

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

им. М.В.Ломоносова

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

КАФЕДРА ФИЗИКИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

Антошкина А.И.

На тему

**КАЛИБРОВКА И КОНТРОЛЬ ФОТОДЕТЕКТОРА ДЛЯ
MULTI-PURPOSE ДЕТЕКТОР (MPD) КОЛЛАЙДЕРА
NUCLOTRON-BASED ION COLLIDER FACILITY (NICA)**

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук
профессор
Тяпкин И.А.

Заведующий кафедрой
академик РАН
Кадышевский В.Г.

Москва, 2013

Содержание

1	Введение	2
2	Физическая программа эксперимента MPD	3
2.1	Цель проекта	4
3	Калориметры.	6
3.1	Электромагнитные и адронные ливни	6
3.1.1	Электромагнитные ливни	6
3.1.2	Адронные ливни	8
3.2	Гомогенные и гетерогенные калориметры	9
3.2.1	Гомогенные калориметры	9
3.2.2	Гетерогенные калориметры	10
3.2.3	Энергетическое разрешение калориметров	10
3.3	Для чего нужен калориметр и каковы требования к нему	11
3.4	Электромагнитные калориметры типа «шашлык»	12
3.4.1	Фотодетектор ECAL	13
3.4.2	Калибровка и контроль	13
3.4.3	Привязка к физическим величинам	14
4	Цель работы	16
5	Влияние температуры	17
5.1	Эвакуация тепла	17
5.2	Термостат	20
5.3	Элементы электроники	21
5.4	Корректировка температурной зависимости МЛФД	23

1 Введение

В физике высоких энергий основными детекторами для измерения энергии электронов(позитронов) и фотонов являются счетчики полного поглощения, в которых амплитуда сигнала пропорциональна энергии регистрируемой частицы. Такие детекторы называют «электромагнитными калориметрами» (от лат. calor — тепло и metor - измерять). Поглощенная в них энергия частиц в конечном итоге переходит в тепло.

Весьма перспективным выглядит слоистый калориметр типа "Шашлык". В этом калориметре чередуются слои поглотителя и сцинтиллятора, пронизанные в поперечном направлении собирающими свет спектросмещающими (WLS) волокнами. Данный тип калориметров планируется использовать в эксперименте NICA-MPD (JINR, Dubna).

Работа выполнена в Лаборатории Физики Высоких Энергий им. В.И. Векслера и А.М. Балдина Объединенного Института Ядерных Исследований (ОИЯИ).

2 Физическая программа эксперимента MPD

На данный момент актуальной задачей в физике высоких энергий является изучение экстремально плотной и горячей ядерной материи. Изучение этой среды даёт возможность обнаружить новое состояние материи – кварк-глюонную плазму (КГП). Досконально изучив свойства кварк-глюонной плазмы можно исследовать фундаментальные проблемы современной физики высоких энергий: уравнение состояния ядерной материи при высоких плотностях, проявление и свойства фазового перехода в состояние деконфайнмента, свойства вакуума КХД, восстановление киральной симметрии, свойства кварк-адронной смешанной фазы и наличие критической точки на фазовой диаграмме.

В ОИЯИ в качестве одной из приоритетных принята программа изучения ядерной материи в горячем и плотном состоянии. Основные цели программы: создание ускорительного комплекса ионов с высокой светимостью в диапазоне энергий до 11 ГэВ/нуклон и современного многофункционального детектора для исследования столкновений тяжелых ионов. В качестве первого шага было принято решение провести модернизацию действующего ускорителя ионов Нуклотрона. На его базе планируется строительство ускорительно-накопительного комплекса NICA. Ионы будут сталкиваться в широком диапазоне атомных масс и энергий столкновений (до $\sqrt{s_{NN}} = 11$ ГэВ). Ускоритель будет обладать очень высокой светимостью - $L = 10^{27} \text{cm}^{-2} \text{c}^{-1}$.

Схема ускорительного комплекса NICA показана на рис.1. На коллайдере предусмотрено два места встречи пучков, что позволяет установить два детектора и проводить одновременно два эксперимента.

Один из детекторов - Многоцелевой детектор(MPD) планируется для изучения свойств горячей и плотной ядерной материи, образованной при соударениях тяжелых ионов высоких энергий, в частности для поиска эффектов, связанных с деконфайнментом и/или восстановлением киральной симметрии, исследования свойств фазовых переходов и смешанной адронной и кварк-адронной фазы.

2.1 Цель проекта

Основным направлением исследований в рамках проекта NICA/MPD является изучение фазовой диаграммы ядерной материи при высоких плотностях и температурах. В фазовой диаграмме проявляются свойства теории сильных взаимодействий - КХД. Конфайнмент и нарушение киральной симметрии, хорошее понимание которых до сих пор отсутствует. Считается, что сверхплотная материя существует в нейтронных звёздах и в центре сверхновых, а вот на ранней стадии эволюции Вселенной реализовывались условия, при которых температура была очень высока с примерно равной плотностью барионов и антибарионов. В лабораторных экспериментах похожие условия могут быть реализованы в объёме реакции при столкновениях релятивистских тяжелых ионов. В таких реакциях образуется высокая плотность энергии значительная часть которой преобразуется в возбуждение новых (цветных) степеней свободы.

Согласно предсказаниям КХД, при сверхвысоких температурах ($T > 130$ МэВ) и/или плотностях ($\rho > 5\rho_0$, ρ_0 - обычная ядерная плотность) в адронной среде возможен фазовый переход, т.н. деконфайнмент при котором материя существует в виде свободных кварков и глюонов (кварк-глюонная плазма). Общий вид фазовой диаграммы сильно взаимодействующей адронной материи представлен на Рис. 2.

Как показано на рисунке, эксперименты на BNL-RHIC и CERN-LHC проводятся в области фазовой диаграммы где температура среды высока, а барионная плотность мала. В этой области энергий обнаружены свидетельства существования сильно взаимодействующей кварк-глюонной материи. В экспериментах на ускорителе GSI-SIS при энергиях 1-2 ГэВ/нуклон, где реализуются высокие барионные плотности, обнаружены возможные проявления эффектов модификации свойств векторных мезонов (их масс и ширин распада). Эксперименты на коллайдере NICA планируется проводить в промежуточной области фазовой диаграммы при умеренных температурах и максимальных значениях барионной плотности. Особенностью этой области диаграммы является не только обнаруженные экспериментально проявления эффекта деконфайнмента, но и наличие т.н. **критической точки**, возможность существования которой и позиция ее на фазовой диаграмме вызывает огромный интерес. Согласно последним вычислениям в рамках решеточной модели КХД ее местонахождение предсказано при температуре $T_E = (162 \pm 2)$ МэВ и барио-химическом потенциале $\mu_E = (360 \pm 40)$ МэВ. Сразу несколько лабораторий в крупнейших ускорительных центрах мира планируют проводить такие эксперименты. Германия (GSI, эксперимент CBM, ускоритель FAIR), США (BNL, где предложено модернизировать RHIC для уменьшения энергии, чтобы достичь этой области фазовой диаграммы), CERN с экспериментом NA61. Проект NICA в ОИЯИ, следует отметить, был предложен одним из первых в новой программе по исследованию плотной барионной материи в столкновениях тяжелых ионов.

