

Федеральное государственное образовательное  
учреждение высшего профессионального  
образования “Московский физико-технический  
институт (государственный университет)”

Кафедра Физики Высоких Энергий

Реферат

**Детектор протонов отдачи в эксперименте COMPASS.**

Еремеев Дмитрий Романович <sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Московский физико-технический институт, МФТИ, Долгопрудный

<sup>2</sup>Институт физики высоких энергий, ИФВЭ, Протвино

Протвино, 2017

## Оглавление

Recoil Proton Detector (RPD).....	2
TOF (Time-of-flight).....	2
Основные принципы.....	2
Измерения времени пролёта при помощи сцинтилляционных детекторов.....	3
Строение детектора.....	5
Введение в эксплуатацию.....	9
Реконструкция и калибровка.....	9
Система координат.....	9
Предотборы.....	9
Нахождение треков.....	10
Энергетические потери.....	13
Эффективность.....	14
Список литературы:.....	17

# Recoil Proton Detector (RPD).

RPD используется для детектирования и идентификации частиц в объёме мишени за счёт измерения время пролёта и потерь энергии при прохождении частиц в веществе. Кроме того, RPD также входит в триггер установки COMPASS. Он состоит из двух концентрических сцинтилляционных цилиндров окружающих мишень. Детектируются заряженные частицы вылетающие из мишени под полярными углами от  $50^\circ$  до  $90^\circ$  с минимальным импульсом около 270 МэВ/с. Соответствующая скорость составляет  $\beta = 0,28$ . Частицами отдачи могут быть протоны, пионы, каоны и электроны с импульсами до 1 ГэВ/с. Для измерения соответствующих физических процессов (а также для применения в триггерной системе) необходимо отличать протоны от других частиц отдачи. Так как время на принятие решения жёстко ограничено, необходимо идентифицировать протоны в течение 500 нс. Проект детектора основан на детекторе GAMS NA12/2 эксперимента в CERN и адаптирован по размерам и для мишени на жидком водороде.

Ниже приводится краткий обзор основных принципов времяпролётного детектирования с помощью сцинтилляционного детектора. Приведено описание устройства детектора, и считывающей электроники. Приведены оценки эффективности и достигнутых разрешений.

## TOF (Time-of-flight)

### Основные принципы.

Измерение времени пролёта частицы.

Время пролёта частицы между первым и вторым счётчиками, если известны расстояния друг от друга, может быть использовано для определения скорости пролетающей частицы. При наличии дополнительной информации это позволяет идентифицировать тип частицы. Например, зная импульс частицы или её удельные потери энергии в веществе. Скорость определяется как:  $\beta = L / (ct_2 - ct_1)$ , где  $L$  - это расстояние между двумя детекторами, а  $t_1$  и  $t_2$  - времена измеренные стартовым и конечным счётчиками. Скорость  $\beta = v/c$  определяется через массу и импульс частицы:  $\beta = p/E = p/\sqrt{m^2 c^4 + p^2 c^2}$ . Переписав через  $t = t_2 - t_1$ , масса частицы определяется как:

$$m = p \sqrt{\frac{c^2 t^2}{L^2} - 1} \quad (1)$$

С разрешением:

$$\frac{\delta m}{m} = \frac{\delta p}{p} + \gamma^2 \left( \frac{\delta t}{t} + \frac{\delta L}{L} \right) \quad (2)$$

, где  $\gamma = 1/\sqrt{1 - \beta^2}$ . В предположении что расстояние между первым и вторым счётчиками хорошо измерены, разрешение по времени должно быть сведено к минимуму на этапе разработки проекта TOF детектора. Точность определения массы ограничена скоростью частицы, которая входит в выражение (1). В частности, масса зачастую неточно определяется из-за того что не получается достичь требуемого разрешения по времени. Но это не так страшно, ведь необходимо знать массу лишь с точностью достаточной для того чтобы отличить тип частиц, т.е. отличить протоны от пионов. Два типа частиц а и б с одинаковыми импульсами различаются по времени пролёта на (3):

$$\Delta t = \frac{l}{pc} (\sqrt{p^2 c^2 + m_1^2 c^4} - \sqrt{p^2 c^2 + m_2^2 c^4}) \quad (3)$$

В частности, для выражения (3) при малых импульсах  $p \ll m_{12}$  видно что разница времён пролёта, в основном, определяется разницей масс частиц  $m_1 - m_2$ :

$$\Delta t = \frac{L}{p}(m_1 - m_2). \quad (4)$$

Разница времён пролёта  $\Delta t$  должна быть гораздо больше чем разрешение  $\delta t$ , и обычно для хорошей идентификации требуется чтобы выполнялось соотношение:  $3\delta t < \Delta t$ .

В случае с экспериментом COMPASS, обычно требуется различать протоны отдачи от пионов с импульсами от 0.3 GeV/c до 1 GeV/c. При расстоянии между счётчиками равным 63 см, соответствующее разрешение по времени должно составлять от  $\Delta t(0.3 \text{ GeV/c}) = 5.6$  нс до  $\Delta t(1 \text{ GeV/c}) = 1.7$  нс. Таким образом, для отличия протонов от пионов требуется разрешение не хуже чем  $\Delta t = 560$  пс. Более подробное изложение времяпролётного детектирования может быть найдено в [2] и [3].

## Измерения времени пролёта при помощи сцинтилляционных детекторов.

Необходимое разрешение по времени можно достичь только при наличии достаточно быстрых детекторов. Зачастую, для данных целей органические ("пластиковые") сцинтилляторы используются вместе с ФЭУ, как и в детекторе RPD.

Средние потери энергии заряженной частицы с импульсом около 100 MeV/c при прохождении через сцинтиллятор на основе поливинилтолуола (polyvinyltoluene) составляет около 2 MeV/cm (mip). В среднем излучается один фотон на каждые 100 эВ. Быстрый отклик детектора достигается за счёт излучения в ультрафиолетовом диапазоне. Излучение детектируется при помощи ФЭУ чувствительных в ультрафиолетовом диапазоне или при помощи обычных ФЭУ, но со смещением света в область чувствительную для стандартных ФЭУ. Возможно добавление флуоресцентных примесей, которые поглощают фотоны и переизлучают их на большей длине волны. Это приводит к сложной временной структуре регистрируемого света, обычно с резким нарастанием до максимума и продолжительным спадением. Форма сигнала зависит от геометрии сцинтиллятора, потому что некоторые фотоны могут приходить позже из-за отражений от поверхностей. Разрешение по времени тем лучше, чем круче начало сигнала. Кроме того, сигнал ослабляется в сцинтилляторе. Длина затухания определяют эффективное число фотонов регистрируемых ФЭУ. Обычно между сцинтиллятором и ФЭУ используется промежуточный элемент, называемый световод с близким коэффициентом преломления, например, полиметилметакрилат (polymethylmethacrylate).

РМТ (photomultiplier tube) представляют собой вакуумные трубки с динодами произведёнными с помощью метода осаждения из паровой фазы (химическое осаждение тонкой пленки материала с высоким коэффициентом вторичной эмиссии). Прилетающие извне фотоны могут выбить с поверхности находящегося под напряжением динода электроны, которые, в свою очередь, попадают на следующие диноды, что вызывает вторичную эмиссию. В конце цепочки электроны попадают на анод. В результате данного процесса возникает ток. Амплитуда сигнала пропорциональна числу фотонов и, следовательно, потерям энергии исходной частицы в сцинтилляторе. Разброс времени от прибытия фотонов до прибытия электронов на анод  $\sigma_{\text{РМТ}}$  зависит от температуры и качества РМТ, и вносит вклад в общее разрешение по времени.

Разрешение по времени сцинтилляционного детектора приблизительно можно записать [3] как:

$$\sigma_t = \sqrt{\frac{\sigma_{sc}^2 + \sigma_{geo}^2 + \sigma_{PMT}^2}{N} + \sigma_r^2 / o}. \quad (5)$$

,где  $\sigma_{sc}$ - обозначает разрешение сцинтиллятора, зависящее от свойств материалов  
 $N$ - число фотоэлектронов на катоде. Здесь наиболее важным является время нарастания сигнала от 10% до 90% от максимального значения.

