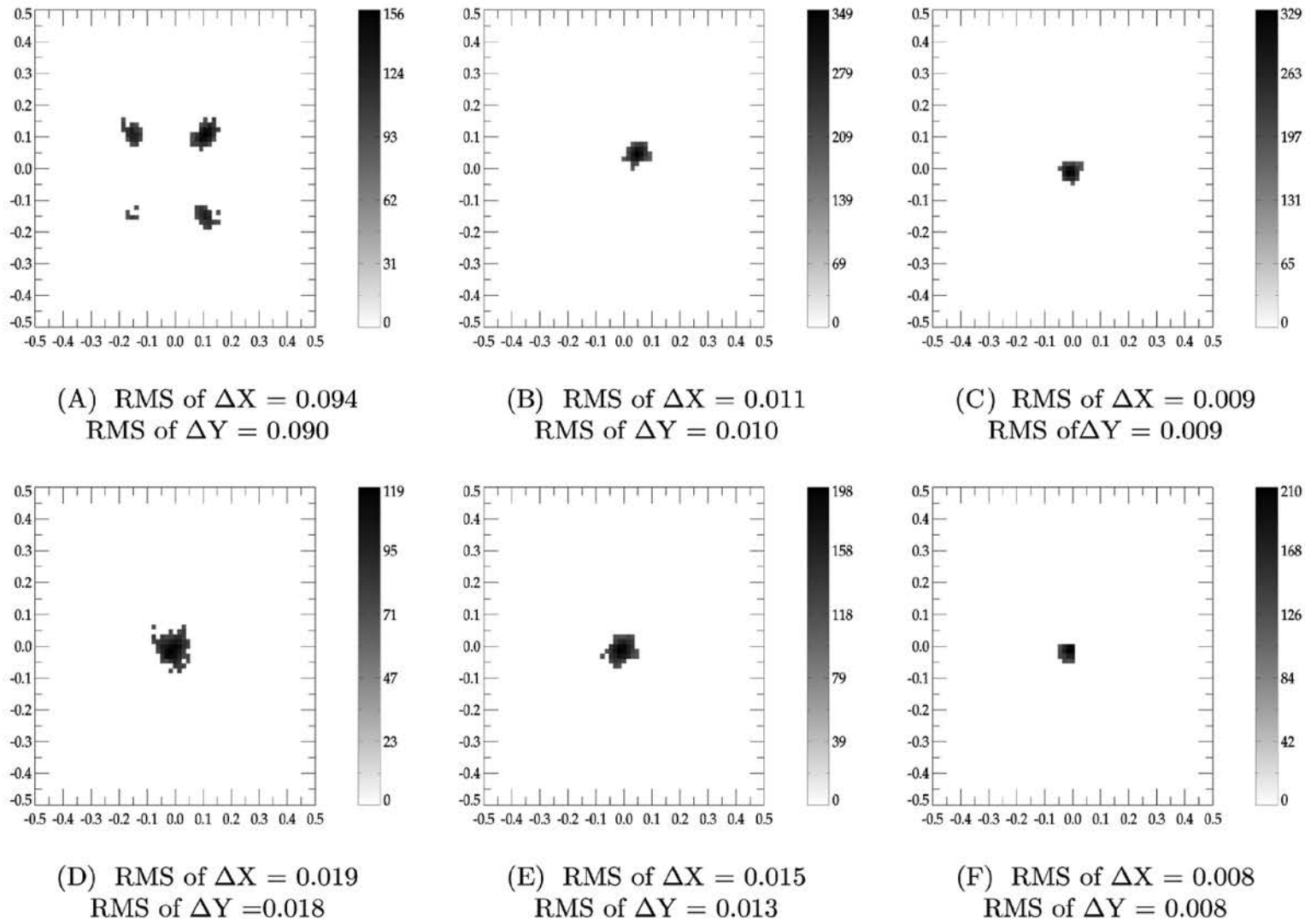


FIG. 5.—Error maps for the 3-square algorithm representing the face of the CMOS pixel with center as the original position of the incoming photon. A data point in these maps corresponds to the detected position of the photon with respect to original one. *Upper panel* (A, B, C) shows the uncorrected data with systematic bias (in form of a modulation pattern); *lower panel* (D, E, F) corresponds to the data corrected to remove systematic bias. Plots at left (A, D) represent the case when photon is falling at a corner of the CMOS pixel; central plots (B, E) correspond to the case when photon is falling between the center and corner of the pixel (along the diagonal line); plots at right (C, F) represent the case when photon is falling at the center of the pixel. The rms values of the scatter are given along with the plots for each of the axes, in units of CMOS pixel. The CMOS pixel corresponds to $3 \times 3 \text{ arcsec}^2$ on the sky. (The threshold on central pixel energy used = 150 DU; the threshold on total event energy used = 450 DU).

