



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

Construcción y Caracterización Con Rayos
Cósmicos del Detector V0A Para el Experimento
ALICE.

T E S I S
PARA OBTENER EL TÍTULO DE
Física

P R E S E N T A :
Laura Helena González Trueba

DIRECTOR DE TESIS:
Andrés Sandoval Espinosa



2008



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Datos del Jurado
1. Datos de alumno González Trueba Laura Helena 5 754 67 23 Universidad Nacional Autónoma de México Facultad de Ciencias Física 401112669
2. Datos del tutor Dr. Sandoval Espinosa Andrés
3. Datos del sinodal 1 Fís. Cruz-Manjarrez Flores-Alonso Héctor de Jesús
4. Datos del sinodal 2 Dr. Montaño Zetina Luis Manuel
5. Datos del sinodal Fís. Flores Morales Luis
6. Datos del sinodal Dr. Belmont Moreno Ernesto José María de la Salette
7. Datos del trabajo escrito Construcción y Caracterización con Rayos Cósmicos del Detector V0A para el Experimento ALICE. 144 p 2008

”La fuerza No es la derivada del momento con respecto del tiempo... es el impulso que tuve para acabar la carrera”

“A mis padres por enseñarme que lo bello de la vida lo da uno mismo. Los Amo”

Agradecimientos

A Dios por permitirme llegar hasta aca. Gracias por poner en mi camino a tanta gente que me ayudo. Te Amo.

A mis padres por darme el apoyo y la comprensión para acabar. Por dedicarme siempre su tiempo. Por darme un gran ejemplo. Gracias Má por ser tan fuerte y tan dedicada te admiro y trato de siempre seguir tu ejemplo. Gracias Pá por estar siempre ahí sin importar cuan ocupado estés. Realmente no tengo palabras para agradecer todo lo que han hecho por nosotros tres. ¡¡LOS AMO!!

A mis hermanos Emmanuel y Esaú porque sin ustedes no sería lo que soy. Gracias por enseñarme a ser una mejor persona. Guso gracias por estar siempre conmigo, por nunca dejarme sola, por jugar y divertarnos juntos. Emma gracias por ser mi hermano mayor, por demostrarme cuanto me quieres y por compartir momentos de gran alegría, que aunque nunca te lo he dicho, puedes ser demasiado gracioso cuando estas alivianado. Los quiero muchísimo.

A mis primos, Edgar y Erika, la tía Chicha y al Abuelo. Porque nosotros nueve somos indestructibles, por estar siempre en los momentos más importantes. Edgar eres un hermano para mi, siempre has estado ahí gracias por cuidarme tanto te quiero mucho. Plimita eres mi hermana te adoro, gracias por ser la más ecuánime en esta familia. Chicha eres mi segunda madre te agradezco todo los momentos y consejos que nos has dado, los regaños y los no regaños. Te quiero mucho. Abuelito eres el pilar de esta familia y nuestra sabiduría, gracias por dejarnos pasar tantos momentos contigo, por estar simplemente ahí, por contarnos tantas historias y dejarte apapachar por nosotros. Te Amo Abuelito.

A Gustavo por ser mi complemento, por enseñarme que nunca se debe perder el coraje y seguir adelante. Por tener tanta paciencia conmigo. Por enseñarme las cosas sencillas de la vida. Amor gracias por detenerme cada vez que pensaba caer y gracias por todos los consejos que tanto me diste, la fortaleza y la calma que necesitaba durante toda la carrera. Te Amo con toda mi alma. 125

A la familia Trueba Marino por ser un ejemplo a seguir, que no importa que tan difícil este la situación siempre están unidos. Tíos los quiero muchísimo y los admiro tanto. Primos, Pao, Sergito y el cacahuete Mafer gracias por tantos momentos juntos, los quiero muchísimo.

A la familia González Ángeles, Toño, Esther, Marco, Gustavo por abrirme las puertas de su casa y darme tantos consejos para salir adelante. Por quererme como uno de ustedes. Los quiero muchísimo.

A Vane por ser la mejor de todas las amigas, por quererme siempre. Por tantos y tantos momentos juntas a lo largo de estos 18 años. Te quiero mucho amigochis.

A mi asesor, el Doc. Andrés, por confiar en mi y enseñarme tantas cosas que nunca me había imaginado. Gracias Doc!!

A todos mis cuates de la facultad, físicos y actuarios. A Bere, Pris, Alex, Armando, David, A Goyo, Mony, Paty, Mariana, Wilchis, Ezequiel, David, Juanito(Niño), Al Mike, Uba, Pablito, Ali, Nico, Raúl, Horacio, Rodolfo, César, Helio, Maggy, Tere, Poli, Róman Bueno, Román Malo, Hugo, Juanito, Eleazar y un matemático colado Andrés, no solo por ayudarme a entender tantos problemas ni a estudiar tanto tiempo con ustedes simplemente gracias por estar ahí para hacerme más divertidos los momentos más pesados, gracias AMIGOS!!

A Pamela y Ariel porque sin ustedes no estaría aquí, gracias por ese último semestre y por tantas y tantas noches de estudio.

A Mariana, Hermes, Andrés, Oscarín y Pablo por hacerme más amenos estos últimos dos años. Por aprender tantas cosas juntos. Gracias AMIGOS!!

A todos los del taller, Victor, Don Mario, Charlie, Saúl.

A Luis Manuel, Marcos y Alejandro por ayudarme a aprender tantas cosas y por los momentos buenisimos que tuve en el CINVESTAV.

A Rubén por enseñarme a amar esta área, por su entusiasmo y entrega cada vez que explica algo.

Al Doc. Belmont porque no solo nos brinda su conocimiento y experiencia si no también su amistad y confianza.

Al Doc. Arturo por brindarnos su apoyo. Por compartir su experiencia con nosotros.

IV

A Hector Cruz -Manjarez por enseñarme la belleza de la física y por contagiarme toda la curiosidad que todo físico debe tener. Por enseñarme que no importa cuanto más sepas siempre vas a saber menos que antes. Gracias por ser más que un maestro, mi Amigo.

A Luis Flores por ayudarme tanto en este tiempo, que aunque no era tu responsabilidad ahí estuviste, por tus consejos y tu paciencia, muchísimas gracias.

Al Profe René por se mi mejor maestro, porque cada clase que tenia aprendia algo nuevo.

A la Profesora Vicenta Sanches por confiar en mi.

A Ileana, Christian y Citlali porque juntos todo fue siempre divertido. Los quiero.

Al coach por enseñarme que pase lo que pase mi cuerpo esta primero. Por ser un gran amigo y un gran entrenador. A Chivis y a Manuel por compartir grandes logros conmigo.

A mis amigos del Ovale por compartir la mejor etapa de mi vida y la más divertida, la secundaria. Daría lo que fuera por regresar un solo instante a ella.

Y a todas las personas que han pasado a lo largo de mi vida ¡¡MUCHAS GRACIAS!!

Reconocimientos

A la Facultad de Ciencias de la UNAM.

Al Laboratorio de Alto Vacío al Fís. Hector Cruz-Manjarez, Fís. Luis Flores y M. en I. Perla Hernández.

Al Laboratorio de Microscopía a M. en C. Jaquelin Cañetas y al Dr. Juan José Morales.

Al Fís. Juan Manuel Eugenio Ramirez de Arellano Niño del Rincón (Juanele) por las caricaturas presentadas en este trabajo.

Al Fís. Andrés Anzo Hernández por sus conocimientos en ROOT y programación en C++, para la elaboración de las gráficas presentadas en este trabajo.

Al Centro de Investigación y Estudio Avansados del IPN por su apoyo económico.

Al Instituto de Física de la UNAM.

Al programa HELEN, por su apoyo económico para mi estancia en el CERN, Ginebra, Suiza.

Al Sistema Nacional de Investigadores y a la DGAPA por el apoyo económico.

Resumen

Este trabajo describe la construcción y la caracterización del detector V0A con rayos cósmicos, que es parte del experimento ALICE, que se construye en el laboratorio del CERN en Ginebra, Suiza. Este experimento estudiará colisiones protón-protón a 14 TeV y de Pb-Pb a $5.5 \text{ TeV}/A^a$ y las propiedades cromodinámicas de la materia.

La construcción y las pruebas iniciales se realizaron en el Instituto de Física, con la colaboración de otros centros e institutos, como el Centro de Investigación y Estudios Avanzados del IPN y el Instituto de Ciencias Nucleares de la UNAM.

En primer término, se resumen los principios básicos de la física de altas energías y se hablará acerca del Modelo Estándar y como predice que a temperaturas y densidades extremas, se puede crear un nuevo estado de la materia (Materia Cromodinámica).

El V0 servirá como disparador para el experimento ALICE, esta dividido en dos detectores centelladores con el nombre de V0A y V0C; para cumplir con esta función el detector tiene que satisfacer varias condiciones: operar dentro de un campo magnético solenoidal de 0.5 T del experimento, el tener una eficiencia de detección de partículas mínimo ionizantes (MIPs) del 100 %, además de una resolución temporal para la detección de un MIP mejor que 1 ns . Otros requerimientos son la máxima aceptación en la pseudorapidez dadas las restricciones de espacio impuestas por la presencia de otros detectores del experimento y tener una segmentación suficiente para poder determinar la multiplicidad de partículas cargadas en colisiones de Pb-Pb y de ahí seleccionar eventos de acuerdo al parámetro de impacto entre los dos núcleos.

^aUn $\text{TeV} = 10^{12} \text{ eV}$, donde eV es una unidad de energía y se define como la energía cinética adquirida por un electrón al pasar por un potencial de 1 V , en el vacío. $1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$. A significa por nucleón.

El detector que se construyó está integrado por un plástico centellador Bicron BC-404, fibras corredoras de frecuencia Bicron BC9929AMC y de fotomultiplicadores Hamamatsu H6153-70; el plástico centellador se maquinó con base en la técnica *MegaTile*, que consiste en ranurar el plástico y rellenarlas de pegamento óptico para generar celdas independientes entre sí, pero en una sola estructura mecánica. Las fibras para extraer las señales de luz están dentro del centellador.

La caracterización del detector VOA se dividió en dos partes, la primera se realizó en el Instituto de Física usando rayos cósmicos y la segunda es la calibración hecha en el Centro Europeo de Investigaciones Nucleares, CERN; con un haz de partículas negativas[19]. En ambos procedimientos los resultados fueron satisfactorios, como se muestra en el contexto del trabajo.

Actualmente el detector se encontrará en la última etapa de instalación en el CERN y se espera que en el 2008 empiece a generar resultados.

Índice general

1. Experimento ALICE para el Colisionador LHC	1
1.1. Partículas Elementales	1
1.2. Interacciones	4
1.2.1. Hadrones, Sistemas Compuestos por Quarks	6
1.3. Materia Cromodinámica.	7
1.4. Aceleradores	8
1.5. ALICE, ATLAS, CMS y LHC-b	11
1.6. ALICE	14
2. Detector V0 para el Experimento ALICE	21
2.1. Interacción Radiación-Materia	21
2.1.1. Sección Eficaz	22
2.1.2. Radiación y sus efectos	22
2.1.3. Fórmula de Bethe-Bloch	23
2.2. Detectores Centelladores	25
2.2.1. Materiales Centelladores	25
2.2.2. Fibras Corredoras de Frecuencia	28
2.2.3. Fotomultiplicadores	28

2.3. Objetivos del Detector V0	30
2.4. Pseudorapidez	32
2.5. Multiplicidad	33
2.6. Luminosidad	36
3. V0A Diseño y Construcción	37
3.1. Maquinado del plástico centellador	38
3.2. Trabajo con Fibras Corredoras de Frecuencia	43
3.2.1. Método de Preparación de las Películas	47
3.3. Módulos de Electrónica utilizados en la Calibración	53
4. Resultados	59
4.1. Calibración de los PMT	59
4.2. Calibración del V0A con Rayos C3smicos	64
4.2.1. An3lisis de Resultados	66
4.2.2. Resoluci3n Temporal	69
4.3. Calibraci3n del V0A con Haz de Part3culas	70
Conclusiones	75
Ap3ndice A	79
Ap3ndice B	113
.1. Desviaci3n Est3ndar y Dispersi3n	116
Ap3ndice C	131

Índice de figuras

1.1. Los quarks están clasificados en seis sabores <i>up, charm, top, down, strange</i> y <i>bottom</i>	4
1.2. Los mesones están formados por un quark y anti-quark.	6
1.3. Los bariones están constituidos por tres quarks.	7
1.4. A la izquierda se muestra un esquema de un acelerador lineal. A la derecha se puede observar una fotografía del LINAC1 en el CERN.	9
1.5. La figura de la izquierda muestra un dibujo tridimensional del LHC, en la frontera de Francia y Suiza y unos de los 2000 imanes superconductores que tiene el acelerador. La figura de la derecha muestra una fotografía real del LHC.	10
1.6. Cadena de aceleradores que se encuentra en CERN, Ginebra, Suiza.	11
1.7. El colisionador LHC con los experimentos ATLAS, ALICE, CMS Y LHC-b en los cuatro puntos de interacción.	12
1.8. Esquema de estructura básica de los experimentos para el LHC.	13
1.9. Los neutrinos se pueden detectar aún cuando éstos no los absorbe algún material, sólo basta con comparar las energías iniciales y finales.	13

1.10. Dibujos de los cuatro experimentos ATLAS, ALICE, CMS Y LHC-b.	14
1.11. ALICE “A Large Ion Collider Experiment”.	15
1.12. Ubicación de los detectores que conforman ALICE.	18
1.13. ALICE en sus distintas etapas de instalación.	19
2.1. La energía de los fotones al interactuar con la materia es de suma importancia para tener uno de los tres efectos de radiación electromagnética. Específicamente en esta gráfica interactúan los fotones con un blanco de Pb.	23
2.2. La gráfica muestra la pérdida de energía de las partículas cargadas, como función de su velocidad: ecuación de Bethe-Bloch. La pérdida de energía depende del tipo de partícula y el medio en el que interactúe esta[3].	25
2.3. Estructura del anillo de benceno.	27
2.4. Fotón penetrando al fotocátodo produciendo un fotoelectrón que es amplificado por medio de los dinodos.	29
2.5. PMT Mesh Type a la izquierda. Fotomultiplicador convencional a la derecha.	30
2.6. El diagrama muestra la ubicación de los dos detectores V0A y V0C en el experimento ALICE	31
2.7. Rangos de pseudorapidez para los detectores del V0.	33
2.8. El parámetro de impacto b es la distancia que existe entre los centros de las dos partículas. Los núcleos no se ven como esferas debido a la contracción relativista.	34

2.9. La probabilidad de que interaccionen dos núcleos esta dada por el área de estos. 34

2.10. 1) se observa la dependencia de la multiplicidad con el parámetro de impacto. 2) La derivada de σ con respecto a el parámetro de impacto b . 3) La derivada de sigma con respecto de la multiplicidad m 35

3.1. Sector 0 con las fibras corredoras de frecuencia del anillo 0, 1, 2 forradas con un plástico llamado termofit, en el anillo 3 solo se muestran las fibras desnudas. 37

3.2. Sector 0 forrado y listo para ser calibrado en el CERN Ginebra, Suiza. . . 37

3.3. Diseño del centellador del V0A, muestra las 32 celdas vistas desde el punto de interacción. La numeración corresponde al número de la celda en la base de datos de ALICE. 38

3.4. Espectro de emisión del plástico BC-404. 38

3.5. Fresadora numérica con la que se maquino el centellador para el Detector V0A 39

3.6. Una de las mitades del V0A solo con las divisiones de los anillos y sectores 39

3.7. La fotografía muestra como se pegó el centellador. Se rellena las ranuras con pegamento óptico, usando guantes y jeringas para inyectar el pegamento 39

3.8. En la fotografía se muestra el cortador esférico haciendo las ranuras para las fibras ópticas. 40

3.9. Cortador con el que se maquinaron las canaletas para las fibras ópticas. . . 40

3.10. El dibujo muestra como están hechas las canaletas de las fibras. 40

XIV ÍNDICE DE FIGURAS

3.11. La fotografía muestra como se pegó el centellador del segundo lado, si se observa se pueden ver del lado contrario las ranuras para las fibras ya hechas.	40
3.12. Proceso de la preparación del pegamento óptico que se utilizó para hacer la técnica de MegaTile. En la primera foto se puede observar como se mezclan las dos sustancias del pegamento. En la segunda foto se le añade el dióxido de titanio. La tercera muestra la cámara de vacío que se utilizó para sacar el aire del pegamento. Por ultimo en la cuarta se ve las burbujas en el pegamento, aire que esta tratando de salir debido a la baja presión a la que se le impuso al pegamento.	41
3.13. La primera fotografía muestra como el centellador todavía tiene el sobrante rectangular y en la segunda como ya se terminó de maquinar y tiene sus 4 <i>cm</i> de más para sujetar las fibras.	42
3.14. Cartón forrado de teflón perforado para la entrada de las fibras al centellador	42
3.15. Se muestra como el centellador en los 4 <i>cm</i> de sobrante tiene hechos los barrenos y en la segunda fotografía como el Nylamid esta sujeto con tornillos de plástico.	43
3.16. Espectros de absorción y emisión de las WLS Bicron BC9929AMC. . . .	43
3.17. Las fibras se cortan con una guillotina	45
3.18. La primera fotografía muestra las fibras aprisionadas por lucitas rectangulares y la segunda con los cobres puestos.	45
3.19. Maquina pulidora. En el microscopio se observan y se limpian todas las imperfecciones que tienen las fibras después de pulir	46
3.20. Las fibras se limpian con gasa y agua destilada únicamente.	46

3.21. En la fotografía se muestra como se utilizó el soporte universal para poder poner las fibras en un cilindro metálico antes de ser aluminizadas. Esto se hizo para que el extremo de las fibras quedará exactamente al ras del cilindro para que solo se aluminizaran las caras de los extremos de las fibras. 47

3.22. Fibras aluminizandose. Se observa el plasma que se forma al excitarse y desexcitarse los átomos del argón. Las primeras fibras se aluminizaban en las lucitas rectangulares las definitivas se aluminizaron en cilindros de metal ya que cabían más fibras. 50

3.23. Las fibras se escogen primero según la medida de estas. Se meten en su respectivo anillo a través del forro de teflón llegando hasta el plástico centellador. 50

3.24. Se puede observar que algunas fibras tiene el termofit y otras no. El termofit es el forro negro que tienen algunas fibras. En la fotografía se aprecia que no se usan guantes, esto es debido a que solo se tocan los termofits no las fibras. 51

3.25. Se pegan las fibras con epoxy de 5 min, tomando cuenta la ubicación que tienen dentro de la caja del centellador y de la caja de los fotomultiplicadores 52

3.26. Las fibras se lijan en bandejas con agua, sumergiendo la lija en el agua. 52

3.27. En la primera fotografía se muestra el cilindro con las fibras antes de pulirlo y en la segunda ya se ha terminado de pulirlo. 53

3.28. Eficiencia cuántica en función de la longitud de onda para el fotocátodo del PMT H6153-70. 54

3.29. En la primera fotografía esta el soporte de aluminio para el detector V0A.
 En la segunda se muestran dos de las cajas de los PMTs. En la tercera el
 V0A terminado en el CERN Ginebra, Suiza donde se caracterizó con haz. 55

3.30. Para integrar la carga, el ADC utiliza el método Wilkinson. 56

4.1. En la caja negra se encuentra el prototipo Sector 0. Tiene un pequeño
 mapa para poderse ubicar donde se encuentra cada anillo. Arriba de este
 están las paletas que servirán como trigger. 60

4.2. Setup de la electrónica para calibrar los PMT's usando el Sector 0. . . . 60

4.3. Las cuatro gráficas muestran el comportamiento del PMT con número
 de serie 9805. 62

4.4. Se comparan los PMTs con número de serie 9704 y 9764 siendo de alta
 (azul) y baja ganancia (rojo) respectivamente. 63

4.5. Dependencia de la resolución en tiempo σ con el voltaje para el PMT
 con número de serie 9714. 63

4.6. El dibujo muestra como se acomodaron las paletas que se usaron como
 trigger para las dos mitades del V0A, la imagen es viendo desde arriba
 por lo que no se vería la otra mitad pero una esta encima de la otra. . . 64

4.7. Electrónica para la adquisición de datos para la calibración del detector
 V0A con rayos cósmicos. 65

4.8. Espectro de la carga integrada por el ADC al paso de muones atmosféri-
 cos. A la izquierda se tiene del pedestal. 66

4.9. Ajuste de una recta para el PMT-9712 con un cambio de vari-
 able para la carga graficando así $1/\sqrt{q}$ 70

4.10. Se graficaron cada punto en la prueba de haz, obteniendo en el análisis una resolución en tiempo σ para cada punto.	72
4.11. Espectro de energía para la calibración del V0A con haz, de una de las celdas del detector.	72
4.12. Se muestra la distribución de la uniformidad en la ganancia en todas las celdas del detector. Resultados obtenidos por la prueba con haz.	73
13. PMT con número de serie 9703	80
14. PMT con número de serie 9704	81
15. PMT con número de serie 9712	82
16. PMT con número de serie 9713	83
17. PMT con número de serie 9714	84
18. PMT con número de serie 9724	85
19. PMT con número de serie 9730	86
20. PMT con número de serie 9754	87
21. PMT con número de serie 9764	88
22. PMT con número de serie 9771	89
23. PMT con número de serie 9773	90
24. PMT con número de serie 9777	91
25. PMT con número de serie 9779	92
26. PMT con número de serie 9780	93
27. PMT con número de serie 9785	94
28. PMT con número de serie 9787	95
29. PMT con número de serie 9788	96
30. PMT con número de serie 9790	97

XVIII ÍNDICE DE FIGURAS

31.	PMT con número de serie 9791	99
32.	PMT con número de serie 9799	100
33.	PMT con número de serie 9800	101
34.	PMT con número de serie 9802	102
35.	PMT con número de serie 9803	103
36.	PMT con número de serie 9804	104
37.	PMT con número de serie 9805	105
38.	PMT con número de serie 9806	106
39.	PMT con número de serie 9865	107
40.	PMT con número de serie 9868	108
41.	PMT con número de serie 9870	109
42.	PMT con número de serie 9897	110
43.	Datos tomados con el primer sector para diferentes anillos. Los primero cuatro espectros están tomados por el ADC Lecroy y los otros cuatro por el ADC Fast	117
44.	Datos obtenidos del segundo sector con el ADC Fast. Los cuatro primeros espectros corresponden a la mitad de abajo y los otros cuatro a la de arriba.	118
45.	Datos obtenidos del segundo sector con el ADC Lecroy. Los cuatro primeros espectros corresponden a la mitad de abajo y los otros a la mitad de arriba.	119
46.	Datos obtenidos del tercer sector con el ADC FAST. Los cuatro primeros espectros corresponden a la mitad de abajo y los otros cuatro a la mitad de arriba.	120

47. Datos obtenidos del tercer sector con el ADC Lecroy. Los cuatro primeros espectros corresponden a la mitad de abajo y los otros cuatro a la mitad de arriba. 121

48. Datos obtenidos del cuarto sector con el ADC Lecroy. Los cuatro primeros espectros corresponden a la mitad de abajo y los otros cuatro a la mitad de arriba. 122

49. Datos obtenidos del tercer sector con el ADC Lecroy. Los cuatro primeros espectros corresponden a la mitad de abajo y los otros cuatro a la mitad de arriba. 123

50. Gráficas de carga vs HV y resolución temporal σ vs carga, con la carga en términos de pC . Para los PMTs 9703 y 9704. 124

51. Gráficas de carga vs HV y resolución temporal σ vs carga, con la carga en términos de pC . Para los PMTs 9712 y 9713. 125

52. Gráficas de carga vs HV y resolución temporal σ vs carga, con la carga en términos de pC . Para los PMTs 9714 y 9724. 126

53. Gráficas de carga vs HV y resolución temporal σ vs carga, con la carga en términos de pC . Para los PMTs 9730 y 9754. 127

54. Gráficas de carga vs HV y resolución temporal σ vs carga, con la carga en términos de pC . Para los PMTs 9764 y 9771. 128

55. Gráficas de carga vs HV y resolución temporal σ vs carga, con la carga en términos de pC . Para los PMTs 9773 y 9777. 129

56. Gráficas de carga vs HV y resolución temporal σ vs carga, con la carga en términos de pC . Para los PMTs 9778 y 9779. 130

57.	Gráficas de carga vs HV y resolución temporal σ vs carga, con la carga en términos de pC . Para los PMTs 9780 y 9785.	132
58.	Gráficas de carga vs HV y resolución temporal σ vs carga, con la carga en términos de pC . Para los PMTs 9787 y 9788.	133
59.	Gráficas de carga vs HV y resolución temporal σ vs carga, con la carga en términos de pC . Para los PMTs 9790 y 9791.	134
60.	Gráficas de carga vs HV y resolución temporal σ vs carga, con la carga en términos de pC . Para los PMTs 9799 y 9800.	135
61.	Gráficas de carga vs HV y resolución temporal σ vs carga, con la carga en términos de pC . Para los PMTs 9802 y 9803.	136
62.	Gráficas de carga vs HV y resolución temporal σ vs carga, con la carga en términos de pC . Para los PMTs 9804 y 9805.	137
63.	Gráficas de carga vs HV y resolución temporal σ vs carga, con la carga en términos de pC . Para los PMTs 9806 y 9895.	138
64.	Gráficas de carga vs HV y resolución temporal σ vs carga, con la carga en términos de pC . Para los PMTs 9868 y 9870.	139
65.	Gráficas de carga vs HV y resolución temporal σ vs carga, con la carga en términos de pC . Para los PMTs 9897 y 9901.	140
66.	Ajustes de las rectas para encontrar las constantes para calcular la resolución en tiempo σ del detector V0A.	142

Indice de tablas

1.1. Propiedades de los leptones y anti-leptones, mostrando algunos de sus números cuánticos.	2
1.2. Propiedades de los quarks y anti-quarks mostrando algunos de sus números cuánticos.	3
1.3. Propiedades de los bosones de las tres interacciones que le Modelo Estándar considera, mostrando algunos de sus números cuánticos.	5
1.4. Energías y dimensiones para los distintos aceleradores que conforman la cadena de aceleradores del proyecto LHC.	11
2.1. Dimensiones de los anillos de los detectores V0A y V0C con rangos de pseudorapidez y sus aceptancias angulares.	33
3.1. Longitud de las fibras en <i>mm</i> . Las medidas que tienen * corresponden a los dos sectores que están abajo. Son más grandes debido a que el soporte del detector debe ser más largo en esta sección y los PMT están más lejos.	44

4.1.	En la tabla se muestra los fotomultiplicadores que se utilizaron para caracterizar el V0A. La tabla tiene información del número de anillo donde se colocó el PMT, el número de serie de este, el voltaje que se le suministró, el centroide que se obtuvo y su ganancia.	67
4.2.	La tabla es la misma que la tabla 4.1 solo que esta vez se presenta con los centroides en términos de pC y no de canales	67
4.3.	Se exponen los datos del V0A según el anillo al que corresponden mostrando la variación de sector a sector.	68
4.4.	La tabla muestra la dispersión de los anillos en los sectores.	69
4.5.	Se exponen las comparaciones de los datos obtenidos por la calibración de los PMTs en el Sector 0 con los datos de la calibración del V0A.	69
4.6.	Se compara la resolución en tiempo obtenida directamente en la calibración de los PMTs que se utilizaron para las mediciones del V0A con los datos obtenidos de interpolar.	71
7.	Se muestran las diferencias de los picos con los pedestales para las celdas con los ocho PMT que se utilizaron para esta calibración.	112
8.	Se obtuvieron los factores de conversión de cada anillo de cada sector. Se dividió la diferencia del pico con el pedestal del Fast con la de Lecroy.	114
9.	La tabla muestra la ganancia en términos del ADC Lecroy y la carga en pC para cada celda.	115
10.	Promedio de la carga entre diferentes celdas de cada anillo.	116
11.	Desviación estándar entre las diferentes celdas de cada anillo	116

12. Se muestran los valores de las constantes A y K para obtener los valores
de σ 131

Capítulo 1

Experimento ALICE para el Colisionador LHC

1.1. Partículas Elementales

El universo está formado por materia, la cual se constituye por partículas elementales. En este capítulo se discute cuales son las diferentes familias de partículas elementales que existen, a que interacciones están sujetas y que estructuras pueden formar. Existe un modelo denominado Modelo Estándar que explica las interacciones que hay entre estas partículas.

En el Modelo Estándar las partículas elementales que tienen espín semi-entero son llamadas *fermiones*, las cuales obedecen la estadística de Fermi-Dirac y satisfacen la ley de exclusión de Pauli. Las interacciones entre estas están mediadas por el intercambio de partículas de espín entero llamadas *bosones* que obedecen la estadística de Bose-Einstein y no están sujetas a la ley de exclusión de Pauli.

En el Modelo Estándar existe la simetría entre materia y antimateria y por ello cada partícula tiene su correspondiente anti-partícula de la misma masa pero con números cuánticos opuestos.

Existen cuatro tipos de fuerzas elementales en la naturaleza que son la fuerza de gravitación, la fuerza electromagnética, la fuerza débil y la fuerza fuerte. En el Modelo Estándar solamente se toman en cuenta las interacciones electromagnéticas, débiles y fuertes.

Cuando una partícula interactúa con otra la interacción no puede ser in-

Leptones y Anti-leptones					
Partícula	Símbolo	Carga	Masa	spin	No. Leptónico
electrón	e^-	-1	$0.511MeV/c^2$	1/2	+1
muon	μ^-	-1	$0.106GeV/c^2$	1/2	+1
tau	τ^-	-1	$1.78GeV/c^2$	1/2	+1
neutrino del electrón	ν_e	0	~ 0	1/2	+1
neutrino del muon	ν_μ	0	~ 0	1/2	+1
neutrino del tau	ν_τ	0	~ 0	1/2	+1
Anti-Partícula	Símbolo	Carga	Masa	spin	No. Leptónico
positrón	e^+	+1	$0.511MeV/c^2$	1/2	-1
anti-muon	μ^+	+1	$0.106GeV/c^2$	1/2	-1
anti-tau	τ^+	+1	$1.78GeV/c^2$	1/2	-1
anti-neutrino del electrón	$\bar{\nu}_e$	0	~ 0	1/2	-1
anti-neutrino del muon	$\bar{\nu}_\mu$	0	~ 0	1/2	-1
anti-neutrino del tau	$\bar{\nu}_\tau$	0	~ 0	1/2	-1

Tabla 1.1: Propiedades de los leptones y anti-leptones, mostrando algunos de sus números cuánticos.

stantánea, por lo que debe existir un medio llamado *campo*, donde se pueda transportar los cuantos de energía. El principio de incertidumbre de Heisenberg $\Delta t = \hbar/\Delta E$ nos permite crear partículas virtuales con masa $m = \Delta E/c^2$ por un tiempo Δt que es responsable de la interacción. El alcance de esa fuerza está dada por la distancia máxima $c\Delta t = \hbar c/mc^2$ permitida por el principio de incertidumbre. Esto se utiliza para definir el alcance de las fuerzas.

Los fermiones se pueden clasificar en dos tipos de partículas:

Leptones . A este tipo pertenecen las partículas que no poseen interacción fuerte, solamente interacción débil y aquellos que tienen carga eléctrica también poseen interacción electromagnética. Existen seis diferentes leptones, tres cargados eléctricamente y tres neutros. Estas partículas son electrones e , muones μ , taus τ y neutrinos del electrón ν_e , del muon ν_μ y del tau ν_τ , además de sus correspondientes anti-partículas[10].

Los seis tipos de leptones están organizados en tres familias donde cada una de ellas tienen propiedades muy semejantes pero difieren en su masa. Estas son (e^-, ν_e) , (μ^-, ν_μ) y (τ, ν_τ) . Sus números cuánticos están resumidos en la tabla(1.1).

Quarks y Anti-quarks						
Partícula	Símbolo	Carga	Masa	spin	No. Bariónico	Carga de Color
up	u	$+2/3$	$\sim 5MeV/c^2$	$1/2$	$1/3$	rgb
down	d	$-1/3$	$\sim 10MeV/c^2$	$1/2$	$1/3$	rgb
charm	c	$+2/3$	$\sim 1.5GeV/c^2$	$1/2$	$1/3$	rgb
strange	s	$-1/3$	$\sim 0.2GeV/c^2$	$1/2$	$1/3$	rgb
top	t	$+2/3$	$\sim 175GeV/c^2$	$1/2$	$1/3$	rgb
beauty	b	$-1/3$	$\sim 4.5GeV/c^2$	$1/2$	$1/3$	rgb
Partícula	Símbolo	Carga	Masa	spin	No. Bariónico	Carga de Color
anti-up	\bar{u}	$-2/3$	$\sim 5MeV/c^2$	$1/2$	$-1/3$	\overline{rgb}
anti-down	\bar{d}	$+1/3$	$\sim 10MeV/c^2$	$1/2$	$-1/3$	\overline{rgb}
anti-charm	\bar{c}	$-2/3$	$\sim 1.5GeV/c^2$	$1/2$	$-1/3$	\overline{rgb}
anti-strange	\bar{s}	$+1/3$	$\sim 0.2GeV/c^2$	$1/2$	$-1/3$	\overline{rgb}
anti-top	\bar{t}	$-2/3$	$\sim 175GeV/c^2$	$1/2$	$-1/3$	\overline{rgb}
anti-beauty	\bar{b}	$+1/3$	$\sim 4.5GeV/c^2$	$1/2$	$-1/3$	\overline{rgb}

Tabla 1.2: Propiedades de los quarks y anti-quarks mostrando algunos de sus números cuánticos.

Quarks Los quarks son partículas elementales sujetas a interacciones fuertes además de tener interacciones débiles y electromagnéticas. Existen seis diferentes tipos de quarks a estos seis tipos se les cataloga con el sabor.

A diferencia de las demás partículas los quarks tiene carga eléctrica fraccionaria ya sea $+\frac{2}{3}$ ó $-\frac{1}{3}$ de la carga del electrón. Los seis sabores son up (u), charm (c), top(t), down(d), strange(s) y bottom(b), (figura1.1). Estos están organizados en tres familias: (u, d), (c, s) y (t, b) y de las cuales la primera constituye los componentes básicos de la materia nuclear (protones y neutrones), mientras que los quarks de las otras familias no son estables y se crean en interacciones de altas energías. Las masas de los quarks y sus números cuánticos están resumidos en la tabla (1.2).

Al igual que la fuerza electromagnética que está ligada a la carga eléctrica, las fuerzas fuertes están ligadas a una propiedad de los quarks llamada carga de color que posee tres valores diferentes que se han llamado *red*, *green*, *blue*. Los anti-quarks poseen la carga de color opuesta *anti-red*, *anti-green*, *anti-blue*.

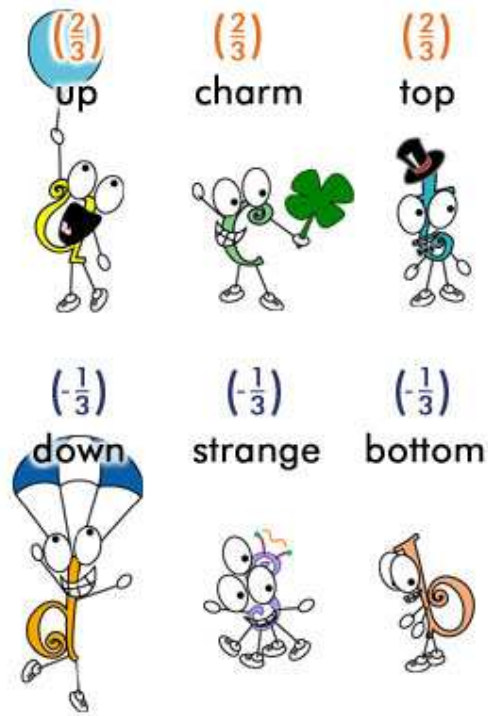


Figura 1.1: Los quarks están clasificados en seis sabores *up*, *charm*, *top*, *down*, *strange* y *bottom*.

1.2. Interacciones

Como se mencionó anteriormente en el Modelo Estándar se consideran tres interacciones aunque en la naturaleza existan cuatro fuerzas.

1. **Interacción Gravitacional.** Es la fuerza que actúa a grandes escalas en todo el universo. Esta interacción es atractiva y se piensa que esta mediada por un bosón llamado *gravitón* del cual aún no hay evidencia experimental. El tratamiento de esta fuerza en este trabajo no es indispensable ya que nos enfocaremos con las interacciones tratadas en el Modelo Estándar.
2. **Interacción Electromagnética.** Esta interacción entre partículas con carga eléctrica está mediada por el fotón de spin 1 y carga eléctrica cero. La teoría que describe estas interacciones es la Electrodinámica Cuántica (QED). Esta fuerza es repulsiva o atractiva dependiendo de que las cargas entre dos partículas que interaccionan sean de igual o de signo contrario. Debido a que la masa del fotón es igual a cero el alcance

Interacciones y sus Mediadores						
Interacción	Partícula	Símbolo	Carga	Masa	Spin	Carga Color
Electromagnética	Fotón	γ	0	0	1	-
Débil	W	W^+	+1	$80\text{GeV}/c^2$	1	-
	W	W^-	-1	$80\text{GeV}/c^2$	1	-
	Z	Z^0	0	$91\text{GeV}/c^2$	1	-
Fuerte	gluon	g	0	0	1	$(r\bar{g}, r\bar{b}, g\bar{r}, g\bar{b},$ $b\bar{r}, b\bar{g},$ $\frac{1}{\sqrt{2}}(r\bar{r} - g\bar{g}),$ $\frac{1}{\sqrt{6}}(r\bar{r} + g\bar{g} - 2b\bar{b}))$

Tabla 1.3: Propiedades de los bosones de las tres interacciones que el Modelo Estándar considera, mostrando algunos de sus números cuánticos.

de la fuerza electromagnética es infinito y la constante de acoplamiento es $\alpha = \frac{1}{137}$.

- Interacción Débil.** Todas las partículas elementales están sujetas a interacciones débiles y está mediada por los bosones W^\pm, Z . Estos bosones tienen masas 80 y $90\text{GeV}/c^2$ y por lo tanto tienen un alcance muy corto del orden de 10^{-16}cm . Esta interacción fue introducida por Fermi en 1934 y desarrollada por Glashow, Salam y Weinberg en los 70's. El acoplamiento de las interacciones débiles para las diferentes partículas está dada por la matriz CKM (Cabibbo, Kobayashi, Maskawa). Esta fuerza es mucho menor que la fuerza fuerte (con un factor del orden 10^{-7}) y que la fuerza electromagnética (con un factor del orden de 10^{-5}), de ahí su nombre.
- Interacción Fuerte.** De las partículas elementales solamente los quarks tienen interacciones fuertes mediadas por los gluones a través de la carga de color sin embargo los gluones por llevar cargas de color pueden interactuar entre sí mismos. La teoría que la describe es la Cromodinámica Cuántica (QCD) y la constante de acoplamiento depende de energía de interacción y tiene un alcance del orden de 10^{-13}cm .

Existen leyes de conservación de los números cuánticos para las diferentes interacciones, están resumidos en la tabla(1.3).

1.2.1. Hadrones, Sistemas Compuestos por Quarks

QCD predice que el potencial de interacción es proporcional a la distancia de los quarks,

$$V_{q\bar{q}} = Kr, \quad (1.1)$$

por lo que no pueden existir quarks en libertad directamente observables. Además predice que una partícula formada por quarks y/o anti-quarks deja de interactuar con el medio solo si las cargas de color están neutralizadas, lo que quiere decir que solamente pueden existir partículas estables constituidas de tres colores diferentes (*red, green, blue*) o (*anti-red, anti-green, anti-blue*) o partículas con un color y un anti-color (*red, anti-red*), (*green, anti-green*), (*blue, anti-blue*). Esta propiedad se le llama confinamiento y es la responsable de la hadronización creando solamente bariones, anti-bariones y mesones. Los bariones están formados por tres quarks de color diferente, los anti-bariones por tres anti-quarks y tres anti-colores diferente y los mesones por un quark y un anti-quark con un color y un anti-color opuestos.

Los hadrones se pueden dividir en dos clases de partículas: mesones y bariones.

Los mesones están compuestos por un quark y anti-quark y son bosones con espín 0 ó 1. A este grupo pertenecen los mesones π o *piones*, los mesones K o *Kaones* y el mesón η y muchos otros más dependiendo del sabor del quark y anti-quark que los componen (figura 1.2).



Figura 1.2: Los mesones están formados por un quark y anti-quark.

Los bariones (y anti-bariones) están compuestos por tres quarks (o tres anti-quarks) y son fermiones con espín 1/2 ó 3/2 (figura 1.3). Agrupan a los nucleones: el protón y el neutrón y partículas inestables, que poseen mayor masa que la de los nucleones, denominados hiperones, como Δ , N^* , Λ , Σ , Ξ , Ω . Salvo el protón (y el neutrón dentro de un núcleo) todos los bariones son inestables.



Figura 1.3: Los bariones están constituidos por tres quarks.

Las fuerzas cromodinámicas ligan a sistemas compuestos de protones y neutrones que forman los núcleos de todos los elementos y sus isótopos conocidos. En estos sistemas los quarks quedan confinados dentro de los nucleones como estructuras neutras de color.

1.3. Materia Cromodinámica.

QCD predice que cuando hay cambios en las condiciones de temperatura y densidades de energía se pueden crear diferentes fenómenos. Cuando hablamos de física nuclear hablamos de bajas energías y de bajas temperaturas. Al aumentar la temperatura se forma un *Gas de Hadrones*, piones y nucleones, que interactúan entre sí. Si aumentamos aún más estos parámetros habrá un cambio de fase creando un estado donde los quarks, anti-quarks y los gluones quedan libres formando Materia Cromodinámica. A esta etapa también se le conoce como *Plasma de Quarks y Gluones* (QGP por sus siglas en inglés).

En la evolución del universo a unos $10^{-5}s$ la densidad de energía era tan alta que el universo se encontraba en una fase de Materia Cromodinámica, al expandirse y enfriarse más se transformó en un Gas de Hadrones y finalmente en materia nuclear.

A fin de poder estudiar experimentalmente estos nuevos estados de la materia se han desarrollado en los últimos 20 años colisionadores de alta energía que permiten hacer chocar núcleos de elementos pesados para obtener densidades de energía y temperaturas extremas suficientes para crear por un breve instante materia cromodinámica. Para ello los experimentos tienen que detectar miles de hadrones que se producen en una colisión y a partir de ellos inferir las propiedades de este nuevo estado.

En los 80's el acelerador SPS del laboratorio del CERN se empezaron

estos experimentos con haces de plomo a una energía en el centro de masa de $19 \text{ GeV}/A$. Se encontró que en colisiones centrales se alcanzaban densidades de energía del orden de $3.5 \text{ GeV}/\text{fm}^3$ y temperaturas de 120 MeV ambos mayores que los valores necesarios para pasar la transición de fase para pasar a la materia de QGP y se demostró que efectivamente se creaba esta nueva fase de la materia por tiempo de unos cuantos fm/c .

A principios del año 2000 se puso en marcha el colisionador RHIC construido en el laboratorio de Brookhaven. Se han hecho experimentos colisionando núcleos de Au a energías de $200 \text{ GeV}/A$ en el centro de masa. Densidades de energías encontradas sobrepasan los $5 \text{ GeV}/\text{fm}^3$ y las temperaturas alcanzan 370 MeV . Se ha encontrado que la materia cromodinámica está altamente relacionada por los campos de color y se comporta como un líquido y no como un gas ideal como se había esperado. Al principios de los 90's se empezó a planear en el laboratorio del CERN el colisionador LHC que sería el siguiente acelerador que alcanzaría energías aún mayores.

En las siguientes secciones discutiremos sobre la realización de los experimentos de este nuevo acelerador y los objetivos que se han planteado para continuar con el estudio de la materia cromodinámica.

1.4. Aceleradores

A lo largo de la historia de la física de altas energías se han diseñado y construido aceleradores que han alcanzado cada vez mayor energía. En los años 30's se creó el primer acelerador en Cambridge que alcanzaba energías de KeV , ahora ya en el año 2007 se construye un acelerador, el más grande del mundo, que alcanzará energías de 7 TeV .

En la actualidad los aceleradores más empleados en los laboratorios de altas energías son de dos tipos, aceleradores lineales (LINACS) y sincrotrones (en los que las partículas describen órbitas circulares) ambos utilizan radio frecuencia para acelerar las partículas.

La trayectoria que recorren las partículas en los aceleradores lineales es rectilínea. Este acelerador proporciona a la partícula cargada pequeños incrementos de energía al pasar por una secuencia de campos electromagnéticos alternos. Se trata de un tanque con alto vacío en cuyo interior se encuentra la estructura aceleradora. Esta consta de tubos metálicos, llamados tubos de deriva, alineados y conectados alternadamente a los electrodos de una fuente

de radio frecuencia. Los tubos de deriva van aumentando de longitud a medida que la partícula adquiere mayor velocidad de manera que siempre este sincronizada con la fase aceleradora de la radio frecuencia. Ver figura 1.4.

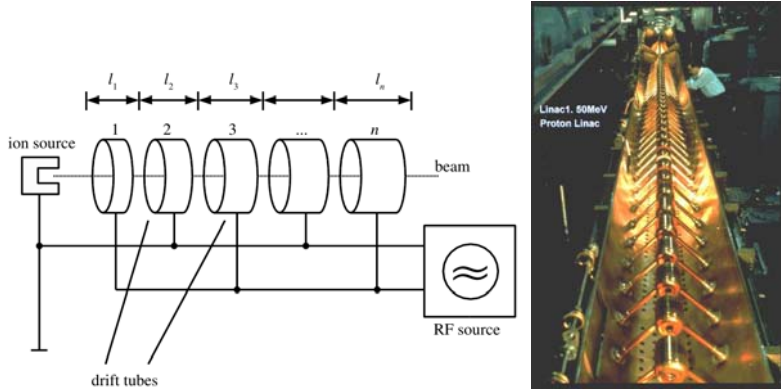


Figura 1.4: A la izquierda se muestra un esquema de un acelerador lineal. A la derecha se puede observar una fotografía del LINAC1 en el CERN.

Para acelerar partículas con mayor eficiencia y poder alcanzar mayores energías se diseñaron aceleradores circulares en los que las partículas pasan repetidamente por la misma sección aceleradora. Para obtener las trayectorias circulares se utilizan electroimanes cuyo campo magnético va aumentando a medida que las partículas tengan mayor velocidad. En la sección aceleradora se utilizan cavidades resonantes en que el campo electromagnético forma ondas estacionarias sincronizadas al paso de las partículas de manera que les imparten energía acelerándolas.

Cada acelerador solamente puede acelerar a un rango de energía por lo que es necesario encadenar una serie de aceleradores para poder alcanzar energías mayores de unos cientos de $MeVs$.

Antes de los 70's todos los aceleradores extraían las partículas del acelerador para hacer colisiones con partículas a un blanco fijo en el laboratorio. En este caso la energía libre en el centro de masa esta dada por,

$$E_{cm} \simeq \sqrt{2m_B E_A} \quad (1.2)$$

donde E_A es la energía del proyectil y m_B es la masa del blanco. En esta época se construyó el primer colisionador, el ISR (Intersecting Storage Rings) en el CERN, consistiendo en dos anillos aceleradores en los que las partículas giran en direcciones opuestas y se hacen chocar una contra otra en un punto

de interacción. Esto tiene la ventaja de que toda la energía cinética de ambos haces está disponible como energía del centro de masa,

$$E_{cm} = E_A + E_B \quad (1.3)$$

Desde entonces todos los aceleradores de más alta energía han sido colisionadores.

En el CERN (Centro Europeo de Investigaciones Nucleares) Ginebra, Suiza, se construye el colisionador LHC (Large Hadron Collider, figura 1.5) el cual cuenta con un anillo de 27 km de longitud y se encuentra entre 50 y 175 metros bajo la tierra, debido a que pasa por abajo de las montañas del Jura. Las partículas se aceleran primero en la cadena de aceleradores del CERN (figura 1.6) para posteriormente introducirlas al LHC. El acelerador colisionará protón-protón a energías de 14 TeV y iones de plomo a energías de 1150 TeV . Si el LHC en vez de un colisionador fuera un acelerador de blanco fijo su energía debería ser de 91 y 700 TeV respectivamente.

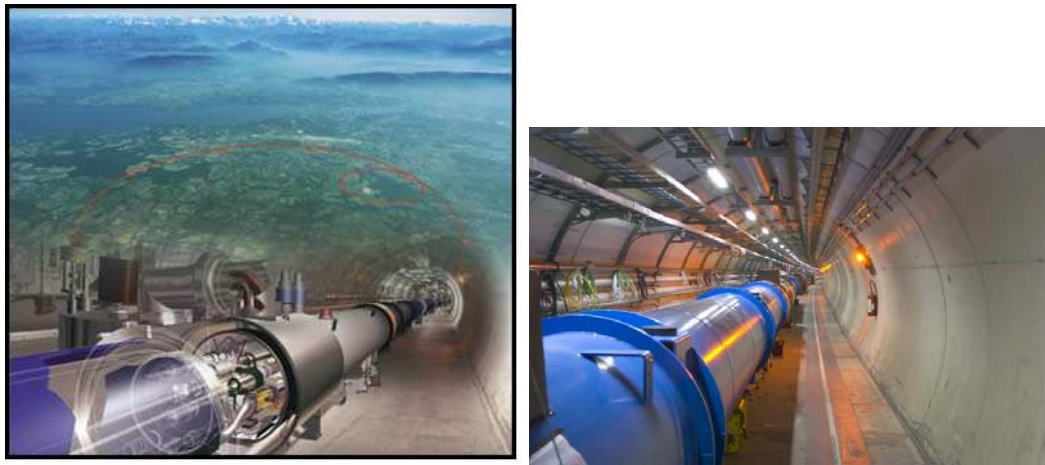


Figura 1.5: La figura de la izquierda muestra un dibujo tridimensional del LHC, en la frontera de Francia y Suiza y uno de los 2000 imanes superconductores que tiene el acelerador. La figura de la derecha muestra una fotografía real del LHC.

La cadena de aceleradores está constituida por dos LINACS, uno como inyector de protones y el otro para el haz de Pb, el PSB (Proton Synchrotron Booster), el PS (Proton Synchrotron), el SPS (Super-Proton-Synchrotron) y por último el LHC. Las energías de cada uno de ellos está dada en la tabla (1.4).

Cadena de Aceleradores Para el LHC		
Acelerador	Dimensión	Energía
LINAC	50 m	50 MeV
Booster	157 m*	14 GeV
PS	600 m*	28 GeV
SPS	7 Km*	450 GeV
LHC	27 Km*	7 + 7 TeV

* Dimensiones de la circunferencia

Tabla 1.4: Energías y dimensiones para los distintos aceleradores que conforman la cadena de aceleradores del proyecto LHC.

