

EL MEPSICRON Y EL AVANCE EN LA DETECCION DE IMAGENES CON ALTA RESOLUCION

Claudio Firmani

Instituto de Astronomía, UNAM
Apartado Postal 70-264. 04510 - México, D.F.

RESUMEN

Investigaciones recientes han llevado a la realización de un nuevo sistema de detección de imagen de muy alta calidad: el MEPSICRON. Se describen las características principales de este detector y se hace un análisis comparativo con el IPCS y el CCD. Se muestran los primeros resultados obtenidos mediante la aplicación del MEPSICRON a la observación astronómica y a la microscopía electrónica y se mencionan brevemente las perspectivas a futuro.

ABSTRACT

Recent researches make possible the realization of a new high performance image detection system: the MEPSICRON. Its main characteristics are described and one comparison analysis with the IPCS

and the CCD is shown. Some preliminary results obtained with the MEPSICRON in astronomy and electronic microscopy are shown and few aspects related with future development are discussed.

INTRODUCCION

Los detectores de imágenes para fotones, partículas atómicas y nucleares, han adquirido en las últimas dos décadas un creciente interés y su desarrollo ha estado relacionado al amplio espectro de aplicaciones que tienen en áreas de primera importancia de la ciencia y de la tecnología. El propósito de estas investigaciones consiste en crear nuevos instrumentos que superen las emulsiones fotográficas y las cámaras televisivas en cuanto a capacidad de detectar muy bajos niveles de iluminación y simplificar el procesamiento de la información contenida en las imágenes. Estos objetivos conducen a nuevos diseños de los detectores de imágenes en que se desarrollan al máximo las características siguientes: alta sensibilidad, alto poder de resolución y gran capacidad de transmisión y manejo de datos.

Muchos campos que van desde actividades industriales hasta investigaciones en ciencias básicas han resultado beneficiados por el desarrollo de esta tecnología. La medicina, la bioquímica, la física atómica y nuclear, la astronomía, la tecnología de materiales y la prospección remota, están recibiendo impulsos considerables del desarrollo de los detectores de imagen. En la medida en que la microscopía electrónica y las técnicas de análisis químico y nuclear puedan usar detectores de imagen cada vez más sensibles, la medicina, la producción y el control de alimentos y el estudio de nuevas especies agrícolas encontrarán nuevos sistemas de análisis que pueden llevar a importantes desarrollos en el futuro próximo. El costo elevado de estos sistemas modernos de detección, relacionado a los financiamientos importantes destinados a estas investigaciones en los países altamente industrializados, hace que la aplicación de esta tecnología resulte inaccesible para la gran mayoría de los campos en los cuales se podría introducir un adelanto.

Desde finales de 1980 se ha venido desarrollando en el Instituto de Astronomía de la UNAM una intensa actividad de investigación en el campo de los detectores de imagen con el objetivo de experimentar técnicas

nuevas capaces de obtener mejores características de detección a menores costos. Este proyecto ha recibido el nombre de MEPSICRON (Microcanal Electrón Posición Sensor con Resolución Temporal) y ha obtenido hasta la fecha un gran reconocimiento, no solamente en el campo de la astronomía, sino de la medicina, bioquímica, física e industria espacial entre otros.

CONSIDERACIONES GENERALES Y CARACTERISTICAS DE LOS DETECTORES MODERNOS

La generación futura de detectores tendrá que cumplir, en términos generales, con los siguientes requisitos:

- Una elevada eficiencia cuántica.
- Cada partícula detectada tendrá que contribuir con igual peso estadístico.
- El ruido tiene que ser reducido a nivel del ruido de disparo cuántico.
- El número de elementos de resolución tiene que ser mayor que 1000×1000 sobre un área sensible cuya dimensión sea mayor de 25 mm.
- El intervalo dinámico tiene que ser mayor de 10^4
- La linealidad tiene que estar limitada a un nivel del 10% para una tasa de 10^5 conteos/segundo sobre toda la superficie sensible. Esta propiedad tiene que ser independiente de la distribución espacial del flujo y la función de saturación tiene que ser la más sencilla posible para facilitar una corrección sobre la linealidad que resulte mejor del 1%.
- La resolución temporal del detector tiene que ser mejor que 1ms para permitir un análisis de transitorios rápidos.
- El detector tiene que ser suficientemente estable para permitir la sobreposición y suma de imágenes observadas en intervalos de tiempo de horas o días, sin pérdida de resolución.

La realización de un detector que, aunque parcialmente, cumpla con estos requisitos, representaría un enorme avance. Con el objetivo de definir un marco de referencia, se hará un breve análisis de los sistemas de detección, que a la luz de los requisitos anteriores, puedan conside-

rarse, hasta la fecha, como los más perfeccionados. Estos son el IPCS y el CCD, ampliamente reconocidos como los más poderosos de la instrumentación actual. Posteriormente se describirá el MEPSICRON que representa el avance más reciente de acuerdo con las consideraciones generales planteadas anteriormente.