El centroiding. *"Estudio de los diferentes algoritmos"*

- Gaussiana
- Parábola
- Lorentziana
- Hiperbólica

Ajustes a funciones analíticas:

- Sólo utiliza el valor de los pixels y no sus diferencias.
- Sencillos conceptualmente.
- Más precisión a la hora de conseguir el Centroiding.
- Implementación más complicada.
- Debes conocer la distribución de datos para poder aplicar la función correcta.

El centroiding. *"Estudio de los diferentes algoritmos"*

- Gaussiana
- Parábola
- Lorentziana
- Hiperbolica

Ajustes a funciones analíticas (ejemplos)

A Gaussian [1]:

$$f(x) = \alpha e^{-(x-x_0)^2/\beta^2}. \quad (1)$$

A parabola [1]:

$$f(x) = \alpha + \beta(x - x_0)^2. \quad (2)$$

A Lorentzian [17]:

$$f(x) = \frac{\alpha}{\beta + (x - x_0)^2}. \quad (3)$$

A hyperbolic cosine [18]:

$$f(x) = \frac{\alpha}{\cosh^2((x - x_0)/\beta)} = \frac{4\alpha}{(e^{(x-x_0)/\beta} + e^{-(x-x_0)/\beta})^2} \quad (4)$$

Algorithm	Formula
3-point centre of gravity	$\bar{x}_{\text{cog3}} = \frac{c - a}{a + b + c}$
5-point centre of gravity	$\bar{x}_{\text{cog5}} = \frac{2e + d - b - 2a}{a + b + c + d + e}$
7-point centre of gravity	$\bar{x}_{\text{cog7}} = \frac{3g + 2f + e - c - 2b - 3a}{a + b + c + d + e + f + g}$
Gaussian	$\bar{x}_{\text{Gau}} = \frac{\ln c/a}{2 \ln b^2/ac} = \frac{\ln c - \ln a}{2(2 \ln b - \ln a - \ln c)}$
Lorentzian	$\bar{x}_{\text{Lor}} = \frac{c - a}{2(c + a - 2ac/b)}$
Parabola	$\bar{x}_{\text{para}} = \frac{c - a}{2(2b - a - c)}$
Hyperbolic cosine	$\bar{x}_{\text{cosh}} = \frac{\ln \left(\frac{2\sqrt{\frac{b}{a}} + \sqrt{\left(\sqrt{\frac{b}{a}} + \sqrt{\frac{b}{c}}\right)^2 - 4}}{2\sqrt{\frac{b}{c}} + \sqrt{\left(\sqrt{\frac{b}{a}} + \sqrt{\frac{b}{c}}\right)^2 - 4}} \right)}{2 \ln \left(\frac{1}{2} \left(\sqrt{\frac{b}{a}} + \sqrt{\frac{b}{c}} + \sqrt{\left(\sqrt{\frac{b}{a}} + \sqrt{\frac{b}{c}}\right)^2 - 4} \right) \right)}$

Table 2
Summary of centroiding algorithm features and results obtained

Algorithm	Fixed pattern noise in %	DQE	Resolution	\bar{x} at pixel boundary	Windowing error
3-point centre of gravity	266 ^a	Not affected	Poor	Depends on pulse height	Yes
5-point centre of gravity	98.6 ^a	Not affected	Poor	Depends on pulse height	Yes
7-point centre of gravity	83.8 ^a , 57.1 ^b	Not affected	Poor	Depends on pulse height	Yes
Hyperbolic Cosine	15.2 ^b	Reduced	Good	Depends on pulse height	No
Gaussian	16.4 ^b	Reduced	Good	$-\frac{1}{2}$ or $+\frac{1}{2}$	No
Lorentzian	131 ^b	Not affected	Poor	$-\frac{1}{2}$ or $+\frac{1}{2}$	No
Parabola	109 ^b	Not affected	Poor	$-\frac{1}{2}$ or $+\frac{1}{2}$	No
Gaussian/parabolic	17.8 ^b	Not affected	Good	$-\frac{1}{2}$ or $+\frac{1}{2}$	No
Gaussian/3-point c. of g.	9.99 ^b	Not affected	Good	$-\frac{1}{2}$ or $+\frac{1}{2}$	No
97% Gaussian/3-point c. of g., 3% Lorentzian	12.4 ^b	Not affected	Good	$-\frac{1}{2}$ or $+\frac{1}{2}$	No
95% Gaussian/3-point c. of g., 5% Lorentzian	10.8 ^b	Not affected	Good	$-\frac{1}{2}$ or $+\frac{1}{2}$	No

