

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 leídas por fotomultiplicadores de silicio

Marcos Martínez Roig

Tutores:

José Díaz Medina  
Nadia Yahlali Haddou

# Índice

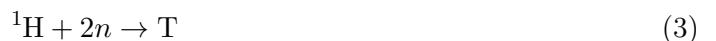
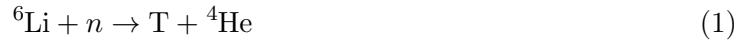
<b>1. Introducción</b>	<b>2</b>
<b>2. Protocolo de manipulación de fibras centelleadoras</b>	<b>8</b>
<b>3. Calibración de los fotomultiplicadores de silicio (SiPM)</b>	<b>11</b>
3.1. Equipo y montaje experimental . . . . .	13
3.2. Características de la tarjeta . . . . .	16
3.3. Análisis de datos . . . . .	16
3.4. Calibración en temperatura . . . . .	21
3.5. Calibración en voltaje de operación . . . . .	22
3.6. Estabilización de la ganancia . . . . .	24
<b>4. Prototipo</b>	<b>28</b>
4.1. Configuración del prototipo . . . . .	28
4.2. Procedimiento de llenado . . . . .	30
4.3. Configuración de la electrónica . . . . .	31
4.4. Resultados . . . . .	34
<b>5. Simulaciones</b>	<b>40</b>
<b>6. Previsiones de futuro</b>	<b>44</b>
<b>7. Conclusiones</b>	<b>47</b>

## 1. Introducción

La creación de altos niveles de radiactividad es un problema que concierne a las centrales nucleares de fisión, centrales termoeléctricas, experimentos de física de partículas, e incluso, a las futuras centrales de fusión termonuclear. Por ejemplo, una central nuclear operando en modo normal puede llegar a emitir alrededor de 300 TBq/GW<sub>y</sub> [1]. Debido al riesgo que ello implica, las emisiones radiactivas deben ser controladas y disminuidas en la medida de lo posible.

En concreto, uno de los elementos radiactivos generados en más abundancia es el tritio. Debido a las elevadas tasas de radiactividad anteriormente mencionada, es fundamental controlarlo en estas zonas de trabajo 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 las instalaciones anteriormente mencionadas las reacciones en las que se basa su funcionamiento tienen lugar a energías en las que se producen con bastante probabilidad neutrones, tanto térmicos como a energías más elevadas. Podemos entender entonces que, en estas instalaciones, dada la alta tasa de hidrógeno y neutrones, existe una posibilidad relativamente alta de que se produzca tritio. Algunos de los principales canales de producción de tritio son la captura neutronica del <sup>6</sup>Li, <sup>7</sup>Li, H, etc. las cuales se muestran a continuación:



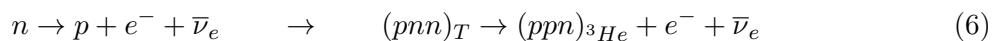
Según nuestro planteamiento, también será más fácil todavía que se produzca deuterio, segundo isótopo del hidrógeno (compuesto por un protón y un neutrón), que puede formar tritio capturando un neutrón adicional.



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 período de semidesintegración de 12,32 años, en concreto, un emisor  $\beta^-$  de baja energía que emite electrones según la siguiente reacción:



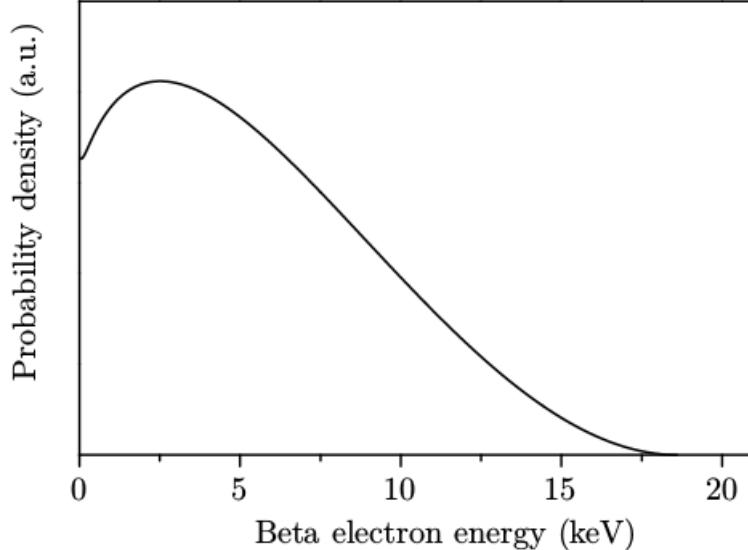
donde lo que ha ocurrido es que uno de los neutrones que forman el tritio se ha desintegrado (a partir de una interacción débil) de acuerdo a una desintegración  $\beta^-$  en un protón, un electrón y un antineutrino electrónico:



La existencia de este antineutrino electrónico es impuesta por la conservación del número 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 ( $\sigma \propto 10^{-42} \text{ cm}^2$ ). Es decir, esta partícula escapa sin interaccionar con el detector y en su lugar, sólo detectamos su ausencia, es decir, la no conservación de ciertas cantidades físicas como energía, momento, número leptónicos, etc. de todas las partículas detectadas.

Por tanto, sólo tenemos la posibilidad de detectar el isótopo estable  ${}^3\text{He}$  y el electrón. Hay que tener en cuenta que, aunque el isótopo hijo de la reacción de desintegración del tritio,  ${}^3\text{He}$ , sea estable, realmente éste se forma 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  $\beta^-$  del tritio, tendremos una posterior desexcitación del  ${}^3\text{He}$  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 la resolución de los aparatos de medida.

Dado que el  ${}^3\text{He}$  tiene una masa muy superior a la de los electrones, por conservación de energía y momento podemos observar que el  ${}^3\text{He}$  apenas se moverá del punto donde ocurre la reacción. Por tanto, nos centraremos en la detección del electrón. En la figura 1 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 [2]

El espectro del tritio presenta la forma típica de un espectro energético de desintegración  $\beta$ , con 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. Como consecuencia, el electrón presentará un recorrido libre medio muy corto, del orden de 3 – 5 mm en el aire y de 5 – 6  $\mu\text{m}$  en un medio sólido [3].

El problema que queremos estudiar 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 [5, 6, 7].

Por ejemplo, entre los métodos más empleados actualmente en centrales nucleares, está 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 de la radiación  $\beta$  del tritio estos presentan un recorrido libre medio muy pequeño (del orden del mm o  $\mu\text{m}$ , dependiendo del medio [3]). Dado que sólo 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 ésto sólo 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 reutilizables. El líquido centelleador debe de ser tratado como residuo peligroso ya que, aunque el análisis desvele que el agua tritiada está libre de tritio (presente una actividad suficientemente baja para ser tratada como material no radiactivo), el líquido centelleador contiene tolueno y, por tanto, debe de ser desecharlo de acuerdo con el protocolo de residuos químicos peligrosos, y en particular no puede ser vertido al medio ambiente. También necesita operarios especializados manipulen estas muestras, poniendo en peligro su salud [8].

El objetivo final de *Tritium*, sobre el cual tratará mi futura Tesis Doctoral, es desarrollar un detector de aguas tritiadas que permita realizar la monitorización del tritio *in situ* en tiempo quasi-real. Por tiempo quasi-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 ( $\sim 1 \text{ keV}$ ) y tener

estadística suficiente para poder discernirla del fondo radiactivo en un tiempo tan pequeño. El proyecto *Tritium* pretende llegar a realizar detecciones en el límite de actividades de la muestra de agua tritiada entorno a 0,1 o 1 kBq/L, lo cual nos permitirá generar mensajes de alarma cuando la muestra supere el límite recomendado por la Comunidad Europea, 100Bq/L. Los trabajos *in situ* con configuraciones del detector similares (centelleador + contador de fotones) realizados hasta la fecha que utilizan el concepto de tiempo real, sólo han conseguido obtener una señal en el límite del MeV/L [2] o incluso decenas de kBq/L [4]. Estos están basados principalmente en plásticos 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 centelleadores 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, ya que estos presentan una mayor eficiencia de fotodetección, aunque también contemplaremos el uso de PMT.

Hay que tener en cuenta que existen diseños que logran llegar a límites del orden del Bequerelio en un tiempo de 3 minutos, aunque estos están basados en configuraciones totalmente distintas, como por ejemplo un sistema, formado por un láser y cavidades espectroscópicas en forma de anillo, en el cual se busca la existencia de resonancias y se relaciona las frecuencias a las que estas ocurren con la concentración de tritio presente en la muestra [9]. Sin embargo, éste 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 implantación de éste 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 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 cual es la mejor elección de las estructuras de fibras centelleadores. 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 cual es la mejor elección del fotosensor. 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 qué 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 qué 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 comenzado 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 cuál 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 cómo preparar un bunch de fibras centelleadoras con resultado ópticamente aceptable. Por otro lado se utilizarán distintas estructuras de las mismas para ver cuál 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 cuál 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[10, 11, 12], programa desarrollado por el CERN capaz de realizar simulaciones muy detalladas de experimentos, principalmente de física de partículas. En este punto, se presentarán las simulaciones realizadas tanto para los prototipos como para posibles diseños finales. Esto nos permitirá ver las posibles mejoras que podemos incluir a nuestro experimento y en qué

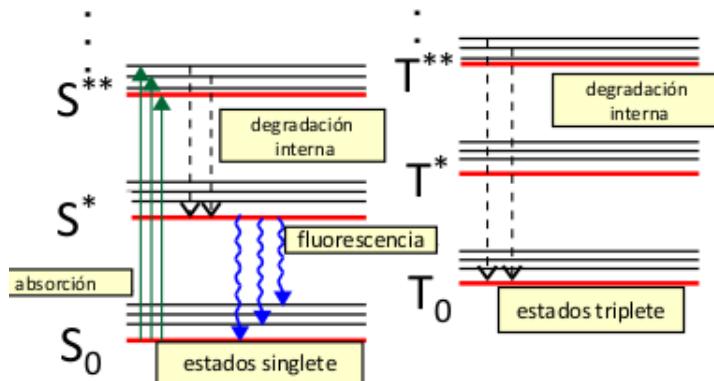
puntos difieren las simulaciones de los resultados obtenidos en los distintos experimentos de los prototipo.

5. En quinto lugar, se presentarán 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 Doctoral. También se comentará brevemente el siguiente paso que pretendemos realizar en el proyecto.
6. Se presentará un último punto donde se expondrán las conclusiones alcanzadas en el trabajo.

## 2. Protocolo de manipulación de fibras centelleadoras

Como se ha comentado anteriormente, el primer paso para monitorizar los niveles de agua tritiada es detectar los electrones que se producen en la desintegración  $\beta^-$  del tritio (5). Para ello se utilizarán fibras centelleadoras cuya oferta ofertada existente en el mercado se estudió [14] y se determinó que las fibras BCF-12 eran las que mejor se ajustaban a los requisitos del experimento.

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 2:



**Figura 2** – Esquema de niveles energéticos de un material centelleador [15]

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 (Fig. 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. 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.

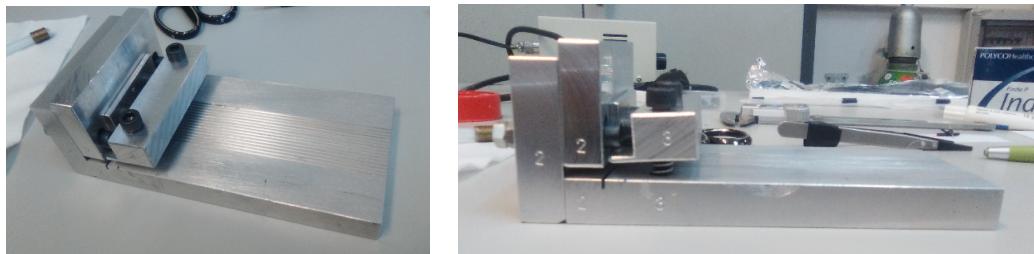
Por lo general estos materiales centelleadores producen señales bastante rápidas en

comparación con otros tipos de detectores. 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 [16]. Estas poseen un índice de refracción de 1,6, parámetro fundamental a la hora de transportar eficientemente la luz.

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 3.4% [16]

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 construyó una guillotina [14] [17] [18] [19] adecuada la cual puede verse reflejada en la figura tres:



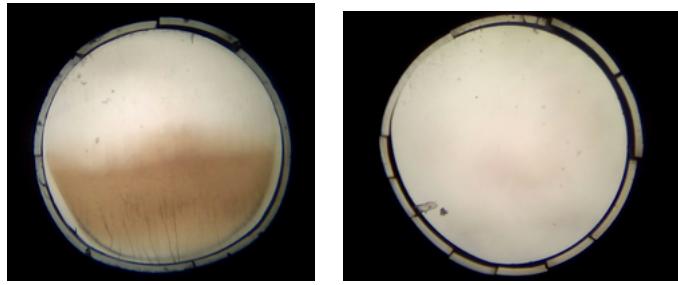
**Figura 3** – Guillotina

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 fibras 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 simultáneos 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 acabó 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 [14] [17].

En la figura cuatro izquierda se puede ver (con ayuda de un microscopio) la cara de una fibra recién cortada. En esta podemos apreciar que, aunque presenta un acabado 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 tras 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 [14] [20].



**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, modelo BC-360) 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) [21].