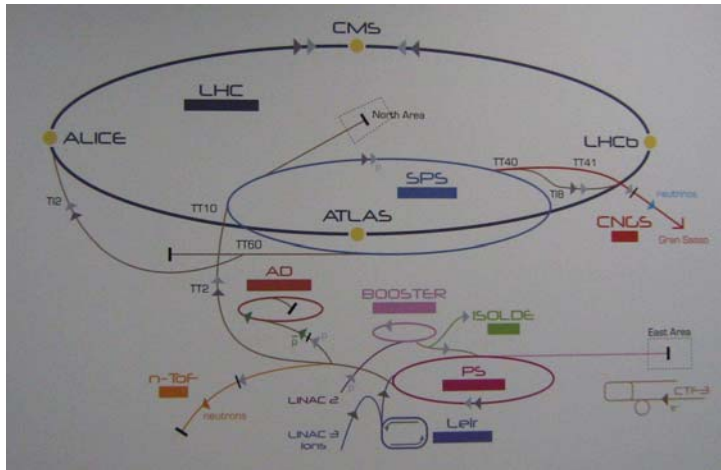


Figura 1.6: Cadena de aceleradores que se encuentra en CERN, Ginebra, Suiza.

1.5. ALICE, ATLAS, CMS y LHC-b

El acelerador LHC tiene cuatro experimentos en construcción ALICE, ATLAS, CMS y LHC-b. Los cuales están localizados en cuatro puntos del anillo donde tendrán lugar las colisiones (ver figura 1.7).

Los primeros tres experimentos están concebidos bajo el mismo principio. Tienen una gran región con un campo magnético intenso, en el centro de la cual interseccionan los dos haces. Una interacción puede producir de cientos a miles de partículas, las que hay que detectar estableciendo sus trayectorias, posición, momento, carga y masa. Para ello se utilizan detectores que usan la interacción de las partículas con la materia para obtener señales del paso de estas. Hay diversos tipos de detectores optimizados para identificar partículas

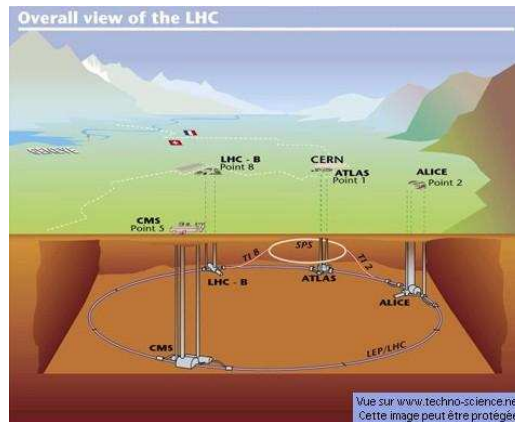


Figura 1.7: El colisionador LHC con los experimentos ATLAS, ALICE, CMS Y LHC-b en los cuatro puntos de interacción.

cargadas o neutras a diferentes energías.

Estas estructuras constan de varios detectores, uno dentro de otro. El más interno es por lo general un detector de vértices con muy alta resolución espacial para determinar el punto de origen de cada partícula cargada. Le sigue una cámara de deriva para determinar las trayectorias de las partículas y de ahí reconstruir su momento. A fin de identificar el tipo de partícula se construyen detectores que tienen como finalidad medir el tiempo de vuelo, la radiación de Cherenkov, la radiación de transición. Para determinar los fotones se utilizan calorímetros electromagnéticos los cuales están hechos de materiales muy densos que permiten determinar su energía. También puede haber calorímetros hadrónicos que absorben la energía de los bariones y mesones. Después de esta capa sólo dos clases de partículas escapan de ser absorbidas: los muones y los neutrinos, ya que poseen un poder de penetración muy alto (figura 1.8). Utilizando espectrómetros y filtros de muones se identifican éstos. Los neutrinos son tan difíciles de detectar que no dejan señal en ningún detector y sus efectos se pueden estimar sólo por la energía faltante (figura 1.9).

Existen otros detectores que sirven para seleccionar los eventos que se quieren estudiar filtrándolos de eventos no interesantes e interacciones con el gas residual. Estos detectores de *triggers* proporcionan una señal muy rápida a todos los demás para que empiecen a adquirir los datos de ese evento. El sistema de adquisición de datos procesa y digitaliza todas las señales

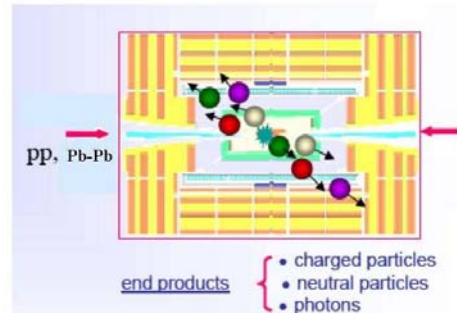


Figura 1.8: Esquema de estructura básica de los experimentos para el LHC.

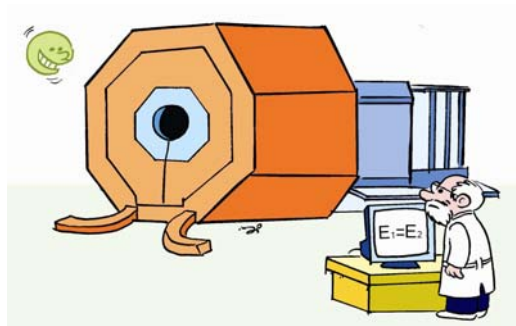


Figura 1.9: Los neutrinos se pueden detectar aún cuando éstos no los absorbe algún material, sólo basta con comparar las energías iniciales y finales.

análogas de los detectores y las almacena utilizando grandes sistemas de cómputo.

Con los datos recopilados de cada detector y cada etapa se puede reconstruir el evento total teniendo las trayectorias proporcionadas por cada dispositivo.

Existen diversos objetivos del proyecto del LHC para los cuales los diferentes experimentos han sido optimizados.

1. El principal objetivo de ALICE es estudiar la Materia Cromodinámica compuesta de quarks, anti-quarks y gluones deconfinados que se crean en los choques de iones pesados ultra-relativistas.
2. ATLAS y CMS están en busca del bosón de Higgs.
3. LHCb estudiará la violación de CP en mesones B que contienen un

quark bottom y que pudieron haber inducido la asimetría entre materia y antimateria en el universo.

Ya que hemos tenido una idea rápida de lo que es el proyecto LHC ahora podemos empezar a platicar quien es y será ALICE y su objetivo. En la figura 1.10

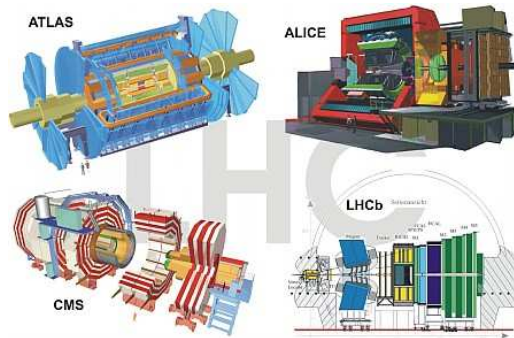


Figura 1.10: Dibujos de los cuatro experimentos ATLAS, ALICE, CMS Y LHC-b.

1.6. ALICE

ALICE que por sus siglas en inglés quiere decir **A Large Ion Collider Experiment**, estudiará las colisiones de iones pesados (plomo-plomo). Donde la energía en el centro de masa será de $5.5 \text{ TeV}/A$ [7]. El objetivo de este experimento será crear Materia Cromodinámica en el primer instante de la colisión. Con esto se podrán estudiar sus propiedades, la evolución dinámica, la re-hadronización y los fenómenos de transición de fase asociados a este nuevo estado de la materia y la evolución del estado hadrónico final hasta que deja de interactuar. En la figura 1.11 se muestra una.

La energía en el centro de masa de $5.5 \text{ TeV}/A$ de iones pesados, hace que el sistema tenga una densidad de energía mucho mayor que la densidad de energía crítica para la transición de fase.

No sólo se colisionarán iones pesados Pb-Pb sino también se colisionarán iones más ligeros para poder variar las densidades de energía y se medirán colisiones de protón-protón para tener una referencia para las colisiones de núcleo-núcleo.



Figura 1.11: ALICE “A Large Ion Collider Experiment”.

Dada la enorme cantidad de partículas y al gran rango de impulsos a las que se producen en esas colisiones se ha diseñado el experimento ALICE con una gran variedad de detectores para poder determinar sus propiedades.

ALICE está constituido por tres regiones, la zona central alrededor del punto de interacción con un imán solenoidal, el espectrómetro de muones con un imán dipolar y los detectores de cero grados a $\sim 100\text{ m}$ del punto de interacción. En la zona central se detectarán e identificarán la mayoría de las partículas cargadas que son producidas cerca del centro del masa: e^\pm , π^\pm , K^\pm , p , \bar{p} , Λ , Σ , Ξ , Ω , etc, impulsos de $100\text{ MeV}/c$ a $20\text{ GeV}/c$. En la zona externa, el espectrómetro de muones estudiará el decaimiento muónico, hadrones como J/Ψ y Υ creados en el primer instante de la colisión. Los calorímetros a cero grados se utilizan para determinar los restos de ambos núcleos y a partir de ello seleccionar eventos con diferentes parámetros de impacto.

Para cada partícula se requiere determinar su origen, si proviene del vértice primario o de un decaimiento o una colisión secundaria, medir su impulso e identificar el tipo de partícula de que se trata. Esto solamente se puede obtener utilizando varios detectores de diferentes tipos que son atravesados por las partículas cargadas. Para partículas neutras solamente se puede determinar su energía por medio de calorímetros.

El diseño de ALICE corresponde a la optimización de estas tareas, por las cuales se construyeron los siguientes detectores (figura 1.12).

1. ITS (Inner Tracking System). Es un detector cilíndrico de seis capas formadas por mosaicos de detectores de silicio con una gran granular-

idad. Este sistema es el más cercano al punto de colisión con un radio interno de 4 *cm*. Su objetivo es medir el punto de origen de las partículas, identificando decaimientos de mesones con charm e hiperones. El ITS tiene 12.5 millones de canales y puede determinar posiciones con precisión de fracción de milímetros.

2. TPC (Time Projection Chamber). La TPC es un detector de gas cilindro de 5 metros de diámetro y 5 metros de largo. Tiene un electrodo central a muy alto voltaje que crea un campo de deriva uniforme del centro a los extremos del cilindro, donde se encuentran cámaras multilámbricas que amplifican la ionización producida por las partículas al atravesar el volumen de gas. La TPC obtiene información tridimensional de la trayectoria de las partículas y de su ionización específica que se utiliza para determinar el impulso e identificar partículas a bajas energías.
3. TRD (Transition Radiation Detector). El TRD es un detector cilíndrico que le sigue a la TPC. Esta compuesto por un arreglo de 5 capas de radiadores y cámaras de deriva en las que los electrones producen radiación de transición en forma de rayos X que son detectados en las cámaras que tiene Xe como gas. Este detector tiene 1.2 millones de canales y discrimina entre electrones y piones. Su objetivo es reconstruir J/Ψ y Υ por su decaimiento leptónico, en e^\pm .
4. TOF(Time-of-Flight). El TOF tiene un diámetro interno de 7.4 *m* y una longitud de también de 7.4 *m*, contiene a todos los detectores anteriores. Se divide en dieciocho sectores azimutales y cada sector constituye cinco módulos que contienen MRPCs (Multi Gap Resistive Plate Chambers) y están ensamblados juntos a un supermódulo. Su objetivo es medir el tiempo de vuelo de las partículas que lo atraviesan con un resolución temporal de 50 *pseg* lo que permite identificar *piones*, *kaones* y *protones* a impulsos entre 0.3 y 6 *GeV/c*.
5. HMPID (High-Momentum Particle Identification Detector). El HMPID es un detector de anillos de Cherenkov con una área de 10 *m*² y se encuentra a 4.9 *m* del punto de colisión. El HMPID reforzará la capacidad de identificación de partículas más allá del rango de momento permitido por la pérdida de energía que ya han medido el ITS, la TPC y el TOF. EL HMPID fue diseñado para extender la identificación de π/K y K/p con valores del momento de 3 *GeV/c* y 5 *GeV/c* respectivamente.
6. PHOS(Photon Spectrometer). Es un calorímetro electromagnético compuesto por arreglos de $PbWO_4$ con una matriz de 56×64 cristales,

operando a una temperatura de $-25^{\circ}C$. La señal de los centelladores se detecta por diodos APD (Avalanche Photo-Diode). Está optimizado para medir fotones, π^0 y mesones *eta* en los rangos de momento $\sim 0.5 - 10$, $1 - 10$ y $2 - 10$ GeV/c respectivamente. El PHOS también detectará hadrones cargados y neutros; hadrones, piones, kaones, protones y antineutrones.

7. EMCAL(Electromagnetic Calorimeter). Es un calorímetro electromagnético hecho de un sandwich de Pb y centellador con 12,672 celdas. Tiene la forma de un cuarto de cilindro alrededor del detector TOF. Tiene como objetivo detectar fotones y jets de alta energía.
8. FMD(Foward Multiplicity Detector) Dentro del detector central a ambos lados del punto de interacción y a ángulos pequeños existe un detector formado por tres anillos de detectores de silicio con segmentación muy fina para medir la multiplicidad de partículas cargadas con 2.2 millones de canales.
9. V0(Vertex Zero) Consiste de dos anillos centelladores ambos lados del punto de la interacción. Tiene como objetivo generar el disparo seleccionando los eventos de interés y discriminando entre colisiones entre los dos haces y colisiones de un haz con el gas residual.
10. PMD (Photon Multiplicity Detector) Este detector se encarga de estudiar la multiplicidad de los fotones. Se basa en el paso de un fotón a través de un convertidor que transforma la energía de este en una lluvia de electrones, teniendo así una señal de voltaje en celdas que conforman al detector. El detector está posicionado a una distancia mínima de 5 *cm* y máxima de 8m del punto de colisión.
11. Espectrómetro de Muones. Está situado a un lado de los detectores centrales después de un absorbedor de cuatro metros de largo que frena a todas las partículas excepto a los muones. El espectrómetro consiste de un gran dipolo de 0.6 *T* y 5 *m* de largo. El paso de los muones se detecta con cinco pares de cámaras multialámbricas con un total de un millón de canales. Su objetivo es reconstruir pares de muones que pueden venir de un decaimiento leptónico de la J/Ψ o de las resonancias Υ .
12. ZDC(Zero Degree Calorimeter) Consiste de dos calorímetros hadrónicos a ambos lados del vértice, que detectan a los espectadores de la colisión (aquellos protones y neutrones de los proyectiles de plomo que no interaccionaron). Están situados a 116 *m* del punto de interacción.

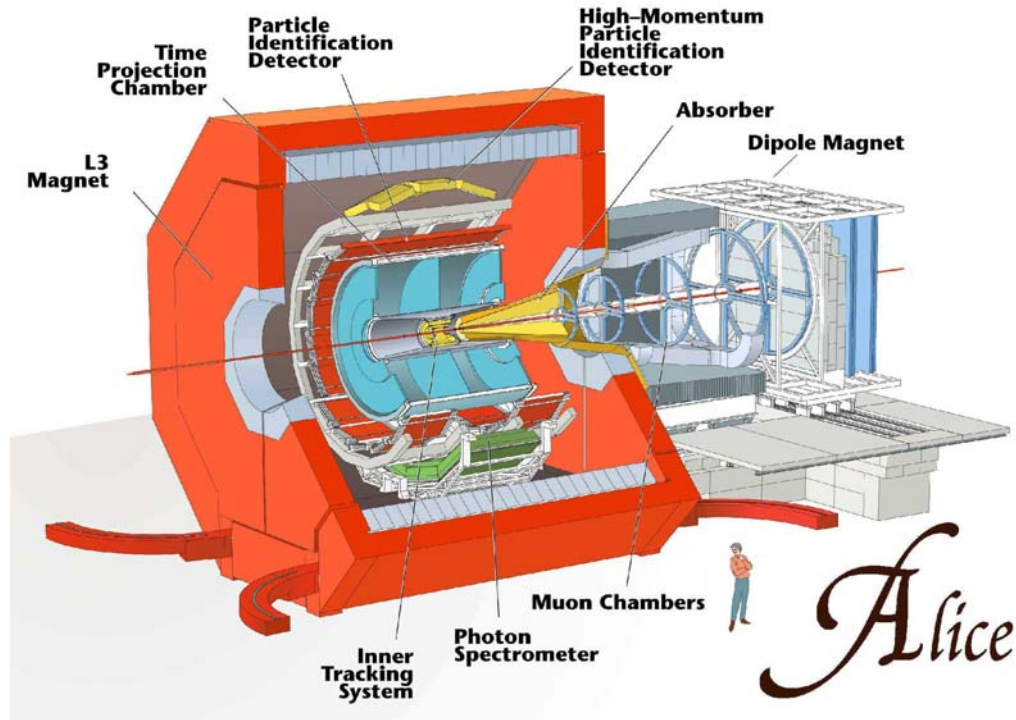


Figura 1.12: Ubicación de los detectores que conforman ALICE.

En la figura 1.13 se muestran diferentes etapas de la insatlación del experimento ALICE.

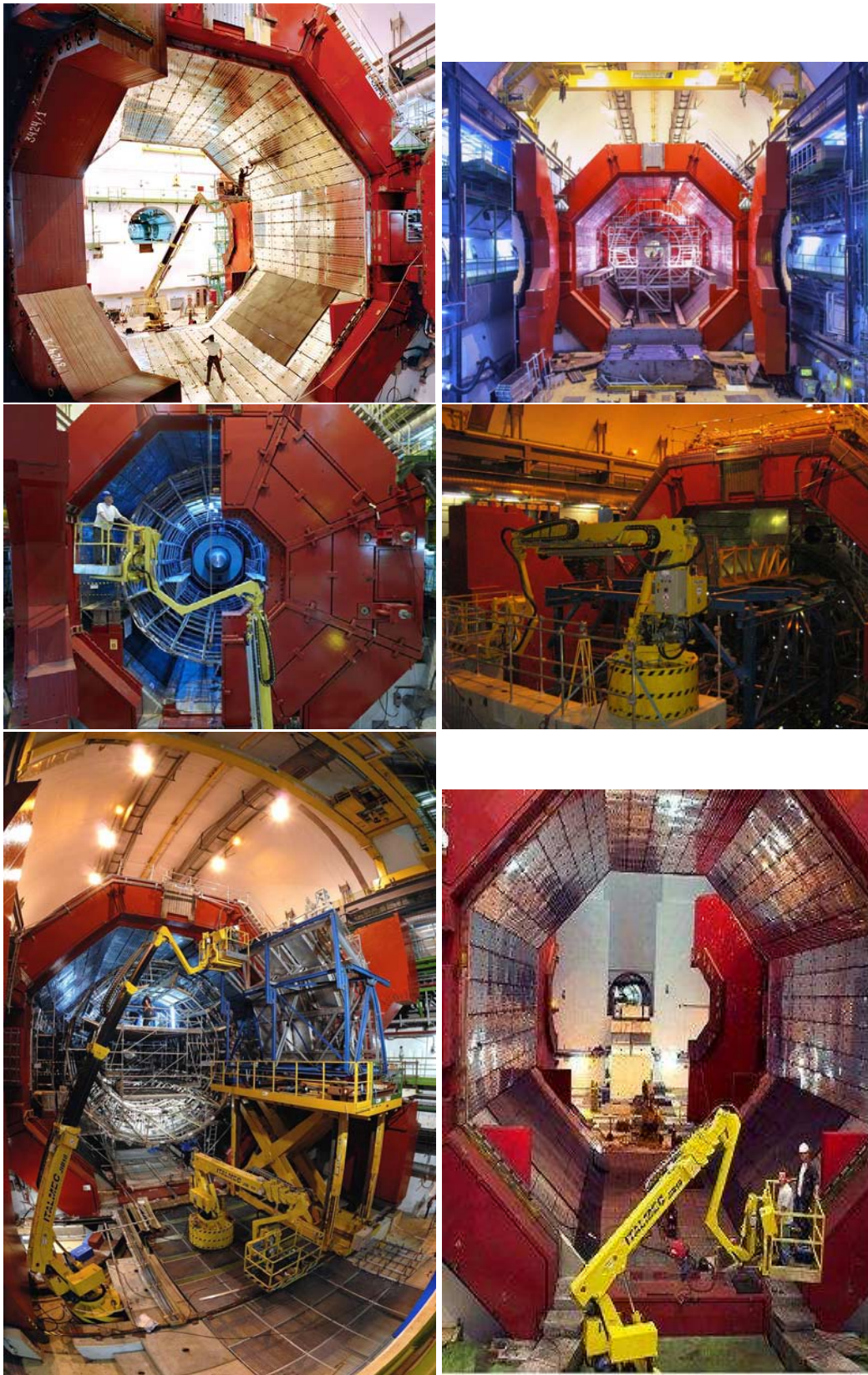


Figura 1.13: ALICE en sus distintas etapas de instalación.

Capítulo 2

Detector V0 para el Experimento ALICE

En el diseño y construcción de detectores existen diversos tipos, pueden ser detectores de estado sólido, de centelleo, de gas, de luz Cherenkov, de radiación de transición . Este capítulo se enfocará a explicar los detectores de centelleo ya que estos son los que se utilizaron en el detector V0. Para ello esto se explicará de forma breve como interaccionan las partículas con la materia.

2.1. Interacción Radiación-Materia

El proceso de interacción de radiación con materia es sumamente importante ya que es la base para todos los dispositivos de detección de partículas. Se hablará de partículas específicamente y no de radiación ya que es el objetivo de este trabajo. En general al interaccionar las partículas con la materia le deposita energía que puede manifestarse en forma ionización, excitación de los átomos, emisión de luz y de rayos X. La medición de estas señales va a permitir determinar ciertas propiedades de las partículas dependiendo del tipo del detector.

Un detector lo podemos definir de la siguiente forma: Es un dispositivo que convierte la pérdida de energía de las partículas que lo atraviesan en una señal eléctrica que puede ser leída por medio de dispositivos electrónicos. Las partículas interaccionan con la materia de dos maneras, por colisiones elásticas o inelásticas con los electrones o núcleos de los átomos del material. Las partículas pierden energía conforme van penetrando el material.

A fin de poder describir el proceso de pérdida de energía en función del grosor del material es necesario determinar las probabilidades de interacción que van a depender de la sección eficaz.

2.1.1. Sección Eficaz

La sección eficaz diferencial es la probabilidad que tiene un flujo F de partículas de energía E de interactuar con un blanco y que sean dispersadas en un ángulo sólido Ω . La diferencial de la sección eficaz esta dada por:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega}(E, \Omega) = \frac{1}{F} \frac{dN_s}{d\Omega} \quad (2.1)$$

Donde N_s es el número de partículas por unidad de tiempo que son dispersadas. La sección eficaz total esta dada por la integral de la sección diferencial sobre todo el ángulo sólido $\frac{d\sigma}{d\Omega}$.

$$\sigma(E) = \int \frac{d\sigma}{d\Omega} d\Omega \quad (2.2)$$

σ

La probabilidad de que una partícula no interactúe en una distancia x esta dada por:

$$P_{int}(x) = \exp -x/\lambda \quad (2.3)$$

donde λ es el camino libre medio que es proporcional al inverso de la sección eficaz:

$$\lambda = 1/N\sigma \quad (2.4)$$

2.1.2. Radiación y sus efectos

Hay dos tipos de radiación que interactúan con la materia,

Radiación Cargada. Pueden ser electrones, muones, piones o núcleos atómicos. Este tipo de radiación interactúa electromagnéticamente con la materia y puede producir ionización, excitación o emisión de luz Cherenkov.

Radiación neutra. Pueden ser fotones, neutrones, neutrinos, etc. Los fotones en especial al interactuar pueden producir tres efectos: efecto fotoeléctrico, efecto Compton, producción de pares. La probabilidad de

que suceda alguno de ellos depende de la energía del fotón. En la figura 2.1 se muestra la probabilidad de estos procesos en la interacción de fotones con Pb en el intervalo de energías de 0.01 a 100 MeV. Las otras partículas neutras solo van a interactuar con la materia por medio de colisiones con esta.

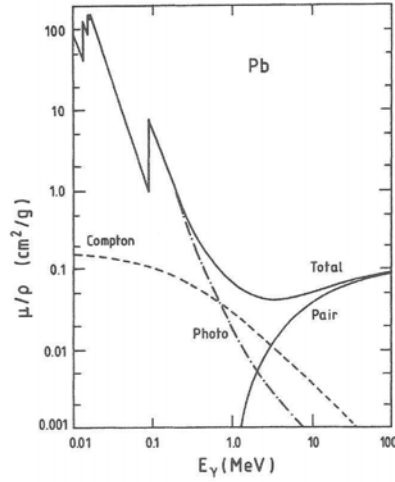


Figura 2.1: La energía de los fotones al interactuar con la materia es de suma importancia para tener uno de los tres efectos de radiación electromagnética. Específicamente en esta gráfica interactúan los fotones con un blanco de Pb.

2.1.3. Fórmula de Bethe-Bloch

Las partículas cargadas al interactuar con la materia van a perder energía por los diferentes procesos antes mencionados. Tomando en cuenta su interacción con la nube electrónica de un átomo y su núcleo, se ha derivado una fórmula para calcular la pérdida de energía que contiene los efectos relativistas y cuánticos y es conocida como la fórmula de Bethe-Bloch. Esta dada por:

$$-\frac{dE}{dx} = 2\pi N_a r_e^2 m_e c^2 \rho \frac{Z z^2}{A \beta^2} \left[\ln \left(\frac{2m_e \gamma^2 v^2 W_{max}}{I^2} \right) - 2\beta^2 - \delta - 2\frac{C}{Z} \right] \quad (2.5)$$

donde,

r_e : radio clásico del electrón

m_e : masa del electrón

I : potencial promedio de ionización

W_{max} : máxima transferencia de energía en una sola colisión = $\frac{2m_e c^2 \eta^2}{1+2s\sqrt{1+\eta^2+s^2}}$

donde $s = \frac{m_e}{M}$, $\eta = \beta\gamma$, $\beta = v/c$ y

$\gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2}$,

N_a : Número de Avogadro

Z : Número atómico de material

A : Peso atómico de material

z : la carga de la partícula.

δ es la corrección por densidad y C/Z la corrección por las capas atómicas

Cuando empezamos esta sección dijimos que los detectores de ALICE están diseñados para detectar partículas de mínima ionización ¿porqué?

La fórmula de Bethe-Bloch es de suma importancia en este tipo de partículas ya que según el comportamiento de la fórmula nos puede indicar si la partícula es o no de esta característica.

A energías no relativistas la pérdida de energía $\frac{dE}{dx}$ se determina por el factor $\frac{1}{\beta^2}$, esta decrece conforme la velocidad crece alrededor de $v = 0.96c$, donde se alcanza un valor mínimo y este aumenta logarítmicamente hasta llegar a un valor constante en la pérdida de energía. Al alcanzar el valor mínimo en la fórmula de Bethe-Bloch, a la partícula se le denomina *partícula de mínima ionización* (MIP, por sus siglas en inglés). En este punto el MIP alcanza un velocidad $\beta\gamma \approx 4$ con su energía tres veces su masa en reposo (figura 2.2). Estas partículas ya se consideran relativistas. Cuando la velocidad es aún mayor aumenta la pérdida de energía y va llegar una región en la cual la pérdida de energía es constante independientemente de que tan grande sea esa velocidad, a esta región se le llama meseta de Fermi[4].

Las partículas que se producen en colisiones de iones pesados ultra-relativistas, tienden a escapar por el vértice de la colisión con energías mayores a su masa en reposo produciendo así mínima ionización en los detectores de ALICE. El diseño de estos detectores tiene que estar basado en la detección de este tipo de partículas, ya que si pueden detectar estas partículas detectarán cualquier otra.

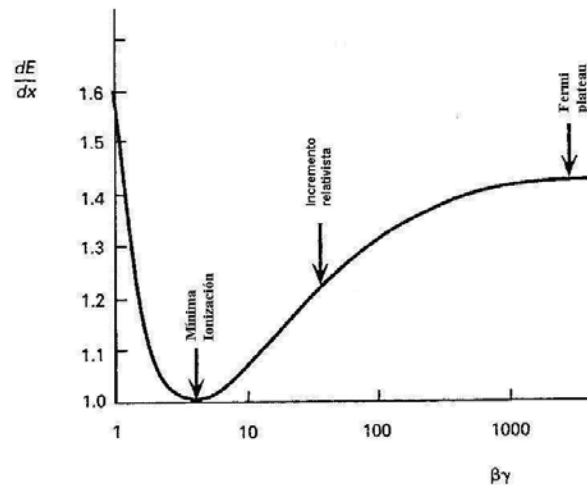


Figura 2.2: La gráfica muestra la pérdida de energía de las partículas cargadas, como función de su velocidad: ecuación de Bethe-Bloch. La pérdida de energía depende del tipo de partícula y el medio en el que interacciona esta[3].

2.2. Detectores Centelladores

Los contadores centelladores son aquellos que están constituidos por un material centellador, una guía de luz (si en su caso lo requiere) y un dispositivo encargado de convertir luz en una señal eléctrica llamado tubo fotomultiplicador (PMT, Photon Multiplier Tube). El material centellador tiene la propiedad que al pasar una partícula por el material, esta excita a una molécula del medio regresando esta última a su estado base produciendo un fotón. Este pasa por medio de guías de luz hasta el PMT y produciendo una señal de voltaje. El tamaño de la señal generada por el PMT es proporcional a la pérdida de energía de la partícula incidente en el centellador.

2.2.1. Materiales Centelladores

Hay diversos tipos de materiales centelladores pero no cualquiera se puede usar como detector, ya que necesitamos que sea transparente a su propia luz. Hay algunos centelladores que absorben esta luz y no nos permiten extraerla para hacer mediciones.

Los tipos de centelladores que se pueden usar para detección de partículas son:

Centelladores Inorgánicos Estos centelladores tienen una estructura cristalina pero no trabajan como cristales puros. Los cristales puros tienen su banda de valencia, su banda de conducción y por supuesto la banda prohibida. Como sabemos los electrones que están en la banda de valencia están completamente ligados a esta, en cambio en la banda de conducción, los electrones tienen suficiente energía como para migrar libremente por el cristal. En los cristales puros la banda prohibida no puede estar ocupada por ningún electrón. La absorción de energía en el cristal puede liberar un electrón de la banda de valencia llegando así a la banda de conducción y al desexcitarse el electrón vuelve a su estado original, la banda de valencia, produciendo un fotón con mayor frecuencia que la del rango de luz visible. Esto se debe a que el electrón debe saltarse la banda prohibida y esta tiene una altura energética excesiva de 4 a 5 eV lo cual no permite que el fotón caiga en el rango de luz visible y el uso de cristales puro es ineficiente para los detectores de centello. Para arreglar esto, se les agrega a los centelladores ciertas cantidades de impurezas llamadas *activadores*, que permiten niveles de energía intermedios dentro de la banda prohibida. Con esto los electrones que son excitados suben a estos niveles permitiendo que el fotón que se produce al desexcitarse quede dentro del rango visible[2].

Una partícula cargada que interacciona con el centellador puede crear varios electrón-hueco por la elevación de electrones desde la banda de valencia. Un hueco puede migrar hasta la posición de impurezas e ionizar, mientras que el electrón libre encuentra un hueco a llenar en el activador. Este átomo de impureza está excitado y es altamente posible que al desexcitarse emita un fotón en el rango de luz visible.

Centelladores Orgánicos Son los plásticos centelladores los más usados. Están compuestos por un arreglo complicado de moléculas, ya que son polímeros y al tener dobles enlaces el material tiene la característica de ser centellador .

El plástico centellador contiene anillos de benceno. El benceno es un hidrocarburo aromático, que en el caso del plástico centellador es policíclico (esto quiere decir que su estructura molecular tiene más de dos anillos de benceno)[1].

Los materiales aromáticos tienen en general un cierto número de átomos de carbono unidos en una cadena, en el caso del benceno la cadena forma un hexágono y por lo tanto tiene 6 átomos de carbono (figura 2.3). También los aromáticos tienen una característica importante, tienen enlaces simples y dobles, los cuales están intercalados entre sí. A los

dobles enlaces se les conoce como enlaces π . Estos materiales tienen una estructura plana y en cada unión de carbonos existen los electrones π , por lo que en promedio le toca 1.5 electrones π a cada núcleo de carbón.

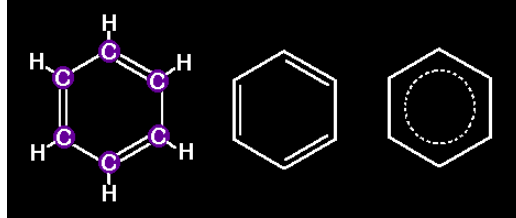


Figura 2.3: Estructura del anillo de benceno.

Como se mencionó anteriormente los centelladores producen luz por medio de las desexcitaciones en las moléculas. En el caso de los centelladores orgánicos la luz se genera por los electrones que se mueven de niveles de energías llamados *orbitales moleculares* π .

La partícula al entrar al centellador puede llegar a excitar uno de esos electrones π y al momento de desexcitarse producen fotones.

El proceso físico en el centellador parte obviamente de la molécula. Cuando se expone a los cambios de temperatura, esta puede tener estados vibracionales. Estos cambios de temperatura pueden darse debido al múltiple paso de partículas cargadas que interactúan con el centellador. Los niveles de energía en los que los electrones suben o bajan son propiamente de la molécula y los átomos están ligados entre sí, por lo que cuando se excitan y se desexcitan por el paso de estas partículas cargadas producen fotones en el rango del visible. La distancia interatómica ayuda a saber que tan eficiente es o no nuestro centellador, entre más pequeña sea esta aumenta la probabilidad de que haya átomos excitados dentro de la molécula.

Una de las características más importantes de estos centelladores es su tiempo de decaimiento que corre alrededor de unos cuantos nanosegundos o menos.

Un aproximación del tiempo de evolución del proceso de re-emisión está dada por:

$$N = \frac{N_0}{\tau_d} \exp\left(\frac{-t}{\tau_d}\right) \quad (2.6)$$

donde N es el número de fotones emitidos en un tiempo dado, N_0 número total de fotones emitidos y τ_d la constante de decaimiento.

2.2.2. Fibras Corredoras de Frecuencia

Existen diferentes materiales que se pueden usar como guías de luz. Están aquellos que son tabletas de polímeros muy transparente y debido a que su índice de refracción radica en 1.5 tienen reflexión total interna y esto les permite conducir la luz del centellador al PMT. También se pueden usar fibras corredoras de frecuencia (WLS *Wave Length Shifter Fiber*) que absorben la luz del centellador, la re-emiten en otra frecuencia y atrapan una fracción de esta luz dentro de la fibra óptica transportándola al fotomultiplicador.

Una fibra óptica usualmente está hecha de vidrio o plástico para poder transmitir la luz. La fibra óptica tiene un arreglo de materiales de diferentes índices de refracción para mantener la luz rebotando dentro de la fibra sin que haya pérdidas de esta. La fibra óptica es un cilindro dieléctrico que sirve como guía de onda que transmite la luz a lo largo del eje por medio de reflexión total interna. Esta puede constar de un núcleo y una coraza llamada *cladding*. El índice de refracción del núcleo debe ser mayor que el del *cladding*.

Las fibras WLS están dopadas con un material corredor de frecuencia fluorescente de alta eficiencia. La fibra absorbe la luz azul del centellador y la re-emite en el verde. La luz azul tiene una longitud de onda en el rango $425 - 490 \text{ nm}$ y la longitud de onda de la luz verde está entre $490 - 560 \text{ nm}$. Las fibras pueden absorber en otras longitudes de onda pero no son tan eficientes como con la luz azul.

La eficiencia que tienen las fibras se toma como la probabilidad de que cada fotón que absorben se re-emita un fotón en la frecuencia corrida. En promedio la eficiencia de las fibras está entre el 70 % y el 80 %. La probabilidad de que un fotón emitido sea atrapado dentro de la fibra por reflexión interna es $\sim 4 \%$

2.2.3. Fotomultiplicadores

La principal función del PMT es captar la luz de un medio y transformarla en una señal eléctrica que pueda ser procesada electrónicamente y digitalmente. El principio del PMT radica en el efecto fotoeléctrico, explicado por Einstein en 1905.¹

¹Es probable que el que lea este trabajo sea alguien que se dedique al área de ciencias, pero en caso de un buen curioso lo lea, el efecto fotoeléctrico se origina cuando un fotón lleva la suficiente energía como para poder sacar un electrón de su órbita absorbiendo toda la energía del fotón convirtiéndose así en un fotoelectrón. La ecuación que rige este

Hay diferentes maneras de amplificar la señal dentro de los PMTs, los más usual es utilizando un arreglo de dinodos pero para detector V0 se utilizó un sistema de mallas (*Mesh Type PMT*).

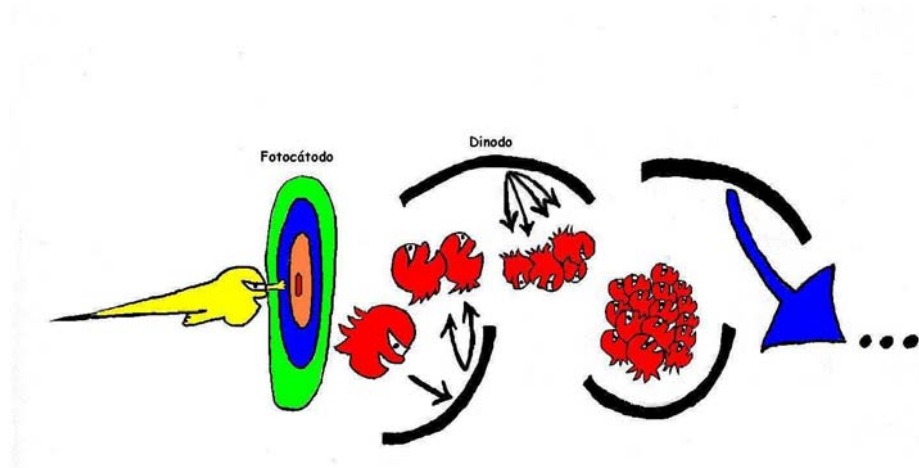


Figura 2.4: Fotón penetrando al fotocátodo produciendo un fotoelectrón que es amplificado por medio de los dinodos.

Un PMT convencional esta compuesto por un tubo al alto vacío con una ventana transparente a la luz en su interior hay dos electrodos, fotocátodo y el ánodo y entre ellos hay una serie de electrodos llamados dinodos. El fotocátodo tiene por objeto en convertir la luz incidente en electrones utilizando el efecto fotoeléctrico. El fotocátodo esta depositado sobre la pared interior de la ventana y contiene elementos con una energía de trabajo lo suficientemente baja para que los fotones de luz visible tengan la suficiente energía para liberar electrones. Los fotoelectrones son acelerados hacia el primer dinodo y al chocar con el produce más electrones estos a su vez son acelerados al segundo siendo amplificados nuevamente y así sucesivamente. Un PMT tiene entre 8 y 14 dinodos lo que da amplificaciones de 10^5 a 10^7 . Al final el tubo fotomultiplicador tiene un arreglo electrónico de varias resistencias y condensadores el cual se va a encargar de convertir esta señal de corriente en una señal de voltaje. Esto es porque es más fácil poder obtener la señales de voltaje y leerlas en nuestros módulos de electrónica.

La probabilidad de que un fotocátodo pueda producir o no fotoelectrones

efecto esta dada por: $E = h\nu - \phi$ donde E es la energía cinética del electrón emitido, ν la frecuencia de la luz incidente y ϕ la función trabajo.

puede expresarse como:

$$\eta = \frac{\text{No. de fotoelectrones obtenidos}}{\text{No. de fotones incidentes al catodo}} \quad (2.7)$$

Esta probabilidad recibe el nombre de eficiencia cuántica η . Lo que nos dice que probabilidad existen de que un fotón incida en el fotocátodo y libere un fotoelectrón.

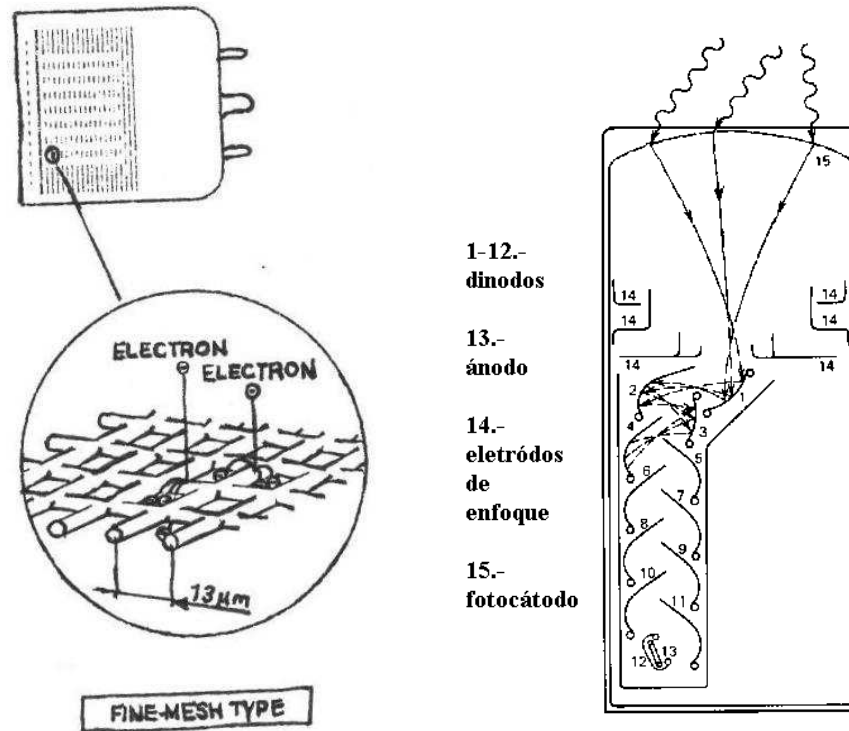


Figura 2.5: PMT Mesh Type a la izquierda. Fotomultiplicador convencional a la derecha.

Los PMT *Mesh Type* tiene una estructura de mallas finas como dinodos muy cercanas entre sí. Esto hace que puedan operar en presencia de campos magnéticos que deflectarían a los electrones en un PMT normal haciendo que no funcione.

2.3. Objetivos del Detector V0

El V0 es uno de los detectores del experimento ALICE que tiene como función el generar la señal de disparo (trigger) para los otros detectores haciendo la primera selección de eventos. Debe discriminar entre eventos debidos

a las colisiones de dos haces y colisiones de un haz con el gas residual, que son eventos de fondo. Para colisiones de Pb-Pb debe dar información sobre el parámetro de impacto entre los dos núcleos a partir de la multiplicidad de partículas que detecta. Otra función que tiene es medir la luminosidad a partir de el número de interacciones por segundo que detecta. Validará el trigger del espectrómetro de muones y servirá de filtro de un gran ruido esperado, sobretodo, en colisiones de p-p.

El V0 está construido por dos anillos de detectores centelladores, V0A y V0C, de los cuales el primero es construido en México y el segundo en Lyon, Francia.

Ubicado a ambos lados del punto de interacción y sobre el eje de la tubería del colisionador, el V0A está a la izquierda a 3.273 m y el V0C se encuentra a la derecha a 80 cm . V0 (*Vertex Zero*) se identifica con V por el vértice de la colisión y es un *trigger* de nivel cero.

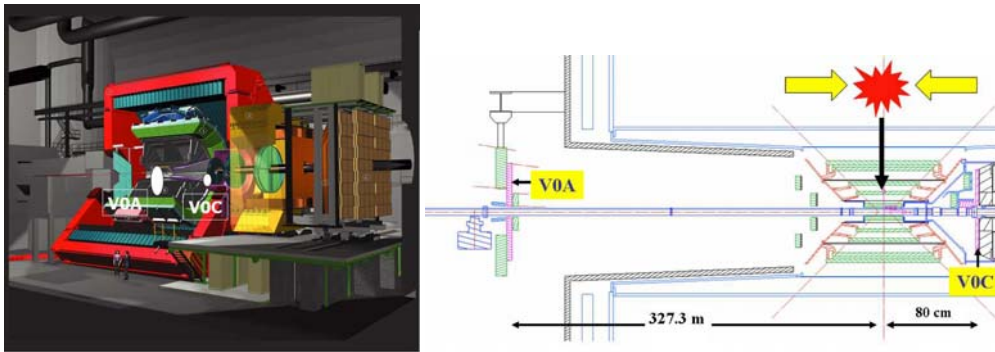


Figura 2.6: El diagrama muestra la ubicación de los dos detectores V0A y V0C en el experimento ALICE

A fin de poder discriminar entre interacciones haz-haz y haz-gas residual el V0A y el V0C deben detectar a las partículas que inciden sobre ellos con una resolución en tiempo mejor que 1 ns . Para poder determinar la multiplicidad de partículas producidas en las colisiones ambos detectores están segmentados en treinta y dos celdas formadas por cuatro anillos y ocho sectores.

El arreglo está hecho tal manera que cuando las partículas lleguen a los dos detectores se medirá para cada uno de ellos el tiempo de llegada de la partícula más rápida con respecto al momento de cruce de los dos haces. Las interacciones entre dos haces tienen lugar en una región centrada en el origen

cuyas dimensiones están dadas por la secciones transversales de los haces y el ángulo de cruce. A esto se le llama el diamante de la interacción y para ALICE se asume que las colisiones tienen distribuciones gaussianas alrededor del origen, con desviación estándar en cada uno de los ejes de $STD_z = 5 \text{ cm}$ y $STD_x = STD_y = 0.1 \text{ cm}$. Si los tiempos de llegada de las partículas a los dos detectores no corresponden a interacciones dentro del diamante son descartadas por provenir de interacciones de un haz con el gas residual.

2.4. Pseudorapidez

La pseudorapidez es una variable invariante relativista que se utiliza cuando no podemos obtener la rapidez directamente, esto ocurre cuando no se tiene la masa de la partícula y solo se conoce el ángulo θ con el que la partícula incide.

La pseudorapidez está dada por la expresión:

$$\eta = -\ln \left(\tan \left(\frac{\theta}{2} \right) \right) \quad (2.8)$$

Los detectores tienen un rango de pseudorapidez para el V0A y V0C de $(2.8 > \eta > 5.1)$ y $(-3.7 < \eta < -1.7)$ respectivamente. Estos rangos se obtienen por medio de simulaciones, que nos permiten ver el número de partículas por unidad de pseudorapidez que llegan a el detector. Estas simulaciones son hechas con un software llamado *Ali-Root*, el cual está hecho para conocer específicamente las características que tienen los detectores en el experimento de ALICE.

Nos podemos guiar con la tabla 2.1 para ver los rangos de pseudorapidez y aceptación angular para los dos detectores del V0, donde la posición del V0A es a lo largo del eje $Z_A = 3.273 \text{ m}$ y para el V0C es $Z_C = 80 \text{ cm}$.

La segmentación de los dos detectores está hecha de manera que los cuatro anillos cubran intervalos iguales en pseudorapidez, esto determina que los radios deben tener. En la figura 2.7 se muestra una distribución de pseudorapidez de partículas cargadas en colisiones de p-p a 14 TeV en la que se muestran las regiones que cubren V0A y V0C.

anillo	V0A			V0C		
	η_{max}/η_{min}	$\theta_{max}/\theta_{min}$	Radio <i>cm</i>	η_{max}/η_{min}	$\theta_{max}/\theta_{min}$	Radio <i>cm</i>
0	5.1/4.5	0.7/1.3	4.1/7.8	-3.7/ - 3.2	177.0/175.3	4.2/6.5
1	4.5/3.9	1.3/2.3	7.8/13.5	-3.2/ - 2.7	175.3/172.4	6.5/10.6
2	3.9/3.4	2.3/3.8	13.5/22.1	-2.7/ - 2.2	172.4/167.5	10.6/17.7
3	3.4/2.8	3.8/6.9	22.1/40.0	-2.2/ - 1.7	167.5/159.8	17.7/29.4

Tabla 2.1: Dimensiones de los anillos de los detectores V0A y V0C con rangos de pseudorapidez y sus aceptancias angulares.

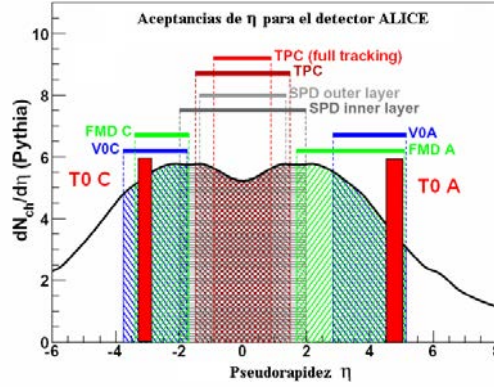


Figura 2.7: Rangos de pseudorapidez para los detectores del V0.

2.5. Multiplicidad

En colisiones de iones pesados en general es importante el parámetro de impacto b , con el que los núcleos colisionaron. El parámetro de impacto es aquella distancia entre los dos núcleos que es perpendicular al vector velocidad de cada uno partiendo del centro de cada uno de ellos antes de la interacción.

El parámetro de impacto ayuda a identificar que tan periférica o central fue nuestra colisión. Si b tiende a cero quiere decir que la colisión fue central pero si es mucho mayor quiere decir que fue muy periférica.

Este parámetro no lo podemos medir directamente por lo que recurrimos a una medida llamada *multiplicidad*. En el momento de una colisión de iones pesados se generan muchísimas partículas dependiendo de la energía de los iones y de b , saber el número de partículas que se generaron nos permite saber que tan central o no fue la colisión, por lo que este número que se genera de

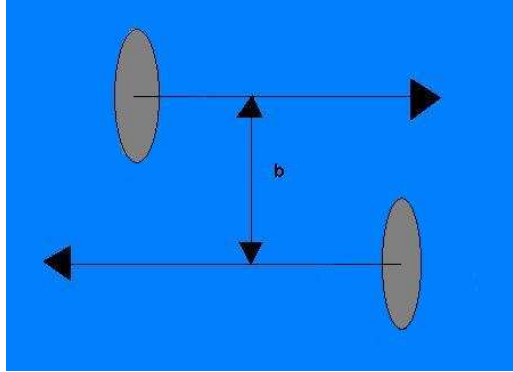


Figura 2.8: El parámetro de impacto b es la distancia que existe entre los centros de las dos partículas. Los núcleos no se ven como esferas debido a la contracción relativista.

partículas se llama *multiplicidad*. Entonces entre mayor sea la multiplicidad menor será b .

