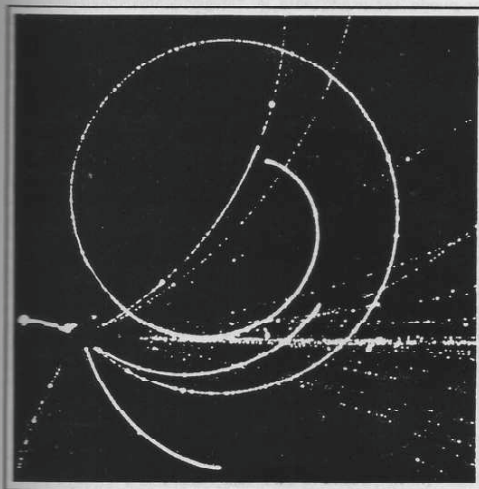


Novedoso detector de radiación cherenkov



□ Jorge Millán Fernández, M.Sc.
Físico - Magíster en
Ingeniería Eléctrica
Profesor Auxiliar
Departamento de Electricidad
Universidad del Valle

RESUMEN

Un novedoso detector de radiación cherenkov (Detector RICH) ha sido diseñado y construido por el autor de este artículo en los Laboratorios David Rittenhouse de la Universidad de Pennsylvania y Joseph Henry de Princeton University. El detector permite la detección y reconstrucción 2-Dimensional de

imágenes formadas en la incidencia de luz ultravioleta con el plano detector. El detector es una cámara de vacío de placas paralelas, con un sustrato de yoduro de cesio como fotodetector y lectura de señales en Tecnología VLSI. Entre las ventajas se encuentran la alta eficiencia de detección, la robustez del detector y el más bajo costo de fabricación; comparadas estas características con la de esquemas actuales de detección de radiación usados en experimentos de física de altas energías experimental, basados en fototubos o fotodetectores gaseosos (TMAE). El presente artículo describe el diseño y construcción y presenta resultados de pruebas realizadas en el Laboratorio Nacional de Brookhaven, NY, USA.

ABSTRACT

A Novel Ring Imaging Cherenkov Detector (RICH Detector) has been designed and constructed at the David Rittenhouse Laboratories of University of Pennsylvania and Joseph Henry Laboratories of Princeton University, by the author of this article. The detector is sensitive to Ultraviolet Light and allows reconstruction of 2-Dimensional Images. The detector is a Low-Pressure Parallel Plate Chamber, Solid CsI Photocathode and VLSI Readout. The detector features high

19

detection efficiency, it is compact in size and the fabrication cost is lower; these characteristics being compared to those of traditional devices and procedures used in radiation detectors for High Energy Physics Experiments. This article describes the design and construction and presents results obtained in the Test Beam at Brookhaven National Laboratory, NY, USA.

1. INTRODUCCION

La física de altas energías investiga las características y propiedades de las partículas elementales constituyentes de nuestro universo y la naturaleza de las interacciones entre ellas. Muchas de estas partículas son inestables y poseen vidas medias tan extremadamente cortas (menos que nanosegundos) que es imposible hallarlas en la naturaleza, bajo condiciones normales. Sin embargo, la colisión de protones o electrones, a altas energías, favorece la creación de diversas partículas, como se ha comprobado ampliamente. Por esto, se hace necesario el uso de aceleradores y colisionadores para producir y realizar un estudio de partículas no antes observadas y estudiadas.

Para lograr la identificación de partículas producidas durante o después de una interacción, se requiere que los detectores empleados, basados en diversos efectos y fenómenos físicos, registren la posición, el tiempo de arribo y la identidad de las partículas cargadas. La evaluación precisa de las coordenadas de posición, para determinar la trayectoria de la partícula y del tiempo de arribo, para asociar partículas provenientes de la misma interacción (generalmente en situaciones donde la tasa de interacción es muy alta), es lograda a través de la combinación de detectores de diferentes tipos.

