

# Informe de las prácticas externas: Calibración de SiPM del plano de trazas del detector NEXT1-EL

Fernando Hueso González\*

*Valencia, 28 de abril de 2011*



Prácticas Externas (Asignatura 34282) - 4º de Grado de Física - UVEG  
Laboratorio de Reacciones Nucleares - Instituto de Física Corpuscular (IFIC)  
150 horas de prácticas externas realizadas entre el 15-02-2011 y el 20-04-2011

## Resumen

El objetivo de las prácticas externas realizadas en el Laboratorio de Reacciones Nucleares (IFIC) es familiarizarse con los sistemas de adquisición de datos de una cámara de Xenon gaseoso a alta presión (TPC), que es el elemento principal del experimento NEXT1-EL. Esta TPC es un prototipo de otra mayor que se instalará en el Laboratorio Subterráneo de Canfranc.

En concreto, mis prácticas se han centrado en la caracterización y cálculo de ganancia de fotomultiplicadores de silicio (SiPM), detectores que se emplean en el plano de tracking de la TPC para visualizar la traza de las partículas ionizantes para poder hacer una selección topológica de los eventos de interés, candidatos a ser una desintegración doble beta sin neutrinos.

Además, me he familiarizado con los elementos que forman el detector, el alto vacío, la detección de puntos de fuga, el aislamiento del ruido mediante una jaula de Faraday, el sistema de purificación y recirculación de gases así como el módulo que controla el alto voltaje de los tubos fotomultiplicadores y SiPM. También he aprendido a utilizar ROOT y programar scripts para el tratamiento de las medidas experimentales realizadas a lo largo de las prácticas.



---

\*ferhue#alumni.uv.es

# Índice

<b>1</b>	<b>Introducción</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Placa de alimentación de CIEMAT</b>	<b>7</b>
<b>3</b>	<b>Crosstalk in the Mother-Board</b>	<b>9</b>
3.1	Set-up with MMCX wires . . . . .	10
3.1.1	Improving the set-up . . . . .	13
3.2	Set-up with HDMI wires . . . . .	16
<b>4</b>	<b>Dark current</b>	<b>17</b>
<b>5</b>	<b>SiPM gain</b>	<b>19</b>
<b>6</b>	<b>Conclusions</b>	<b>23</b>
	<b>References</b>	<b>23</b>
<b>7</b>	<b>Cronograma</b>	<b>24</b>
<b>8</b>	<b>Valoración personal</b>	<b>26</b>
	<b>Agradecimientos</b>	<b>27</b>

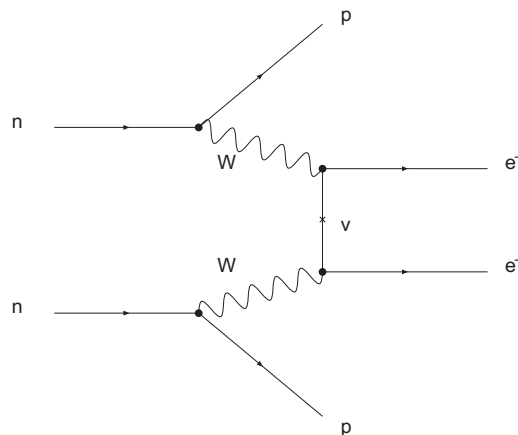
Cabe señalar que algunos apartados han sido redactados en inglés por ser susceptibles de ser incluidos en alguna publicación, con el objetivo de evitar traducciones a posteriori y dobles versiones de un mismo documento.

# 1 Introducción

El experimento NEXT1-EL, en torno al cual he realizado las prácticas externas en el laboratorio de reacciones nucleares del IFIC, forma parte de un proyecto de colaboración a nivel mundial que lleva en marcha varios años para estudiar la naturaleza del neutrino y que tendrá como punto álgido la instalación el detector NEXT-100 en el laboratorio subterráneo de Canfranc. En concreto, NEXT1-EL es un prototipo a pequeña escala del futuro NEXT-100.

El objetivo último de este proyecto es la verificación experimental de que el neutrino es una partícula de Majorana y por tanto su propia antipartícula. De confirmarse esta hipótesis, se daría una base experimental a múltiples teorías que tratan de explicar la asimetría materia-antimateria [2], el proceso de formación del universo, etc.

El procedimiento experimental indicado para verificar la naturaleza del neutrino es la búsqueda de la desintegración doble beta sin neutrinos (éstos se aniquilan - ver figura 1). Este tipo de reacción, si es posible, es muy improbable que suceda (baja sección eficaz) y hasta ahora no ha sido observado. Por ello, el proyecto NEXT aspira a encontrar dicha reacción con una tecnología puntera mediante una cámara (Time Projection Chamber - TPC) que contendrá 100kg de gas xenon ultrapuro a alta presión [2], que presenta el fenómeno de desintegración doble beta y es un candidato a presentar esta desintegración sin neutrinos.



**Figure 1:** Desintegración doble beta sin neutrinos mediada por el intercambio de neutrinos de Majorana [2]

Más en concreto, el detector NEXT1-EL en torno al cual he realizado mis prácticas externas consta de una TPC donde se aloja 1kg de gas (argón actualmente). Su característica principal es la electroluminiscencia (EL), es decir, la emisión de luz al ionizar una partícula el medio activo. Para caracterizar adecuadamente la desintegración es necesario conocer tanto la topología de la misma (trayectorias de las partículas) así como la energía liberada.

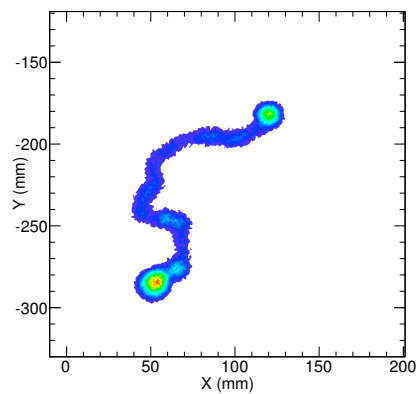
Por ello, el detector cuenta con dos planos distintos: el plano de trazas y el de energía. El plano de energía está formado por una matriz de fotomultiplicadores que permiten medir la energía de la desintegración con una alta resolución, necesaria para distinguir las desintegraciones doble beta con neutrinos (predominantes) frente a las que no tienen neutrinos (residuales), como se ve en la figura 4.

El plano de trazas cumple la función de detectar automáticamente sucesos doble beta y despreciar otras desintegraciones (actúa como trigger) a partir de la topología (trayectorias) de las partículas de la desintegración, como se ve en la figura 3.

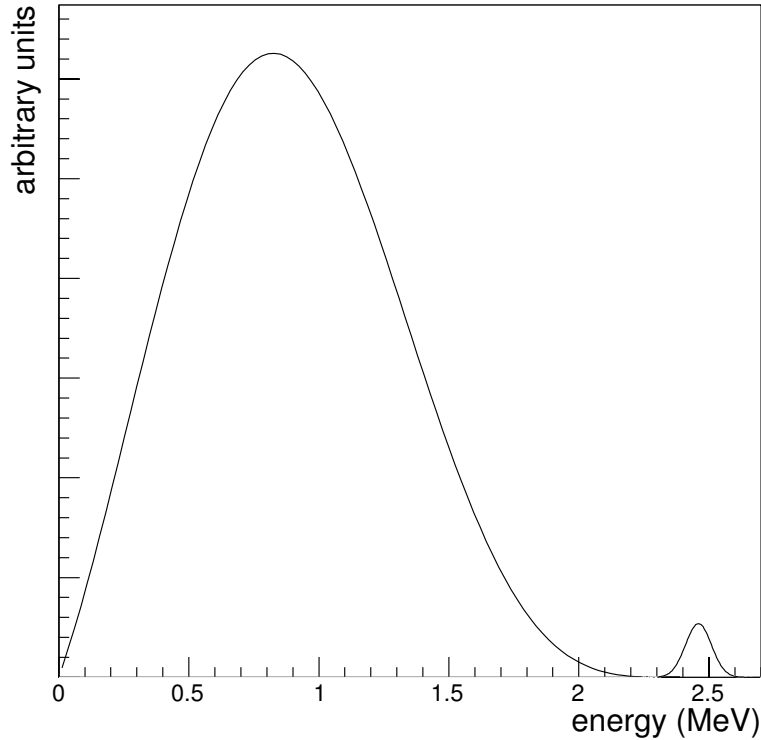


**Figure 2:** Detector NEXTE1-EL en el laboratorio de reacciones nucleares (IFIC)

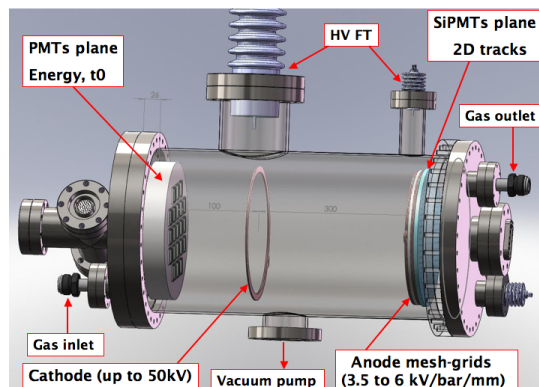
El objetivo de las prácticas externas es familiarizarme con el sistema de adquisición de datos de medida de la TPC de NEXTE1-EL, montaje y realización de alto vacío, comprobación del sistema de circulación de gases, así como aprender a caracterizar fotomultiplicadores de silicio, necesarios para la adquisición de datos y su posterior análisis, así como desarrollar software para automatizar esta caracterización dado el elevado número de fotomultiplicadores. La finalidad última de esta caracterización era poder reconstruir la traza de un evento, pero dado que el prototipo todavía estaba en fase de prueba durante las prácticas, no se ha realizado dicha reconstrucción.



**Figure 3:** Traza signatura de la desintegración doble beta (simulación)[4]



**Figure 4:** Distribución de energías de los electrones de la desintegración doble beta [4]



**Figure 5:** Esquema de NEXT1-EL, donde se sitúa el plano de trazas (tracking plane) [1]

Durante las prácticas, además de familiarizarme con los temas ya señalados, he realizado las siguientes medidas relacionadas con la calibración de los SiPM, cada una de ellas con un objetivo particular concreto, que resumo a continuación pero que se detalla más extensamente en cada sección específica:

- Placa de alimentación (sección 2). El objetivo era analizar la estabilidad de la fuente de alimentación de los SiPM con el tiempo de funcionamiento para conocer las fluctuaciones respecto al valor nominal dado por el fabricante. Dado que la ganancia de los SiPM depende fuertemente del voltaje de alimentación, es necesaria una estabilidad y precisión muy altas en dicha fuente. Para comprobar estas características, se han realizado medidas en los 18 canales de alimentación de la fuente a lo largo de varias horas y días a fin de establecer las cotas en las fluctuaciones o de identificar tendencias sistemáticas y

decidir posteriormente si es válida su utilización según la precisión requerida o hay que perfeccionar dicha fuente para hacerla más estable.

