



Исследование влияния параметров считывающей электроники на точность измерений Straw Tracker SPD с применением программного обеспечения Garfield и LTSpice

Студент: А. И. Гурова, группа Б22-ФЧ

Научные руководители: Е. В. Кузнецова,

Т. Л. Еник, Е. С. Мухамеджанов

Научный консультант: С. А. Буланова



Цель и задачи:

Цель:

Оценить, как параметры считывающей электроники влияют на точность измерений Straw Tracker SPD, используя совместное моделирование в пакетах Garfield++ и LTSpice.

Задачи:

1. Провести моделирование отклика STRAW-трубок с использованием Garfield++ и LTSpice.
2. Количественно оценить влияние параметров считывающей электроники на:
амплитуду сигнала;
зарядовое разрешение (σ/MPV);
вероятность насыщения предусилителя.
3. Определить, какие параметры критичны для параметризации

STRAW ТРУБКИ

- газовый детектор, используемый для трекинга (определения траектории) и измерения энергетических потерь (dE) для идентификации частиц.

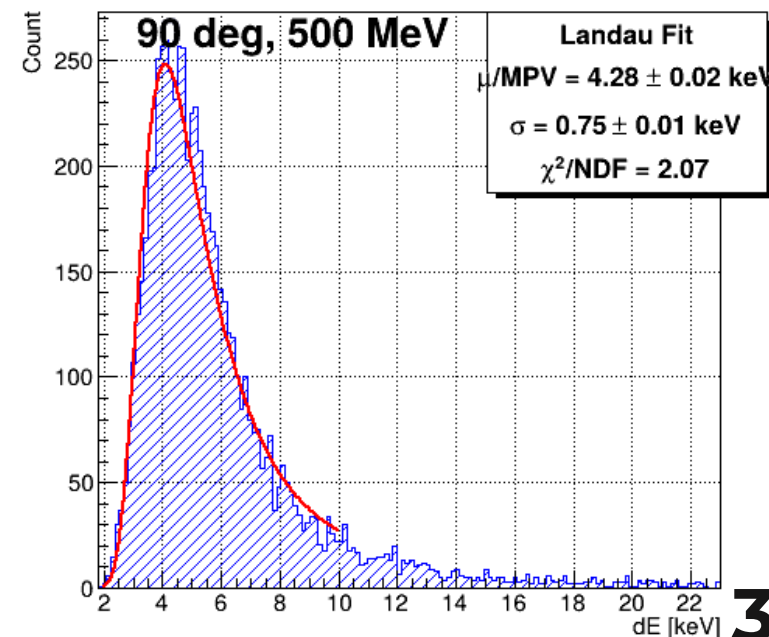
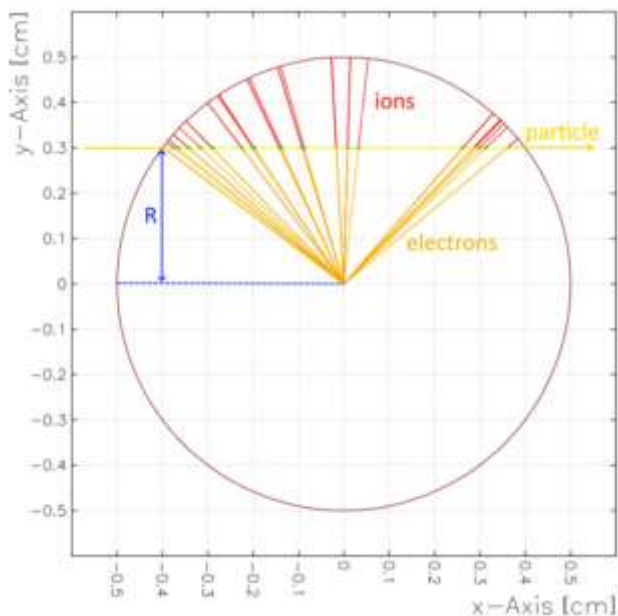
Принцип работы:

Проходит заряженная частица → ионизирует газ → лавинное усиление вблизи проволоки → на электродах индуцируется сигнал



Энергетические потери заряженной частицы в STRAW трубке распределены по Ландау:

Помимо измерения трека, может использоваться для идентификации частиц при малых импульсах (PID).

