PRESENTACIÓN

Hola, me llamo marcos martinez y voy a proceder a exponer mi trabajo denominado “Diseño de un detector de aguas tritiadas basado en fibras centelleadoras leidas por SiPM”

ÍNDICE

Se ha estructurado el trabajo de la siguiente forma:

* Al principio realizare una pequeña introducción donde hable de:
  + Las propiedades que presenta el tritio,
  + De cómo se detecta en la actualidad y como pretendemos detectarlo en nuestro experimento y
  + Del esquema de trabajo seguido
* A continuación se expondrá el protocolo elaborado para la manipulación de las fibras centelleadoras, elementos más sensible del detector.
* Seguidamente se presentará la calibración realizada sobre los SiPM. En esta hablaremos de:
  + El equipo utilizado y el montaje experimental que se elaboró para realizar esta labor,
  + Del análisis de datos empleado para la determinación de la ganancia de los SiPM.
  + De cómo depende este de la temperatura
  + Y del voltaje operacional
  + Y finalmente se expondrá el método desarrollado para la estabilización de la ganancia de un SiPM.
* Después hablaremos del primer prototipo construido por el proyecto tritium en el cual explicaremos en que consiste:
  + Su configuración,
  + El procedimiento que se tuvo que desarrollar para proceder al llenado de la solución radiactiva de forma segura.
  + También mostraremos la configuración electrónica que se dispuso para el tratamiento de la señal del detector
  + Y terminaremos mostrando los resultados obtenidos.
* En último lugar mostraremos las simulaciones realizadas en el experimento,
* Las previsiones de futuro a corto y largo plazo del proyecto tritium y
* Las conclusiones alcanzadas

INTRODUCCIÓN

Actualmente la energía nuclear es imprescindible ya que, aunque existen otras fuentes de energía, ninguna es capaz de proporcionar los niveles de energía actualmente consumidos por la humanidad. Sin embargo, como la propia historia ha mostrado, se trata de un tipo de energía peligrosa y que debe de ser controlada tanto como sea posible.

Una central nuclear se caracteriza por una gran estabilidad y, por tanto, una emisión constante de isótopos radiactivos. Una forma de controlar el funcionamiento de una central nuclear sería controlar las emisiones. Cualquier variación de estas sería una de las principales señales de alerta de mal funcionamiento de una central nuclear. Una central nuclear operando en modo normal puede llegar a emitir alrededor de 300 TBq/GWy. Entre estos esta el Tritio, que se produce por captura neutrónica en el agua utilizada en los circuitos de refrigeración.

Es importante detectar este porque:

* Advierte de un exceso de neutrones,
* Esta agua de refrigeración son posteriormente vertida a los ríos y empleada para el consumo humano. Existe un límite, actualmente impuesto por la comunidad europea, para considerar un alimento apto para el consumo
* Existe ríos que comunican diferentes países.
* No se ha conseguido llegar al kBq en tiempo cuasi-real.

De todas estas razones surge el proyecto Tritium, compuesto por 6 centros de 3 paises, Francia, Portugal y España.

PROPIEDADES DEL TRITIO

El tritio es el tercer isótopo del hidrógeno, formado por un protón y dos neutrones. Los principales canales de formación del tritio se producen por captura neutrónica del Litio o el deuterio, que surge de la captura neutrónica del hidrógeno.

El tritio es un elemento radiactivo con un periodo de semidesintegración de 12.32 años. Es un emisor beta menos de baja energía que se desintegra según la siguiente ecuación. Estos electrones poseen este espectro de desintegración, típo espectro beta menos.

Este posee una energía máxima de 18.6 keV, una energía promedio de 5.7 keV, un valor más probable de 4.5 keV. La energía de radiación del tritio es la más pequeña observada en un isótopo. Debido a ello estos solo recorres en promedio entre 3 y 5 mm en aire y entre 5 y 6 micrometros en un material y este será el principal problema para su detección. Además hay que tener en cuenta que el helio se encuentra en un estado excitado tras la desintegración y este se desintegra dando lugar a un espectro adicional de RX superpuesto a este espectro.

DETECCIÓN DEL TRITIO

El problema actual se encuentra en que los métodos de detección y monitorización del tritio utilizados en la actualidad son lentos o presentan un alto umbral de detección. Entre los métodos más empleados hoy en día se encuentra el método de centelleo líquido, que es el más indicado para la detección de partículas beta con energías tan baja.