Superconducting accelerator complex **NICA** (Nuclotron based Ion Collider fAcility)

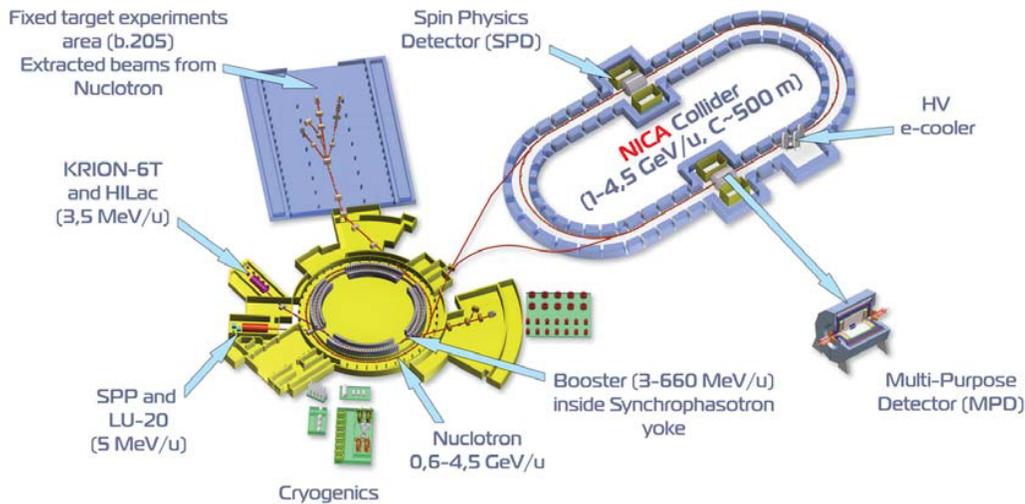


Рис. 1: Проект ускорительного комплекса NICA

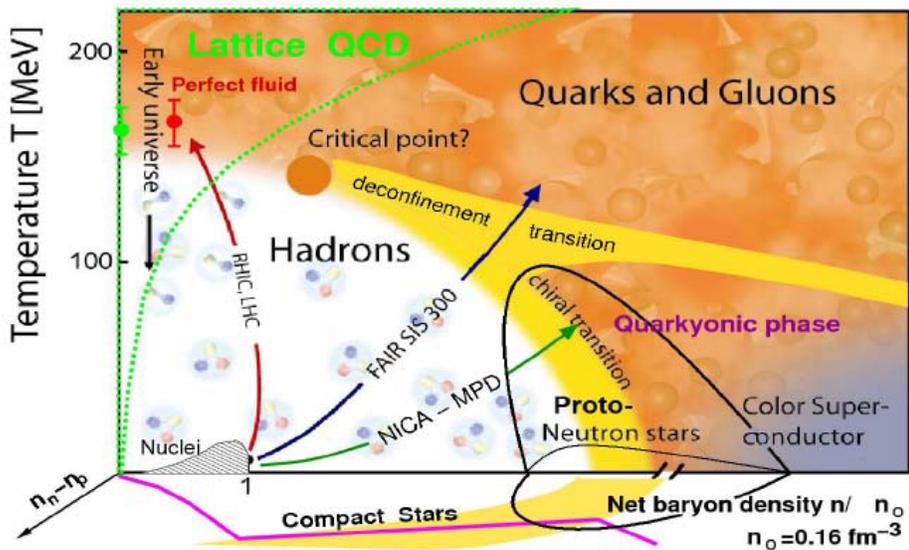


Рис. 2: Фазовая диаграмма сильно взаимодействующей КХД материи

3 Калориметры.

Калориметры предназначены главным образом для измерения полной энергии высокоэнергичных (в том числе и нейтральных) частиц. Попав в вещество калориметра частица рождает ливень вторичных частиц, передавая им свою энергию. Ливень поглощается в объеме калориметра и его энергия измеряется.

Преимущества калориметров:

- Калориметры позволяют измерять энергии частиц в диапазоне от нескольких МэВ до максимально достижимой.
- Относительное энергетическое разрешение калориметров увеличивается с ростом энергии как $E^{-1/2}$, где E - энергия падающей частицы, в то время как у магнитных спектрометров разрешение по импульсу линейно падает с увеличением импульса. Размеры калориметра увеличиваются с энергией логарифмически, в то время как размеры магнитного спектрометра растут с импульсом линейно.
- Калориметры чувствительны как к заряженным, так и к нейтральным частицам.
- При сегментации калориметра можно получить информацию о координатах частиц и струй. Точность измерения координат оси ливня частиц повышается с ростом энергии и может быть лучше, чем 1мм. Возможно измерение как продольной, так и поперечной составляющих импульсов частиц.
- Калориметры также можно использовать как триггеры для селективного отбора событий (длительность сигналов на выводах ячеек калориметра ~ 10 и менее)
- Калориметры позволяют идентифицировать частицы. Например, различать электроны и фотоны от пионов и мюонов.

По типу детектируемых частиц калориметры делятся на электромагнитные и адронные. Конструктивно калориметры подразделяются на гомогенные и гетерогенные (сэмплинг-калориметры).

3.1 Электромагнитные и адронные ливни

3.1.1 Электромагнитные ливни

Электроны, позитроны и гамма-кванты в рожают в веществе калориметра электромагнитные ливни. При энергии ≥ 1 ГэВ основной процесс для фотона – рождение электрон-позитронной пары, для электрона (позитрона) – рождение тормозного фотона. При этом оба процесса уже мало зависят от энергии частицы.

Рассмотрим формирование электромагнитного ливня на примере влетающего в калориметр фотона. Влетающий в калориметр фотон рождает электрон-позитронную пару. В

свою очередь, если энергия электронов (позитронов) больше критической E_c^* , они производят тормозное излучение (фотоны). Количество частиц в ливне будет быстро расти, пока средняя энергия не понизится до критической и основным механизмом для заряженных частиц не станет ионизация. Удельные потери на тормозное излучение:

$$(dE/dx)_{rad} \approx -E/X_0,$$

$$E = E_0 \exp(-x/X_0),$$

где X_0^{**} - радиационная длина, E_0 - энергия первичной частицы.

Быстрый электрон, проходящий в веществе расстояние в одну радиационную длину, уменьшает свою энергию в e раз и при этом испускает в среднем один фотон. Фотон в слое толщиной в одну радиационную длину с вероятностью 54% рождает электрон-позитронную пару. Толщина вещества, на которой образуется максимальное количество вторичных частиц:

$$t_{max} \approx \ln(E_0/E_c) + t_0,$$

где $t_{max} = x/X_0$ измеряется в единицах радиационной длины, $t_0 = -0.5(+0.5)$ для электронов(фотонов).

Толщина calorimetра, где поглощается 95% энергии ливня:

$$t_{95\%} \approx t_{max} + 0.08Z + 9.6$$

В calorimetрах с толщиной $\simeq 25X_0$ регистрируется более 99% энергии ливня вплоть до энергии первичных электронов ~ 300 ГэВ. Таким образом электромагнитные calorimetры весьма компактны.

