

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ

ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ

УНИВЕРСИТЕТ МИФИ»

Институт Ядерной Физики и Технологий

Кафедра физики элементарных частиц

УДК 539.1.074.2

ОТЧЕТ О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

Калибровка детекторов установки ОКА ускорителя У-70

Студент _____ А.В. Охотников

Научный руководитель

к. ф.-м. н. _____ А.С. Садовский

Протвино 2021

Содержание

1	Введение	3
2	Калибровка дрейфовых камер	6
2.1	Математическая модель	7
2.2	Расчет параметров формы распределения сигналов .	8
2.3	Результаты	12
3	Калибровка пропорциональных камер	14
3.1	Расчет параметров формы распределения сигналов .	14
3.2	Результаты	16
4	Перспективы	18
	Список используемых источников	18

1 Введение

Установка ОКА (Опыты с КАонами) создана для исследования эффектов, возникающих при распаде каонов. Принцип ее работы заключается в выделении пучка каонов, который направляется в распадный объем длиной 12 м, где каоны распадаются, порождая заряженные и нейтральные частицы. Полученные продукты реакции регистрируются при помощи системы детекторов, включающей в себя 2 пакета пропорциональных камер, систему дрейфовых трубок, падовый годоскоп [1], составленный из пластин сцинтиллятора, электромагнитный и адронный калориметр и мюонный годоскоп (см. Рис. 1). В рамках данной работы интерес представляет трековая часть детектора, включающая в себя пропорциональные и дрейфовые камеры.

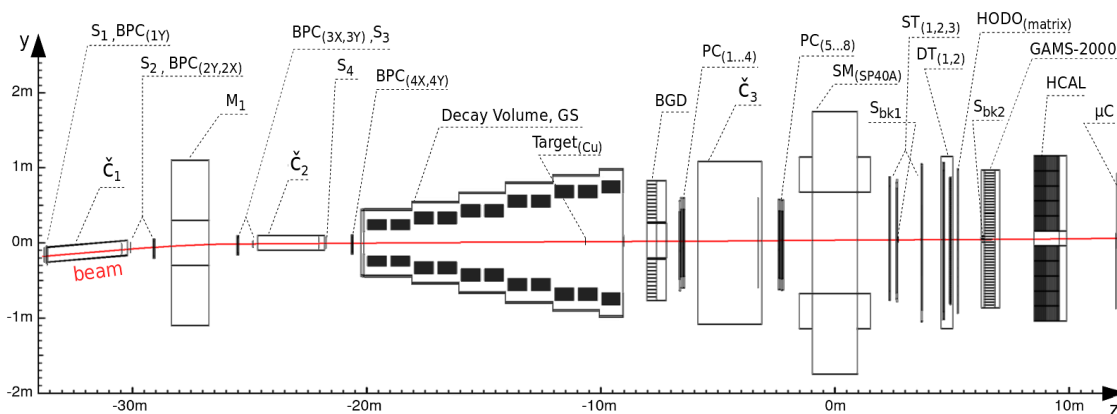


Рисунок 1 – Схема установки ОКА [2].

Данные детекторы относятся к типу газонаполненных и представляют собой наполненную газом оболочку, в объем которой введены электроды. Между этими электродами создается напряжение. Принцип работы детекторов данного типа лежит в явлении ионизации газа, содержащегося внутри, при пролете через него заряженной частицы. Отдавая малую часть своей кинетической энергии атомам газа, частица вырывает электроны с их внешних оболочек, образуя электронно-ионную пару. Полученные элек-

троны дрейфуют под действием электрического поля по направлению к сигнальной проволоке. Вокруг нее находится область сильного электрического поля, величина которого обратно пропорциональна расстоянию до проволоки. Данная область имеет радиус порядка диаметра проволоочки [3]. В этой области электроны сталкиваются с молекулами газа и набирают достаточно энергии для их ионизации. Если энергия электрона на длине пробега достаточно велика, то после первого столкновения с молекулой газа в объеме трубки появляются дополнительно один электрон и ион, образовавшиеся при столкновениях новые электроны также ускоряются под действием поля, ионизируют новые атомы, и т.д. Это явление называется электронной лавиной и представляет экспоненциальный рост количества носителей заряда между катодом и анодом за счет ударной ионизации молекул электронами. Движущиеся заряды лавины приводят к появлению электрического сигнала на проволоке. Этот ток считывается, оцифровывается и обрабатывается для получения различных характеристик.

В пропорциональной камере в одном газонаполненном объеме находится множество анодных проволочек, расположенных на расстоянии около 2 мм, а от плоскостей катодных проволочек — на 8 мм. Между катодом и анодом создается напряжение в несколько кВ. В небольшой области пространства вокруг проволочки, порядка ее диаметра [3], находится уже упомянутое ранее сильное электрическое поле, в котором образуются электронные лавины, вызывающие сигнал на аноде. При этом амплитуда сигнала пропорциональна энергии, потраченной частицей на ионизацию газа за время прохождения объема детектора.

Пропорциональные камеры, использованные в эксперименте ОКА, разделены на две группы. Одна из них, пучковые камеры (ВРС на Рис. 1), регистрируют пучок каонов, тогда как вторая, расположенная между распадным объемом и магнитом СП40 (РС на Рис. 1), регистрирует их продукты распада. Плотность размещения анодных проволочек в пучковых

пропорциональных камерах выше, чем в регистрирующей продукты распада (1 мм против 2-х мм). Это связано с тем, что плотность потока частиц пучка выше плотности потока продуктов реакций распада.