Uno de los detectores indispensables en experimentos que requieren identificación de partículas es

el detector RICH, que permite discriminar partículas de diferente masa, provenientes de la misma interacción, por observación de los diferentes anillos de luz Cherenkov que éstas producen. La medición del radio del anillo de luz Cherenkov permite también medir la velocidad de la partícula que viaja en el medio.

El presente artículo describe un detector RICH diseñado y construido haciendo uso de los últimos avances en materia de fotodetección y sistemas rápidos de adquisición de señales. Este tipo de detector puede ser usado para la detección de radiación Cherenkov, en experimentos de física de altas energías, o como detector de imágenes de luz ultravioleta en equipos para astrofísica y medicina nuclear, entre otros.

2. EFECTO CHERENKOV

Cuando una partícula cargada atraviesa un medio transparente, luz es radiada por el medio en forma de un frente de onda a un ángulo fijo con respecto a la trayectoria de la partícula; fenómeno conocido como efecto Cherenkov. La radiación es producida siempre y cuando la velocidad de la partícula exceda c/n , siendo n el índice de refracción del medio y c la velocidad de la luz en el vacío. La radiación forma la superficie de un cono alrededor de la trayectoria de la partícula, como lo muestra la figura 1, donde θ es el ángulo que el fotón de luz, en el radiador o medio transparente, hace con la trayectoria. El espectro de la radiación Cherenkov es continuo, siendo la región ultravioleta (170-220nm) la de mayor interés. En esta región, la intensidad de la radiación es mayor, como también las eficiencias cuánticas de conversión de fotodetectores existentes en la actualidad. (Ver figura 1) Una de las utilidades de el efecto Cherenkov radica en que la medición del ángulo θ provee una medida de la velocidad de la partícula

$v = \theta c$. El conocimiento de la velocidad, junto con el del momento de la partícula permite identificar la masa, mediante la relación $P = mV$, y de allí establecer que partícula atraviesa el detector. El momento de la partícula se puede establecer aplicando un campo magnético, en la región de viaje de la partícula, y observando el radio de curvatura de la trayectoria ($P = mV = qBr$).

3. DETECTOR RICH

Un detector RICH es un dispositivo que permite la detección y visualización de anillos de luz ultravioleta formados en la incidencia normal de conos de luz Cherenkov con el plano del detector. El detector es usado en conjunto con un medio dieléctrico transparente a luz ultravioleta que actúa como radiador. Un detector RICH está constituido por un fotodetector y un sistema de adquisición de señales.

La fotodetección de luz ultravioleta es tradicionalmente llevada a cabo por fototubos multiplicadores o fotodetectores gaseosos. Los detectores RICH que usan fototubos multiplicadores operan bien pero son muy costosos de implementar en una escala grande.

El uso de fototubos requiere de una gran cantidad de electrónica discreta para la amplificación y adquisición de las señales provenientes de cada tubo multiplicador. Sistemas RICH actuales [2,3] generalmente usan el gas fotosensitivo TMAE (Tetrakis dimethylamino ethylene) como elemento fotodetector. Estos detectores operan a presión atmosférica de un gas portador y con altos campos eléctricos aplicados, lo que los hace inestables y susceptibles a partículas ionizantes que introducen señales y dificultan el proceso de reconstrucción de los anillos de luz. Por otro lado, para incrementar la eficiencia de fotodetección, el volumen del gas fotosensible debe aumentar, incrementando los tiempos de colección de la señal de

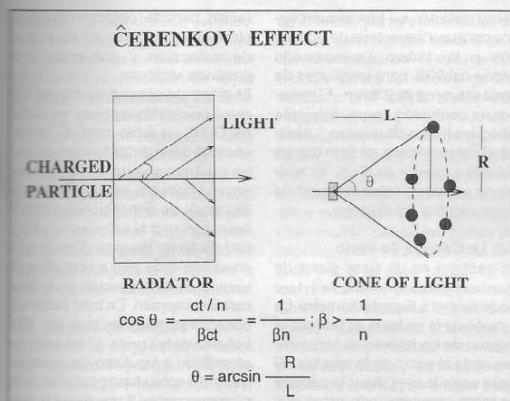


Figura 1: Radiación Cherenkov emitida al paso de partícula de velocidad $v = \beta > c/n$ por un medio dieléctrico.

iones o electrones y limitando la tasa de recepción de eventos. Otra de las desventajas del uso de TMAE como fotodetector, es la dificultad para manejarlo ya que reacciona con la mayoría de los materiales usados en la construcción de detectores.