^aFlat field measurement.

^bBaum test pattern measurement. The reduced DQE is due to a centroiding failure for small pulses. A poor resolution means that the thin end of the resolution wedge of the Baum test pattern, as shown in Figs. 7(a)–13(a), is dominated by fixed pattern noise. There is no windowing error for the algorithms based on analytic functions, any three pixels determine the centroid.

El centroiding. *"Estudio de los diferentes algoritmos"*

Ajustes a funciones analíticas (errores)

- Gaussiana
- Parábola
- Lorentziana
- Hiperbolica

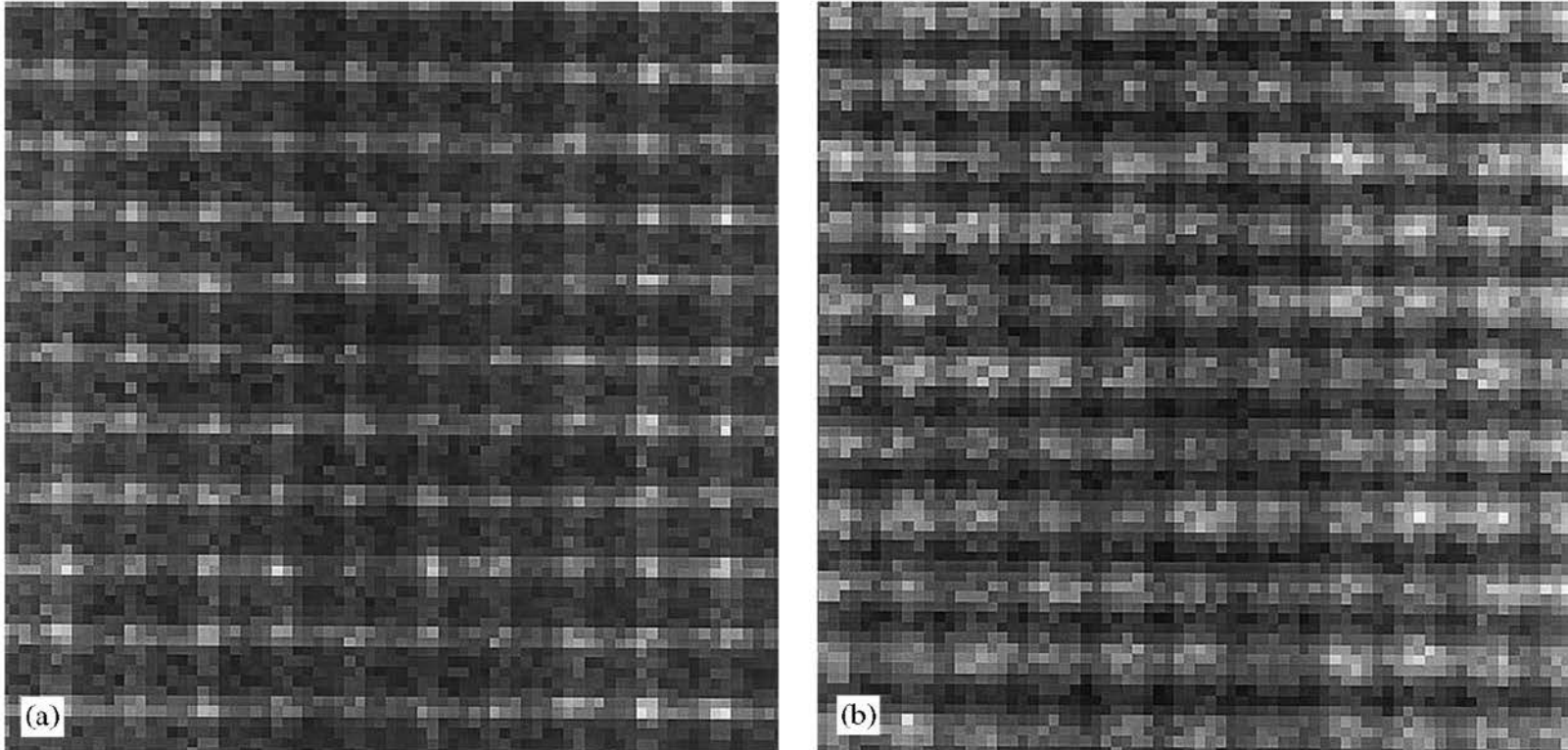


Fig. 1. The result of applying different centroiding algorithms to a flat field. A light grid (a) and a dark grid (b) of the same dimensions as the CCD