В дрейфовых трубках электроны первичной ионизации распространяются в газе с определенной скоростью, близкой к постоянной. Эта скорость называется дрейфовой и зависит от величины электрического поля, а также от химического состава и давления газа. Зная время появления сигнала на проволоке относительно момента прохождения частицы через трубку, можно определить расстояние между траекторией частицы и проволокой. Имея значения этих расстояний с различных трубок, можно воссоздать траекторию частицы, т.н. трек.

Несмотря на все инженерные усилия, добиться абсолютного постоянства скорости движения электронов внутри трубки невозможно, так как она зависит от величины электрического поля. Кроме того, технические особенности каждой отдельной трубки влияют на форму создаваемого ей сигнала. В связи с этим, важное значение для работы детектора имеет определение зависимости $r(t)$, где r — это расстояние между проволокой и треком частицы, а t — время дрейфа электронов.

В настоящее время система обработки данных установки ОКА при считывании данных исходит из допущения, что эти данные получены некой «типичной» дрейфовой трубкой с усредненными параметрами. Такой подход успешно использовался при обработке данных ранее проведенных экспериментов [4][5][6]. Однако обработка данных, полученных во время последнего сеанса, требует доработки калибровочной системы и в рамках данной дипломной работы представляется возможным и интересным дальнейшее ее развитие путем индивидуальной калибровки каждого канала. После определения зависимости $r(t)$ для каждой проволочки станет возможным избавиться от влияния возможных систематических ошибок на итоговую картину, а также повысить точность процедуры восстановления треков.

2 Калибровка дрейфовых камер

Первоочередной задачей процедуры калибровки дрейфовых детекторов является необходимость определения рабочего диапазона времен прихода сигнала $t_0 < t < t_{up}$, ограниченного минимальным и максимальным расстоянием от чувствительной проволоки.

Для этого обычно проводят процедуру выравнивания времени прихода сигналов от всех трубок путем внесения поправок на разброс временных задержек возникающий в результате как работы самих усилителей, так и топологии подключения сигналов к ним, однако имеется также разброс за счет распределения координат треков вдоль трубки и соответствующих времен распространения сигнала вдоль сигнальной проволоки. Из этих задержек и складывается параметр t_0 [7], а также t_{max} — параметр, соответствующий максимально возможному времени дрейфа. В целом, треки, проходящие вблизи проволочки, соответствуют времени t_0 , тогда как время $t_{up} = t_0 + t_{max}$ соответствует треку у самой стенки трубки, практически по касательной.

На иллюстрации характерного распределения dN/dt на Рис. 2 показаны t_0 и t_{max} . Электроны, возникающие близко к сигнальной анодной проволоке трубки, сразу получают сильное ускорение и движутся с большой скоростью, тогда как другие, образовавшиеся на удалении от проволочки, попадают в область сильного электрического поля лишь спустя некоторый промежуток времени. До этого они движутся с относительно постоянной скоростью. Это и приводит к тому, что вблизи t_0 наблюдается пик, тогда как правая половина распределения близка к равномерному, где поле более однородно.

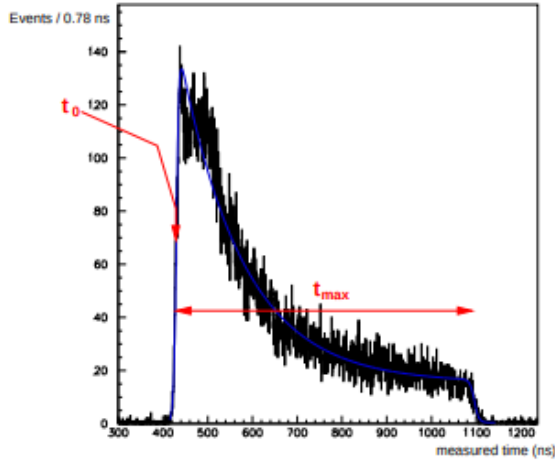


Рисунок 2 – График распределения dN/dt для дрейфовой трубки. Показаны параметры t_0 и t_{max} (взято из [8]).

2.1 Математическая модель

Учитывая размер установки и энергию частиц, в первом приближении можно считать поток частиц — продуктов распада однородным. Математически это можно выразить следующим образом:

$$\frac{dn}{dr} = const = \frac{N_{totTube}}{R_{tube}}, \quad (1)$$

где r — расстояние от проволоки, т.е. от оси трубки, n — число частиц, N_{tot} — общее число частиц, пролетевших через трубку, R_{tube} — радиус трубки. Форму типичного распределения dN/dt для отдельно взятой трубки можно видеть на Рис. 2. В рамках модели предположим, что трубка работает со стопроцентной эффективностью и не имеет шума, иными словами, абсолютно все выдаваемые ей данные соответствуют частице из пучка. Имея такие вводные, можем вычислить (следуя [9]) интересующую нас зависимость $r(t)$ математически:

$$v(t) = \frac{dr}{dt} = \frac{dn}{dt} \cdot \frac{dr}{dn} = \frac{R_{tube}}{N_{totTube}} \cdot \frac{dn}{dt} \Rightarrow r(t) = \frac{R_{tube}}{N_{tot}} \cdot \int_0^t \frac{dn}{d\tau} \cdot d\tau. \quad (2)$$

В полученном выражении R_{tube} и $N_{totTube}$ — это известные параметры. Тогда как аналитическая формула для dN/dt может варьироваться для раз-

ных трубок. Задача по нахождению аналитической формулы рассмотрена ниже.