$\sigma_{geo}$  - определяется геометрией сцинтиллятора и световода, и оптимизируется при тестах прототипов и моделировании прохождения лучей[4].

$\sigma_{r/o}$  определяются особенностями считывающей электроники.

## Строение детектора.

Как показано на рисунке (1) два кольца сцинтиллятора расположены на расстоянии 12см (внутреннее кольцо "А") и 75см (внешнее кольцо "В" ) от центра мишени, выставленной по оси прохождения пучка.

Плотность	1.032 г/см <sup>3</sup>
Индекс преломления	1.58
Световой выход (по отношению к антрацену)	68%
Длина затухания (attenuation length)	140 см
Время нарастания	0.7 нс
Время спада	1.8 нс
Длина волны в максимуме	408 нм

Таблица 1: Характеристики пластикового сцинтиллятора BC404 (St.Gobain)

Внутреннее кольцо состоит из 12 сцинтилляционных элементов с размерами 50см × 6.6см × 0.5 см, каждый из которых покрывает 30° по азимутальному углу φ. В качестве материала выбран BC404[5] из St.Gobain. Как показано в таблице (Таблица 1), он характеризуется быстрым временем нарастания (0,7нс.) и высоким световым выходом(68%) в сравнении с одним из антрациновых. Световоды спроектированы с учётом результатов моделирования прохождения лучей и создания тестовых прототипов. Было протестировано

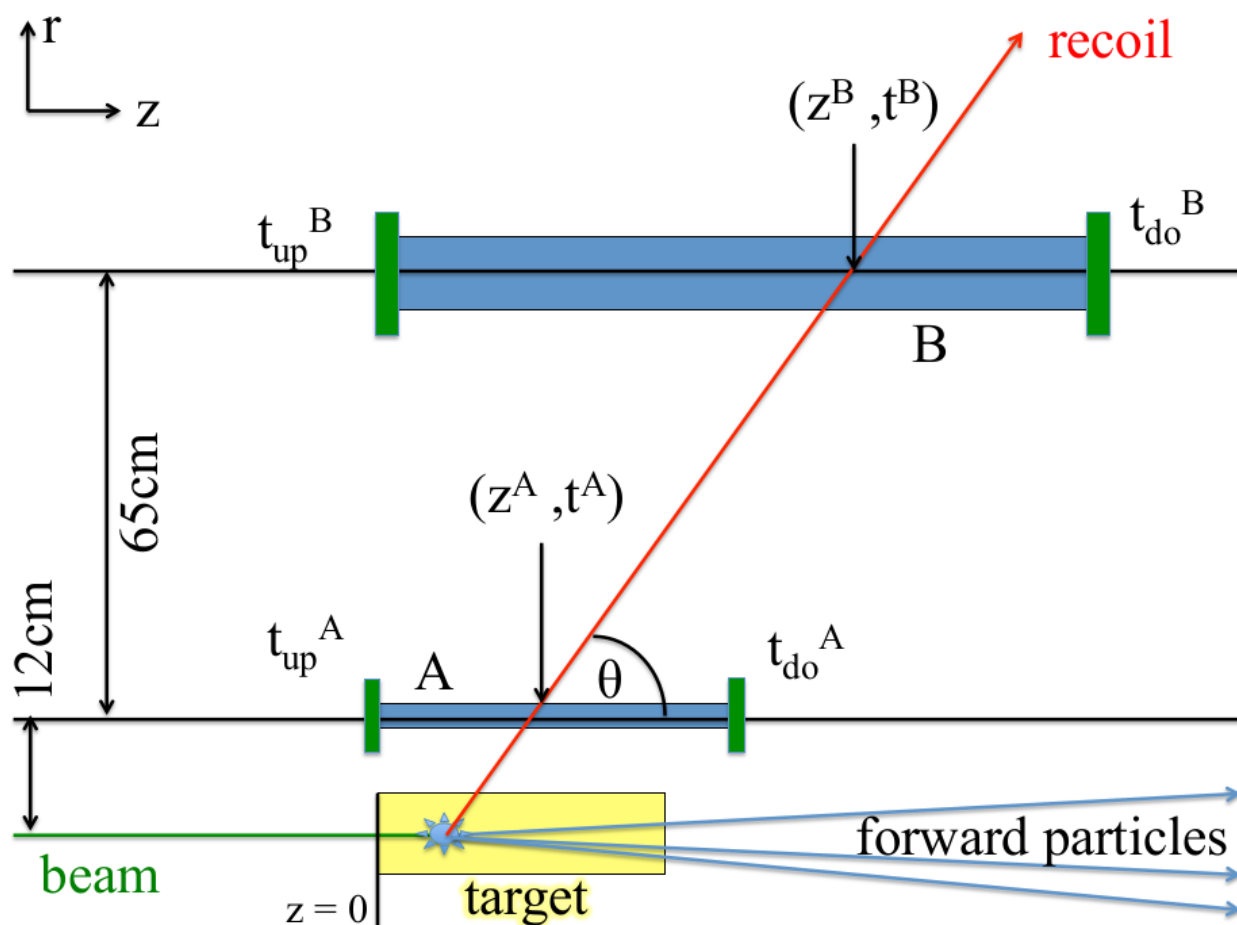


Рис 1: Схематичный вид сбоку установки RPD и мишени.

несколько возможных вариантов геометрии детектора с единственным требованием чтобы все РМТ находились вне акцептанса установки.

Адиабатическая модель геометрии и «рыбий хвост» показывают схожие результаты по разрешению, с небольшим перевесом в сторону «рыбьего хвоста» с лучшей сократостью прохождения света. Потому был выбран второй вариант световода, произведенные в КРН/Mainz. Световоды приклеены к сцинтилляторам под углом в  $15^\circ$  с изгибов в сторону от мишени. Таким образом, в переднем акцептансе спектрометра в диапазоне  $11^\circ$  нет никаких материалов. Как сцинтилляторы, так и световоды обернуты тонкой алюминизированной майларовой фольгой и тонким чёрным ПВХ скотчем для светоизоляции. Такая конструкция выбрана в результате проделанных измерений с проверкой различных фольг используя в качестве источника  $^{207}\text{Bi}$ .

Внешнее кольцо разделено на 24 части со сторонами  $173\text{см} \times 20\text{см} \times 1\text{см}$ . Произведены в ИФВЭ Протвино. Крайние части сцинтилляторов используется в качестве световодов. Они скручены и склеены так чтобы вписались в цилиндр с диаметром  $3.9\text{см}$ . Каждый элемент обернут алюминизированной майларовой фольгой и тонким чёрным ПВХ скотчем. Каждый элемент перекрывает  $15^\circ$  по азимуту. Если смотреть со стороны мишени, то каждый сегмент внутреннего кольца пересекается с тремя сегментами внешнего.

Все элементы используют ЕМI/Thorne 9813КВ фотоумножительные трубки. Для защиты от магнитного поля РМТ экранированы при помощи, как мю-металла (магнито-мягкий сплав никеля (77%), железа (16%), меди (5%) и молибдена или хрома (2%)), так и мягкого железа. Для достижения высоких характеристик были разработаны и собраны собственные делители