pixels is superimposed on the flat field. This effect is caused by a mismatch between the event shape and the centroiding algorithm. The light grid (a) occurs when using a Lorentzian centroiding algorithm, and the dark grid (b) when using a parabolic centroiding algorithm. Both images were derived from the same set of photon events showing that the fixed pattern noise is generated by the centroiding procedure.

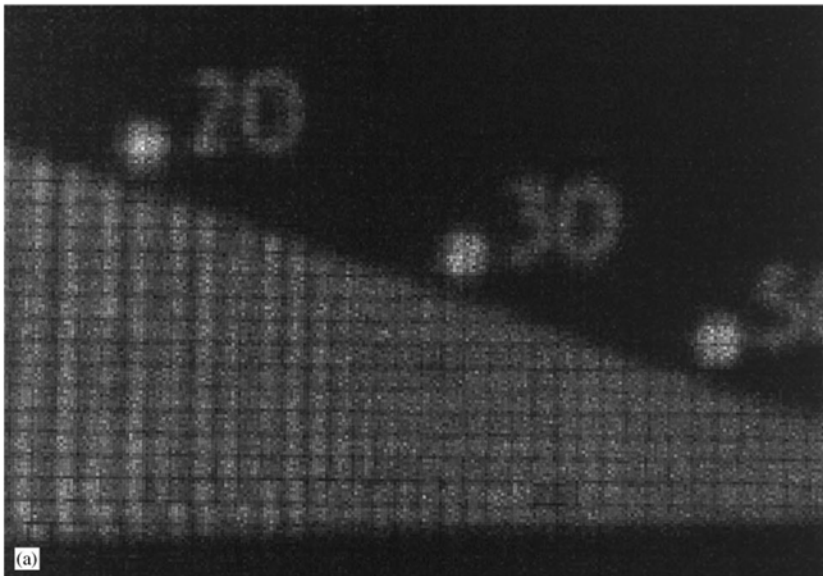
El centroiding. *"Estudio de los diferentes algoritmos"*

Ajustes a funciones analíticas: híbridos.

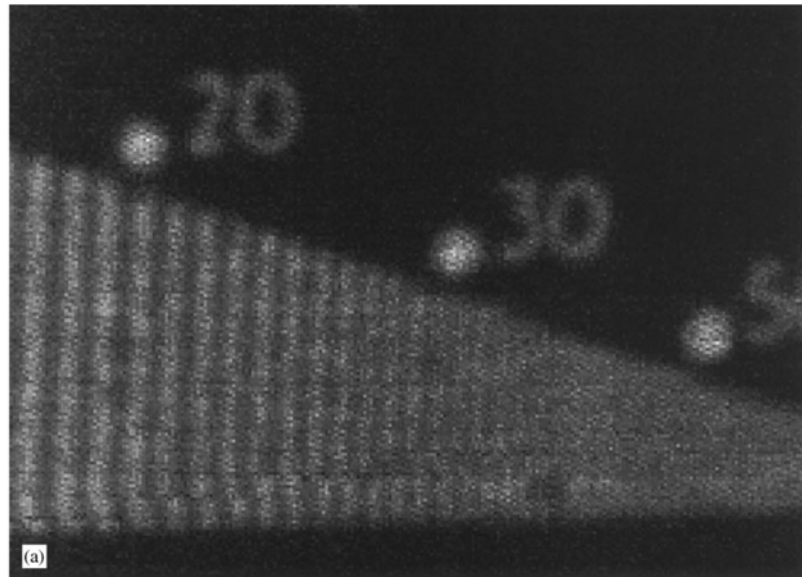
-Por lo general:

Función analítica + algoritmo centro de gravedad

- El conjunto de Gaussiana + 3-point: minimiza el error de grid y maximiza DQE.