2.2 Расчет параметров формы распределения сигналов

Задача состоит из двух частей: нахождение t_0 и t_{up} , то есть, временного диапазона сигнала, и нахождение аналитической функции, выражающей форму dN/dt . Вначале определим временной диапазон сигнала. На данном этапе калибровки можно упростить задачу и проанализировать объем данных, собранных на небольшом временном интервале (например, около часа работы), считая неизменными условия работы дрейфового детектора. С целью упрощения работы допустимо заменить интегрирование функции dN/dt суммированием по столбцам. Это позволит оценить качество разработанного метода. По-видимому, такой подход не оптимален для больших объемов данных, поэтому в дальнейшем процедуру потребуется оптимизировать. Для нахождения t_0 проводилось фитирование левой части пика линейной функцией. Полученная прямая экстраполировалась до пересечения с осью абсцисс (Рис. 3). В дальнейшем их точка пересечения и использовалась как параметр t_0 для данной трубки.

Данный способ имеет недостаток — он не учитывает уровень шума трубки. Таким образом, реальный t_0 должен лежать немного правее по оси времени. Однако данная неточность мала по сравнению с величиной $t_{up} - t_0$, так что на данном этапе ей можно пренебречь.

Поиск t_{up} осложнен плавным убыванием правой части временного спектра сигнала (см. Рис. 2), где можно видеть, что спад происходит много медленнее, чем рост. Для некоторых трубок он настолько плавный, что при переходе от сигнала к уровню шума практически никак качественно не выделяется (см. пример на Рис. 4), а значит, значение t_{up} может быть

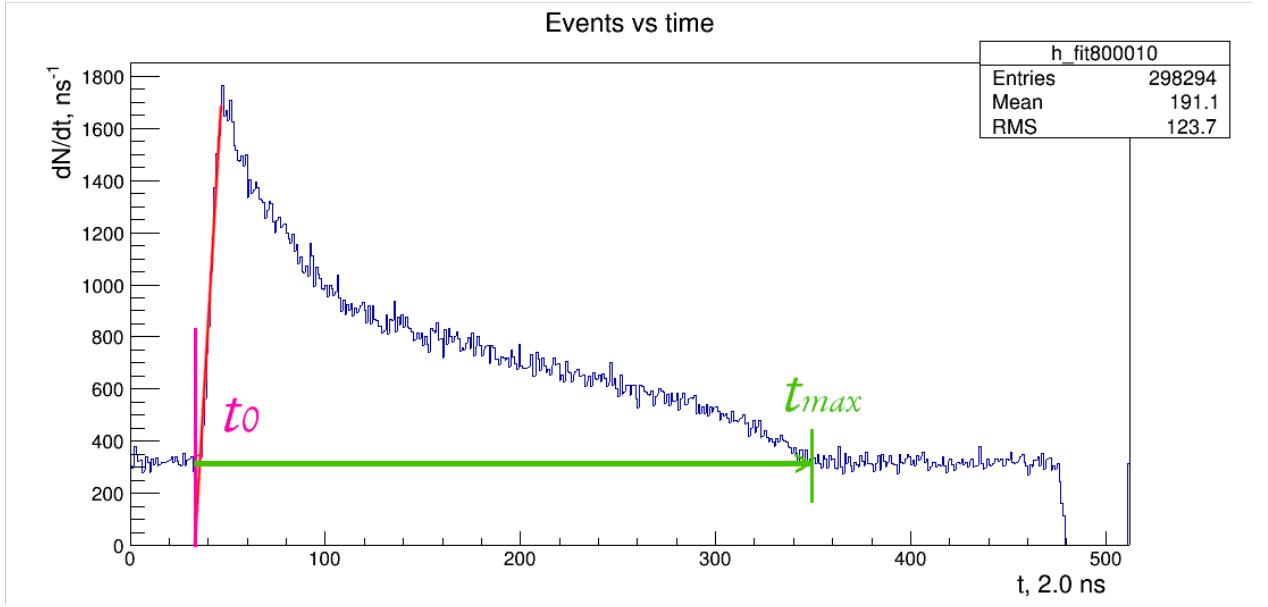


Рисунок 3 – Определение t_0 и t_{max} на примере одной из дрейфовых трубок установки ОКА.

оценено лишь приблизительно.

В работе [8] предлагается несколько путей поиска t_{up} .

- Использовать глобальный фит dN/dt для всего сигнала целиком, например на основе модифицированного [8] распределения Ферми-Дирака:

$$\frac{dN}{dt} = P_1 + \frac{P_2(1 + P_3 \cdot e^{\frac{P_5-t}{P_4}})}{(1 + e^{\frac{P_5-t}{P_7}})(1 + e^{\frac{t-P_6}{P_8}})}. \quad (3)$$

В этом случае, параметры P_5 и P_6 должны соответствовать t_0 и t_{up} соответственно.