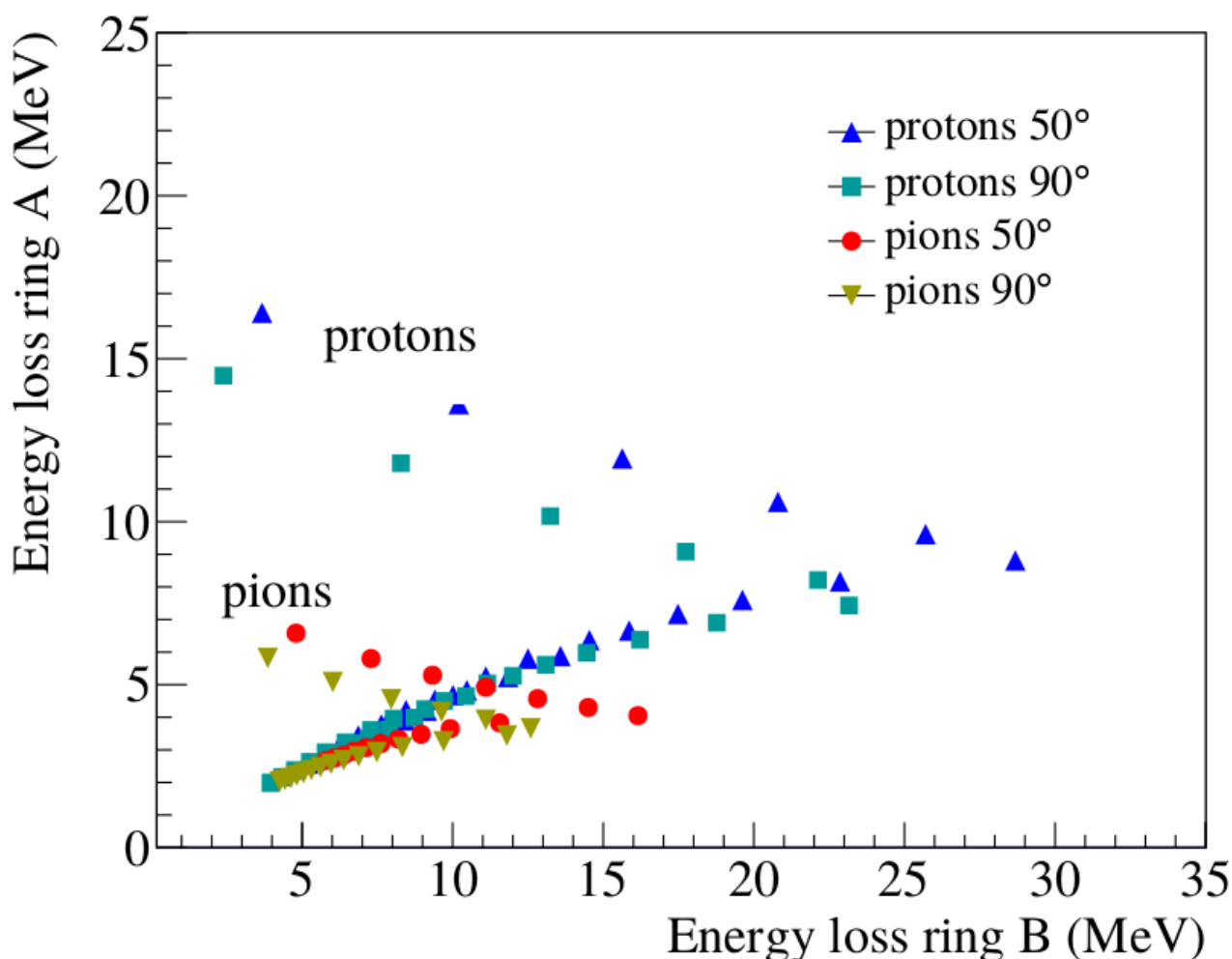
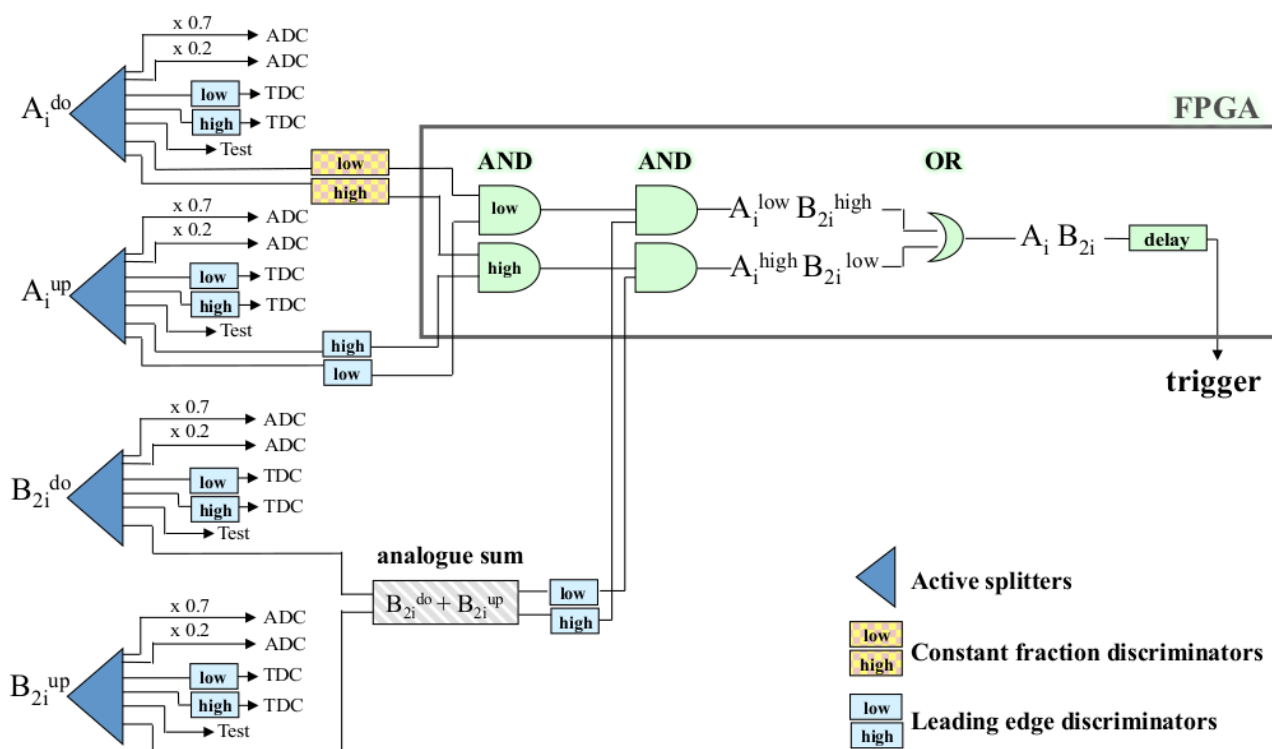


Рис 2: Результаты вычислений потери энергии протонов и пионов при прохождении колец А и В испущенных из мишени под разными углами ( $50^\circ$  и  $90^\circ$ )

на транзисторах, гарантирующие стабильную работу на частотах вплоть до 5-10 МГц и с сигналами амплитудой до 5В.

Считывающее оборудование спроектировано так чтобы было возможно охватить большой динамический диапазон от минимально ионизирующих частиц до протонов вблизи остановки. На графике выше (Рис. 2) показаны расчёты потери энергии в первом кольце(вертикаль) от потерь энергии во втором кольце(горизонталь) для пионов и протонов вылетающих из мишени под разными углами (от 50 до 90 градусов) при фиксированном импульсе 0.3 ГэВ/с. Потери энергии в кольце "А" лежат в диапазоне от 2 МэВ до 18 МэВ, в то время как потери энергии в кольце "В" лежат в диапазоне от 4 МэВ до 30 МэВ. Энергетические потери минимально ионизирующих частиц составляют 1 МэВ в кольце "А" и 2 МэВ в кольце "В". Для определения необходимого динамического диапазона, необходимо также учесть длину затухания света, как в сцинтилляторе, так и в световоде. С учётом симуляций произведённых группой CEA Saclay, минимальный сигнал, который возможно детектировать составляет 0.28 МэВ для внутреннего и 0.26 МэВ для внешнего колец. При настройке усилителя PMT на максимальную амплитуду сигнала равную 5В, минимальная амплитуда сигнала от внутреннего кольца составляет около 75 мВ. Для внешнего кольца амплитуда наименьшего сигнала составляет 35 мВ.