Поперечный размер электромагнитного ливня в основном определяется многократным рассеянием электронов и позитронов. Тормозные фотоны, испускаемые этими электронами и позитронами также вносят свой вклад. Поперечные размеры по всей глубине ливня даются радиусом Мольер (R_M^{***}):

$$R_M(g/cm^2) \simeq X_0 \frac{21MeV}{E_c}.$$

В цилиндре с радиусом $2R_M$ поглощается 95% энергии ливня.

* Критическая энергия – энергия, при которой удельные потери на тормозное излучение становятся равными ионизационным удельным потерям.

$$(dE/dx(E = E_c))_{rad} = (dE/dx(E = E_c))_{ion}.$$

При $E > E_c$ доминируют потери на тормозное излучение.

** Радиационная длина - средняя толщина вещества, на которой энергия электрона уменьшается в e раз.

$$X_0 = 180 \frac{A}{Z^2} [g/cm^2]$$

*** Радиус Мольер или мольеровский радиус - радиус цилиндра, в пределах которого поглощается около 90% энергии электромагнитного ливня.

3.1.2 Адронные ливни

При поглощении сильно взаимодействующих частиц (адронов) в веществе, как и в случае электронов и гамма-квантов образуются ливни. Однако в случае адронных ливней механизмы значительно сложнее.

Когда высокоэнергетичный адрон попадает в ядро, он взаимодействует с его нуклонами, передавая им часть своей энергии. Получившие энергию нуклоны, в свою очередь взаимодействуют с другими нуклонами. В результате такого внутриядерного каскада, энергия налетевшего протона перераспределяется по все большему количеству нуклонов ядра и через некоторое время образуется составное ядро. Часть нуклонов в процессе развития внутриядерного каскада вылетает из ядра. Кроме нуклонов из ядра могут вылетать кластеры (альфа-частицы, дейтроны, ...) и гамма-кванты. Если в качестве поглотителя используется уран, возможен процесс деления. Вылетают также π и η -мезоны, если энергия выше порога их образования. Частицы вылетают ("испаряются") также на стадии составного ядра. Формируется также внешний каскад, когда высокоэнергетические частицы из реакции скалывания в свою очередь попадают в другие ядра.

В результате реакций частиц ливня с ядрами вещества вылетают нуклоны. При этом часть энергии ливня тратится на энергию связи нуклонов (~ 8 МэВ). Эти потери вносят вклад в так называемую невидимую энергию. Это часть энергии ливня, которая не фиксируется калориметром.

Кроме того в калориметре не фиксируется энергия нейтрино и большая часть энергии мюонов.

Некоторые из частиц (например, π^0 , η), произведенные в этом каскадном процессе, распадаются с помощью электромагнитного взаимодействия. Таким образом, в адронном ливне обычно есть примесь электромагнитного ливня. Доля энергии первичного адрона, которая передается образующимся π^0 и η , сильно меняется от случая к случаю, в зависимости от деталей процессов, происходящие на ранних стадиях развития ливня, то есть периода, когда производство этих частиц является энергетически возможным.

В среднем, примерно треть мезонов, образующихся в первом взаимодействии будет π^0 . Во втором поколении каскада, адроны, если они достаточно энергичны, также могут вызвать образование π^0 и так далее. А поскольку образование π^0 является необратимым процессом, средняя доля начальной энергии передаваемая пи-нулям примерно логарифмически увеличивается с энергией.

Электромагнитный ливень, инициированный нейтральными π -мезонами, развиваться так же, как ливень, инициированный высокоэнергетичными электронами или фотонами. Доля энергия, переносимая таким электромагнитным ливнем (f_{em}) сильно меняется от случая к случаю. В среднем, f_{em} растет с энергией, так как π^0 могут образовываться и в последующих поколениях ливня. Как правило, f_{em} возрастает от $\sim 30\%$ при 10 ГэВ до $\sim 50\%$ при 100 ГэВ. В типичной адронном ливне, который развивается в свинце, остальная (не ЭМ) энергия распределяется следующим образом: от ионизирующих частиц (56%, две трети от протонов), от нейтронов (10%), на невидимую энергию приходится 34%. Нейтроны очень мягкие (обычно ~ 3 МэВ). Протоны, которые образуются в основном в

ядерных реакциях скалывания, имеют энергию 50-100 МэВ. Они пролетают в калориметре около 1 см. Это задает масштаб для дискретизации в адронном калориметре. Нейтроны вносят вклад в отклик калориметра, если они имеют достаточно большую вероятность взаимодействия в активном материале. Таким образом, подавляющая часть энергии не ЭМ ливня приходится на нуклоны, а не на релятивистские частицы, такие как пионы. Из-за наличия невидимой энергии, калориметрический сигнал для адронов как правило меньше чем для электронов той же энергии (недокомпенсация). Так как f_{em} зависит от энергии, отклик калориметра на адроны не линеен по энергии.

Аналогично радиационной длине можно ввести длину ядерного взаимодействия λ_h . Однако масштабы другие. Так для поглощения 95% ливня, вызванного π^- -мезоном с энергией 300 ГэВ в уране, требуется около 80 см, в то время как для электрона той же энергии 10 см будет достаточно. Длина ядерного взаимодействия приблизительно пропорциональна ядерному радиусу:

$$\lambda_h \approx 35A^{1/3}[g/cm^2].$$

Так же, как для электромагнитного калориметра, толщина адронного калориметра, необходимая для поглощения адронного ливня приблизительно логарифмически растет с увеличением энергии. Из-за больших флуктуации в развитии ливня, последствия утечки по-прежнему могут играть важную роль. В поперечном направлении высокоэнергетичный ливень занимает меньше места, чем низкоэнергетичный. Это является следствием того, что доля электромагнитной компоненты, вызванной нейтральными π -мезонами и имеющей тенденцию развиваться близко к оси ливня, растет с энергией. Величины λ_h и X_0 сильно различаются, особенно в материалах с большим Z .

В большинстве случаев адронные калориметры гетерогенные из-за больших величин λ_h .

3.2 Гомогенные и гетерогенные калориметры

3.2.1 Гомогенные калориметры

В гомогенных калориметрах поглощающий материал одновременно является и детектирующим.

Основное преимущество гомогенных детекторов – хорошее энергетическое разрешение, что связано с тем, что вся энергия падающей частицы поглощается в активной (детектирующей) среде. С другой стороны, гомогенные калориметры труднее сегментировать в поперечном и продольном направлениях, что является недостатком, когда требуется координатная информация. Кроме того, толщины, необходимые для поглощения ливней от высокоэнергетичных частиц, могут превосходить разумные пределы. Это особенно критично для адронных калориметров, поэтому гомогенные калориметры редко используются для регистрации адронных ливней в экспериментах на ускорителях. С другой стороны, они используются в нейтринных экспериментах, в которых для обнаружения редких событий необходимы большие объемы и используются недорогие материалы, например, вода или воздух.

3.2.2 Гетерогенные калориметры

В гетерогенных калориметрах функции поглощения и детектирования разделены. Это позволяет оптимальным образом выбрать поглотитель. Гетерогенные калориметры обычно имеют структуру сэндвичей – слои поглотителя чередуются с детектирующими слоями. Они также могут представлять собой сцинтилляционные волокна, включенные в свинцовую матрицу. Раздельное считывание отдельных сцинтилляционных волокон обеспечивает прекрасное пространственное разрешение. Такие сцинтилляционные волоконные калориметры могут рассматриваться как трековые детекторы. В гетерогенных калориметрах детектируется только часть энергии ливня.