- Выделить относительно небольшую часть распределения, которая содержит t_{up} и работать непосредственно с ней, если уровень шума это позволяет. Аналогично сделать для t_0 .

Во втором случае нужно заранее знать примерное положение t_{up} , что в нашем случае затруднительно для ряда проволочек. Процедура фитирования, предложенная в первом пункте, может быть использована, но для этого нужно отсечь фоновый шум, для чего нужно знать его уровень. Оце-

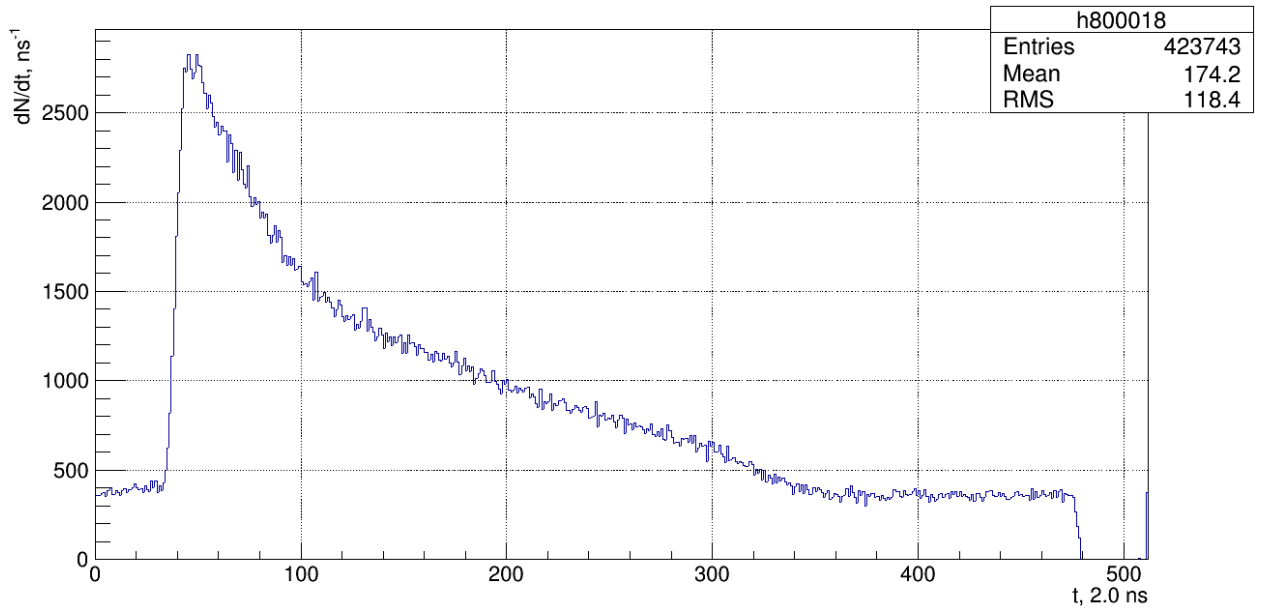


Рисунок 4 – Пример сигнала от одной из дрейфовых трубок. Можно видеть, что сигнал, спадая, постепенно ослабевает до уровня шума, при этом место перехода от сигнала к шуму, в отличие от левой стороны, не выражено явно.

Удалить его можно путем удаления области сигнала из распределения по времени дрейфа, для чего, в свою очередь, необходимо знать t_{up} .

Грубую оценку уровня шума можно получить следующим образом. Как было упомянуто выше, получаемый в ходе расчета t_0 расположен немного левее реального t_0 , $t_{0(calc.)} < t_{0(real.)}$. Значит, dN/dt около $t_{0(calc.)}$ гарантированно относится не к сигналу, а к шуму. Так, усреднив данные распределения для $t < t_{0(calc.)}$, получаем приблизительную оценку уровня фонового шума.

Для оценки t_{max} , пройдя максимум распределения dN/dt , отследим первый столбец, который находится правее вершины сигнала и имеет величину ниже полученного значения уровня фонового шума слева. Его величину и примем за примерное значение t_{up} . Точное значение параметра может быть получено путем фитирования графика формулой 3. На Рис. 5а показан пример такого фитирования. На Рис. 5б полученная подгонка наложена на то же самое распределение, но полученное из трекинга, где шум

из которого был исключен шум при помощи системы трекинга.

Для контроля было получено тоже самое распределение с помощью программы реконструкции восстановления прямых треков (специальный набор данных с мюонными треками без магнитного поля), где наряду с несколькими пропорциональными камерами была включена одна дрейфовая камера. Это позволило подавить шум, присутствовавший на распределении из Рис 5а). На Рис. 5б) можно видеть это распределение при хорошем солгасии с фитированием, полученным для распределения с Рис. 5а).