El IPCS (Imaging Photon Counting System)

El IPCS es un detector contador de fotones basado sobre una tecnología televisiva altamente sofisticada. Su uso ha permitido un avance muy importante en la investigación astronómica extragaláctica y principalmente ha sido empleado para las observaciones de objetos muy débiles a escala cosmológica (cuasares, núcleos activos de galaxias, entre otros). El IPCS es un detector bidimensional con aproximadamente 1 millón de elementos de resolución y mediante un régimen de conteo de fotones elimina todas las fuentes de ruido después del fotocátodo. Su principal limitación se debe a la tasa de conteo extremadamente baja cuando la imagen detectada es puntual, hecho que está relacionado con el tipo de lectura secuencial del barrido televisivo. Esta limitante reduce notablemente el tipo de problemas que pueden ser tratados con este sistema. El barrido televisivo de lectura introduce además una incertidumbre sobre el tiempo de llegada de cada fotón, valores menores de 100 ms son difíciles de obtener. Con base en estos argumentos, sólo marginalmente puede compararse el IPCS a una matriz de fotomultiplicadores, primero porque la tasa máxima de conteo por fotomultiplicador sería aproximadamente de 1 conteo/segundo, y luego porque el número de conteos de cada fotomultiplicador depende de manera crítica del número de conteos de los fotomultiplicadores cercanos. Estos problemas, aparte de limitar las aplicaciones del detector, influyen también sobre la complejidad del esquema de reducción de los datos.

El CCD (Charged Coupled Device)

El CCD es la más reciente contribución en el área de los detectores optoelectrónicos. Sus principales ventajas son la sencillez, la estabilidad y la alta eficiencia cuántica. El problema principal en el CCD es la limitación que presenta en la detección de flujos de radiación muy

débiles, limitación relacionada con el ruido de lectura, que puede ser igual o mayor de 20 electrones rms por elemento de resolución. En estas circunstancias los fotocátodos, en el régimen de conteo de fotones, ofrecen una clara ventaja. Hay que mencionar también que mientras en el rojo el CCD presenta una mayor sensibilidad, en el azul y en el UV los fotocátodos son muy competitivos. Esta situación puede cambiar en el futuro con el desarrollo de fotocátodos de mayor eficiencia, como el de GaAs, que podría competir en el rojo con el CCD.

Debido a que el CCD no trabaja en el régimen de conteo de fotones, es necesario usar tiempos de exposición relativamente largos antes de la lectura para obtener elevadas razones señal/ruido. Esta es una limitación de principio para su uso en aplicaciones que requieren una alta resolución temporal. Otra limitante deriva de las serias dificultades que habrá que superar para aumentar el formato actual del CCD de 1 cm^2 a 10 cm^2 , y debido al poco interés comercial, es fácil prever costos elevados.

En términos comparativos los CCD y los fotocátodos en régimen de conteo de fotones más que competitivos resultan ser complementarios, principalmente en lo que se refiere al intervalo espectral y a los niveles de detección.

EL MEPSICRON

El nuevo sistema de detección MEPSICRON nació con el propósito de superar las limitaciones de los sistemas descritos anteriormente y satisfacer al máximo las propiedades enumeradas al principio del párrafo anterior⁽¹⁻⁶⁾.

El MEPSICRON está basado en un fotocátodo que trabaja en un régimen de conteo de fotones. En la Fig. 1 se muestra una foto del detector y en la Fig. 2 un dibujo esquemático del mismo. Brevemente éste consiste en un fotocátodo multialcalino depositado sobre una ventana de cuarzo, en focada por proximidad sobre un sistema de multiplicación electrónica en cascadas constituido por cinco placas microcanales en configuración V-Z. La nube electrónica producto de la cascada conserva la posición del punto de impacto del fotón sobre el fotocátodo. Acelerada por un campo eléctri

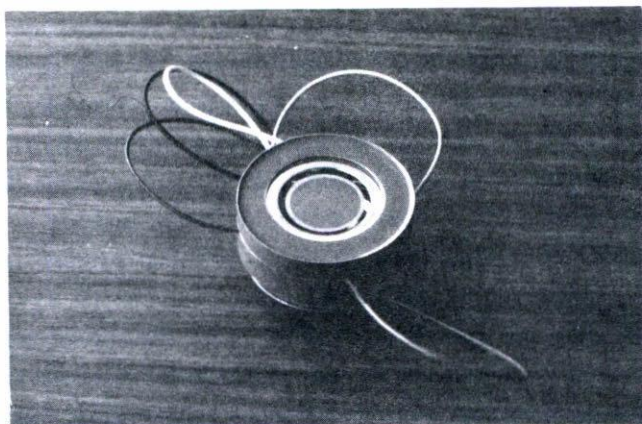


Fig. 1. Foto del MEPSICRON por el lado de la ventana y del fotocátodo. La escala es en centímetros.