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 [22].

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:

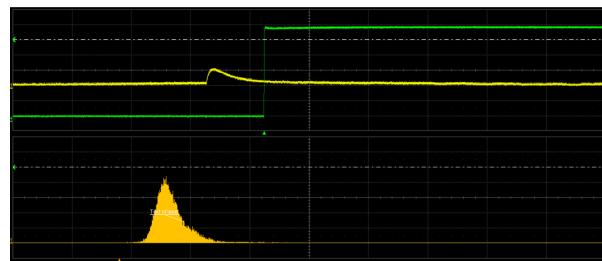


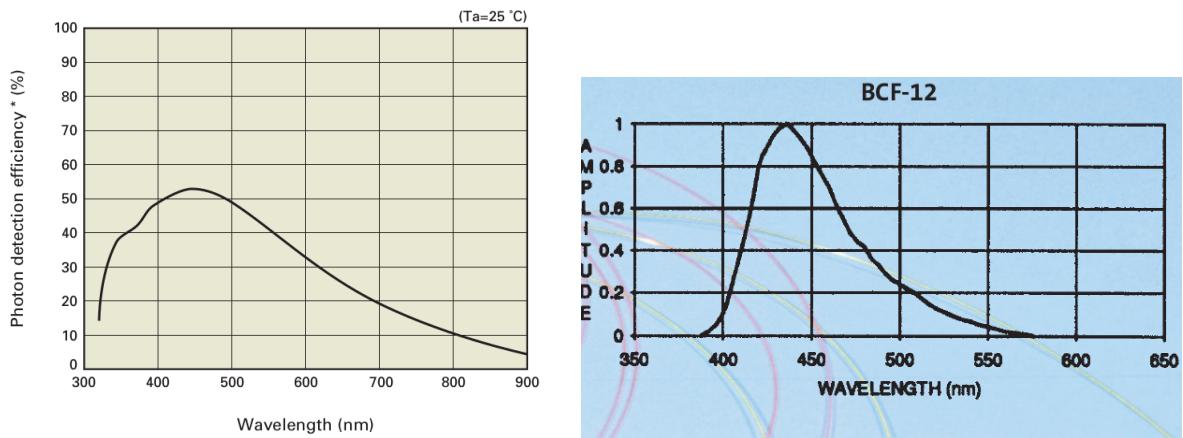
Figura 7 – Dark counts

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. 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  $\beta$  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 dificultados del experimento es que estamos intentando extraer una señal muy pequeña.



**Figura 8** – PDE del SiPM [23] y espectro de emisión de las fibras [16] 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.

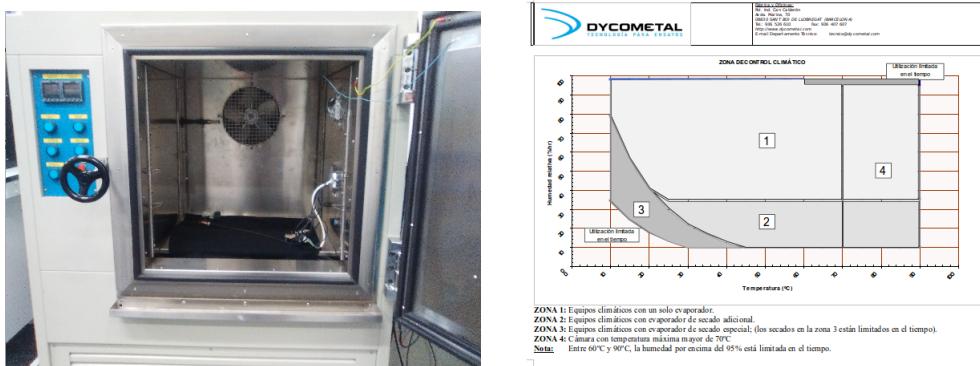
### 3.1. Equipo y montaje experimental

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 9 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 debiamos trabajar siempre en la zona 1 de acuerdo al diagrama de estados existente en la ficha técnica de la cámara, mostrado en la figura 9 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 estados [26]

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 [27], 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 [23].

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 10 izquierda [23].

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 10 derecha, en la cual se encuentra el SiPM utilizado conectado a la misma.



**Figura 10** – SiPMs y tarjeta de conversora intensidad-voltaje

7. Seguidamente se observó 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 11.



**Figura 11** – Ruido electrónico

Se intento 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.

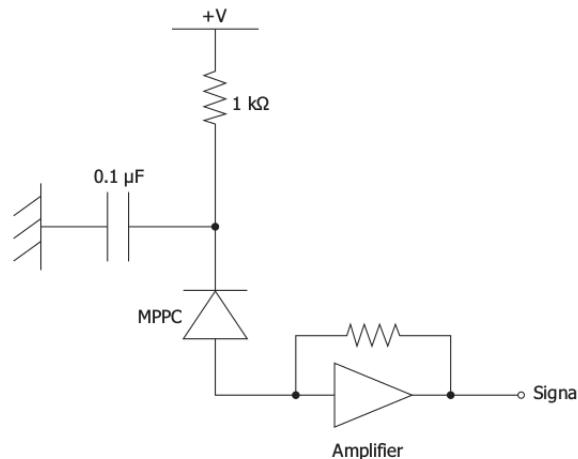
Con la presencia de este ruido no podíamos realizar medidas ya que introducía una componente de ruido tal que estropeaba por completo el resultado de la medida. Con el fin de solucionar este problema se dispuso de un **filtro pasa banda** (GUARD LCD2 650 AP) para eliminar este ruido.

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. Características de la tarjeta

La tarjeta empleada en el sistema (Fig. 10) es una tarjeta reciclada de 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. La tarjeta contiene un circuito similar al de la siguiente imagen para cada SiPM:



**Figura 12 – Circuito de una tarjeta tipo [23]**

Es una tarjeta del departamento de electrónica, cuyos ingenieros nos han informado que posee una ganancia de  $G = 110$ . Este será el valor que utilizaremos en el análisis posterior para calcular la ganancia de los 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 13 (amarilla) [28], el la cual se activado 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, actua 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 de forma aproximada la ganancia del SiPM.

$$G_{tot} = G_{SiPM} \cdot G_{card} \longrightarrow G_{SiPM} = \frac{G_{tot}}{G_{card}} \quad (7)$$

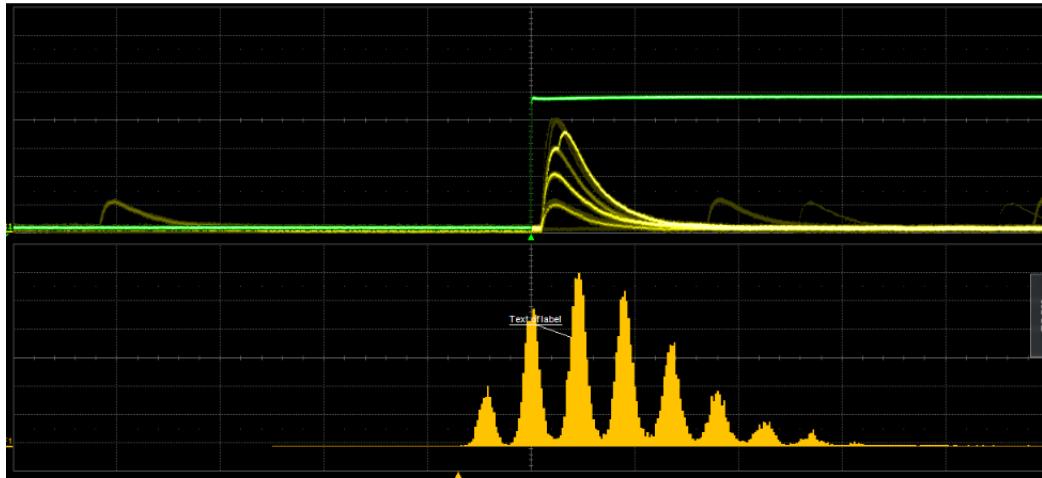
Para medir la ganancia total simplemente realizamos una integral del area de cada uno de los pulsos de salida del sistema y conservamos el resultado en un histograma. De esta forma lo que estamos consiguiendo es un histograma de las cargas de los pulsos. La ventana temporal sobre la que se integra es 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 esta sometido a fluctuaciones estadísticas. Además los propios instrumentos de medidas empleados tienen una incertidumbre inherente. Hay que tener en cuenta que tambiéñ tenemos distintas fuentes de background, como dark counts (ruido térmico), fotones de luz del exterior, etc.

Como resultado de todo esto, lo que obtendremos seran un conjunto de gaussianas equiespaciadas. En la figura 13 inferior puede verse el resultado de una toma de datos de 25000 eventos a 25 grados, 60 % de humedad y  $V_{ov} = 3V$

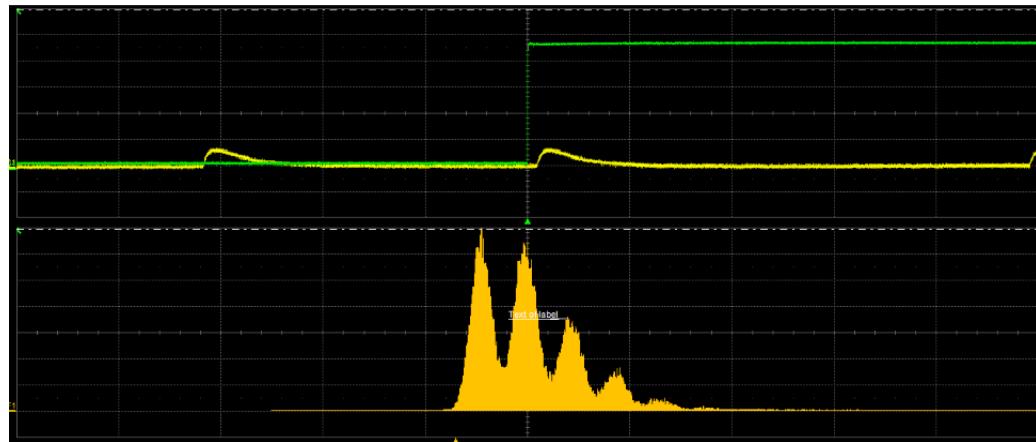
Donde cada uno de estos picos corresponde a la carga de sucesivos número de pixels activados (uno, dos, etc.). El primer pico no debe tenerse en cuenta en el análisis ya que este corresponde al pedestal (cero pixels activados). Su origen es debido a la existencia de las cuentas ocuras.

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**

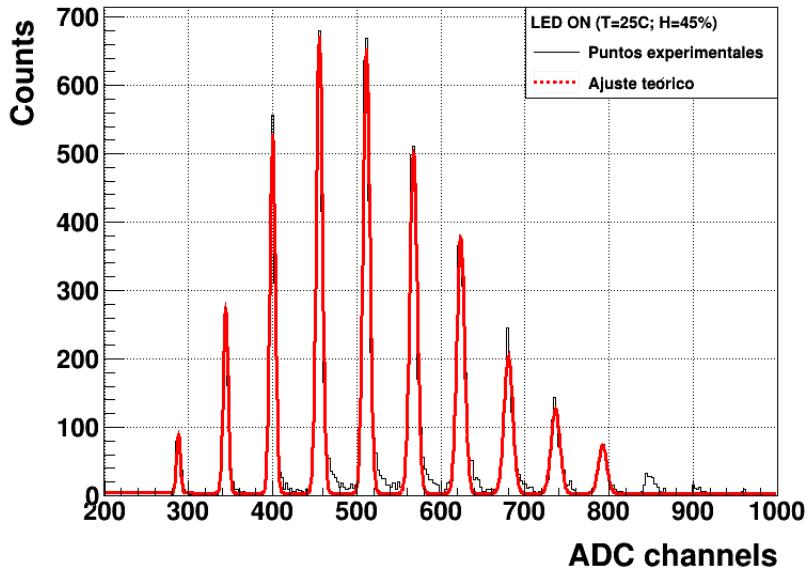
1. Primero la macro lee el fichero de datos, los guarda en una variable de tipo histograma y los representa. La macro termina de leer el fichero cuando no encuentra más valores.
2. A continuación, a partir de una función de la librería TSpectrum, busca en este histograma y devuelve el número de gaussianas 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 14.