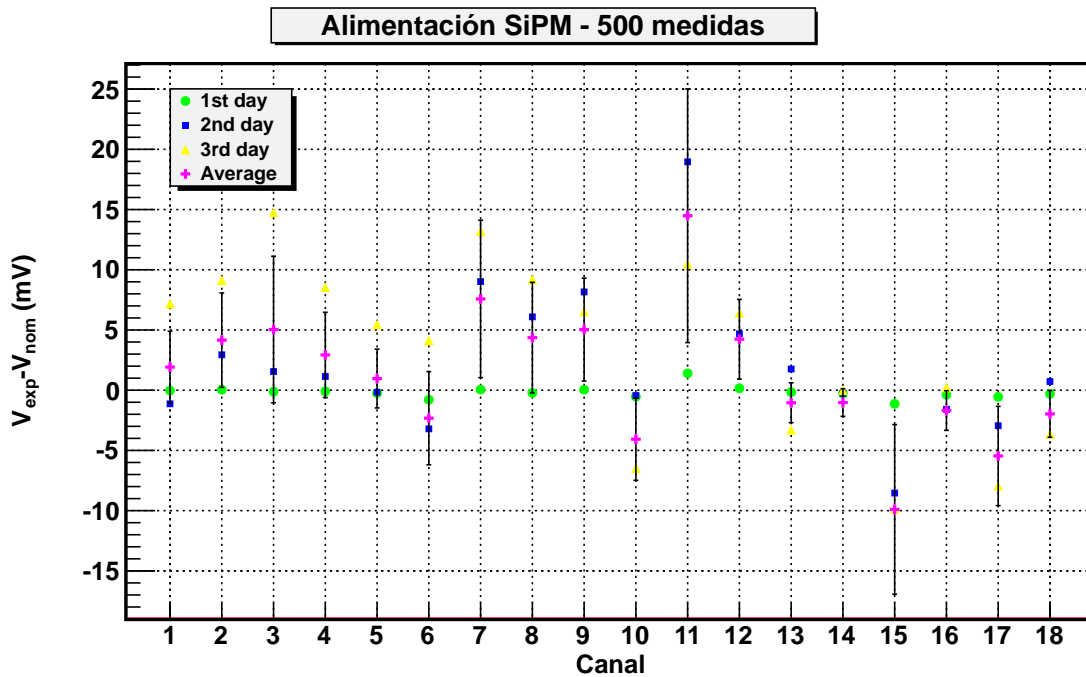
- Crosstalk (sección 3). El objetivo era estudiar el crosstalk presente en la placa madre del plano de trazas, cuantificar su efecto porcentualmente y decidir qué tipo de cables, conectores o formas de trenzado eran más apropiados para reducir el mismo. Para ello, se han tomado medidas con el osciloscopio de la señal de distintos SiPM en distintas condiciones (cubierto o iluminado) y se ha comparado el nivel de crosstalk en los diferentes casos.
- Corriente oscura (sección 4). El objetivo era estudiar la dependencia de la corriente oscura de los SiPM con la temperatura y el voltaje de operación para conocer su influencia relativa en el experimento según las condiciones en que se desarrolle. Para tal fin, se ha medido la corriente oscura de un SiPM a distintos voltajes y temperaturas.
- Ganancia de SiPM (sección 5). El objetivo era caracterizar distintos SiPM de una placa hija a partir de su ganancia, valor necesario para la reconstrucción de la traza de un suceso. Para ello, se han realizado medidas con el osciloscopio y se ha programado una macro con el fin de automatizar esta caracterización y poder aplicarla a numerosos SiPM con el consecuente ahorro de tiempo.

Aparte, se han realizado otras medidas como comprobación de conductividad, verificación de buen estado de fotomultiplicadores, etc., medidas que no he incluido en este documento por no ser especialmente ilustrativas, pero que sí figuran en el cronograma de las prácticas (sección 7).

## 2 Placa de alimentación de CIEMAT

Se han realizado medidas para conocer la fiabilidad de una placa de alimentación con 18 canales proporcionada por CIEMAT y calibrada para unos valores determinados de voltaje de operación, canales que se corresponden con las 18 placas hija que se conectarán a la madre. Por tanto, es necesaria una precisión y constancia del voltaje de alimentación hasta la centésima de voltio. Es decir, las fluctuaciones con el tiempo y la temperatura deben ser menores a 10 mV para evitar cambios significativos en la ganancia. Por tanto, dado que el voltaje está en torno a los 70V, se requiere una precisión relativa de 1/7000.

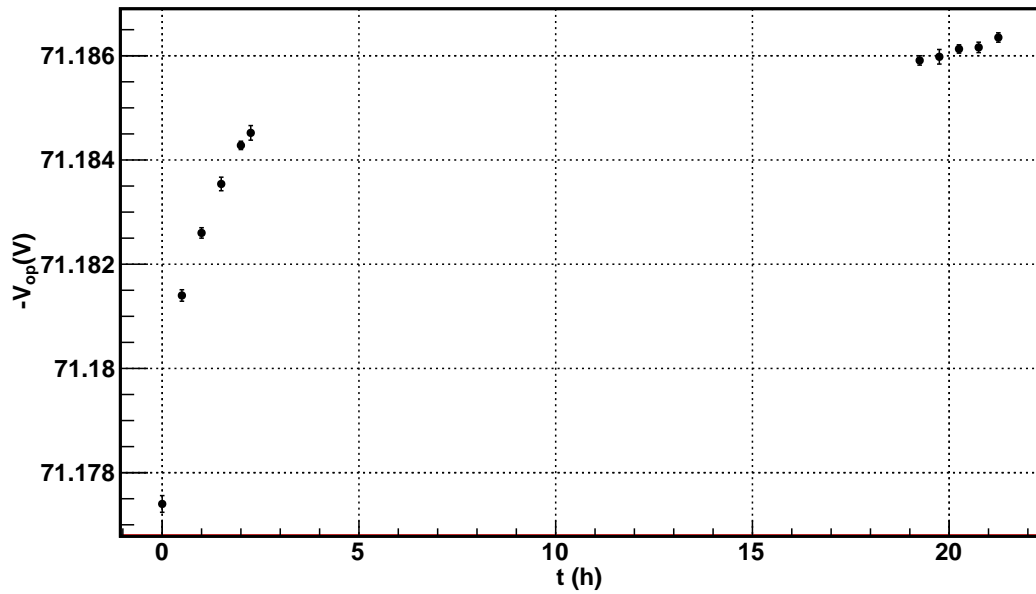
Según las medidas realizadas en distintos días y a distintas horas del día (500 valores por medida), así como después de haber pasado cierto tiempo encendida la placa, se midieron fluctuaciones que superaban ligeramente los 10mV respecto al valor nominal, como se observa en la figura 6. La desviación máxima medida respecto al valor nominal ha sido de 20mV, aunque no se ha comprobado si la fluctuación seguía una tendencia a medida que pasaba el tiempo encendida o si le influía la temperatura ambiente, dada la limitación de tiempo medida y la falta de un sistema automatizado de medida así como monitorización de la temperatura.



**Figure 6:** Desviación del voltaje experimental respecto al valor nominal calibrado según el fabricante para los 18 canales

Por tanto, para tener un mayor control del voltaje de operación, habría que analizar con un sistema de medida más automatizado si existe una tendencia de los valores a estabilizarse con el tiempo, con lo que se podrían recalibrar dichos voltajes, o bien si las fluctuaciones van a ser superiores a las deseadas y es necesario introducir algún cambio en el voltaje de la placa.

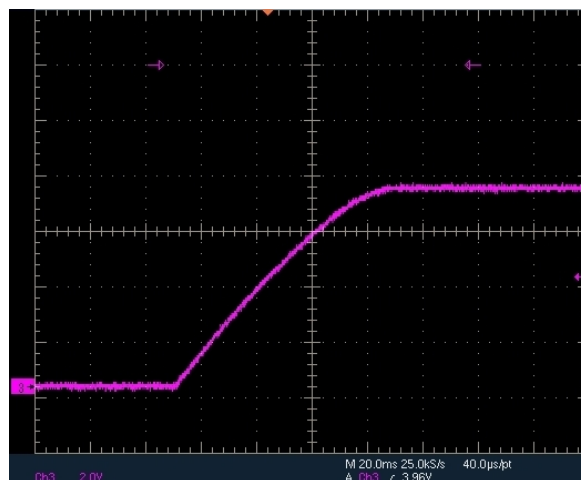
En la figura 7 se observan las fluctuaciones del voltaje a lo largo del tiempo (con la placa encendida) con medidas manuales cuando estábamos en el laboratorio. Esta curva hace pensar que el valor tiende a estabilizarse con el tiempo (como si tardase en calentarse y equilibrarse una temperatura fija en el interior de la placa), pero habría que medirlo con más fiabilidad en un intervalo de tiempo mayor.



**Figure 7:** Variación del voltaje de alimentación en el canal 6 en función del tiempo de funcionamiento de la placa

Se observan dos zonas de puntos que corresponden a la toma de medidas en días consecutivos. Sería conveniente disponer de un sistema automático de toma de medidas para tener puntos con espaciado de tiempo constante. Esto nos permitiría comprobar si el valor tiende a estabilizarse con el tiempo tal y como se intuye a primera vista. Esta caracterización es muy importante porque la ganancia del SiPM (valor que es necesario conocer para el tracking plane) depende fuertemente del voltaje de alimentación y es necesario conocer su valor hasta la céntesima.

Por otro lado, se ha medido el tiempo de subida al conectar la placa con el osciloscopio (ver figura 8), que debería ser del orden de 1 segundo para evitar una subida muy rápida que afecte al SiPM. El resultado es que no había ningún retardo significativo:  $70 \pm 4\text{ms}$ , con lo que habría que instalar algún componente para regular la subida y evitar un hipotético daño irreversible al SiPM en la zona de depleción de carga.

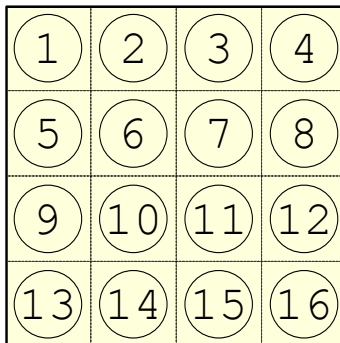


**Figure 8:** Tiempo de subida al encender la placa de alimentación



### 3 Crosstalk in the Mother-Board

In this experiment, we study the noise introduced by the electronics and wires of the Mother-Board (MB) of the SiPM tracking plane, that will be placed in the TPC. We want to know which is the best set-up to reduce the crosstalk: a current in the wires induced by neighboring wires. 18 Daughter-Board (DB) are connected to the MB. 16 SiPM are arranged in each DB in a square (see figure 9). When we illuminate only one DB and cover some of its SiPM, a signal appears in the covered SiPM because those that detect light produce a signal and a current in their wire, which induce another current in neighboring wires.