Изображение 3: Схема считывающей электроники эксперимента RPD

На рисунке (3) показана общая схема считывающей электроники. Все 72 аналоговых сигнала передаются на восьмиканальные разветвители в зону считывания, которая находится вне экспериментальной зоны. Разветвители разработаны и собраны в мастерской КРН/Mainz. Каждый разветвитель имеет пять выходов воспроизводящих оригинальные сигналы, а также один 70%, один 20% и один 10%. Последние нужны для мониторинга. На всех разветвителях есть источник постоянного напряжения с возможностью удалённого управления. На каналах устанавливаются согласующие сопротивления 50 Ом для избежания повреждений при неправильном подключении. Входное напряжение ограничено одним диодом Шоттки на канал и может меняться в диапазоне от 0 до 5 В. Во время работы ограничение устанавливается на 4,2 В, что соответствует ожидаемому максимуму сигнала после



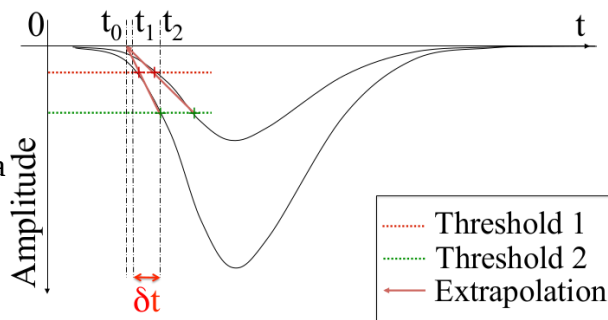
прохождения пятидесятиметрового кабеля. Сигналы сначала инвертируются, а затем разделяются на 6 каналов. Затем усиливаются при помощи асимметрично питаемого (-12В, +3В) операционного усилителя, что позволяет достичь времени нарастания сигнала около 1,8нс. Сигналы снова инвертируются. Один из каналов пассивно разветвляется на 0.7:0.2:0.1 в итоге всего получается 8 каналов. Выходное напряжение стабильно на уровне 5 мВ без видимого шума (<1мВ.) на частотах вплоть до 55 МГц. 70% и 20% сигналы с разветвителя заведены в аналоговые формирователи, а затем поступают в 12-битные сэмплирующие АЦП. (использование двух каналов АЦП позволяет достичь лучшего разрешения при маленьких амплитудах сигналов) Два выхода с разветвителей заведены в дискриминаторы LeCroy 4413/4416 с двумя порогами на каждый ФЭУ. Пороги используются для корректировки работы дискриминаторов. (Time-walk). - параметр дискриминаторов переднего фронта характеризующий отклонение исходящего/триггерного времени в зависимости от амплитуды данного сигнала. На рисунке(4) показаны два сигнала с разной амплитудой и пороги дискриминаторов.  $t_1$  и  $t_2$ - времена срабатывания триггера. В дальнейшем наклон используется вместе с данными АЦП для экстраполяции сигнала и нахождения времени старта  $t_0$ , которое определяется с большей точностью чем разница времён  $\delta t = t_2 - t_1$ . Цифровой сигнал конвертируется из ECL(эмиттерно-связанная логика) в LVPECL (низковольтная положительная эмиттерно-связанная логика) и направляются на F1 ВЦП [7]. Данные вцп имеют разрешение 64 пикосекунд, что составляет основной вклад во временное разрешение считывающей электроники.

В триггерной системе два разветвлённых сигнала с РМТ заводятся в дискриминаторы переднего фронта (LeCroy 4413/4416) на которых выставлены разные пороги срабатывания, за исключением сигналов с дальних ФЭУ внутреннего кольца. Последнее сделано в связи с тем что дискриминаторы (CAEN V812) выдают триггер не при превышении сигналом некоего порога, а при достижении сигналом заданной доли от максимума и, следовательно, гораздо меньше влияет на time-walk. Аналоговые сигналы от внешнего кольца складываются в суммирующем модуле произведённом в КРН/-Mainz [4]. Операционные усилители преобразуют два входных сигнала в один выходной. Симметричное питающее напряжение  $\pm 7,5В$  ограничивает амплитуду входного сигнала на 1.2 вольтах для каждого из двух каналов. Выходной сигнал впоследствии усиливается с коэффициентом 5/3. При максимальных подаваемых на вход сигналах составляющих 1.2 В, амплитуда выходного сигнала будет составлять 2.4 В. Итого после усиления получается 4В. Далее сигнал подаётся на активный разветвитель, на выходе с которого оба сигнала сохраняют ту же амплитуду что и на входе. Первый сигнал используется в триггерной логике, второй сигнал считывается в АЦП.

Детектор RPD оборудован системой лазерной подсветки, которая применяется для онлайн калибровки. Система состоит из зелёного полупроводникового лазера (Team Photonics NG 10120-110) с длиной волны равной 532 нм [8]. Энергия каждого импульса составляет 2.2 мДж, а длительность- 0,53нс. Импульсы повторяются с фиксированной частотой 8.7 кГц (0,11ms). Лазерный пучок рассеивается на стеклянной сфере выполняющей функцию "разветвителя" к которой подводятся 36 стеклянных световода.

Они напрямую присоединены к центрам

сцинтилляционных элементов, как во внутреннем, так и во внешнем кольцах. Предусмотрена возможность управления лазером удалённо вне экспериментальной зоны. Лазер включается только для проверок вне времени записи физических данных.



Изображение 4

## Введение в эксплуатацию.

Оба кольца детектора устанавливаются на стальную "бочку", которая может вращаться вокруг центральной оси. После монтажа детектора с полностью оборудованным внутренним кольцом и на 25% оборудованным внешним кольцом проводятся измерения на мюонном пучке с отобранными гало событиями. Бочка располагается перпендикулярно к оси пучка. Пять сцинтилляционных счётчиков расположены с обеих сторон для получения референсов. Эти измерения нужны для проверки базовых параметров, таких как: достигнутое пространственное разрешение  $\delta z$ , временное разрешение  $\delta t$ . Достигнутое разрешение составляет:  $\delta t = 200\text{ps} \pm 50\text{ps}$  и  $\delta z = 2.7\text{cm} \pm 0.5\text{cm}$  для элементов внутреннего кольца и  $\delta t = 400\text{ps} \pm 50\text{ps}$  and  $\delta z = 5.0\text{cm} \pm 0.5\text{cm}$  для элементов внешнего кольца. Длина затухания также была измерена и составляет порядка 60 см.

После проделанных измерений RPD полностью дооборудовали и установили в экспериментальной зоне, за исключением мишени из жидкого водорода, так как на тот момент она ещё не была доступна. RPD был выравнен по оси пучка. Для первых калибровок был использован цилиндр из полиэтилена в качестве мишени, как наиболее близкий по свойствам к жидкому водороду. Высокие напряжения на делителе подобраны так чтобы наблюдаемые сигналы от подсветки лазером от всех ФЭУ были одинаковы для всех каналов. После этого смотрят сигналы на пучке и снова подбирают коэффициенты усиления так чтобы полностью охватить весь диапазон сигналов. В результате минимальные сигналы по амплитуде составляют 60 мВ для внутреннего кольца (75 мВ ожидалось) и 30 мВ для внешнего (35 мВ ожидалось). Пороги дискриминации выставлены на 30 мВ для нижнего значения и 60 мВ для верхнего.

## Реконструкция и калибровка.

В данном случае главной задачей является определение кинематических параметров частицы отдачи.

