

MÁSTER EN FÍSICA AVANZADA

Especialidad en física nuclear y de partículas



VNIVERSITAT
DE VALÈNCIA

Trabajo final de máster

Diseño de un detector de aguas tritiadas basado en fibras centelleadoras leidas por fotomultiplicadores de silicio

Marcos Martínez Roig

Tutores:

José Díaz Medina
Nadia Yahlali Haddou

Índice

1. Introducción	2
2. Protocolo de manipulación de fibras centelleadoras	8
3. Calibración de los fotomultiplicadores de silicio (SiPM)	11
3.1. Equipo y montaje experimental	13
3.2. Calibración tarjeta	16
3.3. Análisis de datos	16
3.4. Calibración en temperatura	21
3.5. Calibración en voltaje de operación	22
3.6. Estabilización de la ganancia	24
4. Prototipos	28
4.1. Configuración de la electrónica	28
4.2. Procedimiento de llenado	30
4.3. Configuración de la electrónica	31
4.4. Resultados	32
5. Simulaciones	33
6. Previsiones de futuro	34
7. Conclusiones	35
8. Agradecimientos	35
9. Bibliografía	35

1. Introducción

Hoy en día existe un problema que concierne las centrales nucleares de fisión, central termoeléctrica, experimento de física de partículas, etc., e, incluso, en futuras centrales de fusión nuclear y es la creación de altos niveles de radiactividad en estos sitios. Por ejemplo, una central nuclear operando en modo normal puede llegar a emitir alrededor de 300 TBq/GW_y(referencia). Debido a la peligrosidad que ello implica estos deben ser controlados y disminuidos en la medida de lo posible.

En concreto, uno de los elementos radiactivos más abundantes generados en estos lugares es el tritio. Debido a las elevadas tasas de radiactividad anteriormente mencionada, es fundamental controlarlo en estas zonas de trabajo para evitar que contribuya a esta cifra ya que un mayor número de emisiones radiactivas se traduce en una mayor posibilidad de que ello afecte a diversos elementos, entre ellos la salud de las personas.

Para que podamos entender la facilidad con la que este se produce el tritio hay que tener en cuenta que este es el tercer isótopo de hidrógeno formado por un protón y dos neutrones. Por un lado, el hidrógeno es uno de los elementos más abundantes de la tierra y, por otro lado, en cualquier lugar de los anteriormente mencionados, se necesita elevar la temperatura para conseguir que, las reacciones en las que se basa su funcionamiento, puedan ocurrir (para abrir el canal de dicha reacción o aumentar la probabilidad de producirse). Como resultado de ello se producen con bastante asiduidad neutrones con energía suficiente para considerarse cuasilibres.

Podemos entender entonces que, en estos lugares y en estas condiciones, dada la alta tasa de hidrógeno y neutrones, existe una posibilidad relativamente alta de que aparezca tritio o de que existan diversos elementos que puedan dar lugar a la creación de tritio. Algunos de los principales canales de creación de tritio son la captura neutronica del ⁶Li, ⁷Li, H, etc. las cuales se muestran a continuación:



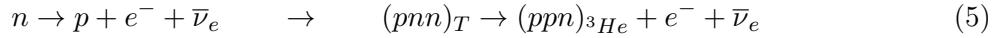
Según nuestro planteamiento también será más fácil todavía que se produzca deuterio, segundo isótopo del hidrógeno (compuesto por un protón y un neutrón). Esto es verdad pero ello no nos importa para nuestro objetivo debido a que el deuterio no es un isótopo radiactivo.

Como hemos dicho, el tritio es el tercer isótopo del hidrógeno compuesto por un protón y dos neutrones. Se trata de un elemento radiactivo con un periodo de semidesintegración de 12,32 años (referencia), en concreto, un emisor β^- de baja energía que emite electrones según la siguiente reacción:



Donde lo que ha ocurrido es que uno de los neutrones que conforman el tritio se ha desintegrado (a partir de una interacción débil) de acuerdo a una desintegración β^- en un protón, un electrón

y un antineutrino electrónico:



La existencia de este antineutrino electrónico es impuesta por la conservación del numero leptónico, en concreto el número leptónico de la familia del electrón (L_e). En la práctica no tenemos la posibilidad de detectar esta partícula ya que interacciona muy débilmente con la materia ($\sigma \propto 10^{-42} \text{ cm}^2$) y por tanto con el material que conforma nuestro detector (en concreto fibras centelleadores BCF-12). Es decir, esta partícula escapa sin interaccionar con el detector y en su lugar solo detectamos su ausencia, es decir, la no conservación de ciertas cantidades físicas como energía, momento, número leptónicos, etc. en la totalidad de las partículas detectadas.

Por tanto solo tenemos la posibilidad de detectar el isótopo ^3He , isótopo estable, y el electrón. Hay que tener en cuenta que, aunque el isótopo hijo de la reacción de desintegración del tritio, ^3He , sea estable (presenta una vida media infinita, es decir, no se desintegra) realmente este se encontrará en un estado no estacionario, es decir, no se encuentra en un autoestado de su hamiltoniano, sino en un estado que puede expresarse como una la suma de autoestados del hamiltoniano. Como consecuencia, tras la desintegración β^- del tritio tendremos una posterior desexcitación del ^3He que producirá fotones con varias energías bien definidas que corresponden a sus niveles energéticos, fotones que podremos observar en nuestro detector. En resumen obtendremos un espectro de desintegración del tritio junto a un espectro típico de rayos X, espectro idealmente discreto pero experimentalmente gaussiano debido a diversas incertidumbres tales como la de los aparatos de medida.

Dado que el ^3He presenta una masa muy superior a la de los electrones, por conservación de energía y momento podemos observar que el ^3He apenas se moverá del sitio donde ha ocurrido la reacción. Por tanto nos centraremos en la detección del electrón. En la figura uno podemos apreciar el espectro energético de los electrones emitidos en la desintegración del tritio.

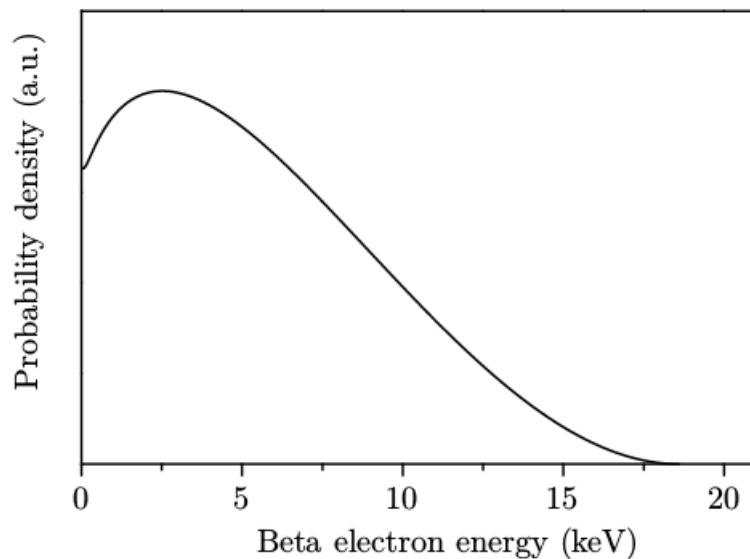


Figura 1.-Espectro energético de los electrones de la desintegración del tritio

Como era de esperar, este presenta la forma típica de un espectro energético de una

desintegración β . Podemos observar que estos poseen una energía máxima de 18,6 keV, una energía promedio de 5,7 keV y una moda (valor más probable) ligeramente inferior a la energía promedio, entorno a 4,5 keV. Con estos valores de energía podemos apreciar que la energía de radiación del tritio es la más pequeña observada hasta el momento en los isótopos (referencia). Como consecuencia el electrón presentará un recorrido libre medio muy corto, del orden de 3 – 5 mm en el aire y de 5 – 6 μm en la fibra centelleadora.

El problema actual reside en que los mecanismos de detección y monitorización de tritio utilizados en la actualidad, en concreto en centrales nucleares, que será el objetivo final del detector que pretendemos desarrollar en el grupo experimental internacional denominado *Tritium*, son métodos lentos o con un alto umbral de detección.

Por ejemplo, entre los métodos más empleado actualmente en centrales nucleares, esta el método de detección de aguas tritiadas por medio de centelleo líquido. Este es el método más indicado para la detección de partículas beta de energía muy pequeña porque, como ya se ha visto al analizar el espectro energético de los electrones que conforman la radiación β del tritio estos presentan un recorrido libre medio muy pequeño (del orden del mm o μm , dependiendo del medio). Dado que solo contribuye a la medida (con una probabilidad aceptable) las emisiones que han tenido lugar a una distancia del detector inferior al recorrido libre medio la forma más efectiva de conseguir que un mayor volumen de la fuente radiactiva contribuya a la señal y que un mayor volumen del detector se encuentre a una distancia adecuada de la fuente radiactiva es disolviendo este detector con el líquido radiactivo (en nuestro caso agua tritiada), y esto solo se puede conseguir utilizando detectores líquidos de partículas beta, como el líquido centelleador.

El método de centelleo líquido consiste en tomar una muestra del líquido radiactivo, agua tritiada en nuestro caso, diluirla (habitualmente al 50 %) con el líquido centelleador y medir los fotones emitidos por este líquido centelleador, a partir de los cuales podremos determinar los electrones emitidos por la muestra de agua tritiada y detectados por el líquido centelleador. Sin embargo para ello se necesita tomar una muestra y llevarla al laboratorio para el correspondiente estudio. En resumen se trata de un proceso de detección de agua tritiada basado en métodos offline que ralentizan la monitorización dilatando el resultado hasta varios días desde la toma de la muestra.

Tras cada análisis, la muestra de agua tritiada y líquido centelleador son inseparables y por tanto no reutilizable. Este debe de ser tratado como residuo peligroso ya que, aunque el análisis desvela que el agua tritiada está libre de tritio (presente una actividad suficientemente baja para ser tratada como material no radiactivo), esta contiene tolueno, presente en el líquido centelleador y, por tanto, debe de ser procesada de manera segura. También necesita operarios especializados manipulen estas muestras, poniendo en peligro su salud (referencia del artículo "sampling tritiated water vapor from the atmosphere by an active system using silica gel").

El objetivo final de *Tritium*, sobre el cual tratará mi futura tesis, es desarrollar un detector de aguas tritiadas que permita realizar la monitorización del tritio *in situ* a tiempo real. Por tiempo real entendemos una dilatación temporal máxima de 10 minutos desde la toma de la muestra (ya que se necesita un tiempo mínimo para poder discernir la señal del background, el cual dependerá, entre otras cosas, de la configuración del sistema de detección). Además el

prototipo desarrollado no necesitará de la presencia de personal especializado que intervenga en el proceso de monitorización de aguas tritiadas, agilizando y abaratando el método de monitorización, además de excluir posibles errores humanos. El método simplemente requerirá continuas calibraciones al cabo de un tiempo determinado para asegurar el correcto funcionamiento del dispositivo.

La dificultad aquí residirá en conseguir extraer esta señal tan pequeña (\sim keV) y tener estadística suficiente para poder discernirla del fondo radiactivo en un tiempo tan pequeño. Los trabajos *in situ* con configuraciones del detector similares (centelleador + contador de fotones) realizados hasta la fecha que utilizan el concepto de tiempo real solo han conseguido obtener una señal en el límite del MeV (citar referencia a la tesis"). Estos están basados principalmente en sólidos centelleadores y tubos fotomultiplicadores (PMT) a diferencia de nuestro experimento que consta de fibras centelleadoras (que detectan la radiación beta del tritio y la convierten en fotones) y tubos fotomultiplicadores o fotomultiplicadores de silicio (que detectan estos fotones y los convierten en electrones que conformarán la señal del sistema).