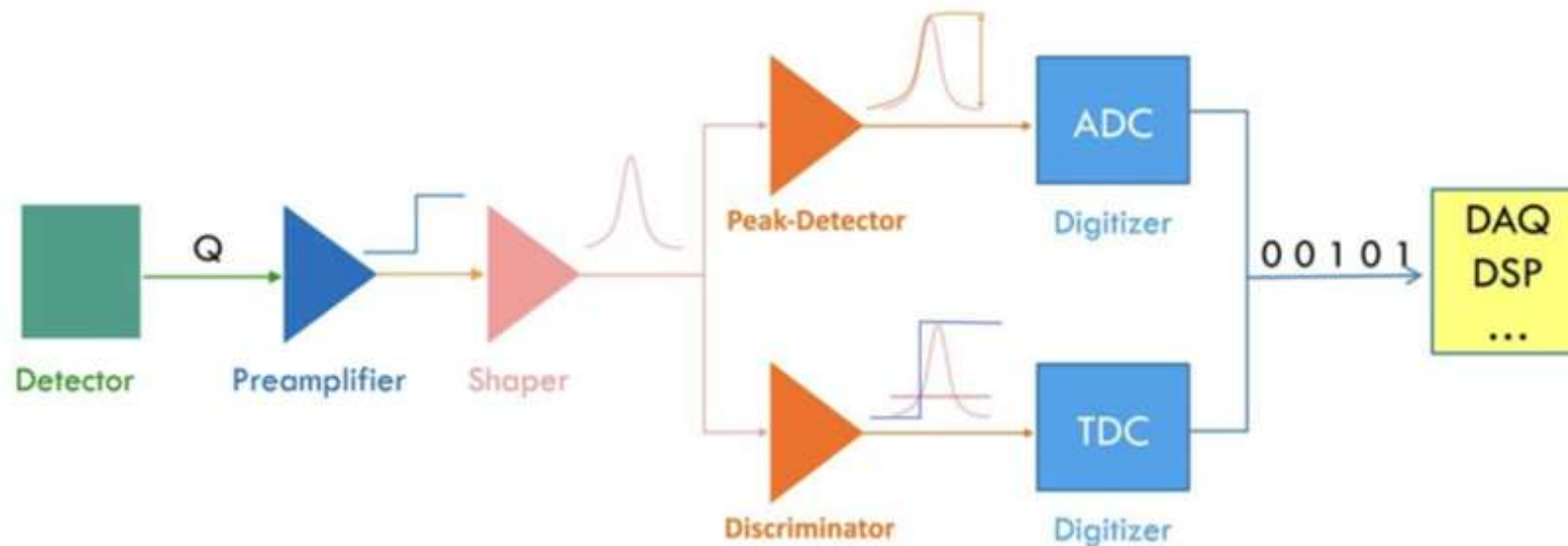


Архитектура канала считывания

Сигнал с анода → ЗЧУ (заряд → напряжение) → шейпер (фильтрация) →
разделение на два каскада:

1. Пиковый детектор + АЦП → амплитуда → PID

2. Дискриминатор + ВЦП → время превышения порога → трекинг



1. Диаметр straw трубки: 10 мм
2. Диаметр анода: 30 мкм
3. Напряжение (HV): 1750 В
4. Смесь газов: Ar+CO₂ / 70:30[%]
5. Температура: 20 °С
6. Давление: 1 атмосфера

Параметры электроники:

1. ASIC VMM3a
2. Усиление (gain): 0.5 мВ/фКл, 3 мВ/фКл
3. Peaking time (τ_p): 25 нс, 150 нс, 200 нс
4. Порог насыщения: 800 мВ

PID в straw-трекере SPD — ранее детально не изучалось.

Ключевой вопрос:

Как параметры электроники влияют на точность измерения заряда?

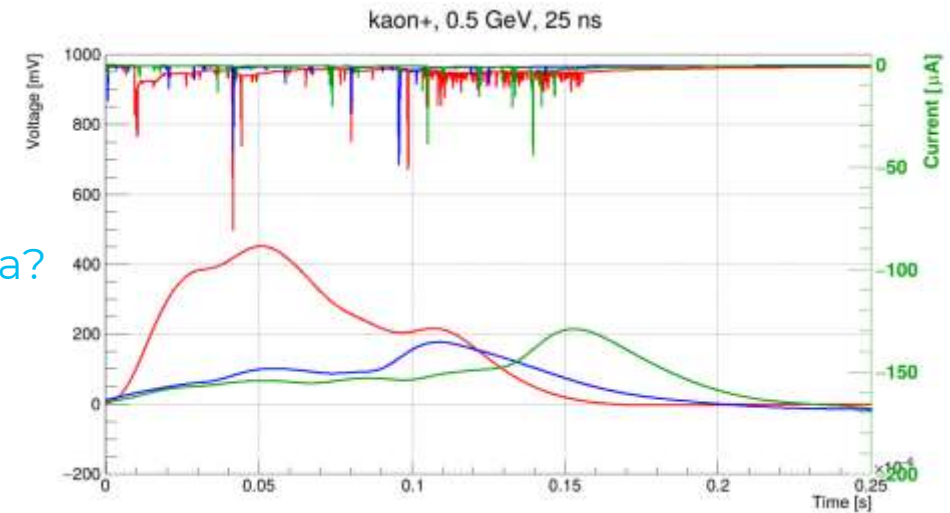
Методика:

