

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ».

Физический факультет

Кафедра общей физики

Черепанов Андрей Вячеславович

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Измерение характеристик спектросмещающих пластин для прототипа
калориметра Супер Чарм-Тау фабрики**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №18303

Научный руководитель:

Оценка научного руководителя

«_____» _____ 20__ г.

Преподаватель практикума

Оценка преподавателя практикума

«_____» _____ 20__ г.

Куратор практикума:

Итоговая оценка

«_____» _____ 20__ г.

Рекомендуется к публикации в сборнике избранных курсовых работ

Научный руководитель

Преподаватель практикума

Куратор практикума

Аннотация

Целью работы являлось исследование недавно разработанных компанией LumInnoTech пластин, покрытых кремнийорганическими наноструктурированными люминофорами (КНЛ) NOL-34 и NOL-9. Пластина с КНЛ является составной частью счётчика на основе сцинтилляционного кристалла чистого CsI для калориметра Супер-Чарм-Тау-фабрики. Спектр сцинтилляционного света кристалла чистого CsI лежит в УФ области (спектральный максимум с длиной волны около 320 нм), и квантовая эффективность полупроводниковых фотодетекторов в этой области мала и сильно зависит от температуры. Пластины с КНЛ с высокой эффективностью (для NOL-9 эффективность составляет 95%, для NOL-34 эффективность составляет 99%) позволяют конвертировать УФ сцинтилляционный свет кристалла CsI в свет в видимом диапазоне, для которого квантовая эффективность полупроводниковых фотодетекторов уже достигает 80%. Для исследования характеристик счётчика с двумя пластинами NOL-34 и NOL-9 был собран специальный стенд. Были измерены значения амплитуд наиболее вероятного энерговыделения от космических частиц в счётчике с пластинами с NOL-34 и NOL-9. В результате было показано, что световыход счётчика с пластиной, покрытой NOL-34, согласуется со световыходом счётчика с пластиной, покрытой NOL-9. Также было показано, что разброс световыходов счётчиков с разными пластинами, покрытыми NOL-9, значителен.

Ключевые слова: кремнийорганические наноструктурированные люминофоры, NOL-34, NOL-9, калориметр, CsI.

Работа выполнена на факультете Физики Элементарных Частиц НГУ, в Институте Ядерной Физики им. Г. И. Будкера.

Оглавление

Оглавление	3
1. Введение	4
2. Описание эксперимента.....	5
2.1 Описание счётчика.....	5
2.2 Описание методики и установки.....	7
2.3 Результаты измерений.....	10
3. Анализ результатов измерений.....	11
3.1 Обработка результатов.....	11
3.2 Оценка погрешностей	13
4. Выводы и заключение.....	15
Список литературы.....	16

1. Введение

В Институте Ядерной Физики (ИЯФ) СО РАН обсуждается проект по созданию Супер Чарм-Тау Фабрики. Проектная светимость фабрики, 10^{35} $1/\text{см}^2/\text{с}$, позволит в десятки раз увеличить объём экспериментальной информации, набранной в области энергий в системе центра масс e^+e^- пучков от 2 до 6 ГэВ предыдущими экспериментами BES III, CLEO-c.

Широкая программа исследований на Супер Чарм-Тау фабрике включает всестороннее изучение физики с-кварка, тау-лептона, двухфотонной физики. На новом уровне точности будет изучено несохранение комбинированной СР чётности в распадах D-мезонов и тау-лептонов. Одной из основных задач Супер Чарм-Тау фабрики является поиск эффектов, которые не объясняются в рамках Стандартной Модели, поиск т. н. Новой Физики.

Высокая светимость Супер Чарм-Тау фабрики, и, как следствие, высокий уровень пучкового фона предъявляют очень жёсткие требования к детектору частиц. Одной из главных подсистем детектора является электромагнитный калориметр, который служит для измерения энергии и координат гамма-квантов, идентификации заряженных частиц и выработки триггерного сигнала с детектора. Для уменьшения шумов наложения (т. н. pile-up шумов) было предложено использовать сцинтилляционные кристаллы чистого CsI (с временем высвечивания около 30 нс) в счётчиках калориметра. Световыход кристаллов чистого CsI на порядок меньше чем, например, у широко используемых кристаллов CsI(Tl), поэтому для преобразования световой вспышки в электрический сигнал приходится использовать фоточувствительные элементы с внутренним усилением и низкошумящую электронику. В предложенной схеме используются полупроводниковые лавинные фотодиоды (ЛФД) Hamamatsu S8664-55, которые нечувствительны к магнитному полю. Их небольшие размеры и приемлемая цена позволяют