La probabilidad de que exista una interacción entre dos núcleos está dada por el área que presentan los mismos (figura 2.9). Es decir,

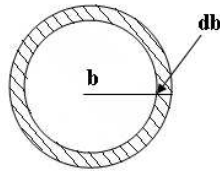


Figura 2.9: La probabilidad de que interaccionen dos núcleos está dada por el área de estos.

$$d\sigma(b) = 2\pi b db \quad (2.9)$$

A energías relativistas la sección eficaz total en colisiones de Pb-Pb se aproxima a:

$$\sigma = \int_0^{R_1+R_2} 2\pi b db = \pi(R_1 + R_2)^2 \quad (2.10)$$

Si se tiene la multiplicidad como dependencia del parámetro de impacto, la derivada de la sección eficaz como dependencia del parámetro de impacto y de la multiplicidad se observa que de la figura 2.10-2

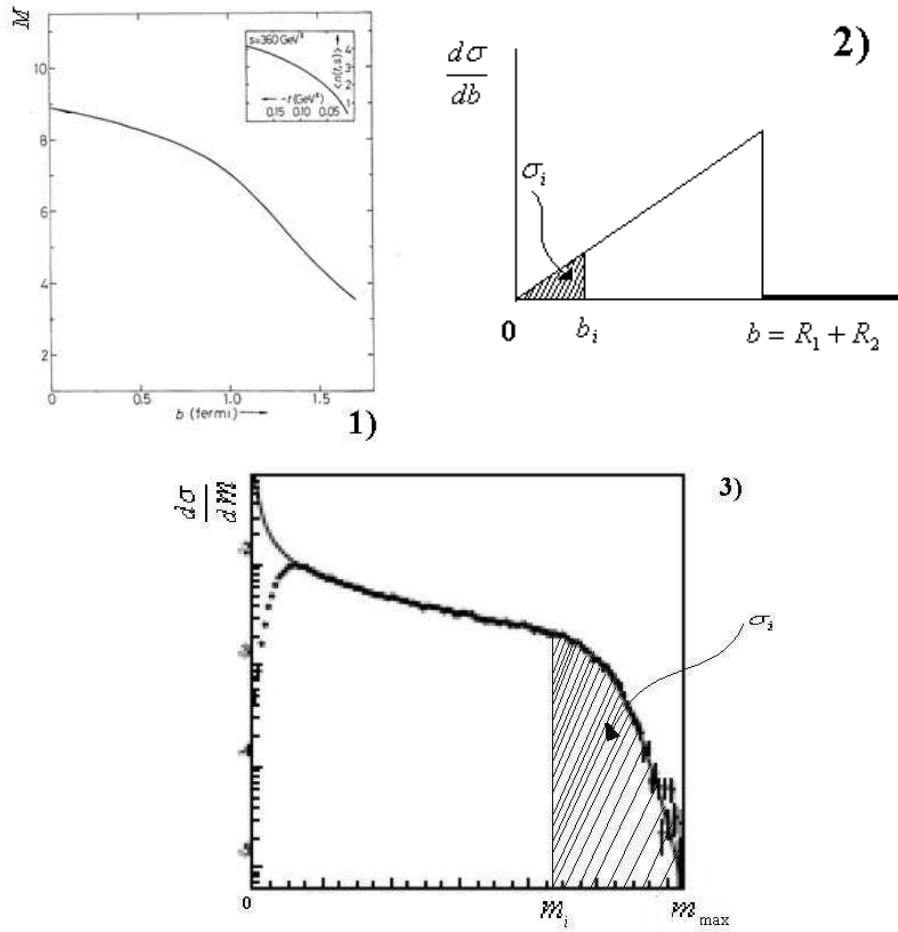


Figura 2.10: 1) se observa la dependencia de la multiplicidad con el parámetro de impacto. 2) La derivada de σ con respecto a el parámetro de impacto b . 3) La derivada de sigma con respecto de la multiplicidad m .

se puede dividir en intervalos del parámetro de impacto b_i siendo $b_{\max} = R_1 + R_2$ integrando sobre el intervalo de 0 a b_i para obtener la sección eficaz σ_i ,

$$\sigma_i = \int_0^{b_i} \frac{d\sigma}{db} db = \int_0^{b_i} 2\pi b db \quad (2.11)$$

Pero si en la figura 2.10-3 dividimos en intervalos m_i donde el máximo es m_{\max} intergramos sobre el intervalo para obtener la sección eficaz σ_i .

$$\sigma_i = \int_{m_i}^{m_{\max}} \frac{d\sigma}{dm} dm \quad (2.12)$$

Igualando las ecuaciones 2.11 y 2.12 tenemos que,

$$\int_{m_i}^{m_{max}} \frac{d\sigma}{dm} dm = 2\pi \int_0^{b_i} b db = -\pi b_i^2 \quad (2.13)$$

Las σ_i de las dos ecuaciones 2.11 y 2.12 son iguales dado que para un parámetro de impacto $b = 0$ le corresponde una multiplicidad m_{max} , por lo tanto cada b_i le corresponde una multiplicidad m_i . De aquí podemos obtener una estimación del parámetro de impacto b_i .

$$b_i^2 = \frac{1}{\pi} \int_{m_i}^{m_{max}} \frac{d\sigma}{dm} dm \quad (2.14)$$

La multiplicidad esperada en el LHC para Pb-Pb por unidad de rapidez está en 1400 a 8000 partículas.

2.6. Luminosidad

La luminosidad la definimos como número de partículas que hay por unidad de área por unidad de tiempo en dos haces en un acelerador antes de la colisión. La luminosidad de colisión define la intensidad del colisionador, es decir, entre más partículas haya mayor intensidad en el acelerador. La podemos expresar como:

$$L = \frac{N_1 N_2 f}{2\pi R h \tan \alpha} \quad (2.15)$$

donde N_1 y N_2 son el número de partículas en los dos haces, f la frecuencia en la rotación de los mismos, $2\pi R$ la circunferencia del anillo del acelerador, h es el tamaño del haz y α es el ángulo de cruce entre los haces.

En el LHC se estima una luminosidad en las colisiones de protón-protón de $5.0 \times 10^{30} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ con una frecuencia de 40 MHz y para Pb-Pb de $1.0 \times 10^{27} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Teniendo una probabilidad de interacción $\sigma_{p-p} = 40 \times 10^{-3} \text{ b}$ y $\sigma_{Pb-Pb} = 7 \text{ b}$ donde un barn $b = 10^{-28} \text{ m}^2$, podemos obtener la tasa de interacción R (Reaction Rate) que está dada por,

$$R = L \times \sigma \quad (2.16)$$

Por lo que para p-p tenemos $R_{p-p} = 2 \times 10^4 \text{ s}^{-1} = 20 \text{ KHz}$ y para Pb-Pb $R_{Pb-Pb} = 7000 \text{ s}^{-1} = 7 \text{ KHz}$.

Capítulo 3

V0A Diseño y Construcción

Para la construcción final del V0A se hicieron diversos prototipos a lo largo de 4 años. Quedando el protitipo “Sector 0” como verisión final de lo que sería el detector V0A (figuras 3.1 y 3.2). El Sector 0 estaba compuesto solo de un sector de un circulo, con 45° en el vértice, es decir, de la forma de una rebanada de pastel. Este prototipo se probó tanto en el IFUNAM como en el CERN. Habiendo cumplido todos los requerimientos se diseño el detector V0A bajo los mismos principios del Sector 0 y se construyó en el Instituto de Física de la UNAM.

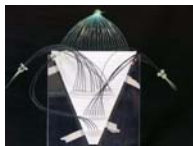


Figura 3.1: Sector 0 con las fibras corredoras de frecuencia del anillo 0, 1, 2 forradas con un plástico llamado termofit, en el anillo 3 solo se muestran las fibras desnudas.



Figura 3.2: Sector 0 forrado y listo para ser calibrado en el CERN Ginebra, Suiza.

EL V0A tiene la forma de un disco dividido en ocho sectores de 45° de separación y estos a su vez están divididos en cuatro anillos formando 32 celdas (ver figura 3.3). Así se tienen 32 detectores de centelleo mecánicamente unidos. Están separados por medio de un pegamento óptico mezclado con dióxido de titanio. Esto evita la perdida de luz en las celdas y el intercambio de luz entre ellas. Siendo cada celda independiente se tiene mejor colección de luz en cada una y la dispersión en el tiempo de colección se reduce dando una mejor resolución en tiempo.

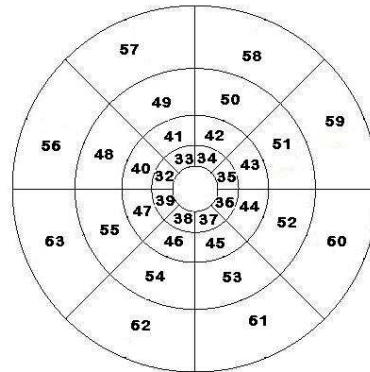


Figura 3.3: Diseño del centellador del V0A, muestra las 32 celdas vistas desde el punto de interacción. La numeración corresponde al número de la celda en la base de datos de ALICE.

3.1. Maquinado del plástico centellador

El plástico centellador que se utilizó es de marca Bicorn modelo BC-404, el cual tiene la propiedad de emitir en el rango del azul (figura 3.4) ¹. Tiene un grosor de 2.5 *cm* con una variación de hasta 8 décimas de *mm*. Esto se debe a que la fabricación del plástico no es uniforme .

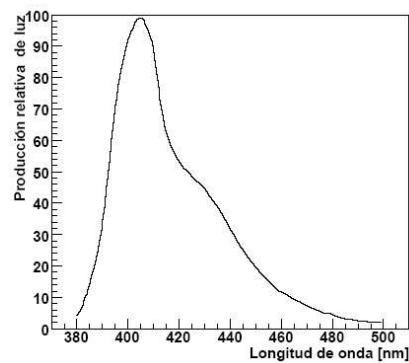


Figura 3.4: Espectro de emisión del plástico BC-404.

Para cortar y maquinar el plástico se utilizó una fresadora numérica, la cual trabaja por medio de un programa predeterminado. A este programa se le proporciona cada detalle que debe tener el centellador.

A fin de tener celdas independientes se maquina en el centellador todo su

¹Para información de este plástico centellador se puede ver en la página www.bicorn.com



Figura 3.5: Fresadora numérica con la que se maquina el centellador para el Detector V0A

perímetro y se rellena el volumen maquinado con pegamento óptico mezclado con dióxido de titanio. Esto separa una de otra ópticamente y la luz que llega a la cara pegada es reflejada por el dióxido de titanio que es extremadamente blanco, reduciendo las pérdidas. De esta manera se tienen celdas independientes pero unidas mecánicamente en solo placa, a esta técnica se le conoce como *MegaTile*.

Se maquinaron dos mitades rectangulares de centellador. En cada mitad se maquina una semi-circunferencia de 40 *cm* de radio y los cuatro anillos con la separación de los sectores. El maquinado de la circunferencia se hizo solo hasta la mitad del grosor, es decir, solo se perforó a una profundidad 1.25 *cm*. Se rellena la separación con pegamento óptico dopado con dióxido de titanio.



Figura 3.6: Una de las mitades del V0A solo con las divisiones de los anillos y sectores



Figura 3.7: La fotografía muestra como se pegó el centellador. Se rellena las ranuras con pegamento óptico, usando guantes y jeringas para inyectar el pegamento .

A continuación se le hacen unas canaletas con una terminación cilíndrica, para introducir las fibras ópticas en el centellador (figura 3.8). Estas canaletas se maquinaron con un cortador esférico que se muestra en la figura (3.9). En la figura (3.10) se puede observar la forma de la canaleta y como es que se introducen estas fibras dentro del centellador.

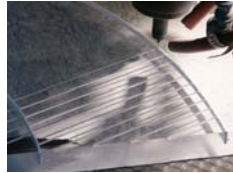


Figura 3.8: En la fotografía se muestra el cortador esférico haciendo las ranuras para las fibras ópticas.



Figura 3.9: Cortador con el que se maquinaron las canaletas para las fibras ópticas.

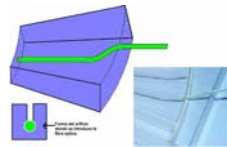


Figura 3.10: El dibujo muestra como están hechas las canaletas de las fibras.

Ya hechas las canaletas de las fibras se voltea el centellador y se repite el mismo procedimiento (figura 3.11).



Figura 3.11: La fotografía muestra como se pegó el centellador del segundo lado, si se observa se pueden ver del lado contrario las ranuras para las fibras ya hechas.

Cabe mencionar que el pegamento óptico que se uso es de la marca Epotek 301,

con índice de refracción de 1.538 – 1.540. Este pegamento consta de dos componentes: una resina y un endurecedor. Se vierte en un vaso de plástico desechable 20gr resina y 5gr de endurecedor (se utilizó una báscula digital para mayor precisión de las cantidades). Se mezclan perfectamente y se les añade 2gr de dióxido de titanio, esto para que se vuelva blanco el pegamento y tenga mayor reflexión. Ya que el pegamento esta incorporado con el dióxido de titanio se introduce el vaso a una cámara de vacío durante 10 minutos para poder sacarle el mayor aire posible y no queden burbujas cuando se inyecte en las ranuras(figura3.12).



Figura 3.12: Proceso de la preparación del pegamento óptico que se utilizó para hacer la técnica de MegaTile. En la primera foto se puede observar como se mezclan las dos sustancias del pegamento. En la segunda foto se le añade el dióxido de titanio. La tercera muestra la cámara de vacío que se utilizó para sacar el aire del pegamento. Por ultimo en la cuarta se ve las burbujas en el pegamento, aire que esta tratando de salir debido a la baja presión a la que se le impuso al pegamento.

Lista la primera mitad, se corto el sobrante del plástico centellador a un radio de 44 cm, 4 cm más que el radio externo del anillo 3. Estos 4 cm son para sujetar las fibras y tener lugar para atornillar el centellador a su soporte. En la figura 3.13 se muestra el antes y el después de cortar el sobrante.

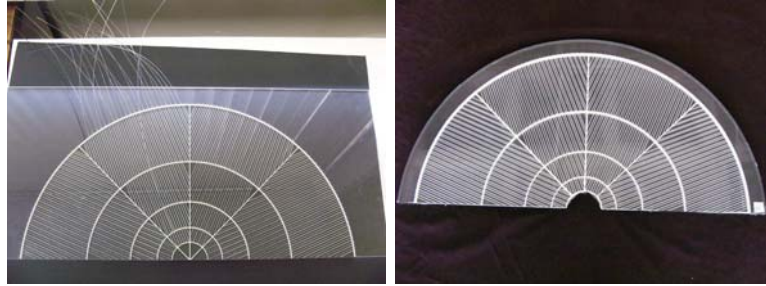


Figura 3.13: La primera fotografía muestra como el centellador todavía tiene el sobrante rectangular y en la segunda como ya se terminó de maquinar y tiene sus 4 *cm* de más para sujetar las fibras.

Una vez maquinada la primer mitad se empezó a maquinar la segunda usando el mismo procedimiento. Mientras tanto se recortaron semicírculos de cartón del tamaño del detector (figura 3.14). Se forraron de teflón para cubrir con ellos al centellador para que la luz que se produzca en el detector se refleje y no haya pérdidas. El cartón sirve para soportar las cintas de teflón, las cuales se colocaron en dos capas tejidas perpendicularmente. Al forro se le perforaron con un punzón orificios de entrada para insertar las fibras. Al poner el forro en el centellador no se necesita usar ningún tipo de pegamento ya que las misma fibras sirven para sostenerlo.

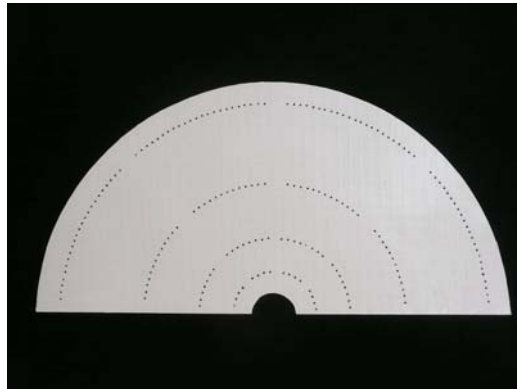


Figura 3.14: Cartón forrado de teflón perforado para la entrada de las fibras al centellador

En el sobrante de 4 *cm* del centellador se hicieron 32 barrenos donde se insertaron casquillos de bronce para poder atornillar unos arcos de Nylamid que sostienen las fibras.

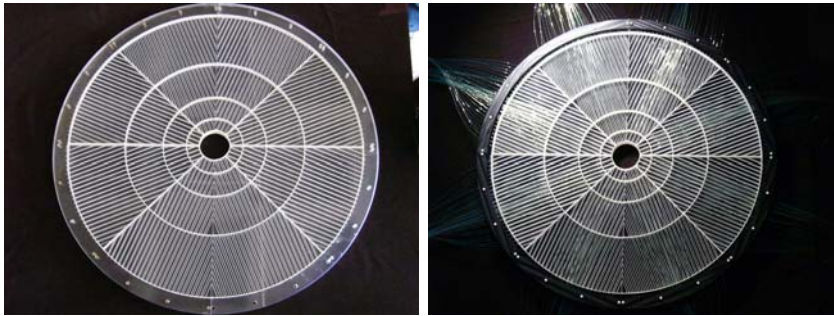


Figura 3.15: Se muestra como el centellador en los 4 *cm* de sobrante tiene hechos los barrenos y en la segunda fotografía como el Nylamid está sujeto con tornillos de plástico.

En la figura 3.15 el centellador aún no tiene el forro, este se pone antes de meter las fibras y ponerle los arcos de Nylamid, esta fotografía fue hecha para ver el centellador antes de “vestirlo”.

3.2. Trabajo con Fibras Corredoras de Frecuencia

Las fibras corredoras de frecuencia que se utilizaron son de la marca Bicon BC9929AMC con un diámetro es de 1 *mm*. Tienen índice de refracción en el cladding de 1.49 y en el núcleo de 1.60. El núcleo de estas fibras absorbe en la región del azul y emite en la región del verde (figura 3.16). De la luz emitida isotrópicamente una pequeña parte queda atrapada por reflexiones internas en ambos lados de la fibra.

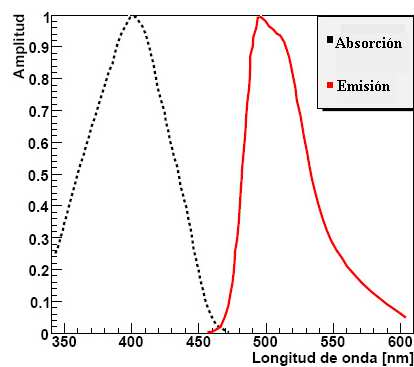


Figura 3.16: Espectros de absorción y emisión de las WLS Bicon BC9929AMC.

Para optimizar el funcionamiento de las fibras que se utilizarán en el detector es necesario evitar la perdida de luz. Debido a que la mitad de la luz viaja en la dirección opuesta al fotomultiplicado es necesario cubrir esa cara terminal de un material reflejante.

Aunque se pudo haber cubierto ese extremo con pintura blanca se decidió hacer un espejo en el extremo de la fibra. Al utilizar un espejo se gana un 15% más de luz y si se hace depositando el aluminio cubierto de cuarzo esto tiene una vida útil mayor en el ambiente de alta radiación en ALICE. Como el detectotr debe funcionar por lo menso 10 años se decidió utilizar la técnica de aluminizado.

El proceso para preparar los extremos de las fibras requiere de los siguientes pasos.

Manejo de las fibras Para manejar las fibras se requiere de suma limpieza, por lo cual se utiliza guantes para no contaminarlas con grasa de las manos. Esto evita que se dañe la fibra con la grasa y evita que haya pérdidas de luz pues esta tiene otro índice de refracción que el cladding. Otra razón es que el sistema debe estar sumamente limpio para que al depositar la película de aluminio esta se adhiera por completo.

Corte de las fibras Las fibras se cortan con una guillotina, de diferentes largos, según el sector donde se encuentren, las medidas se encuentran en la tabla 3.1.

Anillo	Medidas ($\pm 5mm$)
0	850 y 1050*
1	750, 800, 950*, 1000*
2	700, 670, 950*, 900*
3	650, 600, 830*, 900*, 800*

Tabla 3.1: Longitud de las fibras en mm . Las medidas que tienen * corresponden a los dos sectores que están abajo. Son más grandes debido a que el soporte del detector debe ser más largo en esta sección y los PMT están más lejos.



Figura 3.17: Las fibras se cortan con una guillotina

Pulido de las fibras Se toman grupos de cincuenta fibras aproximadamente y se colocan entre unas placas de lucita que las aprisionan y las mantienen fijas para poder pulirlas. A estas lucitas, ya con las fibras metidas, se les colocan unos peso de cobre para su mejor manejo al pulirlas (figura 3.18).

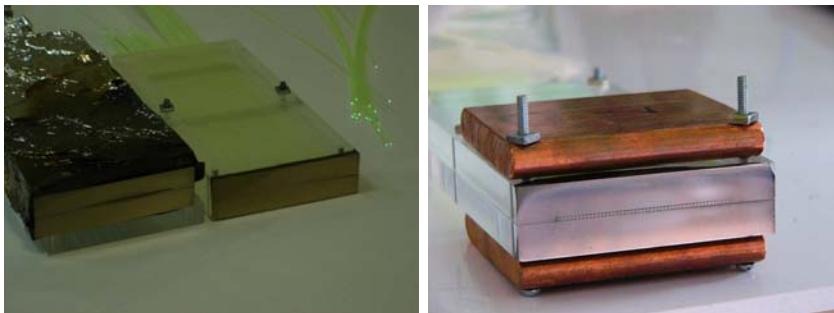


Figura 3.18: La primera fotografía muestra las fibras aprisionadas por lucitas rectangulares y la segunda con los cobres puestos.

Las fibras se pulen en una maquina pulidora utilizando diferentes lijas de agua y paños. Las lijas que se manejaron en un principio fueron 240, 360, 1200, 2000, 4000, pero se observó que el cladding de las fibras se rompía. Por ello se cambiaron las dos primeras por una de 500 y se bajo la velocidad de la pulidora, ya que era muy brusco el trato que le daban con las primeras lijas. Después de esto se observó que el cladding ya tenía mejores condiciones. Cuando se terminó de lijar se les hizo un pulido con los paños, primero utilizando un paño al que se le añade pasta de diamante de una micra y al final se utilizó un paño limpio con

mucha agua para limpiar las fibras. Terminado el pulido se llevan al microscopio y se observa que efectivamente estén bien pulidas, que no tengan virutas de la lucita o de la misma fibra (figura 3.19).



Figura 3.19: Maquina pulidora. En el microscopio se observan y se limpian todas las imperfecciones que tienen las fibras después de pulir

Preparación para hacer superficies reflectoras. Se limpian las fibras a lo largo después de haberlas pulido y observado en el microscopio. En este proceso de limpieza se utiliza solo agua destilada y gasa (figura 3.20). Cabe mencionar no se utiliza ninguna sustancia que no sea agua ya que cualquier solvente puede dañar el cladding, como el alcohol, por ejemplo. Ya limpias las fibras se vuelven a observar las puntas en el microscopio y se limpian si es necesario.



Figura 3.20: Las fibras se limpian con gasa y agua destilada únicamente.

Ya que se limpiaron las fibras se insertan en cilindros de metal, en estos caben alrededor de 130 fibras. Meter las fibras en estos cilindros no es nada trivial ya que se necesita que queden al ras de la superficie. Por lo que se utilizó un soporte universal para sujetar el cilindro y unos anillos para sujetar las fibras como se muestra en la figura 3.21. Después de

esto se limpian nuevamente las puntas de las fibras observándolas en el microscopio.

Las fibras ya en los cilindros metálicos previamente limpios se llevan al laboratorio de alto vacío. Ahí se les deposita una película de aluminio y después de cuarzo por el método de sputtering.

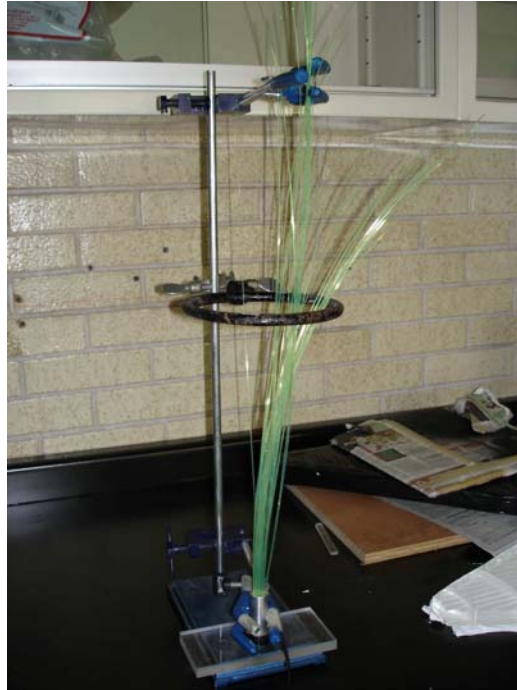


Figura 3.21: En la fotografía se muestra como se utilizó el soporte universal para poder poner las fibras en un cilindro metálico antes de ser aluminizadas. Esto se hizo para que el extremo de las fibras quedará exactamente al ras del cilindro para que solo se aluminizaran las caras de los extremos de las fibras.

3.2.1. Método de Preparación de las Películas

Una película es una estructura sólida sobre un sustrato, que se fabrica cuando el vapor de un material se adsorbe y luego se condensa sobre una superficie sólida. Las películas se catalogan en películas delgadas y gruesas, las cuales se diferencian por su espesor. Una película delgada tiene un espesor menor o igual a una micra, la película gruesa tiene el espesor mayor a una micra. Un recubrimiento es una película delgada o gruesa con una funcionalidad específica.

Existen dos métodos para la deposición de películas, el proceso PVD (Physical Vapor Deposition) y el CVD (Chemical Vapor Deposition). La diferencias

entre ellos es que la película generada por PVD es de la misma naturaleza del material base. En los procesos CVD la película resultante es diferente al material base.

Los métodos PVD son dos; la evaporación térmica y el sputtering. En la primera, el procedimiento consiste en calentar el material base hasta el punto de fusión para generar el vapor. En el segundo el vapor se genera por la erosión de un material sólido por la acción mecánica de partículas de alta energía, este fenómeno se el denominado sputtering o erosión iónica.

Método de Sputtering

Para aprovechar al máximo el vapor generado por el fenómeno de sputtering se han desarrollado las fuentes de sputtering de tipo magnetrón que se alimentan con fuentes de corriente directa o corriente alterna, en esta última en el intervalo de radio-frecuencia, específicamente en 13.56 MHz .

Para crecer películas o recubrimientos por este método se requiere que el proceso se lleve a cabo dentro de una cámara con atmósfera controlada, es decir, debe alcanzarse una presión base en el intervalo de alto vacío (entre 10^{-5} torr), para después aumentar la presión con un gas noble que se usa como proyectil durante el proceso de bombardeo del sólido.

Al aplicar una potencia eléctrica al magnetrón se genera un campo eléctrico intenso, el cual produce iones del gas noble y los acelera hacia el cátodo, donde se coloca el material a depositar.

El material eyectado por el bombardeo viaja hasta un sustrato, para formar la estructura sólida.

Deposición de películas de aluminio y cuarzo. Se hicieron pruebas con fibras de 20 cm de longitud aproximadamente, para ver si era posible depositar películas metálicas en fibras de plástico por este método. Se utilizaron aluminio y plata para las pruebas. La plata tiene la característica de reflejar un 92% en toda la región del visible, mientras que el aluminio no refleja tan eficientemente como la plata. Sin embargo el blanco de plata se oxidaba en un color negro depositando solo el óxido sobre las fibras, este no era el único problema, los parámetros para la deposición de plata requieran mayor potencia quemando el plástico de las fibras, por esto se decidió usar aluminio.

Para el aluminio se hicieron pruebas para optimizar los parámetro del

sistema y los tiempos requeridos para depositar películas de suficiente grueso. Para evitar que el aluminio se oxidará se hicieron pruebas de deposito de cuarzo ya que estos son diferentes parámetros.

El proceso para la deposición de aluminio y los parámetros del sistema son los siguientes.

1. Se posicionan las fibras a la altura del magnetrón y a una distancia de 15 *cm*, además se colocó un vidrio testigo por debajo de las fibras.
2. Se coloca adelante de las fibras un sistema mecánico de obturador el cual tiene otro vidrio testigo. El obturador sirve para proteger a las fibras durante el principio de la evaporación evitando que se depositen en ellas el óxido que se había formado en la superficie del blanco de aluminio. Con el vidrio testigo podemos comparar la película de aluminio con la de óxido.
3. La presión base dentro de la cámara debe de ser de $5 \times 10^{-5} Torr$.
4. Cuando alcanza este vacío se le suministra argón y la presión dentro de la cámara debe ser de $1.1 \times 10^{-3} - 1.3 \times 10^{-3} Torr$. La presión del argón es la diferencia entre la presión dentro de la cámara y la presión base. Esto corresponde alrededor de 100 átomos de Argón por 1 átomo de gas residual.
5. La potencia de la radio frecuencia que se le suministra es alrededor de 130 Watts.
6. Se deja el obturador cerrado durante 5 minutos y se abre después de ese tiempo para el deposito de aluminio en las fibras.
7. Se hace el primer deposito de aluminio durante un tiempo de 10 minutos.
8. Se apaga la radio frecuencia y se deja enfriar durante 5 minutos para hacer el segunda deposito.
9. Se prende la radio frecuencia y se repite el procedimiento desde el paso 7 cuatro veces.

Para la película de cuarzo se sigue el mismo procedimiento pero la potencia es de 227 *Watts*.

En la figura 3.22 se observa el momento del deposito de aluminio en las fibras, el plasma es un color lila, típico para el Ar cuando hay emisión de fotones.

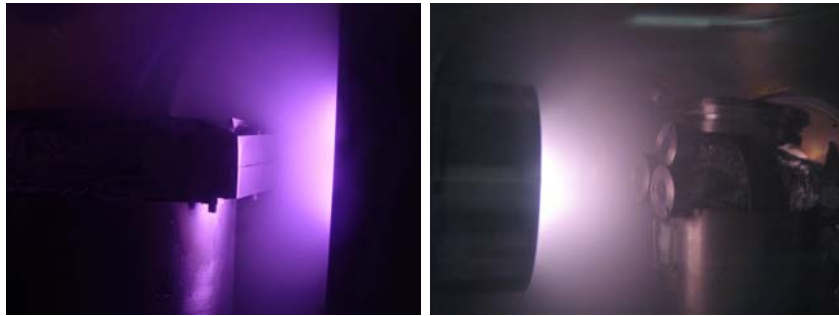


Figura 3.22: Fibras aluminizándose. Se observa el plasma que se forma al excitarse y desexcitarse los átomos del argón. Las primeras fibras se aluminizaban en las lucitas rectangulares las definitivas se aluminizaron en cilindros de metal ya que cabían más fibras.

Ensamblado de las fibras Una vez que se las fibras están listas se inicia la selección de estas y se insertan en el centellador según sus medidas (figura 3.23).



Figura 3.23: Las fibras se escogen primero según la medida de estas. Se meten en su respectivo anillo a través del forro de teflón llegando hasta el plástico centellador.

Quando se termina de meter las fibras al centellador entonces se les coloca el termofit a cada una de ellas. El termofit cubre parte de la fibra que está fuera del centellador.

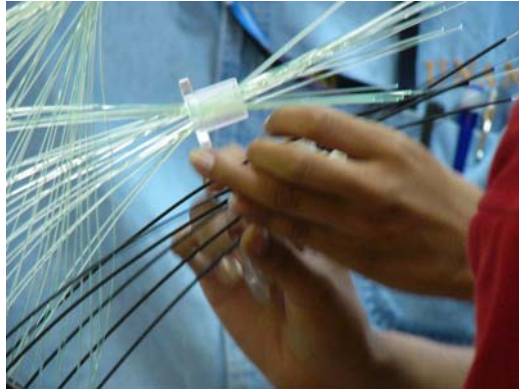


Figura 3.24: Se puede observar que algunas fibras tiene el termofit y otras no. El termofit es el forro negro que tienen algunas fibras. En la fotografía se aprecia que no se usan guantes, esto es debido a que solo se tocan los termofits no las fibras.

Ya teniendo las fibras vestidas con los termofits, las empezamos a *peinar* para que entre ellas nos doblen o se maltraten, sobre todo cuando se ponen los arcos de soporte de Nylamid. Se pintan los termofits con diferentes colores de barniz para distinguir de que anillo son las fibras y no traslapar las de una celda con otra.

Cuando esto está listo entonces el proceso que sigue debe ser sumamente cuidadoso ya que se van a pegar las fibras por celdas en cilindros de Nylamid que son los conectores a los PMTs. Se pegarán con epoxy de 5 minutos mezclado con dióxido de titanio. Dado que cualquier error es difícil reparar así que no se pueden pegar sin tomar en cuenta la posición de las fibras dentro del soporte del centellador y de la caja de los PMT's las cuales están inclinadas a 30° . Hay que ver de que lado las fibras se van a pegar para que no se forcen con el movimiento, con los bordes del soporte y el ángulo que tienen las cajas de los fotomultiplicadores. Para esto se hizo un soporte prototipo de lucita y madera, con el que se vio como tenían que estar acomodadas. Ya teniendo esto resuelto se pegan las fibras y se dejan secar hasta el día siguiente.

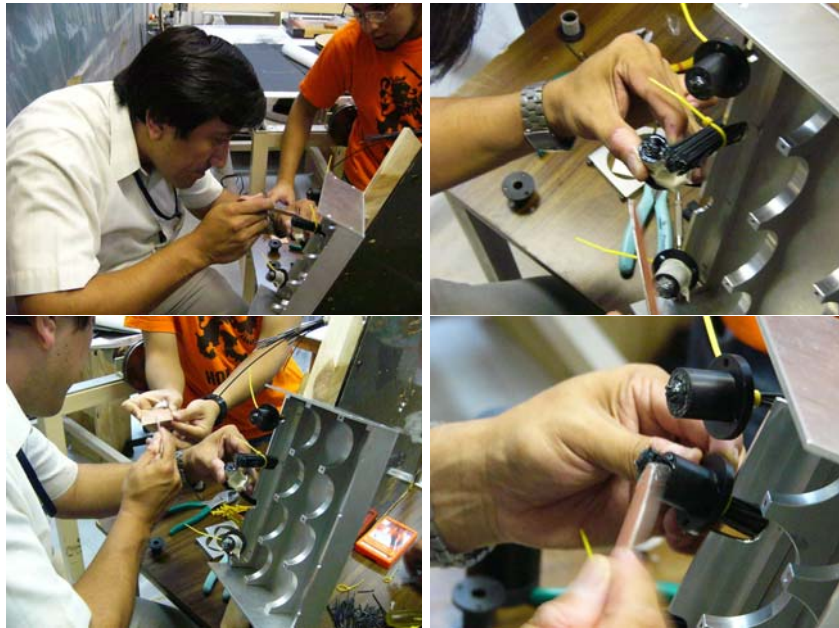


Figura 3.25: Se pegan las fibras con epoxy de 5 min, tomando cuenta la ubicación que tienen dentro de la caja del centellador y de la caja de los fotomultiplicadores

Cuando las fibras están pegadas en su conector, se lijan y pulen mismo procedimiento que se uso en los extremos opuestos que fueron aluminizados, con la diferencia que se usó un dremel para devastar el sobrante de la fibra con pegamento y en esta ocasión no se utilizaron los paños sino una borla. Las fibras se pulen estando ellas dentro del centellador, por lo que se utilizan bandejas con agua y una lija dentro de esta. La superficie debe quedar completamente plana para que se acople bien al el PMT y evitar pérdidas de luz.



Figura 3.26: Las fibras se lijan en bandejas con agua, sumergiendo la lija en el agua.

Cuando se han pulido los 32 grupos de fibras entonces se forrara con un

acetato negro para detectores centelladores, con esto se evita la entrada de la luz del exterior.

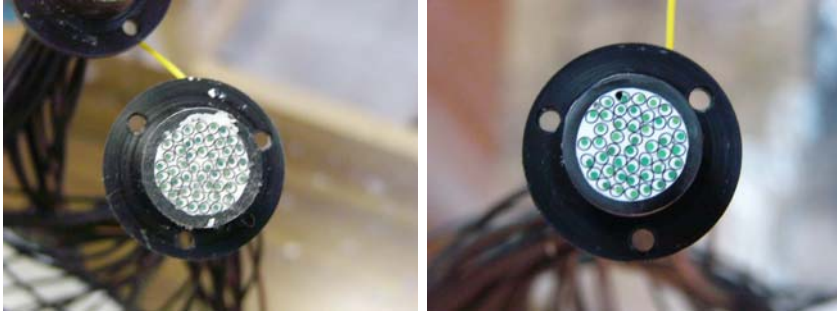


Figura 3.27: En la primera fotografía se muestra el cilindro con las fibras antes de pulirlo y en la segunda ya se ha terminado de pulirlo.

Por otro lado, se debe proteger el centellador y los PMT's de la luz exterior por lo que se hicieron cajas adecuadas para ellos. Las cajas de los PMT's se fabricaron en el Centro de Investigaciones y Estudios Avanzados del IPN. Son cajas hechas para el tipo de PMT que se utilizará. Los fotomultiplicadores son Hamamatsu H6153-70, estos fotomultiplicadores tienen una resistencia a campos magnéticos muy grandes, pueden soportar hasta $1 T$. Estos PMTs tienen una mejor respuesta del fotocátodo en el rango del verde (Figura 3.28).

El soporte del V0A está hecho de bordes de aluminio con tapas de lucita negra. Tiene una forma de hexágono irregular, mide $156.99 cm$ de largo (figura 3.29). Las cajas para los fotomultiplicadores están hechas de aluminio y sus dimensiones son $49.2 cm \times 44 cm \times 14.2 cm$. Las cajas tienen unos arcos donde van sujetos los PMTs, los cuales están atornillados a las tapas de estas. Los tornillos que se utilizarán para cajas y los soportes no deben ser magnéticos debido al gran campo magnético que se producirá en ALICE y no pueden ser de aluminio ya que al atornillar con un material del mismo estos se adhieren por lo que deben ser de otro material, como latón.

3.3. Módulos de Electrónica utilizados en la Calibración

Para procesar las señales de los fotomultiplicadores se utilizan módulos electrónicos. Cada módulo tiene una función específica que puede ser analógica o procesos lógicos. También hay módulos que convierten señales de voltaje, carga o tiempo en información digital.

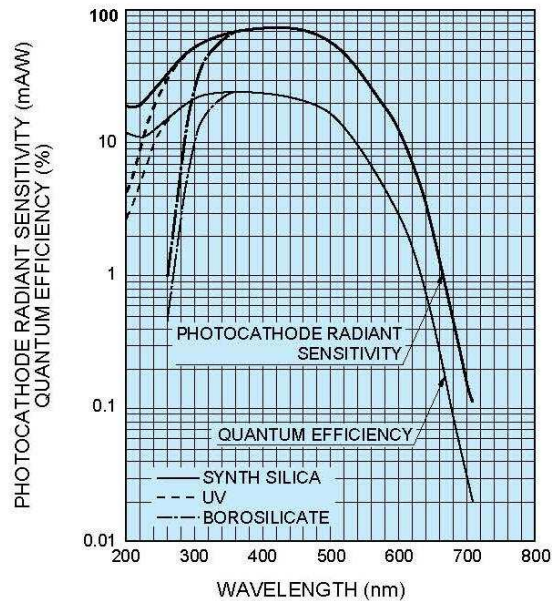


Figura 3.28: Eficiencia cuántica en función de la longitud de onda para el fotocátodo del PMT H6153-70.

En la siguiente lista describimos los módulos que se utilizaron para la caracterización del detector.

NIM bin Las siglas NIM significan Nuclear Instrument Module. Un NIM bin es una “caja” donde se pueden depositar hasta 12 módulos NIM para alimentarlos de corriente eléctrica. Los voltajes que maneja un NIM bin para alimentar a los módulos son de $-12V$, $+12V$, $-24V$, $+24V$, $-6V$ y $+6V$.

CAMAC, Computer Automated Measurement and Control . Un CAMAC es un sistema que está diseñado para complementar el sistema NIM, ya que estos últimos son inconvenientes para los sistemas basados en computo. Los CAMAC también son sistemas de módulos de electrónica, es una caja llamada *crate* donde tiene un número de divisiones conocidas como *slots* donde se insertan estos módulos. Los módulos CAMAC tienen conectores PCI que se conectan al final del slot, estos conectores tienen 86 puntos de contacto que corren por una serie de cables en el plano trasero del *crate*. A toda esta serie de cables se le conoce como *dataway*. EL sistema CAMAC también alimenta los módulos de voltaje. Tiene una interface para que los datos que obtiene del experimento puedan ser procesados entre los módulos de electrónica CAMAC y la computadora.



Figura 3.29: En la primera fotografía esta el soporte de aluminio para el detector V0A. En la segunda se muestran dos de las cajas de los PMTs. En la tercera el V0A terminado en el CERN Ginebra, Suiza donde se caracterizó con haz.

Fan In Fan Out En este módulo puede multiplicar hasta cuatro señales analógicas de entrada y cuatro de salida de la misma altura y forma que la suma de las de entrada.

Discriminador Es un dispositivo que veta señales, como su nombre lo indica discrimina las señales que son más grandes a un cierto umbral dado por el usuario. Cuando esto ocurre el discriminador no responde pero si la señal es más grande del umbral dado entonces responde con una señal lógica. Un uso muy común del discriminador es discriminar las señales verdaderas arriba de la amplitud del ruido de los PMT's. El umbral se puede modificar moviendo un control que tiene el discriminador con un desarmador o hay algunos discriminadores que se modifican digitalmente.

Unidades Lógicas Las unidades lógicas sirven para hacer coincidencias y/o anticoincidencias entre dos o más señales que coincidan en tiempo. Cuando esto sucede el modulo saca una señal lógica si es verdad y no se obtiene señal cuando es falso. La definición de coincidencia la podemos expresar como dos o más señales en tiempo que se traslapan. Cabe mencionar que las unidades lógicas tienen también un control con el que se puede variar y ajustar la anchura del pulso de salida.

Cajas de Retardo Para el manejo de coincidencias el uso de cajas de retardo es muy importante para poder empatar en tiempo una señal con otra. Estas cajas de retardo lo que hacen es simplemente retardar desde 0.5 hasta 40 o mas ns la señal utilizando cables enrollados de gran

longitud.

TDC, Time Digital Converter Este módulo CAMAC sirve para digitalizar un intervalo de tiempo. EL intervalo de tiempo está dado por dos señales, una de inicio y una de termino. Las dos señales serán lógicas. La señal de compuerta nos va a indicar en que momento empieza la señal de tiempo que nos interesa medir, la ultima nos dará el termino. Cuando la compuerta indica el inicio entonces se inicia el conteo de períodos marcado por un oscilador de frecuencia constante y se detienen cuando recibe la segunda señal (de termino). El número de conteo es arrojado en forma proporcional al intervalo de tiempo que se deseaba medir.

ADC, Analogical Digital Converter Es un dispositivo que convierte una señal analógica a un valor digital. Los ADC's pueden ser de dos tipos: sensor de voltaje (peak-sensing) y sensibles a la carga (charge sensitive). En este trabajo se utilizó un ADC sensible a la carga, por lo que se hará la descripción de este. Este tipo de ADC lo que hace es integrar toda la corriente que se genera por ejemplo en un PMT. En la figura podemos observar como el ADC logra la integración.

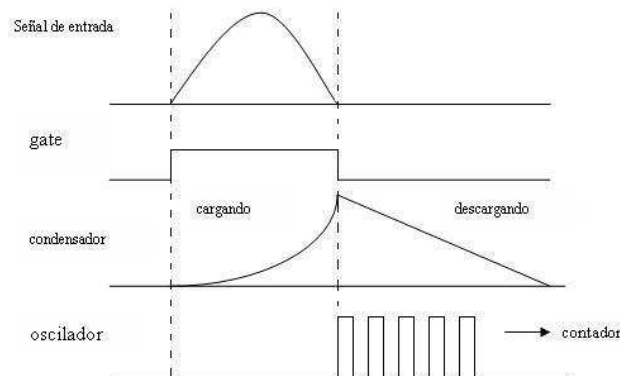


Figura 3.30: Para intergrar la carga, el ADC utiliza el método Wilkinson.

El método que utiliza este ADC para integrar la carga es el llamado Wilkinson (figura 3.30). La técnica consiste en que la señal de entrada cargue un capacitor. El capacitor se va a cargar y descargar en una fracción constante. Cuando la descarga inicia, entonces un contador se enciende y cuenta los pulsos provenientes de un oscilador de frecuencia

constante. Terminando la descarga el contador se apaga y deja de contar. Lo que el contador obtiene es un número proporcional a la carga del capacitor.[1]

Capítulo 4

Resultados

En este capítulo presentaremos los resultados de la calibración que se hizo del detector V0A con rayos cósmicos en el laboratorio del Instituto de Física de la UNAM (IFUNAM).

4.1. Calibración de los PMT

Para calibrar un detector centellador es primordial que los fotomultiplicadores estén caracterizados para que se pueda ver el comportamiento del detector en conjunto y poder manipular los 4 componentes independientemente uno del otro. Los 4 componentes se pueden entender como plástico centellador, fibras, PMT's y electrónica. Primero se calibrarán los PMT's con rayos cósmicos, utilizando el anillo 2 del Sector 0 que había sido calibrado anteriormente con haz en CERN en Diciembre del 2006. Cabe mencionar que cada PMT es único, aunque sea el mismo modelo no necesariamente tiene las mismas características. Debido a esto debemos caracterizar uno por uno de los 32 PMTs.

La calibración de los fotomultiplicadores se hizo utilizando un arreglo experimental con dos detectores centelladores, en forma de paletas, de $10 \times 10 \text{cm}^2$ de superficie y con el prototipo Sector 0 (figura 4.1).

El objetivo de la curva de calibración es obtener las ganancias de los PMT's con diferentes voltajes, los cuales fueron 1350, 1600, 1800, 2000, 2200 V. Esto se hizo con partículas mínimo ionizantes, muones atmosféricos seleccionados por la coincidencia de los dos detectores en forma de paleta, que son casi del tamaño del anillo 2. La señal de coincidencia además de validar el evento, genera una compuerta necesaria para la adquisición de datos en el ADC y TDC.

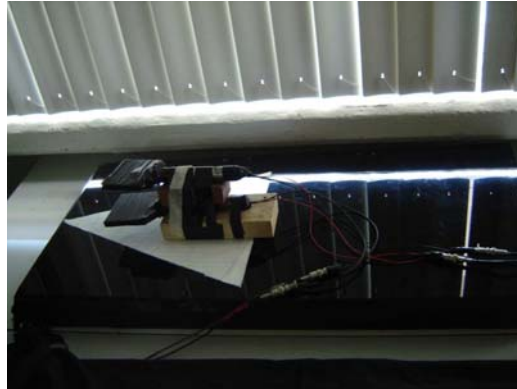


Figura 4.1: En la caja negra se encuentra el prototipo Sector 0. Tiene un pequeño mapa para poderse ubicar donde se encuentra cada anillo. Arriba de este están las paletas que servirán como trigger.

Los muones son tan energéticos que pueden atravesar los tres centelladores, en cambio cualquier otra partícula se frenaría en una de las paletas.

Se utilizó los siguientes módulos de electrónica y el dispositivo experimental que se muestra en la figura 4.2

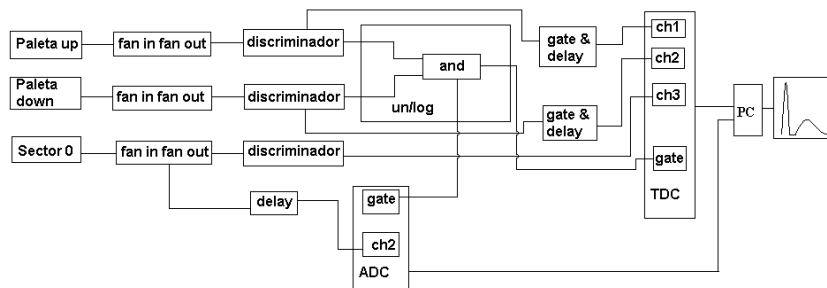


Figura 4.2: Setup de la electrónica para calibrar los PMT's usando el Sector 0.

Se caracterizaron los 32 PMT's, tomando 5000 eventos por voltaje y por PMT. Los datos se tomaron por medio de un DAQ que se realizó en una plataforma de Linux usando un programa de adquisición de datos, escrito en lenguaje C y con una interfase gráfica usando el software PAW. Aunque posteriormente se pasaron los datos a otro software de graficación llamado ROOT donde se obtuvieron las gráficas que posteriormente se presentarán.

Analizando los datos de la calibración de los PMTs se obtuvieron cuatro

gráficas para cada uno de ellos. Se graficó la ganancia contra el voltaje, la resolución en tiempo, σ , contra el voltaje, el tiempo de respuesta contra el alto voltaje HV y la ganancia contra la resolución de tiempo, σ . En la figura (4.3) se puede observar las gráficas de uno de los 32 fotos que se calibraron, el PMT-9805 (nombre que se le dio por su número de serie)¹.