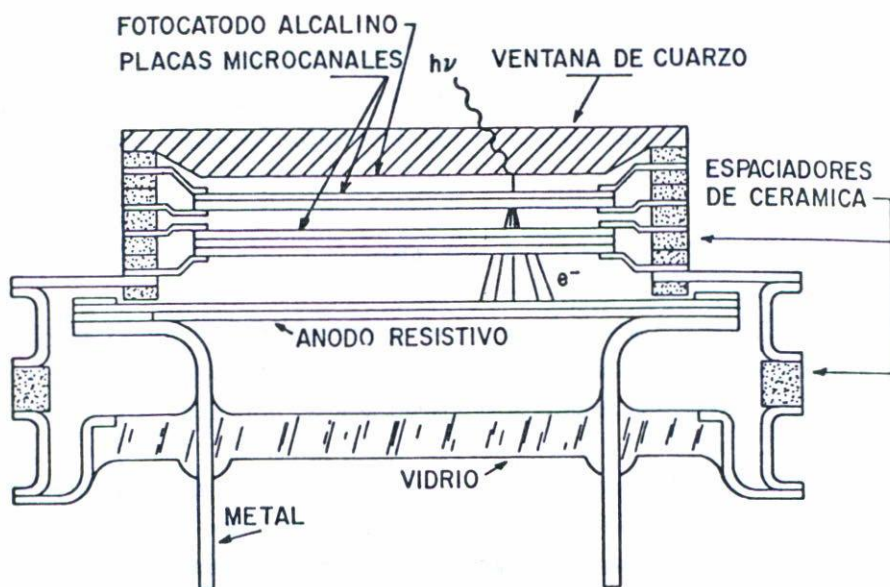


Fig. 2. Dibujo esquemático del MEPSICRON. Un fotón $h\nu$ es convertido por el fotocátodo en electrón, éste induce en las placas microcanales una cascada electrónica cuya posición del centroide está codificada por el anodo resistivo. Un sistema electrónico (APP) recupera a la salida del detector las coordenadas del punto de impacto del fotón.

co la nube es recibida por un ánodo resistivo de baja distorsión^(7,8) que provee la codificación de la posición del centroide de la nube en cuatro señales electrónicas de salida. La geometría y los potenciales eléctricos de las placas microcanales son optimizadas de tal manera que la nube electrónica que se produce con la cascada posee una elevada homogeneidad, tanto en el número total de electrones como también en su distribución espacial. Estos dos factores son de extrema importancia, porque de ellos depende la alta calidad del detector. La ganancia total es aproximadamente de 10^8 electrones/conteo. La distribución de altura de pulsos, que indica la función probabilística del número total de electrones por conteo, está indicada en la Fig. 3. Las cuatro señales obtenidas por el detector son procesadas por un analizador de posición de pulso (APP), que permite la determinación de las coordenadas x, y del punto de impacto del fotón sobre el fotocátodo con una precisión de una parte en mil.

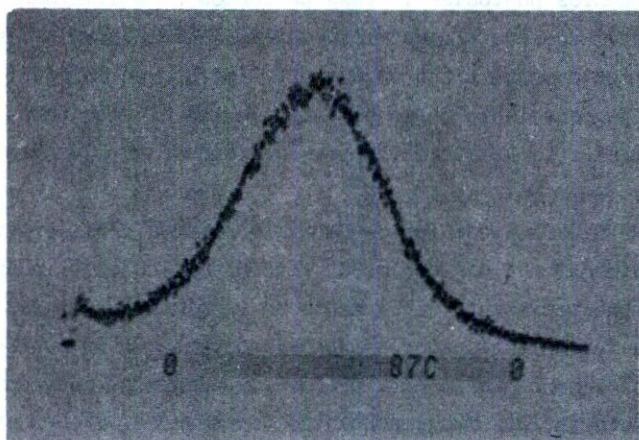


Fig. 3. Distribución en altura de pulsos para el MEPSICRON. En las abscisas se indica el número de electrones por conteo (el máximo corresponde a 10^8 electrones); en las ordenadas se indica la frecuencia.

El MEPSICRON puede ser definido como un tubo fotomultiplicador con resolución espacial. El número total de elementos de resolución (píxeles) es aproximadamente de 10^6 con una superficie sensible circular de 25 mm de diámetro. Se ha logrado una resolución de $42\mu\text{m}$ FWHM (ancho a

media altura) a 6000 \AA uniforme sobre toda la superficie sensible. El ruido interno está dado básicamente por el ruido de disparo cuántico del fotocátodo. En efecto, la contribución de la corriente oscura al ruido es extremadamente baja, siendo un conteo por pixel cada 5 horas a una temperatura de trabajo del fotocátodo de -30°C .