En mi opinión el uso de fibras centelleadoras es una mejor elección ya que presentan un mayor volumen activo con el que detectar la radiación del tritio sin necesidad de utilizar líquido centelleador el cual, como he mencionado anteriormente, produce residuos peligrosos además del coste del líquido centelleador no reutilizable. Además las fibras centelleadoras presentan un mayor abanico de posibilidades en cuanto a la elección de las distintas estructuras de las mismas. Nuestro experimento se centrará en la utilización de SiPM aunque también contemplará el uso de PMT.

Hay que tener en cuenta que si existen diseños que logran llegar a límites del orden del Bequerel en un tiempo de 3 minutos, aunque estos están basados en configuraciones totalmente distintas, como por ejemplo un sistema, conformado por un láser y cavidades espectroscópicas en forma de anillo, en el cual se pretende buscar la existencia de resonancias y relacionar las frecuencias a las que estas ocurren con la concentración de tritio presente en la muestra. (citar referencia Tritiated water detection in the 2,17 micrómetros spectral region by cavity ring down spectroscopy"). Sin embargo este es un estudio totalmente diferente ya que necesita de un acondicionamiento y control exhaustivo de las condiciones del sistema para el correcto funcionamiento del láser, encareciendo la construcción y mantenimiento del mismo y dificultando la existencia de este en sitios como centrales nucleares, es decir, es una aplicación que no persigue un mismo fin.

Para conseguir extraer una señal tan pequeña con la mayor eficiencia posible estudiaremos diversas configuraciones experimentales para conseguir obtener la más adecuada de acuerdo a nuestro objetivo experimental. Además realizaremos en todo momento detecciones en coincidencia, lo cual nos permitirá eliminar en gran medida el fondo radiactivo del experimento. Las configuraciones que pretendemos abarcar en el experimento son:

- Por un lado estudiaremos cuál es la mejor elección para las estructuras de fibras centelleadoras. Estudiaremos las ventajas y desventajas que presenta la utilización clads en las fibras (recubrimiento de la fibra centelleadora para evitar la fuga de fotones de centelleo y poder dirigir estos de manera ópticamente aceptable hasta el contador de fotones).
- Por otro lado estudiaremos cuál es la mejor elección para un contador de fotones. Las

posibilidades contempladas en el experimento serán SiPM o PMT. Veremos cual es más adecuado ya que cada una presenta una serie de características mejores como la eficiencia de fotodetección (PDE) de los SiPM sobre la de los PMT pero otras tantas peores como la dependencia con la temperatura más acusada en los SiPM que en los PMT.

También se realizarán una serie de simulaciones del experimento previas al desarrollo del mismo utilizando el programa "Geant 4", desarrollado por el cern, con el objetivo de ver que es el que deberíamos esperar teóricamente de nuestros resultados. Estas simulaciones nos permitirán comparar nuestros resultados experimentales con los datos simulados para ver hasta que punto nuestro experimento dista del modelo teórico seguido, lo cual nos permitirá a su vez comprobar la fiabilidad de este modelo teórico y corregir posibles erratas del mismo. También nos permitirá ver que posibles modificaciones podemos realizar en el experimento para obtener un mejor resultado.

El grupo experimental *Tritium* es un grupo internacional compuesto por tres países: Portugal, Francia y España; En concreto intervienen las universidades de... El proyecto que planteamos en este grupo es demasiado extenso para una trabajo de fin de master ya que se necesitan años para conseguir resultados concluyentes y, como ya se ha mencionado anteriormente, será la base de mi futura tesis. En este trabajo de fin de máster únicamente nos centraremos en los primeros pasos de este gran proyecto, el cual ha empezado recientemente y, afortunadamente, me ha permitido estar en este desde el inicio.

Dividiremos este trabajo en seis partes:

1. En primer lugar se realizará un pequeño estudio sobre las fibras centelleadoras. Por un lado se determinará cual es la forma adecuada de actuar a la hora de manipular fibras centelleadoras, elemento más sensible de los utilizados en el experimento, presentando el procedimiento final de como preparar un bunch de fibras centelleadoras con resultado ópticamente aceptable. Por otro lado se utilizarán distintas estructuras de las mismas para ver cual nos permite obtener una señal del agua tritiada más óptima.
2. En segundo lugar realizaremos una calibración de los SiPM, paso fundamental antes de poder obtener cualquier medida del experimento. La finalidad de este paso es poder catalogar la magnitud de la medida del sistema que estamos obteniendo con este instrumento, algo fundamental en física. No se necesita realizar una calibración de los PMT, paso igualmente importante al anterior, ya que este trabajo fue realizado recientemente por otro componente del grupo.
3. En tercer lugar se describirá uno de las posibles configuraciones que serán estudiadas con el fin de determinar cual de estas es la más adecuada, desde el punto de vista del objetivo final de proyecto, para el diseño final del detector. Este también nos permitirá encontrar posibles fallos y mejoras que optimicen nuestro prototipo y que podrán ser utilizadas para el diseño final. En concreto la configuración que se estudiará esta formada por un bunch de 35 fibras centelleadoras sin clad leidas por PMT. También se hablará, entre otras cosas, del proceso de llenado que tuvo que ser desarrollado para una realización segura del mismo además de los resultados obtenidos.

4. En cuarto lugar se presentarán las simulaciones realizadas con el programa de Geant4, programa desarrollado por el cern capaz de realizar simulaciones muy detalladas de experimentos, principalmente de física de partículas. En este punto se presentaran las simulaciones realizadas tanto para los prototipos como para posibles diseños finales. Esto nos permitirá ver que posibles mejoras podemos incluir a nuestro experimento y en que puntos difieren los resultados obtenidos con las simulaciones con los resultados obtenidos en los distintos experimentos de los prototipo.
5. En quinto lugar se presentará se comentaran posibles partes del experimento que queden inconclusas o inacabadas o puntos interesantes y que serán propuestos a futuros estudios que habrá que realizar durante la tesis. También se comentará brevemente el siguiente paso que pretenderemos realizar en el proyecto.
6. Se presentará un último punto donde se expondrán las conclusiones alcanzadas durante la completitud del trabajo.

2. Protocolo de manipulación de fibras centelleadoras

Como se ha comentado anteriormente, el primer paso para monitorizar el agua tritiada es detectar los electrones que se producen en la desintegración β^- del tritio (4). Para ello se utilizarán fibras centelleadoras, en concreto, fibras BCF-12.

Un elemento centelleador está formado por materiales luminiscentes cuyos átomos o moléculas que los componen presentan unos niveles energéticos similares a los de la figura dos:

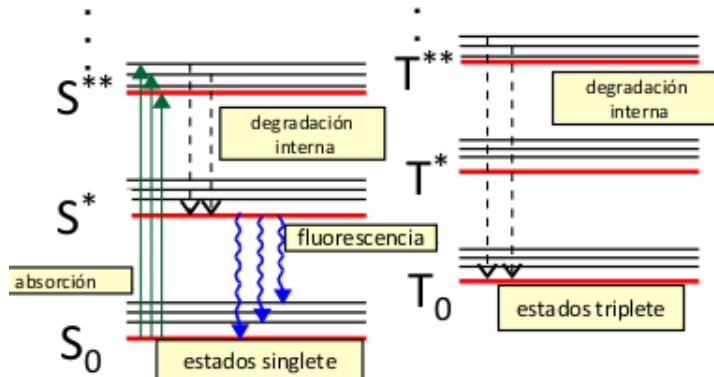


Figura 2.- Esquema de niveles energéticos de un material centelleador

Donde los estados S representan singletes y los estados T tripletes. Cuando la radiación ionizante, en nuestro caso los electrones procedentes del tritio, atraviesa el centelleador sus átomos y/o moléculas absorben su energía produciéndose una excitación de los mismos.

Posteriormente estos se desexcitan, en primer lugar desde niveles superiores hasta el nivel S^* o T_0 por degradación interna (en un tiempo del orden del ps) y seguidamente del S^* hasta S_0 (en un tiempo del orden del ns). En esta segunda desexcitación emiten fotones cuyo rango de longitud de onda puede ir desde el ultravioleta hasta el infrarrojo [100-800]nm dependiendo de la distancia existente entre estos niveles energéticos.

Estos fotones son los que se conocen como fluorescencia y es lo que se utiliza habitualmente como señal de respuesta de un material centelleador. En concreto, en nuestro experimento, esta será la señal que utilizaremos cuyo espectro es el mostrado en la figura 8.

Hay que tener en cuenta que las fibras centelleadoras son transparentes a los fotones que se encuentran en la longitud de onda de su emisión ya que, de lo contrario, tendríamos una nueva reabsorción de los fotones emitidos antes de ser detectados por el contador de fotones, situación indeseada.

Los materiales centelleadoras presentan una muy buena linealidad con la energía de la radiación incidente a partir de una energía mínima que determina la sensibilidad del material centelleador utilizado, en nuestro caso... Teniendo en cuenta que el SiPM también presenta una muy buena linealidad con la señal recibida esperamos obtener una señal de nuestro detector que presente una buena linealidad con la energía que pretendamos medir.

Por lo general estos materiales centelleadores producen señales bastante rápidas en

comparación con otros tipos de detectores tales como.... Utilizamos fibras centelleadoras orgánicas ya que estas son 2 o 3 órdenes de magnitud más rápidas que las inorgánicas, en concreto las fibras que utilizaremos presentan un tiempo de decaimiento de 3,2 ns.

Además debe de ser capaz de producir el mayor número de fotones por unidad de energía para poder tener un mayor detalle de la señal medida. Las fibras BCF-12 son capaces de producir 8000 fotones por MeV de la radiación incidente. Las fibras BCF-12 presentan una eficiencia de fotodetección teórica de...

Para manipular las fibras se vio necesario la utilización de guantes de latex ya que el propio tacto del personal encargado del tratamiento de las fibras las ensuciaban y, por extensión, la propagación de la luz se veía afectada.

Para poder cortar las fibras centelleadoras de forma ópticamente aceptable se diseño y construyo una guillotina (referencia) adecuada la cual puede verse reflejada en la figura tres:

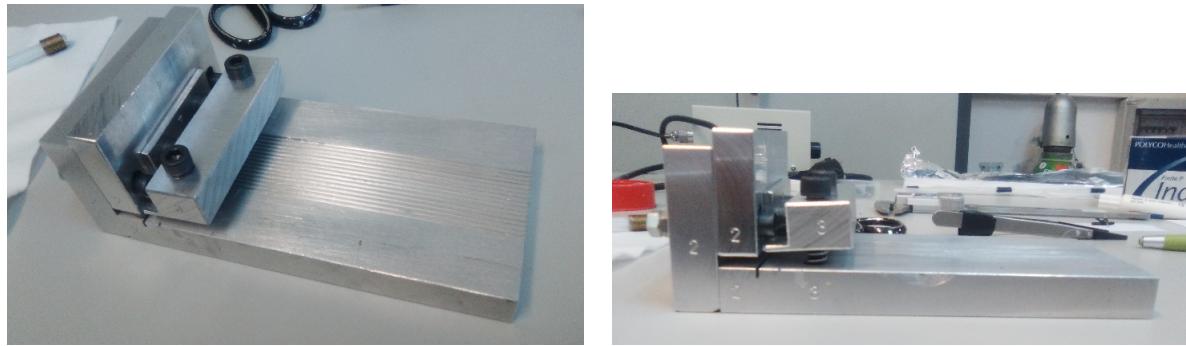


Figura 3.-Guillotina

En la figura derecha se puede apreciar que la guillotina disponía de dos piezas independientes (marcadas con los número 2 y 3) las cuales estaban suspendidas por muelles. Para sujetar y cortar cada una de las fibra había que pulsar las piezas 3 y 2 respectivamente.