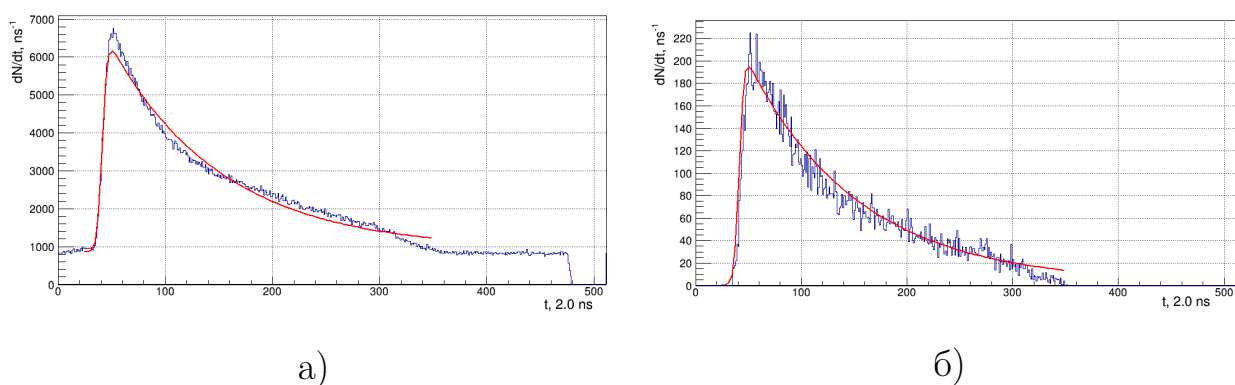


Рисунок 5 – а) Пример сигнала, отфитированного формулой 3. б) Пример выборки после удаления шума с использованием текущей системы трекинга. В качестве фитирующей использована функция, подобранная для а).

В зависимости, описываемой формулой 3, параметр P_1 соответствует уровню шума, поэтому, найдя пересечение прямой, с помощью которой было найдено приближенное значение t_0 , с уровнем P_1 , можно найти точку, абсцисса которой равна $t_{01} = t_0 + \Delta t_0$. Число t_{01} принималось как истинное значение t_0 .

Данную последовательность действий можно повторить многократно, получая новые поправки: $t_{02} = t_{01} + \Delta t_{01}$, $t_{03} = t_{02} + \Delta t_{02}, \dots$, а также соответствующие им t_{up} . Вероятно, это может привести к более точной оценке диапазона и, соответственно, улучшить точность калибровки, что потребует дополнительных исследований.

Подводя итоги, алгоритм калибровки трубки выглядит следующим

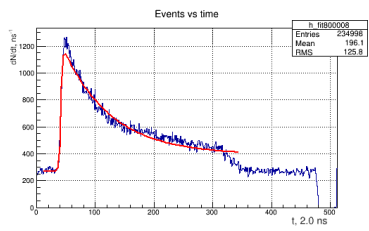
образом:

1. Определение t_0 путем фитирования левой части пика сигнала.
2. Определение среднего уровня шума, основываясь на диапазоне $t < t_0$.
3. Получение приблизительного значения t_{up} путем сравнения правой части сигнала с уровнем шума.
4. Получение уточненного значения t_{up} , а также аналитического приближения dN/dt формулой 3 за счет фитирования распределения.
5. Вычисление поправки Δt_0 , используя параметр P_1 формулы 3, и уточнение значения t_0 .
6. Нахождение зависимости $r(t)$ для трубки из формулы 2.

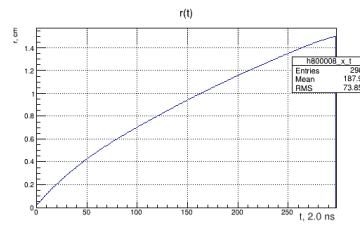
2.3 Результаты

В ходе работы были получены подгонки, определяющие форму сигнала для дрейфовых трубок (Рис. 6а), г), ж)), на основе которых были построены зависимости расстояния между треком и проволочками от времени дрейфа электронов в трубке $r(t)$ (Рис. 6б), д), з)). График зависимости более крутой для малых времен, соответствующим частицам, пролетающим вблизи проволочки, и более пологий для частиц, пролетающих на удалении. Из этого графика видно, что малые расстояния до проволочки соответствуют большой скорости электронов, что не противоречит ожиданиям [3]. Окончательную оценку успешности проведенной работы можно будет дать после включения результатов полученной калибровки в систему обработки данных.

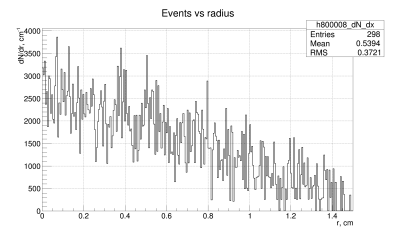
На Рис. 6в), е), и) показаны пространственные распределения dN/dr для дрейфовых трубок.



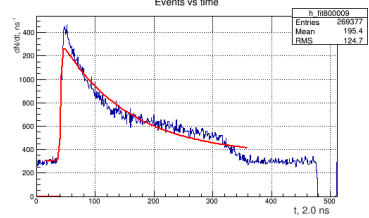
а)



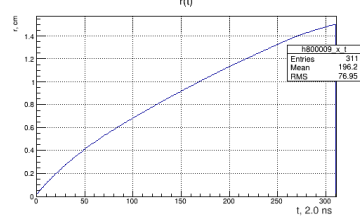
б)



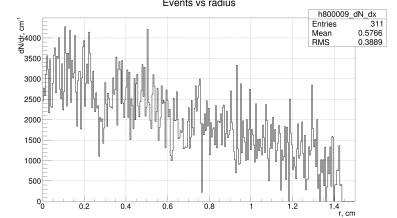
в)