Aparte de una alta resolución espacial, el MEPSICRON está caracterizado también por una alta resolución temporal. Actualmente cada evento puede ser detectado en el tiempo con una precisión de 200 ns. Esta propiedad del detector abre posibilidades nuevas para resolver problemas de fotometría bidimensional ultrarrápida.

La unidad de procesamiento electrónico permite una tasa de conteo de 3×10^4 conteos/segundo al 10% de desviación de linealidad para fuentes difusas, mientras que para fuentes puntuales no se ha registrado una degradación de resolución o de linealidad hasta 50 conteos/segundo pixel. Para fuentes puntuales la tasa de conteo está limitada por el tiempo de recuperación de las placas microcanales. El intervalo dinámico, debido a la corriente oscura tan baja, está limitado en la práctica por la capacidad de almacenamiento de la memoria que, en el caso actual, es de 16 bits por pixel. La variación de sensibilidad de un elemento de resolución a otro es menor del 5%.

El MEPSICRON puede ser esquematizado para fines prácticos, con una matriz bidimensional de 1000×1000 fotomultiplicadores independientes, en donde cada uno representa un elemento de resolución. La tasa de conteo máxima de cada fotomultiplicador es aproximadamente de 50 conteos/segundo, mientras que el tiempo muerto para procesar y almacenar cada conteo es de $3 \mu\text{s}$. Las características más importantes del detector vienen indicadas en la Tabla I, y en la Tabla II se muestra una comparación cualitativa entre CCD, IPCS y el MEPSICRON.

En la Fig. 4 se muestra un esquema general del sistema como actualmente está funcionando en el Observatorio Astronómico Nacional de México en Baja California. Las cuatro señales que salen del detector vienen configuradas, amplificadas y enseguida procesadas por un analizador de posición de pulso APP. Este, que procesa la señal de forma digital, envía la posición de cada fotón a una pantalla analógica de memoria electrostática de baja resolución, a una unidad de cinta magnética y a una memoria

TABLA I

Diámetro del área sensible	25 mm
Ventana del fotocátodo	Cuarzo
Fotocátodo	Multialcalino
Resolución espacial (6000 \AA)	42 μm FWHM 25 μm tamaño pixel
Tiempo de resolución	200 ns
Corriente oscura (-30°C)	50 conteos/seg 1 conteo/pixel cada 5 horas
Tasa máxima de conteos (imagen difusa)	3×10^5 conteos/seg (3 μs tiempo muerto)
Tasa máxima de conteos (imagen puntual)	50 conteos/seg pixel
Variación local en la sensibilidad	$\lesssim 5\%$
Intervalo dinámico	$\gtrsim 10^6$ (limitado por la memoria)
Corrección por linealidad	Uniforme (MCP no saturadas)
Formación de la imagen en tiempo real	Sí

Tabla I. Características del MEPSICRON.

rápida de 2 Mbytes⁽⁹⁾. Cada localidad de esta memoria está relacionada a un pixel, de manera tal que llegando un fotón a un pixel, un conteo se suma al contenido de la localidad de memoria correspondiente. De esta manera, durante la exposición una imagen digital se va formando en la memoria. Una interface especial permite el despliegue de la imagen, en tiempo real, sobre una pantalla televisiva de color y de alta resolución, mientras que un cursor permite interactuar con la memoria. Otra interface conecta la memoria como unidad periférica a una computadora NOVA 1200, por medio de la cual se puede procesar la imagen y transferirla hacia una unidad de cinta magnética. Aparte de la computadora todo el sistema electrónico ha sido diseñado y construido en el laboratorio de electrónica del Instituto de Astronomía de la UNAM.

TABLA II

	CCD	IPCS	MEPSICRON
Lectura por barrido	sí	sí	no
Ruido	medio	bajo	bajo
Resolución espacial	500 x 500	1000 x 1000	1000 x 1000
Resolución temporal	baja	media	alta
Sensibilidad	silicio	fotocátodo	fotocátodo
Tasa conteos (dif.)	alta	alta	alta
Tasa conteos (punt.)	alta	baja	media
Corr. linealidad	-	local	uniforme
Intervalo dinámico	medio	bajo	alto
Geometría	restrictivo	normal	flexible
Enfriamiento	alto	medio	bajo
Estructura	sencilla	compleja	sencilla
Imagen directa	no	sí	sí

Tabla II. Comparación cualitativa entre CCD, IPCS y el MEPSICRON.