7-point centre of gravity centroiding



Gaussian centroiding

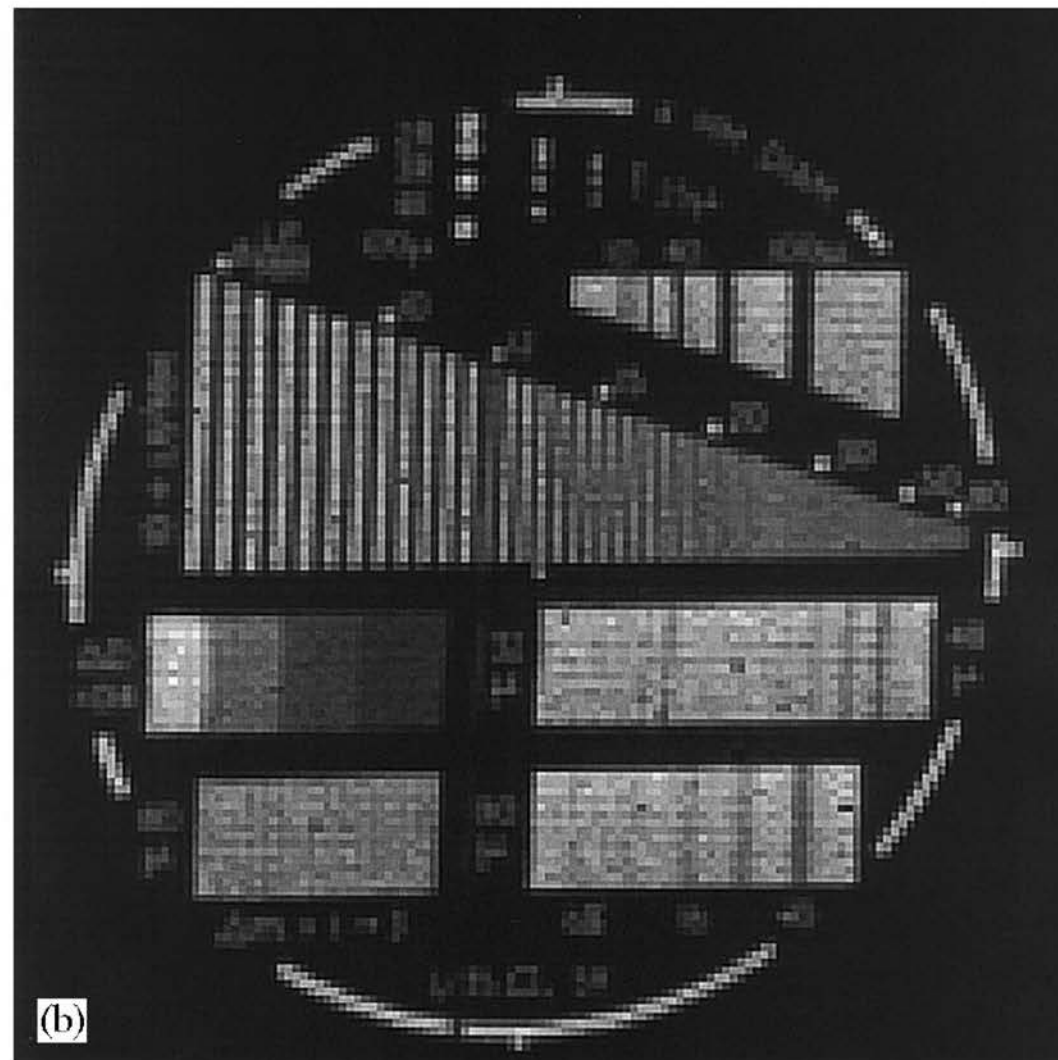
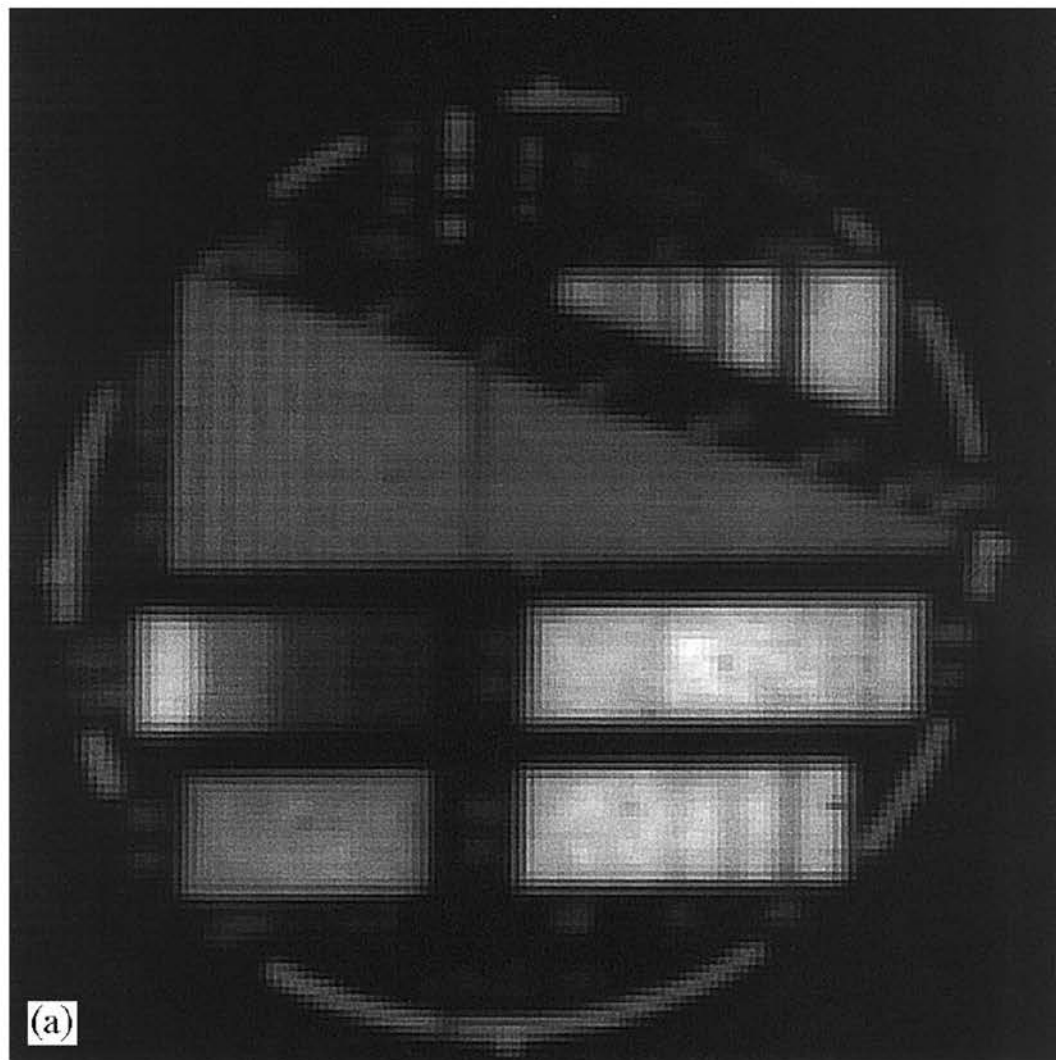


Fig. 6. Uncentroided images of the Baum test pattern. (a) The sum of all unprocessed frames. (b) The sum of all event peak positions. The resolution in (a) is limited by the event size, in (b) by the CCD pixel size.

El centroiding. *"Estudio de los diferentes algoritmos"*

Aplicación a nuestro caso.

- Nuestra distribución es de tipo Poisson.
- A la vista de todos estos modelos, debemos buscar el que mejor se ajuste a nuestras necesidades.

Bibliografía centroiding:

- Mudit K. Srivasta et. al: Studying the Imaging Characteristics of Ultra Violet Imaging Telescope (UVIT) through Numerical Simulations.
- Klaus Suhling et. al: Optimisation of centroiding algorithms for photon event counting imaging.
- Robert Suszynski et. Al: Stars' Centroid Determination Using PSF-Fitting Method
- C. Fosu et. Al: Determination of centroid of CCD star images.