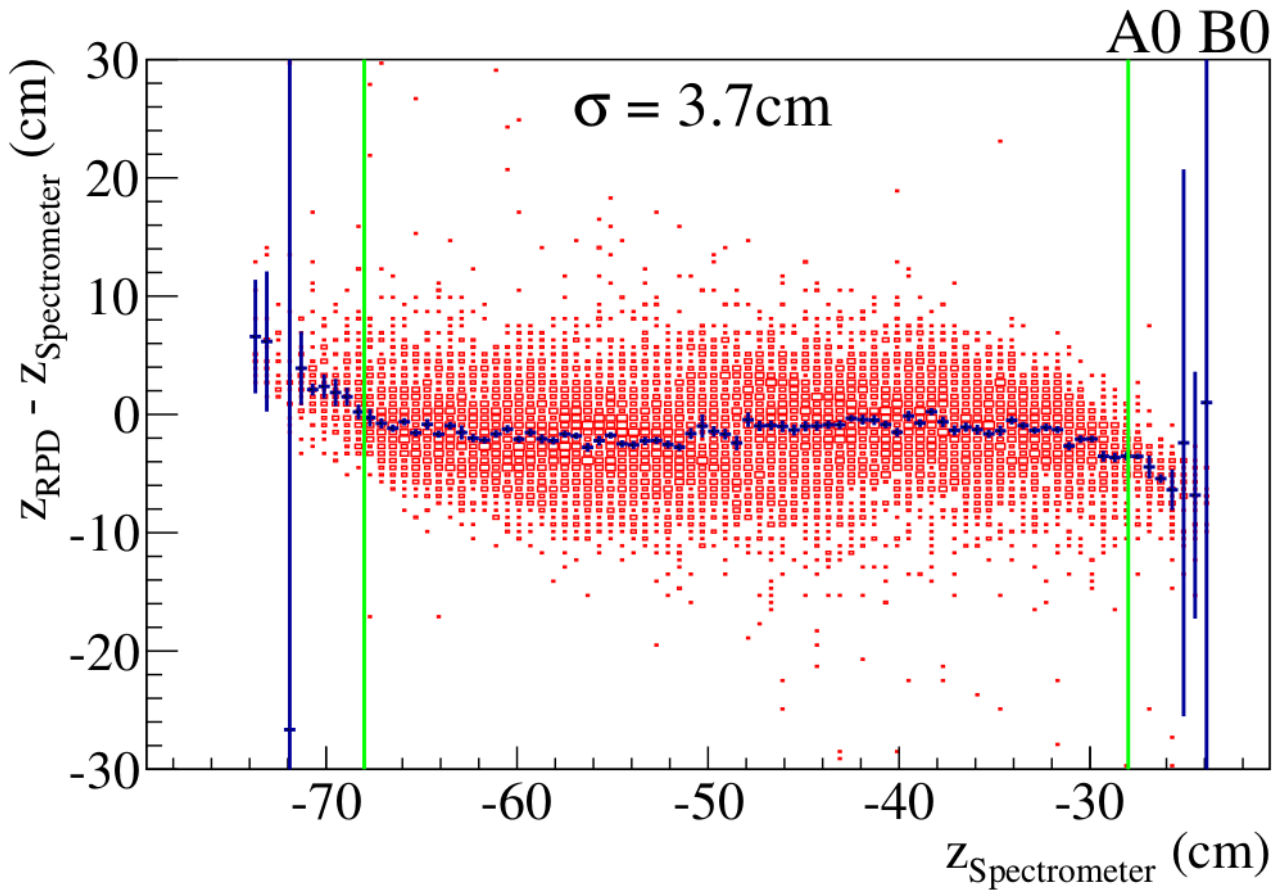
## Система координат.

Реконструкция производится в системе отсчёта связанной с детектором RPD. Ось  $z$ - это ось центра мишени. Ось  $y$ - направленная вверх вдоль вертикальная ось. И соответственно,  $x = z \times y$ . Начало координат находится на оси пучка в конце мишени. Элементы детектора A0B0 соответствуют азимутальному углу  $\varphi = 0^\circ$ . RPD выставлен по оси пучка. Ошибка в расположении по оценкам должна составлять меньше 1мм по любой из осей. (Тем не менее, система отсчёта детектора RPD отличается по координате  $z$  от системы отсчёта установки COMPASS, и может быть слегка наклонена. Поэтому при реконструкции в качестве системы координат используется траектория пучка, как более точная. Для каждой вершины данная траектория измеряется при помощи пучкового телескопа. По мере того как пучок попадает в мишень под слегка отличающимися углами, меняется и направление оси  $z$  от события к событию. Данный подход позволяет более точно определять относительное положение, как RPD, так и спектрометра.

## Предотборы

АЦП и ВЦП предоставляют информацию о амплитудах и временах хитов от дискриминированных сигналов с ФЭУ. Время пролёта частицы от внутреннего до внешнего колец составляет 2 нс. для частиц с  $\beta \approx 1$  под углом в  $90^\circ$  и 10,5 нс. для частиц с  $\beta \approx 0.28$  и углом в  $50^\circ$ . Временное окно для "физических сигналов" выбрано так чтобы снизить фон от соседних событий. Окно определяется следующими параметрами: максимальным временем прохождения во внутреннем кольце (3нс), максимальным временем прохождения во внешнем кольце(7нс), и максимальной разницей времён между хитом на входе и выходе из

мишени(1.5нс.). При сравнении предельных случаев, максимальная разница может составлять 20нс и должна учитываться при выборе минимальной ширины окна. Сравнивая со



Изображение 5: Разница между реконструированной в RPD координатой вершины по оси z и полученной из данных спектрометра в зависимости от z вершины из данных спектрометра для комбинации хитов в A0B0 в результате упругого pp рассеяния. Красные точки- экспериментальные данные. Синие- результат фита функцией Гаусса. Зелёные линии- объём мишени.

временем триггера, сигнал приходит приблизительно на 970нс позже из-за задержек создаваемых в электронике и при прохождении в кабелях. Это смещение вычитается. В дополнение к этому, между разными каналами могут тоже наблюдаться различия во временах из за разных времён прохождения в РМТ и различной длины проводов. Эти отклонения составляют порядка наносекунд. Для предотборов временное окно составляет 20нс и, следовательно, отбираются все хиты в диапазоне 40 нс от триггера.

### Нахождение треков.

Схематичный вид геометрии элементов детектора RPD приведён на рисунке(1). Частица отдачи попадает в сцинтилляционный элемент  $i$  в момент времени  $t_i$  и в точке  $z_i$  в продольном направлении. Каждая возможная комбинация ближнего и соответствующих дальнего фотоумножителей используется для определения  $(z_i, t_i)$ :

$$z_i = \frac{C_{eff}^i}{2} (t_{up}^i - t_{down}^i - t_{cor.up}^i - t_{cor.down}^i) + \frac{L_i}{2} + z_{offset.up}^i + z_{offset.down}^i \quad (6)$$

$$t_i = t_{up}^i + t_{down}^i - t_{corr.up}^i - t_{corr.down}^i + \frac{L_i/2 + z_{offset.up}^i + z_{offset.down}^i}{c_{eff}^i} \quad (7)$$

,где  $t_{up}^i$  - это время хита в переднем ФЭУ.  $t_{down}^i$  - это время хита в дальнем ФЭУ.

Следующие поправки и константы должны быть вычислены:

- $c_{eff}^i$  : Эффективная скорость прохождения света  $c_{eff}^i$  в элементе  $i$  определяется временами и положениями хитов в сцинтилляционных элементах. Наклон определяется линейным фитом **отношения  $z-t$** . Так как разрешение по оси  $z$  мало, в этот метод внесены поправки на основе анализа процессов упругого рассеяния  $pp \rightarrow pp$  и  $p\bar{p} \rightarrow p\bar{p}$ . Эта константа используется для предсказания координаты частицы отдачи по оси  $z$  в сегментах детектора с использованием информации о рассеиваемой частице, координаты которой определяются гораздо точнее чем в сцинтилляционных элементах.
- $t_{corr}^i$  : как было сказано ранее, измерения наклона переднего фронта сигнала используются для поправки ошибок измерения времени в дискриминаторах при изменении амплитуды сигналов. Зависит от  $t_{corr.up}^i$  и  $t_{corr.down}^i$ .
- $z_{offset}^i$  : Два параметра смещения  $z_{offset.up}^i$  и  $z_{offset.down}^i$  используются для компенсации смещения по оси  $z$  для разных элементов в системе координат связанной с детектором RPD. Получаемые распределения по оси  $z$  смещены по сравнению с теми, которые должны были бы наблюдаться при  $z = 0$ . Данные константы вычислены как для сигналов с ближних, так и для дальних ФЭУ и учитывают разницу времён из-за разных смещений возникающих от разных длин кабелей, а также, временных задержек в ФЭУ.
- $L_i/2$  : Центры элементов внешнего и внутреннего колец смещены относительно друг друга и соответствуют геометрическому аксептансу от  $50^\circ$  до  $90^\circ$ , как видно из рисунка(1). Потому, половина длины  $L_i$  от считывающего элемента используется для учёта данной геометрии.

Хиты с реконструированным положением оказавшимся вне достоверной области сцинтиллятора, включающей большую защитную зону составляющую 20см выкидываются из обработки, также как хиты от соседних событий в которых сигнал со внешнего кольца приходит раньше чем от внутреннего. Если в одном из ФЭУ зарегистрировано больше трёх хитов в одном событии, то они принимаются за шум.