Este consiste diluir una muestra, habitualmente al 50%, con el líquido centelleador y medir los fotones emitidos por el mismo. El problema se encuentra en que no se trata de un método portátil y, por tanto, se necesita transportar la muestra al laboratorio dilatando el proceso hasta varios días. Además el líquido centelleador utilizado ya no puede ser reutilizado porque es inseparable en la disolución y este presenta tolueno, elemento peligroso y que debe ser tratado con las correspondientes medidas de seguridad.

ESQUEMA DE TRABAJO

El objetivo final será desarrollar un detector que permita la monitorización de aguas tritiadas in situ en tiempo cuasi-real. Este no necesitará de la presencia de personal, solo requerirá continuas calibraciones que aseguren el buen funcionamiento del mismo.

Las principales limitaciones naturales se encuentran en que

* se trata de una desintegración de muy baja energía, esto implica que la partícula recorrerá muy poco espacio antes de desaparecer.
* Queremos llegar a detectar actividades realmente bajas, esto implica que tendremos muy pocas cuentas por segundo, por lo que necesitamos optimizar tanto como podamos la eficiencia del sistema. El objetivo de esta actividad pequeña es conseguir que sirva para emitir mensajes de alarma cuando se supere el límite impuesto por la comunidad europea. Hasta la fecha solo se ha llegado a detectar decenas de kBq/L o unidades MBq/L. Las configuraciones empleadas para estos experimentos han consistido en solidos centelleadoras más PMTs. A diferencia, nuestro experimento consta de fibras centelleadoras, que poseen un mayor volumen activo y mayor abanico de posibilidades en cuanto a su estructura y SiPM que, fundamentalmente, poseen una mayor eficiencia de fotodetección y menor alimentación.

Hay que tener en cuenta que si existen proyectos que llegan a medir actividades del orden del Bq en 3 minutos por ejemplo un sistema formado por laser y cavidades espectroscópicas en forma de anillo. Sin embargo este es un proyecto totalmente diferente que no persigue un mismo fin.

En resumen en este trabajo estudiaremos por un lado cual es la mejor elección para la estructura de la fibra centelleadoras y estudiaremos la posibilidad de emplear SiPM en lugar de PMTs. Finalmente se realizaran simulaciones que corroboren y ayuden al entendimiento de resultados.

FIBRAS CENTELLEADORAS

El primer paso para monitorizar los niveles de tritio es detectar los electrones procedentes de su desintegración. Para ello utilizaremos fibras centelleadoras.

Una fibra centelleadoras consiste en un plástico dopado con materiales luminiscentes cuyas moléculas tienen un espectro energético similar al de la imagen, donde S son estados singlete y T triplete. Cuando una radiación ionizante, en nuestro caso los electrones, atraviesan el centelleador estas moléculas absorben su energía produciéndose una excitación de las mismas. En primer lugar se desintegran a los estados S\* y T0 por degradación interna (ps) y, a continuación se desintegran del S\* al S0 en un tiempo del ns. Esta segunda desexcitación, cuya longitud de onda esta entre 100 y 800 nm, es la denominada fluorescencia y es lo que se emplea como señal de respuesta de un material centelleador.

Las fibras empleadas fueron BCF-12 de Saint Gobain sin clad por sus parámetros.

Se vio necesario utilizar guantes. Además se diseño una guillotina para poder cortar las fibras de manera ópticamente aceptable. Esta pieza servía para sujetar y esta otra para cortar. Aquí se encontraba la cuchilla, ligeramente inclinada.

Con ayuda de un microscopio vemos como queda la cara de la fibra tras el corte. Esta presenta un buen acabado, sin roturas ni deformaciones. Sin embargo observamos una superficie ligeramente dañada. Para mejorar su aspecto final se vio necesario lijar la cara cortada con ojas de oxido de aluminio en forma de granos de distinto grosor. Podemos observar una mejor en el acabado de la cara. Se observo una rotura del clad inevitable pero su efecto era corregido por el empleo de grasa óptica en la cara final de la fibra (Además las fibras empleadas en el primer prototipo no tenian clad.)