**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 13. Podemos apreciar en la figura 15 que el ajuste (línea roja) es relativamente bueno. Para poder ver hasta que punto nuestro ajuste es aceptable aplicamos el test  $\chi^2$ , donde se ha obtenido un resultado de  $\frac{\chi^2}{ndf} = \frac{1276}{223} \approx 5,72$ . Vemos que efectivamente el ajuste

se realizado 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 [31].

$$Q = GN_\gamma + Q_0 \longrightarrow \Delta Q = Q_{N_\gamma} - Q_{N_\gamma-1} = GN_\gamma + Q_0 - G(N_\gamma - 1) - Q_0 = G \quad (8)$$

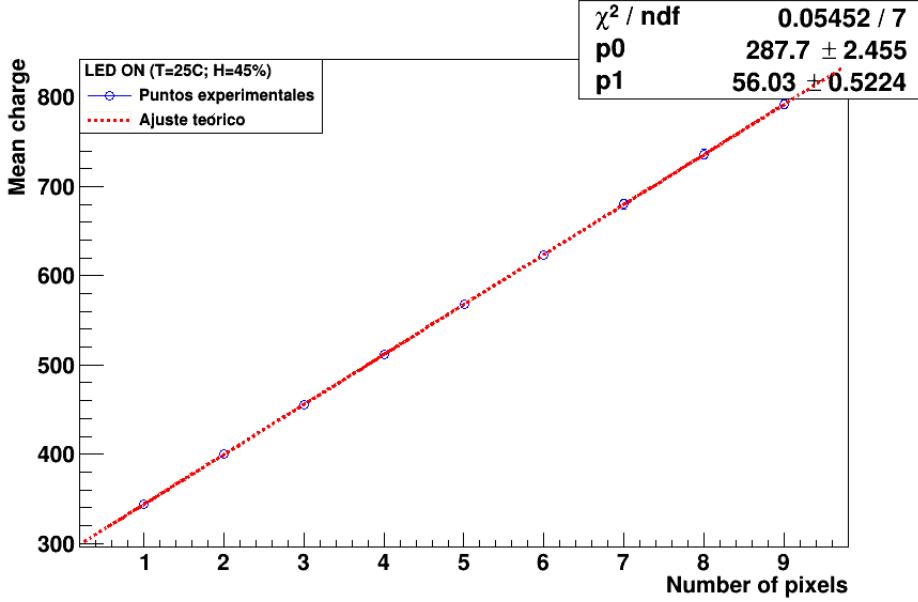
Podemos observar que este cálculo corresponde a la ganancia. Hay que tener en cuenta que se han empleados factores de conversión para convertir la posición del pico (initialmente en unidades de tensión, V) en unidades de carga (coulomb). En concreto se ha utilizado el factor  $\frac{1}{eR}$ , donde R 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 [31]:

$$\text{Centro\_pico}(V) = GeRN_\gamma + k_0 \quad (9)$$

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 16 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:

$$G_1 = 6,38938 \cdot 10^8 \pm 2,15953 \cdot 10^8 \quad (10)$$

$$G_2 = 7,18235 \cdot 10^8 \pm 6,88392 \cdot 10^6 \quad (11)$$

Por extensión, las ganancias del SiPM calculadas por cada camino son (aproximadamente)(7):

$$G_1 = 5,80853 \cdot 10^6 \pm 1,96321 \cdot 10^6 \quad (12)$$

$$G_2 = 6,52941 \cdot 10^6 \pm 6,258 \cdot 10^4 \quad (13)$$

donde los errores se han obtenido por propagación. Si comparamos con la literatura [23] podemos observar que ambos valores son bastante aceptables con errores relativos de:

$$\sigma_{rel1} \approx 0,0319 = 3,19\%; \quad \sigma_{rel2} \approx 0,0882 = 8,82\% \quad (14)$$

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, a pesar de tener un error relativo mayor.

Nuevamente se ha aplicado el test  $\chi^2$  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.

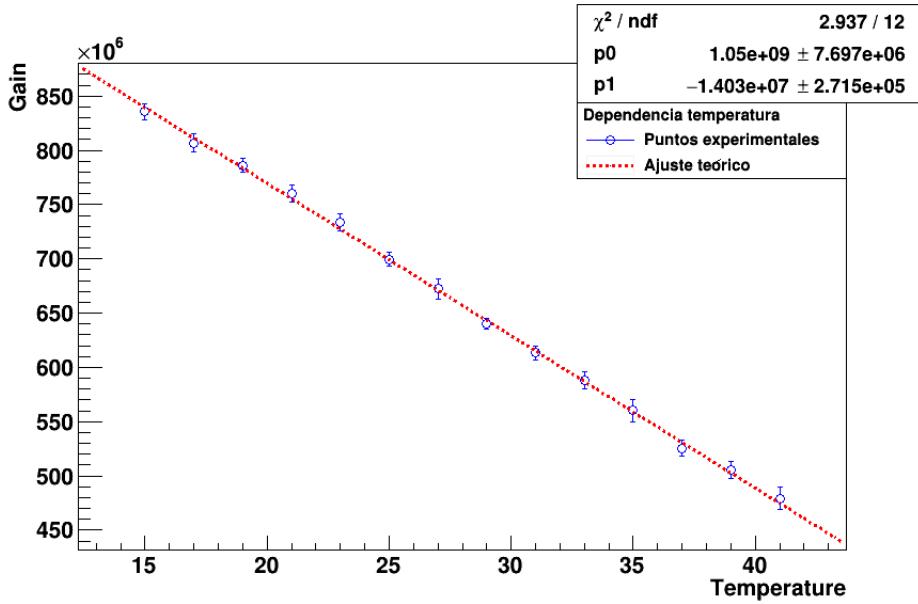
Hay que tener en cuenta que, como se dijo anteriormente, el sistema de control de temperatura debe de estar en la zona uno del diagrama de fases existente en la ficha técnica. Esto implica que, para medidas inferiores a 27 grados necesitamos aumentar la humedad en un 5 % a cada medida (humedad del 45 % 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 17.

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  $\chi^2$  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, como esperábamos [24], la existencia de un decrecimiento del valor de la ganancia del SiPM a medida que aumenta la temperatura. Esto es debido a



**Figura 17** – Ganancia frente a temperatura

que la zona de desertización, 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:

$$a = -1,40308 \cdot 10^7 \pm 2,71545 \cdot 10^5 \frac{1}{^\circ C} \quad (15)$$

$$b = 1,05001 \cdot 10^9 \pm 7,69711 \cdot 10^6 \quad (16)$$

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.

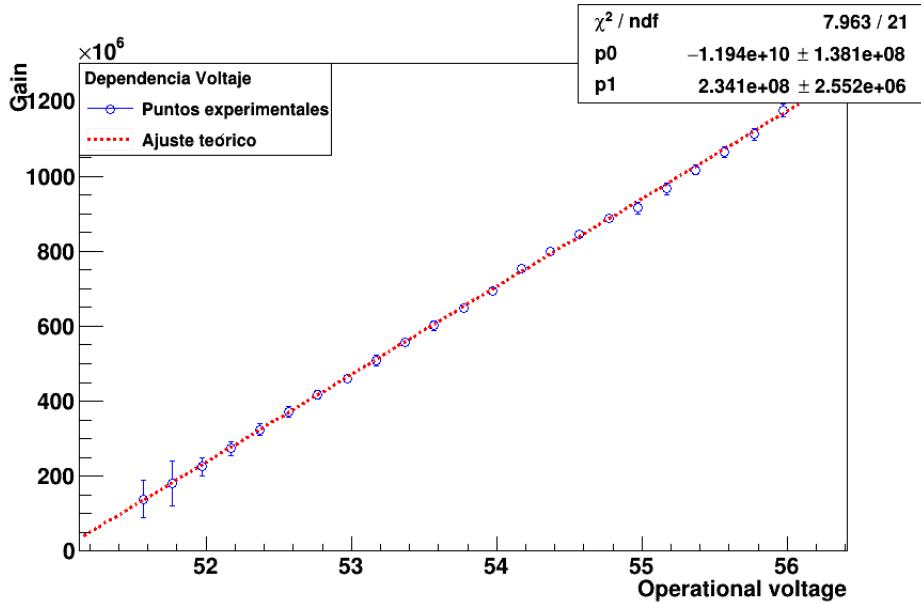
Para automatizar este proceso procedemos a desarrollar una macro en ROOT que realice este ajuste. Análogamente esta macro poseerá dos partes:

- 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 leido) que contienen ganancia, temperatura y sus errores de forma ordenada realiza un ajuste lineal. El ajuste obtenido se presenta en la figura 18.



**Figura 18** – Ganancia frente a voltaje operacional

Podemos apreciar de nuevo, como esperábamos [24], la existencia de un comportamiento creciente 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 llegó 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  $\chi^2$  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:

$$c = 2,34123 \cdot 10^8 \pm 2,55246 \cdot 10^6 \text{ V}^{-1} \quad (17)$$

$$d = -1,19368 \cdot 10^{10} \pm 1,38112 \cdot 10^8 \quad (18)$$

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:

$$G = 0 = c \cdot V_{BD} + d \longrightarrow V_{BD} = -\frac{d}{c} = 50,9852 \text{ V} \quad (19)$$

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 sufrirá 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:

$$G(V_{op}) = cV_{op} + d; \quad G(T) = aT + b \quad (20)$$

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

$$\partial G(V_{op}) = c\partial V_{op}; \quad \partial G(T) = a\partial T \quad (21)$$

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

$$\partial G_{tot} = \partial G(V_{op}) + \partial G(T) \quad (22)$$

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

$$\partial G_{tot} = 0 = \partial G(V_{op}) + \partial G(T) \longrightarrow \partial G(V_{op}) = -\partial G(T) \quad (23)$$

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:

$$\partial G(V_{op}) = -\partial G(T) \longrightarrow c\partial V_{op} = -a\partial T \longrightarrow \partial V_{op} = -\frac{a}{c}\partial T \quad (24)$$

En trabajos anteriores[21][24][25] se ha visto que ambas pendientes,  $a$  y  $c$ , apenas varían en voltaje y temperatura. Por tanto, en primera aproximación, podemos considerarlas constantes en ambas magnitudes. Con ello integramos a cada lado y obtenemos:

$$\int_{V_i}^{V_f} \partial V_{op} = -\frac{a}{c} \int_{T_i}^{T_f} \partial T = -\frac{a}{c} \Delta T \longrightarrow \Delta V_{op} = e \Delta T \quad (25)$$

Donde se ha introducido un nuevo parámetro:  $e = -\frac{a}{c}$  cuyo valor es (15) (17):

$$c = 2,34123 \cdot 10^8 \pm 2,55246 \cdot 10^6 \quad V^{-1} \quad (26)$$

$$a = -1,40308 \cdot 10^7 \pm 2,71545 \cdot 10^5 \quad \frac{1}{C^\circ} \quad (27)$$

$$e = -\frac{a}{c} = 0,059929 \pm 0,001331 \quad \frac{V}{C^\circ} \quad (28)$$

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.

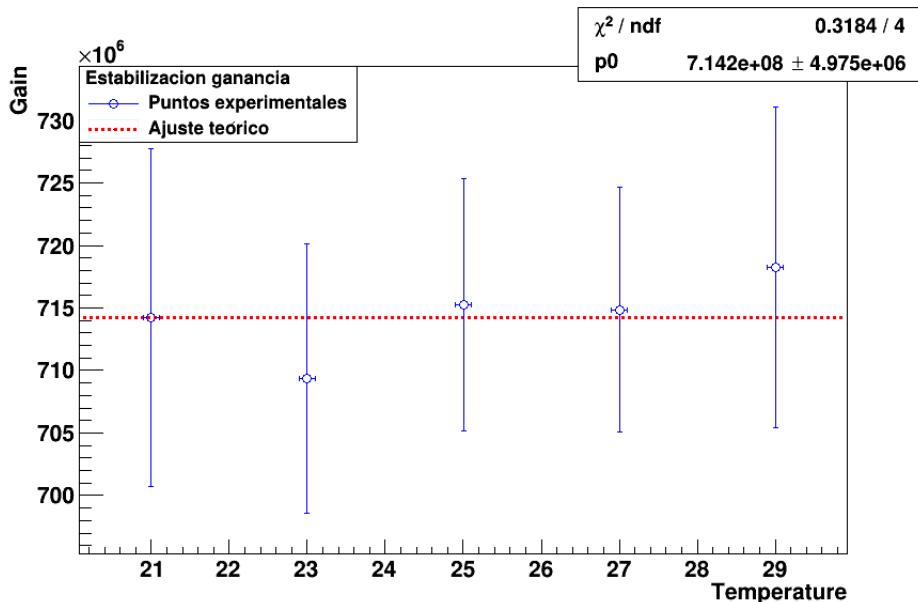
En resumen la ecuación que nos dicta cual es la variación que debemos aplicar al voltaje para mantener un valor de ganancia constante (compensar la ganancia) ante una variación de la temperatura conocida (que puede ser medida con un sensor de temperatura) es:

$$\Delta V_{op} = 0,059929 \cdot \Delta T \longrightarrow V_1 - V_{ref} = 0,059929(T_1 - T_{ref}) \quad (29)$$

Donde  $V_1$  será el voltaje con el que habrá que alimentar al SiPM a una temperatura ambiental de  $T_1$  para mantener la ganancia constante. Para realizar este cálculo se necesita tomar un valor de voltaje operacional y temperatura como referencia, cuya ganancia será la que mantendremos. Para estos valores de referencia elegiremos el caso anteriormente mostrado en la sección de análisis de datos correspondiente a temperatura 25 grados, humedad del 45 % y voltaje operacional de  $53.97 \text{ V} = V_{BD} + 3 \text{ V}$ , cuya ganancia habíamos visto que correspondía a  $7,18235 \cdot 10^8$ . Por tanto, el valor de voltaje operacional  $V_1$  con el que habrá que alimentar al SiPM, el cual se encuentra a una temperatura  $T_1$ , para mantener una ganancia de  $7,18235 \cdot 10^8$  es:

$$V_1 = 0,059929T_1 + 52,47 \quad (30)$$

Ahora 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 19.



**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  $\chi^2$  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 imágen).

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 de  $\sigma_{rel} = 2,801 \cdot 10^{-3}$ . Hemos comprobado por tanto que se trata de un método realmente eficaz.