Resumiendo lo anterior; las limitaciones en el uso de fotomultiplicadores, para la detección de luz Cherenkov o luz ultravioleta, están en el elevado costo, la baja resolución espacial alcanzada con estos dispositivos y la cantidad de electrónica necesaria para la amplificación y adquisición de la señales. Las limitaciones de los detectores actuales que usan TMAE son su inestabilidad y la baja tasa de recepción de eventos.

En cuanto a los esquemas de amplificación y adquisición de señales, los detectores RICH actuales usan electrónica discreta para la amplificación, adecuación, conversión análoga digital y adquisición de las señales provenientes de cada canal. Bajo estos esquemas, resulta muy costoso la instrumentación de cada canal de lectura y, por lo tanto, el incremento de la

resolución espacial del detector por aumento de pixeles de detección.

4. EL NUEVO DETECTOR RICH

El detector RICH, construido por el autor de este texto, explora el uso de cámaras de gas a baja presión, con un sustrato de yoduro de cesio como elemento fotodetector y sistema de amplificación de señales en tecnología VLSI.

El trabajo reciente de varios grupos de investigación [4-9] en materia de fotodetección, ha mostrado que sustratos de yoduro de cesio presentan alta eficiencia cuántica de detección a presiones de 20 Torr, de gases como etano, metano o isobutano y podrían usarse como elementos fotodetectores en detectores RICH. La rápida respuesta temporal de fotocatodos sólidos [4,9] permite que un detector RICH sea diseñado con estructura de plano de pixeles, lo cual lo haría adecuado en ambientes donde la tasa de eventos es alta.

La operación a baja presión hace al detector casi insensible a partículas ionizantes, haciendo más limpias las imágenes capturadas. Ade-

más de esto, la operación a baja presión aumenta la velocidad de conducción de los iones en el gas y reduce el tiempo de colección de la señal inducida en el preamplificador. Fotocatodos de yoduro de cesio, acoplados a cámaras de baja presión, poseen buena eficiencia cuántica para longitudes de onda de hasta 210nm, permitiendo el uso de ventanas de cuarzo no muy costosas. El pequeño rango de sensibilidad de yoduro de cesio (170-210nm) minimiza la dispersión cromática. Esto permite separar más eficientemente anillos de luz pertenecientes a diferentes partículas.

La amplificación y adquisición de señales provenientes de cada pixel se hizo con ASICs, en VLSI, reduciendo de esta forma la cantidad de electrónica discreta requerida de otra forma y el consumo de potencia. El uso de electrónica integrada hace al detector compacto, de menor tamaño y de un costo reducido.

5. DESCRIPCION DEL DETECTOR

La figura 2 muestra el diagrama esquemático del detector. El detector está constituido por un radiador líquido, una cámara de vacío y un sistema electrónico de lectura. (Ver figura 2).

La cámara de vacío posee una ventana de cuarzo -quartz window-, transparente hasta los 170nm, contiene un volumen de gas (etano o isobutano a 20 Torr), una malla de acero inoxidable -s.s. mesh- mantenida a potencial positivo, un plano de pixeles mantenido a potencial cercano a tierra y un sustrato de yoduro de cesio evaporado sobre el plano de pixeles. El sistema de lectura está constituido por preamplificadores, interfaces y un sistema CAMAC de adquisición de datos.