También puede apreciarse que la guillotina dispone de 14 rieles cuadrados los cuales servían para sujetar cada una de las fibras y, así, obtener un corte limpio y perpendicular. Aunque la guillotina tenía la posibilidad de realizar cortes simultaneos sobre varias fibras centelleadoras siempre se realizaron cortes sobre una única fibra. De esta forma asegurábamos un mejor acabado.

Se estuvo probando con varios tipos de cuchilla (de distinto grosor y tamaño) y se acabo viendo que una cuchilla típica de afeitar era suficiente. Hay que tener en cuenta que, para un corte más efectivo se introdujo en la disposición de la cuchilla una ligera inclinación.

En la figura cuatro izquierda se puede ver (con ayuda de un microscopio) la cara de una fibra recien cortada. En esta podemos apreciar que, aunque presenta una cabado realmente bueno (sin roturas ni deformaciones) si encontramos que la cara de la fibra se encuentra ligeramente dañada y esto afectaba a la propagación de la luz. La forma de subsanar esto fue pulir cada una de las caras de las fibras. En la parte derecha de la misma figura podemos observar una foto con la misma fibra trás el proceso de pulido. Podemos comprobar que el simple hecho de pulir las caras de las fibras nos permite obtener fibras con acabado ópticamente aceptable.

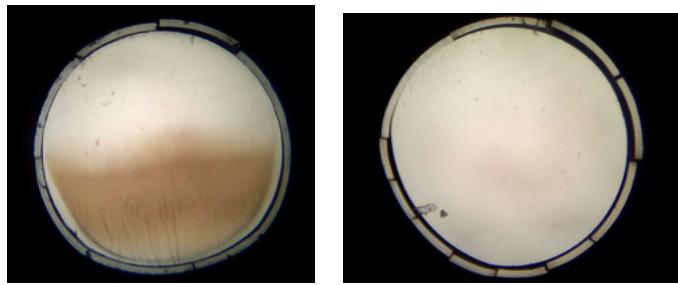


Figura 4.-Cara fibras

Hay que notar en la figura que el clad aparece roto. Se vio que esto era una característica inevitable del proceso de cortado. Sin embargo pudo observarse que este únicamente se encontraba en el extremo final de la fibra por lo que, la utilización de grasa óptica (marca Saint-Global) para acompañar esta al contador de fotones solucionaba el problema.

Seguidamente, con las fibras ya cortadas, simplemente se utilizó un pegamento óptico (marca Saint-Global), especialmente diseñado para materiales centelleadores, para pegarlas entre ellas y obtener, de esta forma, un bunch de fibras. Para que su acabado fuese suficientemente rígido se utilizó un aro metálico en cada uno de los extremos según la figura cinco.



Figura 5.-Aro metálico

En la figura cinco derecha puede apreciarse que este mismo aro disponía de una arandela la cual se utilizaba para una completa sujeción al prototipo.

Finalmente, cuando se había secado el pegamento, volvíamos a pulir cada una de las caras del bunch de fibras con el objetivo de obtener una cara total plana (todas las fibras al mismo nivel) para obtener el mejor acompañamiento con el contador de fotones (ya sea SiPM o PMT). En la figura seis podemos observar un bunch de fibras totalmente acabado.



Figura 6.-Bunch fibras

Este bunch construido disponía de 35 fibras ya que era el mayor número de fibras que cabían en el interior del aro metálico y tenía una extensión máxima de aproximadamente 25 cm, extensión acorde con el prototipo. En la figura seis derecha podemos apreciar la cara final pulida perfectamente plana. Hay que tener en cuenta que cualquier irregularidad inferior al milímetro en la cara final de bunch era subsanada por el hecho de utilizar grasa óptica para acoplar el bunch de fibra al contador de fotones.

3. Calibración de los fotomultiplicadores de silicio (SiPM)

El siguiente paso consistía en leer estos fotones de centelleo. Para ello una de las alternativas que contempla nuestro estudio es la utilización de un fotomultiplicador de Silicio, de ahora en adelante SiPM. El SiPM es un dispositivo de detección de radiación relativamente nuevo en el mercado que surge como alternativa al tubo fotomultiplicador. Este consiste en un array bidimensional formado por múltiples pixels independientes y alimentados en paralelo (mismo voltaje operacional para cada uno) a un voltaje tal que les permita estar en modo Geiger. Cada uno de los pixels actúa como un APD (fotodiodos de avalancha).

Cuando detectan un foton estos pixels producen una cascada de pares electrón hueco que pasará a formar parte de la señal del sistema de detección, la cual estará formada por la suma de las señales de cada pixel que han detectado un fotón para cada instante de tiempo. Idealmente cada pixel únicamente puede detectar un fotón. Dado que poseen una alta eficiencia de fotodetección los SiPM son utilizados como contadores de fotones, especialmente para señales débiles.

Debido a ello presenta una serie de propiedades distintas a los convencionales tubos fotomultiplicadores que lo hacen ideal para unas situaciones y no tanto para otras, como por ejemplo su tamaño compacto, inmunidad a campos magnéticos, electrónica sencilla, alta eficiencia de detección de fotones (especialmente adecuado para nuestro experimento), buena linealidad, dependencia con la temperatura, alta ganancia a menor voltaje de alimentación y, por extensión, menor consumo, tiempo de respuesta corto y, por extensión, buena resolución temporal.

Hay que tener en cuenta que los SiPM son detectores de estado sólido y, por extensión, presentan ruido térmico, ruido que se verá amplificado por el hecho de estar operando en modo Geiger. Este ruido es denominado corriente oscura (Dark counts) y su forma se ve reflejada en la siguiente figura:

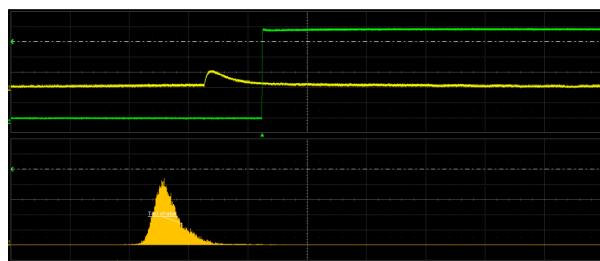


Figura 7.- Dark counts

Cuando trabajemos con detectores de estado sólido debemos trabajar en condiciones de voltaje operacional y temperatura óptimas para poder medir con el detector ya que, estas cuentas oscuras dependen de estas magnitudes y pueden llegar a ser tan numerosas que absorban por completo la señal del sistema. También podemos reducir su importancia sobre la medida con ayuda de triggers, por ejemplo, medir únicamente cuando la señal de entrada del sistema este activa (si se conoce este intervalo de tiempo). En cualquier caso siempre se deberá realizar una medida del pedestal (sin señal de entrada) para tener en cuenta el número y características de los eventos que van a contribuir a la señal sin proceder de la misma y utilizar esta información

para el posterior análisis.

En esta sección nos proponemos desarrollar un método de compensación para las variaciones de la ganancia de un fotomultiplicador de silicio derivadas de la temperatura a partir de variaciones derivadas del voltaje de alimentación del SiPM (voltaje de desertización), de ahora en adelante llamado voltaje operacional.

En concreto utilizaremos el modelo S13360-1375CS de hamamatsu, ya que será el modelo que utilizaremos en el prototipo del experimento. Se ha elegido este modelo ya que presenta una eficiencia de fotodetección máxima entorno a los 450 nm, que corresponde aproximadamente a la longitud de onda del azul, 435 nm y, en concreto, se asemeja bastante con el máximo de la energía reemitida por las fibras centelleadoras BCF-12, 435 nm, encargadas de detectar la radiación β del agua tritiada en nuestro experimento como puede apreciarse en la siguiente figura. Con esto conseguiremos que la señal sea tan grande como sea posible, algo fundamental ya que, como ya se ha mencionado, una de las principales dificultades del experimento es que estamos intentando extraer una señal muy pequeña.

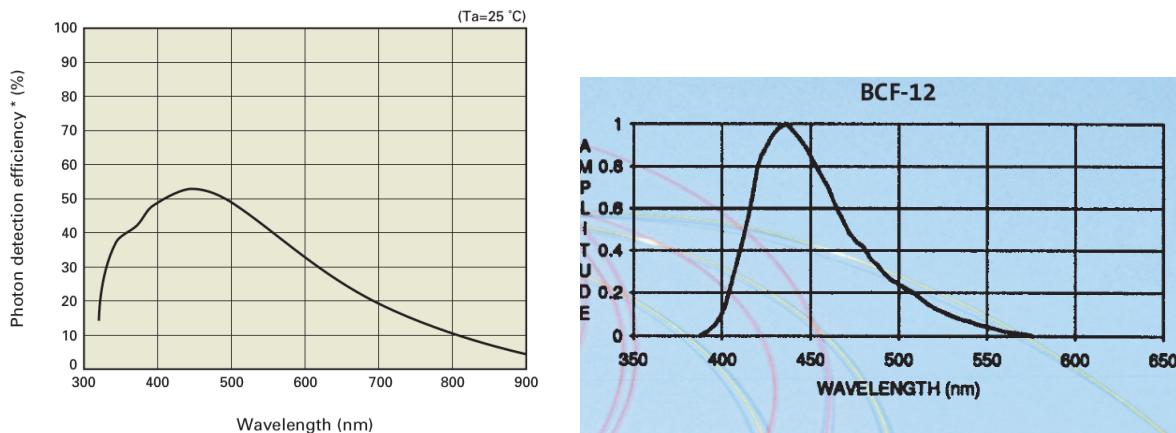


Figura 8.-PDE del SiPM y espectro de emisión de las fibras respectivamente

La forma de abordar este método de compensación de la ganancia ha sido el siguiente:

1. Por un lado se ha realizado una calibración de la ganancia frente a la temperatura obteniendo su relación de dependencia. Para ello se ha necesitado la utilización de un sistema de control de temperatura. En concreto se ha utilizado un sistema de la marca DYCOMETAL, (modelo CCM 81) que permite controlar temperatura y humedad relativa con una precisión de 0,1 grados y 0,5 % respectivamente.
2. Por otro lado se ha realizado una calibración de la ganancia frente al voltaje operacional obteniendo su relación de dependencia. Para obtener este voltaje operacional se ha utilizado un electrómetro de la marca KEITHLEY, en concreto el modelo 6517B, el cual presenta una resolución inferior al mV, más que suficiente para considerar este totalmente constante ya que se necesitan mayores modificaciones para que estas sean apreciables en la ganancia.
3. Finalmente, a partir de estas dos dependencias determinadas, se ha obtenido la ecuación de dependencia entre voltaje operacional y temperatura que nos determine una ganancia constante y se ha realizado un test de comprobación para esta relación.

El objetivo final de este estudio será mantener la ganancia del fotomultiplicador de silicio constante ante variaciones involuntarias de la temperatura a partir de variaciones voluntarias con el voltaje operacional. Esta es una corrección fundamental para el objetivo final del detector ya que de lo contrario (no) obtendríamos alertas de fugas de tritio cuando estas no (si) han ocurrido, cuando, en realidad, lo único que ha ocurrido ha sido una modificación de temperatura.

3.1. Equipo y montaje experimental

Para llevar a cabo esta caracterización de los SiPM se ha necesitado de cierta instrumentación la cual se especifica a continuación:

1. En primer lugar se necesitaba una **cámara de control de temperatura**.

Dado que la cámara existente en el laboratorio del IFIC no estaba configurada tuvo que utilizarse la cámara que se encontraba en el IFIMED. Esta cámara (marca DYCOMETAL, modelo CCM 81) se ve reflejada en la figura nueve izquierda.