Finalmente, con pegamento óptico, pegamos haces de 35 fibras en cuyo extremo se dispuso un anillo metálico que será de gran importancia en el prototipo. Finalmente volvíamos a pulir.

CALIBRACIÓN SiPM

A continuación se procede a leer los fotones reemitidos por la fibra centelleadora. Tritium apuesta por el uso de SiPM, los cuales poseen una mayor eficiencia de fotodetección en comparación con los PMTs. Los SiPM consiste en una matriz bidimensional formada por pixeles independientes, cada uno de los cuales funcionan como un APD, y que se encuentran alimentados en paralelo a un mismo voltaje tal que les permita funcionar en modo Geiger.

La señal típica de un SiPM es similar a esta, donde al activarse el modo persistencia puede reflejarse los diferentes números de pixels encendidos simultáneamente. Idealmente cada pixel encendido corresponde a la detección de un foton, lo cual nos permite utilizarlo como fotosensor para bajos niveles de luz. Poseen una serie de características que los permite diferenciarlos de los PMTs como…

Los SiPM son detectores de estado sólido y, por tanto, presetan ruido térmico, ruido que se verá amplificado por el hecho de trabajar en modo Geiger. Este se denomina cuentas ocuras y, dado que son amplificadas, dependen de todos los parámetros que afecten a la ganancia, tales como temperatura y voltaje.

El objetivo de esta sección será desarrollar un método de compensación de las variaciones ganancia del SiPM debidas a variaciones en la temperatura, inevitables en un medio no controlado tal como una central nuclear, futuro emplazamiento del detector. Estas se compensarán a partir de variaciones en la ganancia del SiPM debidas al voltaje operacional.

Se utilizará este modelo de hamamatsu debido a que presenta su máxima eficiencia de PDE aproximadamente en el pico de emisión de la fibra empleada.

EQUIPO Y MONTAJE EXPERIMENTAL

Para calibrar los SiPM se ha necesitado la siguiente instrumentación:

* Una cámara de control de temperatura, la cual se encontraba en el IFIMED, que permitía especificar la temperatura y humedad a la que trabajar con la condición que había que trabajar en todo momento en una zona delimitada del diagrama de estados para asegurar un correcto funcionamiento. Las incertidumbres determinadas fueron de 0.1 grados en la temperatura y 5% en la humedad y poseía un interior metálico que le permitía actual como jaula de fáraday. No actuaba como camará oscura, por lo que hubo que improvisar.
* Se utilizaros 2 generadores d etensión, uno para alimentar los SiPM y otro para alimentar una tarjeta conversora de intensidad en voltaje.
* Se utilizó un diodo LED que emitía fotones a 435 nm. Esta era la longitud de onda a la que nos interesa calibrar los SiPM ya que es la longitud a la que presenta el pico las fibras utilizadas.
* Se utilizo un generador de pulos para alimentar esta LED. Este nos permitió generar un pulso cuadrado con los parámetros adecuados para conseguir las condiciones idóneas.
* Se utilizo el SiPM anteriormente mencionado el cual presenta una ganancia de 4·10^6 a 3V de overvoltage y 25 ºC. Tiene 285 pixels de 75 micrometros cuadrasdos dando lugar a una superficie activa de 1.3\*1.3 mm^2
* Dado que los SiPM presentan intensidad a la salida se utilizó una tarjeta, la cual fue desarrollada para el proyecto NEXT, que posee una ganancia de 170 para convertir la señal en tensión.
* También, debido a TVV y la irregular toma a tierra que tiene el IFIC encontramos un ruido y, por tanto, se vio la necesidad de utilizar un filtro pasa banda.
* Finalmente, como se ha comentado anteriormente, el sistema de control de temperatura no actua como cámara oscura, por lo que hubo que utilizar una tela negra especial para apantallar la entrada de luz del exterior.
* En resumen tenemos un sistema de control de temperatura junto con la manta oscura en cuyo interior tenemos el dio led, que se ve alimentado por el generador de pulsos, el SiPM, que se ve alimentado por el generador de tensión Keithley y la tarjeta, que se alimenta con el ISO tech. La señal de salida de la tarjeta va al osciloscopio donde será analizada.