**Figure 9:** Sketch of one Daughter-Board (DB) with 16 SiPM used in the tracking plane of NEXT1-EL. The SiPM are numerated from the left to the right and from the top to the bottom from 1 to 16 (4x4 matrix).

This effect is unwanted, because it introduces indetermination and noise in the detection of a photon if this crosstalk has the same weight than the real signal (one loses space resolution and the tracks are thicker). Our aim is to describe the form of this crosstalk and search, as far as possible, a better set-up to diminish this effect. We quantify this effect with the proportion between crosstalk signal (in a covered SiPM) and the real signal (in an illuminated one).

We illuminate the DB of 16 SiPM (connected to the MB) with a Light Emitting Diode (LED) emitting at a wavelength of about 400nm at different voltages.

We study two kinds of wires, MMCX<sup>1</sup> and HDMI<sup>2</sup>. The MMCX is already working fine in other components of the experiment, but it is a hard and long work to create hundreds of cables (one for each SiPM of the plane) of the desired length manually.

The advantage of the HDMI wires is that each cable carries the signal of 4 SiPM, reducing the amount of cables needed for the whole set-up. Furthermore, these cables are already available in the laboratory. The disadvantage is that HDMI have an impedance of  $75\Omega$ , while most of the cables used in the whole circuit have an impedance of  $50\Omega$ . For this reason, there will be reflections in the joints of different cables that will distort the signal. A way to avoid these reflections is to use an impedance matching, which wasn't available when taking our measurements. Another disadvantage is that the crosstalk between the 4 internal wires of a single HDMI could increase in comparison with the case of MMCX (independent wires for each SiPM) because of the distance between them.

---

<sup>1</sup>MMCX refers to micro-miniature coaxial connectors (coaxial RF connectors similar to MCX but smaller)

<sup>2</sup>HDMI refers to High-Definition Multimedia Interface, a compact audio/video interface originally for transmitting uncompressed digital data, but also useful for the SiPM set-up in a mother board.

### 3.1 Set-up with MMCX wires

We have 16 channels to measure in each DB, with only 3 grounds to connect to reduce the crosstalk signal. We want to know if these grounds can reduce the crosstalk, and if we can reduce it.

The SiPM are numerated as seen in figure 9. Firstly, we cover all the SiPMs (gray circle in the sketch) except one (yellow circle) and read the signal (highlighted in the sketch) of the covered ones in comparison with the illuminated. The signal of the SiPM is associated with a channel number, specified in the sketch as C# and its colour. We analyze if there is any difference between the nearest SiPMs and the furthest to the lighted one.

We measure the crosstalk signal with the oscilloscope, whose Max-Function Max(Channel#) plots the height of the pulse on screen, as seen in 10. We define the signal to crosstalk ratio (SCR) as the quotient between the height of the pulse of the induced signal and the original one. The error of the pulse-height is estimated by the temporal variations of the value plotted on screen.

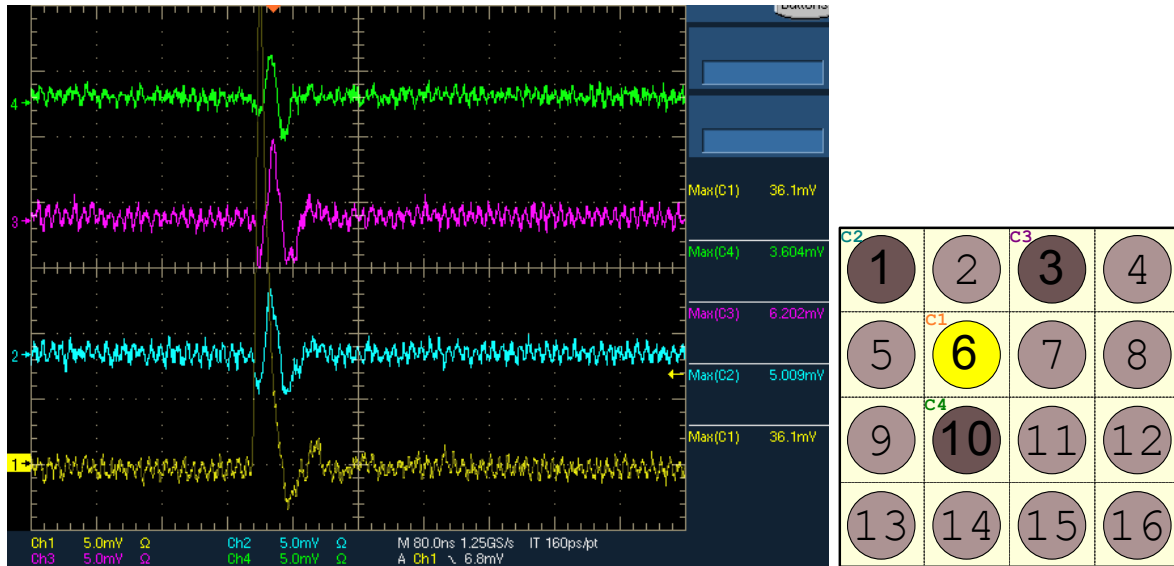
$$SCR_n = \frac{\text{Pulse height of the signal of channel n (covered SiPM)}}{\text{Pulse height of the original signal of the lighted SiPM}}$$

The pulse height is read from the value Max(C#) plotted on the screen.

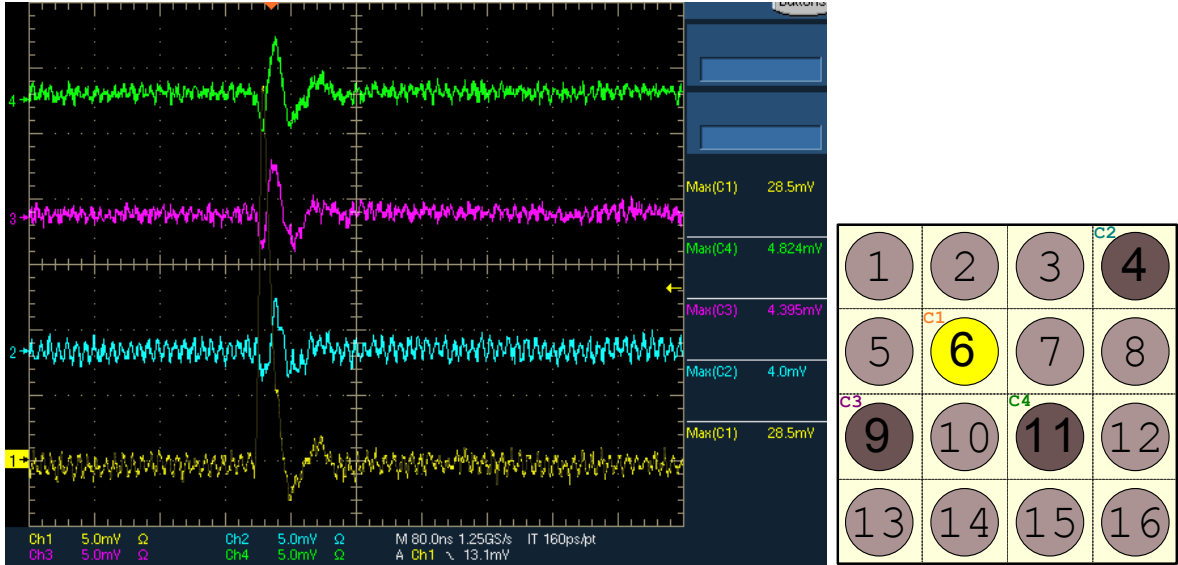
We also define SCR<sub>avg</sub>, which is the average of SCR values different covered SiPM with regard to the original signal of the lighted SiPM. For example, in figure 10, SCR<sub>avg</sub> refers to the 3 SCR values of channels 2-4 with regard to channel 1:

$$SCR_n = \frac{\text{Max}(C_n)}{\text{Max}(C_1)}$$

$$SCR_{\text{avg}} = \frac{SCR_2 + SCR_3 + SCR_4}{3}$$



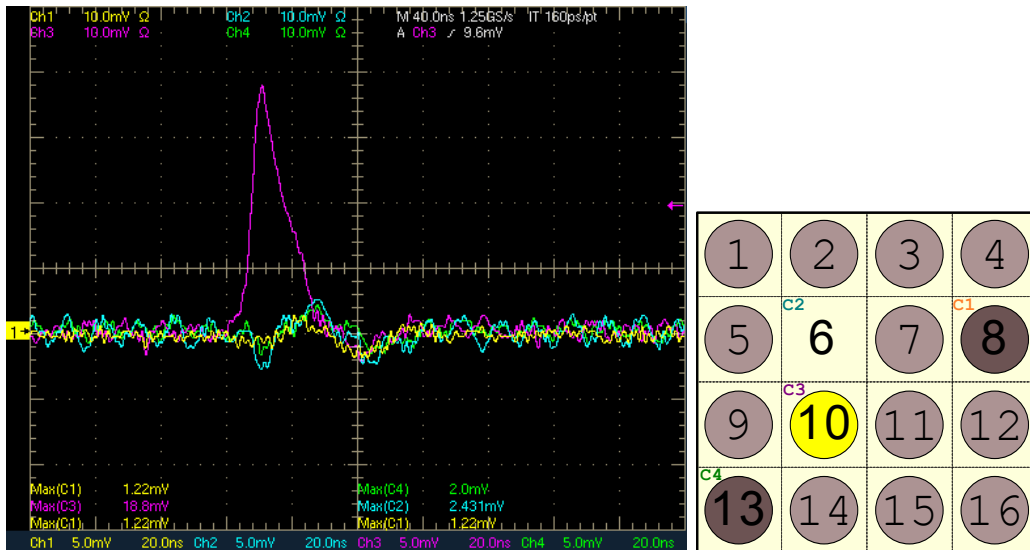
**Figure 10:** Channel 1: signal from SiPM 6 (illuminated), Channels 2, 3 and 4: signals from SiPM 1, 3 and 10 (covered). The LED voltage is 3,5 V. SCR<sub>avg</sub> = (15 ± 4)%.



**Figure 11:** Channel 1: signal from SiPM 6 (illuminated), Channels 2, 3 and 4: signals from SiPM 4, 9 and 11 covered. The LED voltage is 3,5 V.  $SCR_{avg} = (15 \pm 2)\%$ .

Comparing figures 10 and 11, we don't appreciate any difference between them (both have a SCR about 15%). Therefore, we check that there isn't any noticeable dependence (on average, not on the values on screen of figure 11) of the SCR with the distance (neighbour order) between the illuminated SiPM and the covered ones of the DB.