Este sistema dispone de un panel de control con el que poder especificar la temperatura y humedad a la que queremos trabajar en el interior de la cámara. Sin embargo, para asegurar el correcto funcionamiento de la cámara debíamos trabajar siempre en la zona 1 de acuerdo al diagrama de fases existente en la ficha técnica de la cámara, mostrado en la figura nueve derecha. Posee un interior metálico que nos permite una rápida estabilidad ante posibles cambios de las condiciones en su interior y, además, actúa a modo de jaula de Faraday.

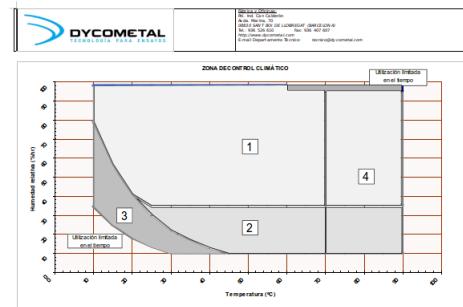


Figura 9.-Sistema de control de temperatura y diagrama de fases

Su incertidumbre se encontraba en 0.1 grados para la temperatura y 0.5 % para la humedad relativa. Estas incertidumbres se determinaron observando la oscilación máxima en la pantalla del panel de ambos parámetros tras llegar a la estabilidad en el interior de la cámara.

En el interior de esta cámara se encontraba nuestra fuente que proporcionaba la señal de entrada del sistema que pretendíamos medir con el SiPM, el propio SiPM, la tarjeta de conversión intensidad-voltaje y cableado que hacía posible la interacción con estos dispositivos. Además hay que tener en cuenta que esta cámara no actuaba como caja negra, por lo que para conseguir reducir la posible entrada de luz del exterior se taparon todas las

posibles fisuras del sistema con cinta metálica y, ademas, se cubrió el experimento con una tela negra especial. Con todo esto conseguiamos reducir el background del sistema hasta un nivel adecuado.

2. En segundo lugar se necesitabamos instrumentos nos permitiesen alimentar tanto el SiPM como la tarjeta de conversión intensidad-voltaje. Se utilizo un **electrometro** (marca KEITHLEY, modelo 6517B) para alimentar el SiPM y un **generador de tensión** (marca ISO-TECH, modelo IPS-4303) para alimentar la tarjeta de conversión.

Se utilizo el electrómetro para el SiPM ya que este dispone de rango de voltajes mayor, necesario para alimentar al SiPM. Por el contrario, el ISO-TECH solo dispone de una tensión máxima de 30V insuficiente para alimentar al SiPM pero suficiente para alimentar la tarjeta. Poseen una resolución inferior inferior al milivoltio e inferior a 0.1 voltios respectivamente, suficiente para considerarlos constantes ya que las ganancias que dependen de estos (ganancia del SiPM y de la tarjeta respectivamente) necesita variaciones superiores para modificarse de forma apreciable.

3. En tercer lugar se necesitaba una **fuente** que simulase la emisión de los fotones de la fibra centelleadora.

Se utilizo un **diodo LED** (de la empresa Roithner Laser technik) que emitía fotones con una longitud de onda de 435 nm, correspondiente al azul. Este es la longitud de onda que necesitabamos en nuestro experimento para calibrar el SiPM ya que corresponde a la longitud de onda a la cual el espectro de emisión de las fibras centelleadoras BCF-12 tiene su máximo.

4. En cuarto lugar, para alimentar este diodo LED, se necesito un **generador de pulsos** (marca Agilent, modelo 33250A). Este generador de señales nos permite especificar la forma del pulso que pretendemos proporcionar y sus características. Este tenía que ser capaz de formar un pulso suficientemente estrecho para que el SiPM detectase unos pocos fotones.

En concreto alimentaremos el diodo LED con un pulso cuadrado. Los parámetros que nos permite especificar el generador de señales para un pulso de esta forma son frecuencia (o periodo), high level (o amplitud), low level, offset, anchura del pulso y tiempo de decaimiento. Para nuestro estudio los valores de estos parámetros que nos daban un mejor resultado desde el punto de vista experimental fueron una frecuencia de 20 Hz, high level de 2.275 V, low level de 1 V, offset de $1.638 V_{dc}$, anchura del pulso de 12 ns y tiempo de decaimiento de 5 ns.

Este generador de señal nos proporciona una segunda señal denominada señal de sincronización la cual podemos utilizar como trigger para determinar el instante de tiempo en el que se activa la señal.

5. En quinto lugar utilizamos un **SiPM** para detectar los fotones emitidos por el LED. En concreto se utilizo el modelo S13360-1375CS de hamamatsu, que es un fotomultiplicador cerámico de silicio que presenta una ganancia teórica de $G = 4 \cdot 10^6$ y una eficiencia de fotodetección teórica del 50 % a 25 grados y $V_{ov} = V_{op} - V_{bd} = 3V$. Este tiene un rango espectral de [270-900] nm.

Esta compuesto por un total de 285 pixels de $75 \mu\text{m}$ cada uno dando lugar a una superficie total activa de $1.3 \times 1.3 \text{ mm}^2$ frente a su superficie total que es de $6 \times 5 \text{ mm}^2$. Puede verse reflejado en la figura diez izquierda.

6. Hay que tener en cuenta que el SiPM nos proporciona un pulso de intensidad a la salida y necesitamos convertir este en un pulso de voltaje para, de esta forma, poder introducirla al osciloscopio para realizar el posterior análisis. Para ello emplearemos en sexto lugar una **tarjeta conversora** de intensidad en voltaje que puede verse reflejada en la figura diez derecha.

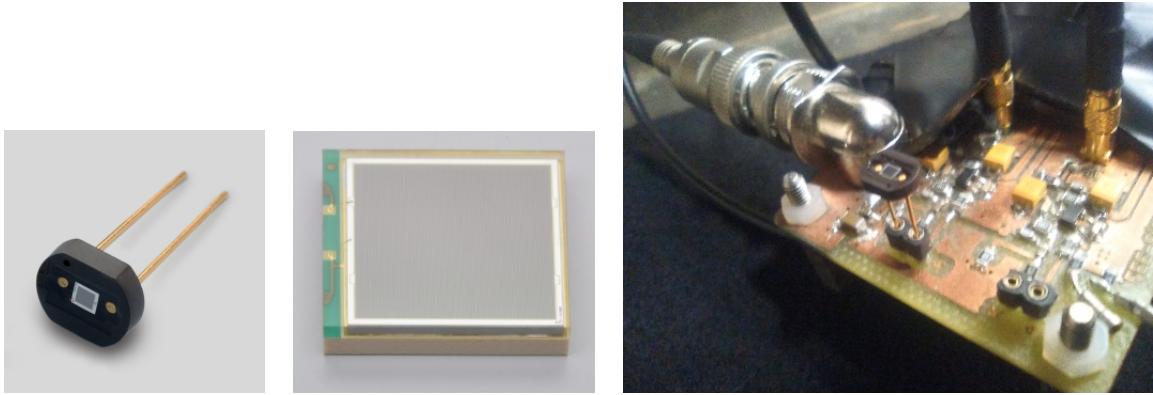


Figura 10.-SiPMs y tarjeta de conversora intensidad-voltaje

7. Finalmente vimos que, únicamente alimentando la tarjeta, antes de alimentar el SiPM y la led, obteníamos una perturbación externa a nuestro experimento. Esta se presenta en la figura once.



Figura 11.- Ruido electrónico

Se intentó caracterizar esta señal de perturbación ajena a nuestro experimento y, a priori, de origen desconocido. Tenía una amplitud máxima de 4 mV y una frecuencia bastante irregular entorno al MHz. Finalmente se vio que era debido por una parte a la emisión producida por las antenas de radiotelevisión valenciana y, por otra parte, de los distintos instrumentos electrónicos conectados a la red eléctrica del IFIC, ya que esta posee una toma a tierra bastante irregular.

Con la presencia de este ruido no podíamos realizar medidas ya que introducía una componente de ruido tal que estropeaba por completo el resultado de la medida. Con el fin de solucionar este problema se dispuso de un **filtro pasa banda** (marca..., modelo...) para eliminar este ruido.

8. Finalmente, como se ha mencionado anteriormente, necesitamos una **manta negra** especial que apantallase la entrada de fotones del exterior, ya que el sistema de control de temperatura no actuaba como caja negra.

Una alternativa podría haber sido introducir una caja negra en el interior del sistema de control de temperatura y introducir el diodo Led, el SiPM y la tarjeta en su interior. Sin embargo de esta forma no conseguimos un control de la temperatura y humedad en su interior.

3.2. Calibración tarjeta

La tarjeta empleada en el sistema, que puede verse en la figura diez, es una tarjeta reciclada un un proyecto anterior. La necesidad de esta, como se ha comentado anteriormente, reside en que la señal de salida de un SiPM es una señal de intensidad y el osciloscopio únicamente puede trabajar con señales de voltaje. Por tanto, para poder analizar esta señal es necesario utilizar una tarjeta conversora de intensidad en voltaje. Esta consiste de dos entradas donde podemos conectar dos SiPM distintos. Cada una de estas señales presenta un circuito similar al de la siguiente imágen:

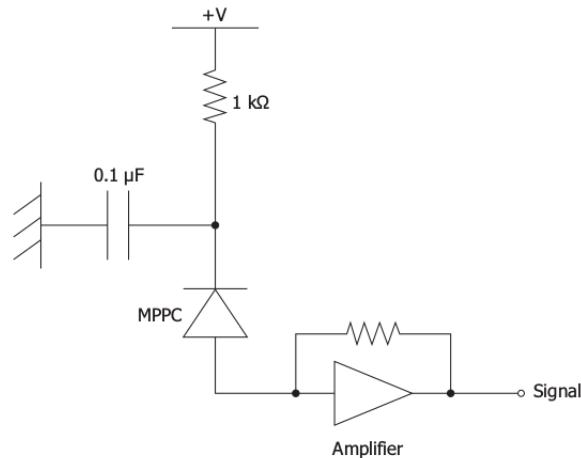


Figura 12.- Circuito de una tarjeta tipo

Sabemos que utiliza un amplificador operacional... que nos ofrece una ganancia teórica de... Para verificación de la misma se realizo un proceso de calibración. Para ello se introdujo una señal de.... similar a la señal emitida por un SiPM.

3.3. Análisis de datos

En resumen, en nuestra prueba de calibración de los SiPM tenemos una caja que actuará como jaula de faraday, con temperatura y humedad controlada y apantallada en lo posible de la luz del exterior.

En su interior tendremos un diodo LED que emite fotones a $\lambda = 435$ nm, un SiPM, el cual emitirá un pulso de intensidad cada vez que detecte uno o más de estos fotones con cada

uno de sus pixels y una tarjeta que convertirá este pulso de intensidad en un pulso de voltaje. Finalmente llevamos este pulso de voltaje a un osciloscopio (marca TELEDYNE LECROY, modelo WwaveRunner 625Zi) para poder ser analizado.

Una vez en el osciloscopio, la señal que recibíamos cuando se encendía el diodo LED será similar a la de la señal superior de la figura trece (amarilla), el la cual se activó el modo persistencia del osciloscopio con el objetivo de comparar señales de distintas alturas. Estas señales corresponden a distinto número de pixels activados en cada instante de tiempo ya que, como hemos dicho anteriormente, la señal de salida del sistema es la suma de las señales de cada pixel que se ha activado. Esta se encuentra superpuesta a la señal de sincronización del generador de señales (verde) que nos muestra cuando se ha encendido el diodo LED y que, por tanto, actúa como trigger.

El objetivo ahora es calcular la ganancia del sistema. Dado que únicamente existen dos ganancias en el sistema (SiPM y tarjeta) y hemos medido la ganancia de la tarjeta en la sección anterior, determinando la ganancia total podremos determinar la ganancia del SiPM.

$$G_{tot} = G_{SiPM} \cdot G_{card} \longrightarrow G_{SiPM} = \frac{G_{tot}}{G_{card}} \quad (6)$$

Para medir la ganancia total simplemente realizamos una integral del área de cada uno de los pulsos de salida del sistema y conservamos el resultado en un histograma. De esta forma lo que estamos consiguiendo es un histograma de las cargas de los pulsos. La ventana temporal sobre la que se integra es aproximadamente una división, que equivale a 500 ns. Esta se ajusta con bastante precisión al pulso, algo muy importante para evitar la introducción de background.