В калориметрах большая часть поглощаемой энергии приходится на низкоэнергетичные частицы. В частности фото и комптоновские электроны вносят значительный вклад в отклик калориметра. У них изотропное угловое распределение и они "забывают" направление входящих частиц. В результате, не имеет значения как ориентированы детектирующие (активные) слои калориметра. Ранее считалось, что только структура "сэндвич" будет работать. В настоящее время используются различные геометрии, например, волоконные структуры с детектирующими волокнами, расположенными в том же направлении, что и ось ливня.

В дальнейшем мы будем говорить как раз о гетерогенных калориметрах.

3.2.3 Энергетическое разрешение калориметров

Калориметры основаны на физических процессах имеющих статистический характер, точность калориметрических измерений определяется флуктуациями. В электромагнитном калориметре на энергетическое разрешение влияют:

- статистические флуктуации числа частиц в ливне,
- флуктуации утечки ливня из объема калориметра,
- шумы электроники, структурных неоднородности и т.п.,
- "сэмплинг" флуктуации.

Энергетическое разрешение идеального гомогенного электромагнитного калориметра бесконечных размеров определяется лишь статистическими флуктуациями числа частиц. На практике энергетическое разрешение конкретного калориметра зависит от флуктуаций различного типа с различными энергетическими зависимостями. Как правило, эти эффекты нескоррелированы, и, поэтому, они должны быть добавлены в квадратуре. В общем разрешении калориметра при разных энергиях могут доминировать различные эффекты. Сэмплинг-флуктуации характерны только для гетерогенных калориметров (сэмплинг-калориметров). В гетерогенных калориметрах энергия, осаждаемая в активных слоях флуктуирует. Эти флуктуации связаны с вариацией количества частиц N , пересекающих активный слой. Количество частиц N пропорционально E_0/t , где t – толщина активного

слоя в единицах радиационной длины. Сэмплинг флуктуации определяются флуктуациями N :

$$\frac{\sigma}{E} \sim \frac{1}{\sqrt{N}} \sim \sqrt{\frac{t}{E_0}} \quad (1)$$

Чем меньше толщина, тем больше выборка и лучше энергетическое разрешение. В хорошо разработанном гетерогенном калориметре, эти флуктуации доминируют.

Энергетическое разрешение "сэндвич" калориметров параметризуется формулой:

$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{a_{samp}}{\sqrt{E}} \oplus \frac{b}{\sqrt{E}} \oplus c \oplus \frac{d}{E}, \quad (2)$$

где a_{samp} определяется сэмплинг-флуктуациями, возникающими из-за слоистой структуры калориметра, b - флуктуациями количества фотоэлектронов, образовавшихся в фотодетекторе, c - систематическими ошибками, d - шумами и емкостью фотодетектора и предусилителя. Складываются они квадратично.

Как уже было сказано ранее, сэмплинг флуктуации доминируют. Еще одна формула для их оценки:

$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{a_{samp}}{\sqrt{E}} \approx \frac{\sigma_0}{\sqrt{E}} \cdot \left(\frac{t}{X_t}\right)^\alpha \cdot \left(\frac{s}{X_s}\right)^{-\beta}, \quad (3)$$

где t - толщина слоя поглотителя, s - толщина слоя сцинтиллятора, X_t, X_s - радиационные длины поглотителя и сцинтиллятора, α, β, σ_0 - параметры.

3.3 Для чего нужен калориметр и каковы требования к нему

Реальные и виртуальные фотоны (дилептоны) дают возможность получить ключевую информацию о температуре, размерах системы на ранних стадиях столкновения, о температурной эволюции системы от ее возникновения до теплового вымораживания. Дилептоны рождаются на протяжении всей пространственно-временной эволюции системы, сразу по испусканию вылетают из сильно взаимодействующей среды без взаимодействия в конечном состоянии. Информацию о прямом тепловом излучении (фотоны и дилептоны) можно использовать для получения оценки начальной температуры КГП, образовавшейся в столкновениях тяжелых ионов.

Главное назначение электромагнитного калориметра – измерение координаты и энергии электронов и фотонов, рожденных в столкновениях тяжелых ионов. Из-за высокого временного разрешения калориметр будет играть важную роль в идентификации частиц. Детектор фотонов будет служить для измерения полного потока энергии, который отражает начальные условия, достижимые в столкновениях тяжелых ионов на установке NICA. Первым шагом в реконструкции событий будет поиск π^0 -мезонов и вычитание фотонов, связанных с ними, из полного потока фотонов. Оставшиеся фотоны считаются кандидатами в прямые фотоны. Заряженные треки с соответствующим энерговыделением будут анализироваться с целью их идентификации как e , π , K или p . Для достижения требуемой чувствительности в реконструкции π^0 при высоком фоне, энергии фотонов должны измеряться с высокой точностью.

Ожидаемые условия с высокой множественностью предполагают сильную сегментацию калориметра, достаточно большое расстояние до вершины и использование плотной активной среды с малым мольеровским радиусом. Для получения необходимого пространственного разрешения и возможности разделения перекрывающихся линий, поперечный размер ячейки должен быть порядка величины мольеровского радиуса. Надежная реконструкция фотонов и мезонов возможна только при небольших перекрытиях ливней. Плотность частиц (осцирапсу) не должна превышать 5 %, для того, чтобы можно было с высокой точностью определить эффективность реконструкции фотона.

Квадратные ячейки детектора со стороной 3 см обеспечат осцирапсу не более 5 % во всем акцептансе детектора.

Разрешение по энергии является крайне важным параметром в условиях высокой множественности фотонов. Требуемое энергетическое разрешение составляет $\sim 3\%$.

Сигналы от нейтральных адронов можно будет отбирать с помощью обрезания по ширине ливня, а также используя условие по времени пролета. Для длины пролета 1.5 м адроны достигнут детектора позже, чем фотоны. В детекторе ESCAL будет возможность измерять времена пролета в субнаносекундном диапазоне.

Детектор фотонов должен устойчиво работать в магнитном поле величиной до 0.5 Тл и быть компактным, чтобы его можно было использовать в MPD.

Электромагнитный калориметр типа "шашлык" удовлетворяет всем перечисленным требованиям.

3.4 Электромагнитные калориметры типа «шашлык»

Электромагнитные калориметры типа "шашлык" обладают хорошим энергетическим ($\frac{3\%}{\sqrt{E}}$) и пространственным разрешением. Обладая относительной простотой конструкции и данными достоинствами, калориметры нашли своё применение в физике высоких энергий в экспериментах: PHENIX, KORIО, LHCb и др. Планируется использование данных калориметров в эксперименте MPD на создаваемом ускорителе NICA (ОИЯИ, Дубна). Пространственное разрешение определяется оптической сегментацией и легко регулируется.