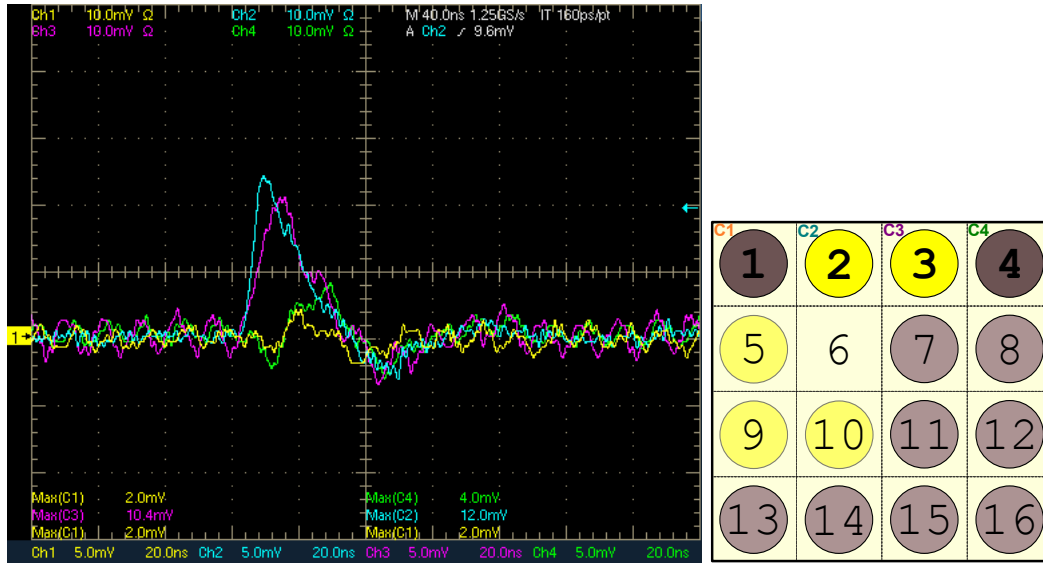
We also check if the crosstalk increases with the number of SiPMs that are lighted and compare if there exists any difference between covering a SiPM or removing it from the DB. We illuminate the SiPM 10, remove the 6 (no circle in the sketch) and cover the rest.



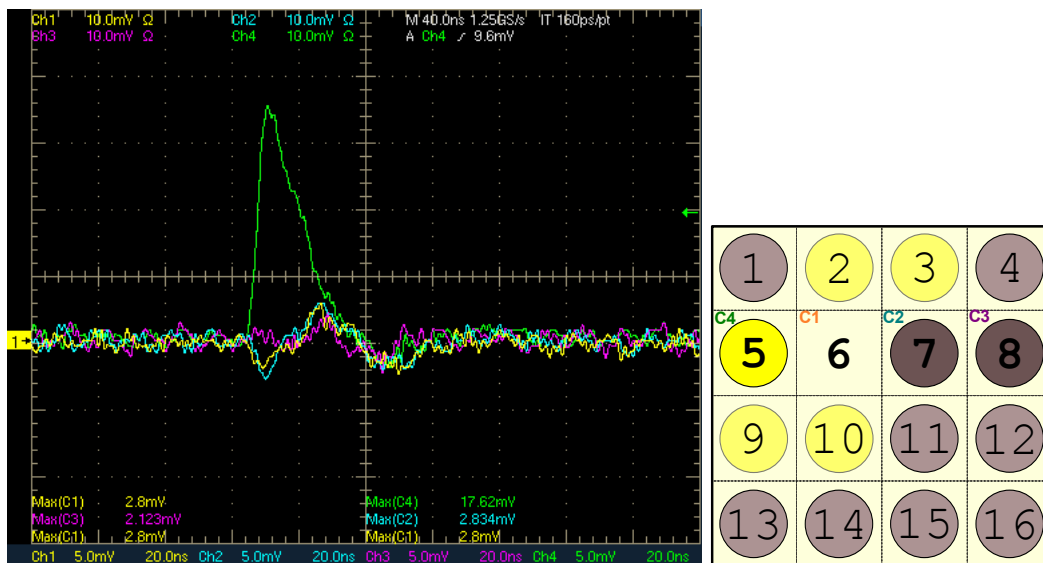
**Figure 12:** Channel 2: signal from SiPM 6 (removed), Channel 3: signal from SiPM 10 (illuminated), Channels 1 and 4: signals from SiPM 8 and 13 (covered).  $SCR_{avg} = (9 \pm 4)\%$ .

We don't see great differences between the SCR removed one and the covered ones on average (plotted values on screen change), which means that no light is arriving at the covered SiPMs, but the entire signal in the cables is induced by crosstalk of the signal of the lighted SiPM.

Then, we illuminate several SiPM to check if there are variations in the crosstalk. The SiPM 1, 4, 7, 8, 11-16, are covered, SiPM 6 is removed.

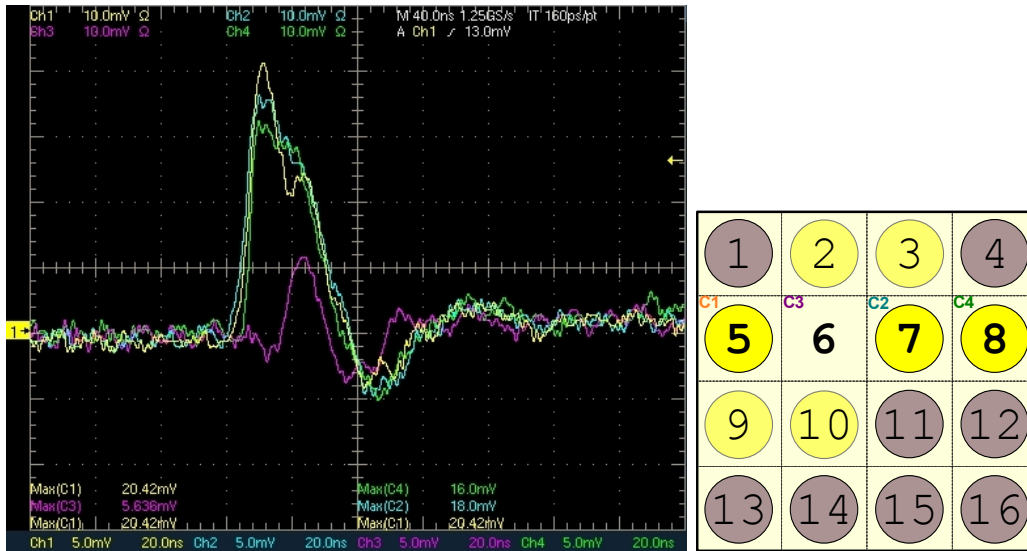


**Figure 13:** Channels 2 and 3: signals from illuminated SiPM (Nr. 2 and 3), Channels 1 and 4: signals from covered ones (1 and 4).  $SCR_{avg} = (27 \pm 10)\%$ .



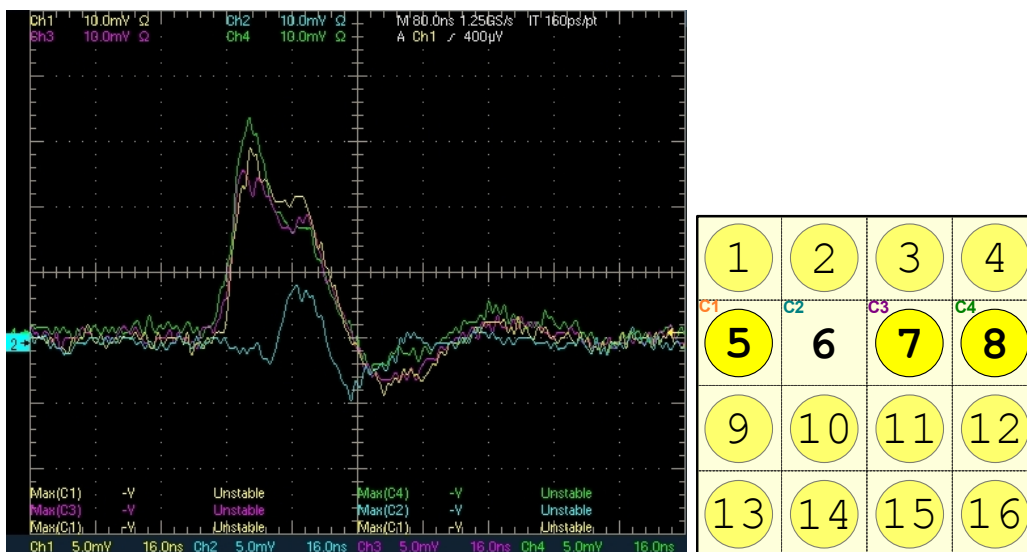
**Figure 14:** Channel 4: signal from the illuminated SiPM (Nr. 5), Channel 1: signal from the removed one (6), Channels 2-3: covered (6-8).  $SCR_{avg} = (16 \pm 2)\%$ .

Next, we uncover SiPM 7 and 8 and repeat the measurement.



**Figure 15:** Channels 1, 2 and 4: signals from illuminated SiPM (Nr. 5, 7 and 8), Channel 3: signal from the removed one (6).  $SCR_{avg} = (31 \pm 4)\%$ .

Finally, we illuminate all the SiPM except one (SiPM 6, removed), to see the maximum level of crosstalk that we could suffer (the worst conditions).

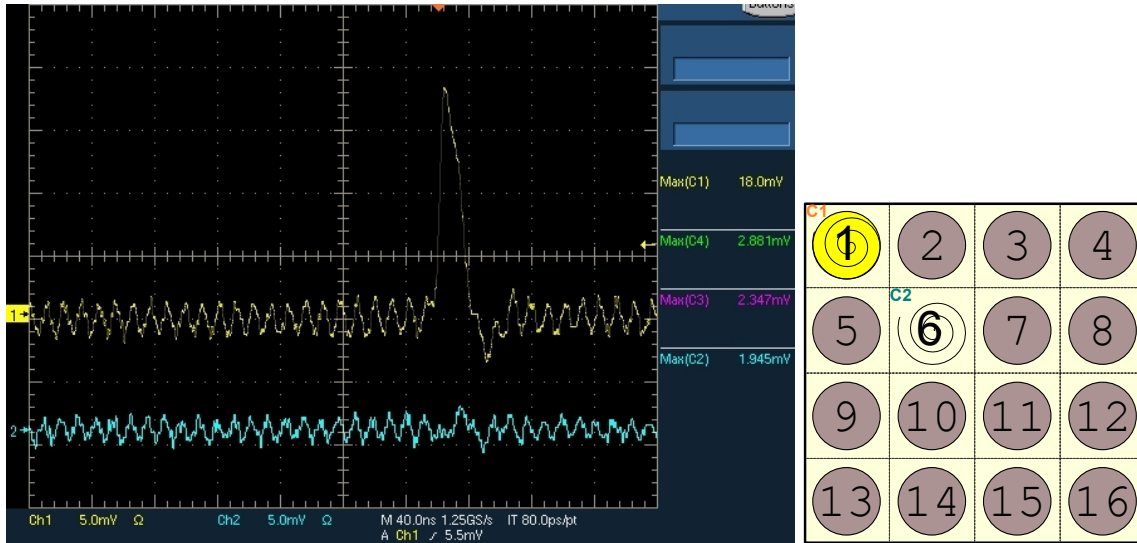


**Figure 16:** Channels 1, 3 and 4: signals from illuminated SiPM (Nr. 5, 7 and 8), Channel 2: signal from the removed one (6).  $SCR_{avg} = (45 \pm 10)\%$ .