Garfield++ - моделирование отклика трубки (ионизация, дрейф, лавина)

LTSpice - учёт реальной электроники (усиление, насыщение)

Данные лягут в основу **параметризации отклика** в **SPDroot** для оценки точности PID.

SPDroot - программа для моделирования физических процессов эксперимента SPD. Результатами моделирования являются базовые характеристики взаимодействия частиц с элементами детектора (напр. ионизационные потери частицы при прохождении одной STRAW трубки).



Garfield++(верх, мкА) и LTSpice(низ, мВ)

Исследования зарядового разрешения для единичной straw-трубки



Garfield++ даёт доступ к моделированию потерь энергии на ионизацию. Проводимое моделирование служит для

1. Сравнения с измерениями на тестовых пучках;
2. Создание параметризации для использования в SPDRoot.

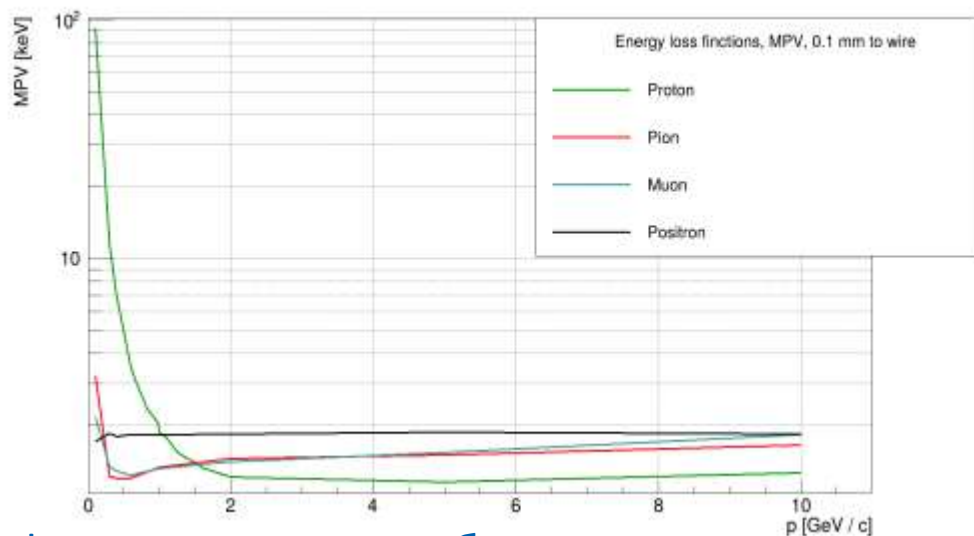
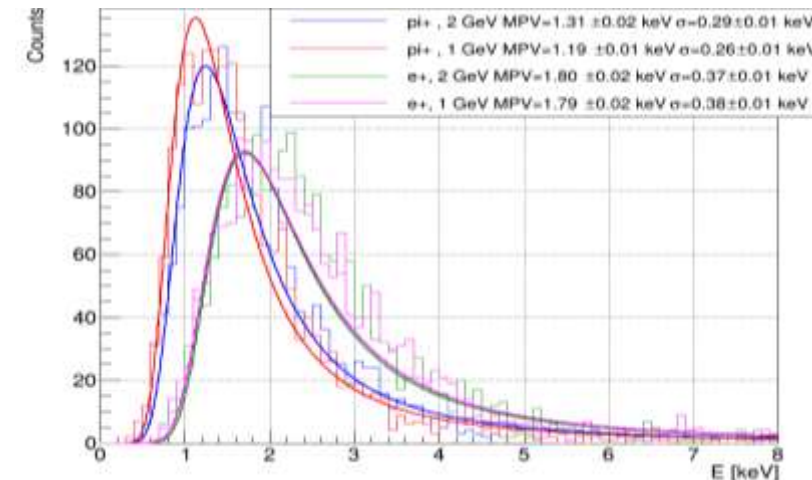


График зависимости наиболее вероятного значения ионизационных потерь от импульса частиц