¹Las gráficas de los 32 fotomultiplicadores se pueden ver en el Apéndice 4.3

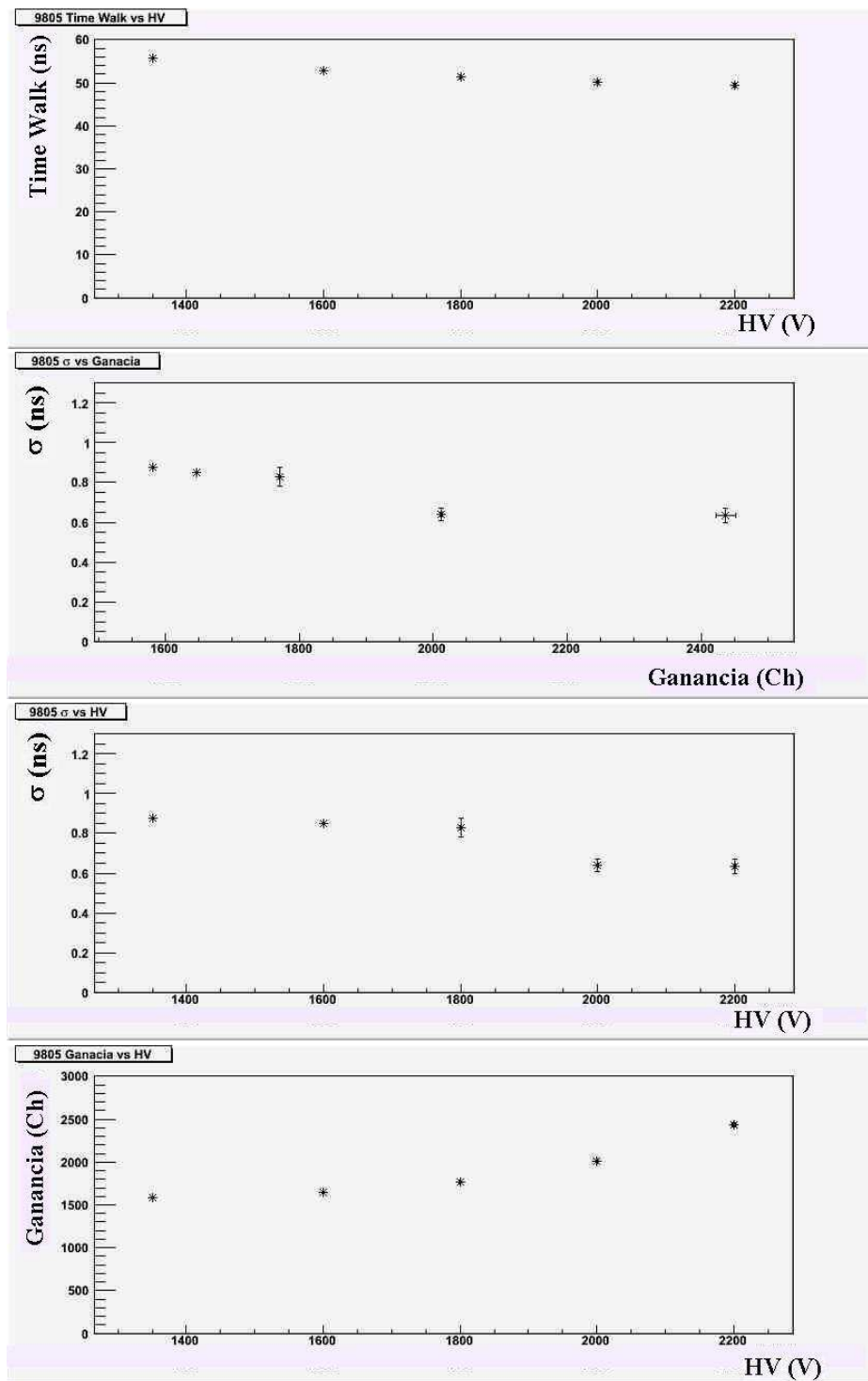


Figura 4.3: Las cuatro gráficas muestran el comportamiento del PMT con número de serie 9805.

De acuerdo a su ganancia los fotomultiplicadores se clasificaron en PMTs de **Baja Ganancia** y **Alta Ganancia**. Las gráficas muestran un ejemplo de cada una ellas en la figura(4.4).

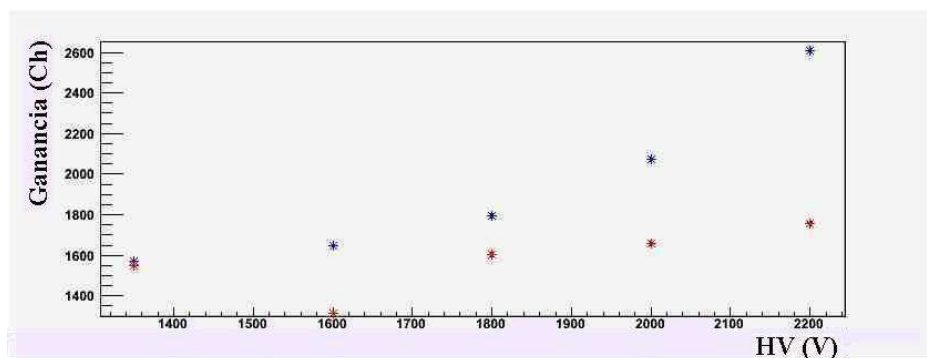


Figura 4.4: Se comparan los PMTs con número de serie 9704 y 9764 siendo de alta (azul) y baja ganancia (rojo) respectivamente.

Las gráficas que se muestran en esta sección para la carga están dadas en canales, presentaremos en el apéndice 4.3 las misma gráficas, con los resultados en términos de carga en pC usando el factor de conversión obtenido por la calibración de nuestro ADC.

Uno de los requerimientos del detector V0A es que su resolución en tiempo para partículas mínimo ionizantes sean menor de $1 ns$. En la figura 4.5 se muestra una dependencia de la resolución en tiempo con el alto voltaje para el PMT-9714, donde su resolución en tiempo es de $0.776 ns$ a un voltaje de $1800 V$.

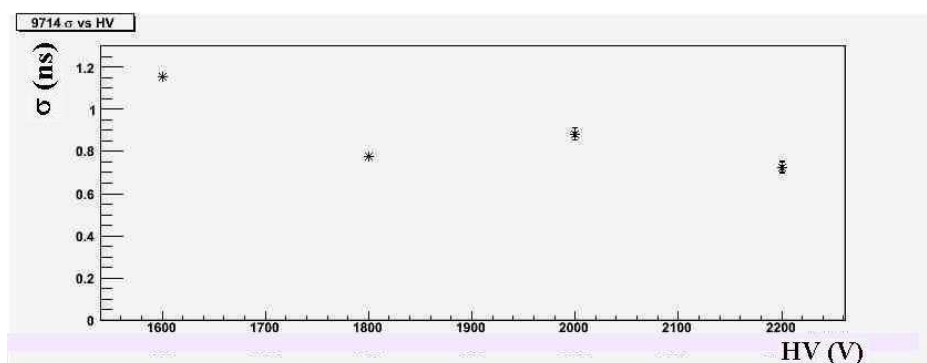


Figura 4.5: Dependencia de la resolución en tiempo σ con el voltaje para el PMT con número de serie 9714.

4.2. Calibración del V0A con Rayos Cós- mos

Los datos que se obtiene en esta calibración son preliminares ya que se utilizaron rayos cósmicos y se necesita de mucho tiempo para tener una buena estadística. Por esto es necesario calibrar el detector con haz, el cual fue solicitado en el CERN, Ginebra, Suiza en julio del 2007. Aún así se requirió probar el detector en el IFUNAM antes de ser trasladado a Ginebra. Cabe mencionar que solo se tuvo cuatro días para hacer todas las pruebas que se presentan en esta sección.

Una vez calibrado cada fotomultiplicador se estudio la respuesta de cada una de las 32 celdas del detector V0A. Para ello se colocaron las dos mitades del detector una encima de la otra. En este caso se usaron paletas más grandes para poder cubrir los cuatro anillos de un sector al mismo tiempo. Una se puso en los dos primeros anillos y la otra en los otros dos últimos, de tal manera que quedarán encontradas(figura4.6).

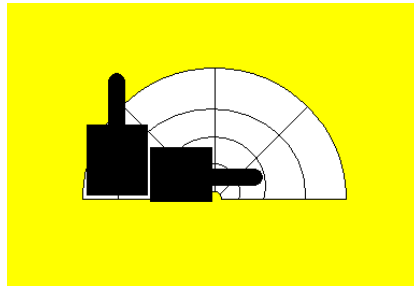


Figura 4.6: El dibujo muestra como se acomodaron las paletas que se usaron como trigger para las dos mitades del V0A, la imagen es viendo desde arriba por lo que no se vería la otra mitad pero una esta encima de la otra.

El diagrama de la electrónica para este caso se muestra en la figura (4.7). Como se puede apreciar en la unidad lógica se hace una coincidencia entre una de las dos paletas y una de las dos mitades del V0A utilizan dos “or” y un “and”. De esta manera se seleccionan eventos producidos por muones atmosféricos.

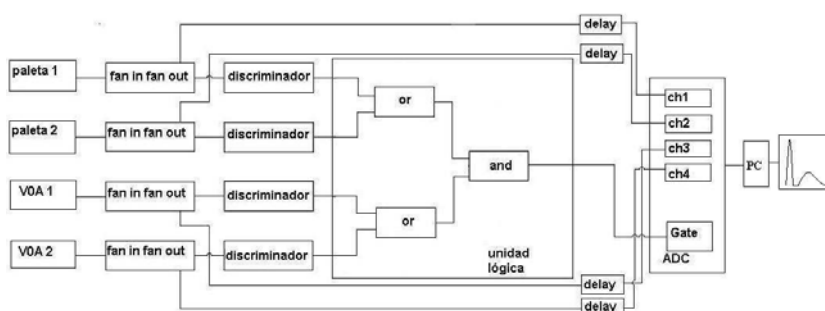


Figura 4.7: Electrónica para la adquisición de datos para la calibración del detector V0A con rayos cósmicos.

Se calibran simultáneamente un sector de cada mitad, es decir ocho celdas. Se utilizan solamente ocho fotomultiplicadores usando el mismo PMT para el mismo anillo en los sectores de cada mitad. Primero se tomaron datos en un sector y luego se cambian los ocho PMT al siguiente, se tomaron los datos de este y se volvieron a cambiar y así sucesivamente hasta acabar con los 4 sectores de cada mitad.

Los ocho fotomultiplicadores se escogieron con ganancia semejante con un valor de la diferencia entre pico y pedestal de alrededor de 200 canales. Cuando al ADC no le llega una señal proveniente del PMT, el ADC marcará un valor constante en canales que indica que no hay señal alguna, a ese valor se le llama pedestal. (Figura (4.8)). En el caso de la calibración de los PMT's el pedestal tiene un valor de 1551 canales.

Los PMT's que se utilizaron en la calibración del V0A se enlistan en la tabla (4.1).

Para la adquisición de datos se utilizaron dos ADCs simultáneamente dividiendo la señal analógica en el Fan In-Fan Out. Los ADC's que se utilizaron son de diferentes marcas, uno es LECROY y el otro es WIENER, nos referiremos a este último como FAST. Por lo que tenemos datos con dos ADC en cada sector. Para comparar el ADC Lecroy con el Fast, (que también se usó en la calibración de los PMT's) se obtiene un factor de conversión para obtener el canal en términos del ADC Lecroy, el cual es de 1.9 y se multiplicó por $0.25pC/canal$ que es el factor de la calibración del ADC Lecroy. Los resultados con los que se trabajó están en pC ².

²Los cálculos para obtener los datos en términos de carga se muestran en el Apéndice 4.3

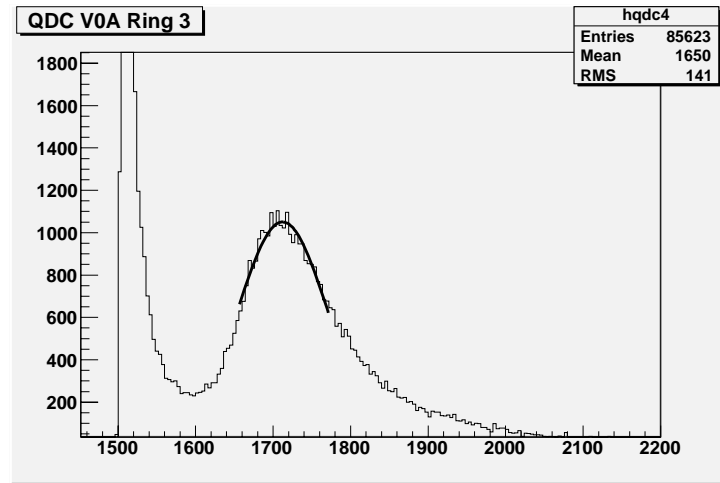


Figura 4.8: Espectro de la carga integrada por el ADC al paso de muones atmosféricos. A la izquierda se tiene del pedestal.

Con esta calibración se tiene que los valores de ganancia de la tabla 4.1 están dados en la tabla 4.2 en términos de pC .

Se presenta un tabla de cada anillo comparando las ganancias en pC de cada sector y se observa como las cargas son congruentes de sector a sector en el mismo anillo. (Ver tabla 4.3)

Como se puede apreciar en las tablas de los anillos 0 y 1 hay ciertos valores de carga faltantes, esto se debe a la falta de estadística debido al pequeño tamaño de estas celdas. Por lo que se enfocará al análisis a los anillos 2 y 3 que dan más información.

4.2.1. Análisis de Resultados

Al comparar los datos de cada anillo, se observa una variación en la respuesta de las cuatro celdas medidas con el mismo fotomultiplicador (tabla 4.3). Se calculó la desviación estándar de esta variación anillo por anillo que da una medida de la dispersión en la fabricación del detector y el acoplamiento de las fibras WLS (tabla 4.4).

Estas dispersiones posiblemente se deben a que hubo variaciones en el acoplamiento del PMT con las fibras resultando diferencias en la colección de luz.

Centellador V0A Abajo				
Anillo	PMT	Voltaje	Centroide	Ganancia
0	9802	1800	1754	203
1	9805	1800	1770	219
2	9800	1800	1700	149
3	9803	1800	1745	194
Centellador V0A Arriba				
Anillo	PMT	Voltaje	Centroide	Ganancia
0	9712	1800	1680	129
1	9771	1800	1712	161
2	9791	1800	1705	199
3	9901	1800	1692	216

Tabla 4.1: En la tabla se muestra los fotomultiplicadores que se utilizarán para caracterizar el V0A. La tabla tiene información del número de anillo donde se colocó el PMT, el número de serie de este, el voltaje que se le suministró, el centroide que se obtuvo y su ganancia.

Centellador V0A Abajo				Centellador V0A Arriba			
Anillo	PMT	Voltaje	Carga (pC)	Anillo	PMT	Voltaje	Carga (pC)
0	9802	1800	26.4	0	9712	1800	16.9
1	9805	1800	28.6	1	9771	1800	20.9
2	9800	1800	19.4	2	9791	1800	26.3
3	9803	1800	25.3	3	9901	1800	28.3

Tabla 4.2: La tabla es la misma que la tabla 4.1 solo que esta vez se presenta con los centroides en términos de pC y no de canales

Por otro lado al comparar la calibración de los PMT's con la calibración del V0A se observó que la variación entre los valores del Sector 0 y del V0A es pequeña. (ver la tabla 4.5).

Estos datos muestran como para los anillos 2 y 3 hay muy poca variación con los datos obtenidos en la calibración de los PMTs. Se utilizó el anillos 2 del prototipo, por lo que estos datos son similares debido al tamaño de la celda de los últimos anillos. Para los anillos 0 y 1 es diferente ya que el tamaño de las celdas es menor.

Anillo 0		
Sector	Carga pC	
	Abajo	Arriba
1	8.2	-
	7.5	-
2	-	-
	1.5	-
3	-	16.1
	-	15.5
4	-	12.6
	-	12.2

Anillo 1		
Sector	Carga pC	
	Abajo	Arriba
1	12.2	-
	14	-
2	12.1	20.7
	12.7	-
3	-	-
	-	-
4	-	-
	-	-

Anillo 2		
Sector	Carga pC	
	Abajo	Arriba
1	18	-
	18.7	-
2	14.3	24.6
	14.8	21.8
3	14.5	33.9
	14.5	34.3
4	13.9	29.3
	14.2	30.5

Anillo 3		
Sector	Carga pC	
	Abajo	Arriba
1	26.7	-
	25.7	-
2	23.7	38.8
	23	38.7
3	33.4	30
	32.2	30
4	29.8	26.5
	29	25.2

Tabla 4.3: Se exponen los datos del VOA según el anillo al que corresponden mostrando la variación de sector a sector.

anillo	Dispersión %	
	Abajo	Arriba
0	-	14.1
1	6.7	-
2	12.2	17.4
3	13.6	18.6

Tabla 4.4: La tabla muestra la dispersión de los anillos en los sectores.

PMT	Sector 0 (pC)	V0A (pC)
9805	28.6	12.8 ± 0.9
9800	19.4	15.4 ± 1.9
9803	25.3	27.9 ± 3.8
9712	16.8	14.1 ± 1.9
9791	26.2	29.1 ± 5.1
9901	28.2	31.6 ± 5.8

Tabla 4.5: Se exponen las comparaciones de los datos obtenidos por la calibración de los PMTs en el Sector 0 con los datos de la calibración del V0A.

4.2.2. Resolución Temporal

Como mencionamos con anterioridad uno de los requerimientos para el V0 es que la resolución en tiempo σ sea menor a $1nseg$. En el caso de la calibración no pudimos obtener estos datos debido a que nuestro arreglo para el V0A no era apto para tener un trigger adecuado para el TDC, ya que las paleta que se usarón con el V0A son muy grandes para este tipo de adquisición de datos. El hecho de que sean muy grandes hace que las fluctuaciones en su tiempo de respuesta sean muy grandes y lo que nos interesa es que haya la menor fluctuación posible.

Para saber aproximadamente cual es la resolución en tiempo σ del V0A podemos comparar los datos de la carga en el Sector cero con los datos de carga de V0A, ya que para una cierta carga debe haber un cierto tiempo. En el caso del Sector 0 obtuvimos una σ experimental. Entonces si tenemos una carga del V0A igual a la carga del Sector 0 deberíamos tener un tiempo de resolución aproximado al del prototipo, esto debido a que usamos el mismo fotomultiplicador. Para poder tener la σ aproximada del V0A lo haremos interpolando tomando los datos experimentales del Sector 0 y las cargas del V0A.

Lo anterior se obtiene de la siguiente manera, a las gráficas de carga vs σ

que obtuvimos de los PMTs caracterizados con el Sector 0, se ajusta a una función;

$$\sigma = \frac{k}{\sqrt{q} + A} \quad (4.1)$$

donde k y A son constantes y q la carga obtenida. Con este ajuste nos interesa obtener estas constantes y con la carga obtenida en el V0A podemos obtener una resolución temporal σ . En este caso hicimos un cambio de variable para ajustar una recta, los cálculos que se hicieron se muestran en el Apéndice .1. Podemos ver uno de los ajustes que se realizaron en una de las gráficas de los PMTs en la figura(4.9). Este ajuste pertenece al PMT-9712.

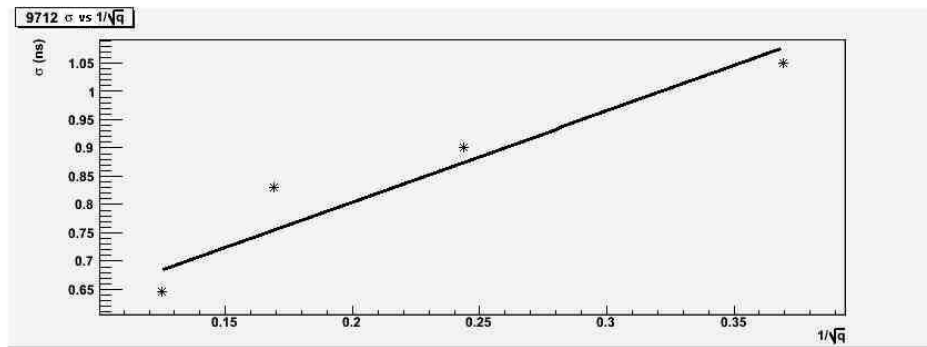


Figura 4.9: Ajuste de una recta para el PMT-9712 con un cambio de variable para la carga graficando así $1/\sqrt{q}$.

En la tabla(4.6) se muestran la resolución temporal σ obtenida por la interpolación y la que se tomó directamente para cada PMT que se utilizó en el V0A.

Se observar que los PMTs que tienen mayor estadística la resolución en tiempo σ se aproximan más. Los que tiene más estadística son los PMTs que se encuentran en los anillos 2 y 3. Estos anillos son los que tienen una carga aproximada entre los datos del Sector 0 y las obtenidas en el V0A.

4.3. Calibración del V0A con Haz de Partículas

En general se obtuvo que para los anillos que tuvieron suficiente estadística, tienen una resolución en tiempo σ que esta entre $750y900ps$. Sin embargo,

Resolución Temporal						
PMT	9805	9800	9803	9712	9791	9901
Carga (pC) Sector 0	28.6	19.4	25.3	16.8	26.2	28.2
Carga (pC) V0A	12.8	15.4	27.9	14.1	29.1	31.6
σ ($nseg$) Sector 0	0.829	0.964	0.780	0.901	0.786	0.978
σ ($nseg$)* V0A	0.788	0.773	0.747	0.908	0.704	0.865
* Son datos obtenidos de interpolar						

Tabla 4.6: Se compara la resolución en tiempo obtenida directamente en la calibración de los PMTs que se utilizaron para las mediciones del V0A con los datos obtenidos de interpolar.

es necesaria una calibración detallada, que solo puede hacerse aumentando el flujo con partículas incidentes. Esto solamente es posible con un haz de partículas de alta energía, el cual nos fue accesible en el acelerado PS del CERN con un haz de piones negativos de $6 GeV$. Permitiendo así la calibración de cada celda, teniendo una resolución temporal σ entre 400 y 850 ps [19]. Como se puede observar en la figura 4.10.

Para determinar la luminosidad y extraer multiplicidad de partículas cargadas a partir de las señales detectadas es necesario también calibrar la amplitud de la respuesta del detector al paso de partículas mínimo ionizantes. Esta calibración se hizo tanto con rayos cósmicos como con el haz de partículas negativas del acelerador PS. Los resultados de las mediciones con haz de partículas muestran una uniformidad en la ganancia de cada celda entre 82 y 106 extraída de la posición de pico de la distribución de la Landau ajustada a los espectros de cada celda (ver figuras 4.11 y 4.12).

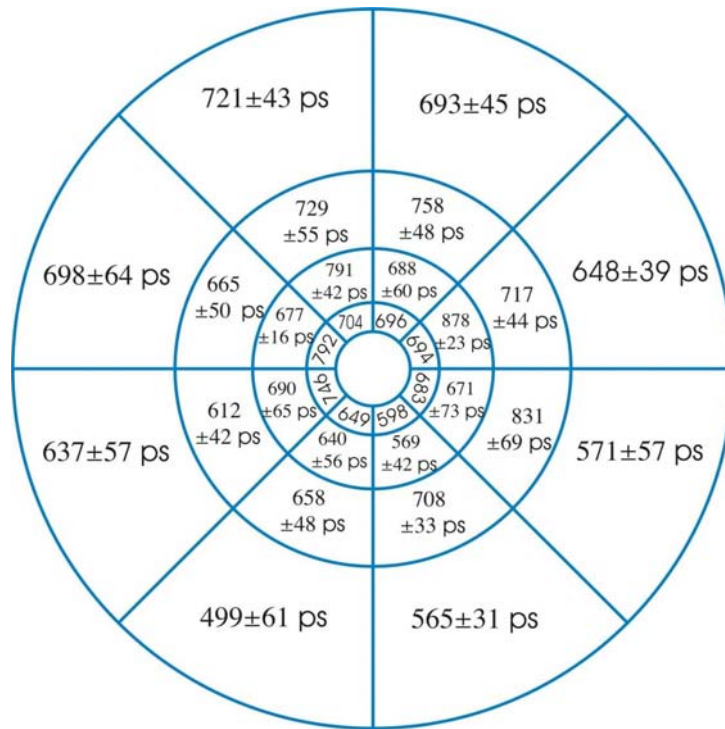


Figura 4.10: Se graficaron cada punto en la prueba de haz, obteniendo en el análisis una resolución en tiempo σ para cada punto.

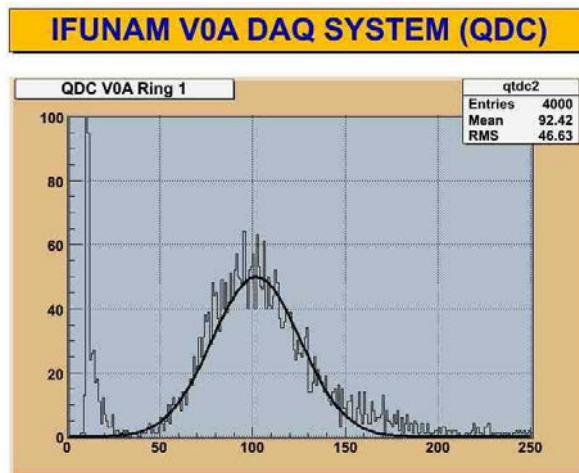


Figura 4.11: Espectro de energía para la calibración del V0A con haz, de una de las celdas del detector.

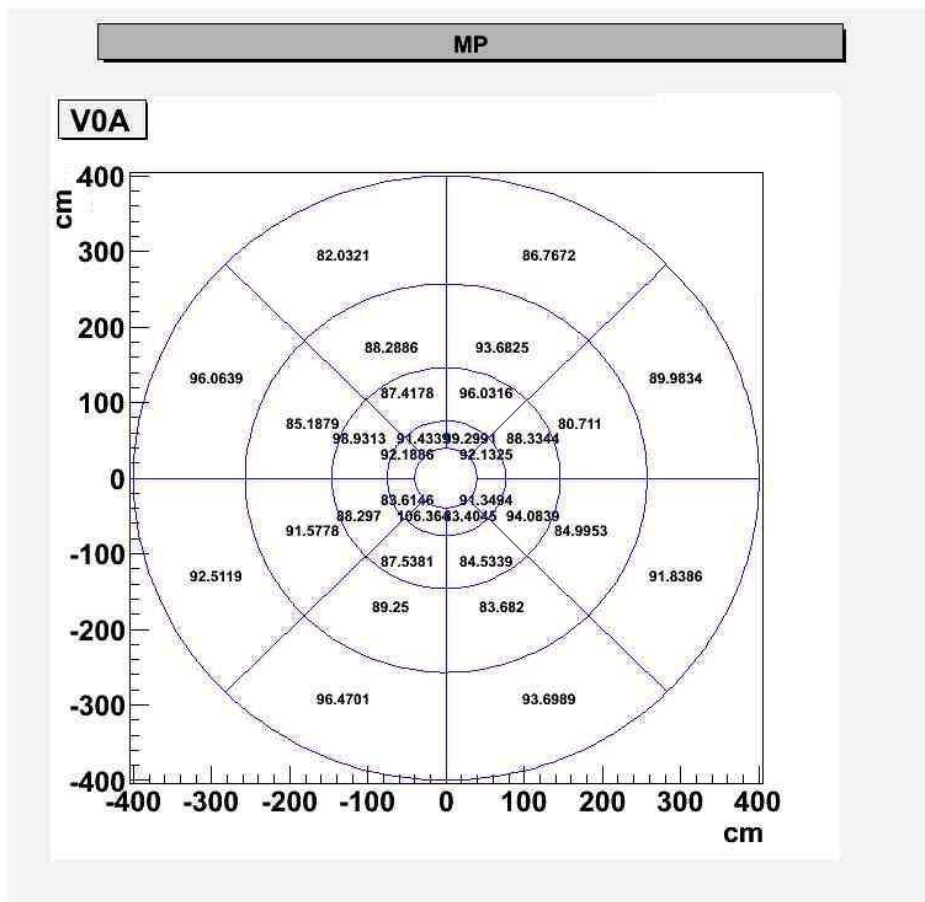


Figura 4.12: Se muestra la distribución de la uniformidad en la ganancia en todas las celdas del detector. Resultados obtenidos por la prueba con haz.

Conclusiones

El tema de tesis esta centrado en la construcción del detector V0A para el experimento ALICE, que una colaboración internacional. Este se encuentra montado en el laboratorio del CERN Ginebra, Suiza. Este experimento estudiará interacciones de protón-protón y entre haces de Pb-Pb producidas por el colisionador LHC (que es hasta ahora el más grande del mundo), que tendrá como objetivo estudiar las propiedades de la materia cromodinámica. Este experimento consta de 15 detectores diferentes para medir las miles de partículas producidas en cada interacción. El detector V0A es parte del sistema de trigger (selección de eventos) a nivel cero de todo el experimento y sirve también para discriminar entre interacciones de un haz con el gas residual y un haz con haz. Para ello se requiere que sea 100 % eficiente a partículas mínimo ionizantes (MIP) y que la resolución temporal en la detección de un MIP se menor que un $nseg$ para cada una de las celdas.

Para optimizar el diseño y la técnica de construcción de un detector de este tipo, que satisficiera los requerimientos del experimento se construyeron diversos prototipos. Yo participé en la construcción y pruebas del llamado prototipo Sector 0, consistente en cuatro celdas a una escala 1:1. Los resultados de las pruebas fueron tan exitosos que se transfirió la técnica de construcción directamente al detector V0A.

El detector V0A consiste en un anillo centellador de 40 cm de radio y 2.5 cm de espesor. Esta segmentado en 32 celdas formadas por cuatro anillos y ocho sectores. Esta construido por medio de la técnica MegaTile, que consiste en maquinar la separación entre las celdas del centellador y pegarlas con pegamento óptico mezclado con dióxido de titanio para aislarlas ópticamente y mantener el detector en una sola estructura mecánicamente. Esta es la primera ocasión que se utilizó la técnica MegaTile en un detector que funcionará como trigger.

El V0A se encontrará situado dentro del campo magnético del solenoide

central del experimento que llega hasta 0.5 *Testla*. A fin de extraer la señal luminosa de las celdas se utilizaron las fibras corredoras de frecuencia (WLSF) acopladas a fotomultiplicadores (PMT) *Mesh Type* que funcionan dentro de campos magnéticos menores a un *Tesla*.

Investigue diferentes técnicas de pulido y aluminizado de las fibras (WLSF) para optimizar la cantidad de luz transmitida al PMT y se procesaron cerca de mil fibras necesarias para el detector. Utilizando la técnica de sputtering con magnetrones se depositaron películas de aluminio y cuarzo, este último con el propósito de proteger a la película de aluminio.

En el detector se maquinaron de ambos lados ranuras equidistantes donde se insertaron las fibras con el extremo aluminizado dentro del centellador. Para cada celda se unieron los extremos de las fibras pegándolas en un conector de Nylamid y se pulieron para tener un buen acoplamiento con los PMTs. Las caras del detector se cubrieron con carton blanco cubierto de teflón para aumentar la colección de luz y exteriormente con acetatos negros para aislarlos de la luz exterior.

Los PMTs de las cuatro celdas de un sector se instalaron en cajas fijas al marco de soporte a un ángulo de 30° con respecto al campo magnético. Todas las regiones expuestas de las fibras se les colocó un funda de plástico negro (Termofit).

El proceso de construcción del detector, en la parte que yo estuve a cargo y en el que participaron varios técnicos y estudiantes llevó un poco más de un año debido a lo laborioso del proceso. Sin embargo el detector se acabó de construir a tiempo exitosamente para ser probado y llevado al CERN a ser calibrado con un haz de piones negativos antes de ser instalado dentro del experimento.

Para verificar el funcionamiento del detector antes de que lo lleváramos a Suiza, se hicieron mediciones utilizando rayos cósmicos usando dos paletas centelladoras para hacer coincidencias, con el objetivo de identificar solamente MIPs. Se armó un sistema de procesamiento y captación de datos utilizando electrónica tipo NIM y CAMAC.

La calibración del detector muestra que la resolución en tiempo σ para cada celda está entre 400 y 850 *ps*, una eficiencia de detección casi el 100% y una no uniformidad en la ganancia de 6.3%.

Durante este trabajo puede aportar los conocimientos básicos que tenía en la deposición de películas delgadas para la realización de los espejos para las caras terminales de las fibras. Contribuí al 90 % de la construcción del detector V0A. Aprendí y reforce los conocimientos que tenía sobre la electrónica que utilizamos para la calibración.

En general trabajar en esta tesis me permitió reforzar mis conocimiento en detección de radiación (principalmente en la parte de hardware) y empezar a empaparme de los conocimientos de altas energía así como temas en películas delgadas, de alto vacío, microscopía y óptica. La construcción y calibración de un detector de frontera como lo es el V0A me dió la oportunidad de aprender tecnologías y técnicas necesarias para un físico experimental. Con ello tube la oportunidad de trabajar en un laboratorio internacional con infraestructura de primer mundo.

El trabajo a futuro será instalar el detector a principios del 2008, integrarlo con el resto del experimento y tomar datos cuando el LHC empiece a funcionar, que se prevé será en el verano ese año. Yo participaré en esta segunda fase del programa.

Apéndice A

Se calibraron los 32 fotomultiplicadores, y se obtuvieron cuatro gráficas donde se puede apreciar el comportamiento del alto voltaje contra de la carga, el tiempo de respuesta y la resolución en tiempo y la carga contra esta última.