установить несколько ЛФД в один счётчик для обеспечения избыточности в считывании сигнала со счётчика. Над кристаллом чистого CsI расположена пластина с ЛФД, покрытая кремнийорганическими наноструктурированными люминофорами (КНЛ) NOL-9 или NOL-34. Люминофор NOL-9 переизлучает с эффективностью 95% сцинтилляционный свет кристалла чистого CsI (с длиной волны 320 нм.) в область видимого света с длиной волны 588 нм, где квантовая эффективность ЛФД Hamamatsu S8664-55 максимальна. Люминофор NOL-34 также переизлучает полученный свет от кристалла в область видимого света с длиной волны 592 нм с эффективностью 99%.

В данной работе требовалось исследовать характеристики счётчика на основе кристалла чистого CsI (с размерами 60 x 60 x 300 мм³) с пластинами, покрытыми спектросмещающим люминофором NOL-9 или NOL-34.

2. Описание эксперимента

2.1 Описание счётчика

Схема счётчика на основе кристалла чистого CsI показана на рисунке 1:

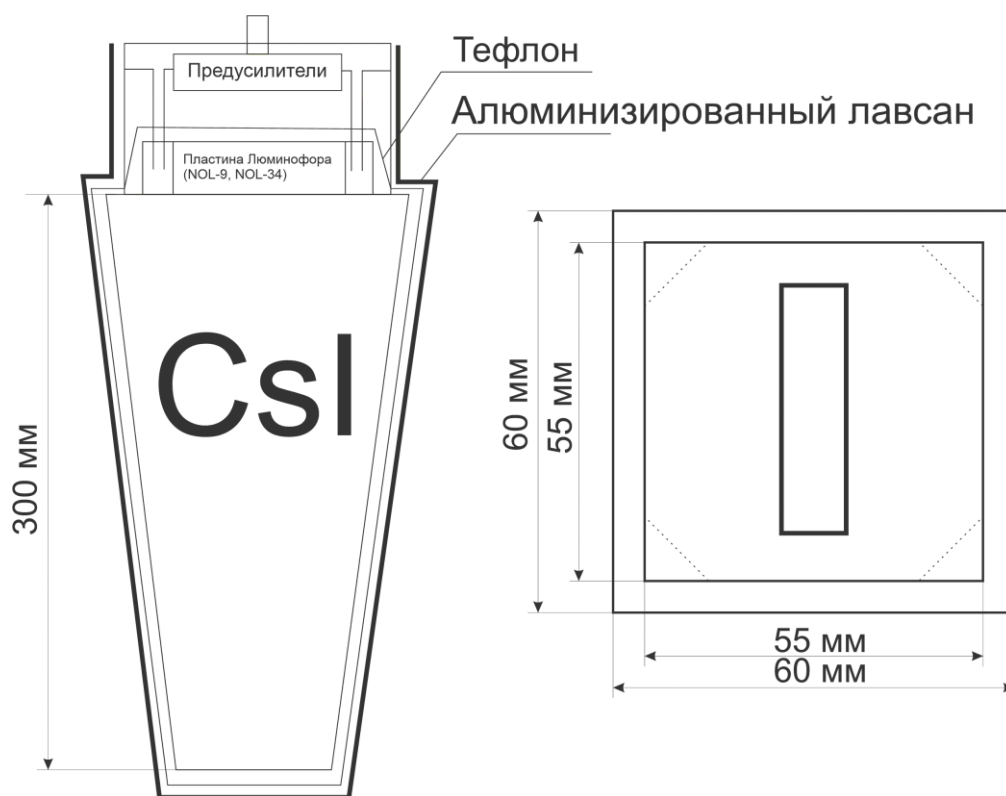


Рисунок 1-Схема счётчика

Сцинтилляционная вспышка регистрируется 4-мя лавинными фотодиодами фирмы Hamamatsu S8664-55. Однако длина волны сцинтилляционного фотона в кристалле CsI составляет 320 нм., а наиболее чувствительной зоной для кремниевых фотодетекторов является длина волны около 580 нм. Для повышения сигнала со счётчика можно использовать спектросмещающую пластину. В качестве такой пластины выбрана пластина сложной формы, покрытая слоем недавно разработанного наноструктурированного кремнеорганического люминофора (NOL-9 или NOL-34) толщиной 100 мкм. Она позволяет сместить спектр сцинтилляционного света с 320 нм. до ~580 нм. Схема пластины и внешний вид представлены ниже:

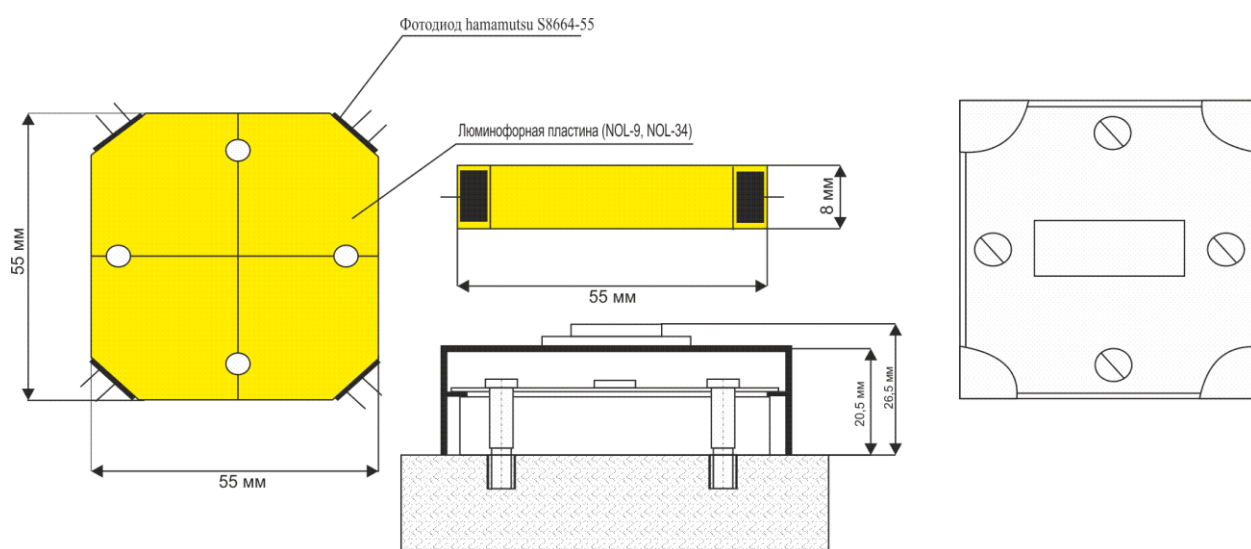


Рисунок 2-Схема пластины с ЛФД

Фотодиоды приклеены с помощью оптической смолы к четырём угловым торцевым граням пластины, как показано на рисунке 2. Четыре лавинных фотодиода подсоединены ко входам четырёхканального зарядочувствительного предусилителя (ЗЧПУ). Сигналы после ЗЧПУ через выходной разъём счётчика передаются по кабелю из витых пар в плату усилителей-формирователей-АЦП.

2.2 Описание методики и установки

Измерялся отклик счётчика на энерговыделение от космических частиц (в основном мюонов). Перед измерениями проводился расчёт рабочего напряжения лавинных фотодиодов. Затем счётчик помещался в светозащитный кожух. После светоизоляции, устанавливалось расчётное напряжение на источнике высокого напряжения, и начинался набор событий. Для каждого космического события оцифрованные АЦП амплитуды записывались в файл на персональном компьютере. Затем по накопленным данным с помощью программы строилась гистограмма амплитудного распределения сигналов со счётчика. Гистограмма фитировалась специальной функцией и извлекалась амплитуда наиболее вероятного энерговыделения в счётчике от космических частиц.

Принципиальная схема установки:

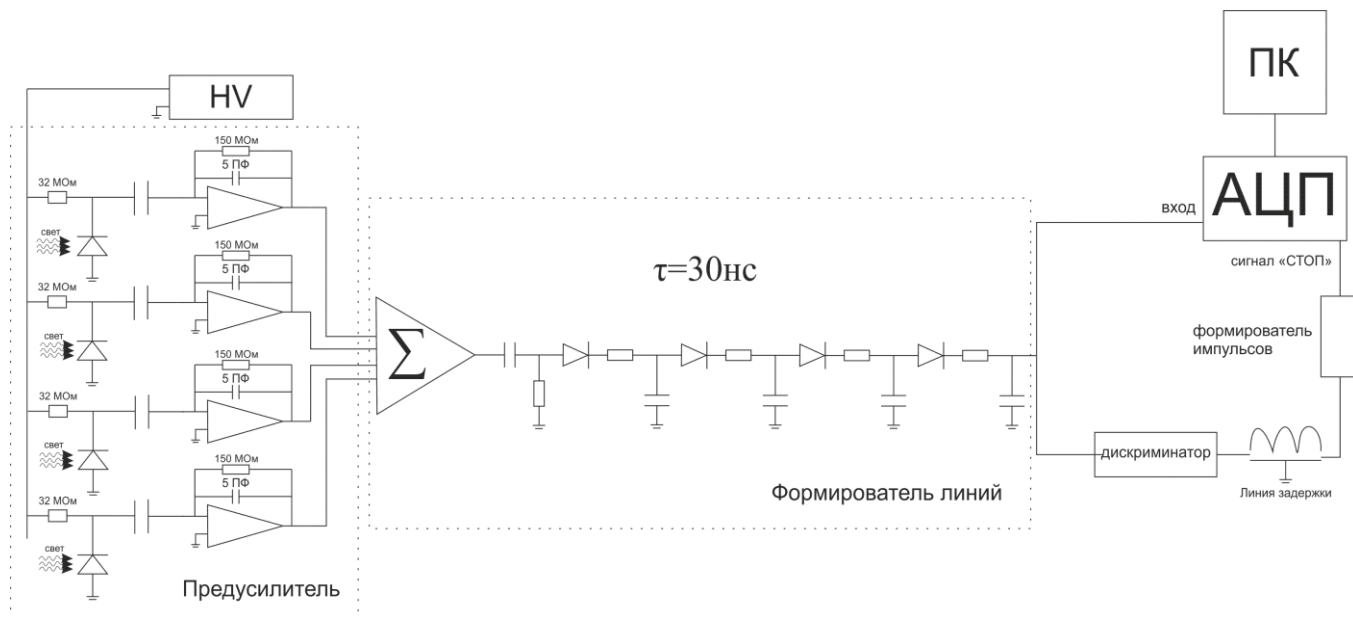


Рисунок 3-Схема установки

Сигнал с одного фотодиода поступает на один из каналов предусилителя. В нем происходит усиление и преобразование сигнала из импульса тока в импульс напряжения. После предусилителя импульс напряжения будет прямо пропорционален заряду, который в свою очередь пропорционален количеству зарегистрированных сцинтилляционных

фотонов, и обратно пропорционален емкости обратной связи, равной 5 пФ.

Выходной сигнал будет иметь вид:

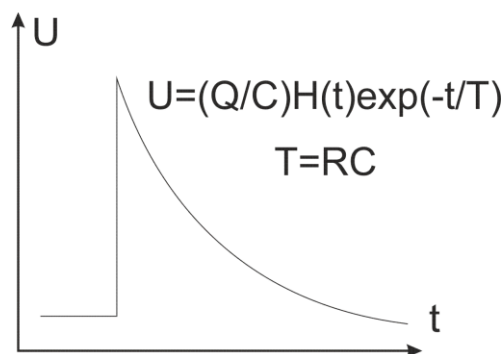


Рисунок 4-Сигнал после прохождения ЗЧПУ

Видно, что у импульсов короткие передние фронты и длинные экспоненциальные задние фронты. Время экспоненциального спада определяется постоянной времени RC . Формула, которая описывает форму сигнала представлена ниже:

$$U = \frac{q}{c} H(t) e^{\frac{-t}{\tau}} \quad (3)$$

Где $\tau = RC$ - постоянная времени RC . Импульс напряжения затем по витой паре передаётся в плату усилителей-формирователей-АЦП.

Используется усилитель-формирователь (CR-4RC), с временем формирования 30 нс. В начале происходит дифференцирование сигнала, а затем происходит 4-ехкратное интегрирование сигнала. Представим это в виде схемы:

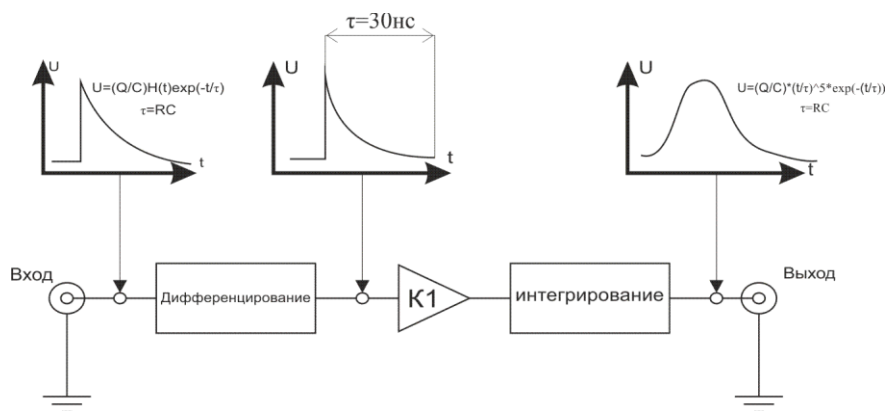


Рисунок 5-Преобразование сигнала на усилителе Формирователе

Модуль амплитуды напряжения после прохождения усилителя можно записать:

$$K(\omega) = \frac{R}{R + \frac{1}{i\omega C}} * \left(\frac{\frac{1}{i\omega C}}{R + \frac{1}{i\omega C}} \right)^4 \quad (4)$$

$$K(\omega) = \frac{\omega CR}{(\sqrt{1 + (\omega CR)^2})^5} = \frac{\omega \tau}{(\sqrt{1 + \omega^2 \tau^2})^5} \approx \frac{1}{\omega^4} \quad (5)$$

Тогда сигнал будет иметь колоколообразную форму, представленную ниже:

$$U = \left(\frac{Q}{C} \right) \left(\frac{t}{\tau} \right)^5 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (6)$$

Далее сигнал разветвляется, одна его часть идёт в АЦП, а другая – подаётся на дискриминатор. Дискриминатор преобразует сигнал так, как показано на схеме ниже:

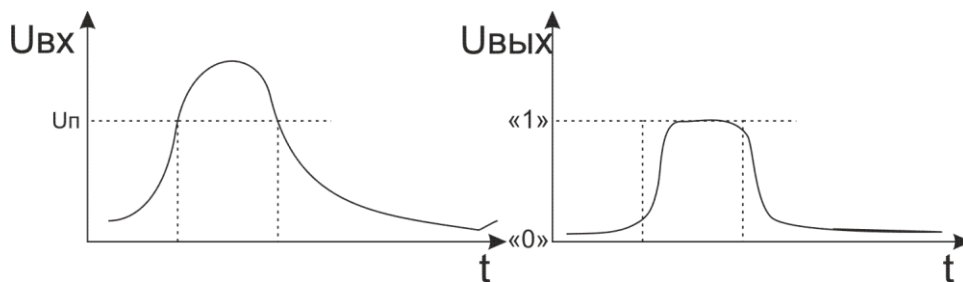


Рисунок 6-Преобразование сигнала в дискриминаторе

Затем для получения сигнала «СТОП» для АЦП сигнал проходит через линию задержки и формирователь импульсов.

Сигнал оцифровывается 12-битным АЦП. Данный АЦП работает с частотой 40 МГц. То есть происходит оцифровка амплитуды каждые 25 нс. Далее амплитуда записывается в кольцевой буфер на 256 слов. По сигналу «СТОП» из буфера АЦП вычитывались 64 12-битные амплитуды, они в виде двоичного кода поступают на персональный компьютер, где записываются в файл. После записи 10000 событий (каждое событие - 64 12-битных числа) происходит обработка с помощью специально написанной программы на языке с++. Затем происходила визуализация обработанных данных в виде гистограмм, где в каждом бине было число событий с определённой

амплитудой. Затем к полученной гистограмме применялась аппроксимирующая функция логнормального распределения.

2.3 Результаты измерения

Ниже представлены гистограммы для каждой из пластин, с найденной величиной амплитуды наиболее вероятного энергосодержания в счётчике от космических частиц:

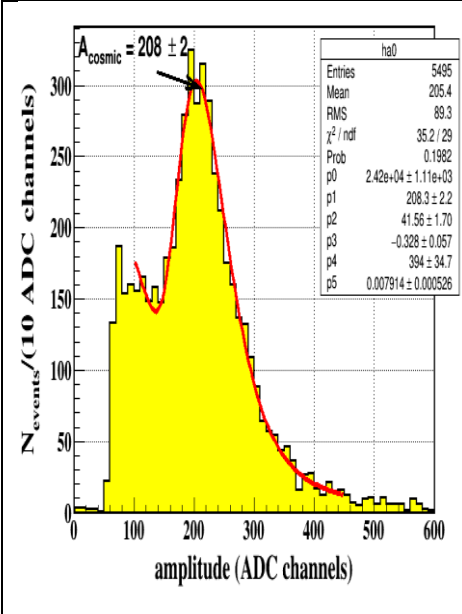


Рисунок 7.- Амплитуда пика регистрации космических частиц, используя первую спектросмещающую платину NOL-9.