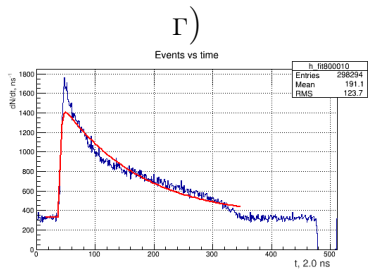
г)



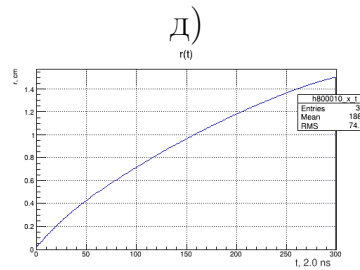
д)



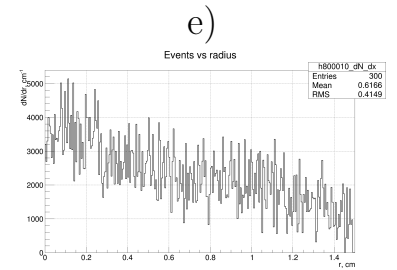
е)



ж)



з)



и)

Рисунок 6 – Зависимости расстояния от трека до проволоки от времени дрейфа электронов в трубке для нескольких каналов дрейфовой камеры.

Ожидается, что наличие индивидуальных данных калибровки для каждой проволочки детектора повысит точность расчета координат пролетающих частиц, тем самым улучшив разрешение трекинга установки.

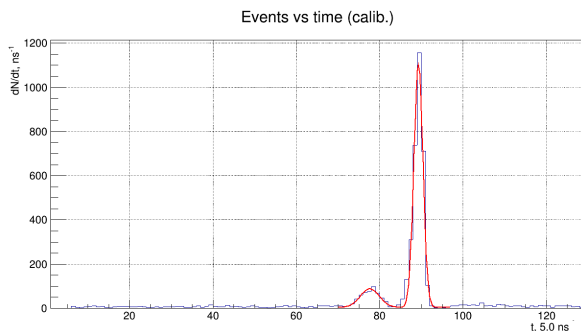
3 Калибровка пропорциональных камер

3.1 Расчет параметров формы распределения сигналов

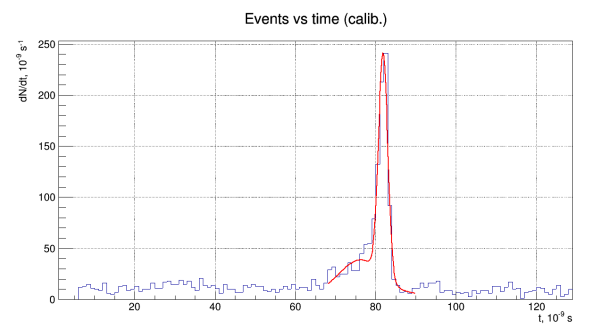
Примеры спектров снимаемых с анодов сигналов можно видеть на Рис. 7. Временной спектр можно охарактеризовать следующим образом: пик импульса, созданного электронной лавиной, за которым следует вторичный пик. Он появляется вследствие конструктивной особенности электроники, используемой для пропорциональных камер. Сигнал, собираемый с проволочек, проходит через усилитель, содержащий блок дифференциатора. В результате этого отрицательный заряд, собранный с проволочки, преобразуется в последовательность из отрицательного и положительного импульсов, причем оба усиливаются, а отрицательный импульс, преодолевший порог дискриминатора, записывается. При этом за счет емкостной связи между проволочками на соседних проволочках также образуется несколько ослабленный, но противоположный по знаку сигнал (положительный). Аналогично основному, этот сигнал также вносит вклад в виде отрицательного импульса, но смещенного во времени.

Как и с дрейфовыми детекторами, задачей, которую необходимо решить в первую очередь, является определение рабочего диапазона времен прихода сигнала путем выравнивания времени прихода сигнала от всех каналов. Причины возникновения задержек аналогичны причинам, актуальным для дрейфовых трубок. Главное отличие заключается в форме обрабатываемого сигнала — в отличие от дрейфовых трубок, он близок к форме нормального распределения, — а также в наличии вторичного пика, который нужно отбрасывать. От канала к каналу временное распределение сигналов может иметь некоторые различия в ширине, амплитуде и, что особенно важно, два пика не всегда достаточно разрешимы, как можно

видеть в примере на Рис. 7б.



а)



б)

Рисунок 7 – Примеры временных спектров, снятых с пропорциональных камер. На *a* можно видеть основной и вторичный пики, тогда как на *б* два пика накладываются друг на друга.

Оба пика фитировались функцией, основанной на функции нормального распределения с учетом уровня шума. Итоговая зависимость выглядела следующим образом:

$$\frac{dN}{dt} = P_1 \cdot e^{-\frac{(x-P_2)^2}{P_3}} + P_4 \cdot e^{-\frac{(x-P_5)^2}{P_6}} + P_7. \quad (4)$$

Чтобы эффективно использовать подгонку данной формулой, необходимо было найти приблизительное положение и ширину пиков; эти данные использовались как начальные значения P_2 , P_5 и P_3 , P_6 соответственно. Для этого находилось положение вершины основного пика — максимум графика, после чего вырезалась область вокруг нее. Ширина этой области подбиралась эмпирически. Затем процедура повторялась, что позволяло обнаружить вторичный пик. Данный алгоритм обладает низкой точностью, которой, однако, достаточно для подбора начальных значений функции, которые затем уточнялись с использованием встроенных средств пакета ROOT [10].