ANALISIS DE DATOS

Una vez en el osciloscopio, la señal que recibíamos es la señal amarilla que, como se ha comentado anteriormente, corresponde al distinto número de pixes encendidos. También se utilizo la señal de sincronización del generador de pulsos a modo de trigger que, básicamente, nos da el momento en el que empieza el escalón de tensión.

El objetivo ahora es calcular la ganancia del SiPM. Dado que solo existen dos ganancias en el sistema y conocemos la de la tarjeta podemos calcular la total y de esta obtener la del SiPM. Para calcular la ganancia realizamos una integral de área de la señal de salida del sistema y guardamos el resultado en un histograma. De esta forma se ha realizado un histograma de carga. La ventana temporal sobre la que se integra es de 500 ns. Idealmente los impulsos de cada pixel son iguales por lo que deberíamos encontrar un conjunto de deltas de dirac equiespaciadas. Sin embargo, debido a la naturaleza estadística de la casacada de pares e-h que se produce en el SiPM y a las incertidumbres de los instrumentos de medida encontramos un conjunto de gaussianas.

Finalmente pasamos a analizar el espectro de carga obtenido para calcular la ganancia.

Para ello desarrollamos una macro en ROOT que utiliza la librería TSpectrum, especialmente diseñada para el análisis de espectros.

* La macro primero lee el fichero y representa el histograma.
* Seguidamente busca el número de picos y su posición.
* A continuación ajusta todos los datos a una recta y solo se queda con las gaussianas cuya norma supera el valor de esta recat. Esto es debido a que, si hay mucho fundo, utiliza este como una gaussiana más.
* Ahora, con el número de gaussianas, ajusta el histograma a ese mismo número de gaussianas más una recta. La recta es por el hecho que siempre tendremos cuentas ocuras. Con este ajuste obtenemos posición, norma, sigma, resolución de cada gaussiana y además las ordena. En la línea roja podemos ver que se trata de un ajuste realmente bueno, lo cual se verifica con el parámetro xi cuadrado.
* Finalmente se calcula la ganancia. Este calculo puede realizarse por dos caminos.
  + Un primer camino la calcula como el promedio de las distancias entre gaussianas.
  + Un segundo camino ajusta el número de pixels encendidos frente al valor del centro del pico. Vemos que se trata de un ajuste realmente bueno, con errores inapreciables. Utilizaremos para el análisis este segundo método ya que se trata de un método de análisis de datos más correcto.

El resultado para cada uno de los caminos se muestra a continuación.

CALIBRACIÓN TEMPERATURA

Ahora procedemos a estudiar la dependencia de la ganancia del SiPM con la temperatura a la que se encuentra. Para ello nos centraremos en el intervalo entre 15 y 41ºC, que es la temperatura a la que se verá sometido en una central nuclear. Se realizarán pasos de 2 grados. Recordemos que en todo momento debemos encontrarnos en la zona 1 del diagrama de estados.

Para automatizar este proceso se ha desarrollado una macro en ROOT que realice el análisis anterior para cada fichero asociada a cada temperatura. Al final se representa las distintas ganancias obtenidas para cada temperatura con sus errores. El resultado puede verse a continuación, donde puede apreciarse que se trata de un buen ajuste, algo comprobado con el test xi cuadrado. Los valores obtenidos en el ajuste se muestran en la pantalla.

CALIBRACIÓN DEL VOLTAJE OPERACIONAL

Análogamente realizamos el mismo estudio frente al voltaje operacional. Se realizará el estudio entre el voltaje de break down y 5 voltios más, teniendo en cuenta que el voltaje de braeak down des 50.97V. Este intervalo es suficiente para el rango de temperaturas. Se realizaran pasos de 0.2 voltios.

Para automatizar el proceso se ha desarrollado una macro en ROOT análoga a la de la situación anterior. El resultado puede verse en la pantalla donde solo se pudo llegar hasta 51.57V. La medida de los casos de voltaje inferior no fue posible debido a que el SiPM no se encontraba totalmente inmerso en la región de comportamiento Geiger. De hecho vemos que las últimas medidas ya presentan una incertidumbre mayor. Vemos que se trata nuevamente de un ajuste aceptable, lo cual se verifica con el test xi cuadrado. Los valores numéricos se muestran en pantalla donde, además se calcula el voltaje de break down del SiPM a partir del ajuste. Este es el voltaje para el cual la ganancia es nula. Vemos que se acerca al valor teórico de forma casi perfecta.