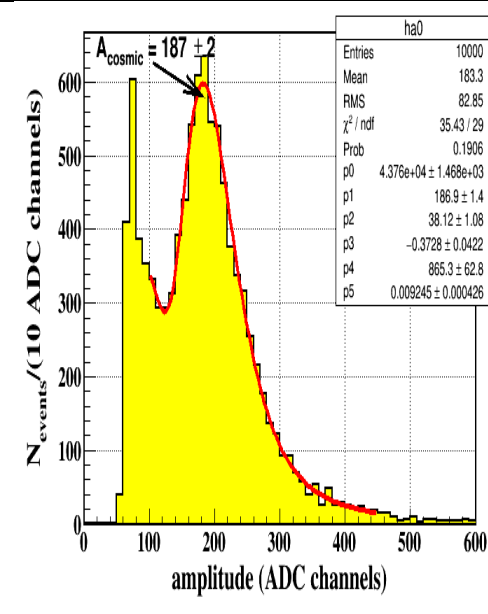


Рисунок 8.- Амплитуда пика регистрации космических частиц, используя вторую спектросмещающую платину NOL-9.

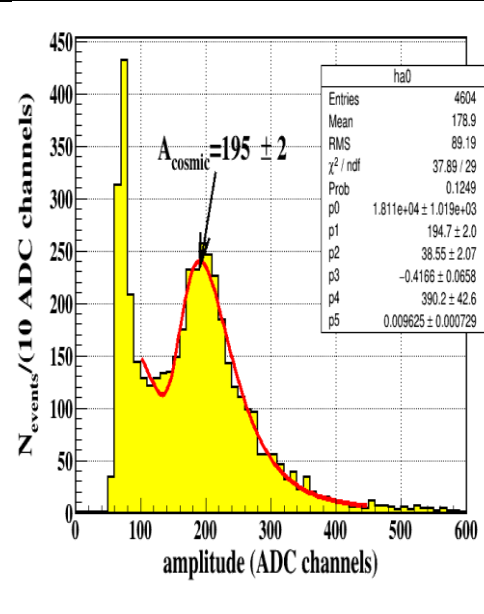


Рисунок 9.- Амплитуда пика регистрации космических частиц, используя спектросмещающую платину NOL-34.

На основе вычисленных значений амплитуды пика наиболее вероятного энергосодержания в счётчике от космических частиц для трёх пластин с КНЛ, видно, что пластина с NOL-34 согласуется со световым выходом счётчика с пластиной, покрытой NOL-9. Значение пика для пластины, покрытой NOL-34, попадает в разброс значений для пластин с NOL-9.

Сравнение полученного результата для NOL-34 с результатами для измеренных 16 пластин:

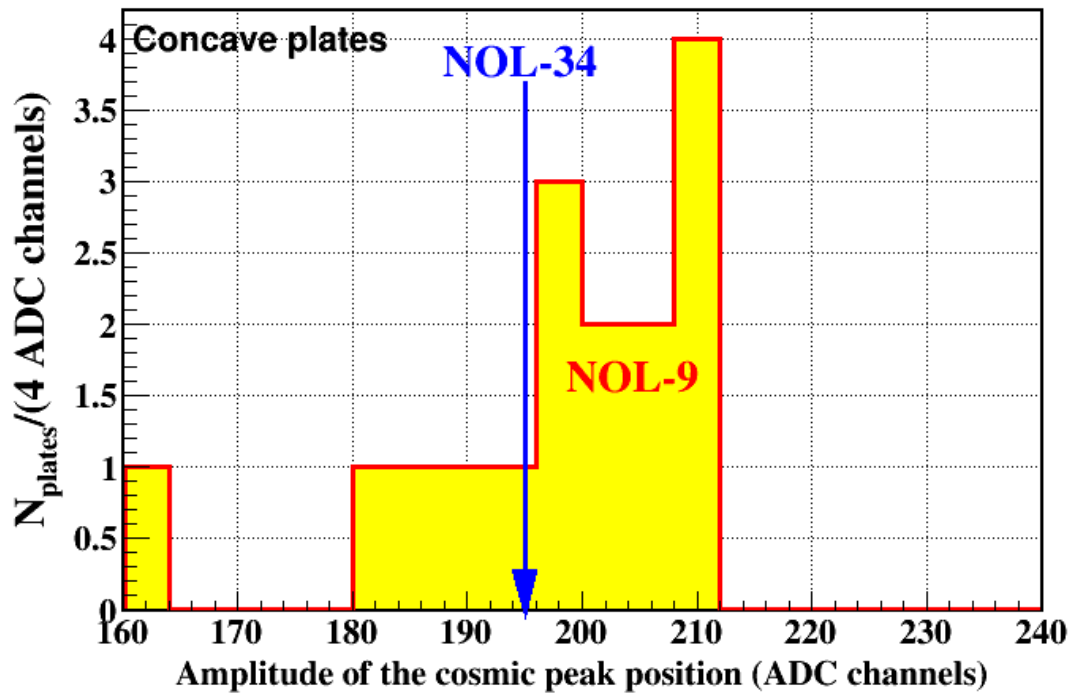


Рисунок 10-Сравнение результатов амплитуд для NOL-34 и NOL-9

Из рисунка 10, видно, что разброс значений для одинаковых пластин, покрытых NOL-9, большой и из расчётов составляет 25%.

3. Анализ результатов измерений

3.1 Обработка результатов

Аппроксимация полученного сигнала происходила в районе пика с помощью функции логнормального распределения, который можно получить из распределения Гаусса:

$$dW = N_0 \frac{(X - X_0)^2}{2\sigma^2} \frac{dX}{\sqrt{2\pi}\sigma}$$

Где:

N_0 - коэффициент нормализации

X_0 - среднее значение

σ – среднеквадратичное значение, которое определяет ширину распределения и для нормального полная ширина может быть выражена как $FWHM = 2\sqrt{2\ln(2)} = \xi \approx 2,35$

(FWHM - Полная ширина на уровне половинной амплитуды)

Однако наш сигнал обладает асимметрией, и тремя параметра аппроксимировать данную функцию не удобно.

Тогда можно провести замену $X \rightarrow \ln(\epsilon - E)$, где ϵ - максимально возможно значение E , которое будет характеризовать асимметрию. Тогда мы получим выражение:

$$dW = N_0 \exp \left(\frac{\left(\ln \left(\frac{\epsilon - E}{\epsilon - E} \right) \right)^2}{2\sigma^2} \right) \frac{dE}{\sqrt{2\pi}\sigma_0(\epsilon - E)}$$

Теперь наша функция может описывать ассиметричные распределения, но параметры N_0 , E , σ_0 , ϵ не обладают достаточной информативностью.

Проведем ещё одну замену на параметры, чей смысл будет более подходящим для данной задачи:

E_p – позиция пика.

$\sigma = \frac{FWHM}{\xi}$ – параметр, который характеризует полную ширину на уровне половинной амплитуды.

$\eta = \frac{\sigma}{\epsilon - E_p}$ – параметр, характеризующий асимметрию, в случае равенства нулю распределение переходит в гауссово.

Распишем связь новых параметров через старые:

$$\sigma_0 = \frac{2}{\xi} \sinh^{-1} \left(\frac{\eta \xi}{2} \right)$$

$$\epsilon = E_p + \sigma/\eta$$

$$E = E_p - \sigma/\eta (e^{\sigma_0^2} - 1)$$

$$E_p = \epsilon - (\epsilon - E)e^{-\sigma_0^2}$$

$$\eta = \frac{2}{\xi} \sinh\left(\frac{\sigma_0 \xi}{2}\right)$$

$$\sigma = (\epsilon - E)\eta e^{-\sigma_0^2}$$

Тогда наше распределение можно записать в таком виде:

$$dW = \exp\left(\frac{\ln^2(1 - \eta(E - E_p)/\sigma)}{2\sigma^2} - \frac{\sigma^2}{2}\right) \frac{\eta dE}{\sqrt{2\pi}\sigma_0\sigma}$$

Тогда полученные данные можно визуализировать в виде гистограммы, чтобы получить более наглядное представление. Из полученного распределения нам необходимо только положение пика амплитуды E_p , именно оно и будет амплитудой наиболее вероятного энергосвечения в кристалле от космических частиц.

Также программа с помощью матрицы корреляции и статистической теории ошибок, высчитывает погрешности каждого из параметров аппроксимирующей функции и выводит общую погрешность для полученного результата.