La máxima variación se observó a 23 grados. Esta es debido a que fue una medida realizada muchas horas después 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. Prototipo

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 del prototipo

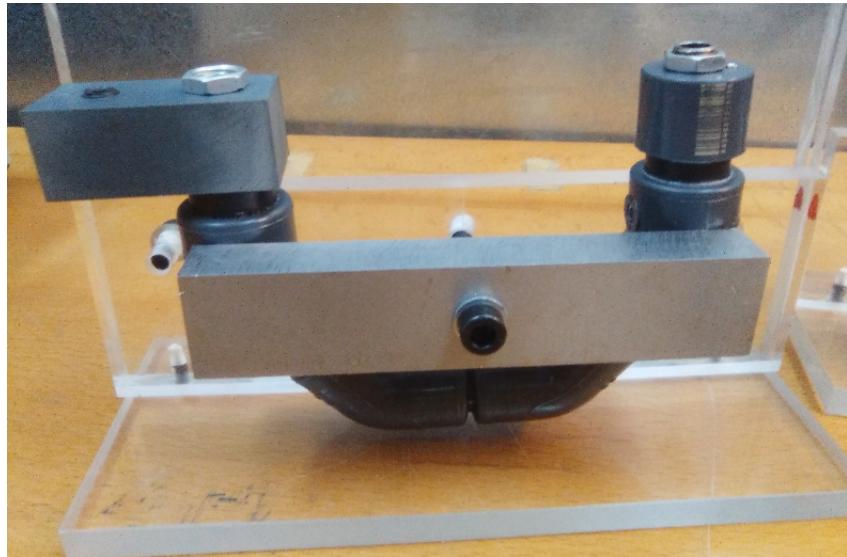
En primer lugar se tuvo que diseñar y construir un prototipo que respondiese a una serie de exigencias impuestas por el experimento. Por un lado este debía de ser capaz de albergar de manera segura un bunch de 35 fibras centelleadoras, el cual se encontraría totalmente sumergido en una solución de agua 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, 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  $39 \text{ cm}^3$ , 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.

Además ambos extremos disponían también de un agujero de 9,8 mm de diámetro, tamaño justo para que por cada uno de estos pasara un extremo del bunch de fibras centelleadoras. En estos extremos 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.

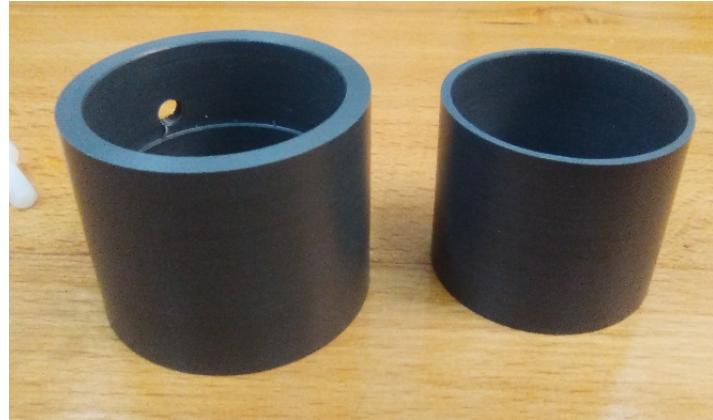
En todo momento se utilizó silicona para sellar cualquier posible fisura del prototipo.

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 21.

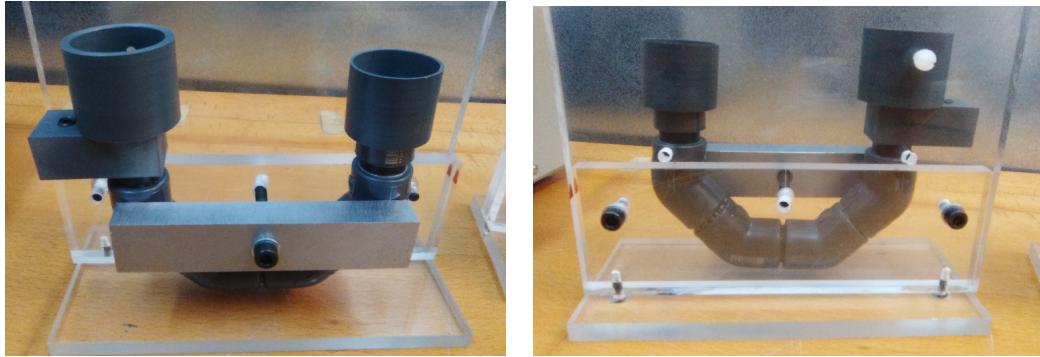
La primera pieza (correspondiente a la pieza derecha de esta figura), más pequeña, simplemente encajaba al tapón circular por un extremo y, por el otro, con un diámetro interior más grande para que cupiese y fijase, se disponía del PMT.

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 22.



**Figura 22** – Prototipo con piezas de sujeción

Hay que tener en cuenta que el proceso de medida se desarrollará en el interior de una cámara oscura cuya única labor es la de proteger de la posible entrada de luz del exterior. En esta no habrá un control exhaustivo de la temperatura como ocurría con el sistema utilizado para la calibración de los SiPM. En su lugar únicamente activaremos el aire acondicionado en la sala para mantener una temperatura constante de aproximadamente  $25^{\circ}\text{C}$  en todo momento.

Los PMTs empleados, R8520-ZB2771 y R8520-ZB2773 se alimentaron ambos a  $-830\text{ V}$ . A esta temperatura disponen de una ganancia de  $G_1 = 1456178$  y  $G_2 = 1921595$  y su eficiencia de fotodetección a  $\lambda = 430\text{ nm}$  es de 29,76 % y 28,66 % respectivamente.

#### 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 ( $\text{HTO}$  en  $\text{H}_2\text{O}$ ) de  $2,0169 \pm 0,0017\text{ g}$  de peso y una actividad específica de  $A = 26,8 \pm 0,6\text{ MBq/g}$  con fecha de calibración del 16 de marzo de 2017. Esta fuente presenta una actividad tal que

puede considerarse exenta [32] .

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 [32] .

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 cm<sup>3</sup> de solución patrón.

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

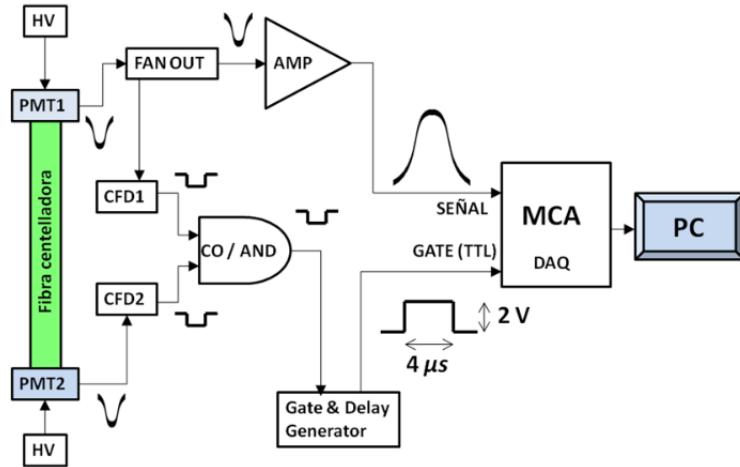
1. En primer lugar se dispuso de una bandeja de plastico recubierta con material absorbente en el interior de la cual se realizaría todo el proceso de llenado. El objetivo de esta fue evitar en la medida de lo posible una contaminación debido a un desbordamiento en el proceso de llenado.
2. En segundo 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 tritada, 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 cm<sup>3</sup> 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 plastico, la cual se introducirá en una caja de carton, 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**

Finalmente, con cada una de las partes del prototipo debidamente conectadas y calibradas y la fuente de tritio debidamente situada y asegurada, únicamente nos resta configurar la

parte electrónica del sistema para empezar a medir en el prototipo y obtener una señal adecuada. El objetivo será obtener un espectro energético de experimento con ayuda de un analizador multicanal analógico, MCA con tarjeta PCA3 y un programa Oxford WIN-MCA.

Para ello necesitamos realizar una serie de transformaciones a la señal para que, por un lado, pueda ser analizada de manera adecuada por el MCA y, por otro lado, optimicemos al máximo la señal sobre el background. El esquema electrónico utilizado se muestra en la figura 23.



**Figura 23** – Esquema Electrico [33]

Para conseguir cada uno de estos pasos se ha utilizado tecnología NIM. A continuación se procede a explicar el camino seguido por la señal y cada uno de los módulos que intervienen en estas transformaciones:

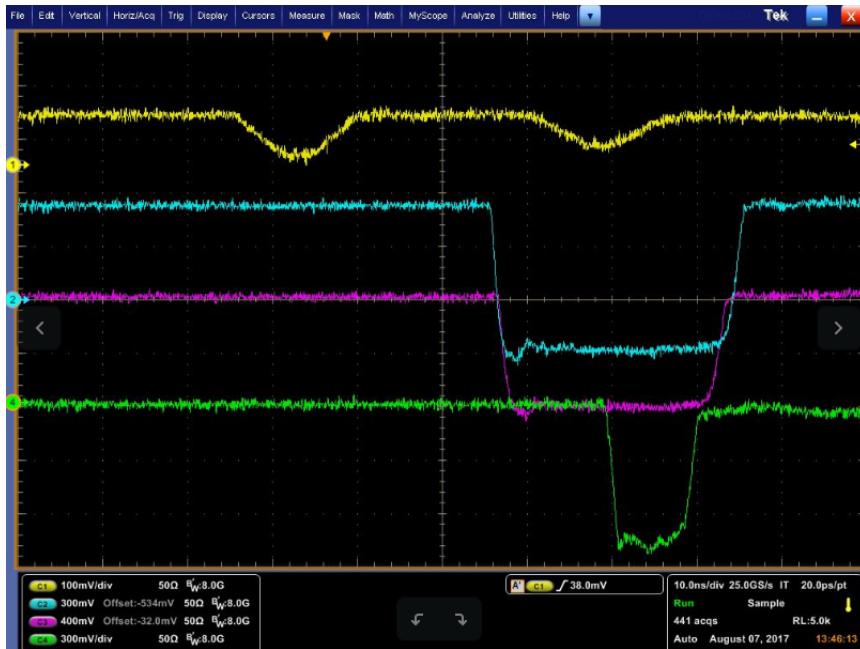
1. En primer lugar sacaremos la señal de cada fotomultiplicador de la caja negra utilizada para apantallar la luz del exterior. Ello lo conseguimos con ayuda de cables BNC ya que la caja dispone de puertos BNC macho que comunican el interior y el exterior.
2. Seguidamente dividimos la señales de un PMT en dos señales idénticas con ayuda de un divisor activo FAN IN/OUT. Esta no es una simple división de la señal donde se produce un reparto de la intensidad sino una copia exacta de la señal de entrada. Necesitamos este tipo de módulo y no una simple división ya que, como se explico al inicio del trabajo, la señal de tritio es una señal muy débil por lo que no nos podemos permitir tener pérdidas ni divisiones de esta. Esta división se ha realizado utilizando el módulo discriminador del cual hablaremos más adelante.
3. Ahora dividiremos en dos caminos. Por un lado una copia de la señal del PMT que se ha duplicado, se llevará a un preamplificador (marca Tennelec) y, seguidamente, a un amplificador (marca Tennelec, modelo TC 241) con una ganancia configurada de 50. Con este camino conseguimos amplificar de manera adecuada la señal de un PMT, del orden de 60 mV hasta un total de 3V, lo cual nos permitirá optimizar el rango disponible en el MCA (Entre 0 y 5 V). Nos referiremos a la señal obtenida por este camino como señal 1.
4. Por otro lado, las dos señales restantes (una señal de cada PMT) serán llevada por un

camino distinto para obtener una señal que nos indique cuando hay coincidencia. Para conseguir esta segunda señal hay que tener en cuenta que los PMTs ofrecen señales analógicas y negativas. Por tanto, dado que esta señal de coincidencia será creada y tratada con tecnología NIM, necesitamos convertir estas señales en señales lógicas de estándar NIM.

Esto lo conseguimos pasando cada una de estas dos señales por un módulo discriminador (CAEN, de cuatro canales). Este ofrece una señal lógica en forma de escalón negativo de altura 800 mV y anchura variable, en nuestro caso 30 ns, para cada una de las señales siempre y cuando la señal de entrada asociada supere un umbral determinado, en nuestro caso 30 mV (hablamos en valores absolutos, hay que tener en cuenta que estas son negativas). De esta forma eliminamos de manera considerable el dark current de los PMT y, por extensión, el background.

5. A continuación hacemos pasar ambas señales de la salida del discriminador por un módulo de coincidencias modelos Cern N 6234. Este genera una señal de salida si solo si las dos señales de entrada (procedentes de cada PMT tras pasar por el discriminador) están en coincidencia temporal.