In conclusion, the maximum SCR is about 45%. In normal cases this value is about 15%.

### 3.1.1 Improving the set-up

We think that the best way to reduce the crosstalk signal is to plait the ground cables with the signal cables. We have three ground available and we plait the SiPM 1 and 6 with two of them (spiral in the sketch). The third ground wire will continue connected to the mother board.



**Figure 17:** Channel 1: signal from the illuminated SiPM (Nr. 1), Channel 2: signal from the removed one (6). Both are plaited.

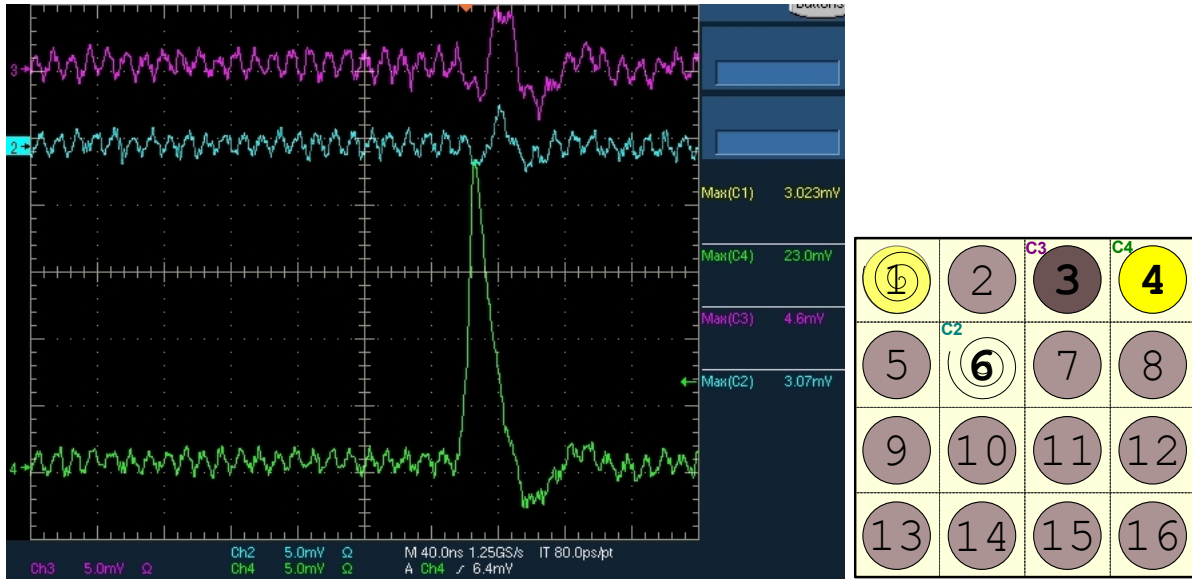
In this case, the crosstalk has an amplitude similar to the noise level, with a SCR about  $SCR = (11 \pm 2)\%$ . Next, we look if there is any difference between the output from a plaited SiPM and one that isn't.



**Figure 18:** Channel 1: signal from the illuminated and plaited SiPM (Nr. 1), Channel 2: signal from the plaited SiPM (6). Channel 3: signal from the non plaited one (3). Nr. 6 is removed and Nr. 3 covered.

There isn't a great difference between the SCR:  $SCR_{C2} = (12 \pm 2)\%$  and  $SCR_{C3} = (18 \pm 4)\%$ . However, even if this method showed a noticeable improvement, we would have to plait all the SiPM, which is not advisable, because it would mean to introduce too many wires, which are possibly unnecessary for our purposes. A better idea is to reduce the crosstalk signal with a noise reduction algorithm that takes into account coincident signals, delay between signals, etc.

At last, we illuminate a non plaited SiPM and we check the difference between reading two SiPM: one plaited and another not plaited.



**Figure 19:** Channel 4: signal from the illuminated and non plaited SiPM (Nr. 4), Channel 2: signal from the plaited SiPM (6). Channel 3: signal from the non plaited one. Nr. 6 is removed and Nr. 3 covered.

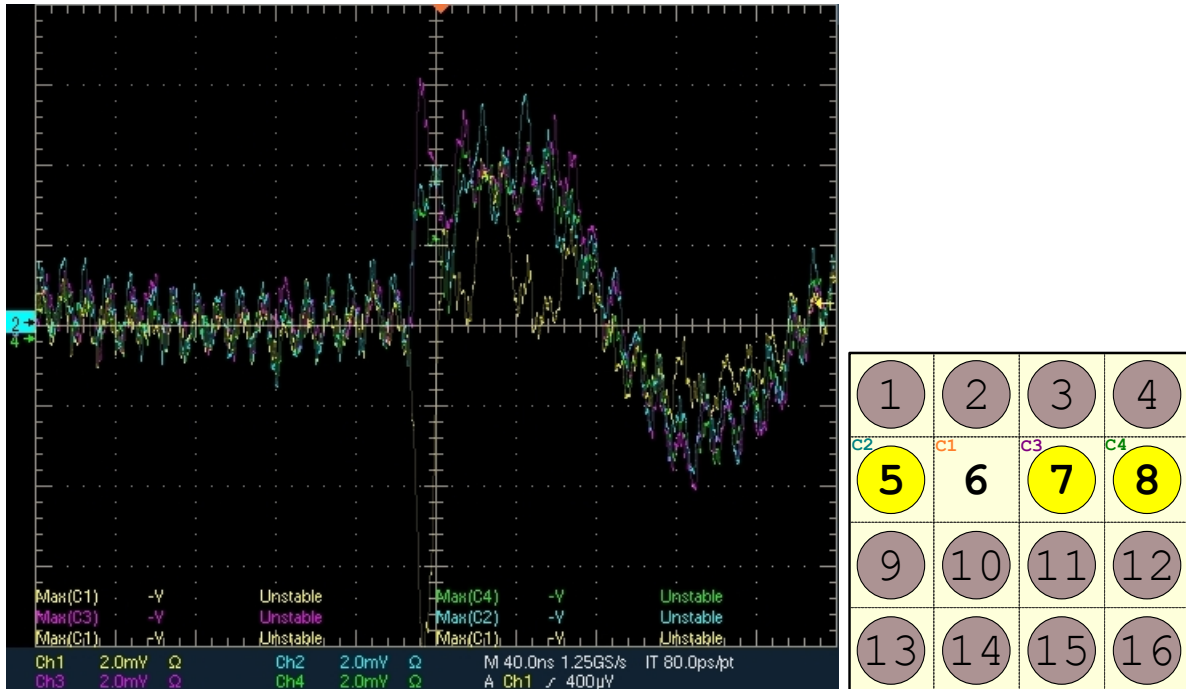
We can see that there is a little difference between lighting a plaited SiPM or a non plaited one:  $SCR_{C2} = (13 \pm 2)\%$  and  $SCR_{C3} = (20 \pm 3)\%$ . We diminish the effect only a 7%. In conclusion, the hard work that is needed to achieve this improvement isn't worth enough.

### 3.2 Set-up with HDMI wires

As we have said before, our aim is to check if the HDMI wire can be so efficient as the MMCX in order to avoid making the MMCX cables and use the already available HDMI cables. Furthermore, HDMI wires can carry 4 channels at once while MMCX needs a single wire for each SiPM.

Unfortunately, in the dark box where we measure, there are only BNC feed-throughs available, and we haven't any way to transform BNC to HDMI. Consequently, we have to make a wire from BNC to HDMI. Another way to achieve it, is to connect the HDMI wire to a board HDMI-MMCX with a loop output-input of different channels, so that we can use the already available cables MMCX-BNC and read the signal with the oscilloscope.

However, all our efforts didn't achieve our goal because of the impedance mismatching, which causes several reflections and doesn't allow us to distinguish a clear signal in the oscilloscope, as it is seen in figure 20.



**Figure 20:** Channel 1: signal from the removed SiPM (6), Channels 2-4: signals from the illuminated SiPM (5, 7 and 8). LED voltage is 3,3 V.

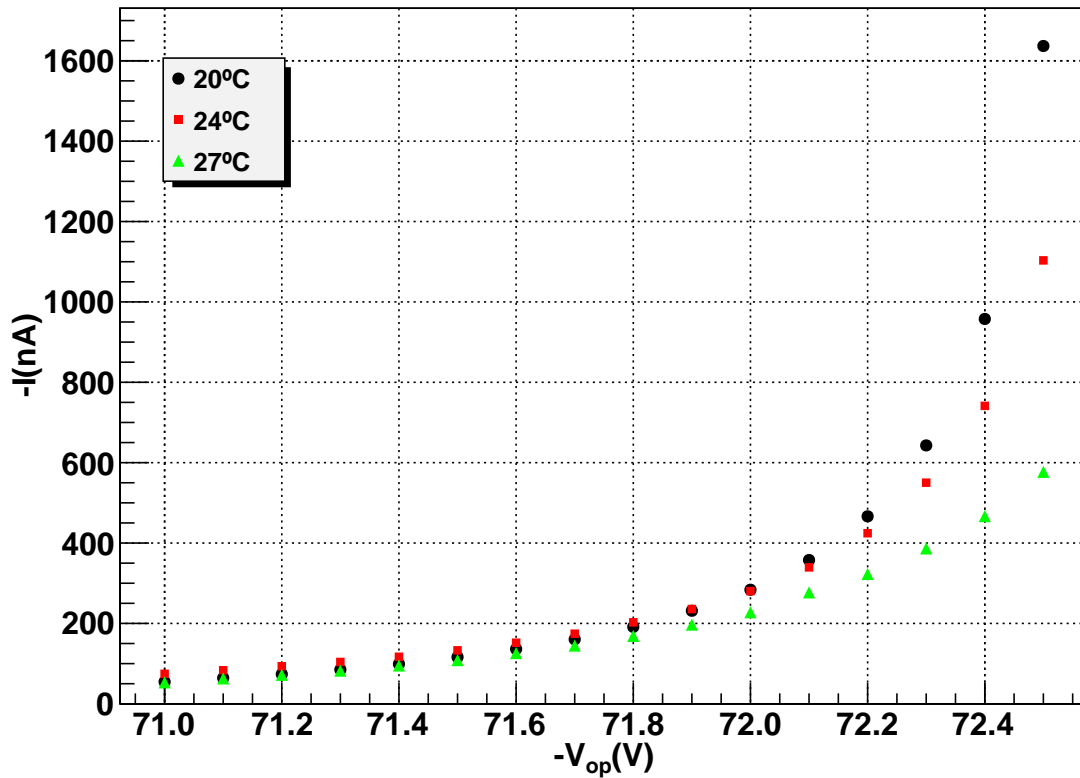
In conclusion, with this set-up we cannot see neither the original signal nor the crosstalk clearly, because of the impedance mismatching. Therefore, the experimental set-up that we advise to use is the one with MMCX cables.