Реконструированные хиты для элементов внутреннего кольца сопоставляются с хитами в трёх соответствующих элементах внешнего кольца. Прямая линия(трек) для каждой комбинации хитов экстраполируется до пересечения с мишенью. Вершина, реконструированная при помощи спектрометра и пучкового телескопа, наиболее близкая к треку, принимается за начало трека. На графике(5) показана разница  $\Delta z = z_{RPD} - z_{spectrometer}$  в зависимости от  $z_{spectrometer}$  для треков полученных при срабатывании ячеек A0B0 при упругом  $pp$  рассеянии. Разница  $\Delta z$  смещена так чтобы находилась вблизи нуля. Зелёные полосы обозначают границы мишени. Ширина распределения вдоль оси ординат соответствует пространственному разрешению. Оно получено в результате нескольких фитов функцией Гаусса. Среднего пространственное разрешение составляет около 3.5-4 см.

Комбинация всех вершин со всеми хитами записываются всегда когда при физическом анализе требуется точное соотнесение вершин и треков.

Далее определяется длина трека между внутренним и внешним кольцами:  
 $d = \sqrt{(z_i^B - z_i^A)^2 + \Delta_{AB}^2}$ , где  $\Delta_{AB} = 65$  см обозначает радиальное расстояние между внутренним и внешним кольцами. С учётом времени пролёта  $t = t_i^A - t_i^B$ , скорость частицы отдачи составляет:

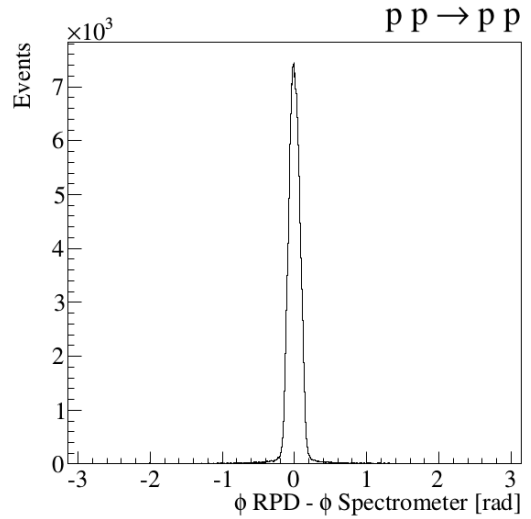
$$\beta = \frac{d}{ct} = \frac{\sqrt{(z_i^B - z_i^A)^2 + \Delta_{AB}^2}}{c(t_i^B - t_i^A)} \quad (8)$$

Из соотношения (2), можно получить импульс, если присвоить частице отдачи какую-либо массу.

$$p = \frac{m}{\sqrt{1/\beta^2 - 1}} = \frac{m\beta}{1 - \beta^2} \quad (9)$$

Здесь предположили что частицей отдачи является протон, после наблюдений описанных ниже.

Для нахождения импульса частицы отдачи в момент времени сразу после взаимодействия, необходимо сделать поправки на достаточно большие потери энергии медленно движущейся частицы в веществе. Энергетические потери для протонов с разными импульсами различны и зависят, в том числе, и от свойств вещества через которые они проходят. Для нижнего порога, который мы можем детектировать  $p \approx 0.3$  GeV/c, толщина материи на пути критична. Более того, при экстраполяции трека к вершине взаимодействия, необходимо учитывать любые смещения  $(x, y)$  относительно оси пучка. Азимутальное разрешение детектора RPD недостаточно для определения  $(x, y)$  вершины. Также, принимаются во внимание координаты ближайших реконструированных при помощи спектрометра вершин. Измерение положения также применяется для нахождения полярного угла  $\theta$ .  $\cos\theta = (z_B - z_A)/d$ . Азимутальный угол  $\phi$  находится из положения элемента в котором зарегистрирован хит. Сначала угол находится на основе номера сработавшего



Изображение 6: Разница между азимутальным углом полученным из измерений на детекторе RPD и на спектрометре в процессе упругого  $pp$  рассеяния.

элемента  $m$  внешнего кольца:  $\phi' = \frac{15}{180} \pi m$ . Затем,

принимается во внимание информация о сработавшем элементе  $i$  внутреннего кольца. Если он находится напротив внешнего ( $m=2i$ ), то корректировка не производится. В противном случае, при  $m=2i \pm 1$  получаем:  $\phi_{corr} = \frac{\pm 1}{4} \frac{15}{180} \pi$ . В итоге азимутальный угол

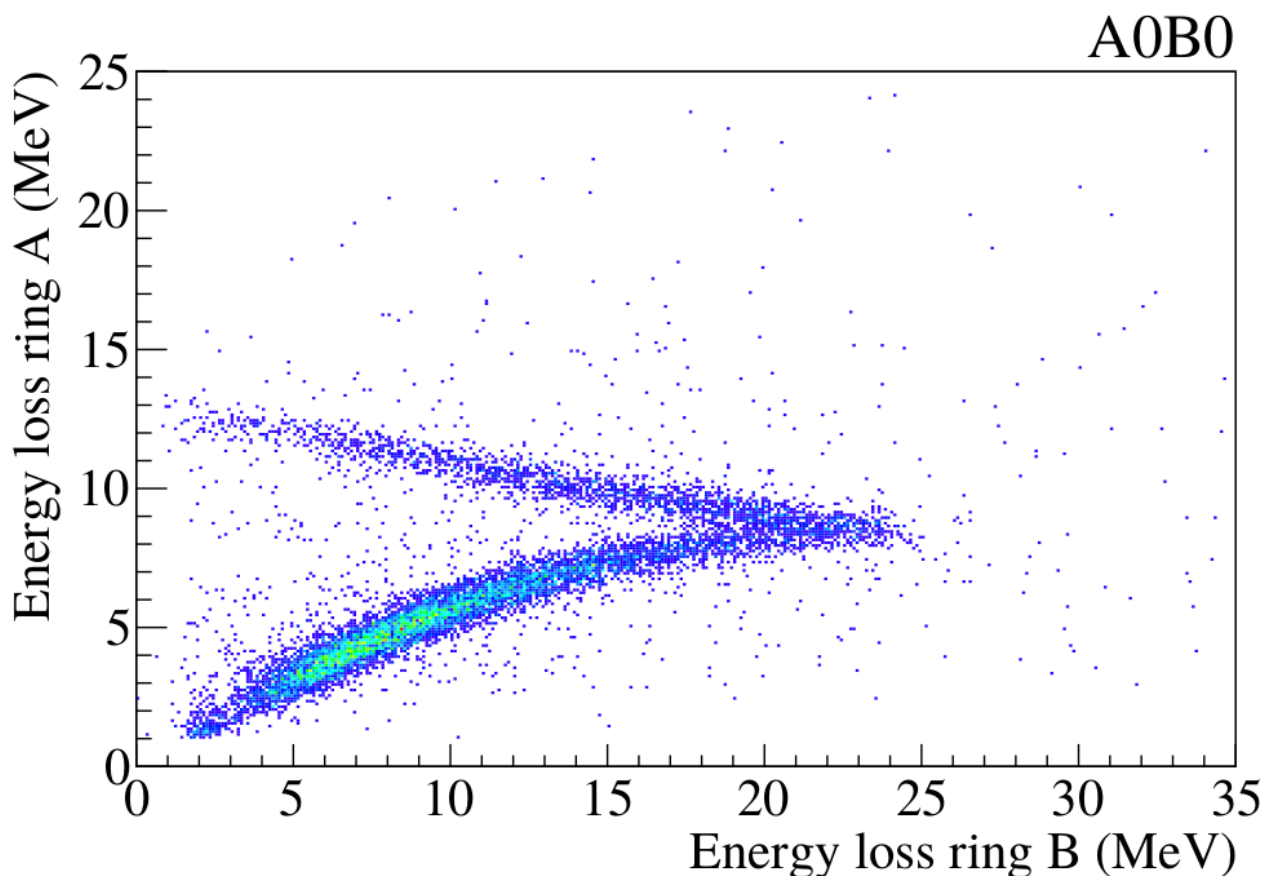
определяется как:  $\phi_{corr} = \frac{15}{180} \pi (m + \frac{1}{4}(m - 2i))$ . В таком случае мы можем получить два различных разрешения по азимутальному углу, в зависимости от комбинации внутренних и внешних элементов:  $\sigma_{\phi_1} = \frac{15^\circ}{\sqrt{12}} = 4.3^\circ$  и  $\sigma_{\phi_2} = 2.2^\circ$ . Так как пучок имеет ненулевые размеры в поперечнике, распределение по возможным комбинациям хитов не равномерно.