Dado que idealmente el pulso de cada pixel es igual, el histograma que estamos obteniendo deberían ser deltas de dirac equiespaciadas. Sin embargo hay que tener en cuenta que la cascada que produce cada uno de estos fotones detectados en cada pixel está sometido a fluctuaciones estadísticas. Además los propios instrumentos de medidas empleados tienen una incertidumbre inherente. Hay que tener en cuenta que también tenemos distintas fuentes de background, como dark counts (ruido térmico), fotones de luz del exterior, etc.

Como resultado de todo esto, lo que obtendremos serán un conjunto de gaussianas equiespaciadas. En la figura trece inferior puede verse el resultado de una toma de datos de 25000 eventos a 25 grados, 60 % de humedad y $V_{ov} = 3V$

Donde cada uno de estos picos corresponde a la carga de sucesivos número de pixels activados (uno, dos, etc.). El primer pico no debe tenerse en cuenta en el análisis ya que este corresponde al pedestal (cero pixels activados). Su origen es debido a la existencia de las cuentas ocultas.

Ahora únicamente desarrollamos una macro en ROOT (programa de análisis de datos desarrollado por el CERN) que, utilizando la librería TSpectrum (librería especialmente diseñada para el análisis de histograma) nos permita obtener la ganancia del sistema. Su forma de proceder es la siguiente:



Figura 13.- Análisis

1. Primero la macro lee el fichero de datos y lo guarda en una variable de tipo histograma. La macro se detiene cuando no encuentra más valores para leer.
2. A continuación, a partir de una función de la librería TSpectrum, busca en este histograma y devuelve el número de gaussianas que ha encontrado y su posición.
3. Ahora ajusta todos los datos del histograma a una recta y solo se queda con las gaussianas, cuya norma sobrepasa en altura a esta recta. El objetivo de este paso es que, en casos muy concretos (temperatura alta o luz del laboratorio encendida) tenemos mucho ruido y, aparece un fondo el cual, el programa ajusta a una gaussiana y, por extensión, calcula la ganancia de manera incorrecta. Un ejemplo de esto se muestra en la figura catorce.

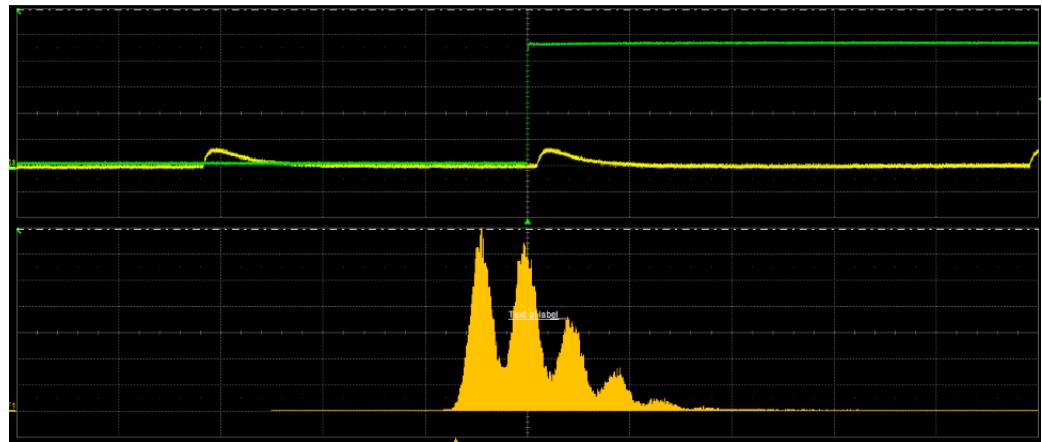


Figura 14.- Espectro con mucho fondo

4. Seguidamente, ajustamos el espectro a una recta mas una suma de n gaussianas, donde n es el número de gaussianas que superan la recta (calculado en el paso anterior). La necesidad de utilizar una recta es debido a que siempre vamos a tener dark counts y otro tipo de background que se verán reflejados en una linea base en el histograma como puede verse en la figura trece. Podemos apreciar en la figura quince que el ajuste (linea roja) es relativamente bueno. Para poder ver hasta que punto nuestro ajuste es aceptable aplicamos el test χ^2 , donde se ha obtenido un resultado de $\frac{\chi^2}{ndf} = \frac{1276}{223} \approx 5,72$. Vemos que efectivamente

el ajuste se realizó con gran precisión.

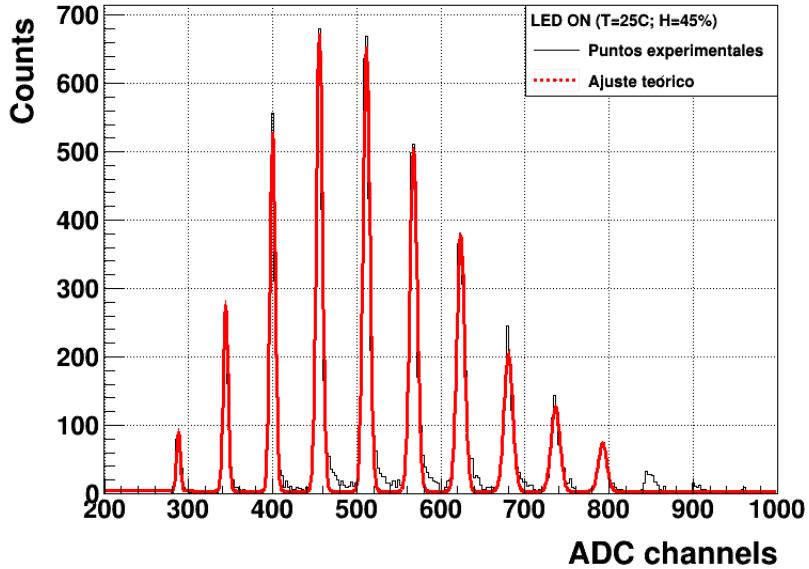


Figura 15.- Ajuste de la macro de ROOT sobre un espectro

5. Dado que se ha observado que, aun con el tercer paso, existen situaciones límites en que el background sigue superando esta recta, se ha incluido un paso en la macro en la cual se acepta por teclado uno a uno los picos que serán utilizados en el análisis. Además la macro calcula la resolución de cada gaussiana y la resolución total, obtenida a partir de la suma cuadrática de la resolución de cada gaussiana. Los valores habitualmente encontrados en los análisis se encuentran sobre 1.5 % y 5 % respectivamente, valores más que aceptables.
6. Finalmente la macro los ordena según su posición en el espectro y calcula la ganancia por dos caminos:
 - a) Por un lado se ha calculado la distancia promedio entre sucesivas gaussianas del espectro.
$$Q = GN_\gamma + Q_0 \longrightarrow \Delta Q = Q_{N_\gamma} - Q_{N_\gamma-1} = GN_\gamma + Q_0 - G(N_\gamma - 1) - Q_0 = G \quad (7)$$

Podemos observar que este cálculo corresponde a la ganancia. Hay que tener en cuenta que se han empleados factores de conversión para convertir la posición del pico (initialmente en unidades de tensión, V) en unidades de carga (coulomb). En concreto se ha utilizado el factor $\frac{1}{eR}$, donde R es la resistencia del osciloscopio, 50 Ω y e es la carga del electrón.

 - b) Por otro lado se ha ajustado a una recta las posiciones horizontales de estas gaussianas en el espectro frente a el número de pixels. Esto nos da la siguiente ecuación:

$$\text{Centro_pico}(V) = GeRN_\gamma + k_0 \quad (8)$$

Donde R y e significan lo mismo. Vemos por tanto que apartir del valor de la pendiente podemos obtener el valor de la ganancia. La figura dieciseis muestra un ejemplo de ajuste entre posiciones de gaussianas y número de pixels para el caso de 25 grados,

humedad de 45 % y $V_{ov} = 3V$. Podemos observar que existe un acuerdo excelente, algo que ocurría prácticamente en la totalidad de los casos. Este gráfico presenta barras de error pero no son apreciables a esta escala.

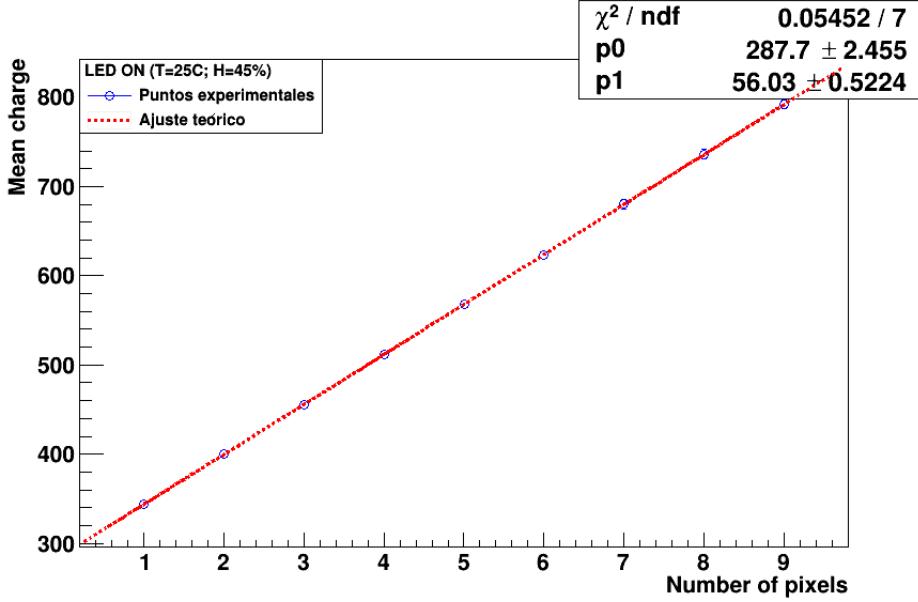


Figura 16.- Ajuste carga de las señales del SiPM frente a n° de pixels encendidos

Para este caso concreto las ganancias obtenidas por los dos caminos anteriores son respectivamente:

$$G_1 = 6,38938 \cdot 10^8 \pm 6,38938 \cdot 10^8 \quad (9)$$

$$G_2 = 7,18235 \cdot 10^8 \pm 6,88392 \cdot 10^6 \quad (10)$$

Por extensión, las ganancias del SiPM calculadas por cada camino son (aproximadamente)

$$G_1 = 4,25958 \cdot 10^5 \pm 4,259 \cdot 10^4 \quad (11)$$

$$G_2 = 4,78823 \cdot 10^5 \pm 4,5893 \cdot 10^4 \quad (12)$$

donde los errores se han obtenido por propagación. Hay que tener en cuenta que el primer método siempre posee errores mayores. Estas se encuentran un orden de magnitud por debajo de la ganancia teórica, con un error relativo de... Esto es debido a...

Dado que, en la práctica, las gaussianas no están perfectamente equiespaciadas debido a errores e incertidumbres consideraremos como más fiable el segundo método ya que se trata de un método más formal.

Nuevamente se ha aplicado el test χ^2 con el objetivo de comprobar la calidad de nuestro ajuste. Se ha obtenido un resultado de $\frac{\chi^2}{\text{ndf}} = \frac{0,05452}{7} \approx 0,008$. Podemos apreciar que ahora hemos obtenido un valor bastante por debajo de la unidad. Este, probablemente, es debido a que se han sobreestimado los errores de las medidas (calculados a partir de las sigmas de las gaussianas del ajuste de la figura 15).