Cuando partículas con velocidades por encima del umbral penetran el radiador en incidencia normal, fotones de luz Cherenkov son

emitidos formando un cono de luz. Los fotones atraviesan la ventana de cuarzo, viajan por el volumen de gas, pasan la malla de acero e inciden sobre el sustrato fotodetector, liberando electrones por efecto fotoeléctrico en una distribución de anillo sobre el plano. Los electrones liberados se conducen hacia la malla por el campo eléctrico creado entre ésta y el plano de pixeles. El campo eléctrico es suficientemente alto para que los electrones ionicen el gas presente y se produzca amplificación de la señal de electrones por avalancha. Ganancias de 70.000/electrón liberado son fácilmente obtenidas con 20 Torr de etano y $V = 600$ voltios. La señal inducida en el plano es captada por los preamplificadores. Las señales inducidas son amplificadas y multiplexadas para su transmisión serial al sistema de adquisición de datos.

Software de reconstrucción permite visualizar los datos en forma gráfica, en tiempo real.

5.1 Radiador

Se usa C_6F_{14} ($n = 1.273$ a $206nm$)

como radiador. La transmisión óptica para una trayectoria de 2cm es 80% en los 190nm y aumentando a más del 90% para longitudes de onda mayores de 230nm. El radiador es contenido en un recipiente cilíndrico hecho de cuarzo. La longitud del recipiente es 2cm con un diámetro interior de 5cm. El recipiente es puesto sobre la superficie de la ventana del detector.

5.2 La Cámara de vacío

La ventana es un disco plano de cuarzo de caras pulidas, de 1.1cm de grosor y 15.2cm de diámetro. La función de la ventana es permitir el ingreso de los fotones de luz, manteniendo el vacío en la cámara. El sello entre la ventana y la cámara se logra comprimiendo estas dos piezas contra un O-ring de Viton. La malla es 80% transparente y es hecha de alambres de acero inoxidable, 27um en diámetro y en un espaciado de 270um. La malla es tensionada y soldada a un marco circular del tamaño del plano de pixeles y mantenida a una distancia -gap- uniforme de 1.6mm de este. La uniformidad de esta sepa-

ración permite obtener campos eléctricos uniformes en toda el área de detección y por ende una ganancia uniforme.

El plano de pixeles es construido como un circuito impreso, en material G-10, en doble capa. El impreso es un disco de 23.5cm en diámetro y 3.2mm en grosor. La capa de encima consiste en un arreglo de 332 pads de dimensiones 8mm X 8mm con una brecha entre pad y pad de 1mm. Huecos -Thru holes- conectan cada pad a una vía que termina en un conector, en la otra cara del impreso. En total existen 8 conectores para extraer las 332 señales de los pads. El impreso es atornillado a un disco de aluminio que sirve como tapa posterior de la cámara y posee 8 ranuras que permiten el paso de los conectores. El sello es logrado por pequeños circuitos impresos de interfaz, cuya función es extraer las señales de cada conector, y que presionan O-rings ubicados alrededor de las ranuras en la tapa posterior.

El fotodetector consiste de una capa de yoduro de cesio, de 1.2um de grosor, evaporada sobre el plano