APORTACIONES ACTUALES Y FUTURAS DEL MEPSICRON

Aportaciones en astronomía

El MEPSICRON está actualmente en operación en el Observatorio Astronómico Nacional de México, en Baja California. Se han efectuado con mucho éxito experimentos con el telescopio de 2.12 m de diámetro en el plano focal por imagen directa y con un espectrógrafo Echelle para espectrofotometría de alta y baja dispersión^(5,6,10,11,12), como también con un interferómetro Fabry-Perot de barrido⁽¹³⁾.

En la Fig. 5 aparece la imagen de la galaxia M82 usando un filtro interferencial en H α con 50 Å de ancho de banda; el tiempo de exposición es de 3 minutos; el color codifica la intensidad del brillo según la escala a la izquierda. En la Fig. 6 se muestra la imagen de una parte del resto de la supernova de Tycho con filtro interferencial en H α y 10 Å

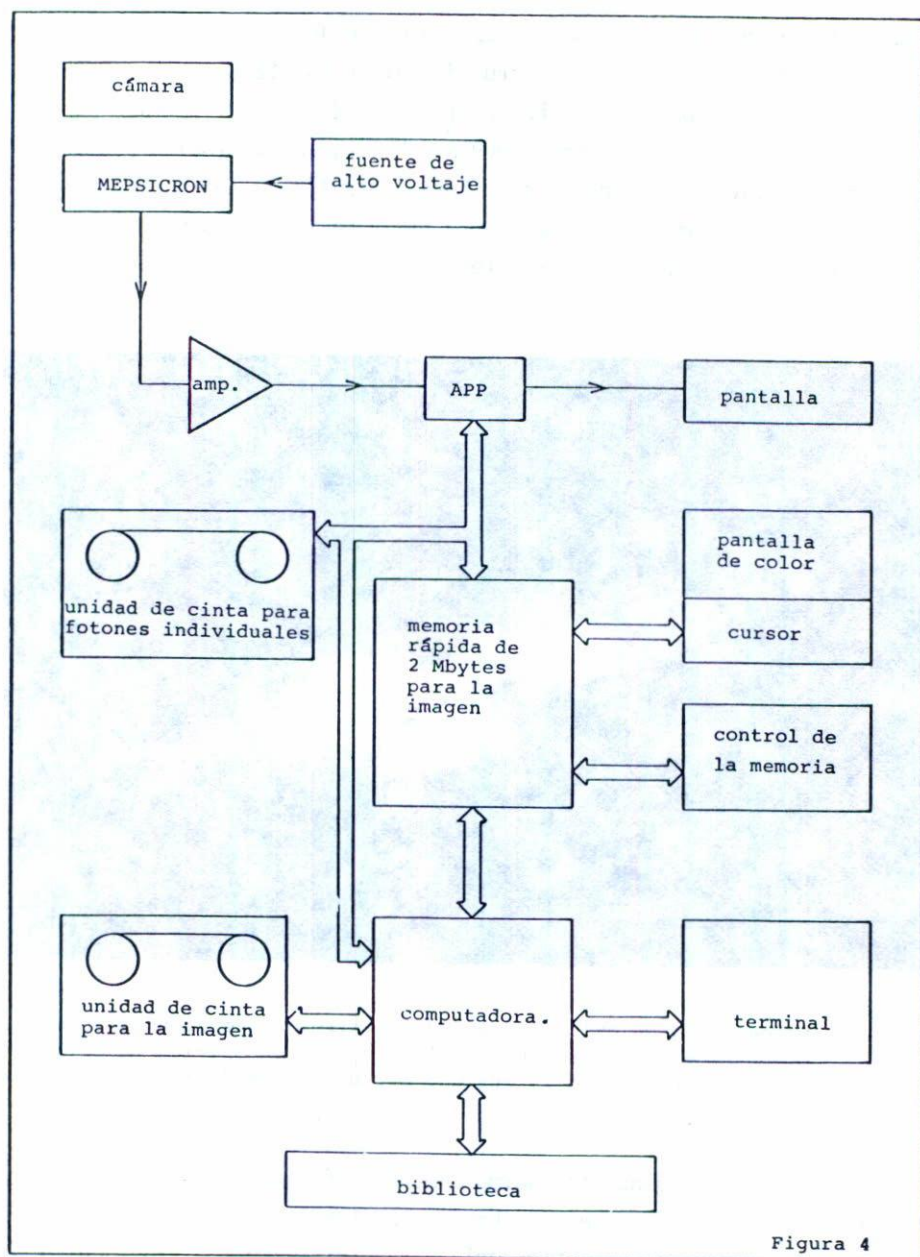


Figura 4

Fig. 4. Esquema general del sistema MEPSICRON con la unidad de adquisición y procesamiento de imagen.

de ancho de banda; el tiempo de exposición es de 40 min. En la Fig. 7 aparece el espectro en dispersión cruzada del cuasar 1225+31 de magnitud 16 y desplazamiento cosmológico hacia el rojo 2.2, en el intervalo de longitud de onda de 3500 Å (arriba) a 5000 Å (abajo); la resolución es .4 Å FWHM y el tiempo de exposición 1 hora. Las líneas de absorción corresponden a desplazamientos cosmológicos hacia el rojo menores que 2.2 y se originan en las nubes de gas intergalácticas situadas entre el cuasar y nosotros.