## 4 Dark current

We measure the dark current of the SiPM, that is, the current in the SiPM without illumination. The reason of this effect is the free electrons on the conduction band of the semiconductor (excited electrons that are able to skip the gap), which depends on the supplied voltage and the temperature.

We use a board of 5 SiPM and measure the dark current with a Keithley electrometer 6571-B (500 automatic measurements) at different operating voltages and temperatures. The temperature is controlled by a Peltier cell and measured with a thermometer arranged near the cell and connected to a computer, although it is difficult to measure the temperature directly in the SiPM (not accessible for the thermometer).



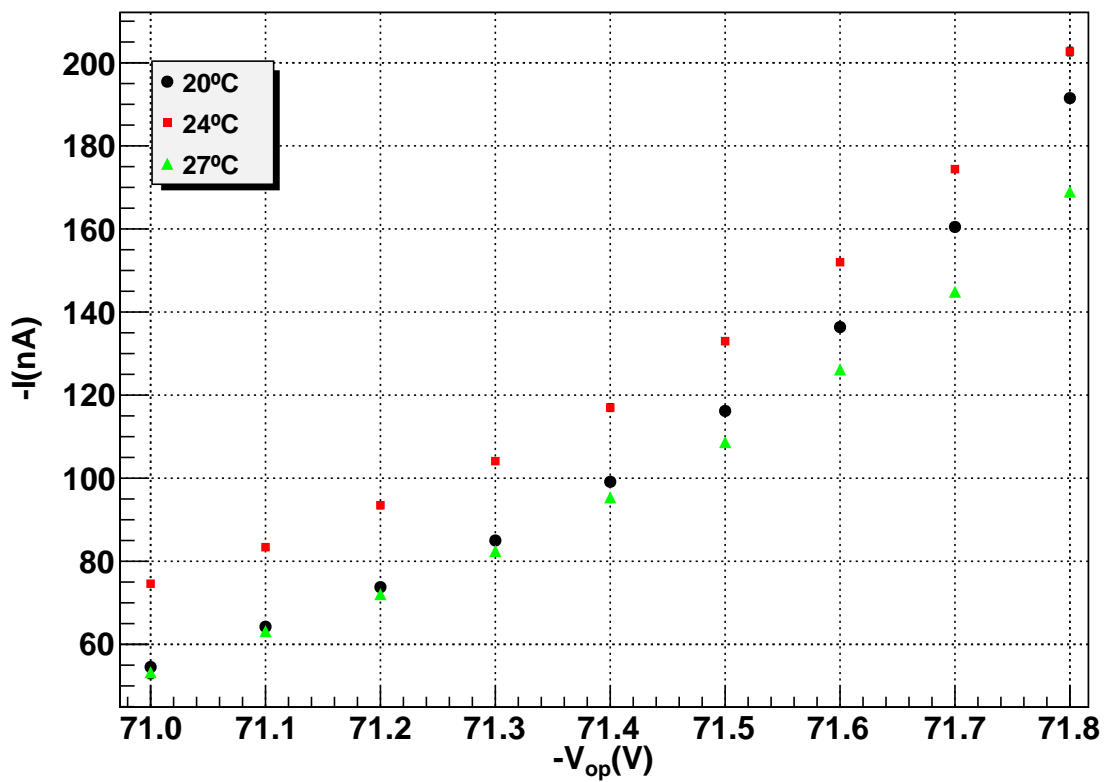
**Figure 21:** Dark current  $I$  as a function of the voltage  $V_{op}$  supplied to the SiPM at different temperatures

Each point of this plot is an average of 500 automatic measurements and its error is the standard deviation of the 500 data (both values are calculated by the electrometer). The error bars are not visible at this scale.

The measured dark current is in nA in the range of temperatures that belong to the data taking of our experiment. Furthermore, near the nominal operating voltage (around 71,5V), the dark current is less than 200nA. This result allows us to despise this dark current in future measurements and treat it as noise, because it won't be significant in comparison to the signal (in the range of  $\mu\text{A}$ ) measured when light is detected by the SiPM.

We check that the dark current is larger at higher operating voltages because of the increasing gain. Also, the influence of the temperature is also important, and we see that the dark current is higher for lower temperatures. But this fact appears to be true only for high operating voltages. At low voltages, the curves intersect (as seen in figure 22) and there is no apparent tendency temperature-dark current. An explanation of this effect could be that the temperature measurements had a great uncertainty. An improvement of this experiment is the usage of a better thermometer that could be nearer the SiPM board in order to have a better determination of the temperature.

Nevertheless, this appreciation is not the goal of this study, but to measure the order of magnitude of the dark current and to check that it won't have a great influence in future measurements with a SiPM when detecting light.



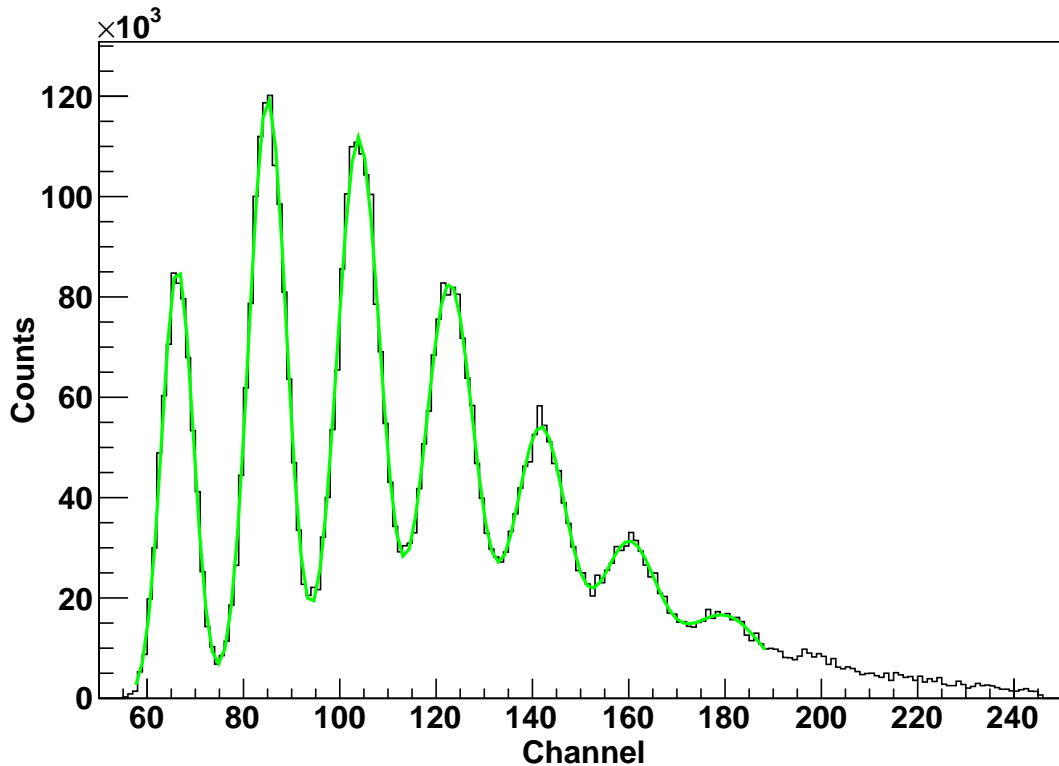
**Figure 22:** Detail of figure 21 for low  $-V_{op}$  (Dark current  $I$  'vs' Operating voltage  $V_{op}$  for different temperatures)

## 5 SiPM gain

In the context of the characterization and calibration of SiPM for the tracking plane of the Xenon TPC of NEXT1-EL, we have measured the gain of the SiPM placed in a Daughter-Board (DB) (see figure 9) with up to 16 small SiPM (4x4). The DB and is connected to the Mother-Board (MB). The SiPM is operated with reverse bias voltage (-71V). When illuminating with a LED of 400nm, we measure the signal produced in the SiPM in an oscilloscope.

In order to measure the response of the SiPM of single, double, etc. photoelectrons, we trigger the LED with square pulses of around 30ns spacing them 1000ns and with a small operating voltage (around 3V high). The trigger of the oscilloscope is controlled by the Sync signal of the waveform generator. Each measurement produces a visible peak in the oscilloscope, whose area is proportional to the number of photons (photoelectrons) that have been detected during this time-window. The gain is a measure of the amplification of the detected photoelectron by the avalanche process.

We measure with the math and gating functions of the oscilloscope the area of the peak and make a histogram of it. The histogram is presented in figure 23. Each channel is associated to a value of the area (given by the oscilloscope in pVs), which is proportional to the charge created by a number  $N_\gamma$  of photoelectrons detected simultaneously. In the figure can be seen several peaks associated to the pedestal level, and in order, one, two, etc. photoelectrons. Due to noise and statistical fluctuations, the peaks have a normal distribution. Our goal is to obtain the peak centroids and consequently the gain of the SiPM. Therefore, we calculate the peak centroids fitting the distribution to a multi-gaussian function with a ROOT script.



**Figure 23:** Histogram of the charge created by the photoelectrons detected in each measurement

As it is seen in the previous figure, the peaks follow a Gaussian distribution and are associated to the detection of successive number of photoelectrons, starting from the pedestal (peak number  $N_\gamma = 0$ ), a single photoelectron ( $N_\gamma = 1$ ), etc. We can appreciate up to 7 (or 8) peaks, and we adjust them to a global function consisting of 7 gaussian distributions, in order to obtain the peak centroids of all of them.

The difference between the consecutive ( $N_\gamma$  and  $N_\gamma - 1$ ) peak centroids (charge generated by photoelectrons) is exactly the charge generated by one incident photon. In other words, this charge difference  $\Delta Q$  is the gain  $G$  of the SiPM (charge generated by a single detected photon).

$$Q = GN_\gamma + Q_0 \quad (1)$$

$$\Delta Q = GN_\gamma + Q_0 - G(N_\gamma - 1) + Q_0 = G \quad (2)$$

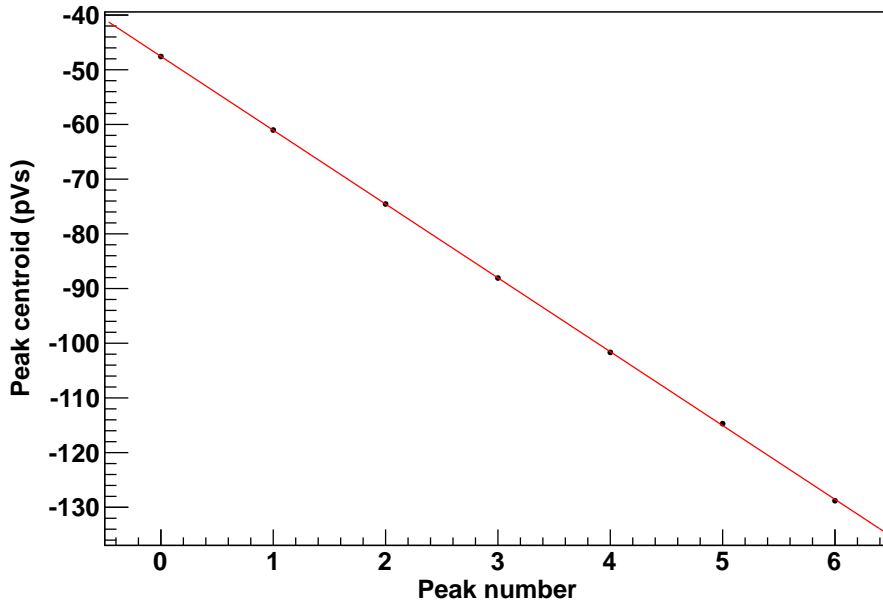
where  $Q_0$  is the charge measured when no photoelectrons are detected (pedestal).