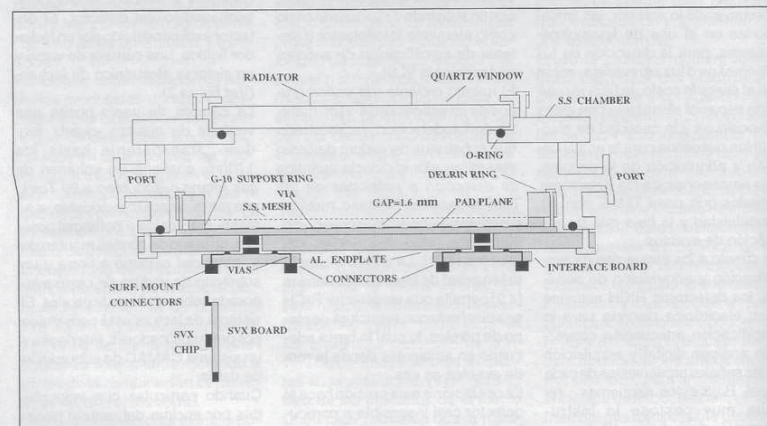


Figura 2: Diagrama esquemático de el detector RICH

de pads. La evaporación del sustrato se realiza siguiendo un riguroso proceso de control de calidad para evitar la absorción de vapor de agua y contaminantes por éste. Una vez el sustrato es evaporado sobre el plano de pads, éste debe ser rápidamente instalado en la cámara y sometido a un vacío del orden de los microTorr hasta que el vapor de agua absorbido en el proceso de instalación haya sido evacuado de la cámara. La calidad del sustrato evaporado determina la eficiencia cuántica del fotodetector.

5.3 Lectura de señales

El sistema de adquisición de datos está constituido por 8 SVX, 4 tarjetas de interfaz, 1 módulo SDA y 1 SRS, 1 sistema de bus CAMAC, 1 GPIB, 1 IEEE 488 y 1 estación de trabajo (SunOS o VAX).

La electrónica de frente-Front-end electronics-está basada en el SVX, circuito integrado de adquisición de datos, diseñado en tecnología VLSI en el Laboratorio Lawrence de Berkeley [10]. Este integrado fue originalmente diseñado para leer señales de carga en tiras de silicio para el Detector de Vértice del experimento CDF en el Laboratorio Nacional de Fermi, USA. El integrado contiene 128 amplificadores en un área de 6mm x 6mm. Las 128 señales análogas son multiplexadas en forma serial a módulos CAMAC de lectura.

El SVX puede también operar en forma selectiva, enviado solo las señales que sobrepasen cierto umbral definido por el usuario. El sistema de lectura puede encadenar en serie hasta 64 SVX, para un total de 8192 canales posibles. La ganancia de cada amplificador es de 14mV/fC y el margen de ruido es de aproximadamente 3000 electrones. Cada amplificador del SVX es acoplado en DC a un pad del plano de pads. La capacitancia de cada pad se estimó en 10pf.

Para conectar los SVX a los pads y al sistema de CAMAC de lectura, se diseñaron 3 tarjetas. Una tarjeta

de interfaz, que trae las señales del interior de la cámara hacia el exterior. Una tarjeta con circuito de protección contra la ruptura de alto voltaje y una tarjeta donde está montado el chip SVX. Debido a las limitaciones, de la tecnología de fabricación de los circuitos impresos, en el momento del diseño no se pudo obtener pistas y espaciado entre éstas, menor a 100 micras. Esto impidió calzar las pistas del impreso con los canales en el chip SVX y solo se pudo utilizar 42 de los 128 canales posibles por chip. En total se utilizaron 8 SVX para leer los 332 canales. Los chips se conectan en serie a través de cable plano de 50 pines y, a través de una tarjeta de interfaz, se envían estas señales a los módulos CAMAC SDA y SRS de adquisición de datos, construidos en prototipo por la Universidad de Oklahoma, para este proyecto.

El módulo SRS provee las señales que controlan las secuencias de inicialización, integración, lectura y multiplexado de los SVX. Estas señales pueden ser microprogramadas y de ésta forma hacen flexible el esquema de control y operación de los integrados. El módulo SDA captura las señales provenientes de los SVX en forma serial, las digitaliza y las almacena temporalmente hasta que la estación de trabajo esté habilitada para realizar el almacenamiento masivo. El SDA trabaja en sincronismo con el SRS. El sistema de bus CAMAC recibe los módulos SDA y SRS y proporciona las líneas de alimentación, selección, control, datos y dirección para estos módulos. El GPIB, también instalado en el CAMAC, provee la interfaz con la estación de trabajo.

Durante una corrida del experimento, los SVX realizan continuamente un ciclo de inicialización, integración de carga y reset. En el evento de que una partícula cargada atraviese el detector en incidencia normal, 2 tubos fotomultiplicadores alineados con el detector, generan

una señal de coincidencia que sirve como disparo. Esta señal de disparo hace que los SVX salgan del ciclo descrito anteriormente y realicen el ciclo de escritura al sistema de adquisición.