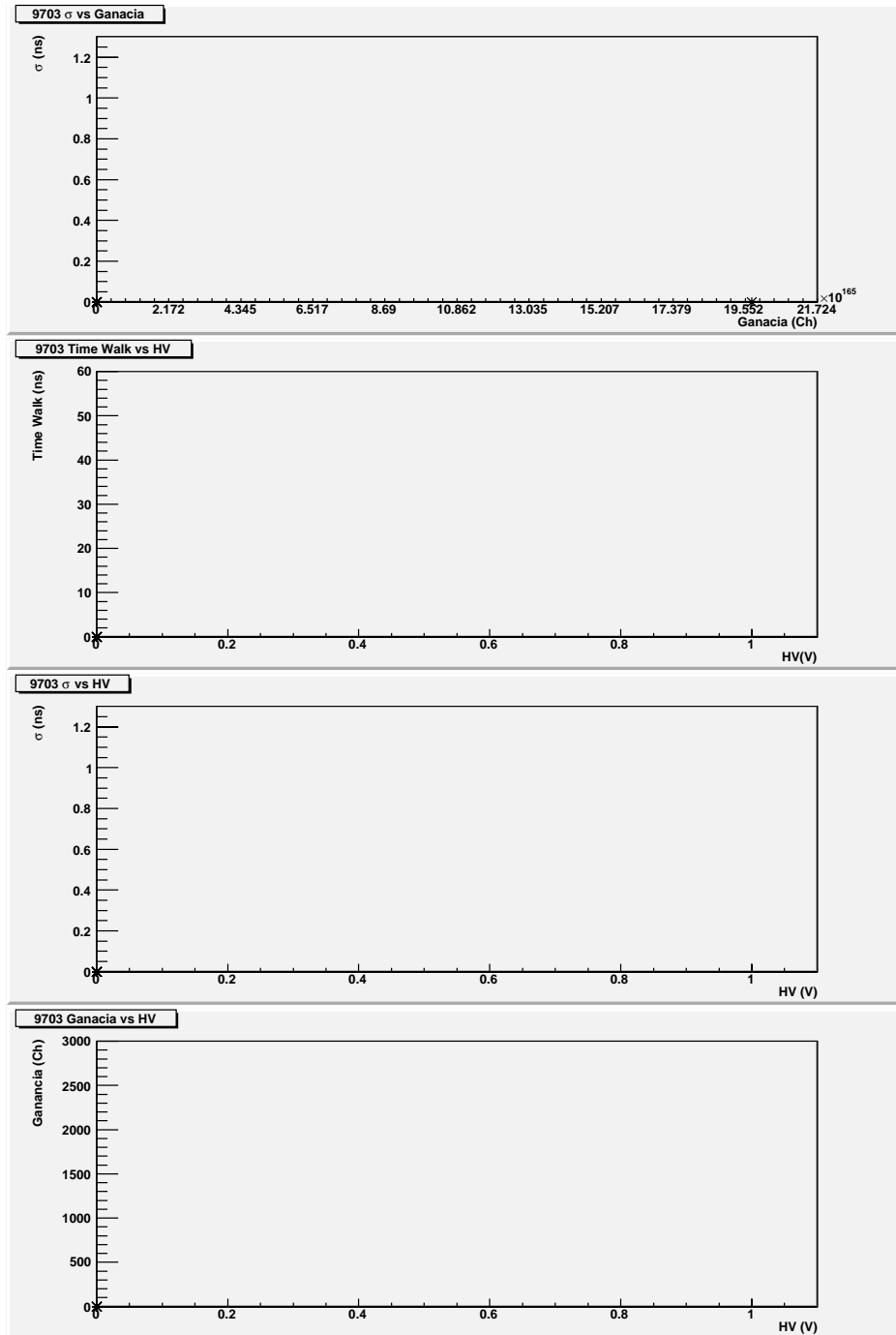


Figura 13: PMT con número de serie 9703

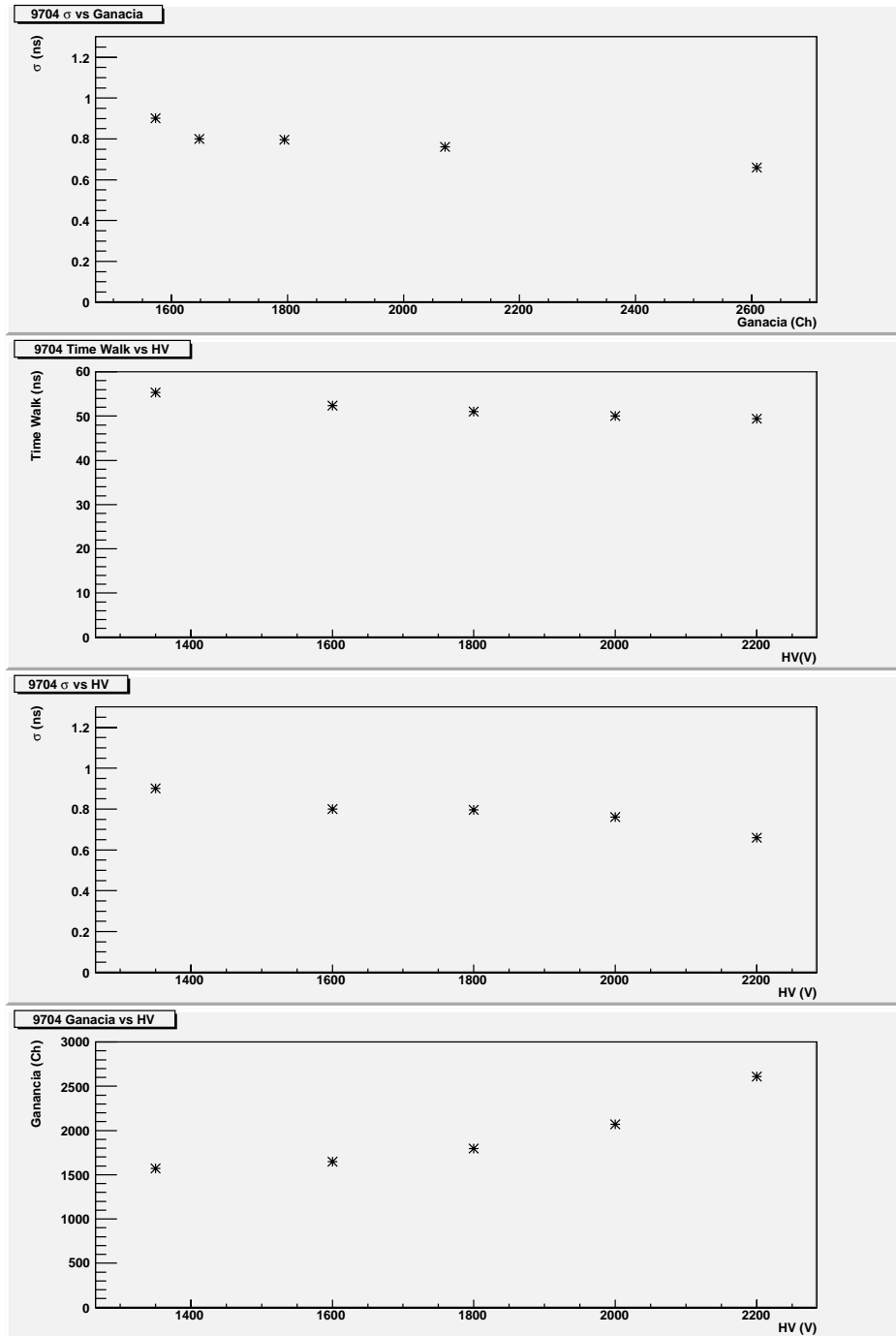


Figura 14: PMT con número de serie 9704

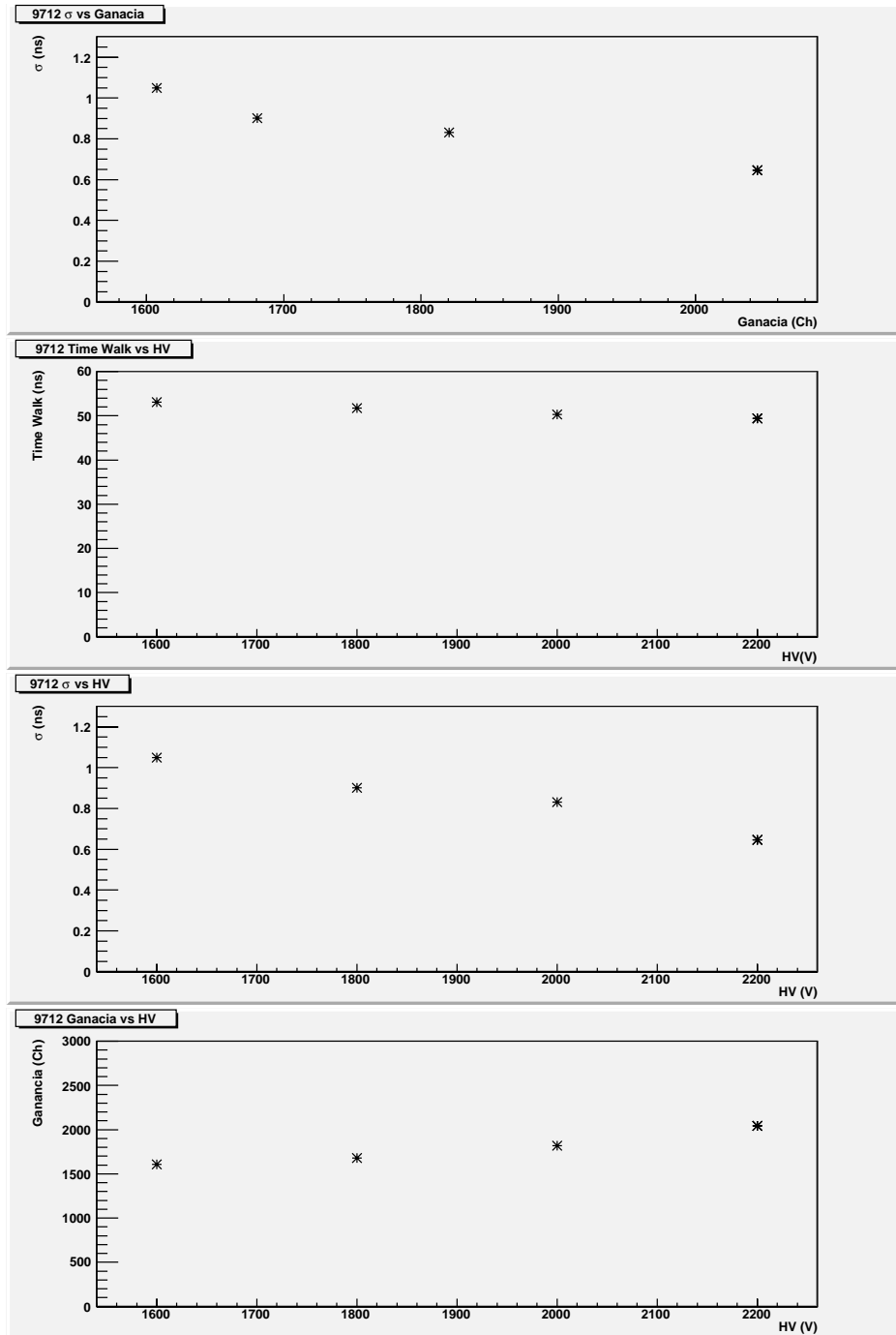


Figura 15: PMT con número de serie 9712

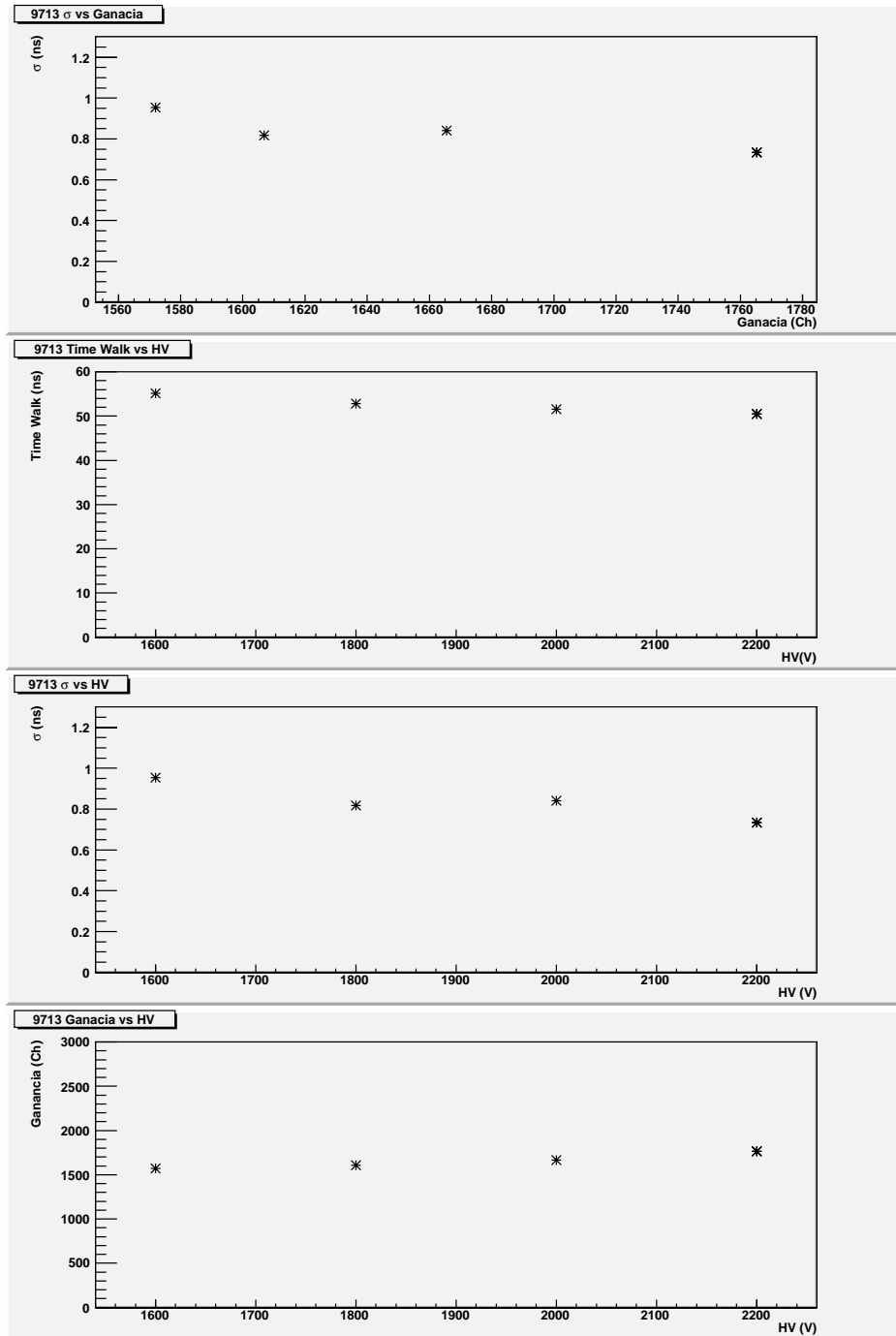


Figura 16: PMT con número de serie 9713

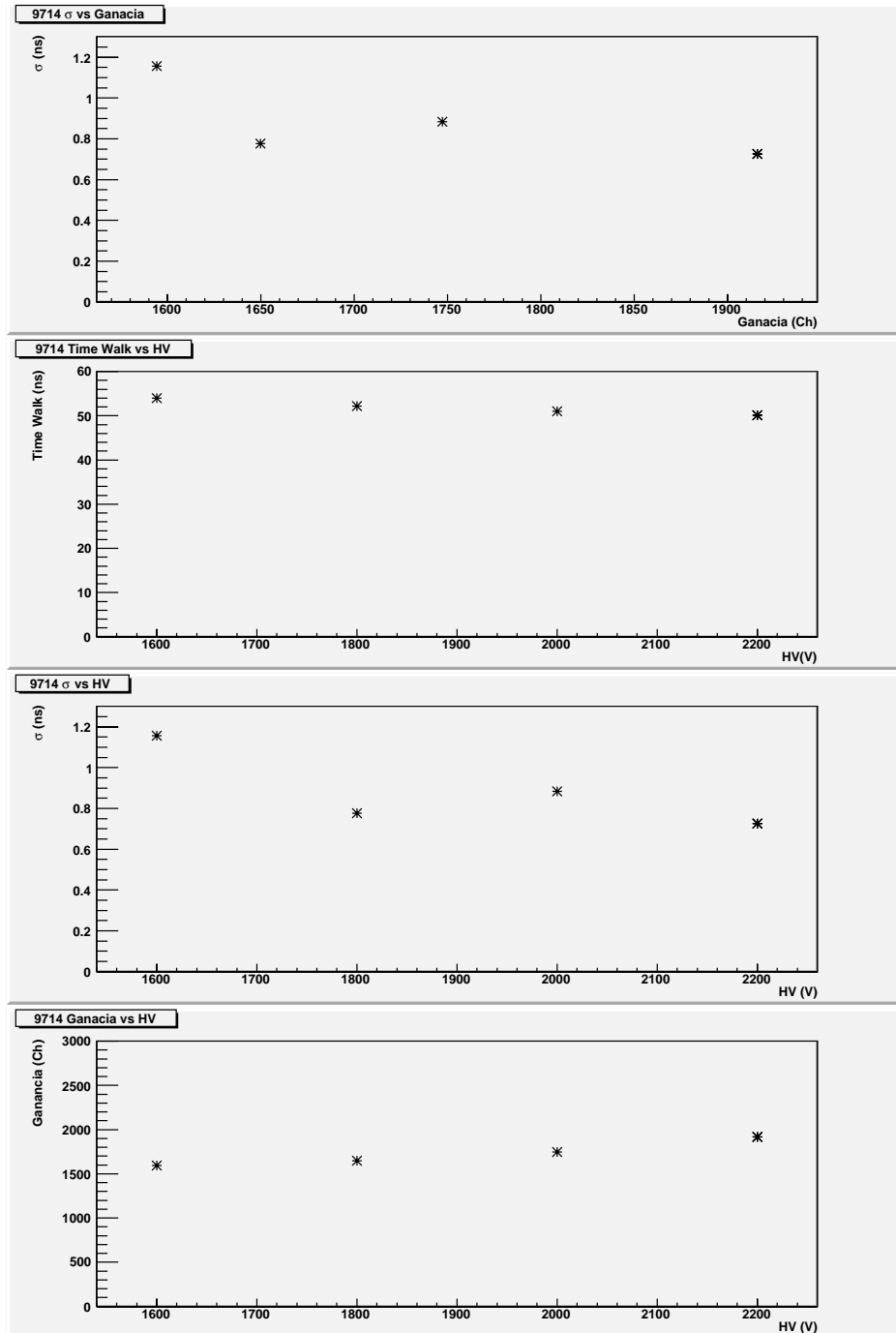


Figura 17: PMT con número de serie 9714

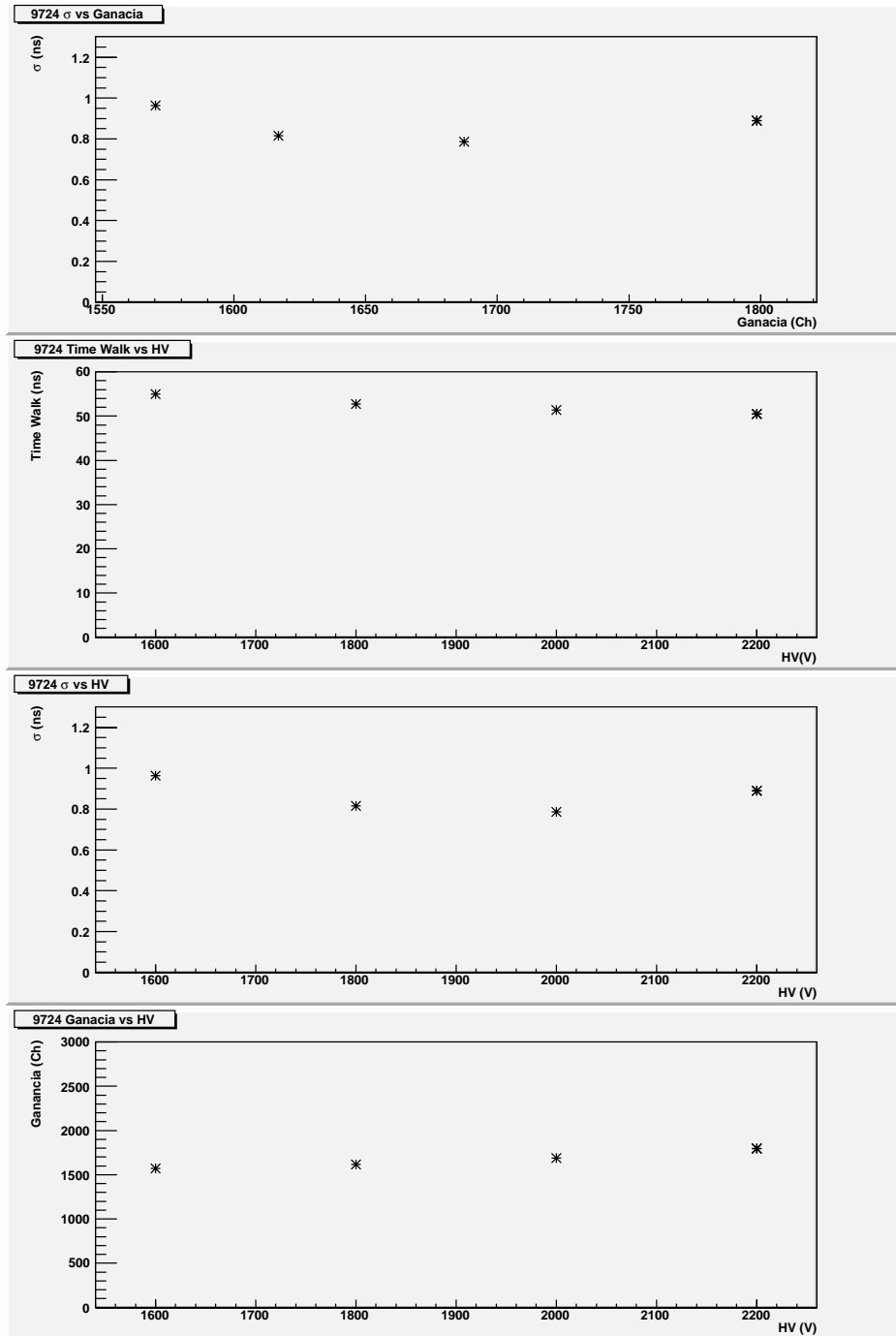


Figura 18: PMT con número de serie 9724

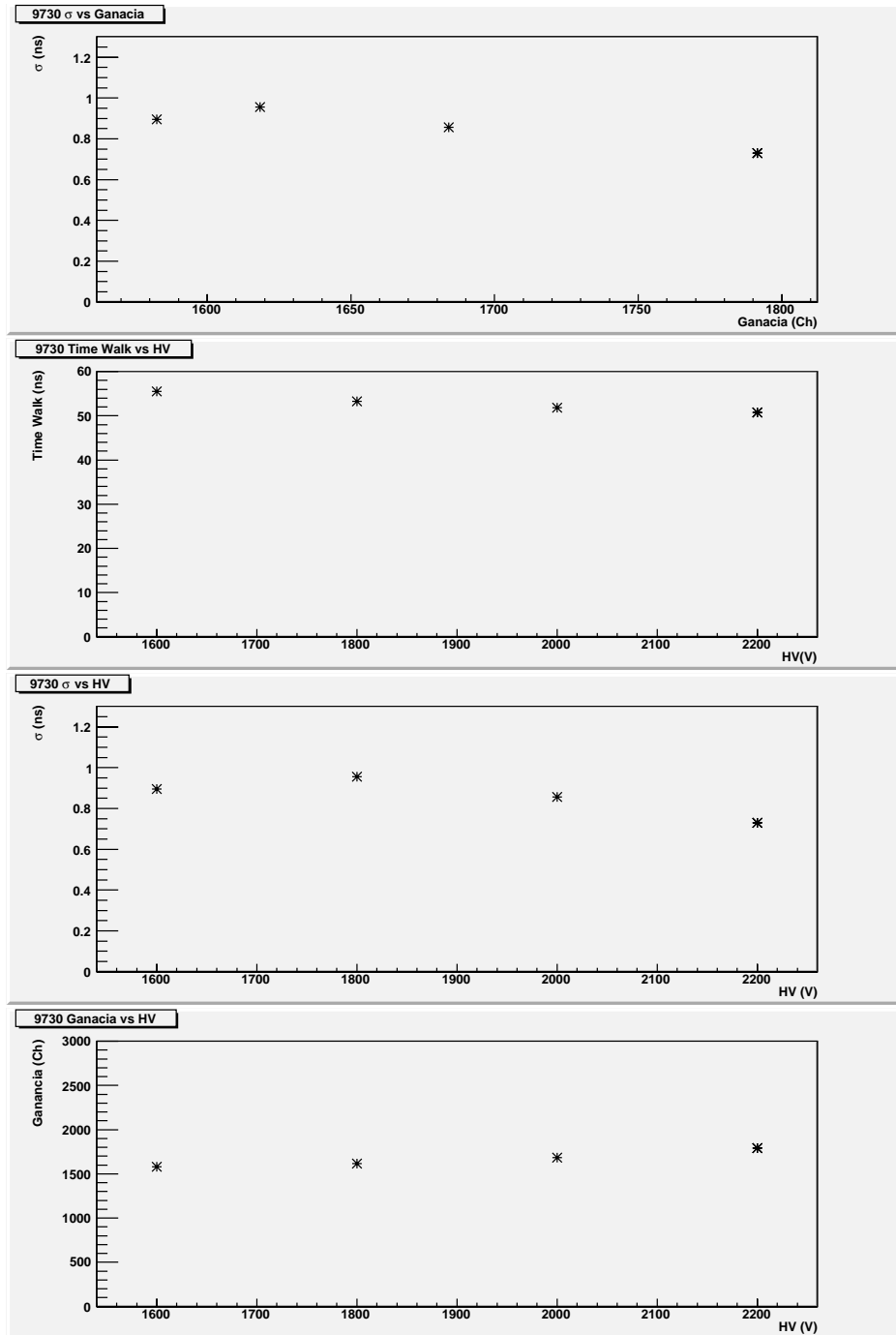


Figura 19: PMT con número de serie 9730

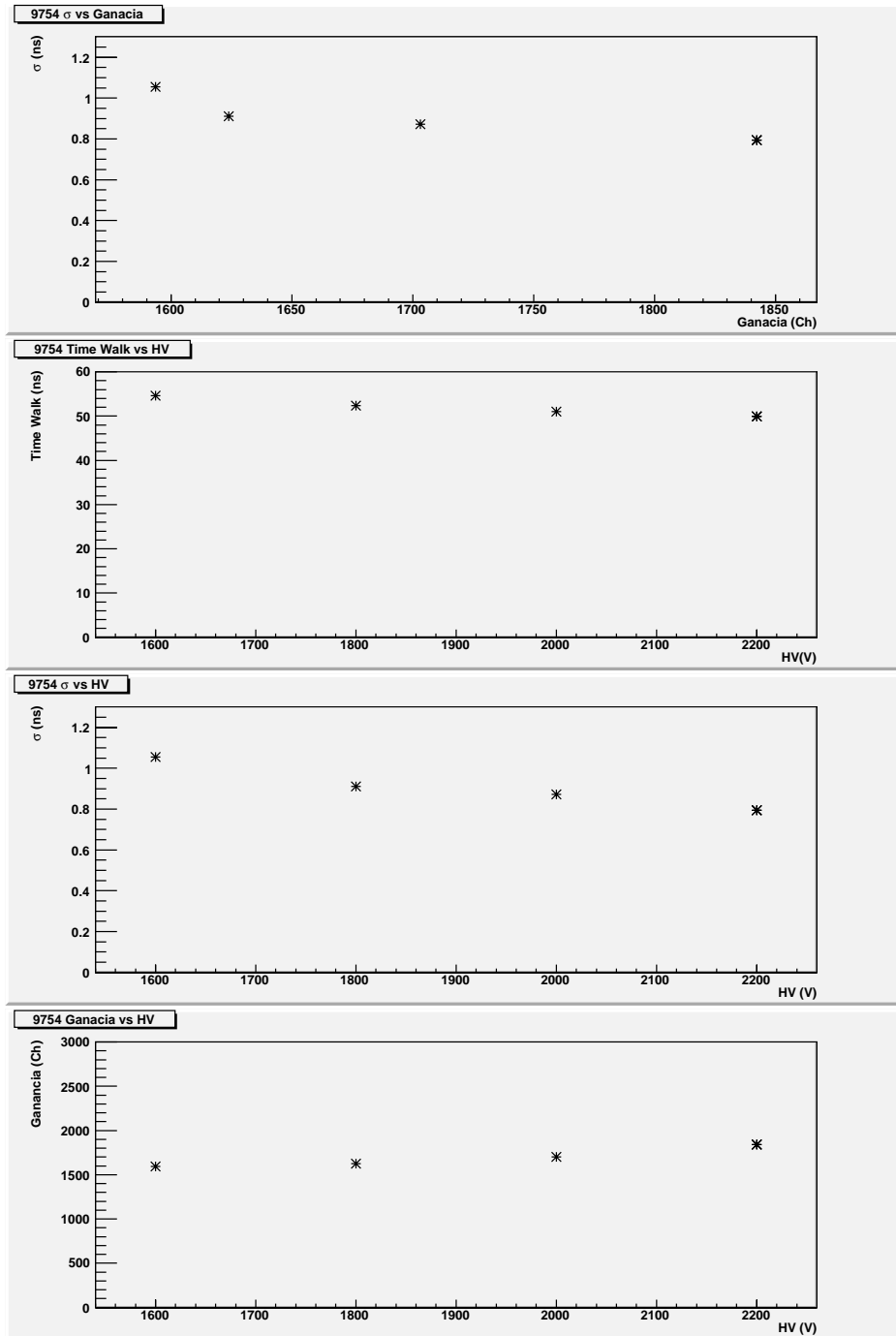


Figura 20: PMT con número de serie 9754

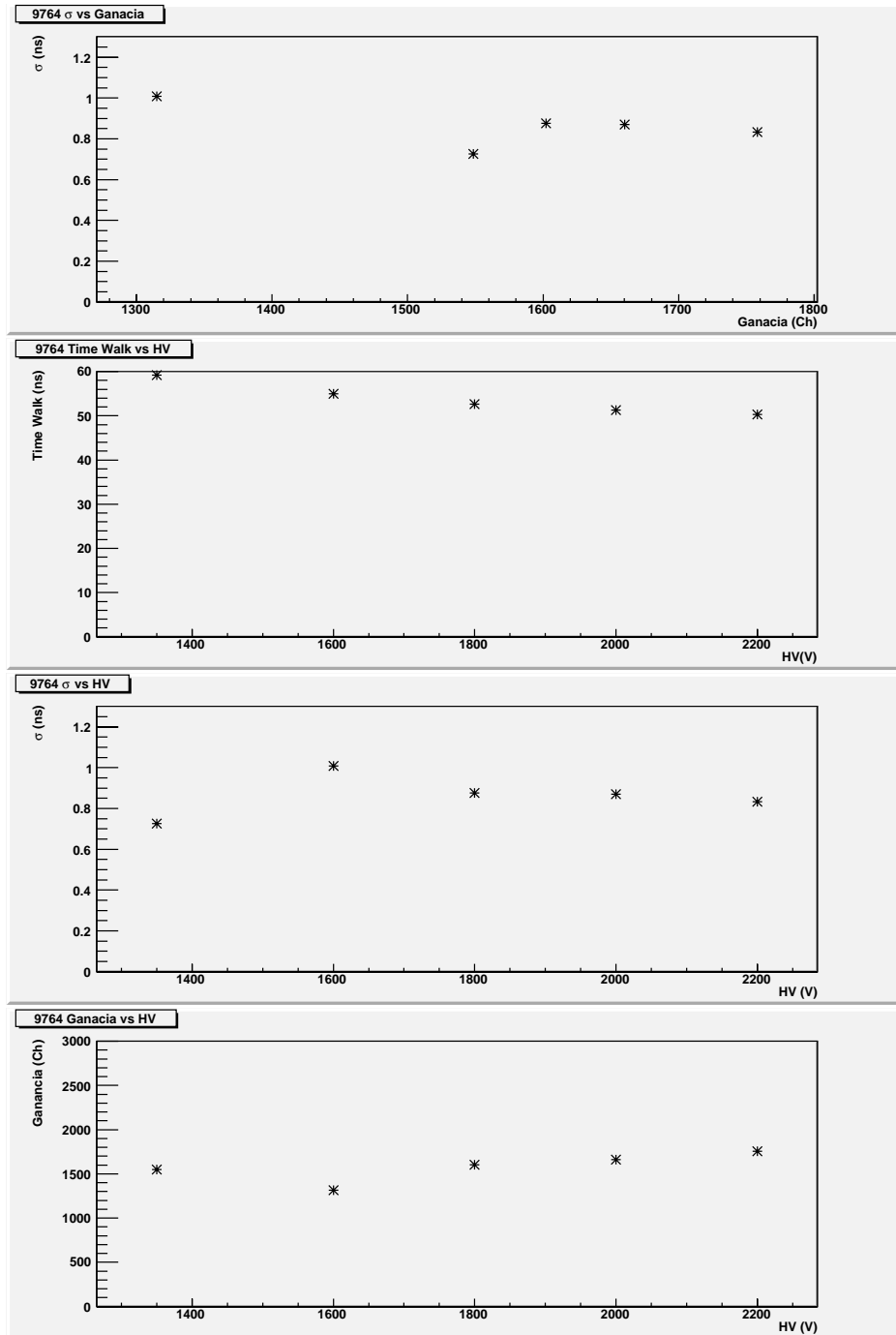


Figura 21: PMT con número de serie 9764

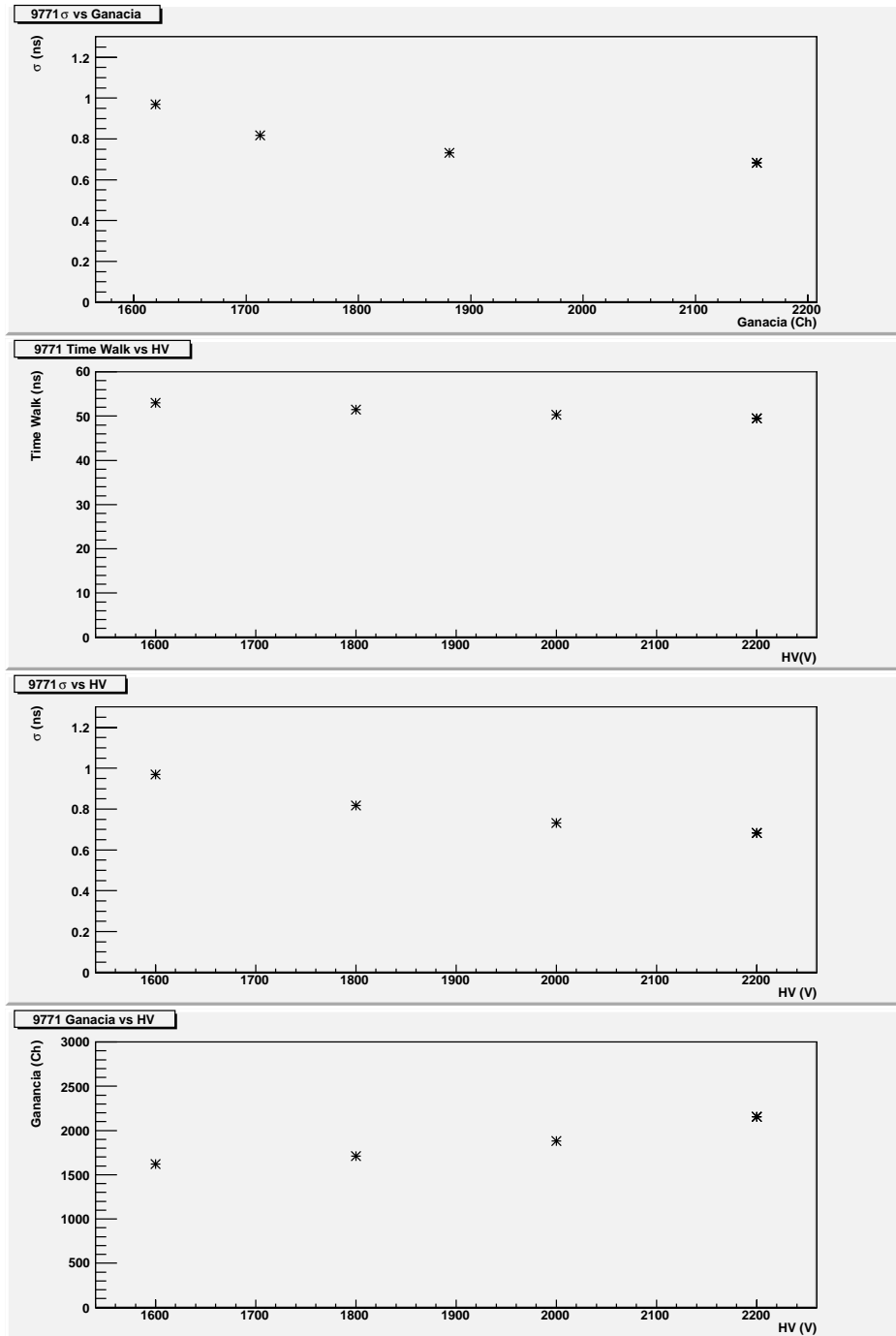


Figura 22: PMT con número de serie 9771

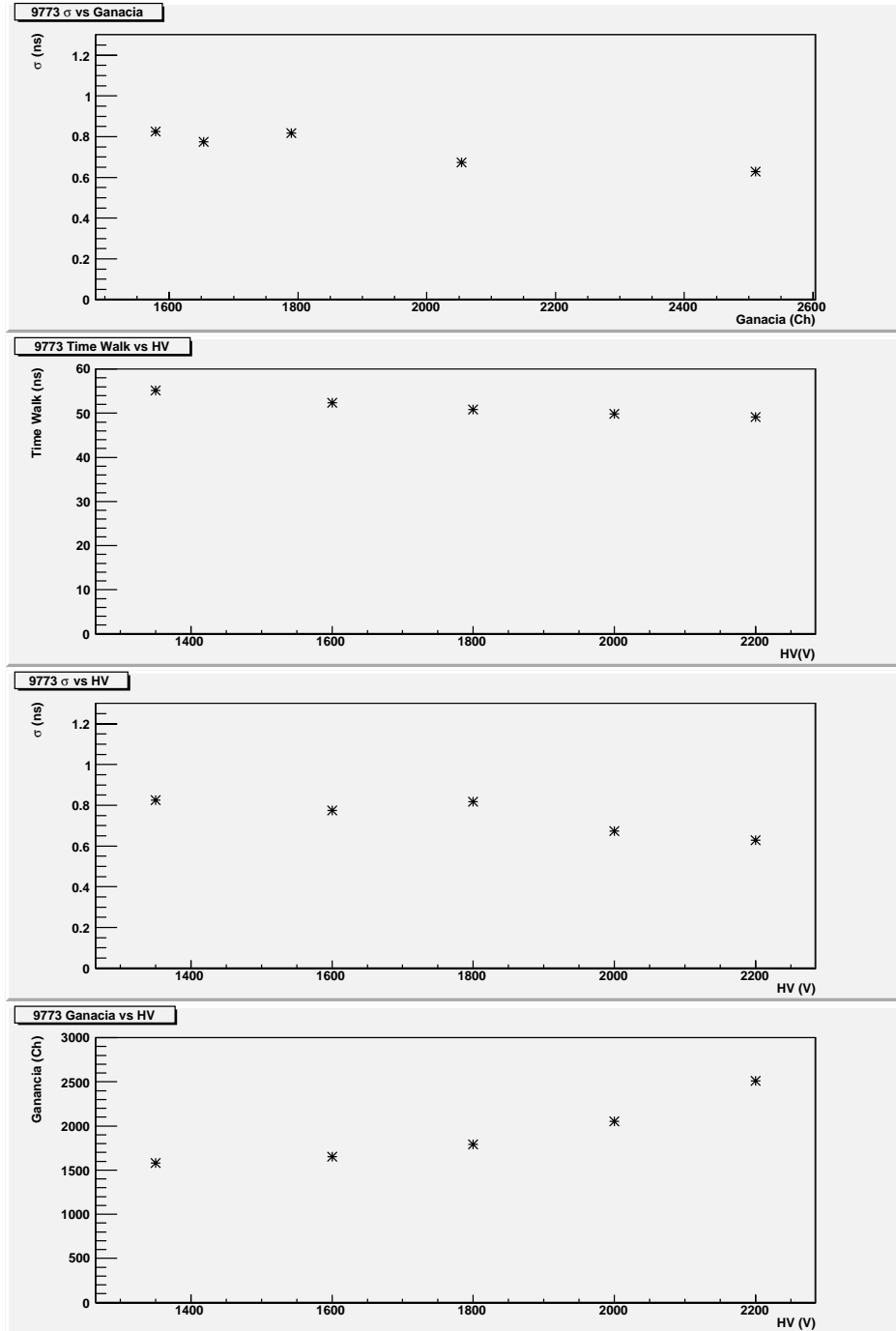


Figura 23: PMT con número de serie 9773

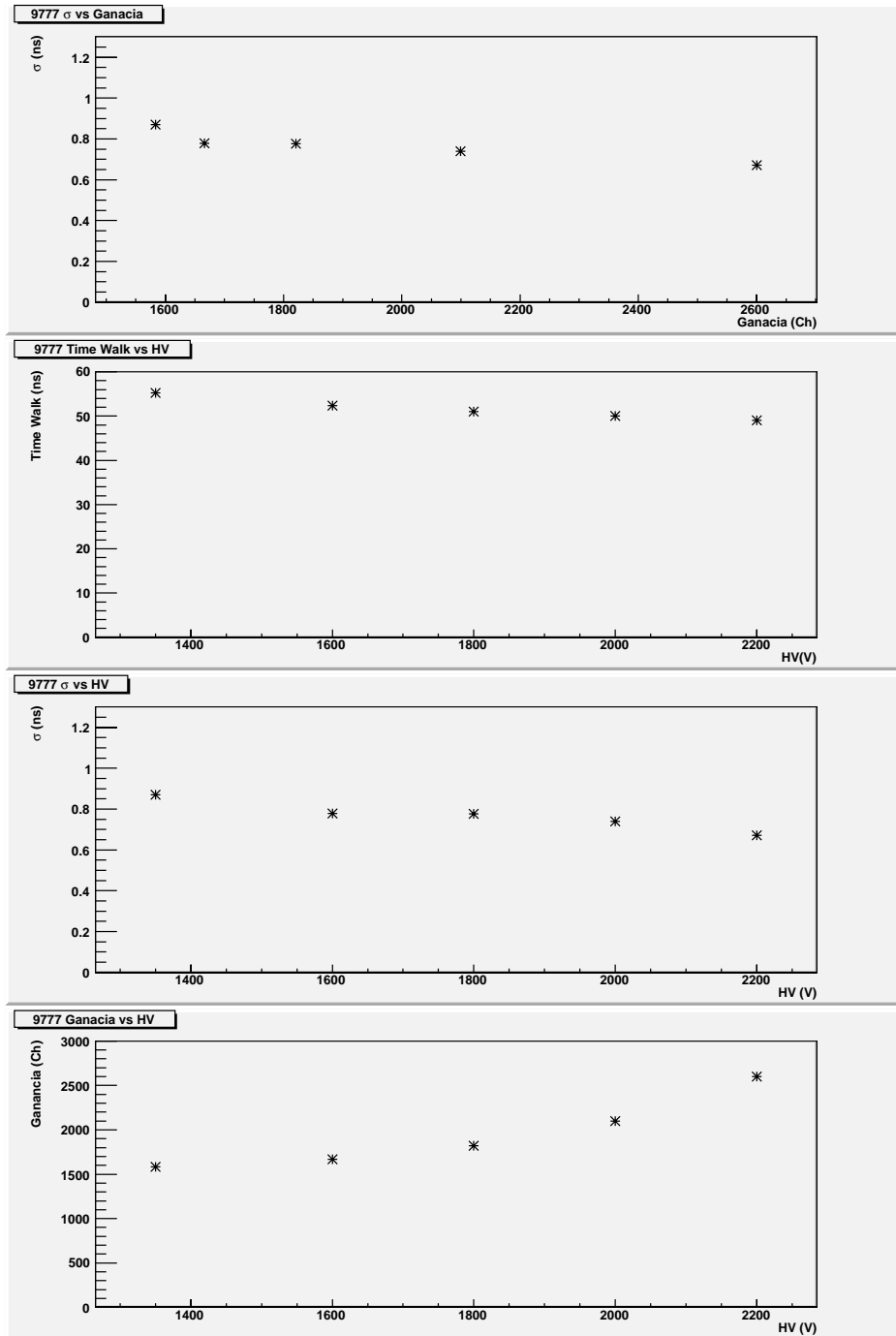


Figura 24: PMT con número de serie 9777

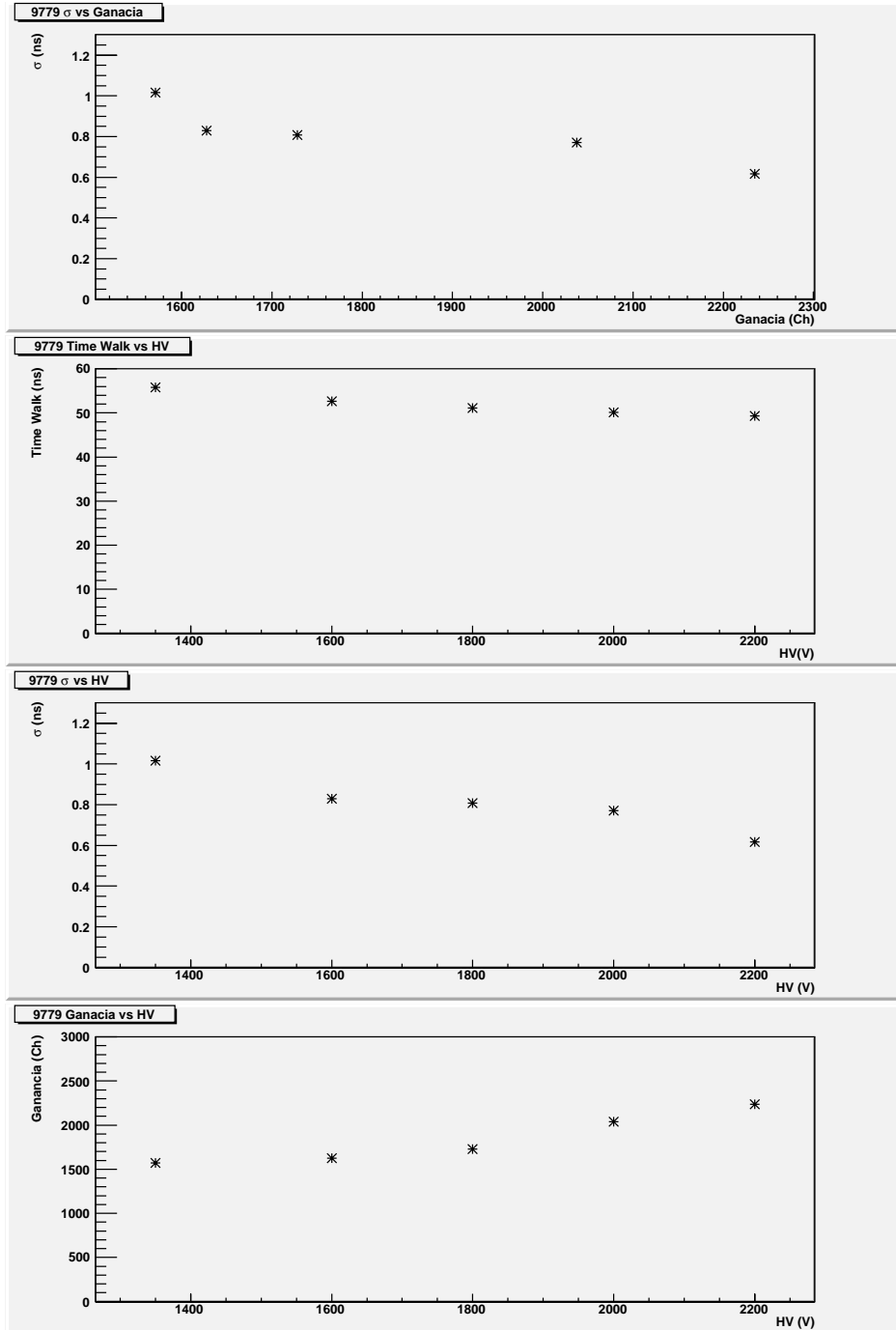


Figura 25: PMT con número de serie 9779

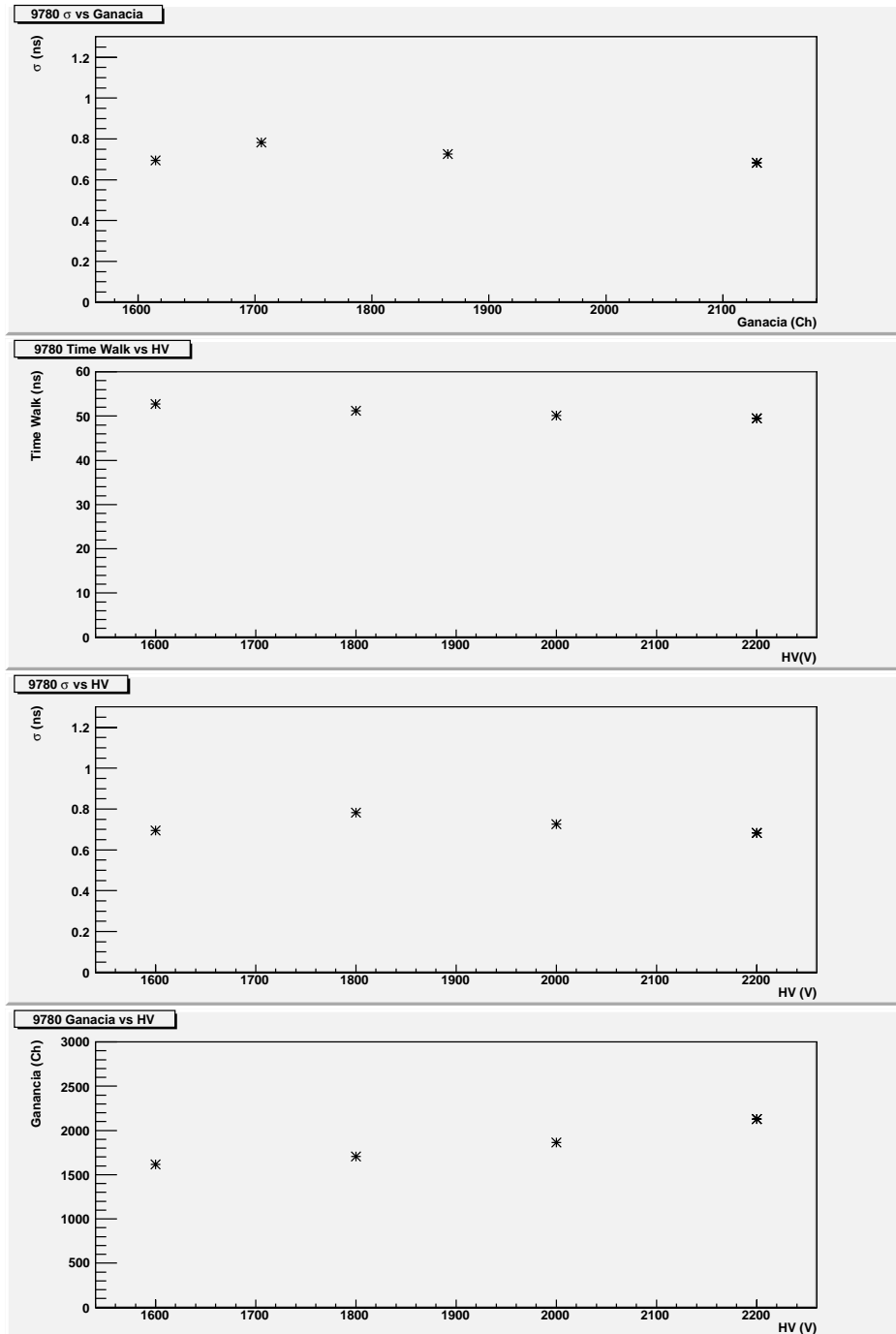


Figura 26: PMT con número de serie 9780

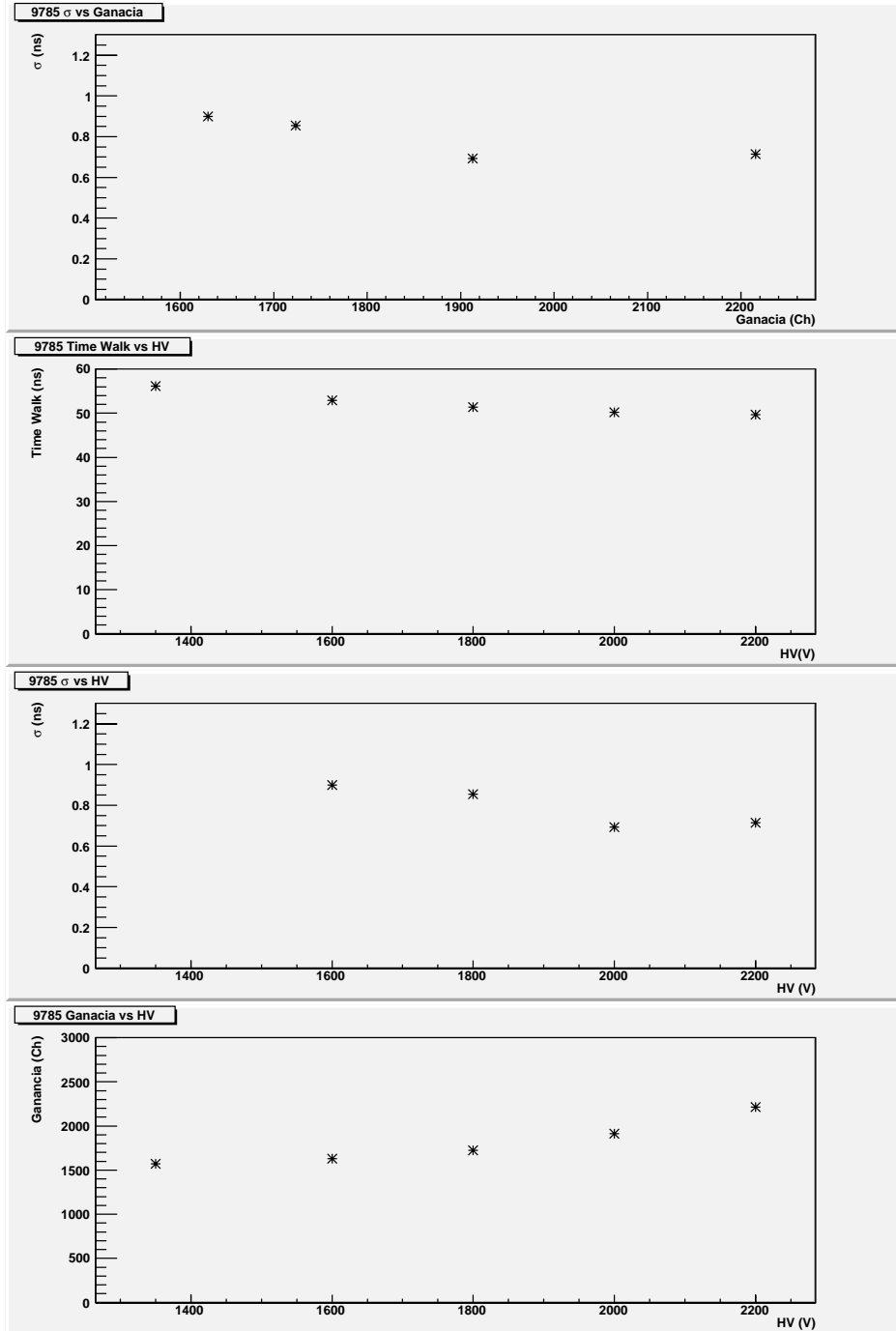


Figura 27: PMT con número de serie 9785

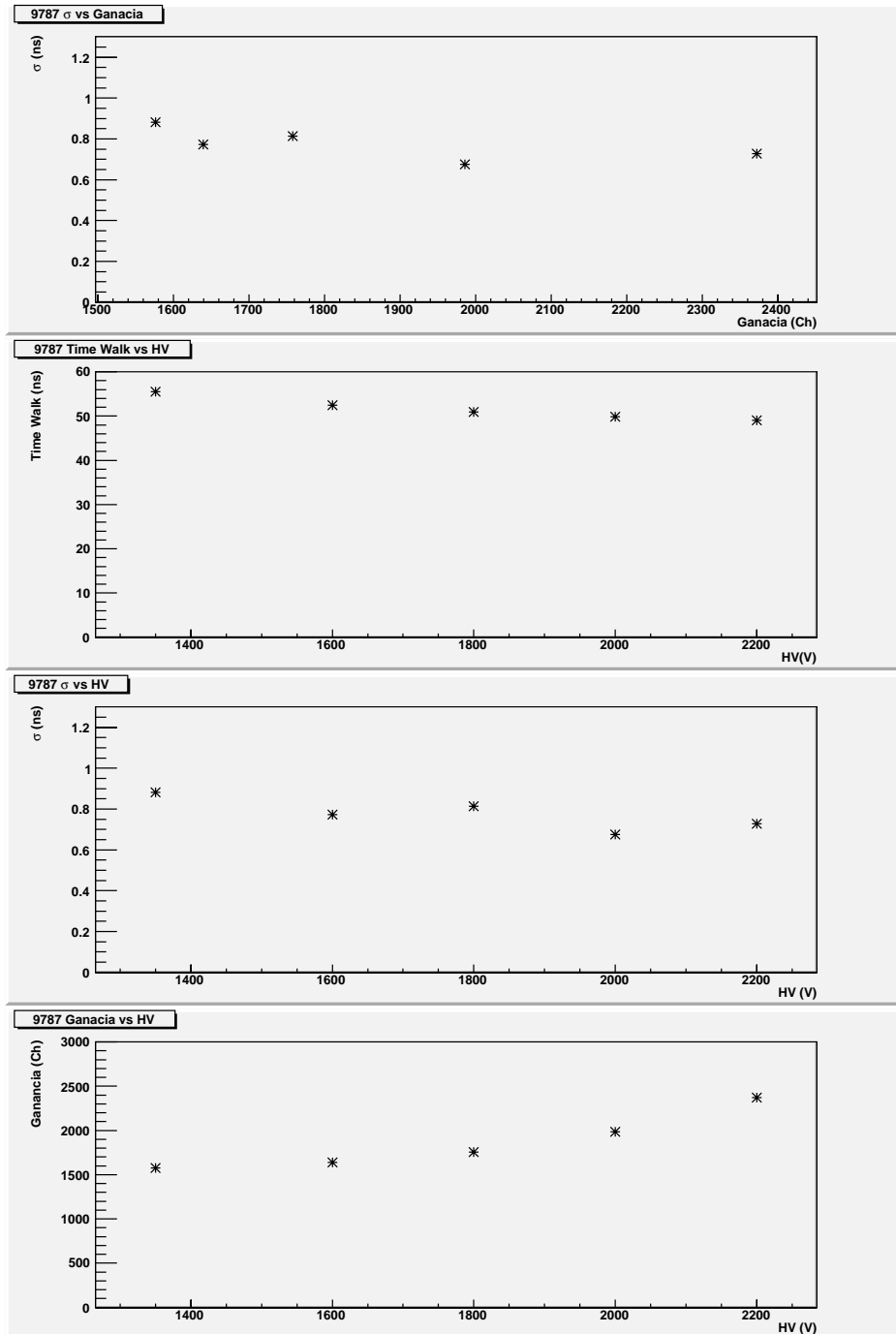


Figura 28: PMT con número de serie 9787

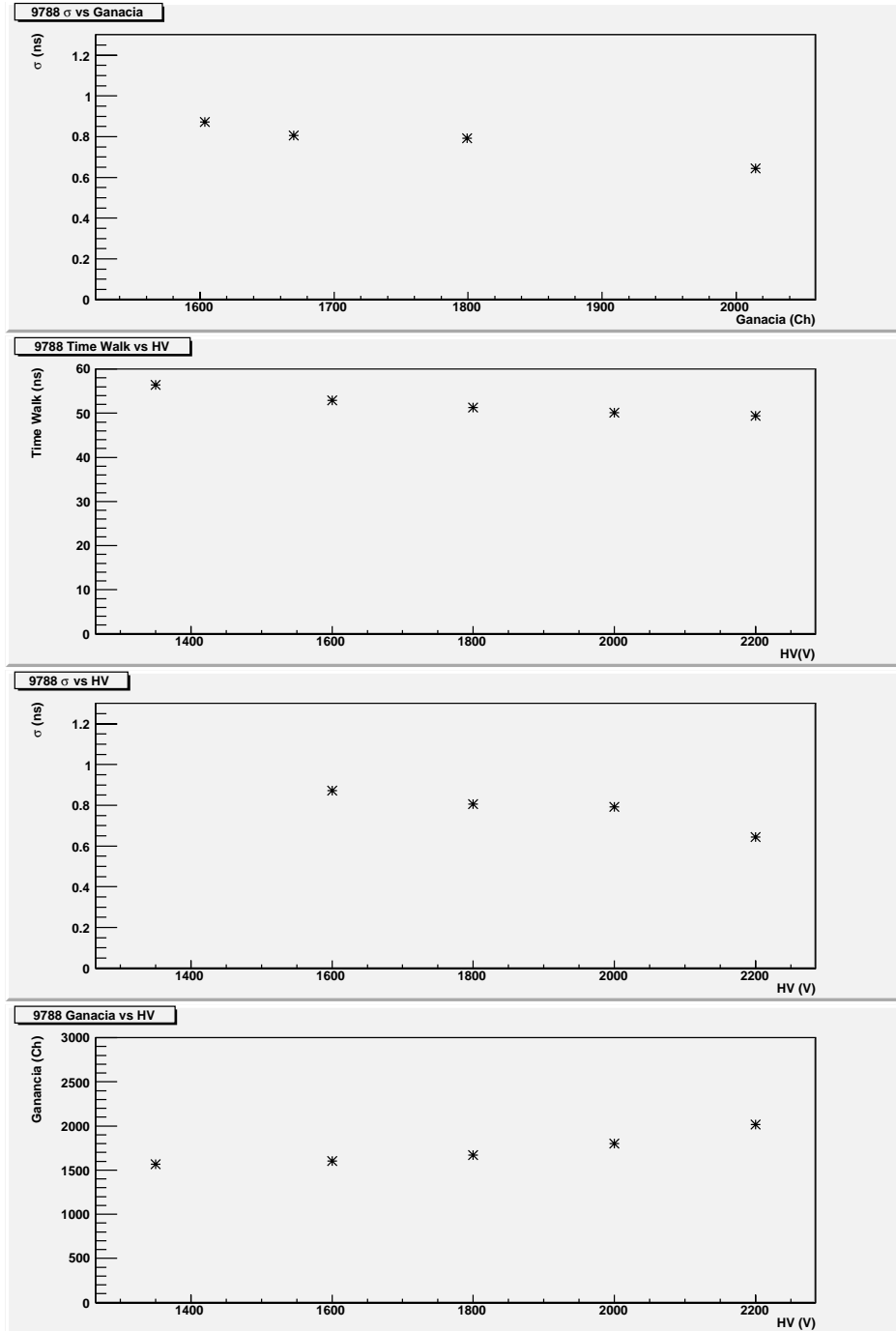


Figura 29: PMT con número de serie 9788

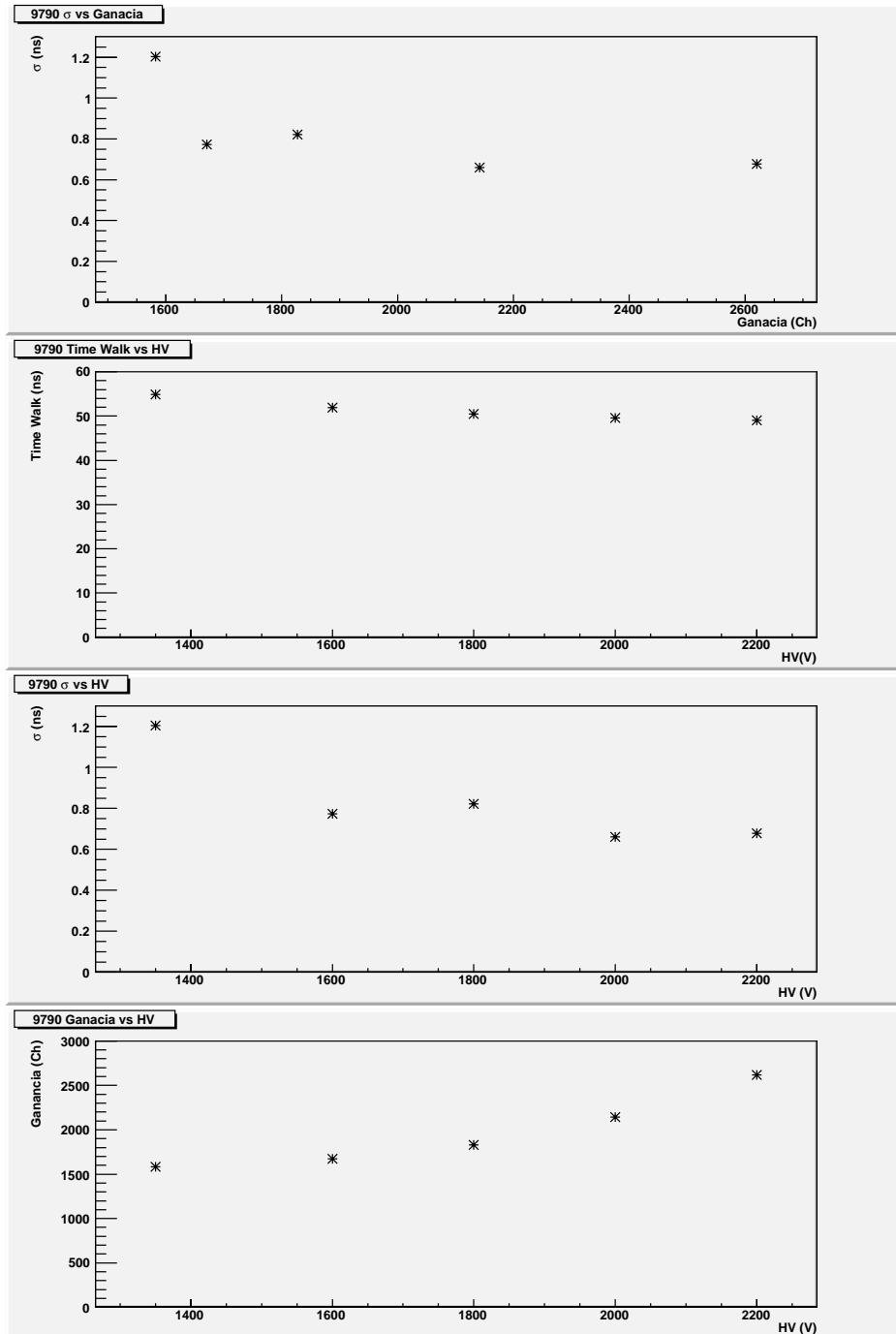


Figura 30: PMT con número de serie 9790

Las gráficas que se presentaron de las calibración de los PMT's tienen los valores para la ganancia en canales, se calculó factor de conversion para tener los datos del ADC Fast en términos del ADC Lecroy.

Primero se toman las diferencias de los datos obtenidos en la calibración del V0A con los pedestales que resultaron en las mediciones, tanto los datos del FAST como los del Lecroy. En las tabla(7) se muestran todas estas diferencias. La columna cinco muestra el nombre de los archivos donde se encuentra cada espectro que se obtuvo durante la adquisición de datos.

Obteniendo las diferencias entre el pico y el pedestal se obtuvo la razón entre la diferencia del ADC Fast y el ADC Lecroy. Se toman los datos del QDC 1 con el QDC 9, el QDC 2 con el QDC 10 y así sucesivamente.

Estos resultados se muestran en el Apéndice 4.3.