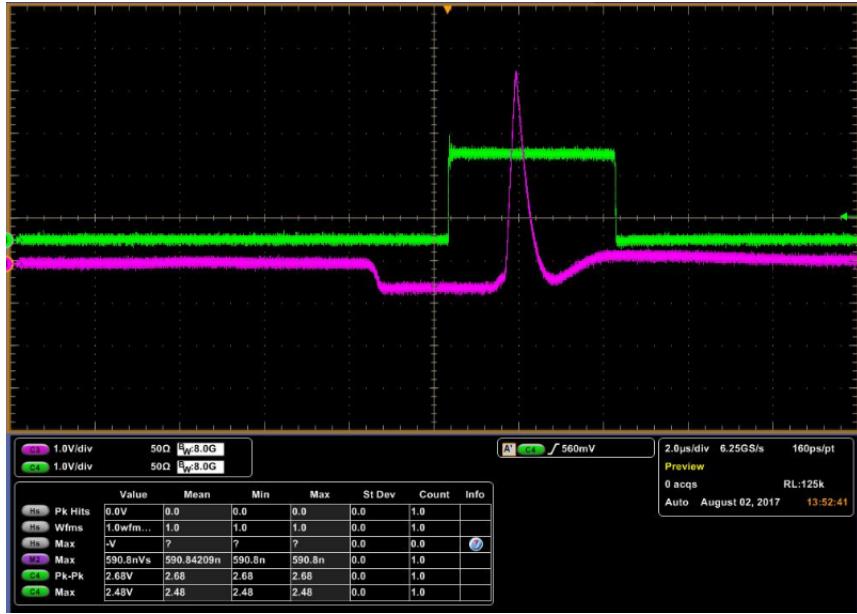
Estas cuatro señales (PMT, puerta lógica de cada PMT y puerta lógica de coincidencia) pueden verse en la siguiente figura:



**Figura 24** – Señal de salida del PMT (1), señal de salida del discriminador para cada PMT (2 y 3) y señal de salida del módulo de coincidencias respectivamente

6. Luego pasamos esta señal de coincidencia a un módulo Gate & Delay Generator (marca ORTEC, modelo 416A). Este módulo nos genera una señal lógica en forma de escalón positivo, de altura 2 voltios y anchura de  $4 \mu s$ , anchura suficiente para comprender en su interior la totalidad de la señal 1. Esta puerta debe ser positiva debido a que este es un requisito del MCA. Además aplicaremos un retraso a esta señal que compense la diferencia de caminos seguidos entre esta y la señal 1. Nos referiremos a la señal obtenida por este camino como señal 2.

7. En último lugar pasarmemos al MCA tanto la señal 1 (señal de un PMT amplificada) como la señal 2 (que nos indica cuando ambos fotomultiplicadores han detectado en coincidencia). Estas dos señales pueden verse en la siguiente figura.



**Figura 25** – Señales de entrada del MCA

Este MCA dispone de la opción de crear un histograma de señal 1 la cual solo leera mientras la señal 2 sea no nula, es decir, solo leera la señal 1 en la ventana proporcionada por la señal 2. Aquí reside la importancia de ajustar bien la anchura de la señal 2 ya que, debe de ser suficiente para contener en todo momento la señal 1 pero ajustada tanto como sea posible para evitar la entrada de dark current.

Con esto conseguimos realizar una detección en coincidencia de ambos fotomultiplicadores, lo cual nos reducirá enormemente el background del experimento.

#### 4.4. Resultados

Ahora, dado que ya disponemos de todas las partes del sistema convenientemente dispuestas y calibradas, procedemos a realizar una primera medida.

Hay que tener en cuenta que en estas primeras medidas no necesitamos un sistema de control de temperatura ya que vamos a utilizar PMT y estos no son tan sensibles a la temperatura como los SiPM. Únicamente deberemos ser capaces de evitar oscilaciones grandes de temperatura ( $\Delta T = 15 - 20^\circ C$ ), los cuales si afectan de forma apreciable a la ganancia del PMT. Esto lo podemos conseguir manteniendo el aire acondicionado de la sala experimental encendido y programado a una misma temperatura durante las medidas.

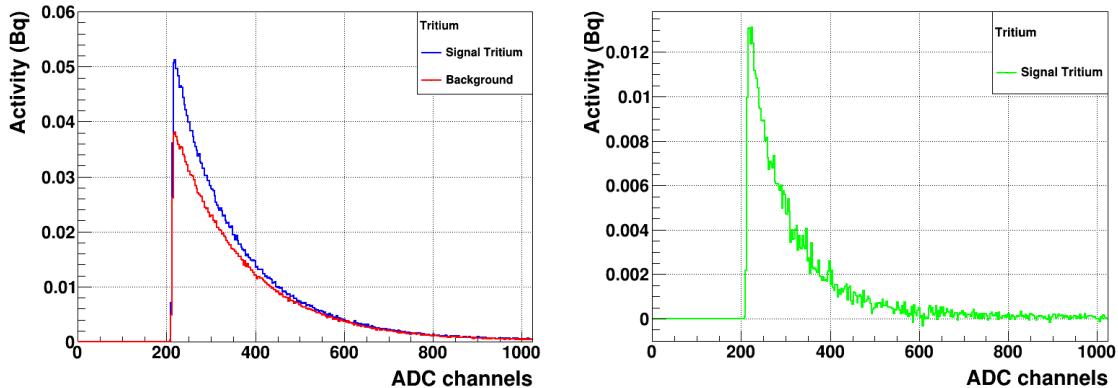
Sin embargo, cuando vayamos a realizar las medidas del prototipo con SiPMs, si necesitaremos este control exhaustivo de la temperatura ya que, como se vió en la sección de calibrado del SiPM, 3.4, existe una dependencia muy marcada. Se necesitará adquirir un sistema de control de temperatura o, en su defecto, como construir y calibrar uno nosotros mismos.

La primera medida se realizará sin coincidencia, pasando directamente la señal 1 al MCA, el cual nos permite obtener un histograma energético.

Se obtendrá un primer histograma del prototipo con agua hiperpura y sin tritio. Dado que el agua hiperpura idealmente no añade ningun tipo de contribución al histograma llamaremos a esta medida señal de fondo.

Seguidamente se rellenará el prototipo con agua tritiada y se obtendrá un segundo histograma. En esta segunda medida se pude observar en el display del MCA que el número de cuentas medidas por segundo era mayor que el de la medida del fondo. Esto es un indicativo de que estamos detectando tritio.

Finalmente se normalizan cada uno de los histogramas al tiempo correspondiente a su medida para obtener histogramas de actividad en lugar de un histograma de sucesos. Los tiempos asociados al histograma del tritio y del fondo son  $T_S = 154143$  s y  $T_B = 246987$  s, respectivamente, medidas largas para tener suficiente estadística. El resultado puede verse en la figura 26 izquierda. Además se ha añadido una segunda imagen, figura 26 derecha, en la cual se ha realizado representado la señal con tritio a la cual se le ha extraido la señal de fondo, es decir, en esta segunda imagen encontramos la señal debida únicamente al tritio.



**Figura 26** – Histograma energético de la señal del prototipo con tritio y del fondo superpuestos y señal únicamente debido al tritio.

En esta figura podemos observar que estamos detectando un pico de señal de aproximadamente 0,05 Bq y una señal debida únicamente a tritio de aproximadamente 0,013 Bq.

Para ver hasta que punto nuestro sistema funciona de forma adecuada podemos realizar un rápido cálculo para ver cual es la actividad que aspiramos detectar con nuestro prototipo. Para ello por un lado calcularemos el volumen efectivo de la fuente (volumen de agua tritiada que tendrá contribución a la señal final) y, por otro lado, utilizaremos este volumen para determinar cual es la actividad que deberíamos medir en nuestro experimento.

- Para calcular el volumen efectivo de la fuente tenemos en cuenta que los electrones procedentes de la desintegración del tritio poseen un recorrido libre medio de  $5 \mu m$ . Por tanto únicamente contribuirá de forma apreciable a la señal el agua tritiada que se encuentre formando un cilindro de grosor  $5 \mu m$  alrededor de cada fibra. Pasamos a calcular este volumen. Para ello calcularemos el volumen total y, a esta cantidad, le extraeremos el volumen

ocupado por la fibra.

El volumen de la fibrá es el volumen correspondiente a un cilindro de radio 0,5 mm (radio de la fibra) y una longitud efectiva de 20 cm, donde se ha tenido en cuenta que, aunque la longitud real de la fibra son 25 cm, esta contiene en los extremos del bunch unos aros metálicos y, además, parte de esta fibra sobresale del prototipo para acoplar a los PMTs. Por extensión, esta sección de la fibra, aproximadamente 2,5 cm a cada extremo, no contribuyen a la señal de detección del tritio. Con todo esto el volumen ocupado por la fibra será  $V_{fibra} = 1,5708 \cdot 10^{-4}$  litros.

Análogamente calculamos el volumen ocupado por la fuente más la fibra (volumen total), que corresponderá a un cilindro de radio 0,5 mm +  $5\mu m$  (radio de la fibra + radio efectivo de la fuente) y la misma longitud que la fibra, es decir, 20 cm, ya que en estos extremos se encuentra el final del prototipo. Como resultado el volumen ocupado por la fibra y la parte de la fuente que contribuye a la señal de esta fibrá será  $V_{total} = 1,6023 \cdot 10^{-4}$  litros.

Por tanto el volumen ocupado únicamente por el porcentaje de la fuente que esta interviniendo en la señal de esta fibra será la diferencia entre estos  $V_{fuente} = 3,1573 \cdot 10^{-6}$  litros.

Por tanto, teniendo en cuenta que el prototipo únicamente dispone de un bunch formado por 35 fibras centelleadoras el volumen efectivo final del agua tritiado que estamos detectando será el anterior multiplicado por 35, es decir,  $1,1050 \cdot 10^{-4}$  L.

Hay que tener en cuenta que en esta última multiplicación se ha supuesto que el volumen del agua tritiada asociadas a cada fibra forman un conjunto disjunto y sabemos que esto no es así ya que se producen solapamientos entre ellos. Debido a ello este cálculo será únicamente aproximado.

- Ahora procedemos a calcular la actividad del prototipo conociendo el volumen de agua tritiada que esta aportando a la señal total. Para ello tenemos en cuenta que la disolución posee  $2,0169 \pm 0,0017$  g de tritio con una actividad específica de  $26,8 \pm 0,6$  MBq/g disueltos en medio litro de agua hiperpura (Sec. 4,2). Con esto podemos calcularnos la actividad total de la disolución, la cual será aproximadamente de 108,11 MBq/L.

Por tanto, si en un litro hay aproximadamente  $1,0811 \cdot 10^8$  desintegraciones por segundo en el volumen calculado anteriormente habrá aproximadamente  $1,1996 \cdot 10^4$  desintegraciones por segundo, es decir, 11,996 kBq.

Finalmente, teniendo en cuenta que la eficiencia de las fibras y de los PMTs son, aproximadamente, 3 % y 30 % respectivamente y suponiendo que la cadena electrónica posee una eficiencia del 100 % llegamos a que la actividad que deberíamos detectar es, aproximadamente 107,96 Bq.

Podemos ver que estamos detectando 4 ordenes de magnitud menos de lo que deberíamos. Esto es debido en parte a imperfecciones del sistema pero la principal fuente de la pérdida de la señal es el hecho de que las fibras empleadas en este prototipo no poseen clad.

El clad hace que los fotones sean conducidos por el interior de las fibras a partir de reflexiones hasta el contador de fotones, es decir, actua como guia de luz. En nuestro caso, fibras sin clad, en cada reflexión se produce una pérdida del 94 % de la señal, por tanto, prácticamente la

totalidad de los fotones de emisión de las fibras escaparán de estas llegando al agua y produciendo de esta forma una pérdida de señal.

Como resultado únicamente detectaremos el porcentaje asociado al ángulo sólido cubierto por las fibras centelleadoras respecto al total de electrones emitidos por el tritio, cuya emisión supondremos isótropa. Además, del total de fotones reemitidos por las fibras centelleadoras (de nuevo se supone emisión isótropa) ante la detección de este electrón, únicamente detectaremos el porcentaje asociado al ángulo sólido cubierto por la cara final de la fibra centelleadora. También hay que tener en cuenta que el porcentaje de fibra que se encuentra en la parte inferior de la U que conforma el prototipo apenas intervendrá en la señal ya que vemos que prácticamente la totalidad de esta será perdida (su ángulo sólido es cero).

Podemos realizar una rápida estimación de la magnitud relativa de estos ángulos sólidos para ver su importancia en la pérdida de la señal. Integrando la expresión del ángulo sólido para una esfera esta toma la siguiente forma:  $\Omega = 2\pi(1 - \cos \theta)$  donde  $\theta$  es el ángulo que subtiene la superficie que queremos calcular [34]. Por tanto, dado que la superficie total de emisión será  $4\pi$  ( $\theta = 180^\circ$ ) el factor de reducción debido al ángulo sólido será:

$$\frac{\Omega}{4\pi} = \frac{1 - \cos \theta}{2} \quad (31)$$

Si nos calculamos el ángulo y, por extensión, este factor para el caso del ángulo sólido subtendido por la fibra centelleadora vemos que este ángulo siempre será aproximadamente  $90^\circ$  debido al hecho que la fibra centelleadora es mucho mayor que su distancia punto de la desintegración,  $5\mu m$  como máximo. Por tanto este factor será aproximadamente 0,5 en todo momento, es decir, aproximadamente la mitad de los electrones que se producen en este punto del agua tritiada pasan por la fibra. Sin embargo, la reemisión de fotones de las fibras al detectar un electrón posee un factor realmente pequeño. Por ejemplo, un punto situado a 2 cm de la cara final de la fibra posee un factor de  $3,12 \cdot 10^{-4}$  llegando a valer 0 para los puntos correspondientes a la parte inferior del prototipo como se ha mencionado anteriormente. Vemos por tanto que si llega a ser un factor realmente relevante y que podría explicar esta gran pérdida de señal.