In order to have a reliable estimate of the gain, we adjust our measurements to equation 3 with a linear fit whose slope allows us to calculate the gain  $G$  of the SiPM (equation 4). As it is seen in Figure 24, the measurements are correctly described by a linear regression.

$$\text{Peak centroid (pVs)} = GeR10^{12}N_\gamma + K_0 = aN_\gamma + K_0 \quad (3)$$

$$G = \frac{a}{eR10^{12}} \quad (4)$$

where  $R$  is the impedance of the oscilloscope ( $50\Omega$ ) and  $e$  is the electron charge.



**Figure 24:** Charge generated by the simultaneous detection of  $N_\gamma$  photons (Peak number)

Error bars are not visible at this scale. In the case of the measurements shown in the previous figures, the SiPM was operated with  $-72V$  and was measured with a board of 5 SiPM, different from the DB. The calculated gain is

$$G = (1,6853 \pm 0,0002) * 10^6$$

Additionally, although it is not necessary for the calculation of the gain, we can analyze which probability distribution follows the detection of photons. The counts associated to each peak is related with the area and sigma of the Gaussian distribution, whose fit parameters (in the predefined ROOT function) are  $p_0$  (global constant),  $p_1$  (peak centroid) and  $p_2$  (sigma of the distribution). By integrating this distribution between  $\pm\infty$ , we obtain:

$$\text{Peak area} = \text{PA} = p_0 p_2 \sqrt{2\pi} \quad (5)$$

The results of the measurements do not follow a pure Poissonian distribution. A plausible explanation could be that the intensity of the LED is not perfectly constant, that is, the variance of the intensity during the detection is not zero. In this case, the photoelectric detection formula of Mandel [5] predicts a superpoissonian distribution (a modified Poisson distribution whose variance is a new parameter that is bigger than the expected value  $\overline{N_\gamma}$ , as seen in equation 6). Another reason could be the noise of the signal or the error of the measurement of the peak area with the cursors of the oscilloscope.

$$\text{Var}(N_\gamma) = \overline{N_\gamma} + (\xi T)^2 * \text{Var}(I) \quad (6)$$

where  $\xi$  is the efficiency of the detector, T the duration of the detection (time gating, controlled by the calculation of the area of the signal between cursors of the oscilloscope) and Var the variance. In other words, if the Var(I) is non-zero, the distribution is superpoissonian. Therefore, we have fitted to two modified distributions, the blue one is a Poisson curve with an offset and the green one a Poisson curve with an additional parameter sigma (equation 7).

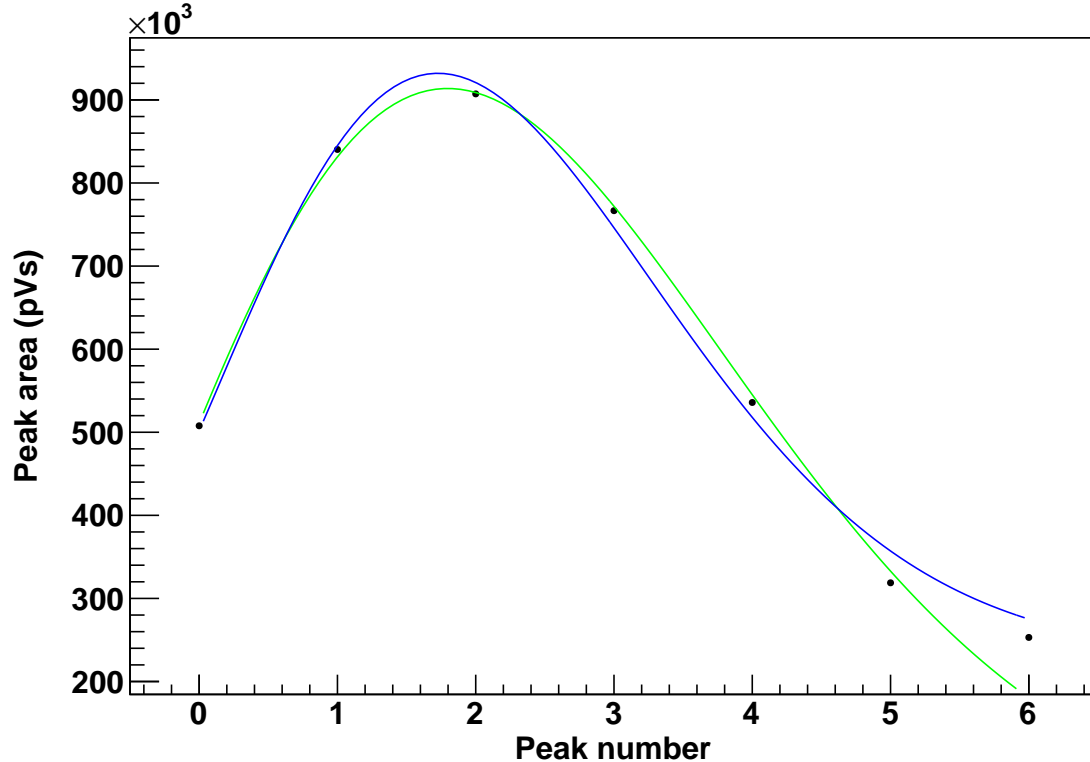
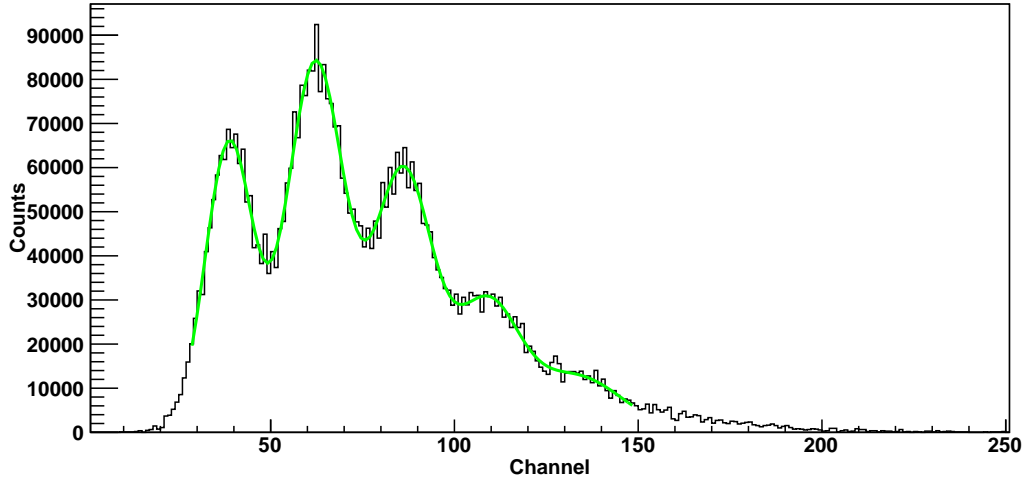


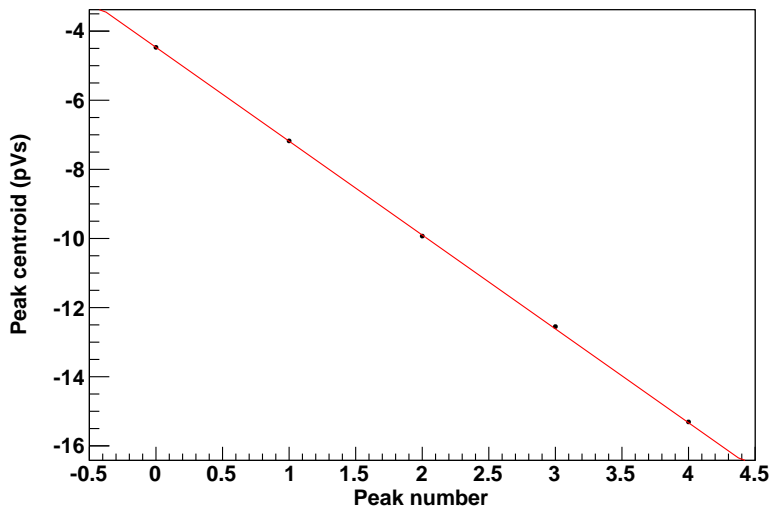
Figure 25: Superpoissonian distribution of the photon counting histogram (see figure 23)

$$\text{PA}_{\text{blue}} = T * \frac{e^{-\mu} * \mu^{N_\gamma}}{\Gamma(N_\gamma + 1)} + b \quad ; \quad \text{PA}_{\text{green}} = T * \frac{e^{-\frac{\mu}{\sigma}} * (\frac{\mu}{\sigma})^{\frac{N_\gamma}{\sigma}}}{\Gamma(\frac{N_\gamma}{\sigma} + 1)} \quad (7)$$

The previous figures correspond to a single board of 5 SiPM that doesn't need any intermediate board in order to read the signal. Below, we present the results for the DB of 16 SiPM connected to the MB. This extra board, its associated electronics and longer cables and the crosstalk (see section 3) justify that the peaks aren't as definite as in the other set-up.



**Figure 26:** Photon Counting Histogram of the SiPM 6 of the DB operated with -71V



**Figure 27:** Charge generated by the simultaneous detection of  $N_\gamma$  photons (Peak number) in the SiPM 6 of the DB

Error bars are not visible at this scale. In the case of the measurements shown in the previous figures, the DB was connected to the MB. The calculated gain is

$$G = (3,390 \pm 0,002) * 10^5$$

This gain is lower than the previous one (figure 24) because the supplied voltage is 1V lower. Moreover, we have obtained the gain of many SiPM of the DB at different operating voltages, results that aren't shown in order to avoid uninteresting repetitions.

## 6 Conclusions

In this section, I sum up the results of the experiments and draw some conclusions for each section.