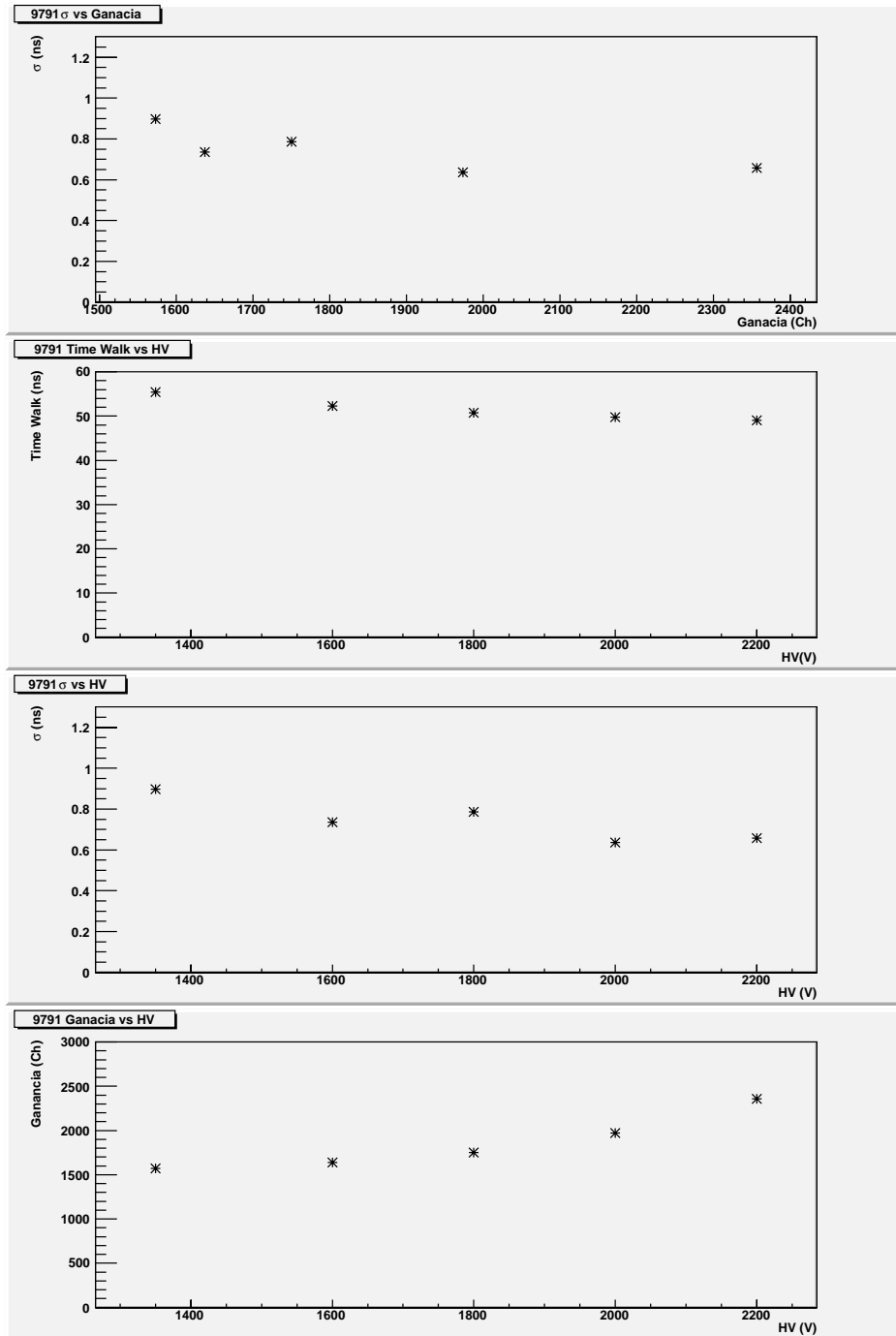


Figura 31: PMT con número de serie 9791

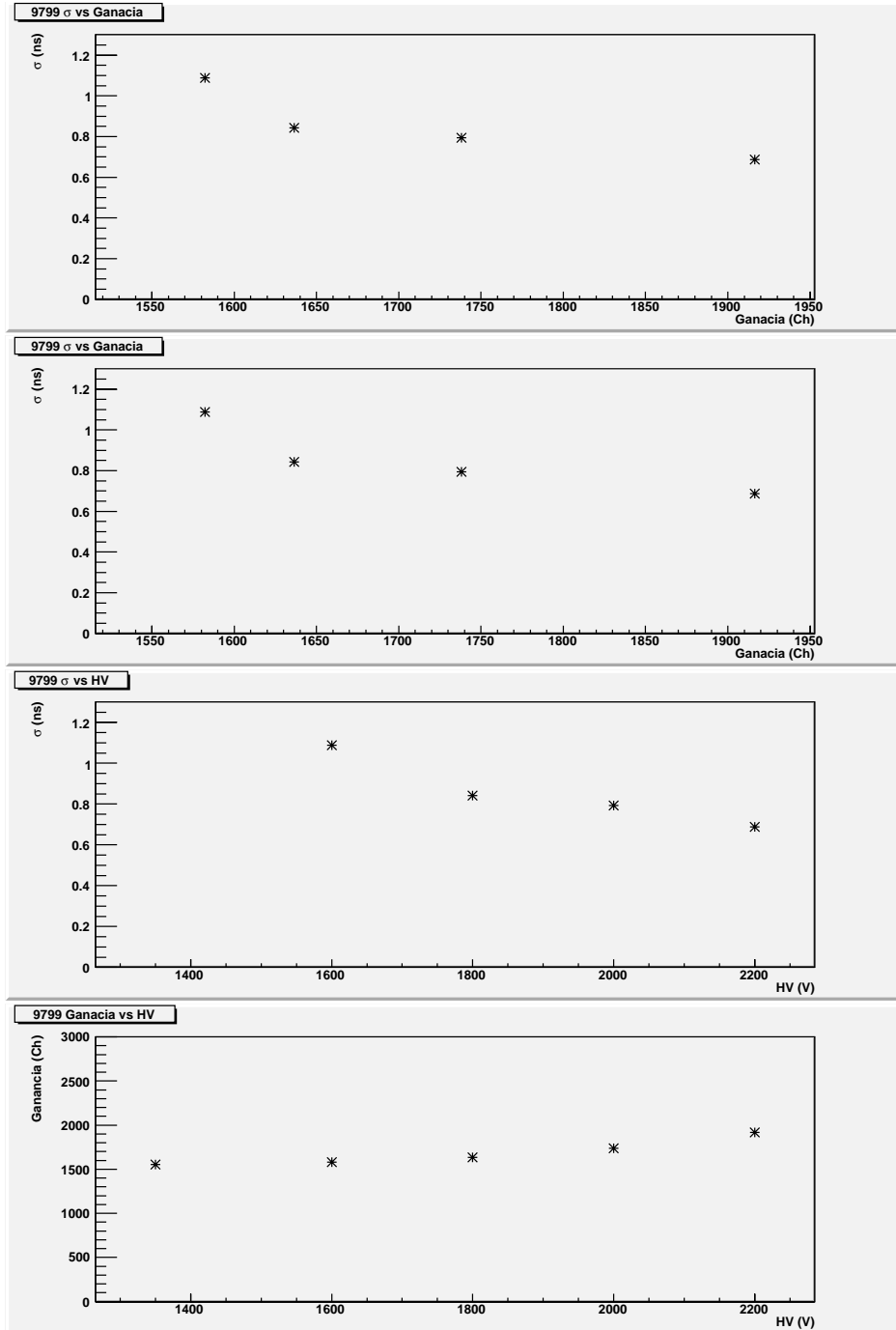


Figura 32: PMT con número de serie 9799

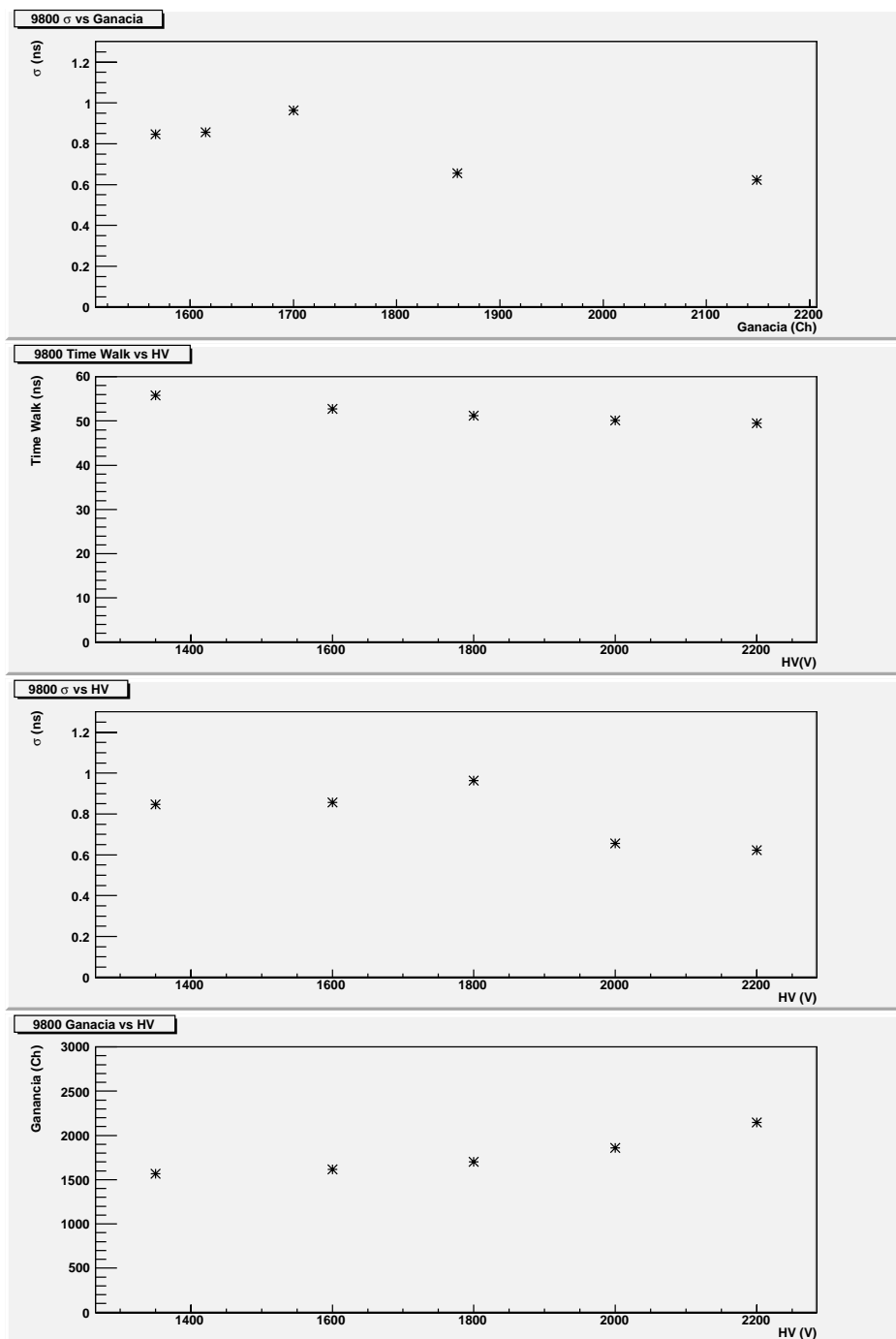


Figura 33: PMT con número de serie 9800

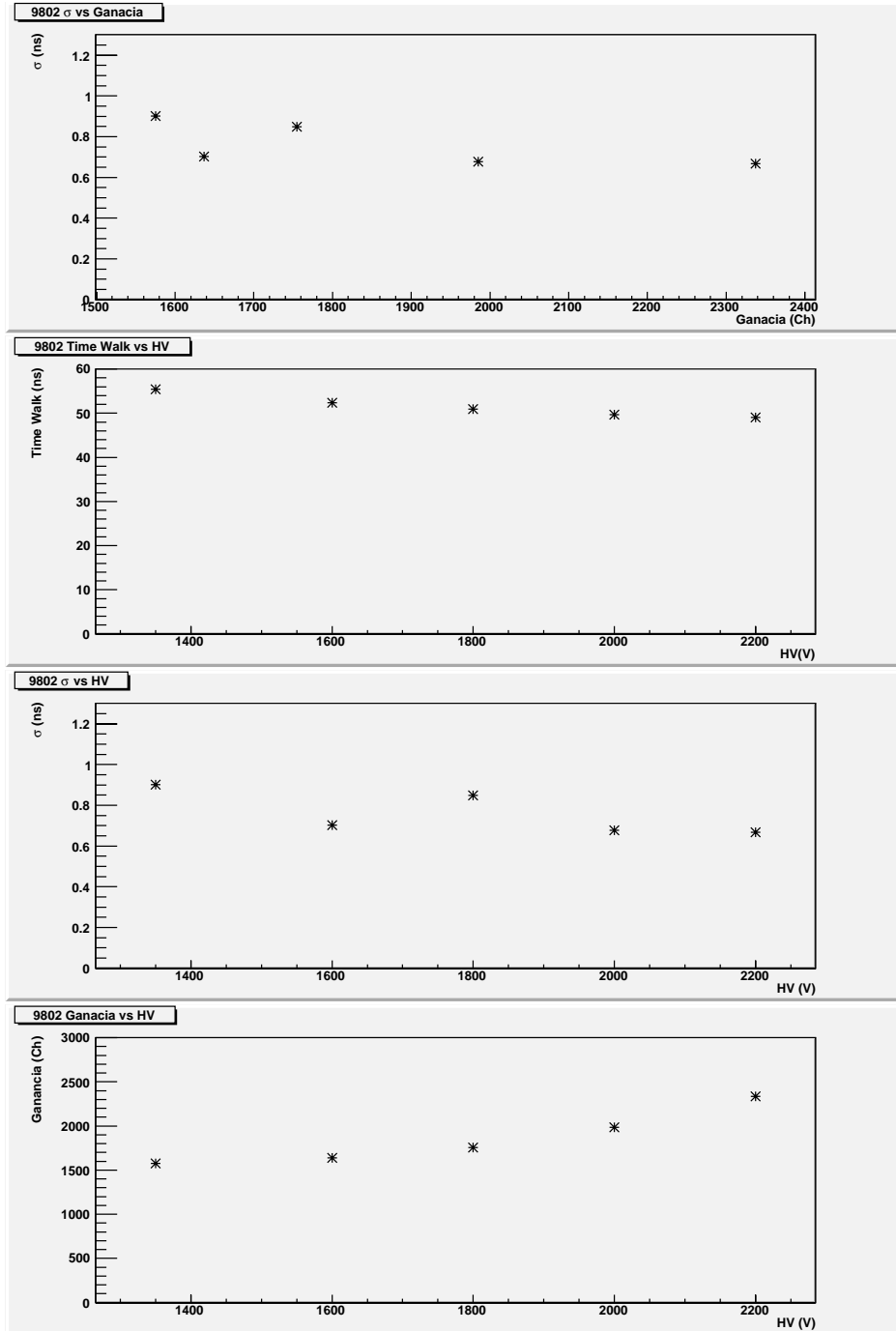


Figura 34: PMT con número de serie 9802

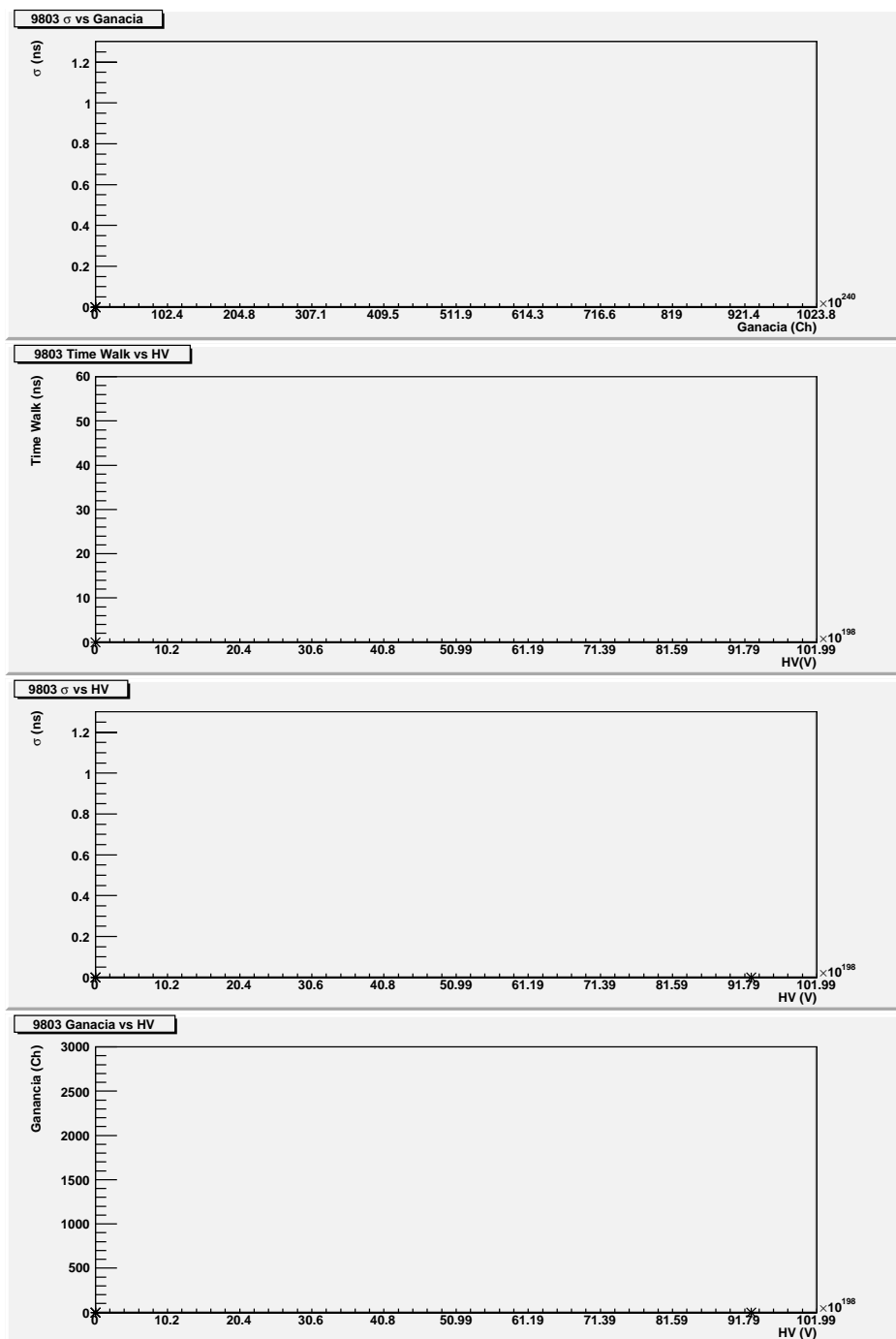


Figura 35: PMT con número de serie 9803

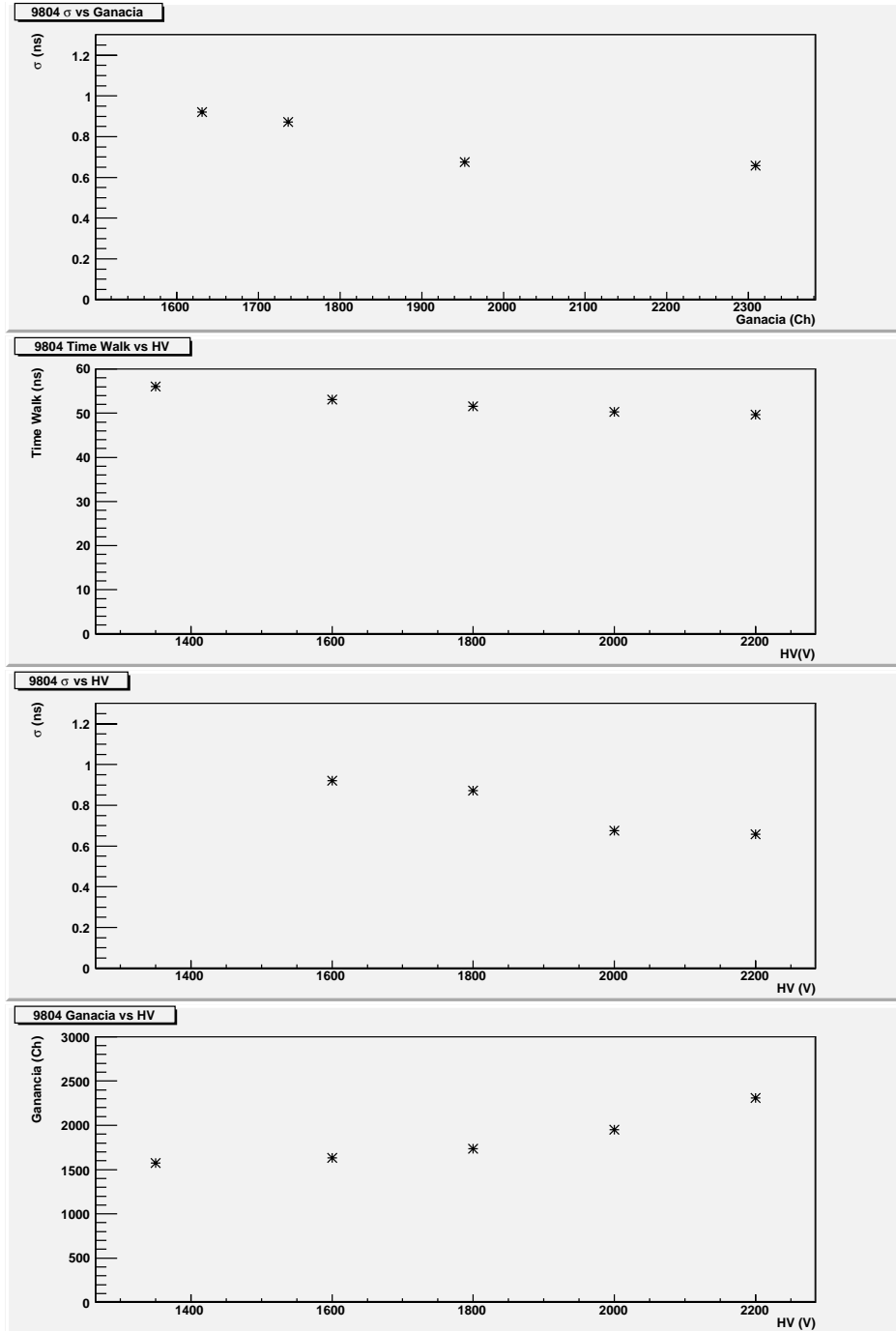


Figura 36: PMT con número de serie 9804

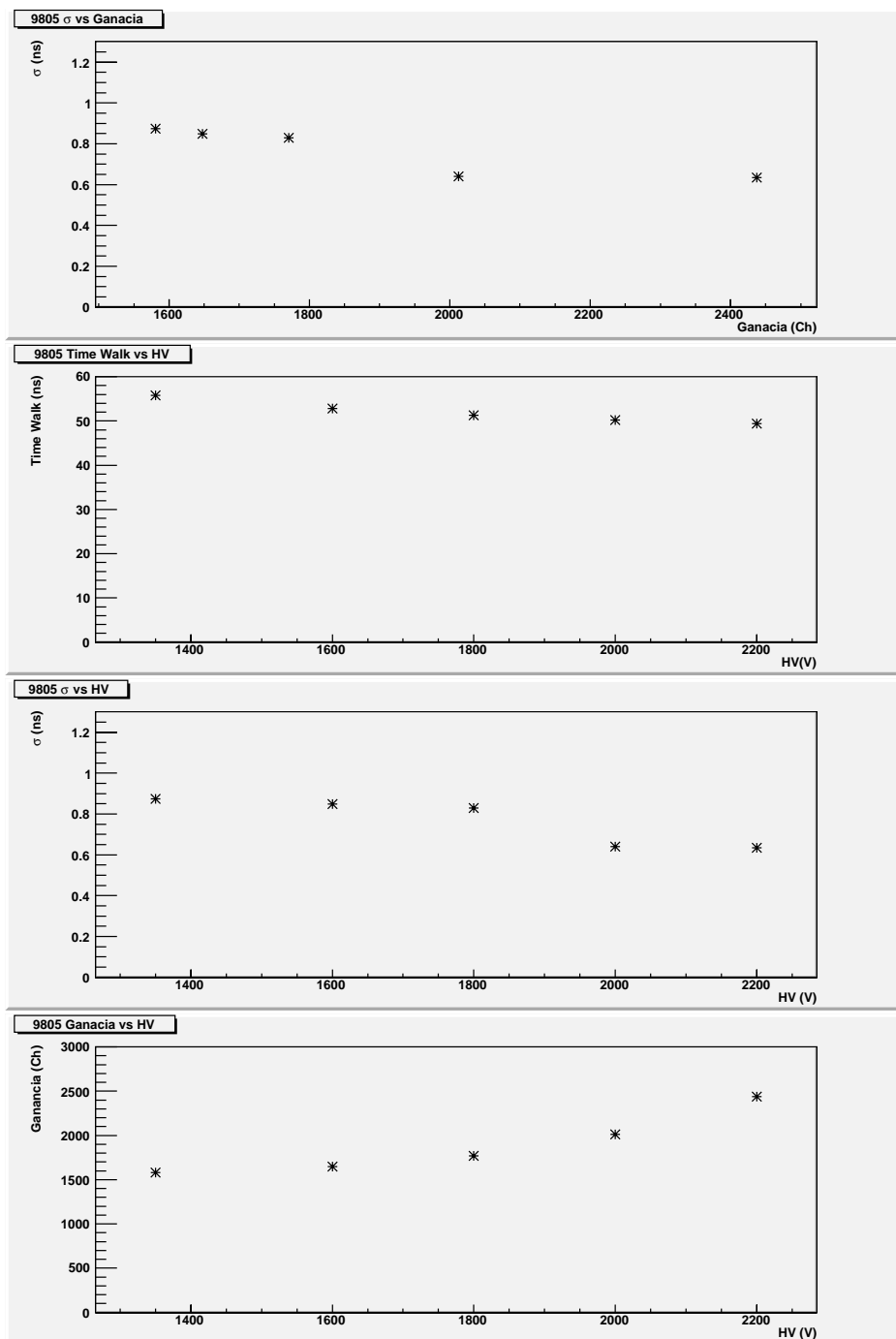


Figura 37: PMT con número de serie 9805

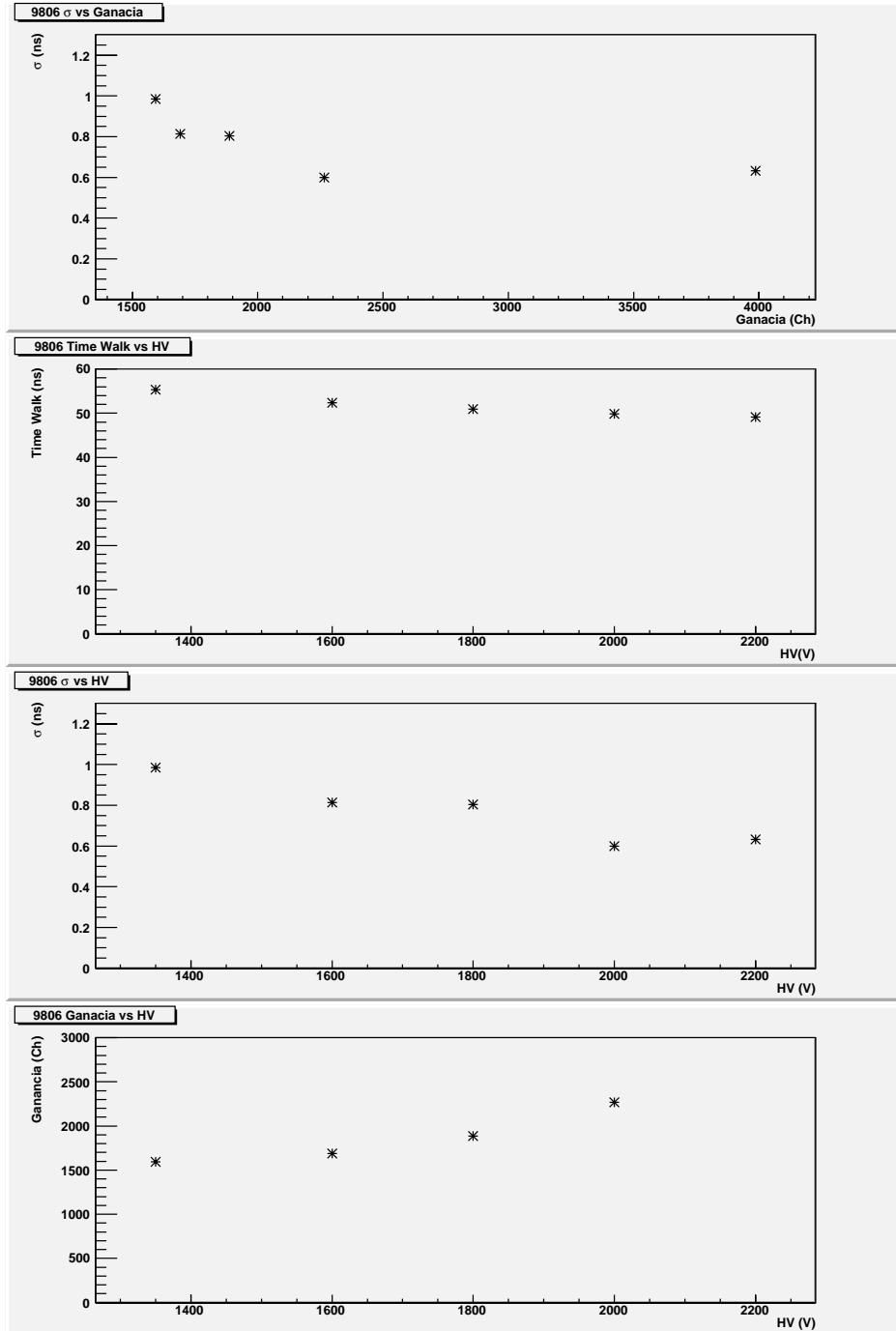


Figura 38: PMT con número de serie 9806

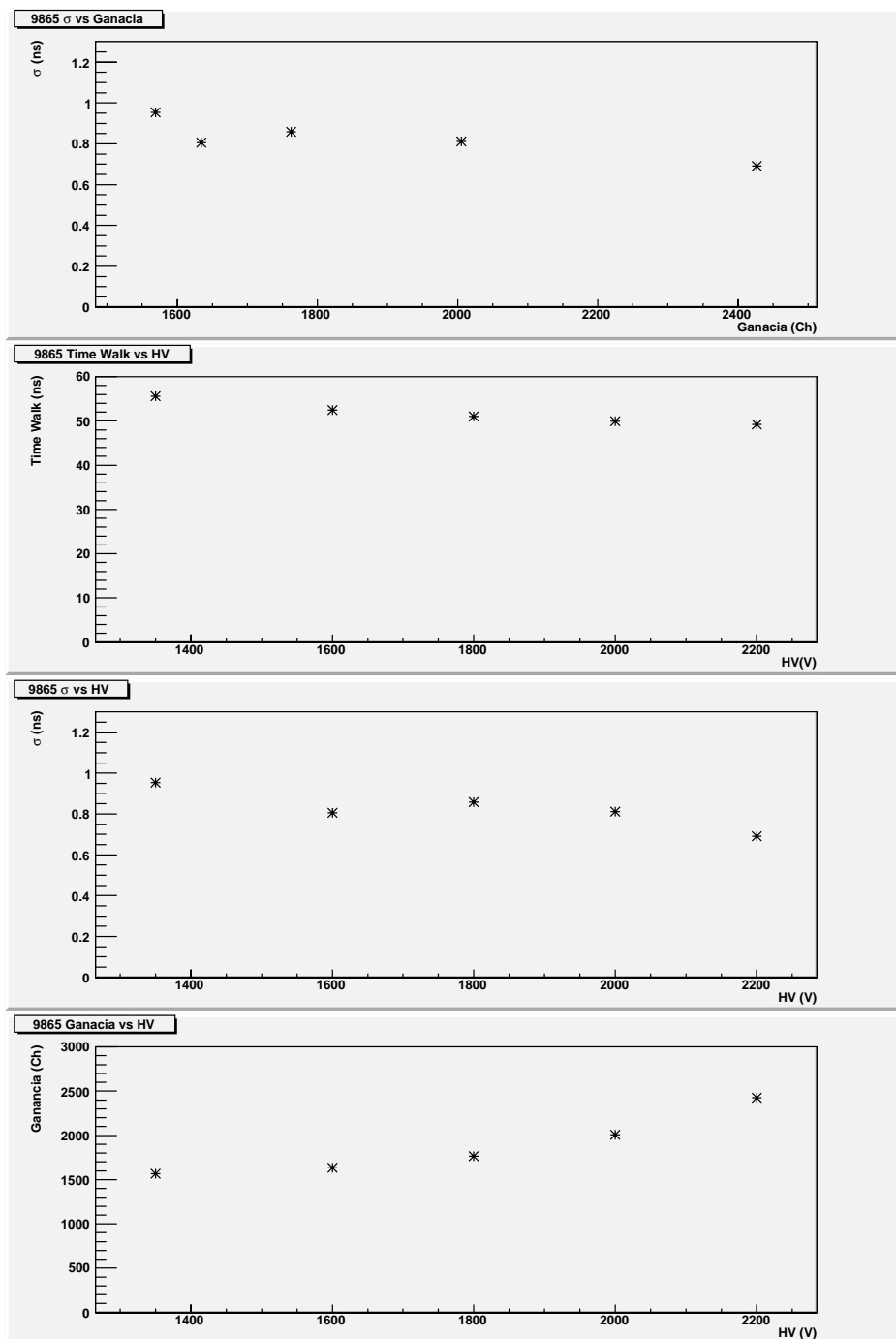


Figura 39: PMT con número de serie 9865

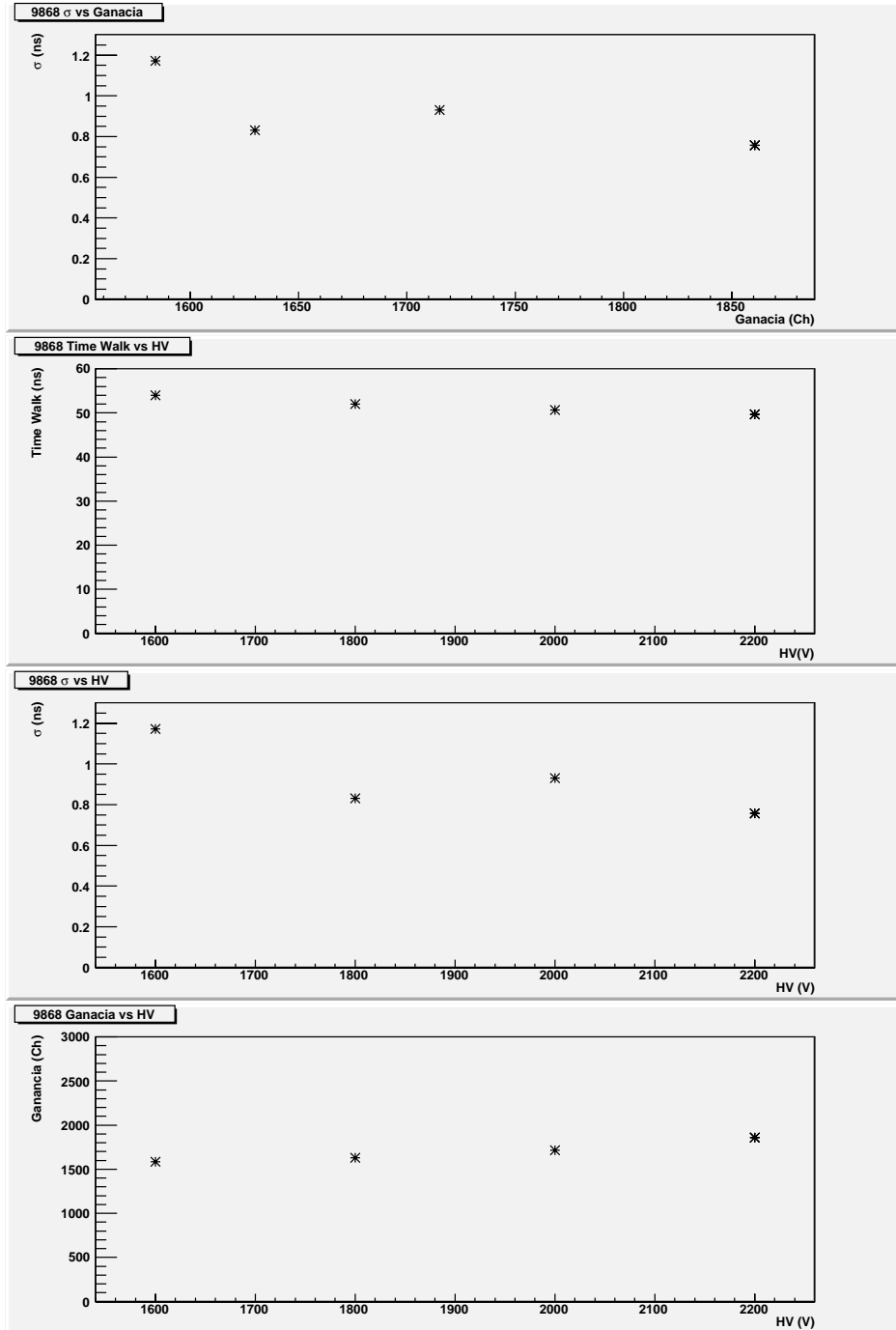


Figura 40: PMT con número de serie 9868

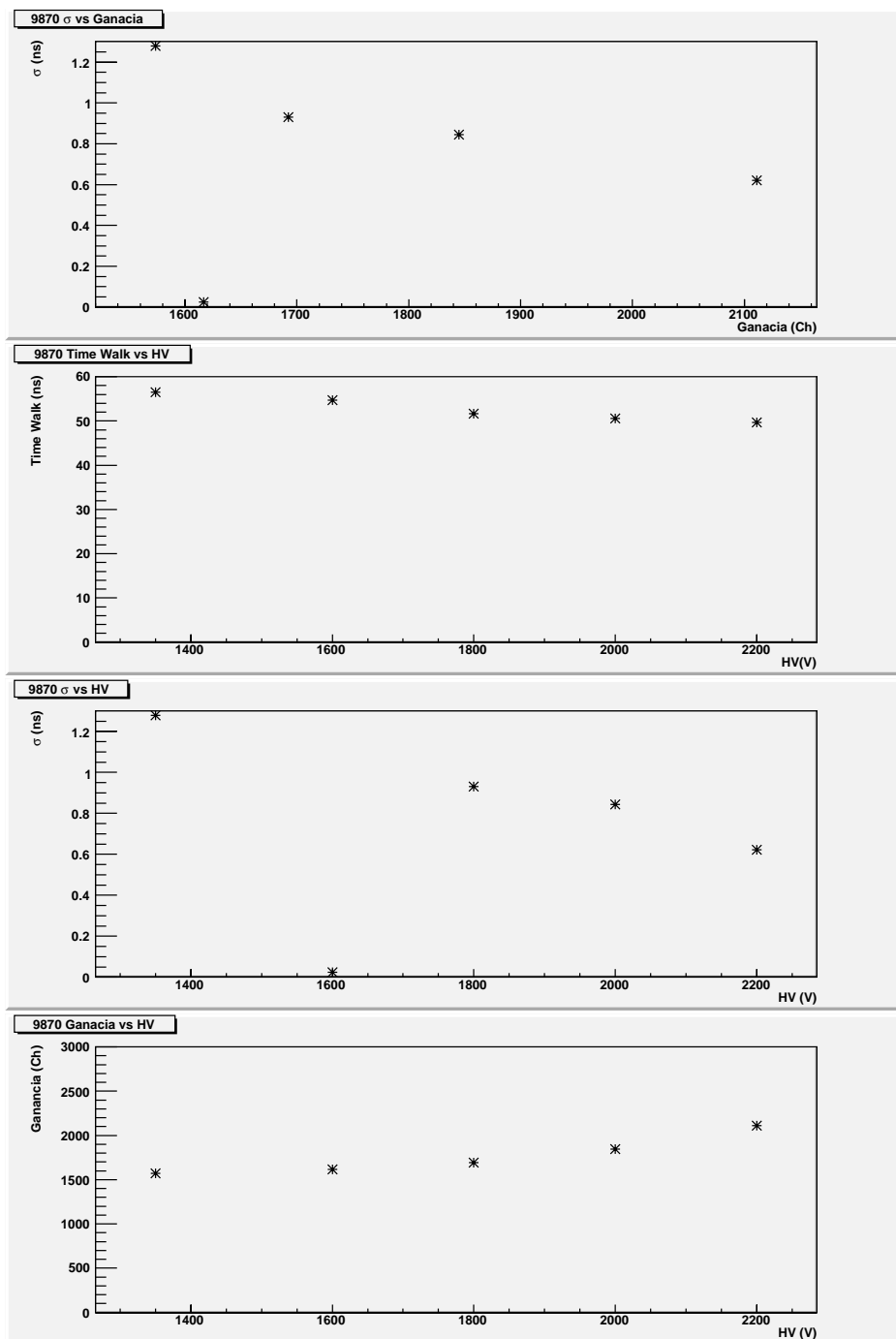


Figura 41: PMT con número de serie 9870

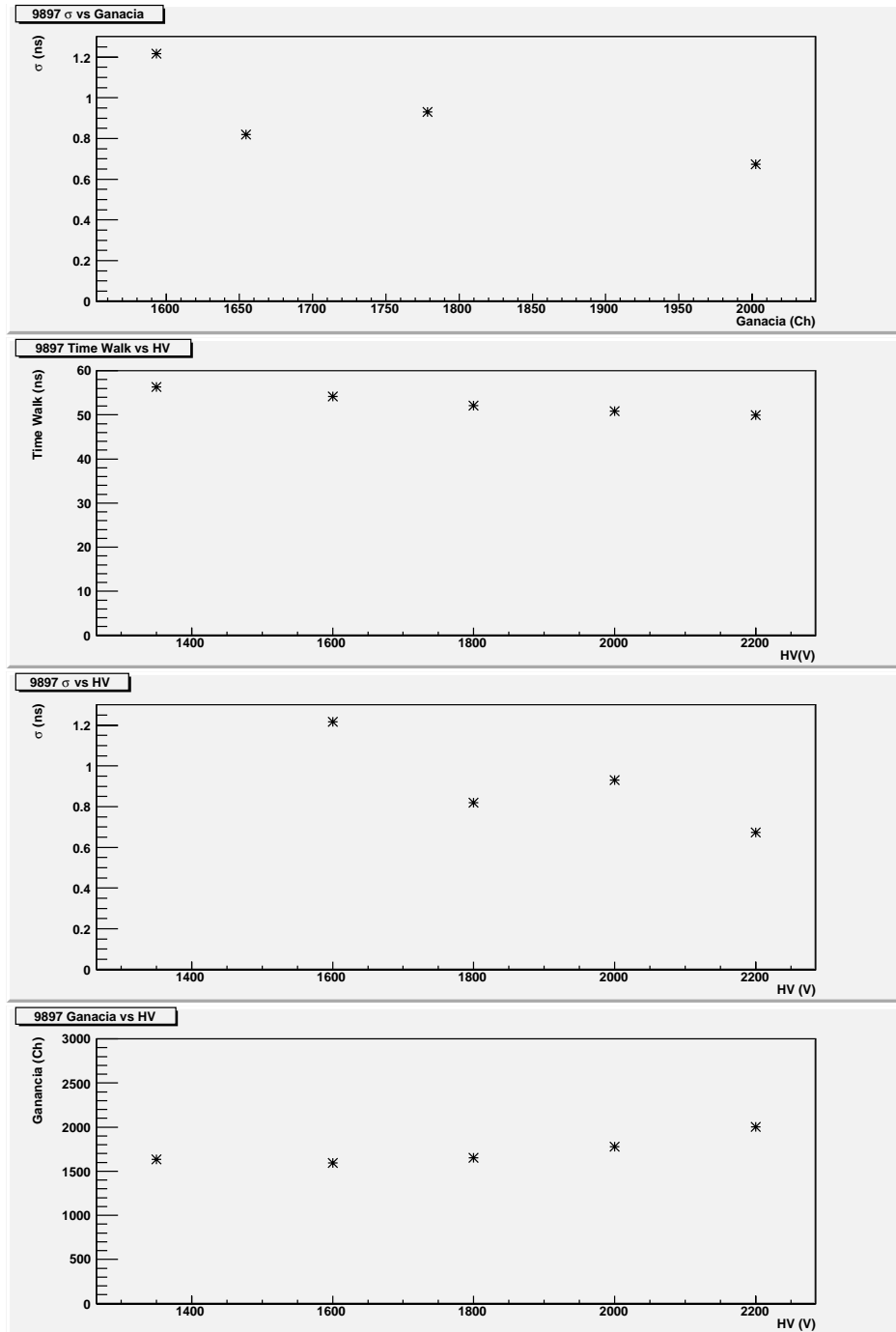


Figura 42: PMT con número de serie 9897

Primer Sector					
FAST					
Anillo	Pico	Pedestal	Diferencia	QDC	Posición
0	1612	1550	62	1	Abajo
1	1754	1661	93	2	Abajo
2	1724	1590	137	3	Abajo
3	1712	1509	203	4	Abajo
LECROY					
0	60	30	30	5	Abajo
1	105	49	56	6	Abajo
2	117	42	75	7	Abajo
3	112	9	103	8	Abajo
Segundo Sector					
FAST					
Anillo	Pico	Pedestal	Diferencia	QDC	Posición
0	-	-	-	1	Abajo
1	1765	1673	92	2	Abajo
2	1706	1597	107	3	Abajo
3	1691	1511	180	4	Abajo
0	-	-	-	5	Arriba
1	1727	1569	158	6	Arriba
2	1684	1497	187	7	Arriba
3	1776	1481	295	8	Arriba
LECROY					
0	32	26	6	9	Abajo
1	105	54	51	10	Abajo
2	103	44	59	11	Abajo
3	97	5	92	12	Abajo
0	-	-	-	13	Arriba
1	-	-	-	14	Arriba
2	110	16	94	15	Arriba
3	178	23	155	16	Arriba

Tercer Sector					
FAST					
Anillo	Pico	Pedestal	Diferencia	QDC	Posición
0	-	-	-	1	Abajo
1	-	-	-	2	Abajo
2	1707	1597	104	3	Abajo
3	1768	1514	254	4	Abajo
0	1503	1381	122	5	Arriba
1	-	-	-	6	Arriba
2	1759	1501	258	7	Arriba
3	1713	1485	228	8	Arriba
LECROY					
0	-	-	-	9	Abajo
1	-	-	-	10	Abajo
2	103	45	58	11	Abajo
3	135	6	129	12	Abajo
0	94	32	62	13	Arriba
1	-	-	-	14	Arriba
2	153	16	137	15	Arriba
3	143	23	120	16	Arriba
Cuarto Sector					
FAST					
Anillo	Pico	Pedestal	Diferencia	QDC	Posición
0	-	-	-	1	Abajo
1	-	-	-	2	Abajo
2	1699	1593	106	3	Abajo
3	1736	1509	227	4	Abajo
0	1477	1381	96	5	Arriba
1	-	-	-	6	Arriba
2	1721	1498	223	7	Arriba
3	1682	1480	202	8	Arriba
LECROY					
0	-	-	-	9	Abajo
1	-	-	-	10	Abajo
2	100	43	57	11	Abajo
3	120	4	116	12	Abajo
0	81	32	49	13	Arriba
1	-	-	-	14	Arriba
2	128	6	122	15	Arriba
3	124	23	101	16	Arriba

Tabla 7: Se muestran las diferencias de los picos con los pedestales para las celdas con los ocho PMT que se utilizaron para esta calibración.

Apéndice B

Los histogramas obtenidos del ADC para el análisis de datos para la carga se muestran por orden de sector y anillo en las figuras 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49.

Los resultados para obtener el factor de conversión para tener los canales del ADC Fast en términos de canales del ADC Lecroy se muestran en la tabla 8.

Primer Sector		
Anillo	Razón	Posición
0	$62/30 = 2.06$	abajo
1	$95/54 = 1.75$	abajo
2	$137/75 = 1.82$	abajo
3	$203/105 = 1.93$	abajo

Primer Sector		
Anillo	Razón	Posición
0	- $122/62 = 1.96$	abajo arriba
1	- -	abajo arriba
2	$110/58 = 1.89$ $258/137 = 1.88$	abajo arriba
3	$254/129 = 1.96$ $228/120 = 1.9$	abajo arriba

Segundo Sector		
Anillo	Razón	Posición
0	- -	abajo arriba
1	$92/51 = 1.8$ -	abajo arriba
2	$109/59 = 1.8$ $187/94 = 1.98$	abajo arriba
3	$180/92 = 1.95$ $295/155 = 1.9$	abajo arriba

Primer Sector		
Anillo	Razón	Posición
0	- $96/49 = 1.95$	abajo arriba
1	- -	abajo arriba
2	$106/57 = 1.86$ $223/122 = 1.82$	abajo arriba
3	$227/116 = 1.95$ $202/101 = 2$	abajo arriba

Tabla 8: Se obtuvieron los factores de conversión de cada anillo de cada sector. Se dividió la diferencia del pico con el pedestal del Fast con la de Lecroy.

Teniendo los factores de conversión de cada sector y anillo, se promedian para tener un solo factor de conversión para todos los datos. El promedio de estos datos es 1.9, y con este factor se dividen todos los datos obtenidos por el ADC Fast para tener todo en términos de el ADC Lecroy. Una vez teniendo estos resultados se multiplica todo por $0.25pC$. Este ultimo número es la calibración del ADC Lecroy. Si se divide 0.25 entre 1.9, se multiplica el cociente [ecuación 2] por cada diferencia resulta la carga en pC .

$$\frac{0.25}{1.9} = 0.13 \quad (2)$$

Si solo se quiere ver los resultados de la carga en términos de canales de ADC Lecroy, en la tabla 4.3 se puede ver los dos resultados, la carga en pC y la ganancia en canales.

Primer Sector			
Anillo	Ganacia (ch)	carga pC	Posición
0	32.6	8.2	Abajo
1	48.9	12.2	Abajo
2	72.1	18	Abajo
3	107	26.7	Abajo
Segundo Sector			
Anillo	Ganacia (ch)	carga pC	Posición
0	-	-	Abajo
	-	-	Arriba
1	48.4	12.1	Abajo
	83.1	20.7	Arriba
2	57.4	14.3	Abajo
	98.4	24.6	Arriba
3	94.7	223.7	Abajo
	155.2	38.8	Arriba
Tercer Sector			
Anillo	Ganacia (ch)	carga pC	Posición
0	64.2	16.1	Abajo
	-	-	Arriba
1	-	-	Abajo
	-	-	Arriba
2	57.9	14.5	Abajo
	135.8	33.9	Arriba
3	133.7	33.5	Abajo
	120	30	Arriba
Cuarto Sector			
Anillo	Ganacia (ch)	carga pC	Posición
0	-	-	Arriba
	50.5	12.6	Abajo
1	-	-	Abajo
	-	-	Arriba
2	55.79	13.9	Abajo
	117.4	29.3	Arriba
3	119.4	29.9	Abajo
	106.3	26.6	Arriba

Tabla 9: La tabla muestra la ganancia en términos del ADC Lecroy y la carga en pC para cada celda.

Al obtener la carga en pC se hicieron las gráficas del Apéndice 4.3(carga vs σ y HV vs carga) en términos de estos. (Vease al final de este apéndice y al principio del Apéndice .1.)