В качестве базового "кирпичика" для электромагнитного калориметра MPD будет использоваться модуль с габаритами $120 \times 120 \times 397.8 \text{ mm}^3$. Каждый модуль (рис. 3) состоит из 221 перемежающихся пластин свинца и пластического сцинтиллятора (полистирол). Толщина свинцовых пластин - 0.3 мм. Толщина пластического сцинтиллятора - 1.5 мм. Радиационная длина такого модуля составляет $X_0 = 3,27 \text{ см}$, а радиус Мольер — $R_M = 3,188 \text{ см}$. Длина модуля - 39.78 см, что соответствует ~ 12 радиационным длинам. Светосбор в модуле осуществляется с помощью 9-ти продольных спектросмещающих волокон. Свет, собранный волокнами, считывается ливневыми фотодиодами (MAPD) с чувствительной областью размером $3 \times 3 \text{ mm}^2$. Модули механически сгруппированы и образуют трапецевидную структуру (рис. 5) которые в свою очередь образуют сектор с проективной ориентацией каждого модуля. Внешний радиус - 2198 mm, а внутренний - 1798

mm.

Вся баррельная часть калориметра будет состоять из 48 секторов, что позволит изолировать модули от электроники, которая будет устанавливаться в верхней части секторов.

3.4.1 Фотодетектор ECAL

Детектор фотонов должен будет работать в магнитном поле до 0.5 Тл. Лучшим кандидатом на данную роль является микропиксельный лавинный фотодиод - фотодетектор новейшей конструкции с многопиксельной внутренней структурой на общей кремниевой подложке. В улучшенной модификации детектора MAPD с микроканалом для съема заряда плотность пикселей составляет более $10^4/mm^2$. Каждая независимая лавинная область с отдельными микроканалами для сбора заряда создается на глубине около 3-5 мкм при помощи особого распределения внутреннего электрического поля. Сбор заряда в отдельных микроканалах обеспечивает локальное самогашение лавинных процессов.

Пиксель действует как гейгеровский детектор и срабатывает при попадании фотона в цифровом режиме. Но в целом MAPD является аналоговым устройством и может измерять интенсивность света в динамическом диапазоне. Конструкция, принцип работы и внешний вид показаны на (Рис. 4).

MAPD удовлетворяют всем требованиям, таким как: компактность, нечувствительность к магнитному полю, большой динамический диапазон и линейность при измерении энергии частиц.

3.4.2 Калибровка и контроль

Для того, чтобы пространственное и временное разрешение детектора фотонов было на требуемом уровне необходимо проводить калибровку и контроль детекторов и считывающей электроники. Один из основных способов калибровки и мониторинга каналов регистрации модуля заключается в использовании тестовых световых сигналов. В качестве источника света используется светодиод (LED). Во время набора данных необходимо постоянно контролировать следующие параметры:

- Температура MAPD, с точностью до 0.1°C .
- Коэффициента усиления считывающей электроники.
- Свет со светодиода и лазера в каждом детекторе будет использоваться для непрерывной калибровки всей цепочки.

Считывающая электроника должна измерять энергию с точностью 0.5 МэВ в динамическом диапазоне 50-5000 МэВ, а время пролета с максимально возможной точностью 100 пикосекунд (желательное временное разрешение). Мертвого времени быть не должно, электроника должна работать в конвейерном режиме.

3.4.3 Привязка к физическим величинам

Можно рассчитать заряд, который приходит на каждый канал. Для этого нам нужно знать следующие параметры аппаратуры:

- Разрядность АЦП $\rightarrow 14 \text{ bit}$;
- Измеряемый диапазон амплитуд $\rightarrow 1 \text{ V}$;
- Частота дискретизации $\rightarrow 50 \text{ MHz (f)}$;
- Входное сопротивление $\rightarrow 50 \Omega (R)$;
- Коэффициент усиления предусилителя $\rightarrow 10 (k)$;

$$1ch = \frac{\frac{1V}{14bit} \times \frac{1}{2} \times \frac{1}{f}}{R} = \frac{U}{R} \Delta t$$

$$14bit = 2^{14} = 16384;$$

$$1ch = 1,2 \times 10^{-14} C;$$

$$\boxed{1ch = 12fC} \rightarrow \text{канал АЦП};$$

$$\boxed{1ch = \frac{12}{k}fC} \rightarrow \text{с учетом усилителя};$$

$$\boxed{1fC = \frac{10^{-15}}{1.6 \times 10^{-19}} \approx 6250e^-}$$

Теперь мы можем представлять все полученные значения не только в отсчетах, но и в физических величинах.

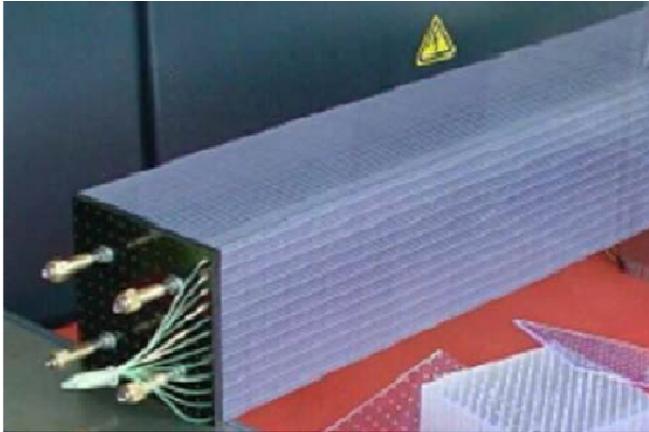
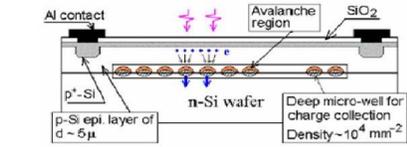


Рис. 3: Модуль типа "шашлык"



AMPD with deep micro-wells
Patent application #2005108324 from 24.03.2005.

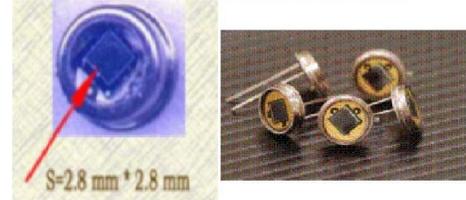


Рис. 4: Детектор MAPD

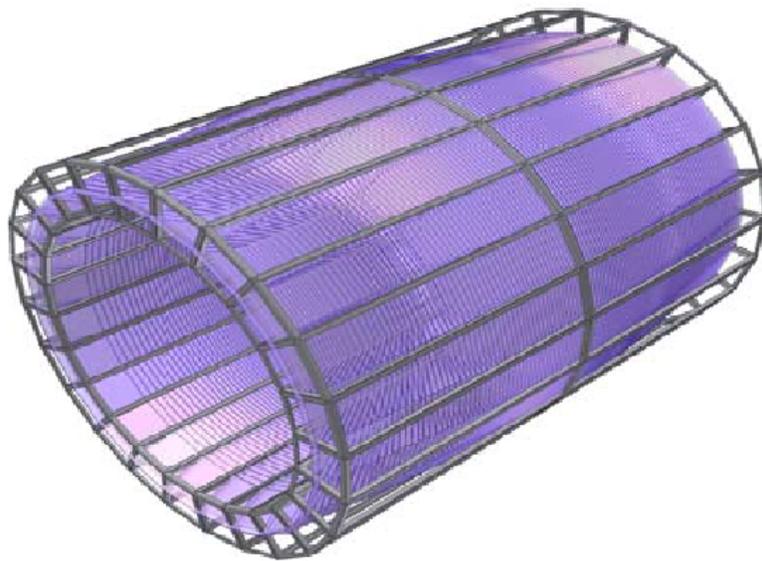


Рис. 5: Детектор ECAL

4 Цель работы

Основные цели данной работы:

- Исследование зависимости характеристик калориметра от температуры и напряжения
- Калибровка и мониторинг калориметра

Понять интерес к исследованию зависимостей параметров от температуры несложно. Однако для начала рассмотрим принцип работы MAPD, его достоинства и недостатки.