- With regard to the alimentation board (section 2), we have checked that the fluctuations of the voltage in some channels are higher than 0,01V (which is the highest fluctation that we want to have). Therefore, this effect has to be taken into account and either replace this board with a more stable one or make some modifications of its circuit adding some electronic components in order to reduce the fluctuations with regard to the nominal value. A study in depth of the systematic tendencies of this values with the working time couldn't be done because we didn't have any automatic system of measurements.
- Concerning the crosstalk (section 3), we have shown that the MMCX set-up is more advisable than the HDMI set-up, and we have quantified the signal to crosstalk ratio (SCR) for each set-up. In the case of MMCX wires, the SCR is about 15% in normal cases and increases up to 40% in pathological cases (worst conditions). We advise therefore to reduce this undesired effect for example with a noise reduction algorithm in a software.
- Related to the dark current (section 4), we have measured this current for several operating voltages and temperatures of a SiPM. We have checked the strong dependence of the dark current with the operating voltage, but we couldn't establish a dependence between the dark current and the temperature at same voltage, maybe because of the error associated to the measurement of the temperature.
- Finally, regarding the gain of the SiPM (section 5), we have measured the gain of several SiPM at different operating voltages and compared it succesfully with nominal values. We have also written a ROOT script in order to speed up the process of characterization (multipeak detection, calculation of the gain), a great improvement if we wanted to measure the gain of each SiPM (up to 248) of the MB.

## References

- [1] Desarrollo y Caracterización de Fotomultiplicadores de Silicio para NEXT. David Lorca Galindo - 27/09/2010.
- [2] Letter of Intent to the LSC Scientific Committee: *NEXT, a HPGXe TPC for neutrinoless double beta decay searches* - (3 April 2009)
- [3] *The NEXT experiment: neutrinoless double beta decay searches at the LSC* - Justo Martín-Albo, on behalf of the NEXT Collaboration (2010)
- [4] *Poster about NEXT* presented at XXXIX International Meeting on Fundamental Physics - J. J. Gómez Cadenas, J. Martín-Albo (IFIC-CSIC).
- [5] *Sub-Poissonian photon statistics in resonance fluorescence* - L. Mandel, Opt. Lett. 4, 205-207 (1979)

## 7 Cronograma

En este apartado resumo cronológicamente las actividades que he realizado en las prácticas externas a lo largo de dos meses a tiempo parcial.

**Table 1:** Cronograma de las prácticas externas realizadas en el Laboratorio de reacciones nucleares del IFIC en torno al detector NEXT1-EL

Día	Duración (h)	Tarea
15/02/2011	6	Presentación en el laboratorio, explicación sobre los distintos experimentos que se están llevando a cabo. Familiarizarse con los componentes de NEXT1-EL y los SiPM (fotomultiplicadores de silicio).
16/02/2011	4	Montaje de cables con conectores BNC-LEMO para futuras medidas en las cajas negras en torno a los SiPM. Comprobación de conductividad de los cables y conectores con multímetro.
17/02/2011	4	Lectura de bibliografía y tesis de máster sobre el detector NEXT1-EL y los SiPM. Reunir toda la documentación al respecto y estudiarla. Medidas de Crosstalk en los cables provenientes de la Mother-Board del plano de SiPM. Ver apartado <a href="#">3</a> .
21/02/2011	6	Lectura de bibliografía. Soldar cables con conectores HDMI para comparar las medidas de Crosstalk en éstos frente a las realizadas con conectores MMCX.
22/02/2011	7	Finalizar la soldadura de cables. Instalación del programa de análisis de datos ROOT en mi ordenador. Medidas de Crosstalk con el osciloscopio.
24/02/2011	4	Aprendizaje de uso de ROOT y programación de macros. Ayudar a cablear el detector NEXT1-EL.
25/02/2011	3	Lectura de bibliografía. Aprendizaje de uso de ROOT y programación de macros.
28/02/2011	6	Comprobación de Crosstalk con placa HDMI. Coser jaula de Faraday. Medidas de corriente oscura en los SiPM.
01/03/2011	6	Medidas de corriente oscura en distintos SiPM para distintas temperaturas. Ver apartado <a href="#">4</a> .
02/03/2011	4	Desmontaje del detector NEXT1-EL y limpieza. Representación de los resultados de la corriente oscura en ROOT.
04/03/2011	5	Coser jaula de Faraday. Montar el plano de tracking del detector NEXT1-EL.
07/03/2011	4	Aislar cables del detector NEXT1-EL para reducir el ruido. Cierre de la jaula de Faraday. Montar el set-up del plano de tracking de SiPM en la caja negra.
08/03/2011	6	Ordenar cables de NEXT1-EL. Configuración del alto voltaje de cada PMT de NEXT1-EL, colocación de una fibras ópticas para la calibración de los PMTs dentro de la TPC. Comenzar informe de las prácticas. Montar el set-up de 16 SiPM en la caja negra para el sistema de adquisición de la UPV.



09/03/2011	3	Medida del voltaje de la placa de alimentación de CIEMAT para comprobar las fluctuaciones con el tiempo en los 18 canales. Medida del tiempo de subida y bajada al encender y apagar la placa respectivamente. Ver apartado 2.
10/03/2011	5	Coser jaula de Faraday. Hacer cables MMCX-BNC para conectar entre la placa de lectura (de la UPV) de los 16 SiPM de una "Daughter-Board" al feed-through de la caja negra. Comprobar la conductividad de todo el circuito. Redacción del informe.
14/03/2011	4	Medida del voltaje de la placa de alimentación de los SiPMs del CIEMAT y representación de las medidas con ROOT.
15/03/2011	8	Búsqueda de los picos asociados a la detección en coincidencia de fotoelectrones en una placa de 5 SiPM con la configuración de cálculo de área entre cursores en el osciloscopio Tektronix. Representación de datos con ROOT y ajuste a gaussianas.
21/03/2011	5	Programación de una macro en ROOT para realizar automáticamente los ajustes a gaussianas. Cálculo de ganancia del SiPM y distribución superpoissoniana de las áreas de las gaussianas. Ver apartado 5.
22/03/2011	7	Continuar programación en ROOT. Programación de un algoritmo de búsqueda de picos automático.
23/03/2011	4	Medida de picos en otros SiPM para calcular su ganancia.
24/03/2011	5	Modificación de la macro de ROOT para reducir parámetros introducidos a mano en el algoritmo, ajustando de manera automática a aquellos que dan el mejor $\chi^2$ .
25/03/2011	5	Cambio al osciloscopio de marca Yokogawa para intentar obtener medidas con menos ruido. Aprendizaje de manejo del mismo.
28/03/2011	6	Medida de picos a distintos voltajes de operación con el osciloscopio Tektronix. Montaje de la placa "Daughter-Board" de 16 SiPM en la caja negra grande para futuras medidas.
29/03/2011	6	Medida de picos en la placa hija con el osciloscopio Yokogawa.
30/03/2011	4	Modificación de la macro de ROOT para adaptarla al formato de adquisición de datos del osciloscopio Yokogawa. Intento de medida de nuevos picos con éste.
11/04/2011	5	Redacción del informe.
12/04/2011	6	Representación de ganancia de un SiPM en función del voltaje de operación.
13/04/2011	4	Redacción del informe.
19/04/2011	5	Comparación de ganancia de un mismo SiPM en dos cajas negras con distinto set-up y longitud de cableado. Redacción del informe.
20/04/2011	4	Redacción del informe.
23/04/2011	2	Últimos retoques de la programación en ROOT.
25/04/2011	7	Finalizar informe.
<b>Total</b>	160	Prácticas externas

## 8 Valoración personal

Durante las prácticas externas me he familiarizado con los componentes del experimento NEXT-1 y especialmente con los fotomultiplicadores de silicio, que he estudiado y caracterizado en profundidad.

En concreto, he desarrollado un programa para calibrar los SiPM que se utilizarán en el plano de tracking utilizando distintos set-up, entre ellos las placas y electrónica concretas que se van a utilizar en NEXT-1. He medido la respuesta del SiPM a la llegada de unos pocos fotoelectrones y he realizado un ajuste múltiplo mediante una macro automática para calcular la ganancia de distintos SiPM para distintos voltajes de operación.

También he realizado otras medidas experimentales de crosstalk y corriente oscura, útiles para caracterizar dichos detectores (consultar apartados 3 y 4), además de otras medidas no relacionadas directamente con los SiPM, pero sí con el detector NEXT-1 (apartado 7).

Como valoración personal, puedo decir que las prácticas externas me han servido para complementar mi formación académica y adquirir experiencia y otro punto de vista (totalmente cercano a la realidad, al ponerse en contacto con muchos aspectos de la Física, incluso los menos atractivos o los más rutinarios de la investigación) sobre la física de hoy en día, el ambiente de un laboratorio real y las perspectivas de futuro que se me pueden plantear al acabar el Grado.

Por tanto, para las decisiones que tome en un futuro tendré mayor conocimiento de causa a partir de lo que he conocido y aprendido en estas prácticas, donde he puesto a prueba muchas de las competencias que he ido adquiriendo a lo largo de la carrera.

En concreto, he tratado de resolver los problemas o tareas que se han planteado apoyándome en los conocimientos adquiridos en diversas asignaturas (Física Nuclear y de Partículas, Óptica Cuántica) de 4º de Grado, realizando aproximaciones pertinentes para ser capaz de atacar el problema de la manera más sencilla posible y de entenderlo mejor conceptualmente.

También he podido aplicar las habilidades desarrolladas en los distintos laboratorios de la carrera de representación de datos, tratamiento y análisis, ajustes a funciones por mínimos cuadrados, etc.

Aparte, he tratado de asimilar rápidamente el manejo los nuevos programas informáticos y aparatos de medida que he tenido que utilizar, tecnología puntera con la que no había entrado en contacto hasta ahora.

Además, he realizado búsquedas bibliográficas para familiarizarme con el tema de la desintegración doble beta sin neutrinos y el experimento NEXT-1, así como de temas generales de Física de Partículas de investigación básica y aplicada. También he practicado el inglés al interactuar en el laboratorio con investigadores extranjeros o en la lectura de bibliografía, que estaba fundamentalmente en dicho idioma.

Por otro lado, he realizado informes en inglés sobre la actividad realizada, tratando de transmitir los resultados obtenidos de la manera más estructurada y clara posible mediante el uso del lenguaje científico.

Además he aprendido a trabajar en equipo, de manera organizada y coordinada con otro compañero de prácticas y el resto de investigadores del laboratorio, tratando de mostrar iniciativa e interés, colaborar, ser responsable, constante, comunicativo y aportar soluciones originales o creativas a ciertos problemas planteados.

Finalmente, me gustaría recomendar al resto de estudiantes del Grado de Física que elijan esta asignatura optativa, pues ofrece una visión totalmente distinta (más cercana a la realidad) sobre la física a la que recibes a lo largo de la carrera. Una visión enriquecedora que permite tomar decisiones con mayor conocimiento de causa, coherencia y claridad de ideas.

En especial, si decide hacerlas en torno al experimento NEXT-1, encontrará la última tecnología y muchos medios materiales, además de un magnífico ambiente de colaboración y simpatía de todos los investigadores, una autonomía notable y un gratificante reconocimiento del trabajo realizado.

## **Agradecimientos**

Gracias a David (ambos), Hapepe, Vicente, Javis, Álex, Sara, Luis, Francesc, Kira, Nadia, Pepe, Justo, Juanjo, José, Michel, etc. por vuestro apoyo, consejo y enseñanzas durante todo el período de prácticas.