Более того, распределения по  $\sigma_{\varphi 1}$  и  $\sigma_{\varphi 2}$  сложно вычислить и потому определяются из эксперимента. На изображении (6) показано распределение числа событий в зависимости от разности между углом измеренным при помощи детектора RPD и спектрометром в результате упругого pp рассеяния. Измеренное угловое разрешение составляет  $\sigma_{\varphi}=5^{\circ}$ , что достаточно близко к ожидаемым значениям.

С учётом информации об угле и о импульсе частицы, мы имеем полную информацию о треке. После проделанных операций мы имеем набор треков и соответствующих вершин доступный для отбора событий и физического анализа.

### Энергетические потери:

Потери энергии во внутреннем и внешнем кольцах можно получить из данных измеренных в SADC. Калибровка производится по перегибу, который можно увидеть в распределении потерь энергии в кольце А относительно кольца В (изображение 2). Виден переход между полностью остановившимся, потеряв всю энергию, протоном и протоном всё ещё способным пройти через кольца детектора. Если посмотреть на изображение (7), то становится хорошо видно что экспериментальные данные хорошо согласуются с предсказаниями (изображение 2). Видны только протоны. Фоном от пионов пренебрежимо мал.



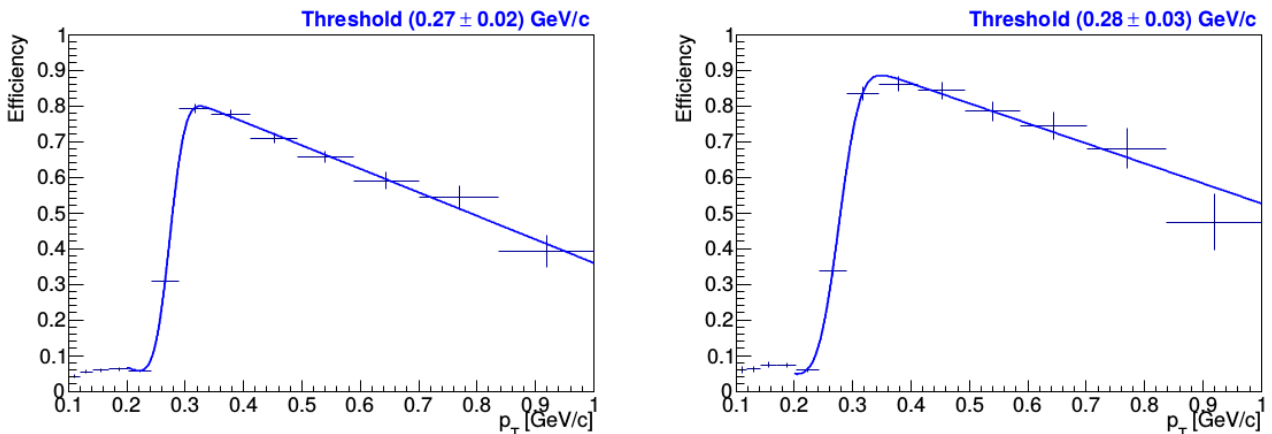
Изображение 7: По вертикали показаны потери энергии в кольце А, по горизонтали - в кольце В для комбинации элементов А0В0 при упругом рассеянии pp. Видны только протоны без фона от пионов или минимально ионизирующих частиц.

## Эффективность:

Эффективность детектора определяется при анализе процесса упругого  $pp$  рассеяния. Отбираются события в триггере beam в которых имеются один входящий и один выходящий трек от положительно заряженной частицы, а также одна реконструированная вершина для однозначности интерпретации. Импульс вылетающей частицы должен находиться в окне 6.3 ГэВ/с около стандартного импульса пучка 190 ГэВ/с. Кроме того, частица должна быть детектирована в детекторе CEDAR(используется для идентификации пучковых частиц). Кинематика протона отдачи рассчитывается на основе информации о рассеиваемом протоне. Из закона сохранения энергии-импульса может быть получена энергия пучка. Импульс пучка не измеряется, в отличии от направления. Расчёты энергии пучка приводятся в [9] и [10]. В случае с протонным пучком имеем:

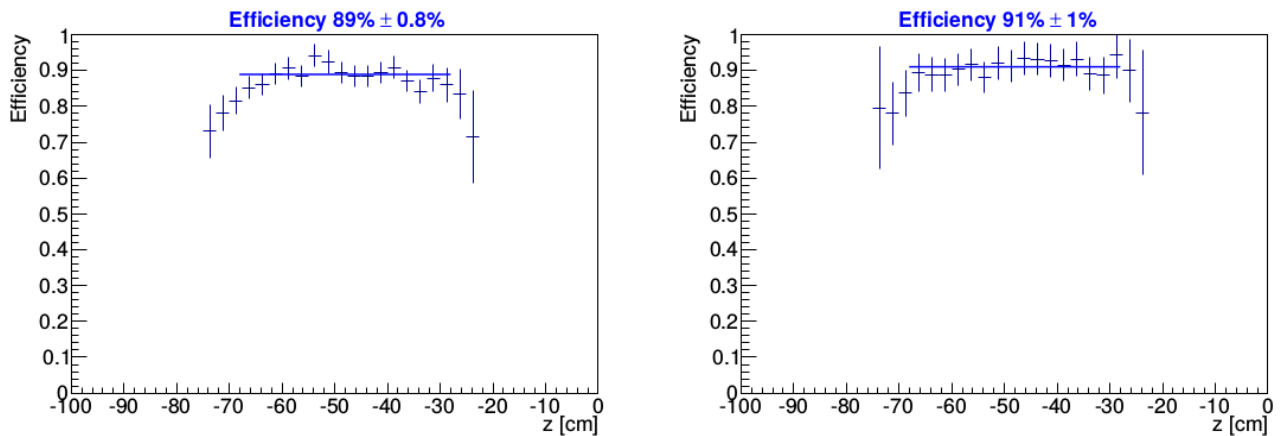
$$E_{beam} = \left(1 - \frac{m_p}{E_{scattered}}\right) / \left(1 - \frac{E_{scattered}}{m_p} + \frac{|\vec{p}_{scattered}| \cos \theta}{m_p}\right) + \left(\frac{m_p |\vec{p}_{scattered}| \cos \theta}{2 E_{scattered}^2}\right) / \left(1 - \frac{m_p}{E_{scattered}}\right) \quad (10)$$

, где  $m_p$ - масса протона,  $\theta$ - угол рассеяния по отношению к направлению налетающего пучка. Изначально нет обрезаний по импульсу отдачи чтобы иметь возможность определить порог чувствительности детектора RPD. Зависимость эффективности  $\epsilon$  от кинематических переменных вычисляется как доля найденных хитов в элементе RPD к ожидаемому числу хитов в результате упругого рассеяния. Эффективность выражается через поперечный импульс частицы отдачи и координаты вершины  $z$  в мишени. На рисунке (8) показана эффективность элементов A0 и B0 в зависимости от поперечного импульса  $p_T$ . При низких поперечных импульсах распределение плоское и не превышает пяти процентов. Эта "остаточная эффективность" появляется из-за наличия шума или же пайлапных протонов (т.е. посторонних частиц пришедших от других вершин взаимодействий). Как и ожидалось, на пороге эффективность начинает нарастать, так как протоны начинают достигать внешнего кольца детектора. Достигает максимума на 82% для кольца А и 87% для кольца В. Порог  $p_T = (0.27 \pm 0.01)$  GeV/c одинаков для всех элементов и согласуется с расчётным значением. С ростом  $p_T$  уменьшается время пролёта, и следовательно, измерения не всегда достаточно точны для определения  $\beta$  с необходимой точностью.