ESTABILIZACIÓN DE LA GANANCIA

En último lugar, con la información obtenida, pasamos a desarrollar un protocolo de estabilización de la ganancia. Este será de vital importancia si queremos utilizar este detector a modo de alarma.

Las dos expresiones obtenidas de los ajustes anteriores se muestran en pantalla.

Tomamos las cantidades diferenciales de estas.

Queremos que la ganancia se mantenga constante a partir de una variación de ambas cantidades. Esto lo podemos expresar matemáticamente con esta ecuación, que nos dice que la variación de la ganancia debida a un cambio en la temperatura debe de ser igual y de sentido contrario a la variación que produzcamos en la ganancia debida a un cambio en el voltaje operacional. Sustituimos las expresiones anteriores y despajamos. Finalmente integramos en ambas magnitudes suponiendo a y c constantes. Realmente esto no es matemáticamente consistente ya que c puede depender de la temperatura y a del voltaje pero según estudios anteriores estos se mantienen aproximadamente constantes.

Por tanto llegamos a esta expresión donde, sustituyendo los valores numéricos, obtenemos esto.

Hay que tener en cuenta que intentamos mantener una ganancia constante y, por tanto, necesitamos una situación de referencia cuya ganancia se mantenga. En último lugar procedemos a la comprobación de este método de compensación.

La situación inicial que tomaremos de referencia es la utilizado en el apartado del análisis. Sustituyendo estos valores en la ecuación anterior llegamos a la expresión de la pantalla, que nos dice cual es el voltaje para una temperatura dada que nos mantiene la ganancia al valor anterior. Realizamos la medida en este intervalo en pasos de 2 grados. El resultado se muestra en la siguiente gráfica, donde se ha ajustado a una constante. Vemos que se trata de un ajuste realmente bueno, el cual se comprueba con el test xi cuadrado. Vemos que el valor del ajuste solo presenta un error relativo del 0.28% respecto al de la situación inicial. Vemos por tanto que el método funciona.

PROTOTIPO

Ahora que ya hemos hablado de cada una de las partes que contendrá nuestra versión final del detector procedemos a hablar del primer prototipo diseñado por Tritium. Su aspecto final se ve en la pantalla.

DESCRIPCIÓN DEL PROTOTIPO

En su diseño se tuvieron que tener en cuenta una serie de exigencias impuestas por el experimento.

* Por un lado debía de ser capaz de contener, de manera segura, un haz de 35 fibras centelleadoras sumergido en una solución de agua tritiada estanca.
* Tenia que permitir la comunicación entre las fibras y los fotosensores, los cuales debían de encontrarse aislados de la solución y
* Debía de ser capaz de sostener de forma segura todos los elementos del sistema.

Teniendo en cuenta esto el material que se eligió para la construcción del detector fue diversos elementos de fontanería de PVC por su seguridad, facilidad de manipulación, la existencia de muchas formas en el mercado y su precio económico. Se utilizó un tubo de PVC de diámetro interno 15 mm. Los distintos elementos eran unidos con ayuda de codos de 45 grados y las uniones se sellaron con soldadura química. La sujeción fue proporcionada por una estructura de metacrilato y acero que se fabricó en el taller de mecánica del IFIC. Este contenía un volumen interno de 39 mL. El prototipo diseñado presenta forma de U, forma que cumple con las exigencias y seguridades requeridas.

Las dos aperturas superiores se sellaron con 2 tapones:

* Un primer tapon circular de que contenía un orificio de 9.8 mm de diametro por donde pasarían las fibras para comunicar estas con el exterior y un segundo orificio de 1 mm para el purgado y
* Un segundo tapon que contenía los mismos orificios anteriores mas un tercer orificio de 8 mm el cual se utilizaría para llenar el prototipo. Este tapon se diseño cuadrado para facilitar el proceso de llenado..

Ahora es cuando entra en juego la tuerca que tenían en el extremos las fibras centelleadoras. Esta sirve de sujeción del haz de fibras al prototipo. Con todo esto el prototipo queda de la siguente forma.