3.4. Calibración en temperatura

Ahora que ya sabemos calcular la ganancia del SiPM a partir de una toma de datos procedemos a determinar la dependencia que presenta el SiPM con la temperatura. En concreto nos interesa determinar el comportamiento de su ganancia cuando varía la temperatura. Para ello realizaremos una serie de medidas a distintas temperaturas y, para cada una de ellas, calcularemos la ganancia a partir del método expuesto en el punto anterior.

Nos centraremos en el rango de temperatura entre 15 grados, que es el mínimo que nos permitía llegar al sistema de control de temperatura y 41 grados, que, suponemos, será el límite al que llegará nuestro futuro detector en la práctica. Es decir, este rango de temperaturas será equivalente a las temperaturas a las que estará sometido nuestro detector debido a las condiciones climáticas del lugar. Realizaremos pasos de 2 grados entre cada medida realizando un total de 14 medidas. Únicamente realizaremos medidas de 15000 eventos ya que son más que suficiente para obtener un espectro suficientemente suave.

Para automatizar este proceso procedemos a desarrollar una macro en ROOT que realice este ajuste. Esta macro se divide en dos partes:

- Por un lado posee un bucle en el que, en cada paso, abre el fichero correspondiente a una temperatura, empezando por la mínima (15 grados) realiza todo el estudio anterior y guarda ganancia y temperatura con sus errores en 4 vectores respectivamente. En cada paso aumenta 2 grados la temperatura y pasa a leer el siguiente fichero.

Hay que tener en cuenta que, como se dijo anteriormente, el sistema de control de temperatura debe de estar en la zona uno del diagrama de fases existente en la ficha técnica. Esto implica que, para medidas inferiores a 27 grados necesitamos aumentar la humedad en un 5 % a cada medida (humedad del 45 % para 25 grados, 50 % para 23 grados, etc.). Esto no tiene mayor importancia ya que se vio que la ganancia del SiPM no se ve afectada de forma apreciable ante modificaciones de la humedad de este tamaño.

La incertidumbre en la temperatura viene dada por la oscilación en el valor de la temperatura observada directamente en el panel de control del sistema. La oscilación observada fue en todo momento de 0.1 grados, una incertidumbre totalmente inapreciable tanto a nivel visual en la gráfica como a nivel de variación de la ganancia.

- Por otro lado, partiendo de estos 4 vectores de dimensión 14 en nuestro caso (igual al número de ficheros que ha leído) que contienen ganancia, temperatura y sus errores de forma ordenada la macro realiza un ajuste lineal. El ajuste obtenido se presenta en la figura diecisiete.

Podemos observar la existencia de un comportamiento lineal casi perfecto en un rango de temperatura de 26 grados. Esta es una propiedad que caracteriza al SiPM, una muy buena linealidad en su comportamiento frente a modificaciones en varias magnitudes. Nuevamente comprobamos la calidad del ajuste a partir del test χ^2 obteniendo un valor de $\frac{\chi^2}{ndf} = \frac{2.937}{12} \approx 0.245$, el cual se trata de un valor relativamente bueno.

En la gráfica encontramos la existencia de un decrecimiento del valor de la ganancia del SiPM a medida que aumenta la temperatura. Esto es debido a que la zona de desertiza-



Figura 17.- Ganancia frente a temperatura

ción, que se crea en el SiPM al aplicar un voltaje en inversa y que actúa como zona útil de detección de radiación, depende de la temperatura. En concreto, al aumentar la temperatura estamos incrementando la excitación térmica de los portadores de carga pudiendo, de esta forma, invadir esta zona de desertización, reduciéndola su tamaño y, por extensión, la ganancia del SiPM.

La ecuación obtenida en este ajuste $G = aT + b$ toma los siguientes valores:

$$a = -1,40308 \cdot 10^7 \pm 2,71545 \cdot 10^5 \frac{1}{C^\circ} \quad (13)$$

$$b = 1,05001 \cdot 10^9 \pm 7,69711 \cdot 10^6 \frac{1}{C^\circ} \quad (14)$$

Esta es un resultado importante, no por el valor numérico, sino porque será la base que utilizaremos para conseguir la compensación de la ganancia.

3.5. Calibración en voltaje de operación

De forma totalmente análoga procedemos a determinar el comportamiento del SiPM, en concreto de su ganancia, frente al voltaje operacional. Para ello realizaremos una serie de medidas a distintos voltajes operacionales y, para cada una de ellos, calcularemos la ganancia a partir del método expuesto anteriormente.

Nos centraremos en el rango de voltajes entre el voltaje break down, $V_{BD} = 50,97$ V, que es el mínimo voltaje en valor absoluto a partir del cual nos encontramos en modo Geiger y $V_{BD} + 5V$, que, suponemos, será un intervalo suficiente para compensar la ganancia acorde con el intervalo de temperaturas que hemos medido. Realizaremos pasos de 0.2 V entre cada medida realizando un total de 25 medidas. De nuevo únicamente realizaremos medidas de 15000 eventos ya que son más que suficiente para obtener un espectro suficientemente suave.

Para automatizar este proceso procedemos a desarrollar una macro en ROOT que realice este ajuste. Análogamente esta macro poseerá dos partes:

- Por un lado posee un bucle en el que, en cada paso, abre el fichero correspondiente a un voltaje operacional, empezando por el mínimo ($V_{op} = V_{BD}$) realiza todo el estudio anterior y guarda ganancia y voltaje operacional con sus errores en 4 vectores respectivamente. En cada paso aumenta 0.2 V el voltaje operacional y pasa a leer el siguiente fichero.

En este estudio, a diferencia del estudio de la temperatura, la incertidumbre en el voltaje viene dada por la precisión del electrómetro (milivoltio) ya que el valor era perfectamente estable. Esta, de nuevo es una incertidumbre totalmente inapreciable tanto a nivel visual en la gráfica como a nivel de variación de la ganancia.

Hay que tener en cuenta que el voltaje operacional posee un error relativo, definido como $\frac{\sigma_x}{x}$ muy inferior al de la temperatura, siendo estos aproximadamente $1 \cdot 10^{-5}$ y $8 \cdot 10^{-3}$ respectivamente. Es decir, las medidas que tomemos en este estudio serán más precisas.

- Por otro lado, partiendo de estos 4 vectores de dimensión 25 en nuestro caso (igual al número de ficheros que ha leído) que contienen ganancia, temperatura y sus errores de forma ordenada realiza un ajuste lineal. El ajuste obtenido se presenta en la figura dieciocho.

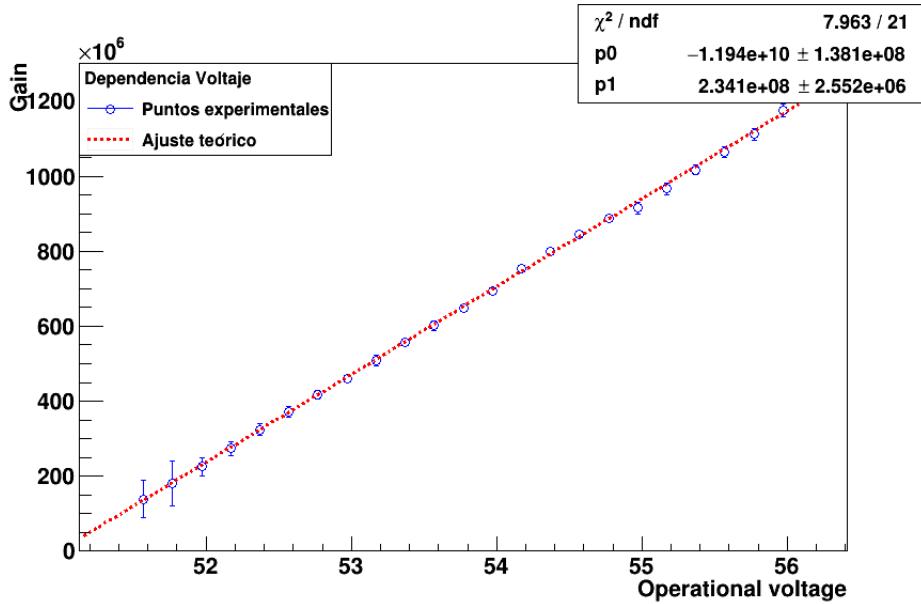


Figura 18.- Ganancia frente a voltaje operacional

Podemos apreciar de nuevo la existencia de un comportamiento lineal casi perfecto en un rango de voltaje de 5 voltios. Vemos de nuevo reflejada la propiedad de buena linealidad que caracteriza a los SiPM. En la gráfica podemos notar la existencia de un mayor error en las medidas de voltajes mas bajos (en valor absoluto). Esto es debido a que nos estamos acercando al voltaje break down donde el silicio entra en modo Geiger y el valor de la ganancia empieza a ser distinto de cero. Podemos hachacar este mayor error a que a estos voltajes cercanos a la frontera de cambio de comportamiento, el SiPM todavía no funciona de forma adecuada debido a efectos más sutiles. Este necesita estar totalmente dentro del modo Geiger para funcionar perfectamente. Hay que tener en cuenta además que solo se

llego hasta el voltaje $V_{op} = 51,57$ V debido a que, cuando estamos a valores muy cercanos al voltaje de break down la ganancia sufre un decaimiento exponencial, siendo imposible realizar su medida.

De nuevo comprobamos la calidad del ajuste a partir del test χ^2 obteniendo un valor de $\frac{\chi^2}{ndf} = \frac{7,963}{21} \approx 0,379$, el cual se trata de un valor relativamente bueno.

Podemos observar que, al contrario de lo que ocurría con la temperatura, el valor de la ganancia del SiPM aumenta a medida que aumenta el voltaje operacional. Esto es debido a que a medida que aumentamos el voltaje operacional aumenta la diferencia de potencial en la zona de desertización. De esta forma, por un lado, aumentando la zona de desertización, por lo que los pares electrón–hueco dispondrán de mayor espacio para generar una mayor replicación y, por otro lado, estamos aplicando una mayor tensión sobre los pares electrón–hueco generados al detectar radiación y, por extensión, estos se verán acelerados más rápidamente. Debido a ello dispondrán de una mayor energía para producir un mayor número de pares electrón–hueco. En resumen ambos procesos contribuyen a aumentar la ganancia del SiPM.

La ecuación obtenida en este ajuste $G = cV_{op} + d$ toma los siguientes valores:

$$c = 2,34123 \cdot 10^8 \pm 2,55246 \cdot 10^6 \text{ V}^{-1} \quad (15)$$

$$d = -1,19368 \cdot 10^{10} \pm 1,38112 \cdot 10^8 \text{ V}^{-1} \quad (16)$$

Remarquemos de nuevo la importancia de este resultado, no por el resultado numérico, sino porque es la parte que nos faltaba para poder calcular la compensación de la ganancia.

A demás, a modo de comprobación, podemos obtener el Voltage break down a partir de esta expresión, que se corresponde al voltaje al cual la ganancia es cero (voltage a partir del cual estamos en modo geiger y la ganancia empieza a ser no nula). El voltage calculado es:

$$G = 0 = c \cdot V_{BD} + d \longrightarrow V_{BD} = -\frac{d}{c} = 50,9852 \text{ V} \quad (17)$$

Vemos que este se acerca de forma extraordinaria al voltaje teórico especificado por hamamatsu, 50,97 V.

3.6. Estabilización de la ganancia

Finalmente, con toda esta información, procedemos a desarrollar un protocolo de compensación de la ganancia. Nuestro objetivo es que, ante una modificación de la ganancia debido a una variación involuntaria de la temperatura (por ejemplo debido a variación climatológicas) aplicar de manera voluntaria una variación adecuada en el voltaje operacional que devuelva a la ganancia a su valor inicial.