El software de adquisición se escribió en lenguaje C y Fortran. El software permite la inicialización y control del sistema y el almacenamiento de los datos para los diferentes eventos. También se escribió un software de visualización que reconstruye en forma gráfica, y en tiempo real, las señales provenientes de los diferentes eventos, en un arreglo 2-Dimensional. La adquisición y almacenamiento masivo de datos para 8 SVX (1024 canales) toma aproximadamente 160ms usando la SunOS y 40 ms con la microVAX. Es posible reducir este tiempo operando el SVX en modo selectivo (sparse data scan), para lo cual el límite estaría en el tiempo invertido en realizar el DMA.

6. PRUEBAS Y RESULTADOS

Las pruebas sobre el sistema en su primera fase evaluaron el desempeño individual de cada uno de sus componentes esenciales. La segunda fase consistió en evaluar el desempeño del sistema de detección acoplado al sistema de adquisición de datos, usando para ello fuentes radioactivas intensas de baja energía y fuentes de luz ultravioleta. La tercera fase evaluó la detección de anillos de luz Cherenkov al exponer la cámara a un flujo de partículas ionizantes de alta energía.

La primera fase evaluó, entonces, la transmisión óptica del radiador de la ventana de cuarzo, de la malla y la eficiencia cuántica del fotodetector. También se evaluaron pérdidas de luz en las superficies de las interfaces. Los resultados de estas mediciones aparecen en la figura 3, en función de la longitud de onda. También aparece la eficiencia total del detector hallada como la integral de los an-

teriores factores. La eficiencia total proporciona la fracción de electrones convertidos en el fotocátodo por número de fotones producidos en el radiador.

Por otro lado, el diseño de la cámara permitió alcanzar vacíos del orden de 10 microTorr, con una rata de fugas de 100 microTorr/día. Esta rata de fugas no resultó ser un inconveniente para obtener un grado aceptable de pureza del gas durante los períodos de toma de datos. El voltaje de operación a 20 Torr de etano fue de 600 voltios con un margen de seguridad contra la ruptura de 50 voltios. El ruido intrínseco de los amplificadores estuvo en el orden de 2000 electrones y subió a los 6000 electrones cuando se conectaron al detector. En la segunda fase se evaluó la operación de la cámara como amplificadora de fotoelectrones individuales. Para realizar esto, se conectó un preamplificador ORTEC ($g = 7\text{mV/fC}$, $\text{ENC} = 1000$ electrones) a uno de los pads. Se envía un haz de fotones de luz ultravioleta hacia el pad instrumentado usando una lámpara de hidrógeno pulsada. La intensidad del haz luminoso se disminuye hasta estar seguros que solo está siendo fotoconvertido 1 fotón a la vez (esto se logra disminuyendo la intensidad de la luz hasta que se detecte 1 señal en el amplificador cada 10 o más disparos de la lámpara). La ganancia promedio de la cámara de halla del espectro de señales obtenido, como lo muestra la figura 4. Usando este procedimiento se halló una ganancia promedio de 200.000 cuando $P = 20$ Torr de etano y $V = 600$ voltios. El sistema SVX de adquisición se conectó, entonces, a la cámara y se hizo una corrida inicial por software para estadísticas de ruido. Finalmente se hizo una toma de datos con todos los componentes acoplados y generando señales con la fuente de luz ultravioleta. Todas estas pruebas resultaron satisfactorias y sirvieron para realizar calibraciones del sistema.

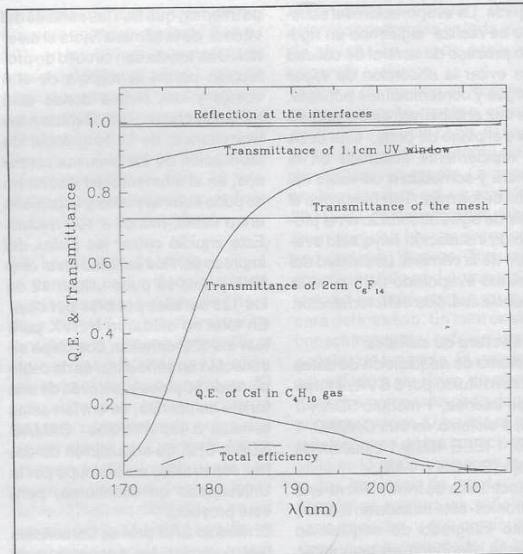


Figura 3: Factores de transmisión y eficiencia del detector en función de la longitud de onda.