Fig. 5. Imagen de la galaxias M82 usando un filtro interferencial en H α con 50 Å de ancho de banda. El tiempo de exposición es de 3 min; el color codifica la intensidad del brillo según la escala a la izquierda.

Es fácil imaginar la enorme contribución que puede aportar a la astronomía la técnica de detección basada en el MEPSICRON, ya sea a través de la imagen directa, la espectroscopía, la interferometría, la técnica speckle o la fotometría bidimensional rápida. Entre las áreas que primero resultarán beneficiadas, mediante el uso sistemático del MEPSICRON,

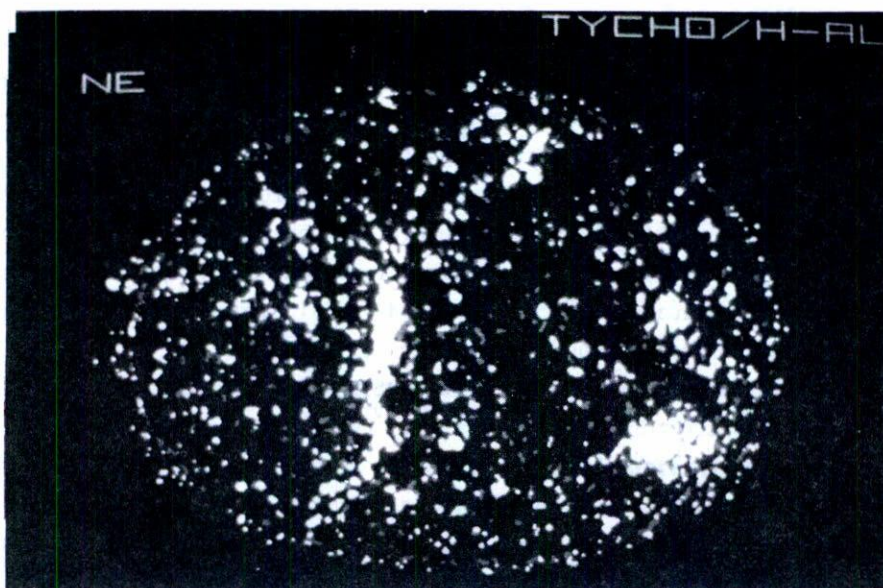


Fig. 6. Imagen del resto de la supernova de Tycho usando un filtro interferencial en $H\alpha$ y 10 \AA de ancho de banda; el tiempo de exposición es de 40 min.

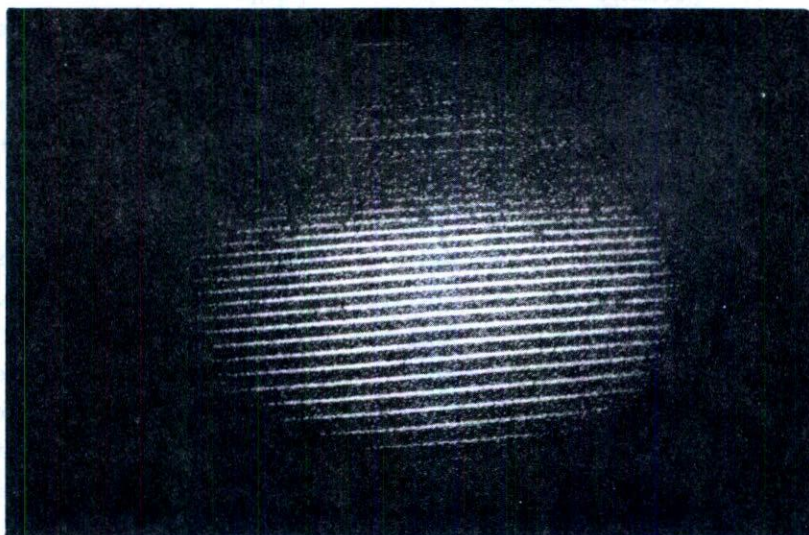


Fig. 7. Espectro en dispersión cruzada del cuasar 1225+31 de magnitud 16 y desplazamiento cosmológico hacia el rojo 2.2, en el intervalo de longitud de onda de 3500 \AA (arriba) a 5000 \AA (abajo); la resolución es 4 \AA FWHM y el tiempo de exposición 1 hora. Las líneas de absorción corresponden a desplazamientos cosmológicos hacia el rojo menores que 2.2 y se originan en las nubes de gas intergaláctico situadas entre el cuasar y nosotros.

estará la astronomía extragaláctica. Se podrá contar con una enorme cantidad de información, ya sea para problemas relacionados con la rotación y la estructura de las galaxias, así como para alones en galaxias y cuasares, gas intergaláctico, evolución química, formación estelar en las galaxias, actividad nuclear, cuasares y estructura de los cúmulos de las galaxias. También a nivel galáctico se tendrá una contribución con respecto a atmósferas estelares, pérdidas de masa, rotación, binariedad, medio interestelar, composición química, velocidad radial, transferencia de masa, acreción, objetos colapsados y remanentes de supernovas.