Ahora solo necesitamos diseñar dos piezas que encajen en la parte superior de la U, cuya función sea la de sujetar los fotosensores y permitir la comunicación de estos con el haz de fibras. En la primera versión se utilizaron PMTs ya que tenemos una mayor experiencia con estos. Las piezas utilizadas se muestran en pantalla. Una simplemente encajaba en el tapon circular. La segunda no podía encajar en el tampón ya que era cuadrado. Este encajaba en la arandela de la terminación del haz de fibras y se atornillaba a la base de metacrilato.

Hay que tener en cuenta que este prototipo se dispuso en el interior de una cámara oscura que no permitía el control de la temperatura. En su defecto simplemente encendimos el aire acondicionado del laboratorio para mantener oscilaciones de la temperatura pequeñas y que, de esta forma, la ganancia no se vea afectada. Los parámetros de los PMTs utilizados se muestran en la pantalla.

LLENADO

Ahora procedemos a explicar el procedimiento de llenado. En primer lugar elaboramos la solución de agua tritiada. Para ello disponemos de una solución de agua tritiada de aproximadamente 2 gramos con una actividad específica de 26.8 MBq/g, actividad que permite tratarla como exenta, procedente de la empresa PTB de Alemania.

La solución patrón se creó diluyendo esta solución con 0.5 L de agua hiperpura, proporcionada por el laboratorio LAUREX de Cáceres. Con la solución preparada procedemos al llenado del prototipo, el cual se elaboró en la gammateca del IFIC.

* En primer lugar se dispuso el prototipo sobre una bandeja de plástico recubierto de material absorbente para evitar la posible contaminación de la sala.
* En segundo lugar se llenó una bureta con ayuda de un embudo y una pipeta
* Ahora, con la bureta llena de la solución patrón, se introdujo está en el prototipo según se ve en la imagen y se procedió al llenado del mismo.
* Finalmente se cerró y selló todos los orificios del prototipo y se trasladó este al laboratorio.

ELECTRÓNICA

Por tanto, únicamente nos resta proceder a la configuración de la electrónica para poder obtener la primera medida del experimento. El objetivo final será administrar esta señal a un analizador multicanal analógico para obtener un espectro energético. Para ello necesitaremos realizar una serie de transformaciones para que, por un lado, pueda ser analizada de forma adecuada por el MCA y, por otro lado, aprovechemos el rango del MCA (entre 0 y 5 V) en su totalidad. El esquema electrónico utilizado puede verse en la figura. El flujo de la señal es:

* Sacamos la señal de cada PMT del prototipo de la caja oscura con ayuda de puertos BNC que comunican a ambos lados de la caja.
* Seguidamente dividimos la señal de un PMT en 2 señales idénticas con un divisor activo.
* Ahora creamos 2 caminos:
  + Por un lado una de las señales del PMT que se ha duplicado se lleva a un preamplificador y, segudamente a un amplificador con una ganancia de 50, ganancia tal que nos permita aprovechar el rango del MCA.
  + Por otro lado con las dos señales restantes, una procedente de cada PMT, obtendremos la coincidencia, hecho que nos permitirá optimizar la señal sobre el fondo.
    - Para ello llevamos estas a un discriminador el cual solo emitirá una señal para cada señal de entrada si esta supera los 30 mV (en caso contrario suponemos que es fondo). La señal emitida tendrá forma de escalón y poseerá una altura de 800 mV y una anchura de 30 ns.
    - Seguidamente se llevan estas a un módulo de coincidencias, el cual emitirá una señal de escalon de altura un voltio durante el tiempo en el que las señales de entrada coinciden.
  + Estas pueden verse en la siguiente imagen, donde tenemos la señal de un PMT, con el undershot que la caracteriza, la señal de salida del discriminador para cada señal y la señal de coincidencia.
  + Seguidamente pasamos esta señal a un módulo Gate and Delay generator que crea una señal de 2 Voltios de altura y de una anchura variable cuando recibe una señal de entrada. También se puede aplicar un retraso sobre esta señal. Esta es la señal que utilizaremos como gate, es decir, es la señal que nos dira cuando tomar la medida, por lo que su anchura y retraso deben de ajustarse a la diferencia de caminos de la señal 1 (obtenida con el preamplificador y amplificador) para que caiga dentro. Esto puede verse en la siguiente imagen.
* Finalmente pasamos estas dos señales al MCA, que tiene la posibilidad de simplemente crear un espectro con la señal 1 o utilizar la 2 como gate.

RESULTADOS