3.2 Результаты

Для пропорциональных камер был завершен первый этап работы — определение временных задержек и ширины временного окна сигналов для разных проволочек и записан файл с параметрами для нескольких периодов набора статистики и записан в формате данных эксперимента ОКА. Параметры калибровки для одной из пропорциональных камер приведены в виде временного окна на Рис. 8б, в сравнении с исходными данными до калибровки на Рис 8а. Полученная калибровка была использована в работе программы реконструкции эксперимента.

Результат программы реконструкции можно проиллюстрировать графикам, приведенными на Рис. 9: Рис. 9а — это распределение восстановленного импульса пучка (он целиком определяется пучковыми пропорциональными камерами до и после первого магнита); на Рис. 9б представлена инвариантная масса трех пионов, восстановленная с помощью импульсов трех заряженных треков в распаде $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^+ \pi^-$ в предположении, что это три заряженных пиона.

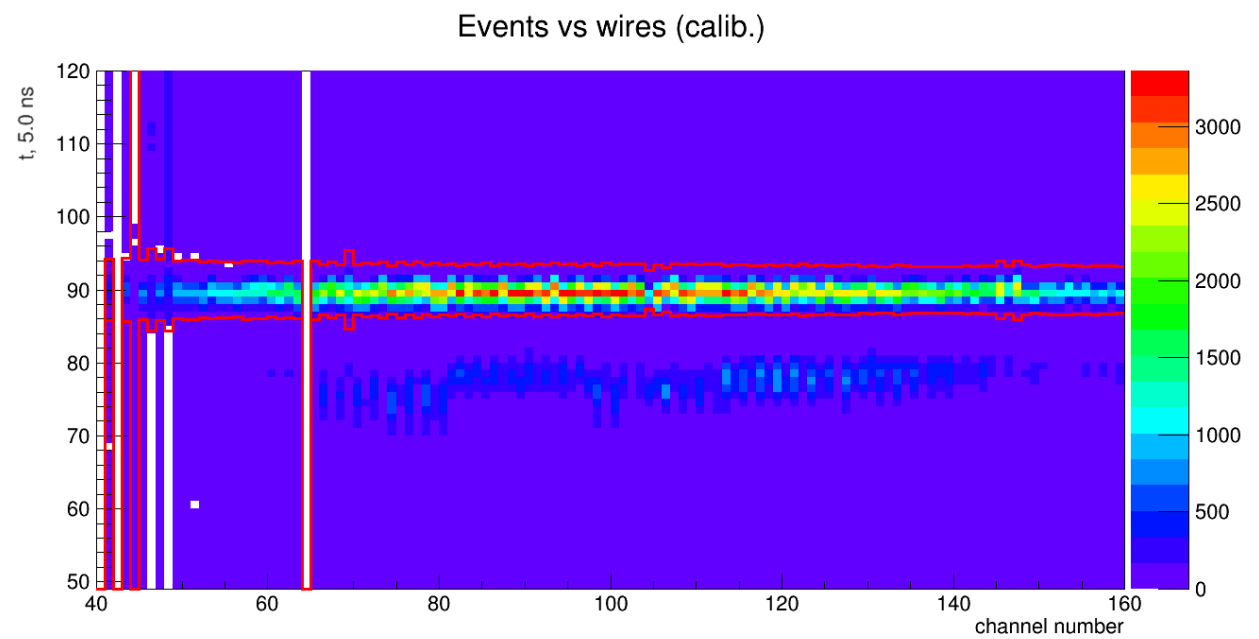
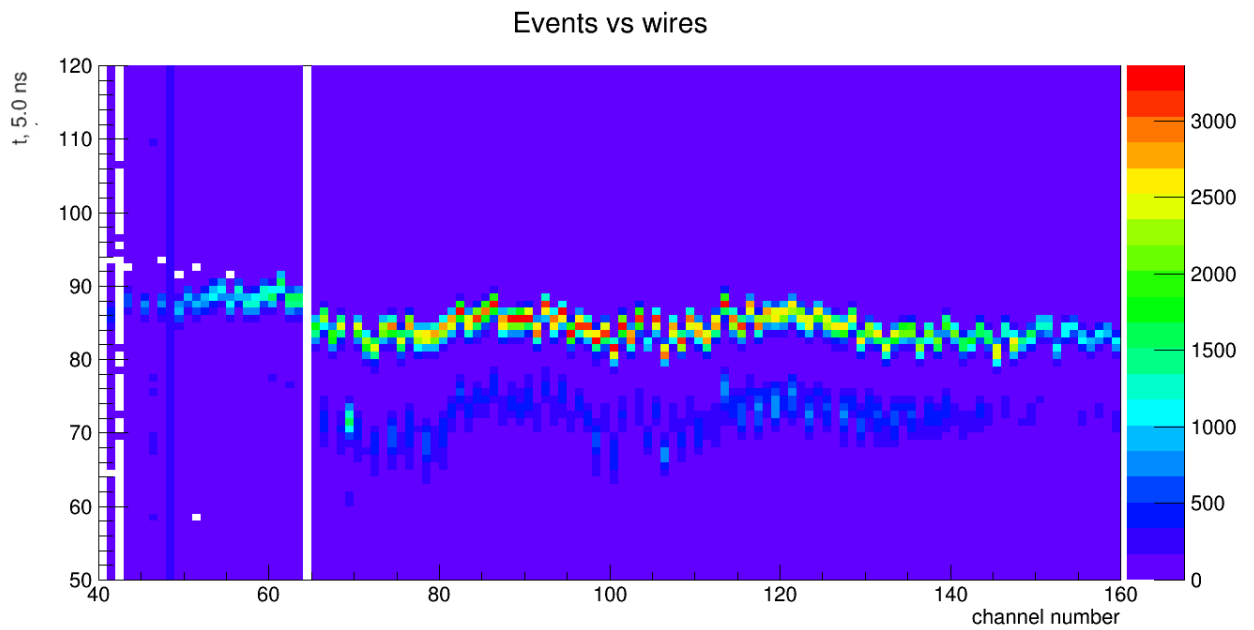