.1. Desviación Estándar y Dispersión

Para obtener la dispersión de los anillos entre sectores con el mismo fotomultiplicador se calcularon las desviaciones estándar (STD) para cada anillo. Donde el promedio de los datos de cada anillos se muestra en la tabla .1.

Anillo	PMT		$\langle C \rangle pC$	
	Abajo	Arriba	Abajo	Arriba
0	9802	9712	-	14.1
1	9805	9771	12.8	-
2	9800	9791	15.4	29.1
3	9803	9901	27.9	31.6

Tabla 10: Promedio de la carga entre diferentes celdas de cada anillo.

La desviación estándar esta dada por;

$$STD = \sqrt{\frac{\sum_{x_i}^n (x_i - \bar{x})}{n - 1}} \quad (3)$$

En la tabla(11) se muestran las desviaciones para cada uno de los anillos.

Anillo	PMT	$STD pC$
1	9805	0.9
2	9800	1.9
3	9803	3.8
0	9712	1.9
2	9791	5.1
3	9901	5.8

Tabla 11: Desviación estándar entre las diferentes celdas de cada anillo

Teniendo la desviación estándar, la dispersión se obtuvo calculando el cociente entre la desviación estándar y la carga promedio $\langle C \rangle$ y multiplicándolo por 100 (estos resultados se muestran en la tabla 4.4).

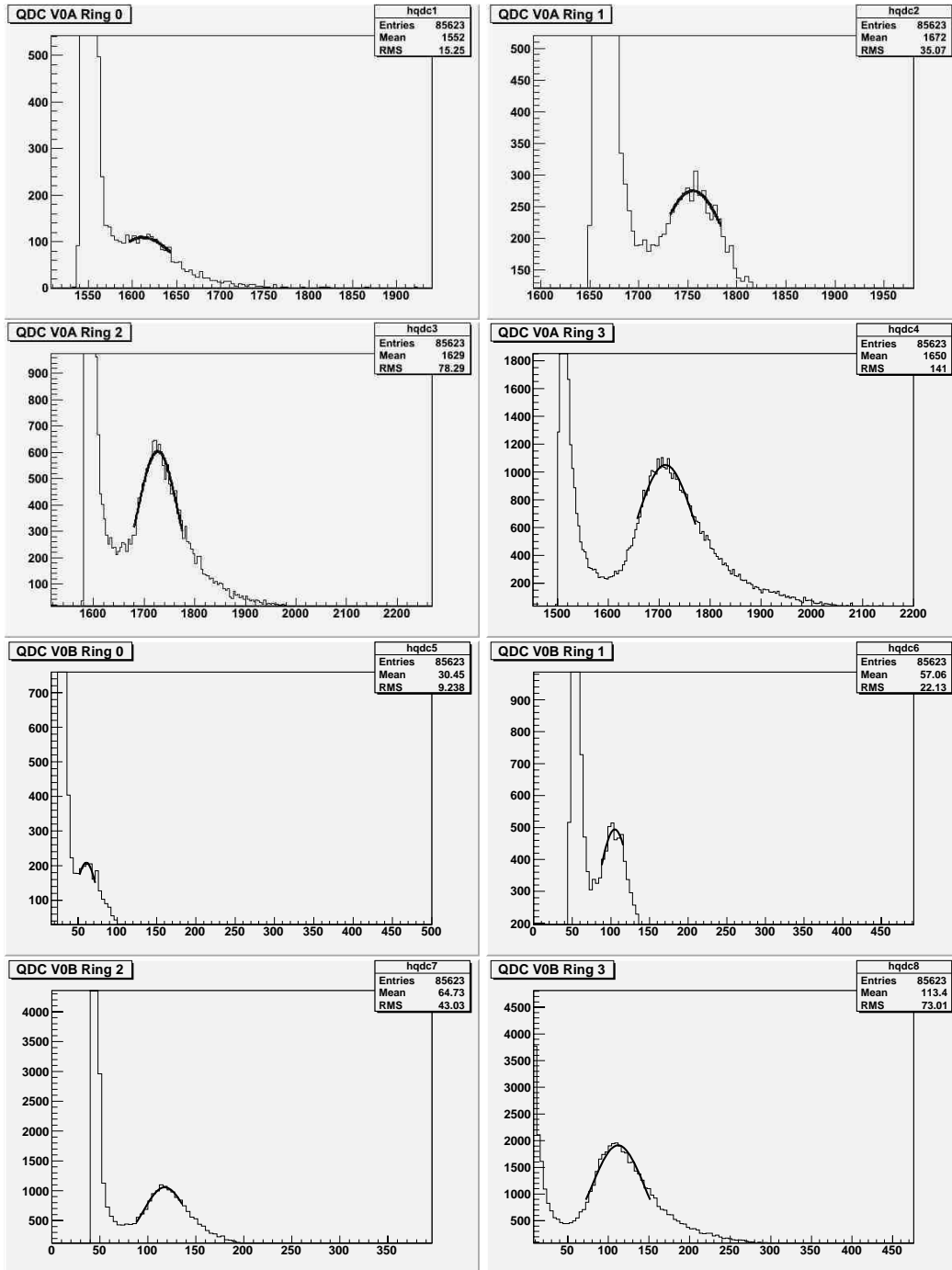


Figura 43: Datos tomados con el primer sector para diferentes anillos. Los primero cuatro espectros están tomados por el ADC Lecroy y los otros cuatro por el ADC Fast

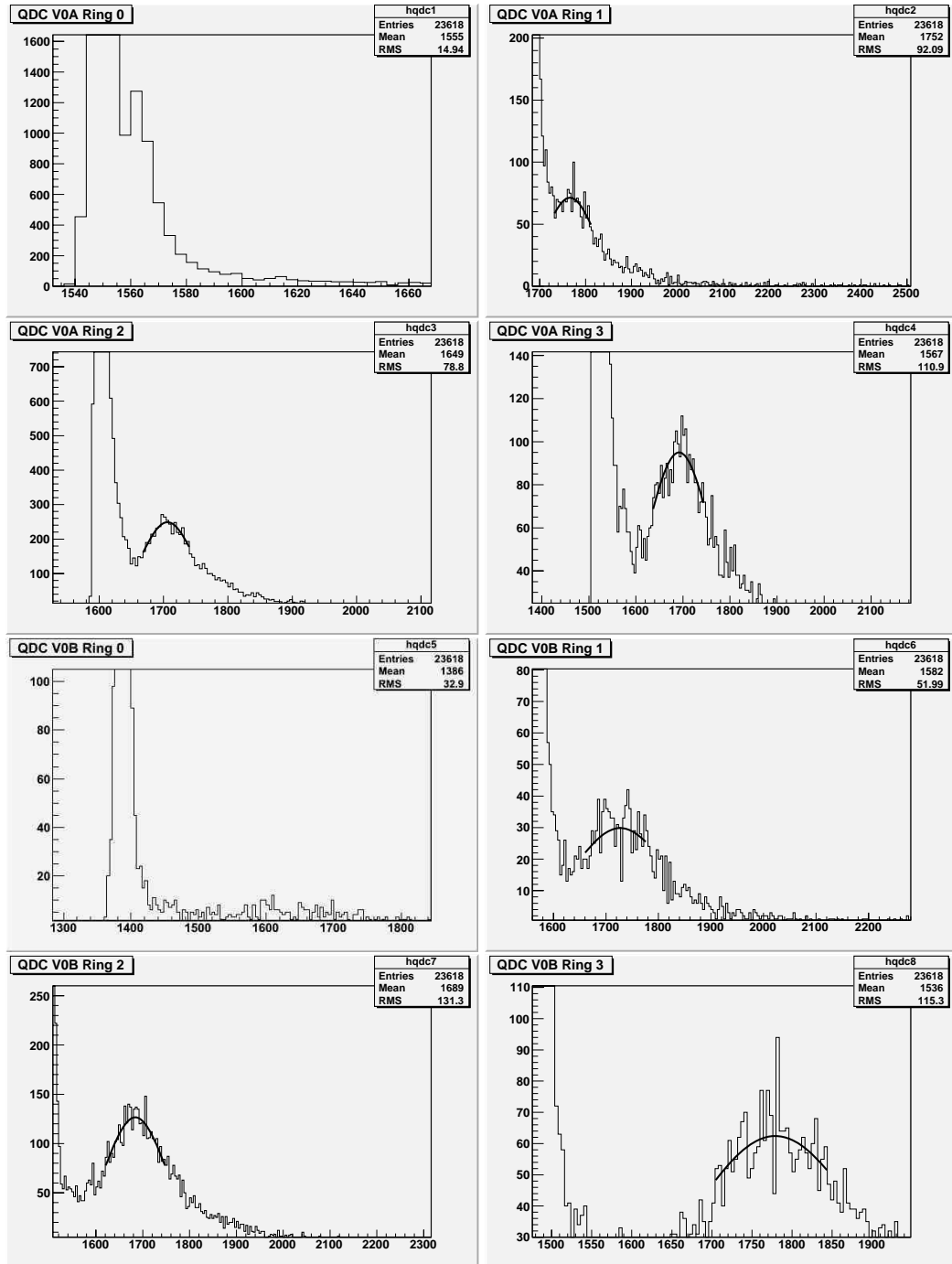


Figura 44: Datos obtenidos del segundo sector con el ADC Fast. Los cuatro primeros espectros corresponden a la mitad de abajo y los otros cuatro a la de arriba.

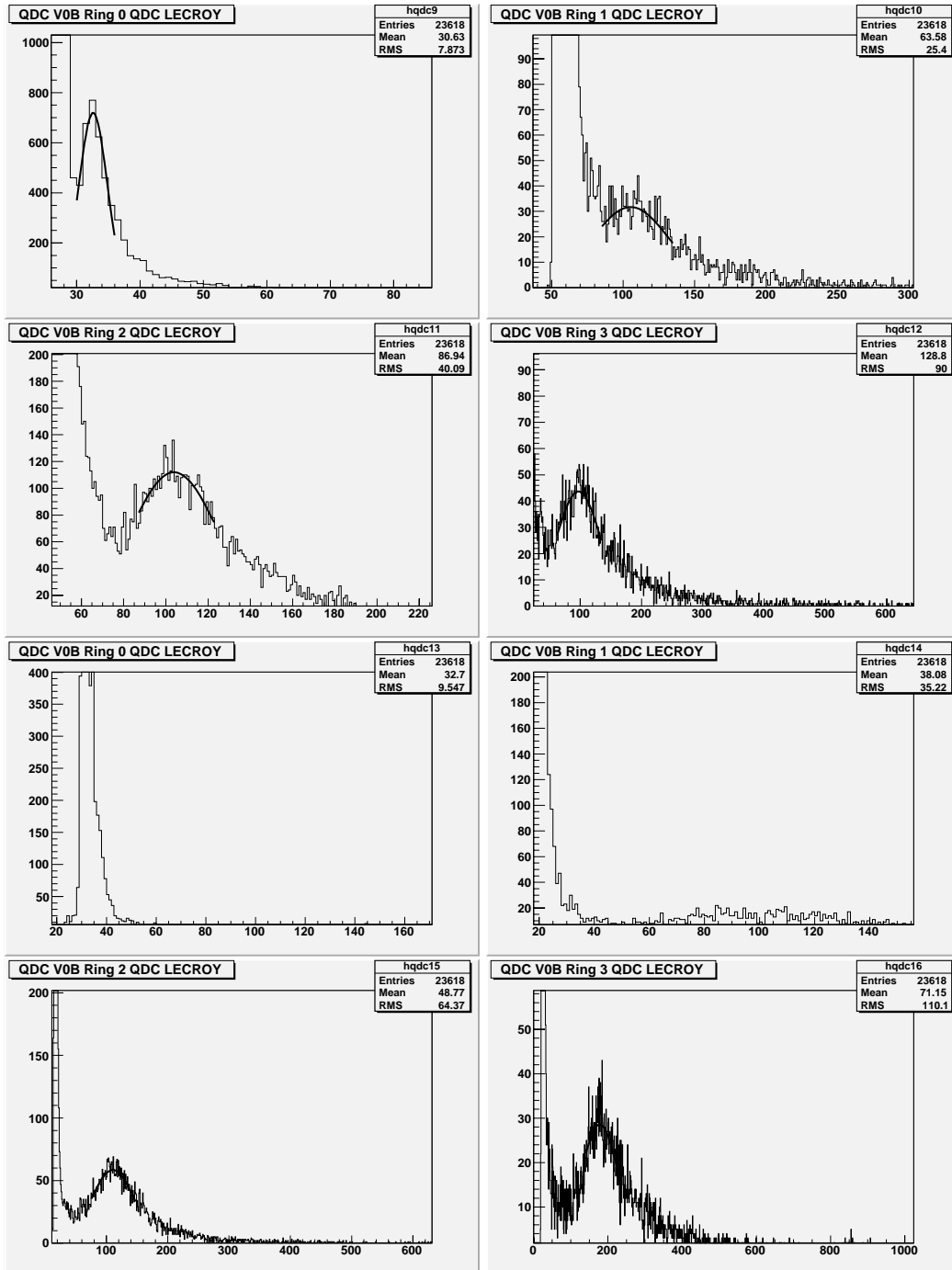


Figura 45: Datos obtenidos del segundo sector con el ADC Lecroy. Los cuatro primeros espectros corresponden a la mitad de abajo y los otros a la mitad de arriba.

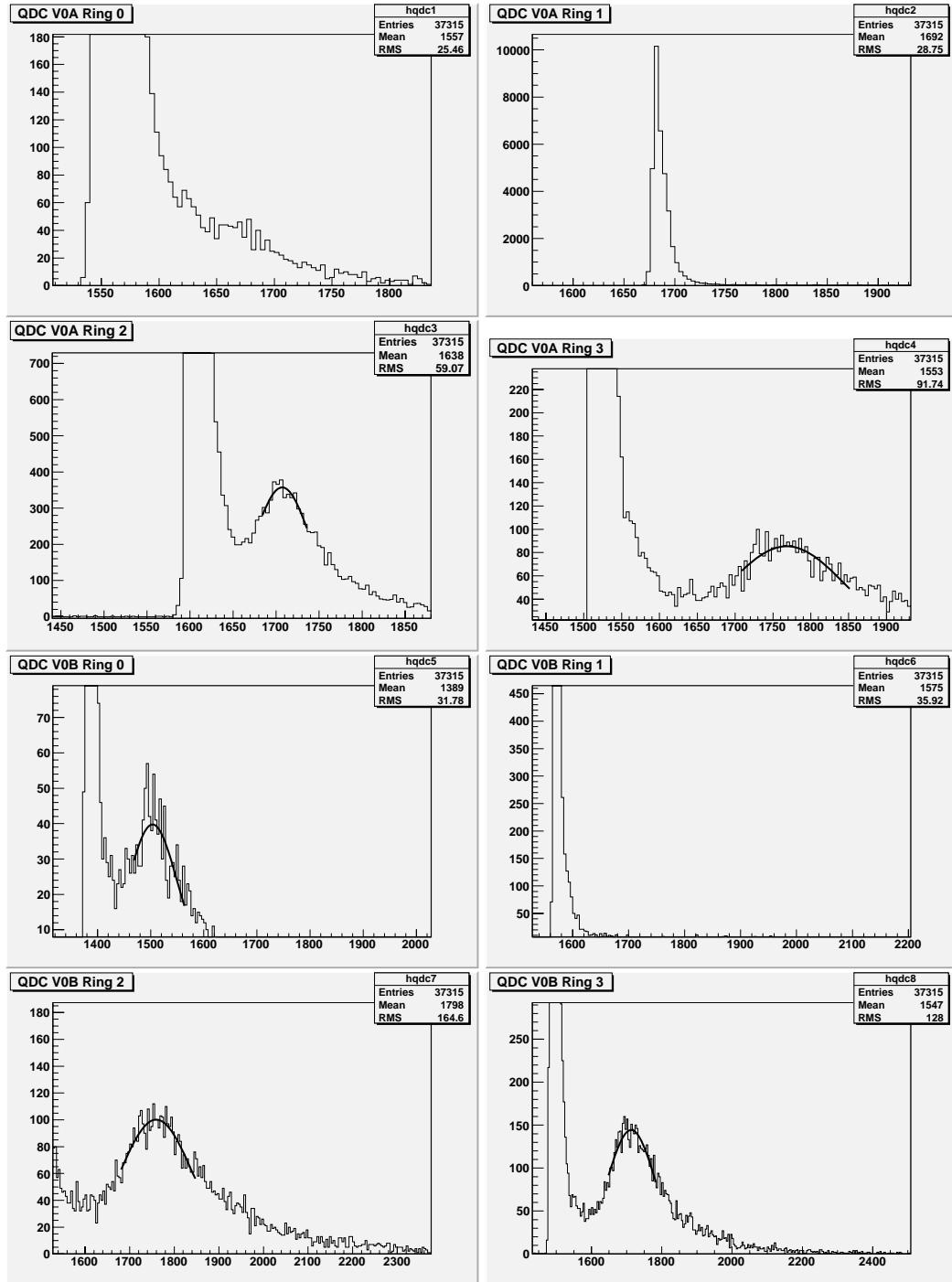


Figura 46: Datos obtenidos del tercer sector con el ADC FAST. Los cuatro primeros espectros corresponden a la mitad de abajo y los otros cuatro a la mitad de arriba.

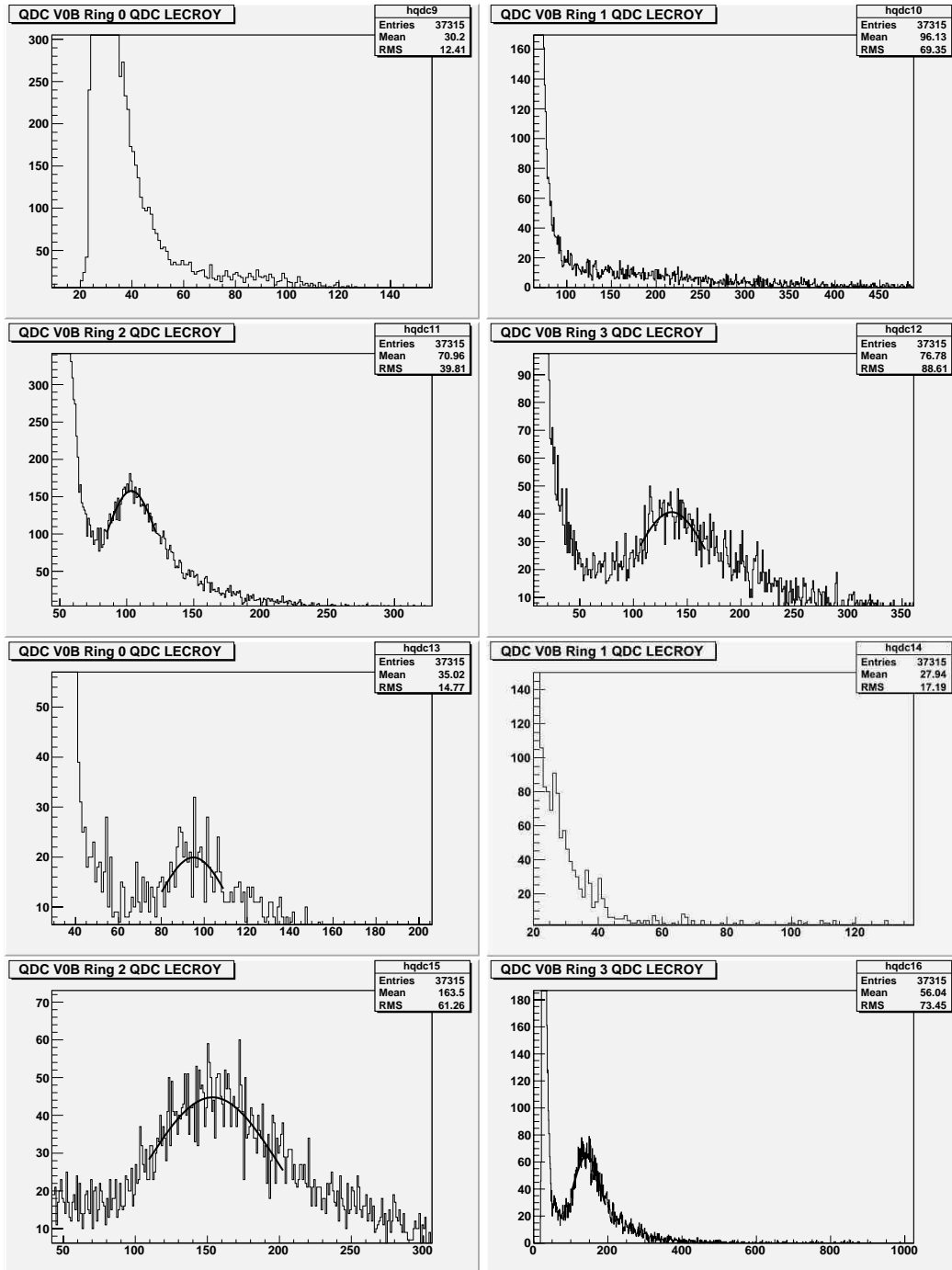


Figura 47: Datos obtenidos del tercer sector con el ADC Lecroy. Los cuatro primeros espectros corresponden a la mitad de abajo y los otros cuatro a la mitad de arriba.

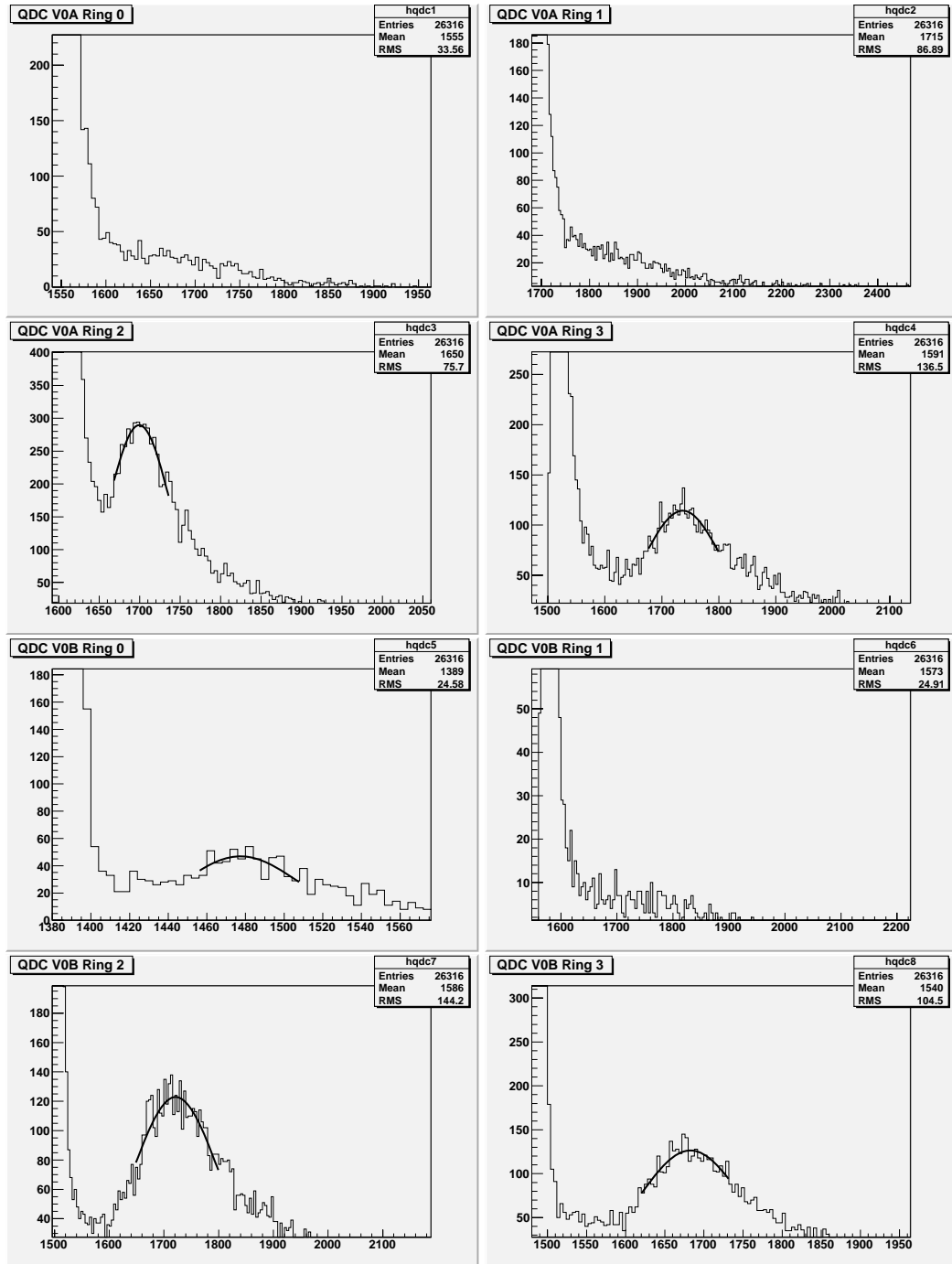


Figura 48: Datos obtenidos del cuarto sector con el ADC Lecroy. Los cuatro primeros espectros corresponden a la mitad de abajo y los otros cuatro a la mitad de arriba.

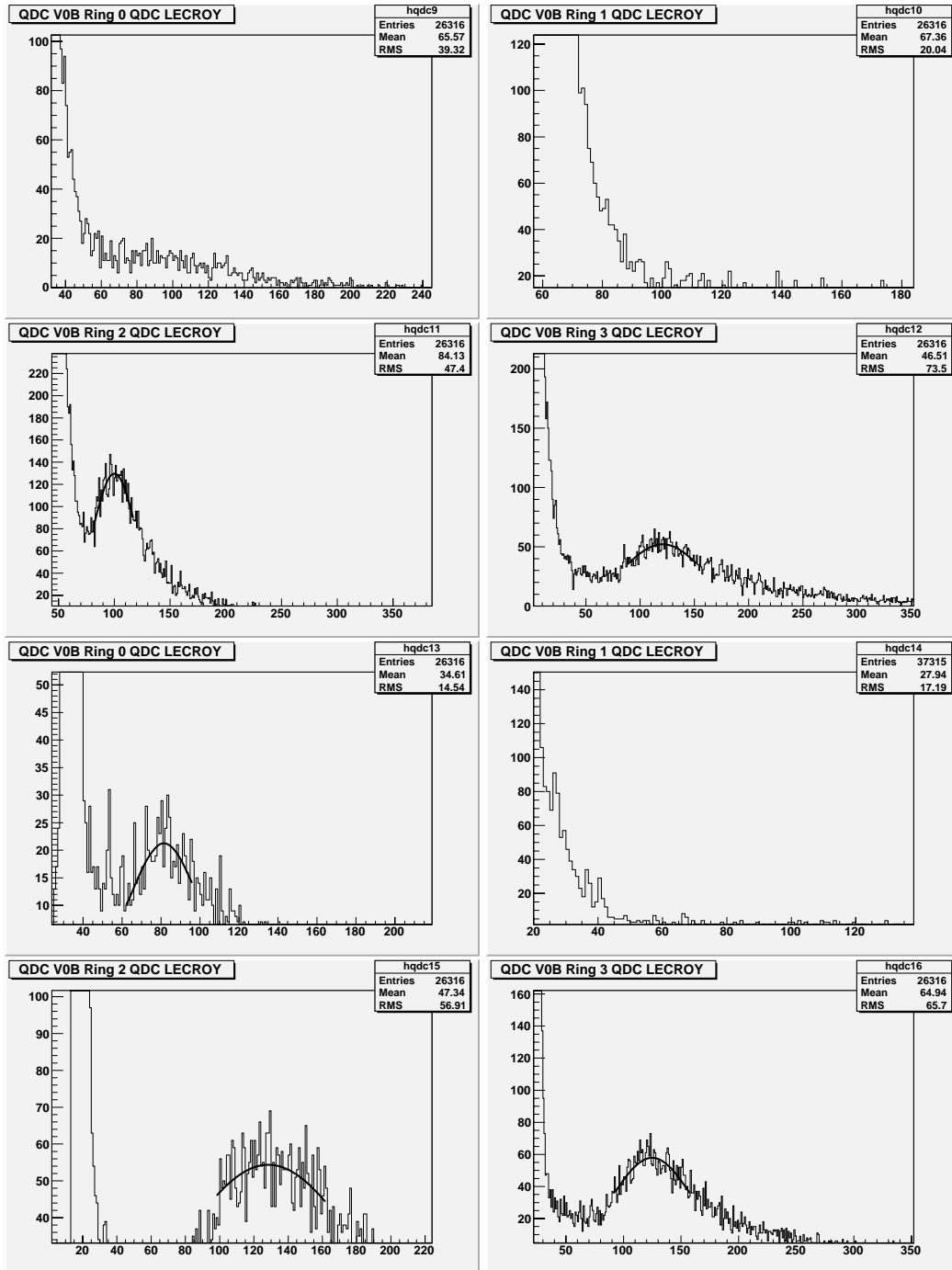


Figura 49: Datos obtenidos del tercer sector con el ADC Lecroy. Los cuatro primeros espectros corresponden a la mitad de abajo y los otros cuatro a la mitad de arriba.

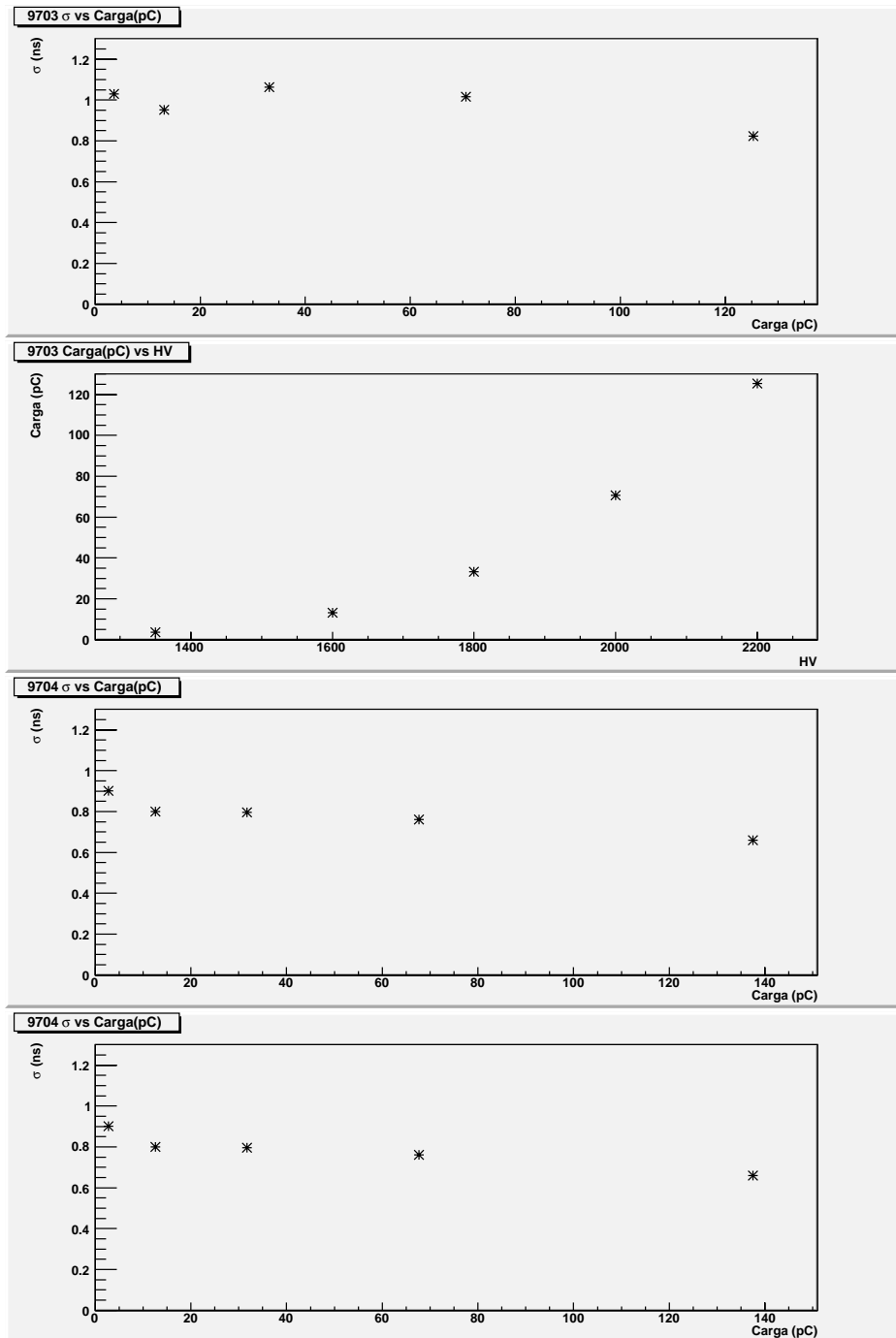


Figura 50: Gráficas de carga vs HV y resolución temporal σ vs carga, con la carga en términos de pC . Para los PMTs 9703 y 9704.

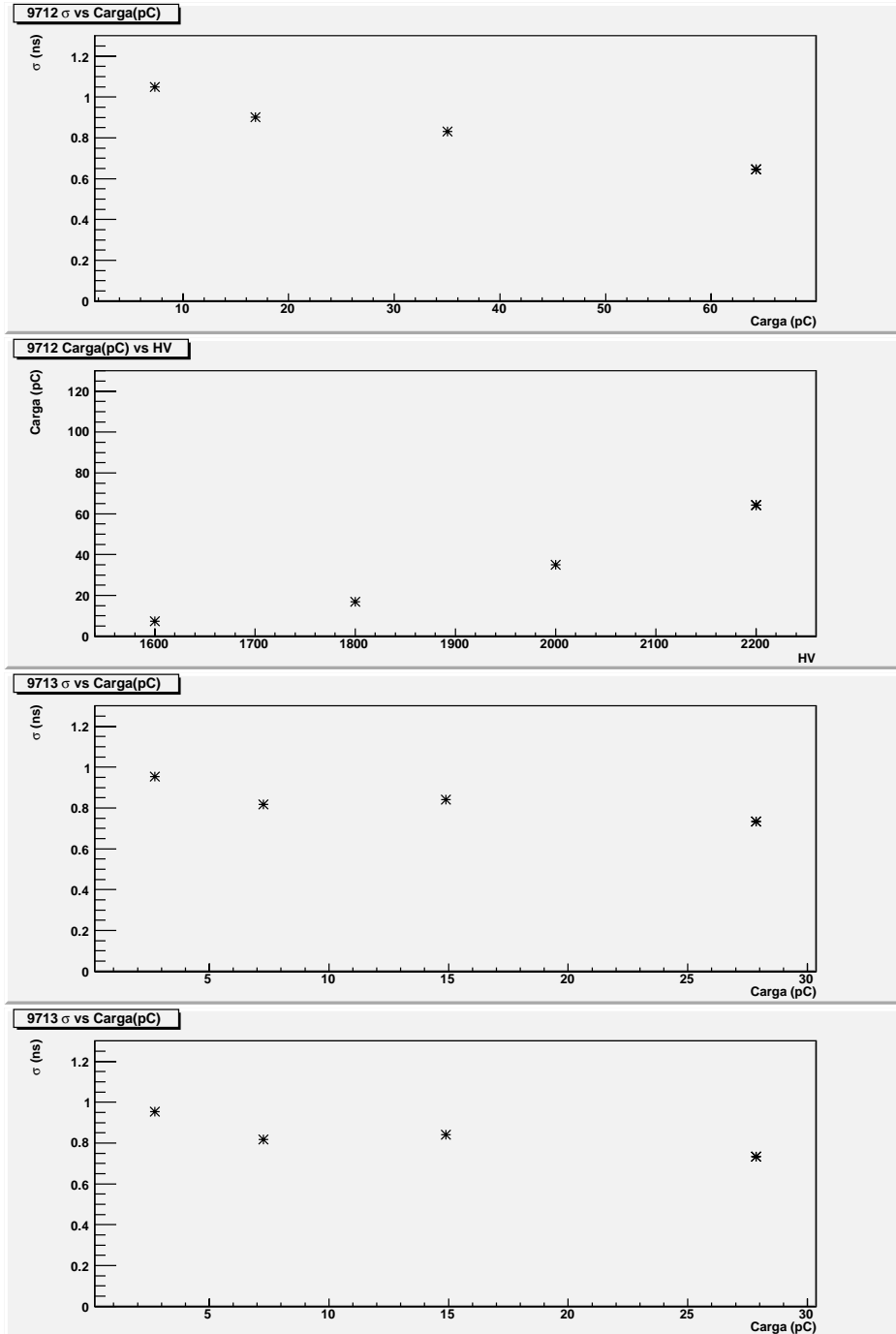


Figura 51: Gráficas de carga vs HV y resolución temporal σ vs carga, con la carga en términos de pC . Para los PMTs 9712 y 9713.

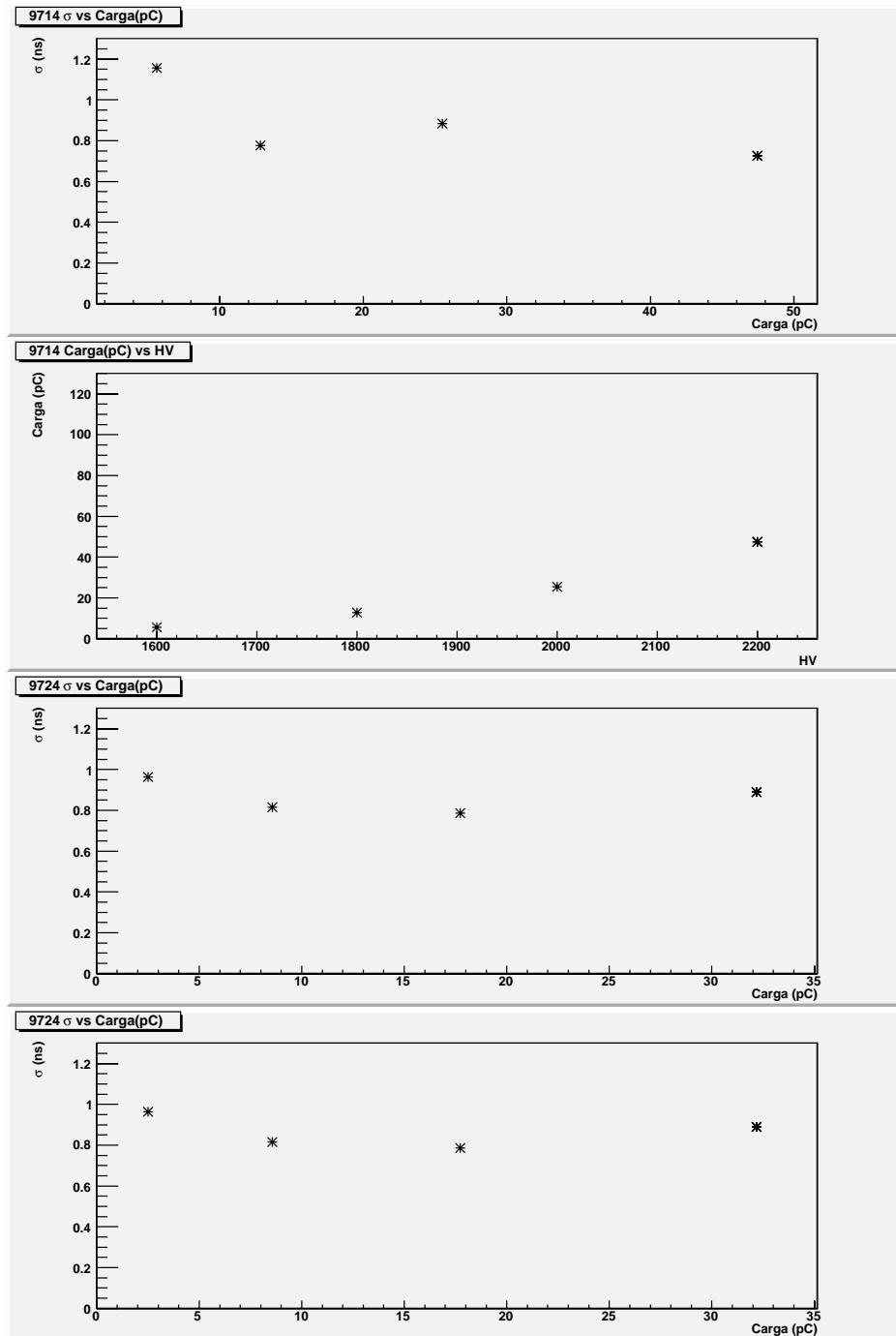


Figura 52: Gráficas de carga vs HV y resolución temporal σ vs carga, con la carga en términos de pC. Para los PMTs 9714 y 9724.

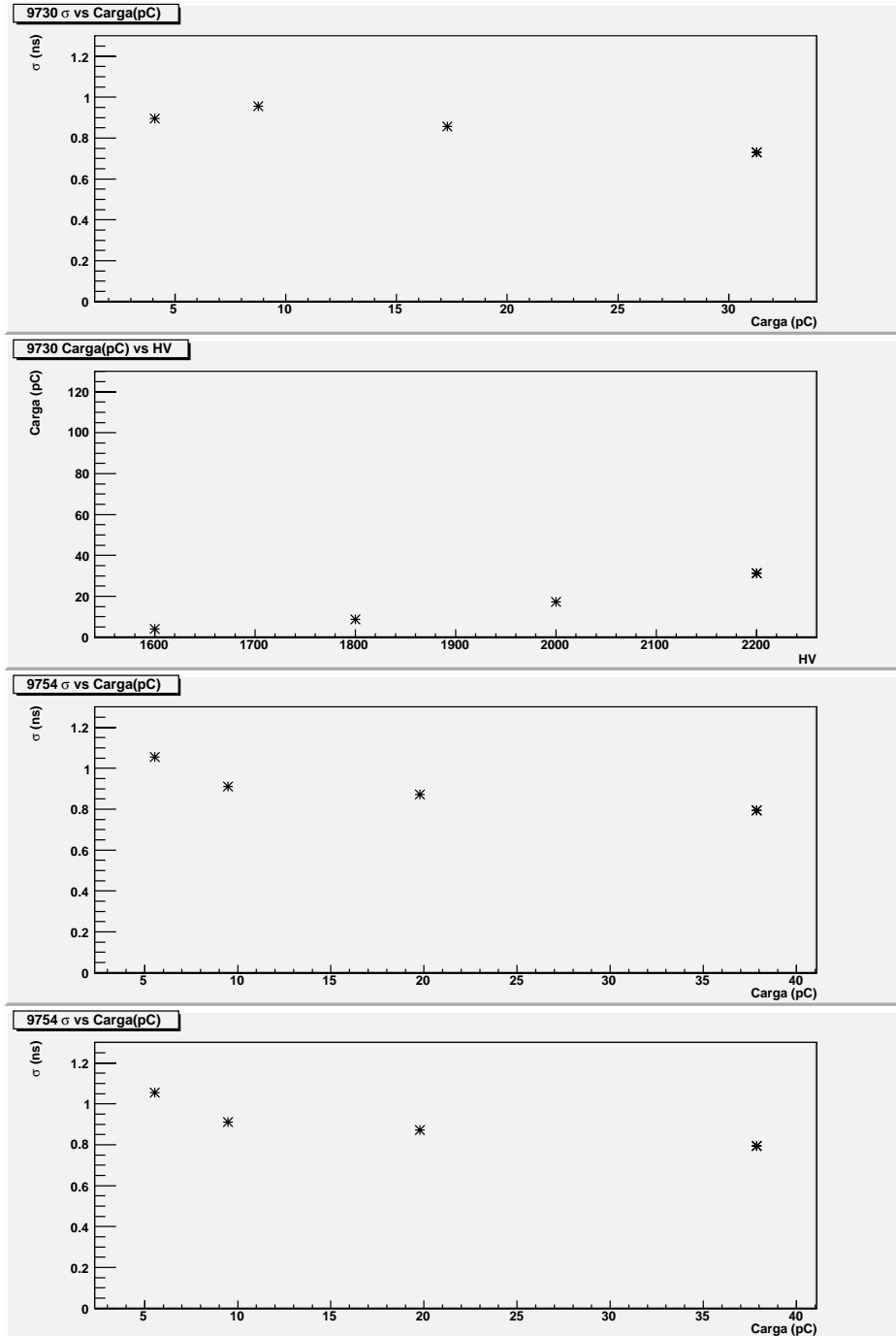


Figura 53: Gráficas de carga vs HV y resolución temporal σ vs carga, con la carga en términos de pC . Para los PMTs 9730 y 9754.

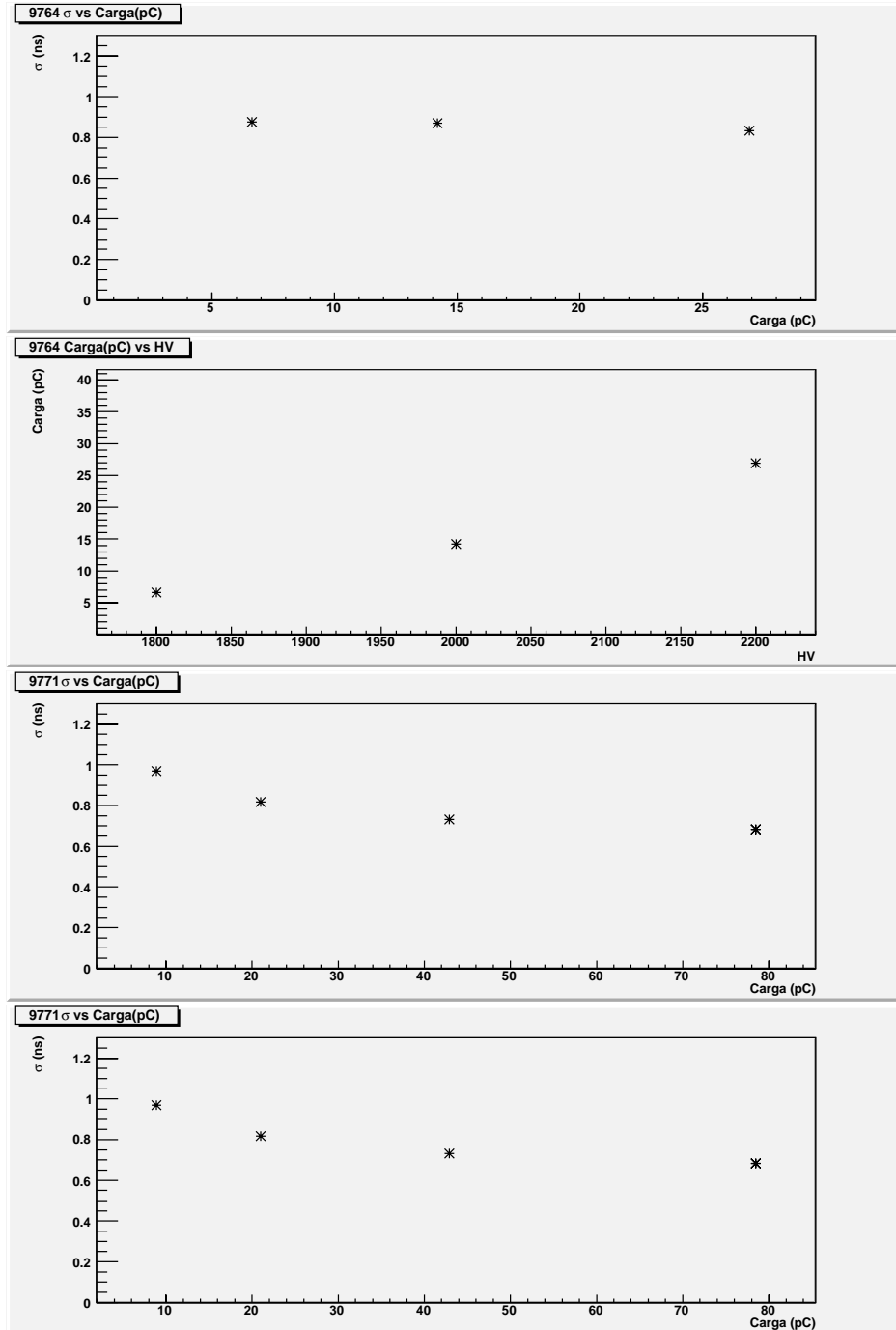


Figura 54: Gráficas de carga vs HV y resolución temporal σ vs carga, con la carga en términos de pC . Para los PMTs 9764 y 9771.

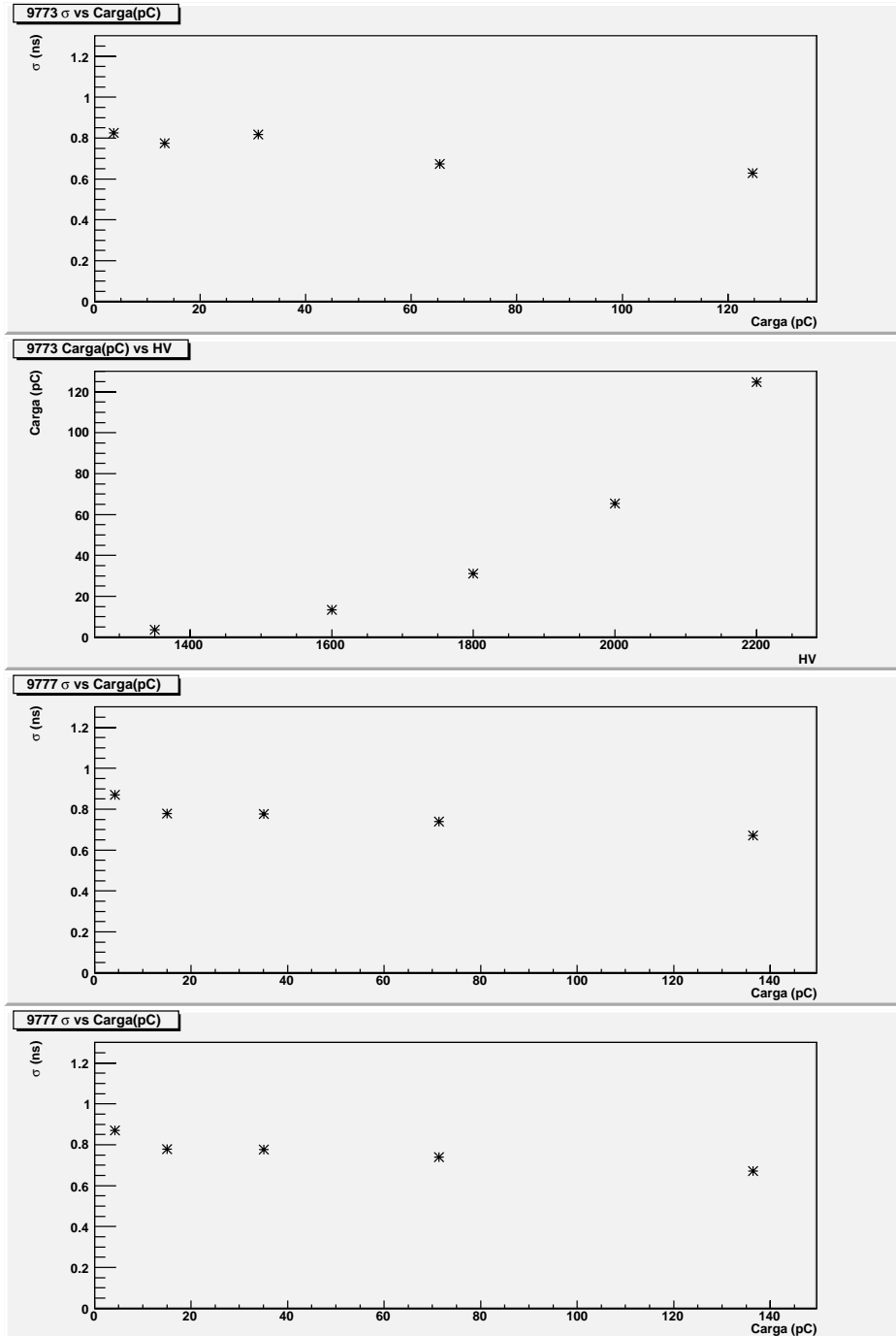


Figura 55: Gráficas de carga vs HV y resolución temporal σ vs carga, con la carga en términos de pC . Para los PMTs 9773 y 9777.