МЛФД (MAPD) – фотодетектор с микропиксельной структурой на общей кремниевой подложке, каждый пиксель которого работает в гейгеровском режиме: "да" или "нет". Общий выходной сигнал пропорционален числу сработавших пикселей. Следовательно МЛФД – аналоговый прибор, способный измерять интенсивность света с диапазоном, который определяется количеством пикселей. Представляет собой прибор нового типа для детектирования вспышек света слабой интенсивности (одиночные фотоны) и длительностью порядка нескольких наносекунд.

Чтобы не быть голословными, рассмотрим структуру МЛФД-3 с "микроколодезной" структурой и большой плотностью пикселей (Рис. 6).

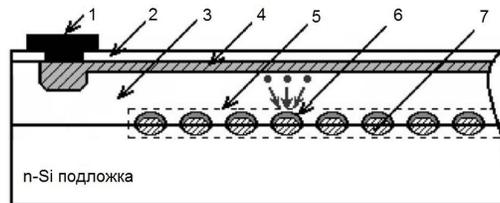


Рис. 6: 1-металлический электрод; 2-защитный слой из SiO_2 ; 3-эпитаксиальный кремниевый слой p-типа проводимости; 4-высоколегированный кремниевый слой p^+ -типа проводимости; 5-область с микроканалами; 6-локальные лавинные области; 7-индивидуальные микроканалы.

На рисунке видно общий p-n переход на кремниевой подложке n-типа и единую чувствительную поверхность. На глубине 3-5 мкм внутри подложки находится матрица из областей лавинного размножения и индивидуальных гасящих элементов. Эти независимые лавинные области имеют "микроколодцы" для захвата и сбора заряда. Локальное самогашение лавинного процесса происходит из-за накопления заряда в этих "микроколодцах".

Рассмотрим достоинства MAPD.

- Высокое внутреннее усиление порядка 2×10^5 ;

- Низкий шум-фактор;
- Эффективность регистрации видимого света на уровне ФЭУ;
- Регистрация наносекундных вспышек света без искажения формы детектируемого импульса;
- Работа, как в режиме счета импульсов, так и в спектрометрическом режиме;
- Хорошее временное разрешение (лучше 1 наносекунды);
- Небольшое напряжение питания (25-90 В);
- Нечувствительность к магнитному полю;
- Компактность;

Однако работа детектора в лавинном режиме предъявляет особые требования к стабильности рабочей точки, так как коэффициент лавинного умножения зависит от напряжения и температуры. Один из способов учета данной зависимости – использование элемента Пельтье. (термоэлектрический преобразователь, принцип действия которого базируется на эффекте Пельтье — возникновении разности температур при протекании электрического тока.)

В нашем случае особенность конструкции не позволяет использовать элемент Пельтье. 4π закрытый объем затрудняет отвод излишков тепла. Решение данного вопроса заключается в локализации всей считывающей электроники в малом объеме, который мы сможем охладить. Мы ставим перед собой задачу максимально стабилизировать температуру внутри установки, а оставшиеся температурные колебания, которые непременно появятся, будем компенсировать с помощью изменения напряжения. Для этого нужно знать точную зависимость параметров от напряжения и температуры (и температуры от напряжения).

5 Влияние температуры

5.1 Эвакуация тепла

Первая цель – обеспечение максимальной стабильности температуры в установке. Был создан макет охлаждающей системы для считывающей электроники, которая будет находиться в специальной трубе, локализованной между ЕСАЛ и магнитным кольцом. Схематично данная система показана на Рис. 7.

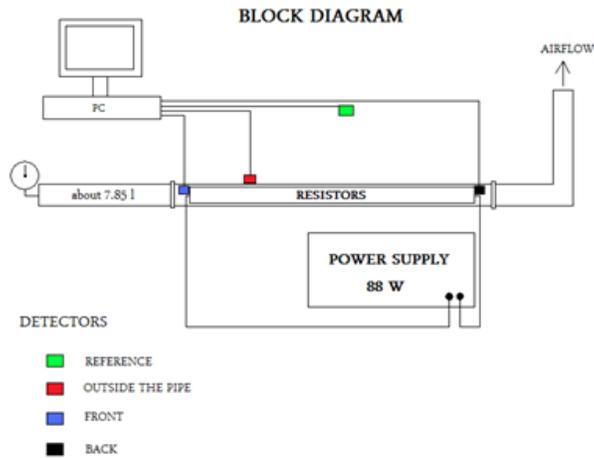


Рис. 7: Охлаждающая система для считывающей электроники

Модель данной система представляет из себя воздушную трубу, источник питания, платы, имитирующие электронику по тепловыделению, прибор для измерения скорости воздушного потока, температурные датчики. В нашем случае труба может иметь параметры $3m \times 0.05m \times 0.1m$. Объём составляет 15 л. Суть теста состоит в следующем: мы располагаем платы внутри трубы на те места, где должна стоять электроника. Ток от источника питания подбирается таким образом, чтобы на платах выделялось такое же количество тепла, как и на электронике. Включаем источник питания, платы нагреваются. С помощью температурных датчиков измеряем температуру в различных точках. Затем включаем продув и следим за понижающейся температурой до её стабилизации. И так для различных условий продува трубы.

На Рис. 8 и 9 показана эволюция температуры в зависимости от скорости потока.

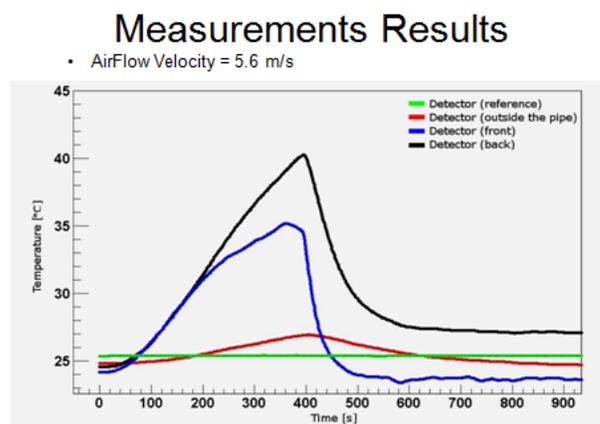


Рис. 8: Эволюция температуры при скорости потока 5.6 м/с

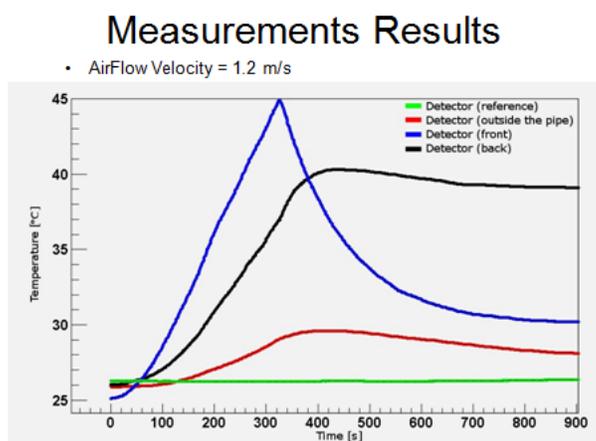


Рис. 9: Эволюция температуры при скорости потока 1.2 м/с

Четыре температурных датчика находились в различных точках системы. Зеленый находился за пределами трубы, красный – на поверхности, синий – на входе трубы, а черный – на выходе. Для считывающей электроники предел нормальной работы – 50°C . Производился поиск минимальной скорости потока, при которой электроника еще нормально работает. Это сделано для того, чтобы создать воздушные магистрали малого сечения, которые облегчат доставку и эвакуацию охлаждающего воздуха внутрь закрытого объема МПД, где расположены calorimeters. Из Рис. 8 и 9 видно, что при скорости потока 1.2 м/с еще сохраняется приемлемая для электроники температура, однако также видно, что корпус нашей трубы греется при любых скоростях потока и это нужно учесть. На-

до сделать корпус более теплонепроницаемым. В целом предложенная система эвакуации тепла вполне адекватна поставленной задаче.