Por tanto, debida a la necesidad de recolectar el máximo de luz, un paso inmediato en el siguiente prototipo será incluir fibras con clad que nos permitan recolectar un mayor porcentaje de luz. El problema reside en que el grosor actual del single clad comercial de las fibras Saint-Gobain es de, aproximadamente, 4% del diámetro, es decir,  $40 \mu m$ . Prácticamente ningún electrón conseguirá pasar el clad y ser detectado en el núcleo de la fibra por lo que habrá que considerar otros mecanismos de guía de ondas. Una posible solución a este problema sería incluir nosotros el clad en las fibras a partir del proceso de deposición de aluminio por evaporación en vacío. Esto lo podemos realizar en el ICMOL, departamento asociado al IFIC, con el cual ya se han realizado trabajos similares anteriores [25] [35]. De esta forma podríamos conseguir un clad con un espesor del orden de cientos de nanómetros, espesor suficientemente pequeño para que un porcentaje aceptable de electrones derivados de la desintegración del tritio puedan superarlo.

En último lugar, para comprobar que nuestro argumento de la pérdida de la señal situamos una fuente de actividad conocida, cuya emisión sea suficientemente energética, en el exterior del prototipo y procedemos a medir la señal.

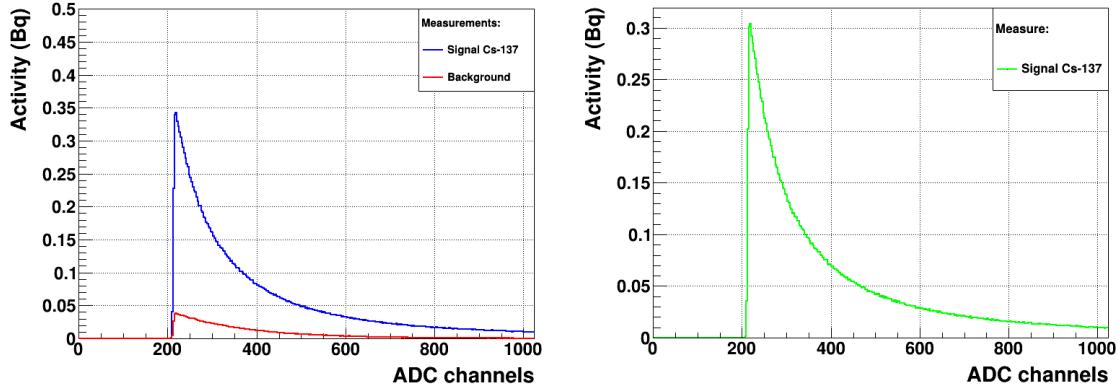
Si ahora también medimos una actividad con aproximadamente cuatro órdenes de magnitud inferior a la actividad teórica estipulada por la fuente,  $3 \mu Ci \approx 1,11 \cdot 10^5$  Bq, no habremos confirmado nuestro argumento pero si le habremos dado mucho peso ya que, una vez los fotones reemisidos por la fibra llegan al PMT ya es realmente complicado perder la señal.

La fuente elegida es Cs-137, el cual presenta una desintegración  $\beta^-$ , según el siguiente decaimiento



cuyos electrones emitidos en esta desintegración poseen una energía promedio de 512 keV [3]. Estos electrones no llegaremos a verlos pero tras esta desintegración el  $^{137}\text{Ba}$  se encuentra en un estado excitado y, por consiguiente, se desexcita en un tiempo de 153 segundos a partir de una desintegración  $\gamma$  cuyos fotones presentan una energía de 662 keV [3]. Estos son los fotones que llegarán a la fibra centelleadoras y que pretendemos utilizar para obtener la eficiencia del sistema. Hay que tener en cuenta que, debido al pequeño tamaño de las fibras centelleadoras, únicamente aspiraremos a detectar el valle compton de esta desintegración, es decir, no conseguiremos observar el pico debido al efecto fotoeléctrico. Este valle compton corresponde aproximadamente a un 10 % de las cuentas, es decir, únicamente aspiraremos a detectar una actividad de  $1,11 \cdot 10^4$  Bq. Si además tenemos en cuenta la eficiencia de los PMTs y de las fibras centelleadoras, 30 % y 3 % respectivamente, únicamente aspiraremos a detectar una actividad de  $99,9$  Bq  $\approx 1 \cdot 10^2$  Bq

A continuación, de forma similar al caso del tritio, mostramos el espectro medido con el prototipo y la fuente de Cs-137.



**Figura 27** – Histograma energético de la señal del prototipo con fuente de Cs-137 y del fondo superpuestos y señal únicamente debido al Cs-137.

En este espectro podemos ver que se ha medido una señal con una actividad ligeramente inferior a 0,3 Bq. Vemos que se trata de aproximadamente 3 órdenes de magnitud por debajo de lo que esperaríamos detectar.

Por tanto procedemos a calcular el ángulo sólido para verificar que su valor podría explicar esta diferencia. Para ello, por un lado suponemos que únicamente tienen aportación a la señal los fotones los cuales llegan directamente de la fuente y justo en la cara final del bunch son absorbidos por las fibras centelleadoras y reemisidos ya que, por un lado, debido al efecto de la eficiencia de fotodetección de los PMTs, los fotones de 662 keV que llegan al PMT no tendrán aportación significativa y, por otro lado, debido al ángulo sólido, los que se absorben a

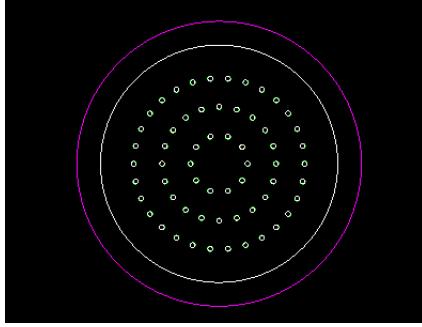
una distancia mínima de la cara final tampoco tendrán aportación. Además tenemos en cuenta que la fuente se ha situado sobre la parte central de la U y debajo de la estructura de acero que sujeta el prototipo (fig. 20). Con todo esto el ángulo sólido calculado es aproximadamente  $2,845 \cdot 10^{-3}$ .

Vemos que este ángulo sólido justo nos aporta la diferencia de tres órdenes de magnitud que necesitamos. Tomando por válido nuestro argumento obtendríamos una señal máxima de 0,284 Bq, el cual vemos que se acerca de forma casi perfecta al valor esperado.

Por tanto, aunque no hayamos comprobado que la perdida de señal sea debido al caso del ángulo sólido vemos que es esta hipótesis se ajusta perfectamente a los resultados. Las mínimas desviaciones podrían ser debido a que se ha considerado que únicamente aportan a la señal los fotones reemitidos justo en la cara final. Esto ha sido una aproximación para realizar un rápido cálculo pero realmente también tendrán aportación los fotones reemitidos a una distancia del orden del milímetro o inferior, lo cual se traduciría en un ligero aumento del ángulo sólido y por tanto, de la señal detectada. Este hecho podría explicar perfectamente el resultado obtenido en esta prueba de verificación. La prueba que nos confirmará en último lugar que lo ocurrido ha sido realmente esto serán las simulaciones realizadas sobre el experimento.

## 5. Simulaciones

Finalmente presentamos en este último punto las simulaciones realizadas sobre el experimento. Estas han sido desarrolladas sobre un código bastante avanzado sobre el que se han realizado una serie de modificaciones. Pretenden simular un prototipo del detector rectilíneo a diferencia del nuestro que presenta forma de U. Una imagen transversal del prototipo puede verse reflejado en la figura 27.



**Figura 28** – Imagen transversal del prototipo

Está formado por un cilindro externo de teflón de radio interno 2,5 cm, medio centímetro de grosor y una longitud de 80 cm dando lugar a un volumen interno de 1,1781 l. En su interior residirán 60 fibras centelleadoras dispuestas formando 3 círculos según la imagen 27. El círculo interno, con un diámetro de 6 mm, contendrá 10 fibras, el círculo intermedio, con un diámetro de 12 mm, contendrá 20 fibras y el círculo externo, con un diámetro de 18 mm contendrá 30 fibras. El volumen efectivo interno (descontando el volumen ocupado por las fibras) será de 1,1498 l, volumen que en la práctica será ocupado por el agua tritiada.

Las fibras que se han simulado pretenden ser las utilizadas hasta el momento, fibras centelleadoras BCF-12 de un milímetro de diámetro pero con longitud de 60 centímetros. En los 20 centímetros del cilindro de teflón que no están ocupados por las fibras centelleadoras (10 cm a cada lado) se pretende situar los PMTs o, en su defecto, los SiPMs para detectar los fotones que reciban de las fibras. Ambos lados estarán separados por una ventana de quarzo que permita el paso de los fotones y no del agua destilada ya que ninguno de los contadores de fotones que utilizarán en este experimento puede encontrarse en contacto con el agua en ningún momento.

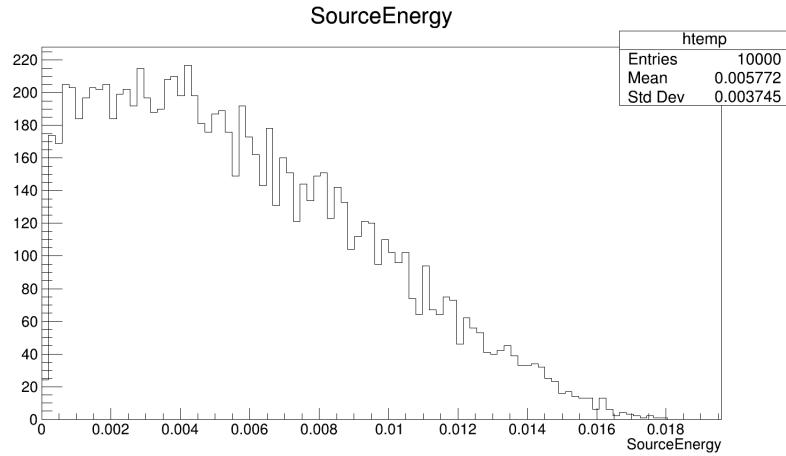
La simulación describe la emisión de una fuente de tritio que en la práctica se encontrará cubriendo por completo el volumen libre del interior del cilindro de teflón pero, con el objetivo de agilizar las simulaciones, solo ha sido necesario implementar un interior de aire y unos cilindros de agua tritiada de 50  $\mu\text{m}$  de grosor alrededor de cada fibra centelleadora. Debido a que el recorrido libre medio de los electrones en el agua es 5  $\mu\text{m}$  ambas situaciones son análogas.

Hay que tener en cuenta que los resultados presentados de estas simulaciones únicamente describen los electrones detectados en las fibras y la posterior conversión de estos en fotones. En esta simulación no se ha implementado el posterior tratamiento de la luz, por lo que todavía no podemos justificar la importancia de la pérdida de luz discutida en la sección 4.4.

Los resultados obtenidos para una simulación de 10000 eventos se muestran a continua-

ción:

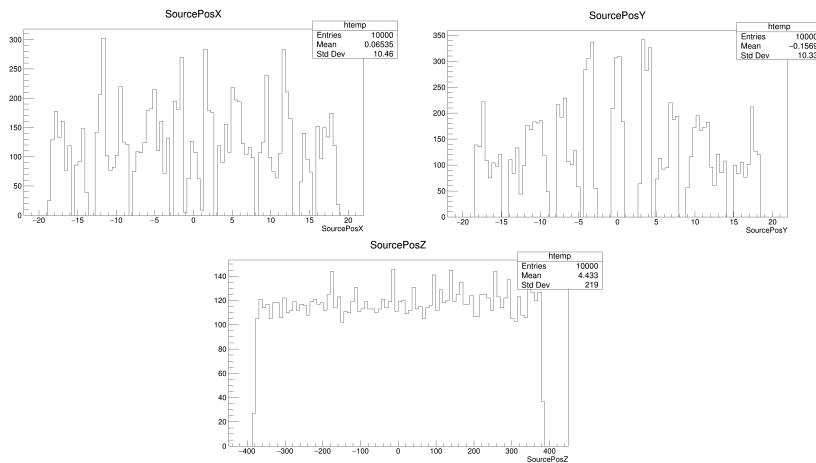
1. En primer lugar se ha realizado un histograma energético de los electrones emitidos en la desintegración del tritio, el cual se muestra en la imagen 28.



**Figura 29** – Espectro simulado de los electrones procedentes de la desintegración del tritio (Escala en MeV)

Podemos ver que se trata de un espectro que se ajusta perfectamente al espectro teórico, fig. ???. Para conseguir un espectro más suave será necesario realizar una simulación con un mayor número de eventos, para lo cual será necesario acceder al centro de cálculo del IFIC para disponer de una mayor potencia de computación.