Полученные результаты для пластин представлен ниже в виде таблицы:

NOL-34	195±2 каналов АЦП
NOL-9	208±2 каналов АЦП
NOL-9	187±2 каналов АЦП

3.2 Оценка погрешностей

Для того, чтобы оценить соответствие полученных данных и ожидаемых нужен критерий оценки. Для нашего случая, когда имеется множество параметров, и требуется вычислить погрешности для всех параметров, а также рассчитать общую погрешность пика, подходит критерий Хи-квадрат. Опишем основную идею, которая заложена в данном критерий.

Рассмотрим выборку наблюдений, которые характеризуются значениями переменной x и прогнозом $f_0(x)$ их распределения. Разделим интервал x на B интервалов, и к каждому присвоим номер k . Прогноз для вероятности нашего наблюдения на интервале k :

$$p_k = \int f_0(x) dx$$

Где сумма всех p_k равна 1. Интеграл распространяется на все интервалы k . Количество наблюдений в каждом бине d_k должно быть сравнено с ожидаемым $N p_k$. Чтобы интерпретировать разницу $d_k - N p_k$, мы должны рассчитать среднее квадратичное отклонение δ_k^2 , считая, что наш прогноз верен. Так как наше распределение наших сигналов в каждом бине обладает биномиальным распределением, тогда мы имеем:

$$\delta_k^2 = N p_k (1 - p_k)$$

Тогда, так как вероятности p_k гораздо меньше единицы, то выражением в скобках можно пренебречь:

$$\delta_k^2 = N p_k$$

Тогда нормализуем наблюдаемое к ожидаемому среднему квадратичному отклонению:

$$\chi_k^2 = \frac{(d_k - N p_k)^2}{N p_k}$$

Просуммируем для всех бинов:

$$\chi_k^2 = \sum_{k=1}^B \frac{(d_k - N p_k)^2}{N p_k}$$

Для повышения точности требуется чтобы χ^2 квадрат стремился, как можно, меньшему значению.

Можно рассчитать корреляционную матрицы. Из методов статистического анализа погрешностей:

$$\left(\frac{1}{2} \frac{\partial^2 \chi^2}{\partial p_i \partial p_j} \right)^{-1} = D = \begin{pmatrix} \delta_1^2 & \delta_1 \delta_2 & \dots \\ \delta_2 \delta_1 & \delta_2^2 & \dots \\ \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix}$$

Где диагональные элементы являются квадратом ошибок параметров.

Все расчеты происходили с помощью специальной программы, критерий Хи квадрат и матрицы рассчитывались с помощью численных методов.

Систематические ошибки много меньше статистических и ими можно пренебречь.

4. Выводы и заключение

Целью данной работы было сравнение показаний световыхода счетчика с пластинами одинаковой формы, покрытых разными люминофорами: NOL-34 и NOL-9. С каждой из пластин собирался сцинтилляционный счётчик, набиралась статистика событий прохождения через счётчик космических частиц, проводилась обработка данных и извлекалась амплитуда наиболее вероятного энерговыделения в счётчике.

Из полученных результатов можно сделать выводы:

- 1) Световыход счётчика с пластиной, покрытой NOL-34, согласуется со световыходом счётчика с пластиной, покрытой NOL-9.
- 2) Разброс световыходов счётчиков с разными пластинами, покрытыми NOL-9, значителен и достигает 25%. Это связано с особенностями технологии нанесения покрытия с люминофором на поверхность пластины. Для достижения меньшего разброса требуется усовершенствовать технологию нанесения покрытия с люминофором на поверхность пластины.

Список литературы

1. Fast calorimeter on the pure CsI crystals for the moderne+e-Super Factories/D.A.Epifanov.
<https://journals.jps.jp/doi/pdf/10.7566/JPSCP.27.012010>
2. Pure CsI calorimeter for Super C-Tau factory/D.A.Epifanov.
<https://indico.inp.nsk.su/event/13/session/10/contribution/17/material/slides/0.pdf>
3. Study of scintillation counter consisting of a pure CsI crystal and APD/D.A.Epifanov. <https://pos.sissa.it/252/052/pdf>
4. Gerhard Bohm. Introduction to Statistics and DataAnalysis for Physicists/Gerhard Bohm, Günter Zech – Deutsches Elektronen-Synchrotron in der Helmholtz-GemeinschaftZentralbibliothek. February 2010, - 412 стр.
5. Аульченко В.М., Анализ сигналов. Элементы аналоговой электроники. Новосибирский гос. ун - т. Новосибирск, 2001. 104 с.
6. Ядерная электроника для пользователей/Э.Кэбин.