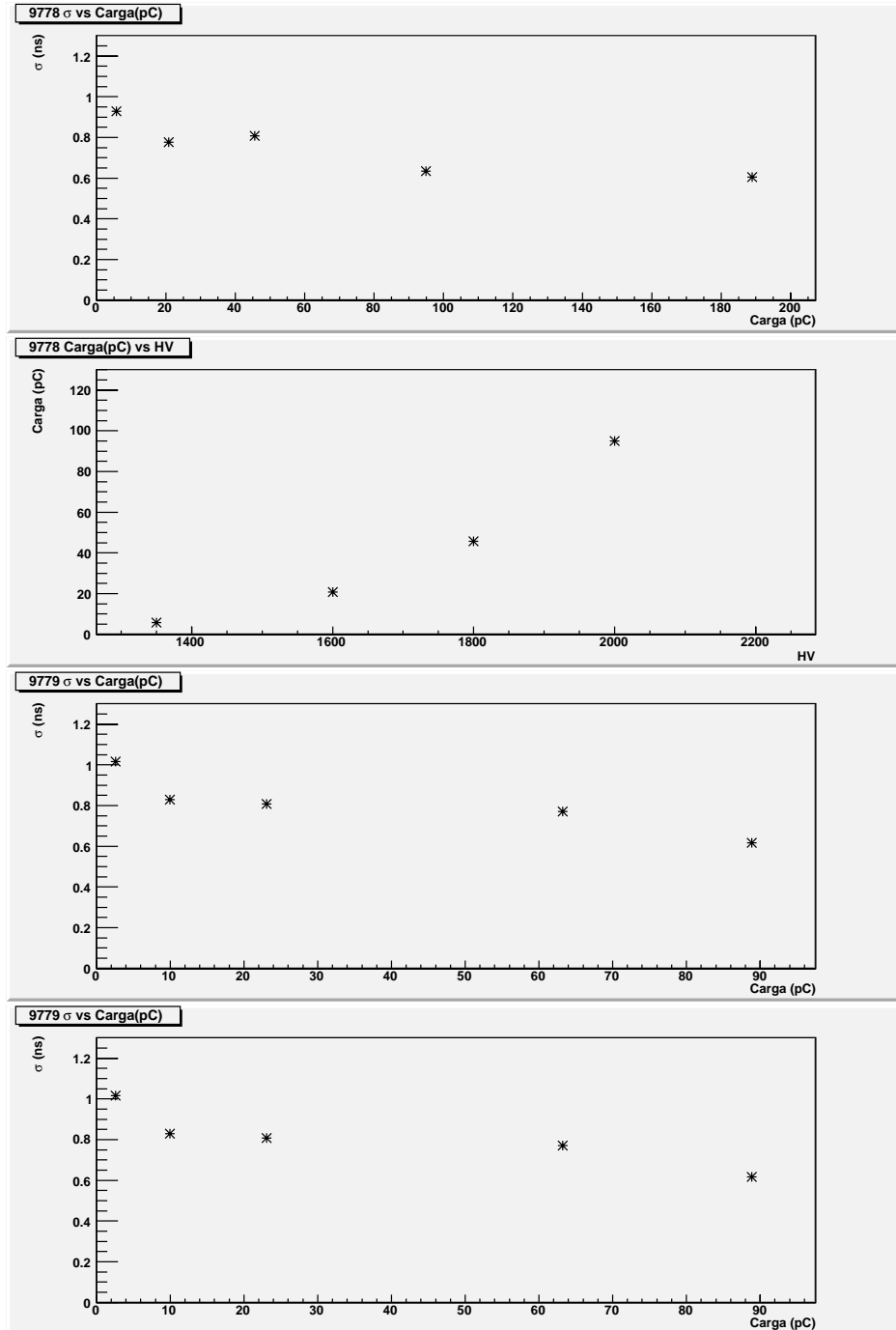


Figura 56: Gráficas de carga vs HV y resolución temporal σ vs carga, con la carga en términos de pC . Para los PMTs 9778 y 9779.

Apéndice C

Para obtener la resolución en tiempo σ del detector V0A se hizo un cambio de variable en la ecuación (4.1) para poder ajustar una recta.

$$x = \frac{1}{\sqrt{q}} \implies q = x^{-2} \quad (4)$$

Sustituyendo en (4.1) (4) tenemos que;

$$\sigma = A + Kx^{-2^{1/2}} = A + Kx \quad (5)$$

Para poder gráficar y ajustar una recta se calcula,

$$x = \frac{1}{\sqrt{q}} \quad (6)$$

Se graficaron los datos utilizando el software de graficación ROOT ajustando la recta, (el ajuste se muestran al final este apéndice) y se obtuvieron los valores de A y K (tabla12).

Teniendo estos valores se pueden sustituir en la ecuación 4.1, tomando como q los valores experimentales de la carga del V0A. Los que se muestra en la tabla 4.6.

Los ajustes de las rectas para encontrar dichas constantes para los PMTs que se utilizaron en la calibración y que tienen suficientes datos se muestran

PMT	9805	9800	9803
Constantes	$A = 6.3 \times 10^{-1}$ $K = 5.6 \times 10^{-1}$	$A = 7.0 \times 10^{-1}$ $K = 2.8 \times 10^{-1}$	$A = 6.4 \times 10^{-1}$ $K = 5.3 \times 10^{-1}$
PMT	9712	9791	9901
Constantes	$A = 1.6$ $K = 4.8 \times 10^{-1}$	$A = 6.2 \times 10^{-1}$ $K = 4.8 \times 10^{-1}$	$A = 8.9 \times 10^{-1}$ $K = -1.7 \times 10^{-1}$

Tabla 12: Se muestran los valores de las constantes A y K para obtener los valores de σ .

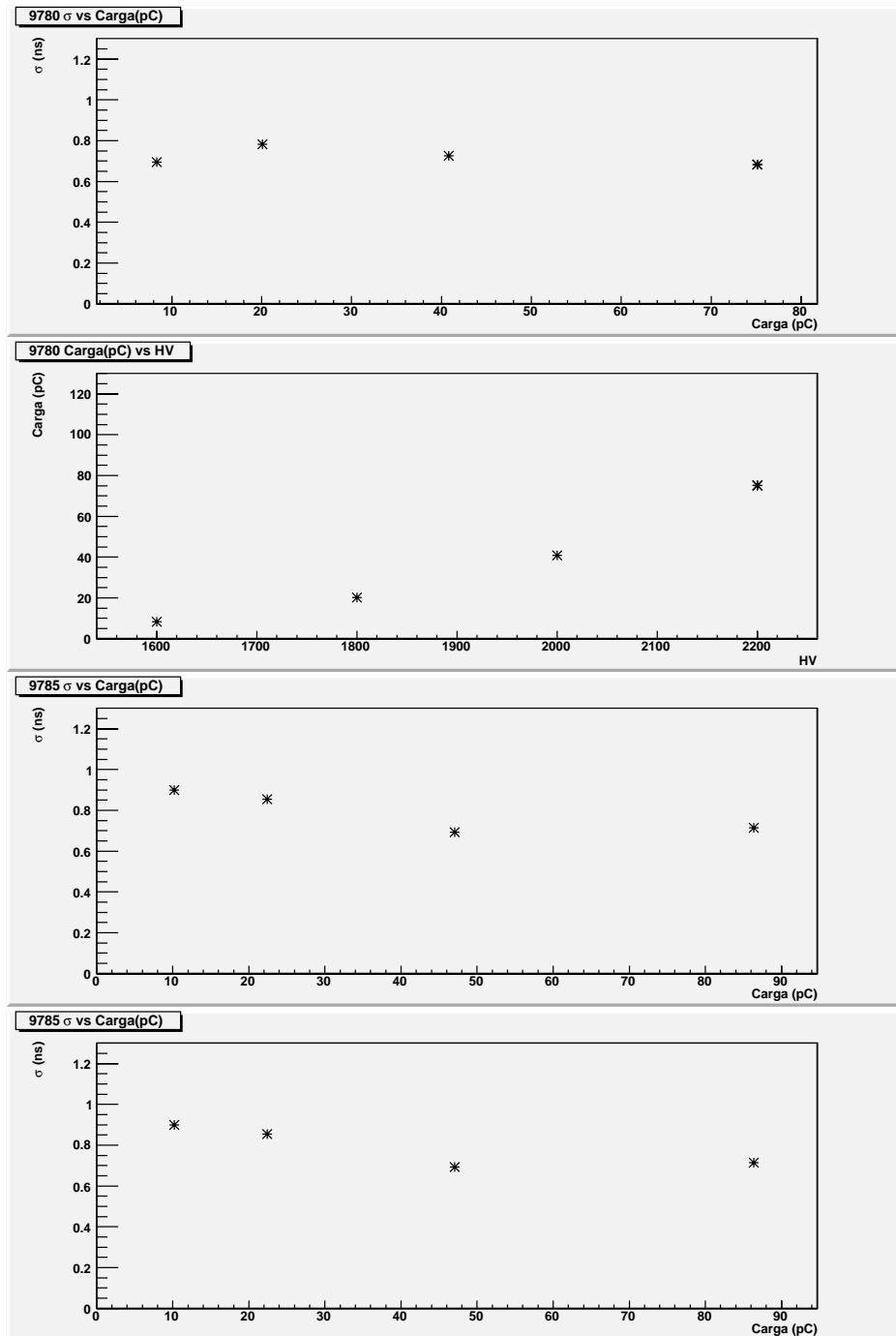


Figura 57: Gráficas de carga vs HV y resolución temporal σ vs carga, con la carga en términos de pC . Para los PMTs 9780 y 9785.

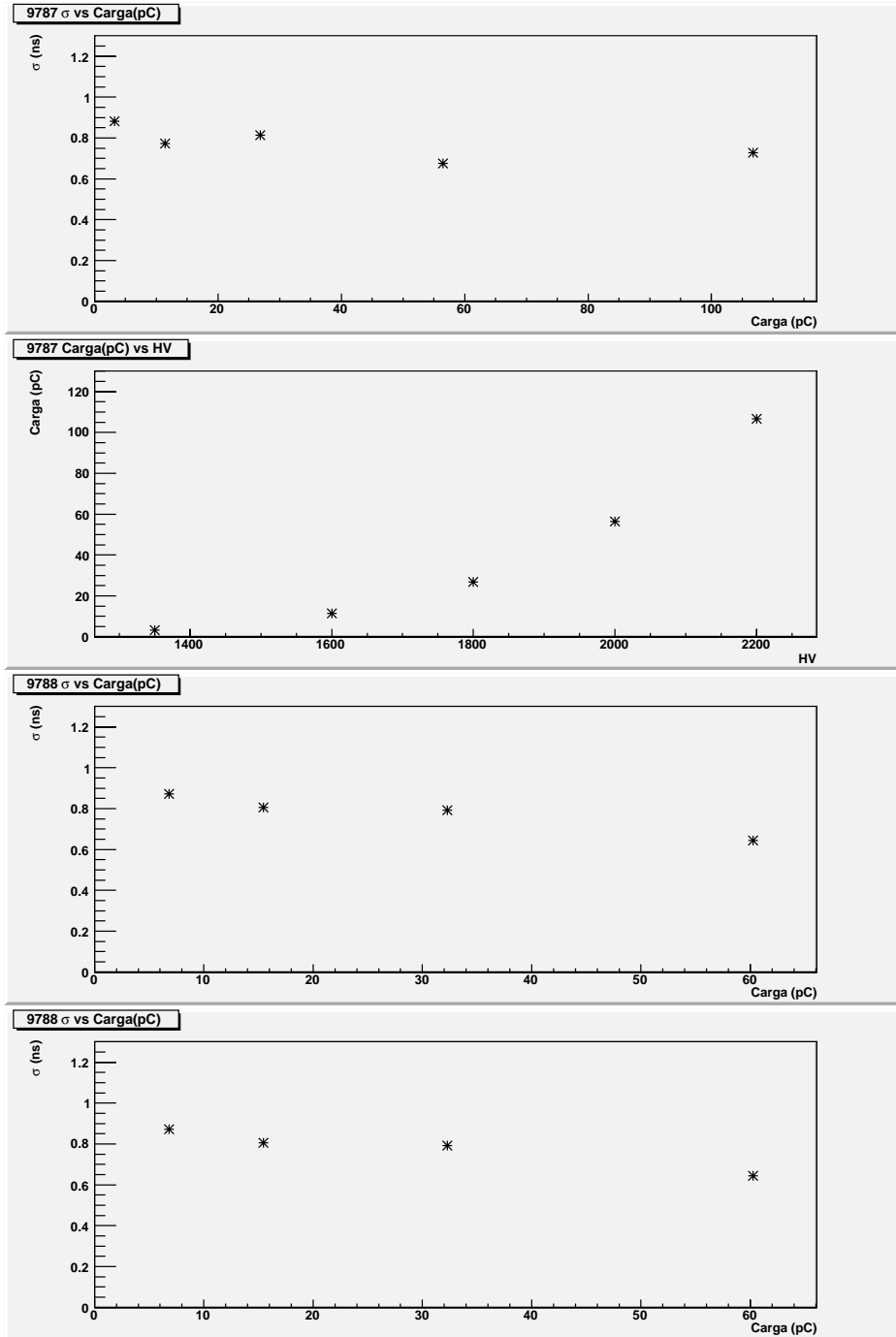


Figura 58: Gráficas de carga vs HV y resolución temporal σ vs carga, con la carga en términos de pC . Para los PMTs 9787 y 9788.

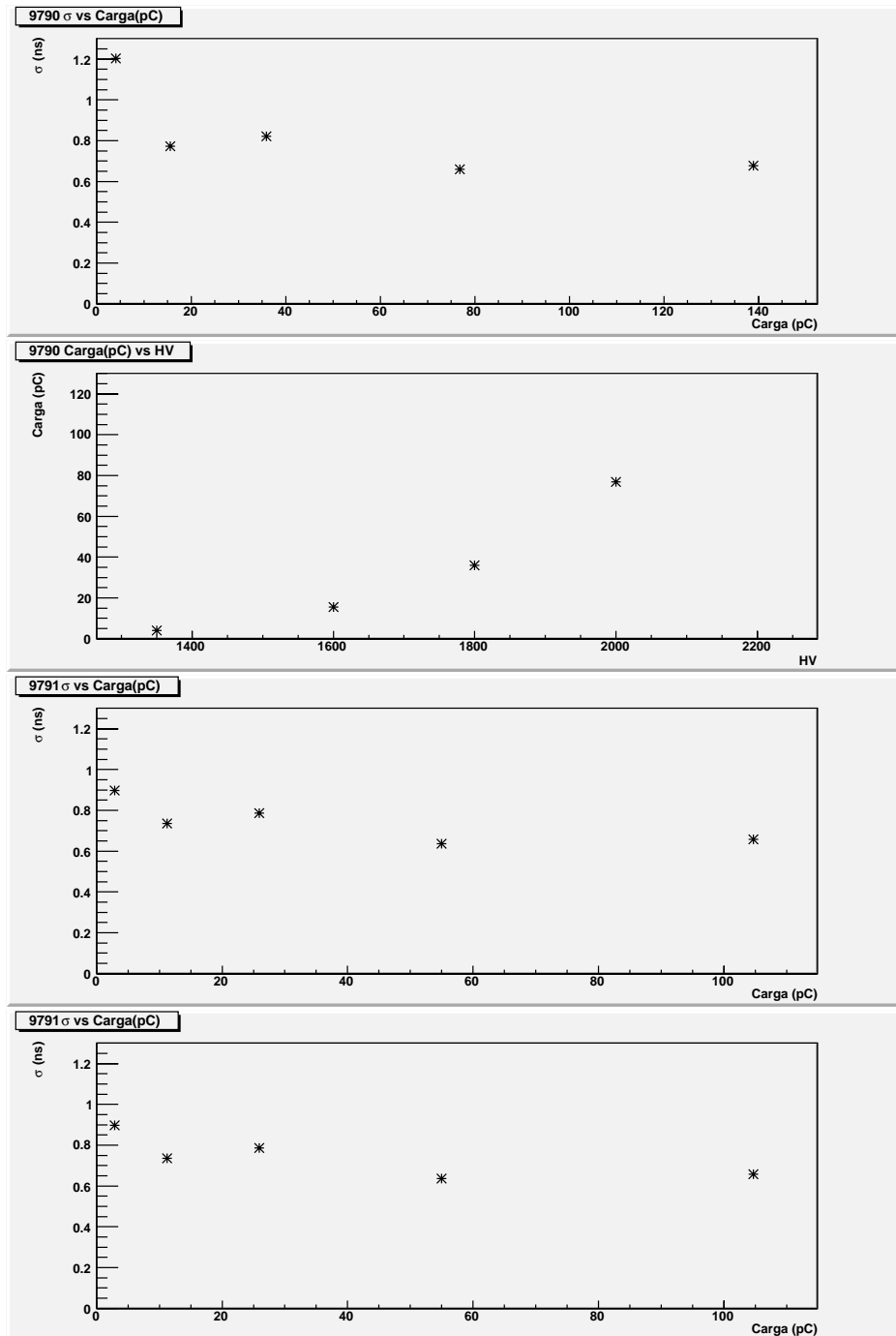


Figura 59: Gráficas de carga vs HV y resolución temporal σ vs carga, con la carga en términos de pC . Para los PMTs 9790 y 9791.

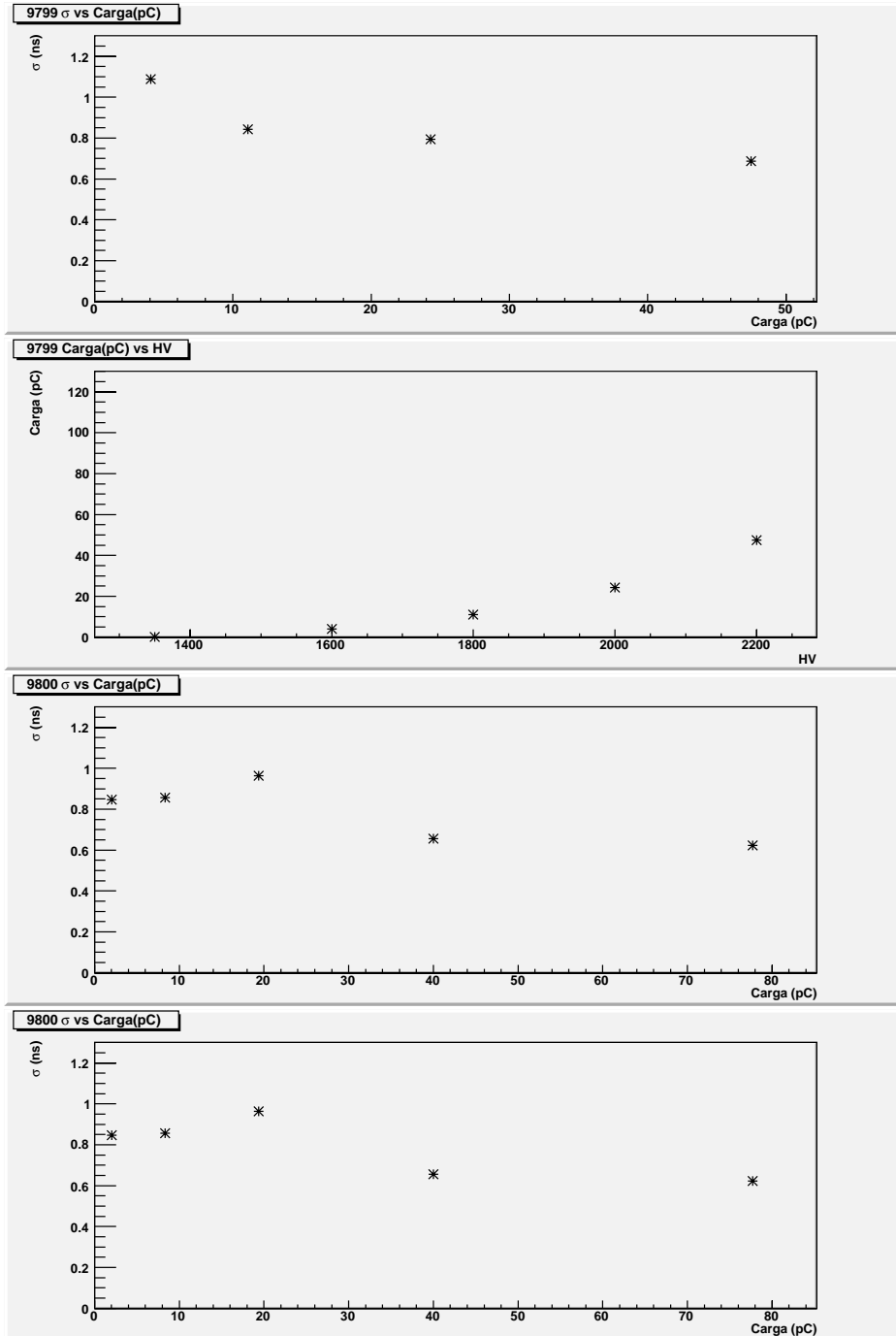


Figura 60: Gráficas de carga vs HV y resolución temporal σ vs carga, con la carga en términos de pC . Para los PMTs 9799 y 9800.

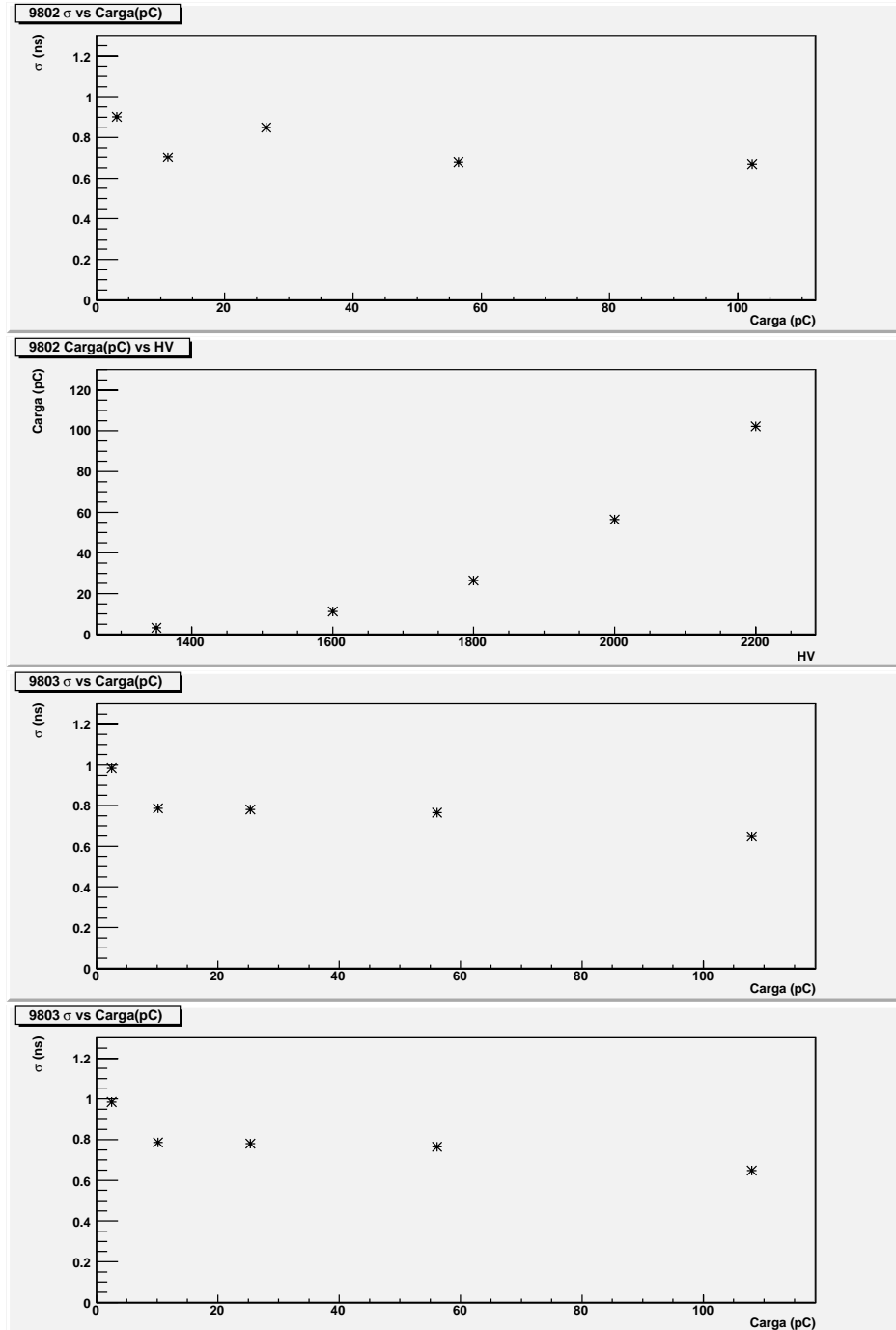


Figura 61: Gráficas de carga vs HV y resolución temporal σ vs carga, con la carga en términos de pC . Para los PMTs 9802 y 9803.

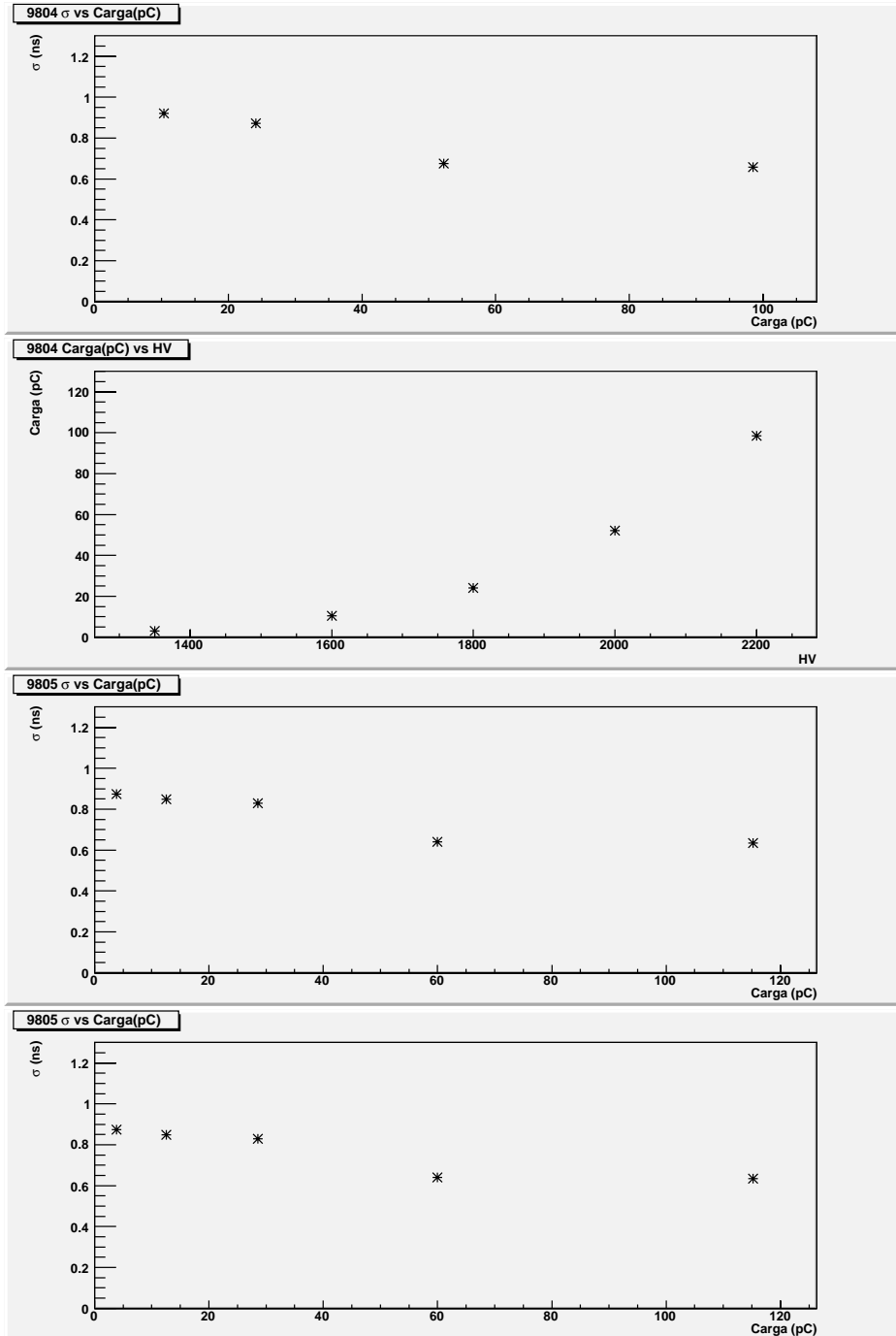


Figura 62: Gráficas de carga vs HV y resolución temporal σ vs carga, con la carga en términos de pC . Para los PMTs 9804 y 9805.

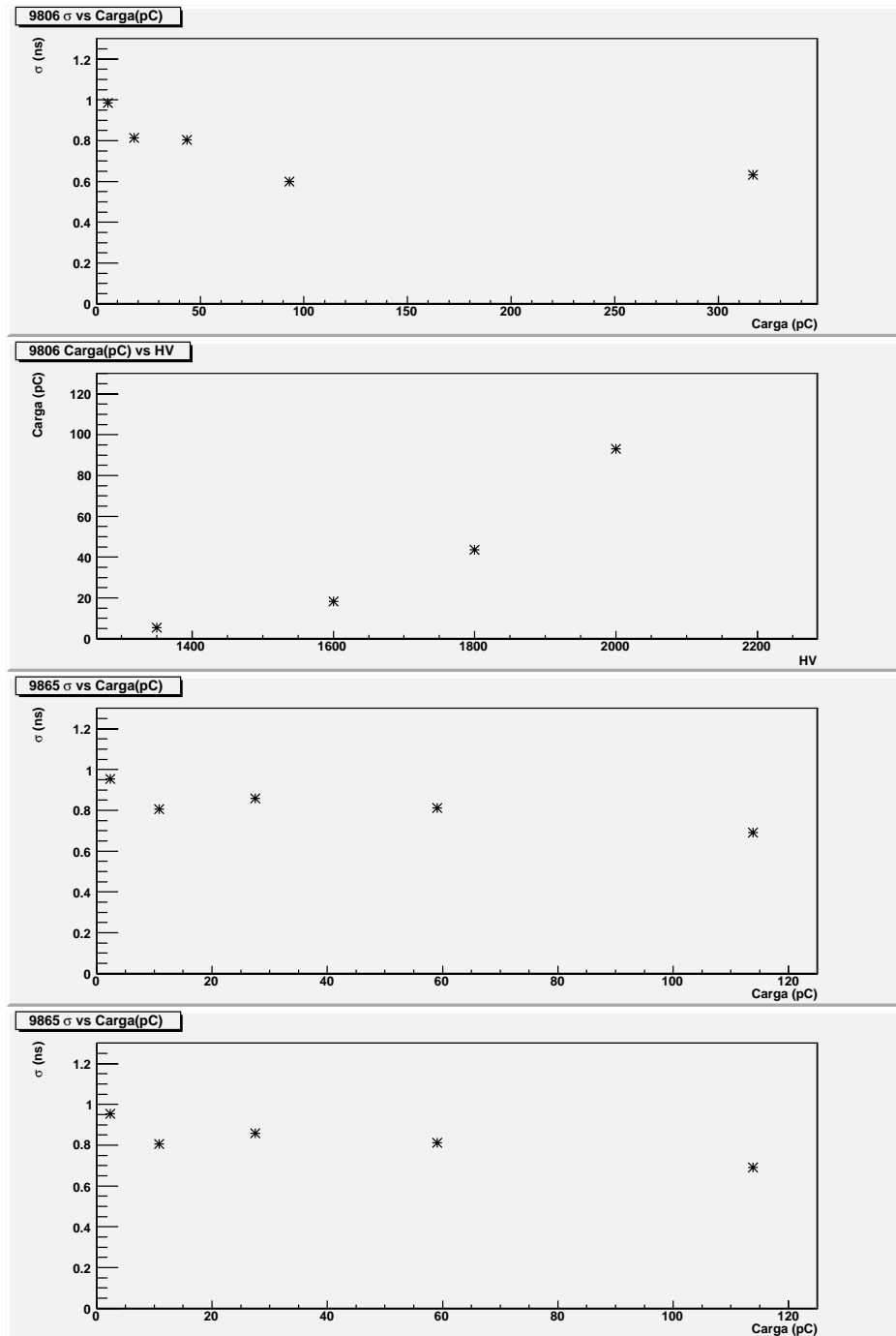


Figura 63: Gráficas de carga vs HV y resolución temporal σ vs carga, con la carga en términos de pC. Para los PMTs 9806 y 9895.

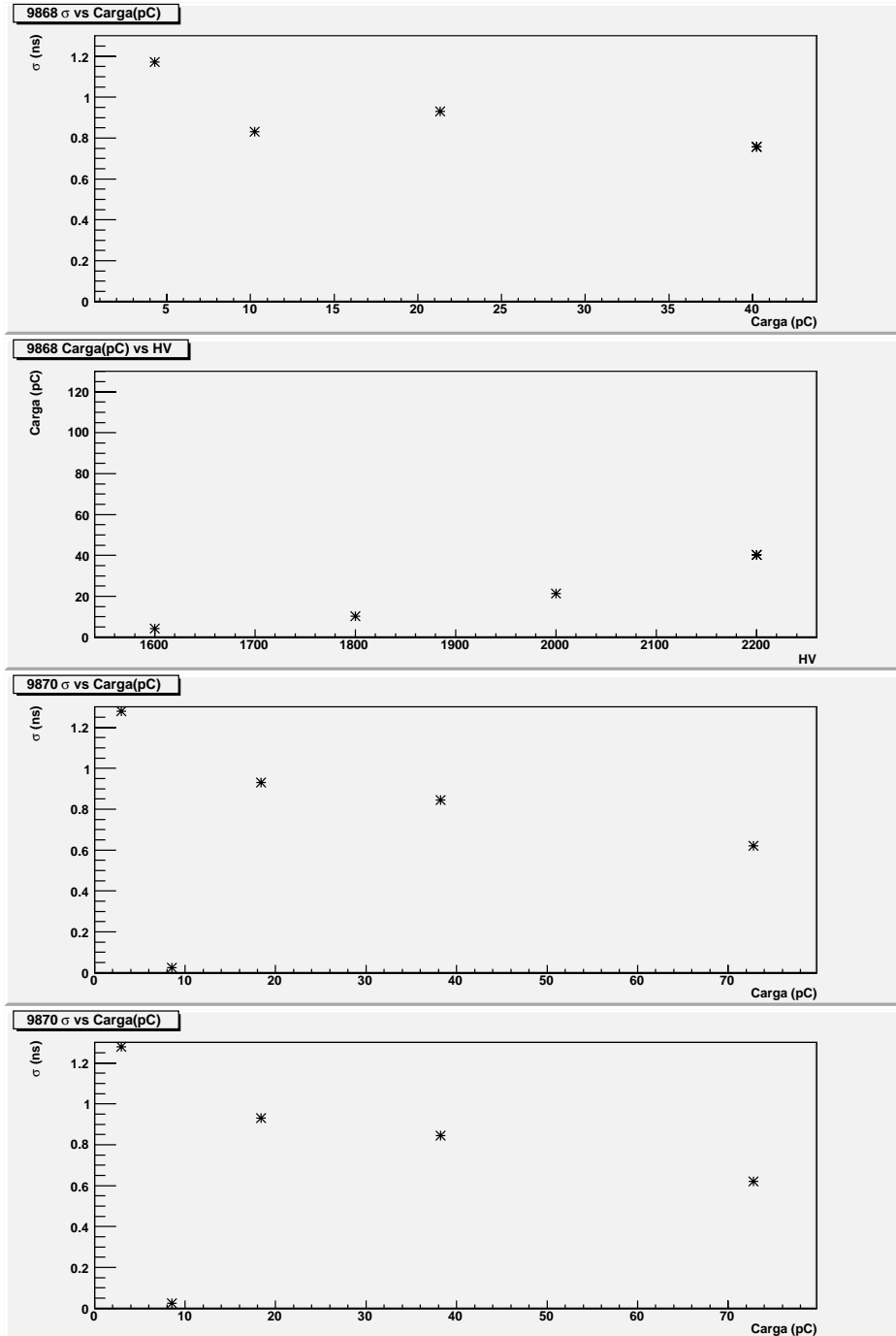


Figura 64: Gráficas de carga vs HV y resolución temporal σ vs carga, con la carga en términos de pC . Para los PMTs 9868 y 9870.

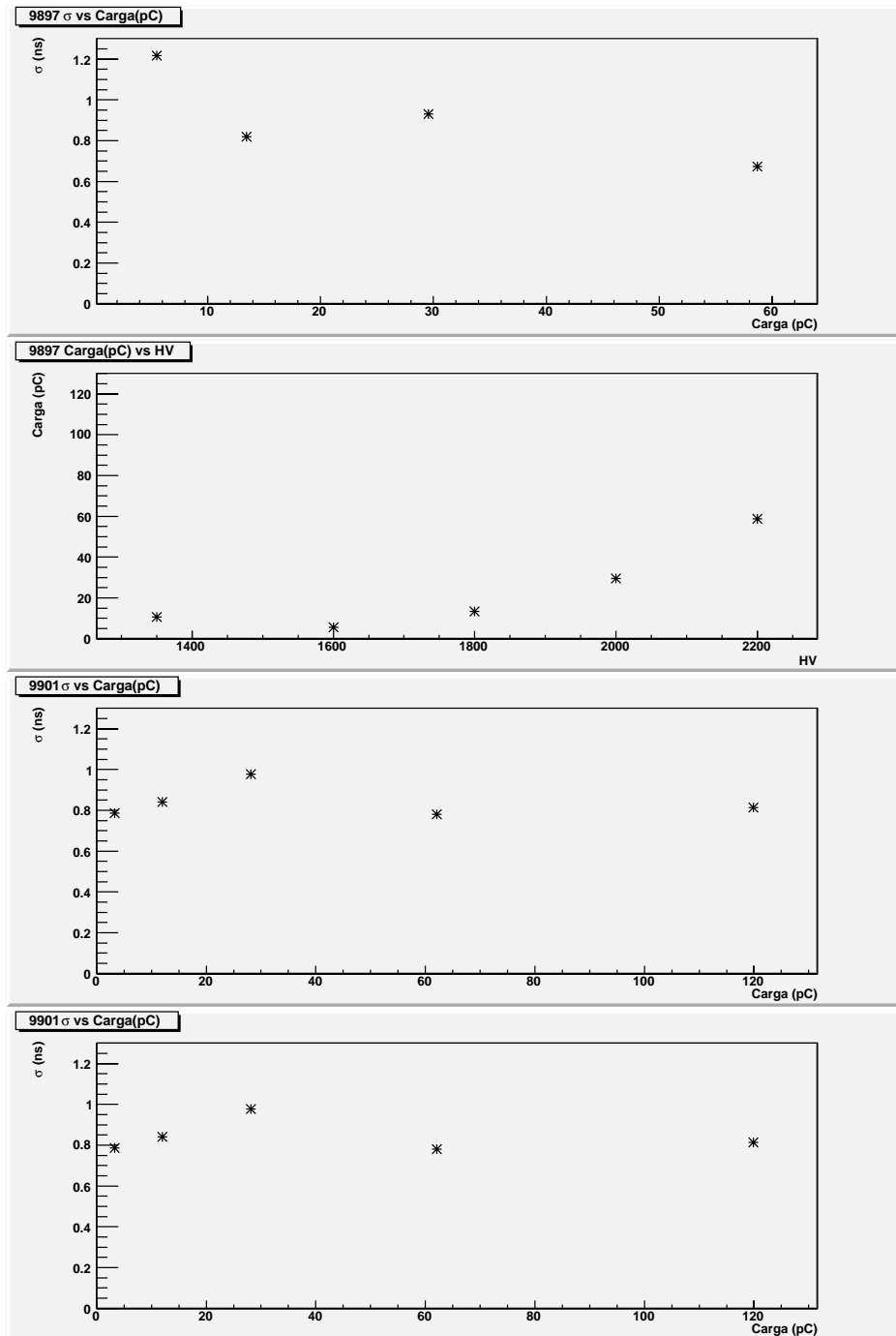
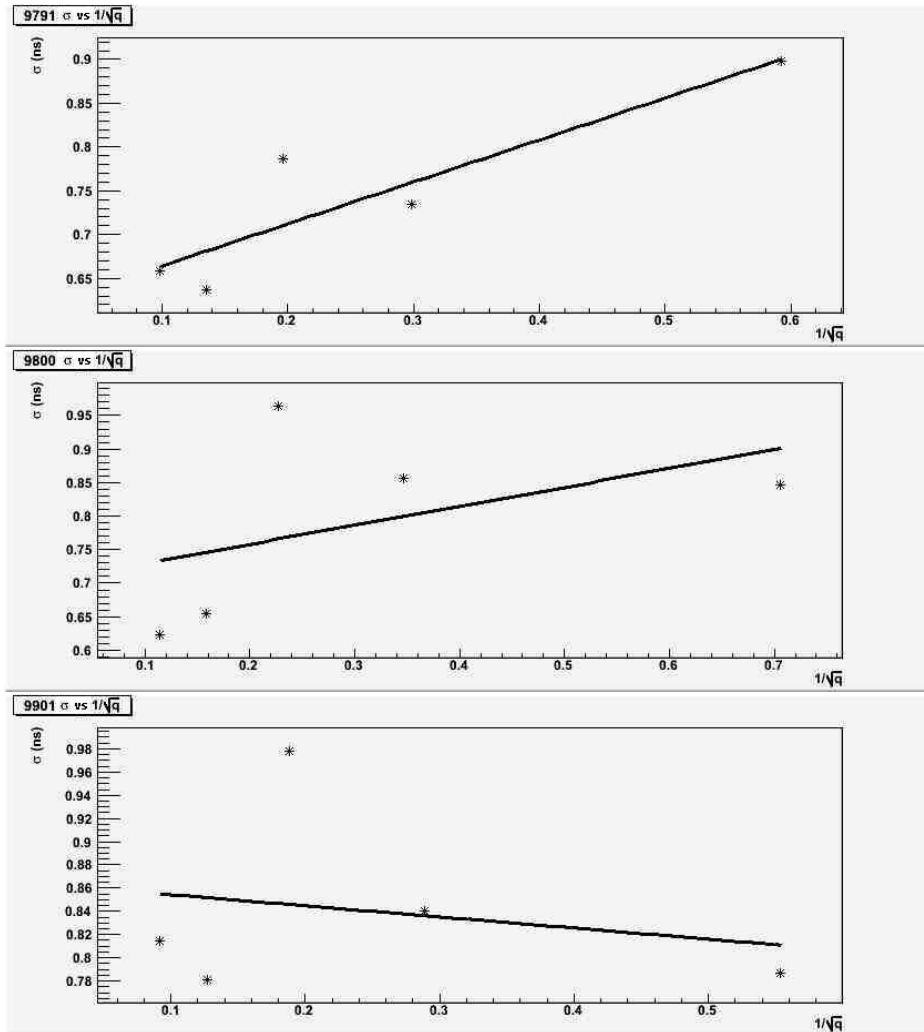


Figura 65: Gráficas de carga vs HV y resolución temporal σ vs carga, con la carga en términos de pC . Para los PMTs 9897 y 9901.

en la figura 66



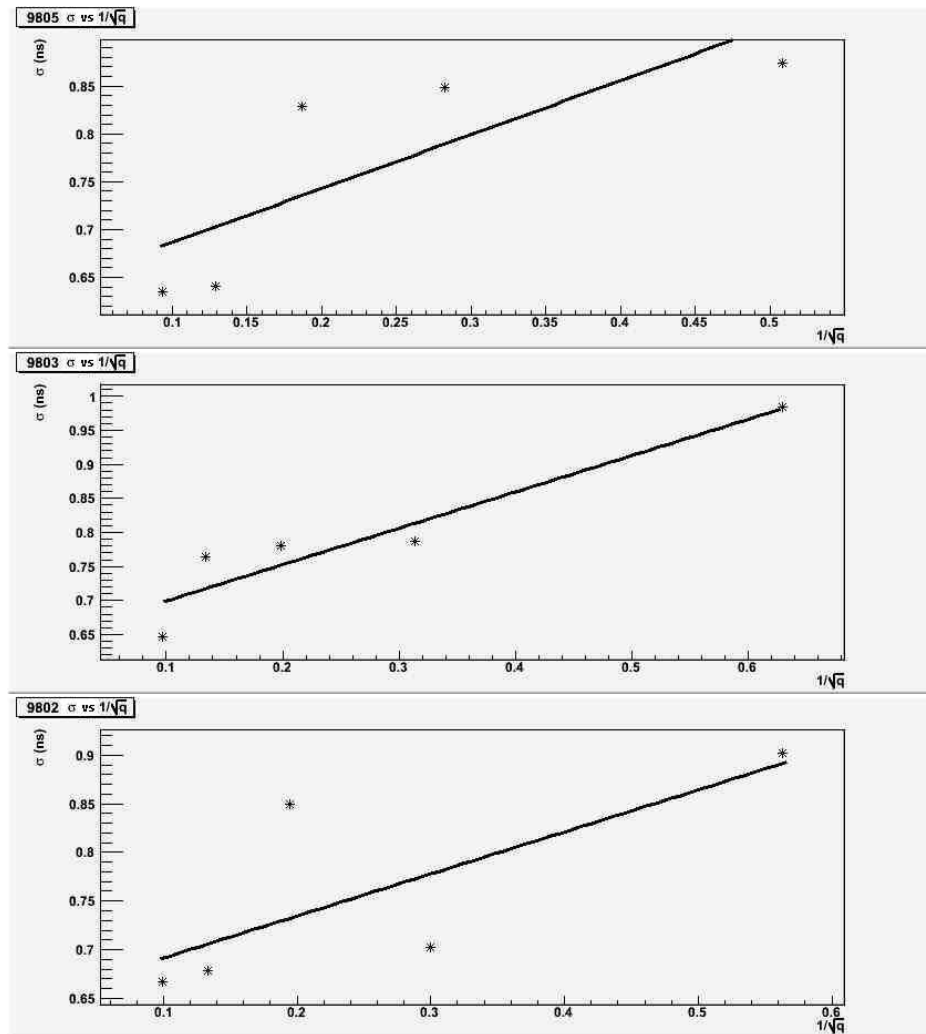


Figura 66: Ajustes de las rectas para encontrar las constantes para calcular la resolución en tiempo σ del detector VOA.

Bibliografía

- [1] Leo, William. *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*. Ed. Springer-Verlag 2da edición. Germany, 1994.
- [2] Gilmore, R.S. *Single particle detection and measurement*. Ed. Burgess Science Press. Great Britain, 1992.
- [3] Kleinknecht, Konrad *Detectors for particle radiation*. Ed. Cambridge University Press 2da edición. United Kingdom, 1998.
- [4] Knoll, Glenn *Radiation Detection and Measurement* Ed. John Wiley & Sons, Inc. 3ra edición. USA, 1999.
- [5] Wasa, Kiyotawa. Kayakawa, Shigeru. *Handbook of Sputter Deposition Technology*. Ed. Noyes Publication. USA, 1992.
- [6] *ALICE Technical Design Report on Forward Detectors FMD, T0 and V0* CERN, Suiza, 2004.
- [7] *ALICE Physics Performance Report Volumen 1* CERN, Suiza, 2003.
- [8] <http://www.icmm.csic.es/amm/instituto/tecnica.htm>
- [9] Conesa, Gustavo. Tesis Doctoral *Identificación de partículas y procesos duros con el espectrómetro PHOS del experiemnto ALICE*. Universidad de Valencia, 2005.
- [10] Fernández, Ramón. Ramón, M. *Partículas Elementales* Ed. Fondo de Cultura Económica. México 2003.
- [11] <http://www.sinorg.uji.es/Docencia/QO/tema9QO.pdf>
- [12] Birks, J.B. *The Theory Practice Scintillation Counting* Ed. Pergamon Press. Londres, 1963.
- [13] Ho-Kim, Quang. Pham, Xuam-Yem. *Elementary Particles and Their Interactions, Concepts and Phenomena*. Ed. Singer.

- [14] Becerril, Ana. Tesis de Licenciatura *Construcción y Pruebas del Prototipo VOL para el Experimento ALICE del CERN*. Universidad Nacional Autónoma de México, 2004.
- [15] Linarez, Moises. Tesis de Licenciatura *Análisis de Datos de los Prototipos del Detector V0A del CERN*. Universidad Nacional Autónoma de México, 2005.
- [16] Allison, J. et.al. *Formulae and Methods in Experimental Data Evaluation with Emphasis on High Energy Physics* Vol. 1:General GLOSSARY, Glossary Group Theory. Publicado por European Physical Society. CERN, Ginebra, Suiza, 1984.
- [17] *Review for Particle Physics, Particle Data Group* Artículo **Passage of Particles Through the Matter**, Universidad de California, 2004.
- [18] Perkins, D.H. *Introduction to High Energy Physics*. Ed. Cambridge Press 4ta edición. Inglaterra, 2000.
- [19] Leon, Hermes. Tesis de Maestria *El Detector V0A del Experimento ALICE-CERN* Universidad Nacional Autónoma de México, IFUNAM. 2007.
- [20] *Detectores de Radiación*. [http://200.D.198.11/Program/T %EGnicos/2007/05-07.pdf](http://200.D.198.11/Program/T%EGnicos/2007/05-07.pdf)