Como ya se ha explicado la importancia de este estudio de compensación es poder utilizar este sistema a modo de alarma. Dado que este estará expuesto a condiciones climáticas inevitablemente sufrira variaciones de temperatura. Si queremos el detector final sea capaz de avisar en caso de obtener una señal demasiado grande y que esta señal se corresponda a una fuga

de tritio necesitamos que el sistema posea una ganancia constante.

Las expresiones que se han obtenido con las dos calibraciones anteriores son:

$$G(V_{op}) = cV_{op} + d; \quad G(T) = aT + b \quad (18)$$

Esto implica que una variación de la ganancia en cada una de estas magnitudes viene reflejado como:

$$\partial G(V_{op}) = c\partial V_{op}; \quad \partial G(T) = a\partial T \quad (19)$$

Finalmente, la variación total de la ganancia ante una variación de ambas magnitudes viene dado por:

$$\partial G_{tot} = \partial G(V_{op}) + \partial G(T) \quad (20)$$

Por tanto, si queremos que el valor de la ganancia se conserve ante una variación de ambas magnitudes tendremos que conseguir que:

$$\partial G_{tot} = 0 = \partial G(V_{op}) + \partial G(T) \longrightarrow \partial G(V_{op}) = -\partial G(T) \quad (21)$$

En otras palabras, lo que tenemos que conseguir es producir la misma variación a la ganancia con la modificación del voltaje que la que se ha producido al variar la temperatura. Para determinar esta variación únicamente sustituimos las expresiones anteriormente obtenidas para cada diferencial de la ganancia:

$$\partial G(V_{op}) = -\partial G(T) \longrightarrow c\partial V_{op} = -a\partial T \longrightarrow \partial V_{op} = -\frac{a}{c}\partial T \quad (22)$$

Finalmente consideramos que a y c las consideramos constantes en voltaje y temperatura, ya que, estas varian muy poco por lo que, en primera aproximación, es aceptable. Con ello integramos a cada lado y obtenemos:

$$\int_{V_i}^{V_f} \partial V_{op} = -\frac{a}{c} \int_{T_i}^{T_f} \partial T = -\frac{a}{c} \Delta T \longrightarrow \Delta V_{op} = e \Delta T \quad (23)$$

Donde se ha introducido un nuevo parámetro: $e = -\frac{a}{c}$ cuyo valor es (13) (15):

$$c = 2,34123 \cdot 10^8 \pm 2,55246 \cdot 10^6 \quad V^{-1} \quad (24)$$

$$a = -1,40308 \cdot 10^7 \pm 2,71545 \cdot 10^5 \quad \frac{1}{C^\circ} \quad (25)$$

$$e = -\frac{a}{c} = 0,059929 \pm 0,001331 \quad \frac{V}{C^\circ} \quad (26)$$

Donde el error de e se ha obtenido por propagación de errores.

Finalmente, procedemos a analizar el resultado. Hemos obtenido dos dependencias de la ganancia lineales y opuestas. Por un lado la ganancia disminuye con la temperatura y por otro lado la ganancia aumenta con el voltaje operacional. Por tanto, si queremos conseguir modificaciones opuestas de la ganancia debemos desplazar voltaje y temperatura en la misma dirección (aumentar o disminuir ambas magnitudes simultáneamente). Si analizamos el resultado vemos que, efectivamente tenemos una dependencia positiva.

También apreciamos que obtenemos un valor dos ordenes de magnitud inferior a la unidad. Esto es debido a que la dependencia de la ganancia con el voltaje es mucho más marcada que la variación con la temperatura (mayor pendiente en valor absoluto para el ajuste del voltaje que para el ajuste de la temperatura). Este es el motivo por el que se tomo pasos inferiores para el voltaje que para la temperatura.

En resumen la ecuación que nos dicta cual es la variación que debemos aplicar al voltaje para mantener un valor de ganancia constante (compensar la ganancia) ante una variación de la temperatura conocida (que puede ser medida con un sensor de temperatura) es:

$$\Delta V_{op} = 0,059929 \cdot \Delta T \quad (27)$$

Finalmente tomamos como referencia el caso anteriormente mostrado en la sección de análisis de datos correspondiente a temperatura 25 grados, Humedad del 45 % y voltaje operacional de 53.97 V = $V_{BD} + 3$ V, cuya ganancia habíamos visto que era $7,18235 \cdot 10^8$ y procedemos a realizar una verificación midiendo los casos de 21, 23, 25, 27 y 29 grados. En cada uno de ellos se corregirá el voltaje de alimentación de forma adecuada para mantener el mismo valor de la ganancia. El valor de la ganancia para cada caso se ve reflejado en la figura diecinueve.

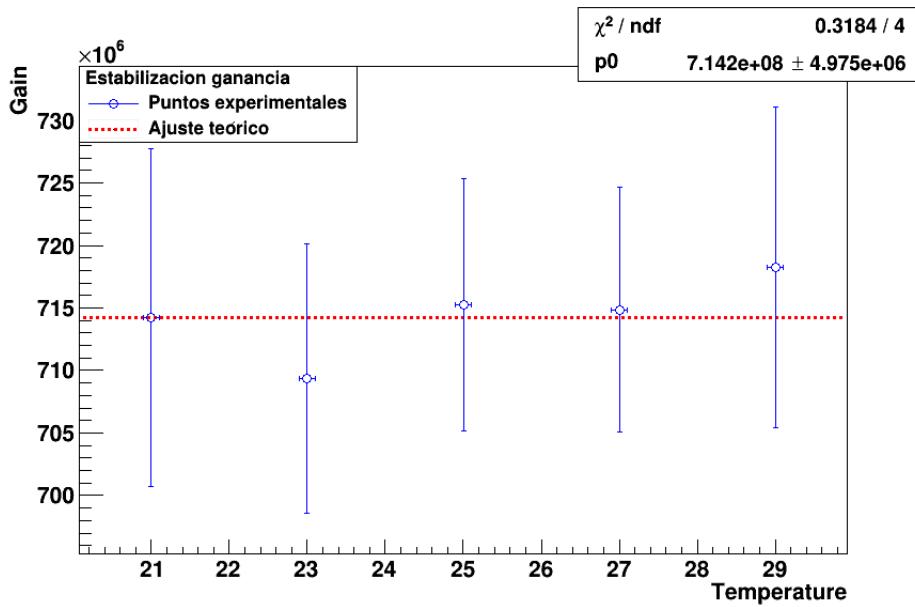


Figura 19.- Verificación del método de compensación

Donde la raya roja corresponde al ajuste a una constante. Su valor, correspondiente al valor de la ganancia es $G = 7,14203 \cdot 10^8 \pm 4,97472 \cdot 10^6$. Comprobamos una última vez la calidad del ajuste a partir del test χ^2 obteniendo un valor de $\frac{\chi^2}{ndf} = \frac{0,318}{4} \approx 0,0795$, valor ligeramente bajo. Este, probablemente, puede ser debido a una sobreestimación de los errores (algo que ya puede apreciarse en la imagen).

Podemos ver que el método funciona de manera muy eficaz ya que la ganancia presenta variaciones muy pequeñas de aproximadamente $\Delta G = 5 \cdot 10^6$, que corresponde a una variación relativa del $2,801 \cdot 10^{-3}$. Vemos que es un método realmente eficaz.

La máxima variación se observó a 23 grados. Esta es debido a que fue una medida

realizada muchas horas despues de tomarse las otras y existen factores externos que no podemos controlar y afectan al sistema. En este tiempo más largo transcurrido es más probable que hayan cambiado estos factores. Sin embargo puede observarse en todo momento que la variación de la ganancia es mínima verificando en gran medida la ecuación anteriormente obtenida.

4. Prototipos

Finalmente, con cada una de las partes convenientemente preparadas y calibradas, procedemos a realizar el estudio sobre una de las configuraciones que contempla el proyecto *Tritium*. Para ello, en primer lugar, se realizará una descripción del prototipo y de la puesta a punto del mismo. En segundo lugar, se presentarán los resultados obtenidos.

4.1. Configuración de la electrónica

En primer lugar se tuvo que diseñar y construir un prototipo que respondiese a una serie de exigencias impuestas por el experimento. Por un lado este debía de ser capaz de albergar de manera segura un bunch de 35 fibras centelleadoras, el cual se encontraría totalmente sumergido en una solución de agua tritiada estanca. Este prototipo debía de ser capaz de comunicar los extremos del bunch con contadores de fotones, los cuales deben estar aislados del agua tritiada, sin que existiese ningun tipo de fisura para asegurar que no existe peligro de fuga y, por tanto, de contaminación, nisiquiera por evaporación del agua. Por otro lado debía de sostener de forma segura el contador de fotones utilizado, en nuestro caso PMTs (marca... modelo...), para leer la señal recibida por estas fibras centelleadoras.

Con todas estas exigencias el material elegido para la construcción del prototipo fueron diversos elementos de fontanería de PVC. El motivo de este es su seguridad, ya que están especialmente diseñados para transportar y retener agua, su facilidad de manipulación ya que podemos realizar cortes con mucha rapidez, sencillez y eficacia además de existir muchas formas para diversos fines y, finalmente, su precio ya que se trata de un materia bastante económico.

En concreto se utilizó un tubo de PVC de 2 metros de longitud y un diámetro interior de 15 mm, en el cual se practicaron una serie de cortes dando lugar a un conjunto de secciones que conformarían los 2 prototipos. Para unir cada una de estas secciones y dar forma al prototipo se utilizaron codos, típicamente utilizados en fontanería de PVC, cuyas uniones serían finalmente selladas con silicona. Finalmente el prototipo quedaría sujeto de forma segura sobre una estructura de metacrilato y acero. El aspecto final del prototipo puede verse reflejado en la figura 20.

Este prototipo presenta un volumen en su interior (el cual será rellenado por la solución radiactiva) de 39 cm^3 , el cual se calculó y verificó con varios ensayos de llenado con agua destilada. También se verificó la permeabilidad del prototipo a partir de una estancia de estos ensayos de 2 días.

Podemos observar que se decidió realizar un prototipo con forma de U. Dado que el prototipo no se trasladará en ningun caso y, teniendo en cuenta que se verificó su permeabilidad, personalmente opino que esta es la forma más segura y que mejor se adapta a las exigencias del prototipo. Las dos oberturas superiores serán cerradas y selladas con tapones tipicamente utilizados en fontanería de PVC. Se eligieron tampones diferentes para cada extremo. Un primer tapón circular, acorde a la forma del tubo de PVC y un segundo tapón cuadrado, el cual nos facilitaría el proceso de llenado. Este segundo tapón dispone de dos orificios, uno de 8 mm por



Figura 20.- Prototipo

el que se realizará el proceso de llenado y otro de 1 mm por el que se purgará el aire durante el mismo proceso. Finalmente estos orificios se cerrarán con ayuda de dos tornillos de rosca envueltos en teflón. Estos tapones pueden verse reflejados en la imagen 20.

Finalmente ambos extremos tenían una agujero de... de diámetro. Por cada uno de estos pasaba un extremo del bunch de fibras centelleadoras. En cada uno se dispusieron dos arandelas, roscadas al aro que conformaba el extremo del bunch, según la imagen 5 (una arandela a cada extremo del tapon, parte interna y externa). De esta forma conseguíamos fijar perfectamente cada uno de los extremos del bunch al prototipo y comunicar el extremo de las fibras al exterior del prototipo para su correspondiente lectura con los contadores de fotones, PMTs en nuestro caso.

En todo momento se utilizó silicona para sellar cualquier posible fisura del prototipo.

También podemos observar que se ha decidido realizar el giro de 180°, correspondiente a la U, con ayuda de cuatro codos de 45° y no con dos codos de 90°. Esto es debido a que, con giros progresivos, el bunch de fibras centelleadoras estarán sometidos a una tensión inferior y, por extensión, ofrecerán una mejor propagación de la señal.