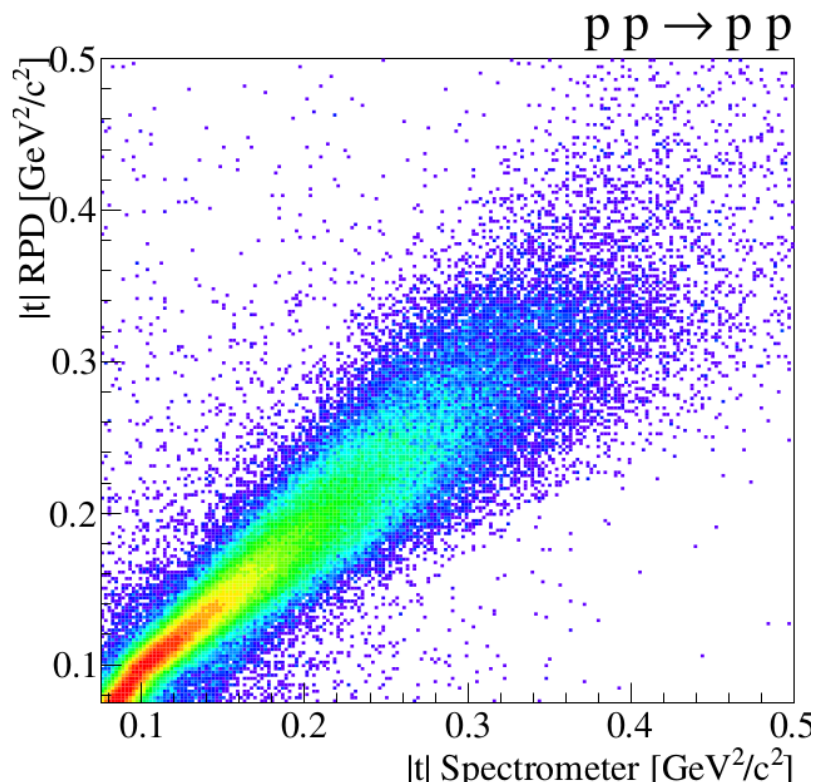
Изображение 8: Эффективность в зависимости от попересного импульса  $p_T$  при упругом  $pp$  рассеянии. Слева: эффективность для A0. Справа: эффективность для B0.





Изображение 9: Эффективность в зависимости от координаты вершины по оси  $z$  при упругом  $pp$  рассеянии. Слева: эффективность элемента A0. Справа: эффективность элемента B0.

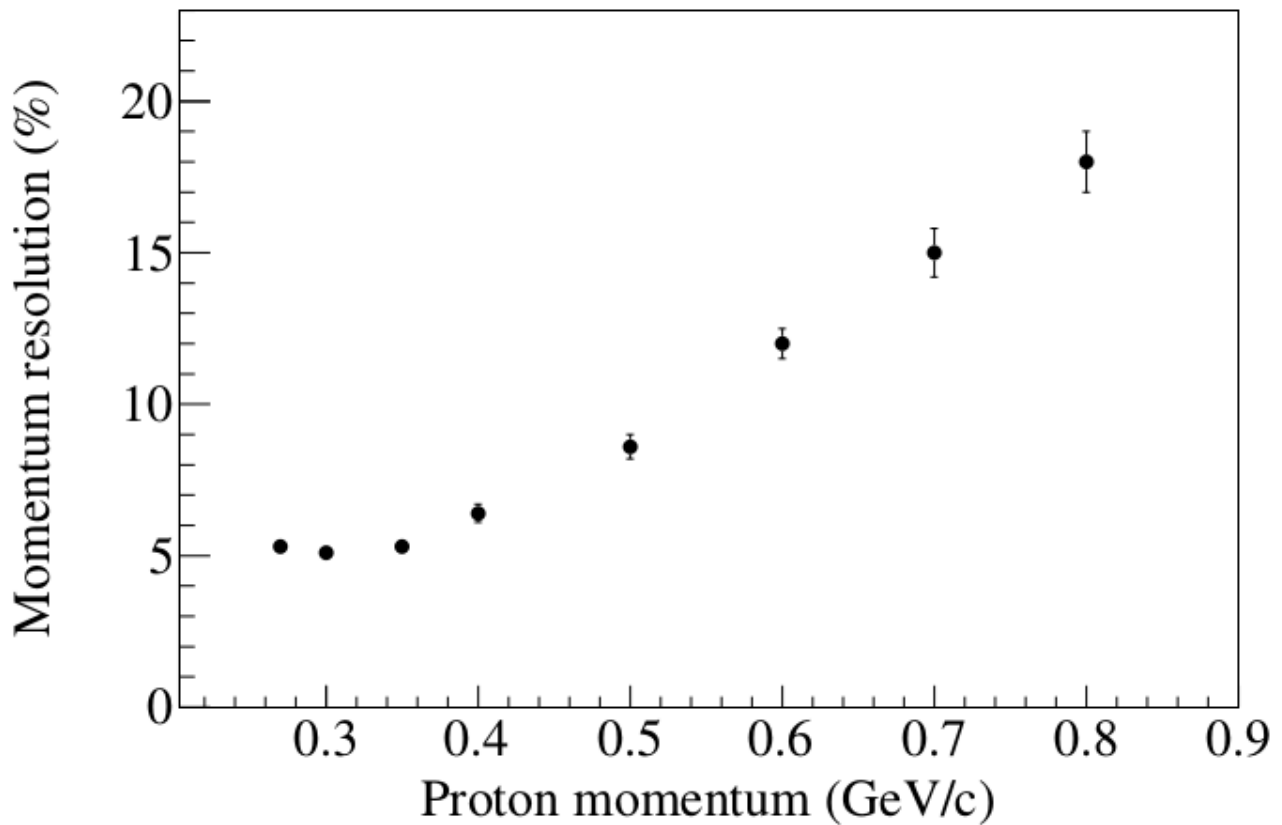
Распределение эффективности в зависимости от  $z$  получают после обрезания поперечного импульса  $p_T > 0.27$  ГэВ чтобы быть уверенными что кандидат в протон отдачи не потерял слишком большую энергию в веществе и способен достичь внешнего кольца детектора. На изображении (9) показаны эффективности соответствующие элементам A0 и B0 в зависимости от положения вершины по оси  $z$ . Общая эффективность извлекается из фита данных графиков прямой линией в диапазоне от  $-68\text{см} < z < -28\text{см}$  (в объёме мишени). Эффективность лежит в диапазоне от 85% до 90% для всех элементов. Данная эффективность используется при Монте-Карло симуляциях детектора RPD.



Изображение 10: Корреляции между переданным импульсом измеренным при помощи RPD и при помощи спектрометра.



На изображении (10) показаны корреляции между преданным импульсом  $|t|$  измеренным при помощи RPD и при помощи спектрометра. Хорошо видна корреляция вплоть до  $|t| = 0.4$   $(\text{GeV}/c)^2$ . При больших импульсах корреляции пропадают из-за низкого разрешения по энергии, что видно на картинке(11). При низких импульсах разрешение по импульсу составляет 5% и быстро ухудшается с ростом из-за сокращения времени пролёта.



Изображение 11: Разрешение по импульсу в зависимости от импульса протона отдачи.

## Список литературы:

- [1] Johannes Bernhard, Exclusive vector meson production in pp collisions at the compass experiment.
- [2] W. Klempt, Review of particle identification by time of flight techniques, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment 433 (1999) 542 – 553.  
URL  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016890029900323X> (Cited on page 44.)
- [3] C. Grupen, Teilchendetektoren, BI-Wiss.-Verlag, 1993. (Cited on pages 43, 44, and 45.)
- [4] J. Bernhard, Aufbau des inneren Rings eines Recoildetektors am COMPASS-Experiment, Diploma thesis, Johannes-Gutenberg-Universität Mainz (2007). (Cited on pages 45, 47, 48, and 60.)
- [5] P. Ullaland, et al., Fluid systems for RICH detectors, Nucl. Instr. and Meth. A 553 (2005) 107–113. (Cited on page 35.)
- [7] H. Fischer, et al., Implementation of the dead-time free F1 TDC in the COMPASS detector readout, Nucl. Instr. and Meth. A 461 (2001) 507–510. (Cited on page 48.)
- [8] CERN, Initial Safety Info Laser (2007).  
URL <https://edms.cern.ch/document/816962/> (Cited on page 48.)
- [9] Q. Weitzel, Precision Meson Spectroscopy: Diffractive Production at COMPASS and Development of a GEM-based TPC for PANDA, Ph.D. thesis, TU München (2008). (Cited on page 55.)
- [10] T. Schlüter, The  $\pi - \eta$  and  $\pi - \eta'$  systems in exclusive 190 GeV reactions at COMPASS(CERN), Ph.D. thesis, LMU München (2012). (Cited on pages 55, 77, and 91.)