5.2 Термостат

Максимально предусмотрев стабилизацию температуры в установке, мы должны, тем не менее, предусмотреть возможность коррекции некоторых изменений. Надо узнать зависимости параметров составляющих частей нашей системы от температуры. Для этих задач было создано терморегулирующее устройство – термостат. Быстрое охлаждение для наших целей не подходит, т.к. прибор должен имитировать ситуации, которые могут происходить в реальности. Темп изменения t° должен соответствовать реально возможным событиям. Быстрое охлаждение не физично. На Рис. 10 показаны скорости изменения температуры при различных напряжениях и максимально возможное изменение Δt_{max} . Использовалось напряжение 3V, 6V и 12V.

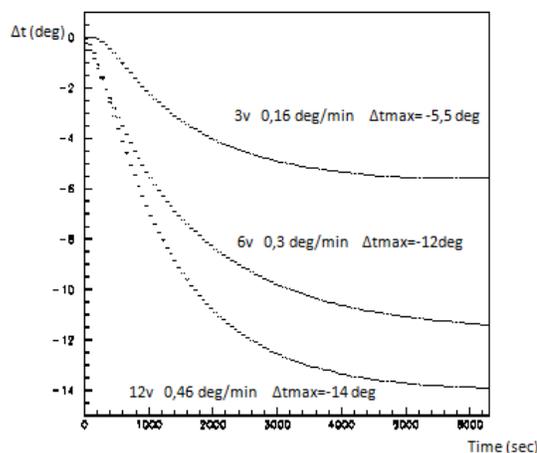


Рис. 10: Скорость изменения температуры при различных напряжениях

Рассмотрим ближе один из графиков. Например при 3V. (Рис. 11)

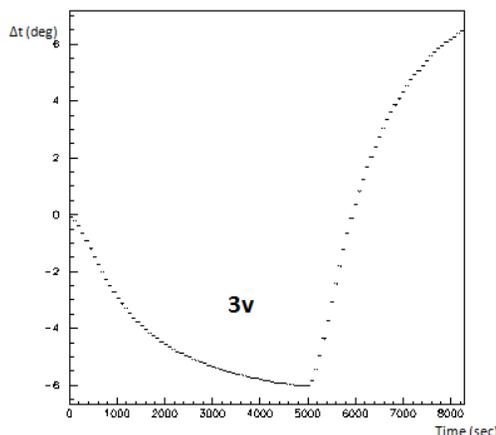


Рис. 11: Скорость изменения температуры при 3V

На Рис. 11 видно, что термостат довольно быстро достигает температурный предел для данного напряжения, после чего "тянется" хвост (когда термостат работает на пределе своих возможностей). Из приведенных графиков следует, что созданный термостат может имитировать различные градиенты изменения температуры. Прибор может работать как в ручном режиме, так и под управлением компьютерных программ. Таким образом с помощью данного термостата можно создать практически любые сценарии изменения температуры.

5.3 Элементы электроники

Рассмотрим элементы электроники, которые понадобятся нам для постоянной калибровки и мониторинга МЛФД. Нас устроят только те элементы, которые сами очень слабо реагируют на изменение температуры. Источник высоковольтного питания детекторов от 0,5 до 15kV, а также светодиод (LED), которые используются для калибровки и мониторинга каналов регистрации модуля (интенсивность света светодиода контролируется с помощью PIN-диода), не меняют свои параметры при изменении температуры, что было проверено экспериментально. (Рис. 12 и 13). LED – очень надежный прибор. При малейшем изменении интенсивности света обратная связь с PIN-диодом возвращает всё на прежнюю величину. Источники питания полупроводниковых детекторов также слабо зависят от температуры (Рис. 14). Все сигналы анализируются с помощью ADC, который также слабо зависит от температуры. Следовательно, можно переходить к анализу температурной зависимости самих МЛФД.

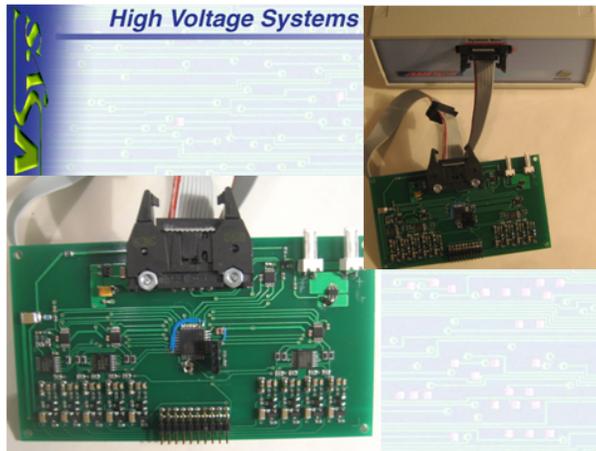


Рис. 14: Источники питания полупроводниковых детекторов

5.4 Корректировка температурной зависимости МЛФД

Был проведен следующий эксперимент. Параллельно измерялись зависимости температуры и сигнала от времени. Затем температура варьировалась. Это позволило найти зависимость между сигналом и температурой (Рис. 16). На Рис. 15 данная зависимость четко прослеживается.