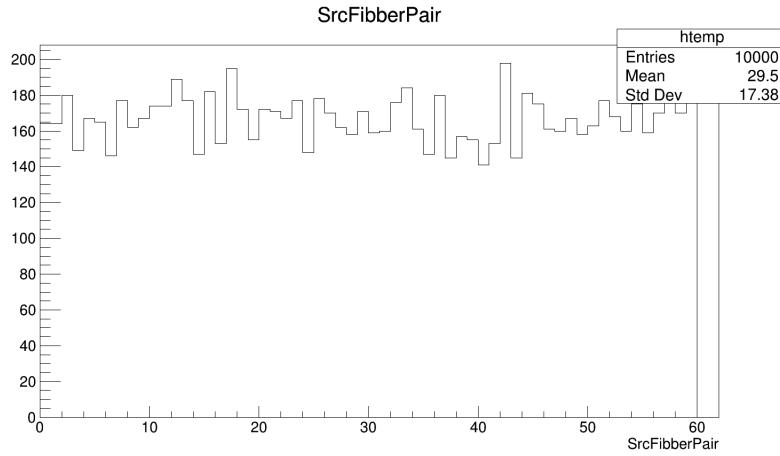
2. Seguidamente se realizó un histograma de la posición de la fibra en la cual se había detectado el suceso. Este se muestra en la siguiente figura en la que se muestran tres imágenes asociadas a cada uno de los ejes espaciales.



**Figura 30** – Histograma espacial de la posición de detección de los electrones en las fibras

En los ejes X e Y puede apreciarse una detección más o menos uniforme en los puntos espaciales donde se encuentran situadas las fibras y, en el eje Z puede apreciarse una detección totalmente uniforme a lo largo de la longitud de las fibras. Este es un resultado que deberíamos esperar ya que se ha simulado una fuente de actividad uniforme y constante en el tiempo.

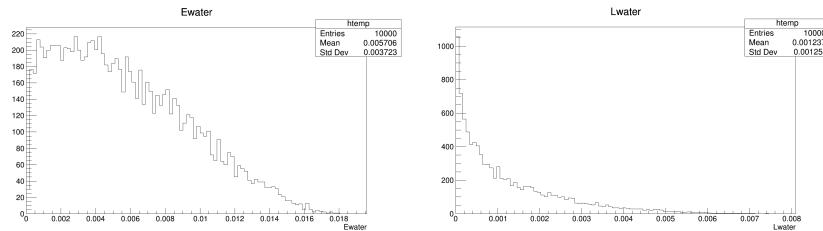
3. Se ha asignado un número del 1 al 60 a cada una de las fibras y se ha realizado un histograma del número de eventos que se han detectado en cada una de ellas. Este se muestra en la figura 30.



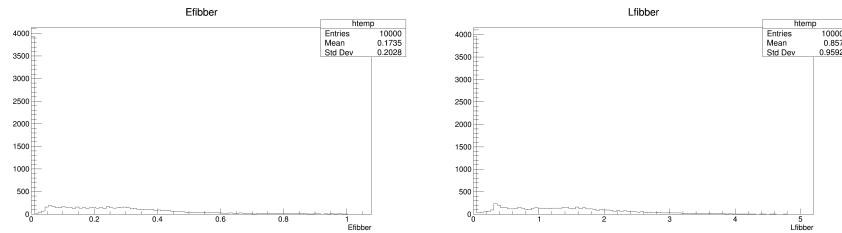
**Figura 31** – Histograma de sucesos sobre cada fibra

Podemos observar de nuevo que se trata de una deposición uniforme sobre las fibras. Todas han detectado aproximadamente el mismo numero de eventos, algo que de nuevo deberíamos esperar.

4. Seguidamente se ha obtenido el espectro de energía depositada en el agua y en las fibras además de las longitudes recorridas en ambos medios por los electrones del tritio. Ambas se muestran en las figuras 31 y 32 respectivamente



**Figura 32** – Histograma energético y espacial de los electrones absorbidos en el agua



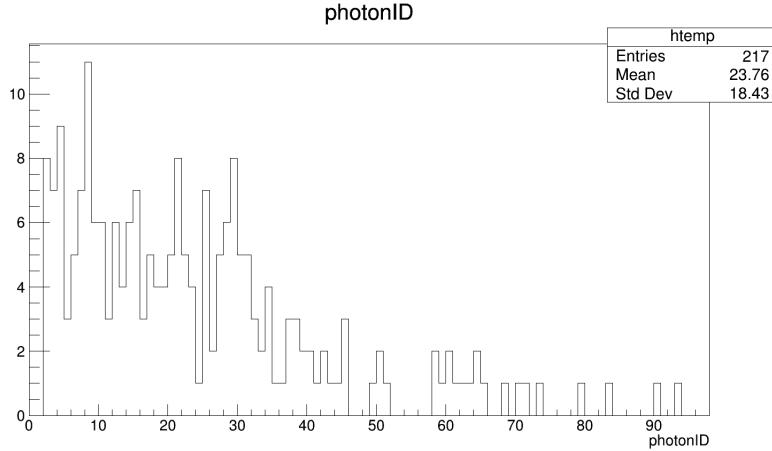
**Figura 33** – Histograma energético y espacial de los electrones absorbidos en las fibras

En la figura 31 podemos observar que la energía depositada presenta un espectro típico de una desintegración  $\beta$  y la longitud recorrida por los electrones presenta un decaimiento exponencial, función que, teóricamente, describe el fenómenos de atenuación,  $N = N_0 \exp(-x/\lambda)$ .

Podemos observar por tanto que el programa esta simulando correctamente la absorción de

tritio en el agua. Algo similar ocurre en la imagen 32 pero en estos histogramas no puede apreciarse debido a limitaciones que presentaba el código desarrollado.

- Finalmente se ha obtenido un histograma del número de fotones reemisidos en cada detección del tritio. Este se muestra en la imagen 33.



**Figura 34** – Histograma del número de fotones reemisidos en una detección

Dado que existe una equivalencia entre la energía de la partícula detectada en la fibra y el número de fotones que esta reemite deberíamos esperar un espectro similar a una desintegración  $\beta$ , fig. ???. Podemos observar que, efectivamente, se cumple.

Hay que tener en cuenta que solo han sido detectados y transformados en luz 217 eventos. Vemos por tanto que el espectro queda muy poco definido. De nuevo, para una mayor suavidad del espectro será necesario acceder al centro de cálculo del IFIC para disponer de una mayor potencia de computación.

Vemos por tanto que se ha realizado una simulación cuyo funcionamiento ha sido verificado. El siguiente paso sera desarrollar la parte del tratamiento posterior de la luz tanto a través de las fibras como su detección en el contador de fotones. De esta forma podremos comprobar la importancia del guiado en las fibras centelleadoras.

## 6. Previsiones de futuro

Como ya se ha mencionado durante todo el trabajo, este dispositivo es un prototipo. La forma de proceder de *Tritium*, y en general de un experimento, es realizar todas las medidas posibles sobre este y, cuando ya no podamos obtener más información, fabricar un nuevo prototipo que supere las limitaciones encontradas en el anterior. Nuevamente, realizar la misma labor sobre el siguiente prototipo. Se considerará que se ha llegado al diseño final cuando hayamos llegado al objetivo final del proyecto *Tritium* (detectar actividades del orden de cientos de  $Bq/L$ ) o ya no podamos aplicar mejoras para conseguir una optimización del sistema de detección y poder, de esta forma, detectar niveles de actividades más bajas.

Según se ha calculado realizado en la sección 4,4 nuestro dispositivo presenta una actividad aproximada de  $108,11 \text{ MBq}/L$ . Podemos observar que todavía estamos lejos del límite actual [4], por lo que, según se ha explicado, el siguiente paso es pasar a diseñar una nueva versión del prototipo.

Hay que tener en cuenta que aun podemos realizar una serie de medidas sobre el prototipo, tales como el cálculo de su eficiencia de fotodetección, los cuales nos permitirá determinar otras posibles mejoras que serán implementadas en el siguiente prototipo. Es importante obtener el máximo de información de cada prototipo para poder incluir una mayor optimización en la siguiente versión y, de esta forma, necesitar un menor número de prototipos para llegar al diseño final (abaratando de esta forma el proceso de I+D).

A pesar de que todavía se realizarán más medidas sobre el prototipo final ya se han encontrado ciertas limitaciones de este prototipo que serán subsanadas en la siguiente versión. Estas se citan a continuación:

1. En primer paso será la realización de medida con los SiPM con los que se realizó la calibración (Sec. 3) ya que recordemos que el prototipo utilizado hasta el momento únicamente ha utilizado PMT. El punto más importante de la sustitución de los PMTs por los SiPMs será la obtención de una mayor eficiencia del sistema, ya que los PMTs poseen una eficiencia bastante inferior, 30 %, en comparación con los SiPMs, 50 %.

Para poder depositar de forma segura los SiPM sobre el prototipo sera necesario el diseño de nuevas piezas de sujeción ya que las actuales (Fig. 21) estaban específicamente diseñadas para la sujeción de los PMT.

2. Hay que tener en cuenta que se utilizaron los SiPM modelo S13360-1375CS de hamamatsu (Sec. 3,1). Estos se utilizaron de forma provisional ya que son los que estaban disponibles en el laboratorio de reacciones nucleares y su espectro de PDE cumplía con los requisitos del proyecto (Fig. 8). Además estos 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, superficie total activa de  $6 \times 6 \text{ mm}^2$ , y, por extensión, mayor número de pixels (6000). Este mayor número de pixels repercute en un mayor rango

dinámico. Además estos SiPM son de tipo PE, es decir, presentan unas 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.

Dado que estos tienen que ir dispuestos sobre la tarjeta final del prototipo retrasaremos su utilización y, por el momento, realizaremos todas las pruebas sobre los SiPM actualmente utilizados ya que ambos presentan exactamente las mismas características en casi todos los aspectos.

3. En tercer lugar se pretende sustituir la tarjeta conversora (Sec. 3,2), tarjeta reciclada de un proyecto anterior, por una tarjeta especialmente diseñada para nuestro fin o un fin similar. Antes de empezar a diseñar esta tarjeta busquemos más necesidades que puede presentar nuestra tarjeta para poder ser implementadas todas en el siguiente prototipo.

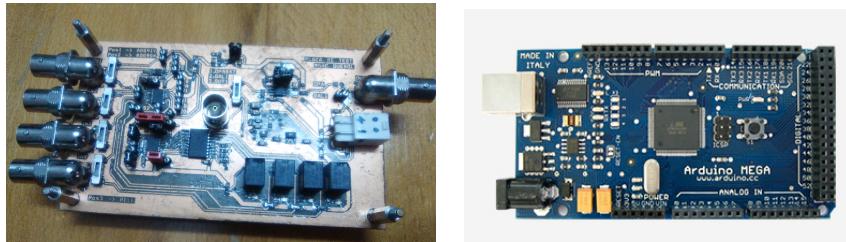
Por un lado, uno de los pilares fundamentales del proyecto *Tritium* será crear un proceso de automatización que compense las variaciones de la ganancia debidas a cambios en la temperatura con variación voluntaria de la ganancia debidas a cambios en el voltaje operacional (Sec. 3,6).

Por otro lado, el diseño final del detector que pretende desarrollar el proyecto *Tritium* presenta un gran número de bunch de fibras centelleadoras, a priori es desconocido y que habrá que calcular con ayuda de simulaciones, y, por extensión, necesitaremos un gran número de SiPM en las terminaciones de cada extremo de estos bunch. Debido a ello nos encontramos con la necesidad de desarrollar un proceso de automatización de la calibración de los SiPM.

Por todo ello la tarjeta que será diseñada para el segundo prototipo deberá de ser capaz de reproducir estas labores de automatización. Para empezar con el diseño a pequeña escala de este proceso de automatización se utilizará una tarjeta que solo contiene cuatro posibles entradas (cada una de las cuales estará asociada a un SiPM). Además dispone de varios caminos para realizar esta automatización (por medio de relés o multiplexores) y dispone de la posibilidad de obtener la señal amplificado o no. Esta nos permitirá determinar cual de todos estos caminos ofrece menos cross talk entre señales y, por extensión, mejores resultados. La tarjeta utilizada se diseña en el IFIC para el proyecto NEXT-100 cuyo proyecto presenta unos requisitos muy similares a los nuestros [36]. Esta tarjeta puede verse en la figura 35 izquierda.

Habrá que familiarizarse con el programa LabView, programa elegido para desarrollar el código de automatización ya que cumple con todos los requisitos impuestos por el proyecto, disponemos de trabajos anteriores muy similares a nuestro proyecto realizados con este programa por compañeros del IFIC y, además, el IFIC posee licencia para su uso. También habrá que familiarizarse con el uso de algún tipo de microcontrolador capaz de realizar esta labor de automatización. En concreto se utilizarán Arduinos ya que son rápidos, eficaces y económicos. El arduino utilizado, Arduino Mega, puede verse reflejado en la figura 35 derecha.

Lo más importante de esta tarjeta es que por un lado realiza el proceso de automatización y, por otro, nos permite interaccionar con todas las partes importantes de nuestro experimento, tales como fuente de tensión de alimentación de distintos componentes del sistema, osciloscopios, etc, a partir de un programa llamado LabView.



**Figura 35** – Tarjeta de automatización y Arduino Mega

Como ya se ha mencionado anteriormente esta tarjeta formará parte de un prototipo. El diseño final 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 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.