Рисунок 8 – Временное распределение сигналов для всех каналов пропорциональной камеры до (а) и после (б) калибровки. Красные линии указывают диапазон, из которого выделяется сигнал.

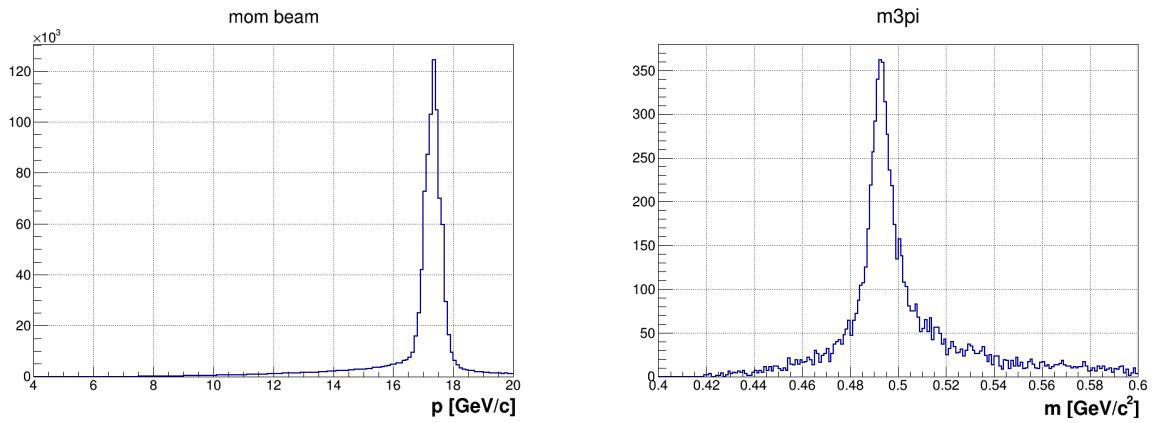


Рисунок 9 – а) Распределение восстановленного импульса пучка. б) Инвариантная масса распада $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^+ \pi^-$ в предположении, что 3 заряженные частицы – это пионы.

4 Перспективы

В ближайшее время планируется доработать созданную систему калибровки и внедрить ее в систему обработки данных. Для дрейфовых камер будут проведены попытки сделать это несколькими способами. Во-первых, можно использовать в качестве источника данных о калибровке полученную аналитическую формулу для dN/dt . Во-вторых, для этой цели будет использована сама зависимость $r(t)$ после ее параметризации (такой метод используется в системе калибровки, действующей в настоящий момент).

Со временем характеристики, влияющие на параметры калибровки, например, температура окружающей среды и давление газовой смеси, могут меняться. Поэтому следующей задачей, которую предстоит решить, будет поиск изменений параметров калибровки во времени и, в случае необходимости, их перекалибровка.

Список используемых источников

- [1] LHCb Collaboration. LHCb calorimeters: Technical design report. 2000.
- [2] A. S. Sadovsky, V. F. Kurshetsov et al. Search for heavy neutrino in $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_H$ decay. *The European Physical Journal C*, 2018.
- [3] Заневский Ю.В. *Проволочные детекторы элементарных частиц*. М.: Атомиздат, 1978.
- [4] V. Obraztsov. Recent results from OKA setup at U-70 synchrotron. *J. Phys. Conf. Ser.*, 1526(1):012017, 2020.
- [5] A. Yu. Polyarush et al. Study of $K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu \gamma$ decay with OKA setup. *Eur. Phys. J. C*, 81(2):161, 2021.
- [6] V. I. Kravtsov et al. Measurement of the $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu \gamma$ decay form factors in the OKA experiment. *Eur. Phys. J. C*, 79(7):635, 2019.
- [7] F. Petrucci. Calibration software for the Atlas monitored drift tube chambers. 1:3, 2005.
- [8] P. Bagnaia, T. Baroncelli et al. Calibration model for the MDT chambers of the ATLAS Muon Spectrometer. 04 2008.
- [9] S. Baranov, V. Dodonov, and A. Glazov. Autocalibration method for determination of drift time - space relation for HPDT. 5 1994.
- [10] ROOT. An open-source data analysis framework used by high energy physics and others. <https://root.cern.ch/>.