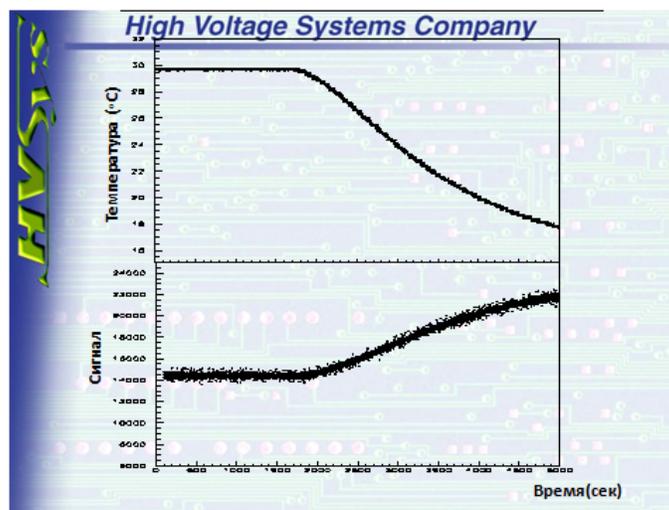


Рис. 15: Зависимость температуры и сигнала от времени

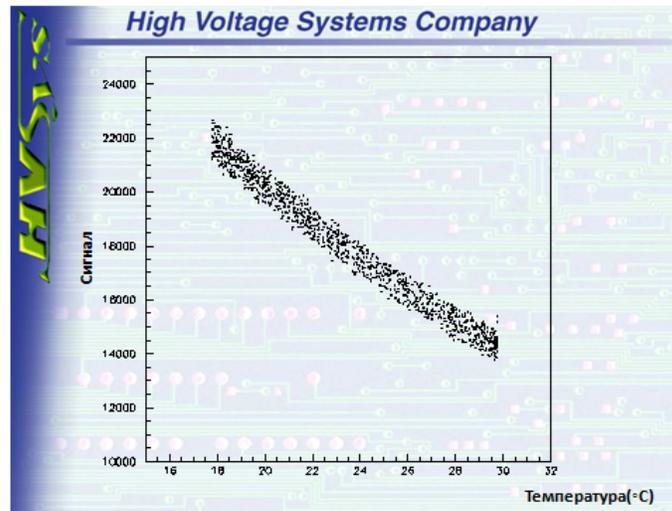


Рис. 16: Зависимость сигнала от температуры

Зависимость оказалась практически линейной. Через аппроксимацию данного графика линейной функцией был найден коэффициент наклона $K = 0.065V/°C$. На следующем этапе эксперимента мы снова снимали зависимости температуры и сигнала от времени, однако для сигнала был введен поправочный коэффициент K . Также для сигнала в исследуемом канале был построен интеграл, который можно аппроксимировать функцией Гаусса, т.к. это статистический процесс(в идеале). Разрешение определялось из соотношения $\frac{\sigma_A}{A}$, где A – среднее значение, а σ_A – стандартное отклонение. (Рис. 17)

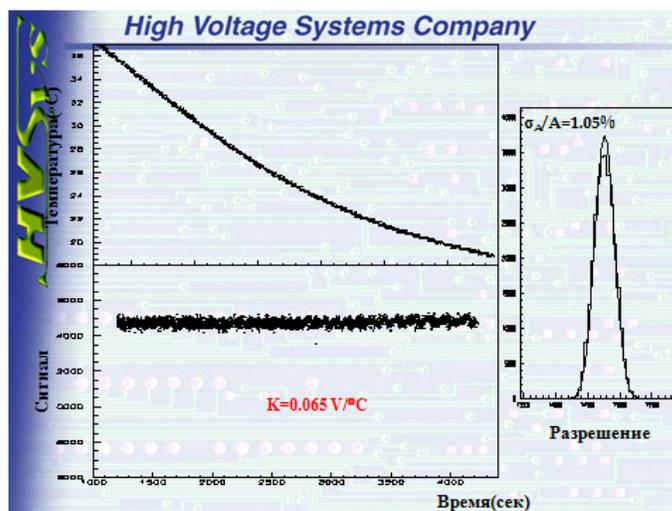


Рис. 17: Зависимость температуры и сигнала от времени (с поправкой), разрешение

Из Рис. 17 видно, что уже достигнуты довольно хорошие результаты. Разрешение для канала получилось на уровне 1 %, а сигнал практически не зависит от изменения температуры. Был построен график зависимости сигнала от температуры и напряжения от температуры в малом диапазоне (Рис. 18).

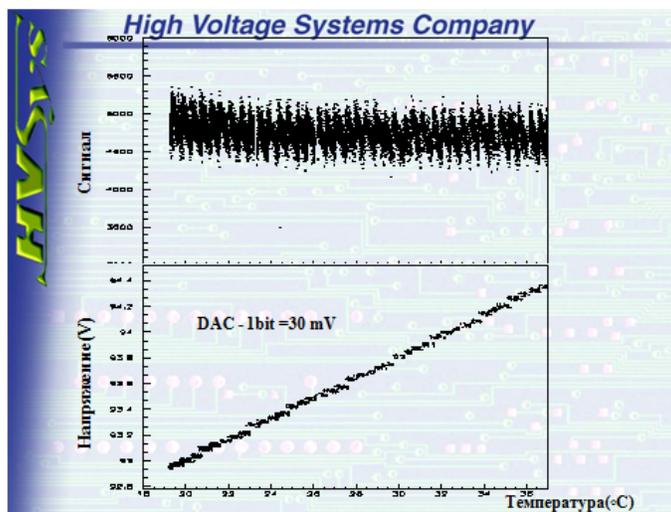


Рис. 18: Единичный шаг аппаратуры

Из этих графиков было обнаружено, что 8 бит-ная разрядность DAC даёт слишком большой шаг по напряжению (30 mV). Из-за этого возникают колебания сигнала. Использование аппаратуры с большей разрядностью влечет дополнительные расходы. Решение данной проблемы было найдено в введении пьедестала, что позволило уменьшить шаг в 3 раза. Разрядность аппаратуры "тратится" лишь на добавочное напряжение, а не на весь диапазон. Были проведены аналогичные измерения (температура опять варьировалась) зависимости температуры и сигнала (с поправочным коэффициентом) от времени и оценено разрешение для данного канала (Рис. 19). Из графиков видно, что разрешение улучшилось (стало порядка 0.5%), колебания сигнала стали намного меньше. Шаг аппаратуры теперь составлял 10 mV (Рис. 20), чего оказалось достаточно для требуемой точности.

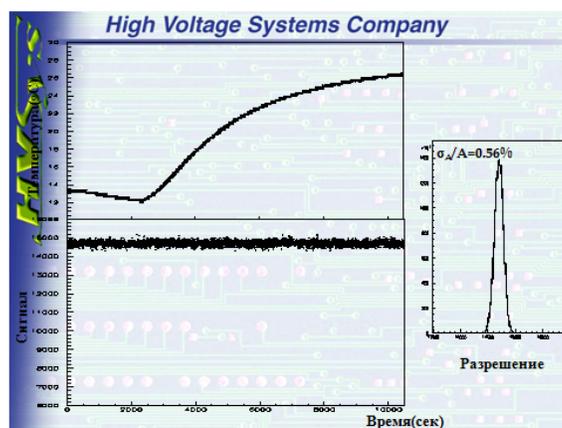


Рис. 19: Зависимость температуры и сигнала от времени (с поправкой), разрешение. (Использование пьедестала)

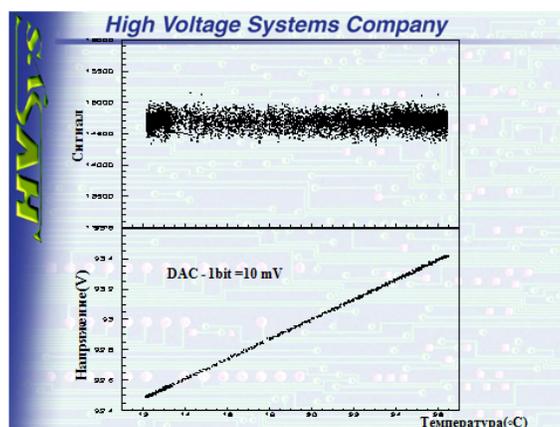


Рис. 20: Единичный шаг аппаратуры. (Использование пьедестала)