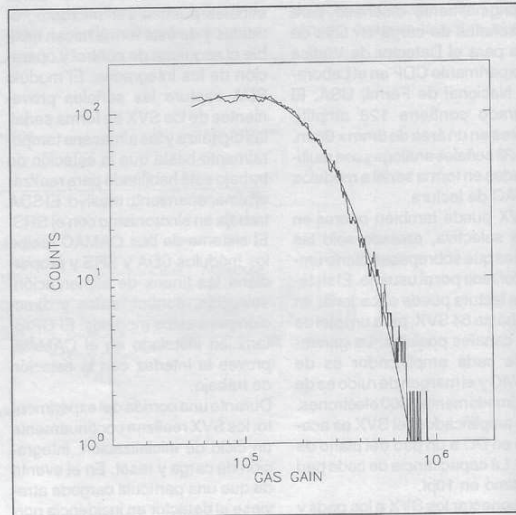


Figura 4: Ganancia de la cámara por multiplicación. La ganancia promedio es de 200.000 electrones/fotoelectrón.

Después de realizar pruebas iniciales de laboratorio con el detector, utilizando fuentes de luz y fuentes radioactivas, se expuso el detector a haces de partículas de mayor intensidad y que permitieran tener una frecuencia mayor de eventos. La figura 5 muestra el montaje experimental para este propósito. Las pruebas se realizaron utilizando un haz de prueba, en el Laboratorio Nacional de Brook-haven, NY. La figura 6 muestra 3 eventos separados y la suma de eventos durante una corrida corta del experimento. Los cuadrados en la figura representan pads que recibieron señal. El tamaño del cuadrado representa la intensidad relativa de fotones que, durante la corrida, recibió cada pad. Claramente se observa en estas gráficas la distribución en forma de anillo de las señales obtenidas. La figura muestra el número promedio de fotones recibidos por el detector durante la corrida. (Ver figuras 3, 4, 5 y 6).

7. CONCLUSION

Estos resultados indican que un detector RICH, usando yoduro de

Cesio como fotocátodo, acoplado a una cámara de vacío de placas paralelas, es un dispositivo que puede ser utilizado como detector de luz ultravioleta o como un dispositivo para realizar identificación de partículas en experimentos de física de altas energías.

La eficiencia de detección puede ser incrementada en un factor de 4, siguiendo procesos de fabricación de fotocátodos sólidos recientemente desarrollados [6].

8. AGRADECIMIENTOS

Agradezco la dirección y cooperación de los investigadores N. Lockyer de la Universidad de Pennsylvania y K. McDonald y C. Lu de Princeton University, para el desarrollo de este proyecto. También agradezco la ayuda y orientación suministrada por los grupos de instrumentación de estas universidades. Este trabajo de investigación y desarrollo fue financiado por el Departamento de Energía de los Estados Unidos y por la Texas National Research Laboratory Commission.

9. BIBLIOGRAFIA

- [1] DUNKELMAN, L., y otros, Applied Optics, Vol 1, No. 6 (1962)
- [2] LEITH, D.W.G.S., Nuclear Instruments and Methods A265 (1988) 120
- [3] ARNOLD, R., y otros, Nuclear Instruments and Methods A270 (1988) 255
- [4] HOENEISEN, B., y otros, Nuclear Instruments and Methods A302 (1991) 447
- [5] KWAN, S., y otros, Nuclear Instruments and Methods A309 (1991) 190
- [6] ANDERSON, D.F., y otros, Nuclear Instruments and Methods A323 (1992) 626
- [7] PESKOV, V., y otros, Nuclear Instruments and Methods A269 (1988) 149
- [8] SEGUINOT, J., y otros, Nuclear Instruments and Methods A297 (1991) 133
- [9] CHARPAK, G., y otros, Nuclear Instruments and Methods A307 (1991) 63
- [10] KLEINFELDER, S., y otros, IEEE Transactions on Nuclear Science 35 (1988) 171