4. En cuarto lugar también habrá que proceder a contrucción de un clad para las fibras centelleadoras a partir del proceso de deposición de aluminio por evaporación en vacío el cula se realizará en el ICMOL, tema discutido en la sección 4,4.
5. En quinto lugar se ha visto que la medida obtenida del prototipo presenta una gran cantidad de ruido por lo que será un paso importante conseguir electrónica de bajo ruido en un futuro para poder seguir reduciendo la actividad del prototipo y que podamos distinguir esta señal del fondo.
6. En sexto lugar habrá que terminar las simulaciones incluyendo el posterior tratamiento de la luz tras su emisión en las fibras centelleadoras, tema que nos permitirá evaluar la importancia del guiado de luz en las fibras centelleadoras, tema discutido en la sección 4,4.
7. En séptimo lugar se desarrollará un segundo prototipo con una forma diferente ya que se vio que, aunque la forma de U sea la más segura para evitar posibles fugas, no es la más eficiente. En principio, los primeros diseños apuntan a un segundo prototipo rectilineo similar al de las simulaciones ya que, aparentemente, es el diseño en el que tendremos una menor pérdida por ángulo sólido.
8. En último lugar se pretende desarrollar un sistema de control de temperatura para disponer de este en el laboratorio de reacciones nucleares. Para ello se contruirá una caja de algún material térmicamente asilante, por ejemplo poliespán, en el interior de la cual residirá nuestro foco frío y caliente. El foco frío consistirá en una resistencia térmica unida a un ventilador de 12V y el foco frío consistirá en un aire acondicionado [37].

## 7. Conclusiones

El proyecto *Tritium* ha realizado un primer paso construyendo un prototipo en forma de U cuyo interior, con una capacidad de  $39\ ml$ , se ha llenado con una solución de agua tritiada con una actividad de  $108,11\ MBq/L$  (sec. 4,4).

Se ha conseguido obtener una señal del sistema a partir de la cual, mediante un tratamiento de datos *off-line* que incluye la extracción del background, se ha obtenido una señal de actividad debida únicamente tritio (fig. 26). Este nos permite comprobar que el prototipo funciona correctamente ya que es capaz de discernir la presencia de tritio a partir de su contribución a la actividad total (background).

Sin embargo se ha visto que el prototipo presenta una eficiencia muy lejos de la idónea lo cual nos produce una numerosa pérdida de cuentas y, por extensión, una medida de la actividad que presenta el agua tritiada de su interior muy inferior en comparación con su valor teórico.

Para comprobar hasta que punto es ineficiente nuestro prototipo se ha realizado una serie de estimaciones que nos han permitido determinar aproximadamente la actividad efectiva máxima que esperaríamos detectar con nuestro prototipo debido únicamente al agua tritiada, cuyo valor es  $215,03\ Bq$ . En esta estimación se han tenido en cuenta eficiencias tanto de las fibras como de los fotomultiplicadores.

Sin embargo, la actividad medida con nuestro prototipo es únicamente de  $0,013Bq$ , cuatro órdenes de magnitud por debajo del valor máximo. Podemos comprobar que se trata de una pérdida de cuentas realmente importante que produce un reordenamiento de prioridades en el proyecto ya que, de lo contrario, no podremos reducir la actividad del tritio en la muestra y seguir obteniendo señal.

Ahora, la mayor prioridad y, por tanto, el tema sobre que tratarán las siguientes modificaciones en el prototipo será obtener una mayor eficiencia. Para ello el primer paso es determinar el punto en el que se ha producido esta pérdida de la señal.

Se ha visto que un punto muy importante es el clad de la fibra, el cual permite una recolección eficiente de la luz. Debido a que las fibras utilizadas en el prototipo no presentan clad tenemos una gran pérdida de la señal en cada reflexión (94 %). Esto nos permite considerar que, aproximadamente, solo contribuirán a la señal los fotones reemisidos por la fibra en la dirección del ángulo sólido cubierto por las caras finales de cada fibra, es decir, el ángulo sólido cubierto por las caras finales de bunch.

A partir de una rápida estimación se ha visto que esto produce una considerable pérdida de cuentas llegando a factores del orden de  $10^{-4}$  o  $10^{-5}$  en distancias de apenas 2 o 4 cm respectivamente, valores que explicarían nuestra medida tan baja. Por tanto un primer paso en el siguiente prototipo será la utilización de fibras centelleadoras con clad.

El incluir clad en las fibras centelleadoras será un proceso difícil y bastante laborioso ya que actualmente Saint-Gobain únicamente ofrece clads comerciales de aproximadamente  $40\ \mu m$ , imposibilitando por completo su uso en este experimento ya que ningún electrón procedente de

la desintegración del tritio conseguiría cruzar el clad y aportar señal. Por tanto solo nos queda buscar algún método alternativo para obtener un clad.

Se está barajando la posibilidad de utilizar las instalaciones del ICMOL para realizar deposición de aluminio por evaporación en vacío, el cual nos permite llegar a grosos del orden de cientos de nanómetros o menos. Sin embargo habrá que realizar un estudio sobre la adherencia ya que recordemos que las fibras se encontrarán en todo momento sumergidas en agua tritiada y necesitamos que el clad presente una adherencia mínima para permanecer en la fibra. También habrá que ver cual es el material que utilizaremos para conformar el clad. Lo ideal sería utilizar un material plástico sin embargo no se trata de una técnica estudiada para utilizar materiales no metálicos por lo que el hecho de hacerlo nos puede conducir a problemas.

También es visto la necesidad de cambiar la forma del prototipo ya que, de la forma actual, forma de U, la parte del bunch de fibras (aproximadamente el 33 %) no contribuye a la señal ya que necesita un número excesivo de reflexiones para llegar al PMTs y, en cada una de estas existirá siempre una mayor o menor pérdida de la señal.

Por tanto, de todo también esto podemos ver que un punto decisivo será avanzar en las simulaciones para determinar el grosor y el material del clad, el diseño del prototipo, etc que optimicen la señal obtenida por el sistema. También nos permitirá estar preparados para superar de la mejor forma futuros problemas que nos encontraremos.

En último lugar también se han comentado futuros cambios que ya se están estudiando pero cuya importancia es menor y podemos aplazar para un futuro tales como la automatización del sistema, utilización de electrónica de bajo ruido, etc.

## Agradecimientos

En la realización de este trabajo he recibido ayuda de diferentes personas y me gustaría agradecer a todos estos el haber utilizado parte de su tiempo en mi.

En primer lugar quería agradecer a mis dos tutores, Jose Díaz y Nadia Yahlali, el intentar transmitirme en todo momento tantos conocimientos como les ha sido posible,iendo en muchas ocasiones más allá de los conocimientos correspondientes a este trabajo. Por facilitarme cualquier tipo de herramienta o material que agilizase mi proceso de aprendizaje o mi trabajo. Agradecer en concreto que me haya facilitado las medidas de calibración de los PMTs utilizados en el prototipo además de ciertas macros de ROOT, desarrolladas por ellos mismos, que me sirvieron como base para el desarrollo de las macros que se utilizaron en este trabajo. También por informarme acerca de muchas de las herramientas de las que se dispone en el laboratorio y, en general, de las que dispone el IFIC, algunas de los cuales no eran necesarios para el desarrollo del TFM. Por utilizar gran parte de su tiempo en ayudarme a solucionar muchos de los problemas que me han ido surgiendo en el laboratorio. Finalmente agradecer el haberme incluirme en todo tipo de procesos referidos al proyecto *Tritium*.

En segundo lugar agradecer a los ingenieros electrónicos de laboratorio que, apesar de

no disponer de tiempo libre, intentar ayudarme en cualquier duda que tuviese sobre el equipo electrónico o intentar facilitarme material que necesitase y a Carlos Acevedo, de la universidad de Aveiro, Portugal, por ayudarme en el aprendizaje de la programación con Geant 4, facilitarme el programa de simulación con un diseño rectilineo del prototipo y resolverme cualquier duda acerca de las simulaciones o la programación.

Finalmente agradecer a los investigadores del IFIMED que nos prestasen su tiempo e instalaciones para desarrollar la calibración de los SiPM y a Teresa Cámara y a Rosa Carrasco por realizar la disolución radiactiva, el proceso de llenado de esta en el prototipo y por facilitarme cualquier tipo de material o ayuda que necesitase.

## Referencias

- [1] A. TARANCÓN, H. BAGÁN, G. RAURET, J.F. GARCÍA, *Comprative study of pre-treatment procedures for  ${}^3\text{H}$  monitoring in water samples from environmental protection programs*
- [2] ZOLTÁN KÖLLO, *Studies on a plastic scintillator detector for activity measurement of tritiated water*
- [3] RICHARD B. FIRESTONE y VIRGINIA S. SHIRLEY, *Table of Isotopes*
- [4] M. RATHNAKARAN, R.M. RAVETKAR, M.C. ABANI, *A Real-time Tritium-In-Water Monitor for Measurement Of Heavy Water Leak To The Secondary Coolant*
- [5] MASAO MATSUYAMA, KENICHI TAKATSUKA, MASANORI HARA, *Sensitivity of a specially designed calorimeter for absolute evaluation of tritium concentration in water*
- [6] YUJI HATANO, MASANORI HARA, HIROKO OHUCHI-YOSHIDA, HIROFUMI NAKAMURA, TOSHIHIKO YAMANISHI, *Measurement of tritium concentration in water by imaging plate*
- [7] N.P. KHERANI, *An alternative approach to tritium-in-water monitoring*
- [8] M. HERRANS, N. ALEGRÍA, R. IDOETA, F. LEGARDA, *Sampling tritiated water vapor from the atmosphere by an active system using silica gel*
- [9] C. BRAY, A. PAILLOUX, S. PLUMERI, *Tritiated water detection in the  $2.17 \mu\text{M}$  spectral region by cavity ring down spectroscopy*
- [10] S. AGOSTINELLI ET AL., Geant4 - A Simulation Toolkit, Nuclear Instruments and Methods **A 506**(2003) 250-303.
- [11] J. ALLISON ET AL., Geant4 Developments and Applications, IEEE Transactions on Nuclear Science **53** (2006) 270-278
- [12] J. ALLISON ET AL., Recent Developments in Geant4, Nuclear Instruments and Methods **A 835** (2016) 186-225.
- [13] K.W. JANG, D.H. CHO, W.J. YOO, J.K. SEO, J.Y. HEO, J.-Y. PARK, B. LEE, *Fiber-optic radiation sensor for detection of tritium*

- [14] ALBERTO SOLER CAMBRA, *Protocolo de preparación y caracterización de fibras centelladoras para el detector tritium*
- [15] M<sup>A</sup> VICTORIA CASTILLO GIMENEZ, *Instrumentación nuclear*
- [16] SAINT-GOBAIN CRYSTALS, *Scintillating Optical Fibers*
- [17] DAVID SÁEZ-RODRÍGUEZ, KRISTIAN NIELSON, OLE BANG, DAVID JOHN WEBB, *Simple room temperature method for polymer optical fibre cleaving*
- [18] S.H. LAW, J.D. HARVEY, R.J. KRUHLAK, M. SONG, E. WU, G.W. BARTON, M.A. VAN EIJKELENBORG, M.C.J. LARGE *Cleaving of microstructured polymer optical fibres*
- [19] JOEL S. GEARHARD, *Investigation of BCF-12 plastic scintillating coherent fiber bundle timing properties*
- [20] THORLABS, *Guide to connectorization and polishing optical fibers*
- [21] ALEJANDRO SÁNCHEZ LÓPEZ, *Estudio de las propiedades de los fotomultiplicadores de silicio (SiPM)*
- [22] GABRIELA LLOSÁ, JOSEP F OLIVER, *Aplicaciones médicas en física nuclear y de partículas*
- [23] HAMAMATSU, *MPPCs (Multi-Pixel Photon Counter) for precision measurement*
- [24] KARINA ASMAR, *Control de la dependencia en la temperatura de la ganancia de los detectores de silicio de radiacion (SiPM) mediante la tensión de polarización*
- [25] DAVID LORCA GALINDO, *SiPM based tracking for detector calibration in NEXT*
- [26] DYCOMETAL, <http://www.dycometal.com/>
- [27] ROITHNER LASERTHECHNIK, *LED435-03 Blue LED Lamp*
- [28] HAMAMATSU, *MPPC (Multi-Pixel Photon Counter): Technical Information*
- [29] DANILO PIPARO, GÜNTER QUAST, MANUEL ZEISE, *A ROOT Guide For Students "Diving Into ROOT"*
- [30] MIROSLAV MORHÁČ, *Processing and Visualization Functions*
- [31] FERNANDO HUESO GONZÁLEZ, *Informe de las prácticas externas: Calibración de SiPM del plano de trazas del detector NEXT1-EL*
- [32] JOSE DÍAZ MEDINA, *Protocolo de manipulación de la fuente radiactiva de tritio*
- [33] ANDRÉS BATALLER MARTÍ, *Medidas de la eficiencia luminosa de fibras centelleadoras para el diseño de detectores de dosimetría médica*
- [34] JOSÉ M. GARCÍA-BONDÍA, *Asignatura Cálculo integral y geometría*
- [35] NADIA YAHLALI, L.M.P. FERNANDES, DAVID LORCA GALINDO, *Characterization of UV-enhanced SIPMs for Imaging in a High Pressure Xenon Electroluminescent TPC*

- [36] MARC QUEROL SEGURA, *Sistema de test para la caracterización de los fotomultiplicadores de silicio de la cámara de proyección tempral NEXT-100*
- [37] LUIS VILLARREAL RAMÍREZ, *Construcción y prueba de un cámara térmica para caracterizar un gamma-detector (SiPM). Construction of a climatic chamber to test the thermal behavior of a SiPM detector*