Finalmente se utilizaron dos piezas, usualmente utilizadas en fontanería de PVC para comunicar tuberías de igual o diferente diámetro para sostener los PMTs en el prototipo. Debido al hecho de haber utilizado dos tapones distintos ahora necesitaremos dos piezas diferentes. Estas pueden verse en la figura veinti uno.

La primera pieza (correspondiente a la pieza derecha de esta figura), más pequeña, simplemente encajaba al tapón circular por un extremo y, por el otro, con un diámetro interior más grande para que cupiese y fijase, se disponía del PMT.

Para la segunda pieza encontramos un problema y es que no hay tuberías cuadradas, por lo que no encontramos ningun tipo de pieza como esta que ajustase a este tapón (tapón cuadrado del prototipo). En su lugar simplemente utilizamos una pieza para que encajase a la

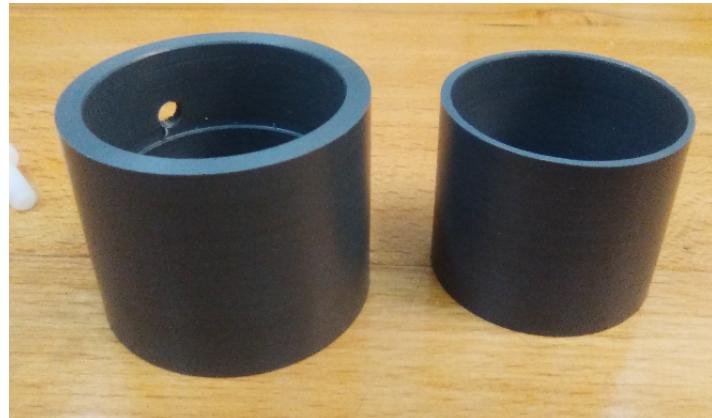


Figura 21.- Piezas de sujeción de los PMTs

arandela que sobresalía del prototipo (utilizada para fijar el bunch de fibras) y por el otro extremo que encajase al PMT. Para mayor sujeción se utilizó en esta pieza un tornillo que unía esta a la plataforma de metacrilato. La disposición de estos en el prototipo y el tornillo que ayuda a la sujeción pueden verse reflejados en las imágenes de la figura veinti dos.

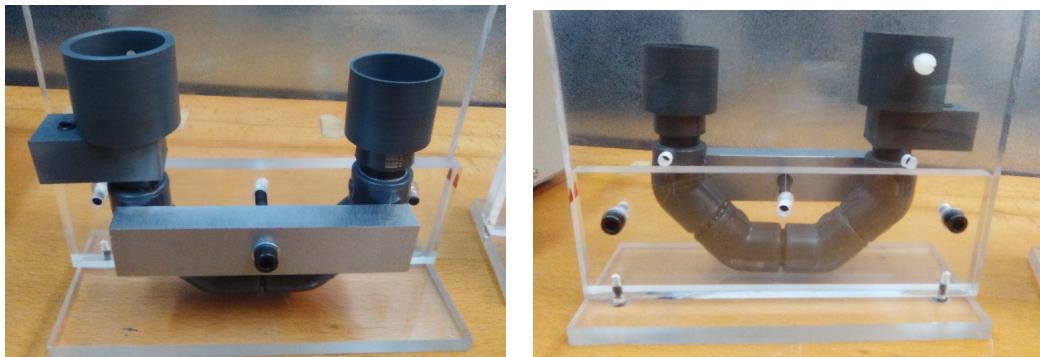


Figura 21.-Cara fibras

4.2. Procedimiento de llenado

Para realizar el llenado en primer lugar necesitamos preparar la solución de agua tritiada. Para ello disponemos de una fuente radiactiva de tritio, es decir, una solución de agua tritiada (HTO en H_2O) de $2,0169 \pm 0,0017$ g de peso y una actividad específica de $A = 26,8 \pm 0,6$ MBq/g con fecha de calibración del 16 de marzo de 2017. Esta fuente presenta una actividad tal que puede considerarse exenta.

Esta ha sido proporcionada por PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig and Berlin), Alemania. Presenta un número de serie 2005-1442, un número de referencia PTB-6.11-285/03.2017, una fecha de referencia de 1 de enero de 2017.

La solución que prepararemos para el experimento, denominada solución patrón, consiste en diluir la ampolla que contiene la solución anterior con 0.5L de agua hiperpura, la cual ha sido proporcionada por el LAREUX de Cáceres, Universidad de Extremadura. Esta disolución fué realizada por Teresa Cámara en el laboratorio de radiactividad ambiental, LARAM, de la

universidad de Valencia.

El agua hiperpura consiste...

Finalmente, con la solución patrón ya preparada, se realizó el proceso de llenado en la gammateca del IFIC, sala debidamente acondicionada para manipulación de fuentes radiactivas. Se prepararon un total de 50 cm³ de solución patrón.

El mecanismo seguido para el proceso de llenado se describe a continuación:

1. En primer lugar se dispuso de una bandeja de plástico recubierta con material absorbente en el interior de la cual se realizaría todo el proceso de llenado. El objetivo de esta fue evitar en la medida de lo posible una contaminación debido a un desbordamiento en el proceso de llenado.
2. En segundo lugar, con ayuda de una pipeta y un embudo de cristal, se procede a llenar una bureta. Para mayor seguridad se fijo la bureta con un soporte de laboratorio.
3. En tercer lugar, con la bureta ya llena del agua tritizada, se procede a introducir esta en el prototipo. Para ello se introduce la punta final de la bureta en el orificio de 8 mm del prototipo anteriormente descrito y, lentamente, se procede al llenado del mismo. El proceso terminará en el momento en que se hayan introducido 39 cm³ ya que, como se ha mencionado anteriormente, este es el límite del prototipo.
4. En cuarto lugar se procederá a cerrar los dos orificios del prototipo anteriormente mencionados. Además, el resto de la disolución sobrante se verterá en una botella suficientemente segura en la cual se conservará para un futuro uso. Esta disolución junto con el material empleado en el proceso de llenado se introducirá en una bolsa de plástico, la cual se introducirá en una caja de cartón, y todo ello será debidamente guardado en el LARAM.
5. En último lugar se trasladará el prototipo, debidamente rellenado y sellado, al laboratorio de reacciones nucleares del IFIC (025)

4.3. Configuración de la electrónica

Con todo el prototipo dispuesto para medir procedemos a configurar la electrónica para obtener una señal adecuada. El objetivo será obtener un espectro energético de experimento con ayuda de un analizador multicanal analógico, MCA.

Para ello necesitamos realizar una serie de transformaciones a la señal para que esta pueda ser analizada de manera adecuada por el MCA. El esquema electrónico utilizado se muestra en la figura veinti tres.

IMAGEEEEEEN

A continuación se explican los módulos y el camino seguido por la señal para este preparamiento:

1. En primer lugar sacaremos la señal de cada fotomultiplicador de la caja negra utilizada para apantallar la luz del exterior. Ello lo conseguimos con ayuda de cables BNC ya que la caja dispone de puertos BNC macho para sacar la señal.
2. Hay que tener en cuenta que los PMTs ofrecen señales analógicas y negativas. Por tanto, en segundo lugar necesitamos convertir estas señales en señales lógicas de estándar NIM para poder ser tratadas con tecnología NIM. Esto lo conseguimos con ayuda de un módulo discriminador
3. Además esta señal será muy débil ya que ya

4.4. Resultados

5. Simulaciones

6. Previsiones de futuro

Cabe mencionar que se utilizaron estos SiPM de forma provisional ya que son los que estaban disponibles en el laboratorio y son de tipo CS, es decir, disponían de dos terminaciones para una conexión rápida y no permanente. Sin embargo, la propuesta final de tritium sería utilizar fotomultiplicadores modelo S13360-6075PE, que presentan exactamente las mismas características que los anteriormente mencionados pero con un mayor tamaño, $(6 \times 6) \text{ mm}^2$ de la superficie total activa, y, por extensión, mayor número de pixels (6000). Este mayor número de pixels repercute en un rango espectral del SiPM distinto [320-900] nm. Además estos SiPM son de tipo PE, es decir, presentan terminaciones que tiene que ir soldadas a la placa por lo que, para su utilización, se necesita disponer de la placa final que se utilizará en el prototipo. Estos pueden apreciarse en la figura cinco central.

Hay que tener en cuenta que esta tarjeta únicamente nos servirá para las primeras pruebas del prototipo.

En futuras prueba sobre el prototipo se utilizará una tarjeta que se utilizó para el prototipo del proyecto NEXT, proyecto que requería unas condiciones muy similares al nuestro. Esta tarjeta permite conectar 4 SiPM y permite el tratamiento de forma óptima de estas cuatro señales a partir de multiplexadores y reles (que eligen una señal u otra sin que aparezca ruido inducido entre señales) o amplificadores operacionales que dan la opción de amplificar la señal en caso de ser necesario. Lo más importante de esta tarjeta es que esta preparada para realizar un proceso de automatización, es decir, calibra los SiPM de forma automática y nos permite interaccionar con todas las partes importantes de nuestro experimento, tales como fuente de tensión de alimentación de distintos componentes del sistema, oscilloscopios, etc, a partir de un programa llamado LabView.

Hay que tener en cuenta que estas tarjetas de conversión solo valdrán para el prototipo ya que este solo contendrá un bunch de fibras (pack de 35 fibras). Que pueden ser leidas únicamente por un SiPM. El diseño final del prototipo contendrá un número mucho mayor de bunch de fibras centelleadoras y, por extensión, necesitará un número mayor de SiPM para leer todas estas. Es en este punto cuando cobra una vital importancia el hecho de la automatización tanto en calibración de SiPM como en control de componentes ya que calibrar un SiPM es un trabajo costoso pero abordable pero calibrar un número elevado de SiPM (en principio se han previsto 64 SiPM) es un trabajo que llevaría demasiado tiempo. Además, para poder controlar de forma efectiva un número tan elevado de SiPM es necesario un control automático.

7. Conclusiones

8. Agradecimientos

Tutores Alumnos Nadia Andres Alberto Ingenieros laboratorios (En concreto Marc y Vicent) Teresa Cámara + otra ->Disolución Manolo taller

9. Bibliografía

Referencias

- [1] IVO VAN VULPEN y IVAN ANGELOZZI, *The Standard Model Higgs Boson*
- [2] JOSÉ IGNACIO ILLANA, *EL MODELO ESTÁNDAR Y SU FENOMENOLOGÍA*
- [3] SIANNAH PEÑARANDA RIVAS, "Quantum Field Theory"Photons and the electromagnetic field
- [4] M. GOMEZ-BOCK, M. MONDRAGÓN, M. MÜHLLEITNER, R. NORIEGA-PAPAQUI, I. PEDRAZA, M. SPIRA y P.M. ZERWAS, *Rompimiento de la simetría electrodébil y la física del Higgs: Conceptos Básicos*
- [5] FRANCIS HALZEN y ALAN D. MARTIN, *QUARKS AND LEPTONS: An Introductory Course in Modern Particle Physics*
- [6] Partícle data group (<http://pdg.lbl.gov/>)
- [7] MATTHIAS JAMIN, *QCD and Renormalisation Group Methods*
- [8] JUAN ROJO, *The Strong Interaction and LHC phenomenology*
- [9] MARK THOMSON, *Particle Physics*
- [10] MARK THOMSON, *Particle Physics* Handout 1: Introducción
- [11] MARK THOMSON, *Particle Physics* Handout 1: Symmetries and Quark Model
- [12] JOAQUÍN SANTOS BLASCO, *UNITARY ANALYSIS OF THE SCALAR SECTOR OF THE STANDARD MODEL*
- [13] J. MARSANO, *String Thery in the LHC Era* Lecture 3: Why do we need the Higgs?