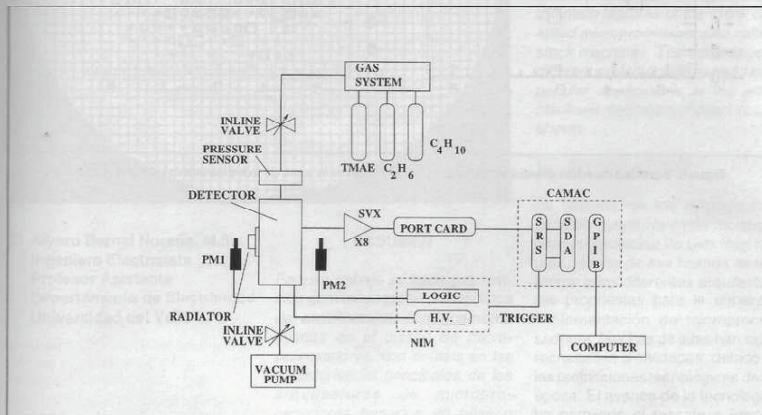


Figura 5: Montaje experimental utilizado para la detección de anillos de luz Cherenkov

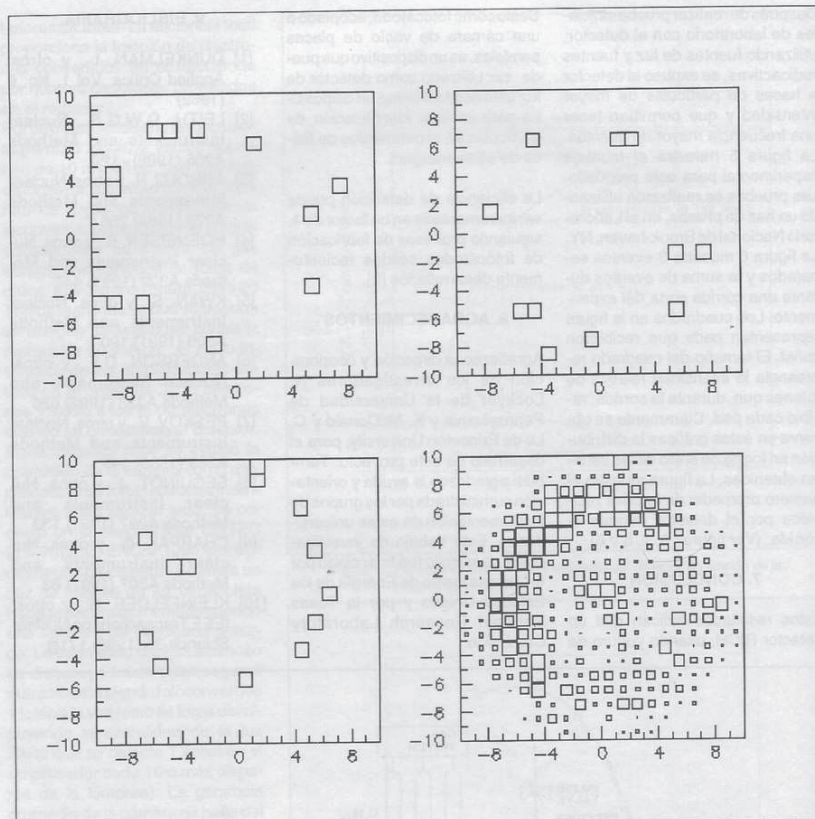


Figura 6: 3 gráficos muestran eventos individuales. El cuarto muestra la suma de todos los eventos durante la corrida.