Dos aspectos son sumamente atractivos del MEPSICRON: la flexibilidad en la estructura y el bajo costo. Estas características permitirán una aplicación sistemática del detector no sólo en los grandes telescopios, sino también en un gran número de telescopios de dimensiones medianas y pequeñas. Sobre esta base es lícito pensar en una contribución y en un avance significativo de la astronomía en un futuro próximo.

Aplicaciones en microscopía electrónica

Es importante mencionar que la tecnología del MEPSICRON rebasa las fronteras de la astronomía. En efecto, este detector es un excelente sensor de rayos X y de partículas cargadas. En el breve lapso de tiempo transcurrido desde la aparición de los primeros resultados en la literatura científica, se ha despertado un enorme interés al respecto, y muy en especial entre grupos que trabajan en áreas relacionadas con la medicina nuclear, la bioquímica, la química y la física.

Un experimento de gran éxito se llevó a cabo en marzo de 1984 en colaboración con un grupo de investigadores del Instituto de Física de la UNAM dirigido por el Dr. M. José Yacamán, aplicando el MEPSICRON como detector a un microscopio electrónico JEOL 100-CX. En ese experimento se usó una versión del detector sensible a electrones sin ventana y fotocátodo. En la Fig. 8 se encuentra la imagen del patrón central de difracción para una partícula con estructura icosaédrica; el resultado de este experimento confirma las predicciones obtenidas mediante la teoría de difracción dinámica⁽¹⁴⁾.

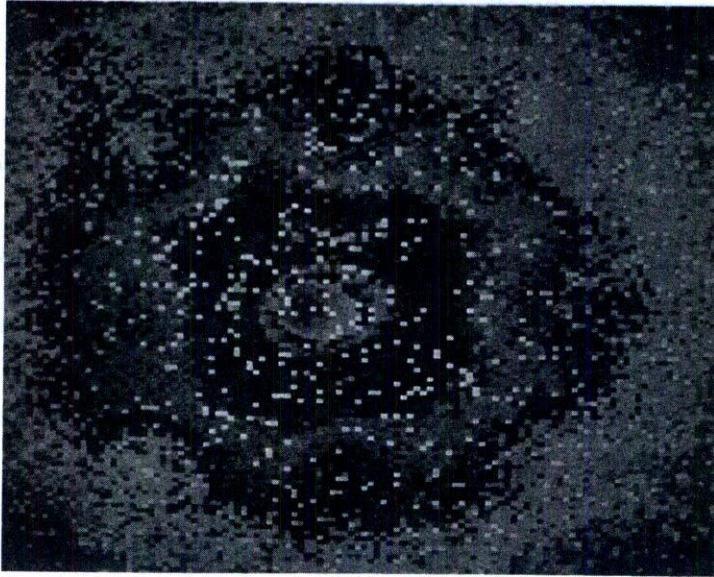


Fig. 8. Imagen del patrón central de difracción para una partícula con estructura icosaédrica obtenida al microscopio electrónico usando el MEPSICRON como detector bidimensional de electrones.

Con respecto al uso convencional de las emulsiones fotográficas el MEPSICRON ofrece dos ventajas importantes: una, que está relacionada con el enorme intervalo dinámico y la linealidad del detector, la otra, que permite llevar a cabo una microscopía "en línea" con un procesamiento de imagen en tiempo real por computadora. Citando a los mismos especialistas del Instituto de Física, entre los avances, accesibles con esta técnica, se pueden mencionar:

- La capacidad de detectar la estructura fina en patrones de difracción; lo cual introduce un método de verificar y aplicar la teoría dinámica de difracción de electrones.
- La posibilidad de caracterizar, de una forma más completa, defectos en sólidos.
- La automatización de la toma de datos en el microscopio; lo cual permi

tirá evaluar muestras en forma estadística.

- El análisis de las pérdidas de energía en electrones y la posibilidad de estudiar la interacción fonón-electrón, plasmón-electrón, electrón-electrón y las vibraciones electrónicas de la red.
- La posibilidad de hacer estudios cristalográficos midiendo intensidades de los patrones de difracción; lo cual se dificulta con la emulsión fotográfica.
- La posibilidad de substituir muchas técnicas que actualmente requieren de un gran acelerador para producir radiación de sincrotrón, como son, por ejemplo, la técnica de EXAFS y XANES. Estos avances permitirán estudiar sólidos amorfos, partículas pequeñas y macromoleculares.
- La simplificación del estudio de materiales sensibles a electrones como son los polímeros y las macromoléculas.

Actualmente se considera que la capacidad de un microscopio electrónico, equipado con un sistema de detección MEPSICRON, resulte particularmente adecuada para el análisis de tejidos biológicos, en especial por el bajo flujo de radiación necesario. En este campo, también se esperan resultados interesantes mediante la aplicación del sistema MEPSICRON a la microscopía óptica. Muy recientemente, como resultado de los últimos avances en técnica de procesamiento de imágenes, se pudo observar, en tonalidad dinámica de color, la alta calidad del detector para problemas, como el de los tejidos biológicos, en los cuales el nivel de contraste es mínimo.

En la actualidad las investigaciones están progresando para alcanzar objetivos que ya se ven accesibles desde el punto de vista teórico. Un resultado extraordinariamente importante sería el logro de una resolución y una tasa de conteo más elevadas, esto será posible perfeccionando el diseño del detector y al mismo tiempo la tecnología de construcción. También otro objetivo a futuro consiste en aumentar y extender la sensibilidad del detector, en particular en el dominio de la radiación infrarroja; actualmente no existe en esta región un detector que trabaje en el régimen de conteo de fotones. Finalmente, la gran flexibilidad del diseño y la extendida variedad de radiaciones para las cuales el detector es sensible, estimula la investigación para explorar campos nuevos de aplicación

relacionados con ciencia básica, tecnología y procesos industriales.

AGRADECIMIENTOS

El autor desea manifestar la importante contribución a este proyecto de E. Ruiz, L. Salas, R. Enríquez, L. Gutiérrez, G.F. Bisiacchi y J. Bohigas del Instituto de Astronomía de la UNAM. También, quiere manifestar su agradecimiento a M. José Yacamán, V. Castaño, R. Pérez, P.S. Schabes, A. Gómez y D. Romev, del Instituto de Física, así como a K. Willms del Instituto de Investigaciones Biomédicas de la UNAM por el interés y la colaboración que han demostrado hacia el proyecto.

REFERENCIAS

1. C. Firmani, E. Ruiz, C.W. Carlson, M. Lampton, F. Paresce, *Rev. Sci. Instrum.*, 53 (1982a) 570.
2. C. Firmani, L. Gutiérrez, E. Ruiz, G.F. Bisiacchi, L. Salas, Proc. "II Simposio de Instrumentación", Oaxtepec (México) (1982b).
3. C. Firmani, L. Gutiérrez, E. Ruiz, L. Salas, G.F. Bisiacchi, F. Paresce, Proc. Symposium on Photoelectronic Image Devices, London (1983a).
4. C. Firmani, L. Gutiérrez, E. Ruiz, G.F. Bisiacchi, L. Salas, F. Paresce, Proc. of SPIE - The International Society of Optical Engineering "Instrumentation in Astronomy V", Vol. 445, London (1983b).
5. C. Firmani, L. Gutiérrez, L. Salas, E. Ruiz, G.F. Bisiacchi, F. Paresce, Proc. Colloquium No. 78 IAU "Astronomy with Schmidt-Type Telescopes", M. Capaccioli (ed.), (1984a) p. 177.
6. C. Firmani, L. Gutiérrez, E. Ruiz, G.F. Bisiacchi, L. Salas, C.W. Carlson, M. Lampton, F. Paresce, *Astron. Astrophys.*, 134 (1984b) 251.
7. M. Lampton, F. Paresce, *Rev. Sci. Instrumen.*, 45 (1974) 1098.
8. M. Lampton, C.W. Carlson, *Rev. Sci. Instrumen.*, 50 (1979) 1093.
9. R. Enriquez, L. Gutiérrez, E. Ruiz, L. Salas, Reporte Técnico No. 20, Instituto de Astronomía, UNAM (1985).
10. C. Firmani, E. Ruiz, J. Bohigas, G.F. Bisiacchi, Proc. IV Latin American Regional Meeting IAU. (1985b).
11. C. Firmani, J. Bohigas, G.F. Bisiacchi (en prensa) (1985c).
12. J. Bohigas, Reporte Técnico No. 19, Instituto de Astronomía, UNAM. (1985).
13. E. Carrasco, Tesis (1984).
14. C. Firmani, L. Salas, R. Enriquez, E. Ruiz, A. Gómez, D. Romero, R. Pérez, V. Castaño, P.S. Schabes, J. Yacamán, Ultramicroscopy (en prensa) (1985a).