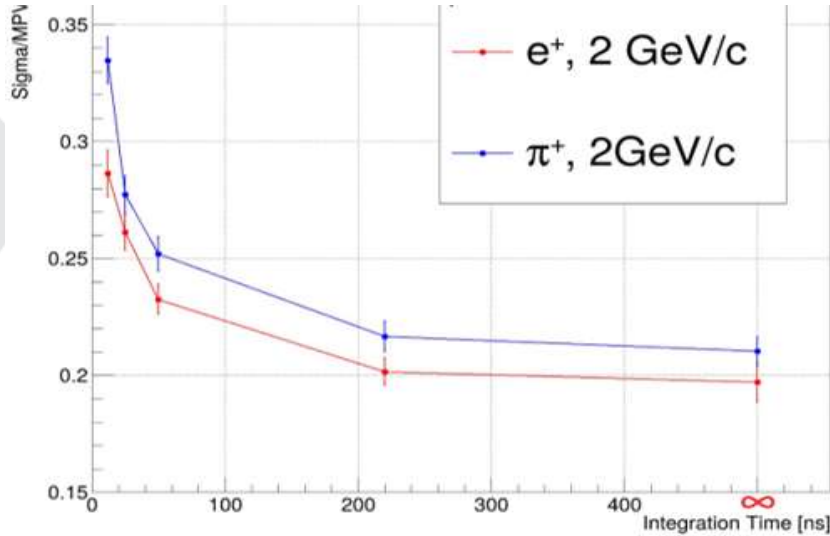


Ландау распределения ионизационных потерь

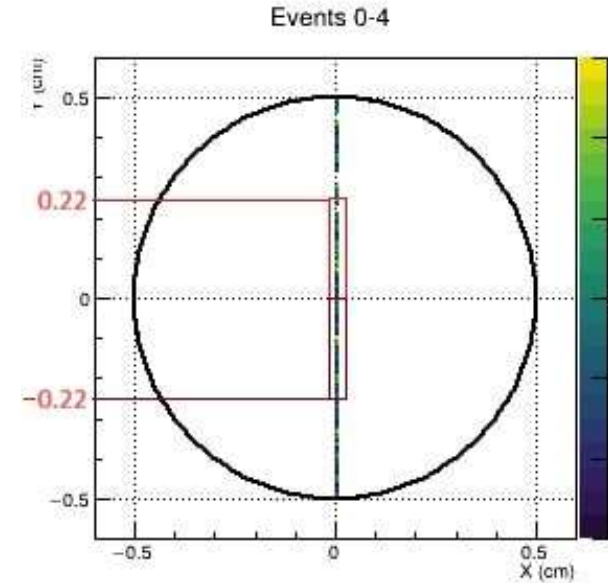
При малых импульсах ($p < 1$ ГэВ/с) ионизационные потери различных частиц (на картинке изображены пионы, каоны, протоны, мюоны) существенно различаются.

Это позволяет эффективно идентифицировать тип частицы.

Влияние параметров считывающей электроники на идентификацию частиц

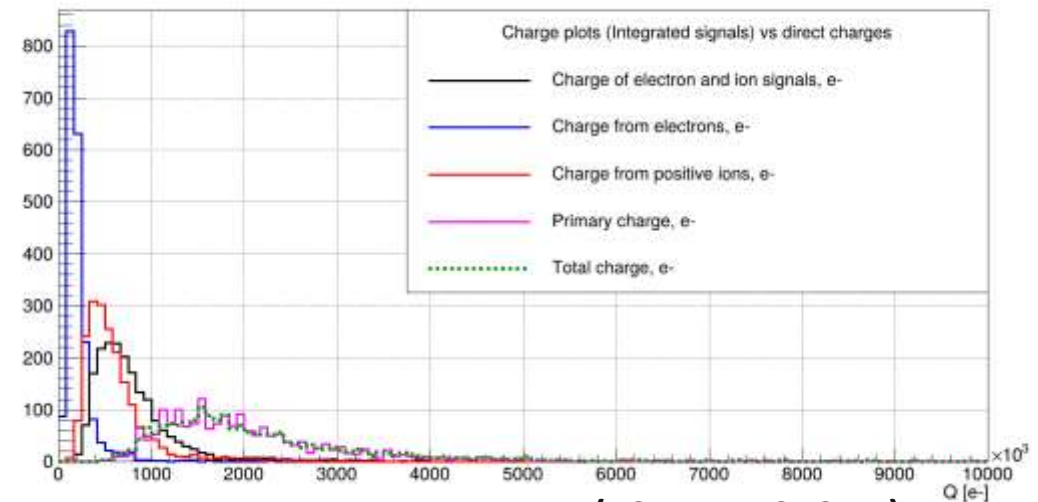
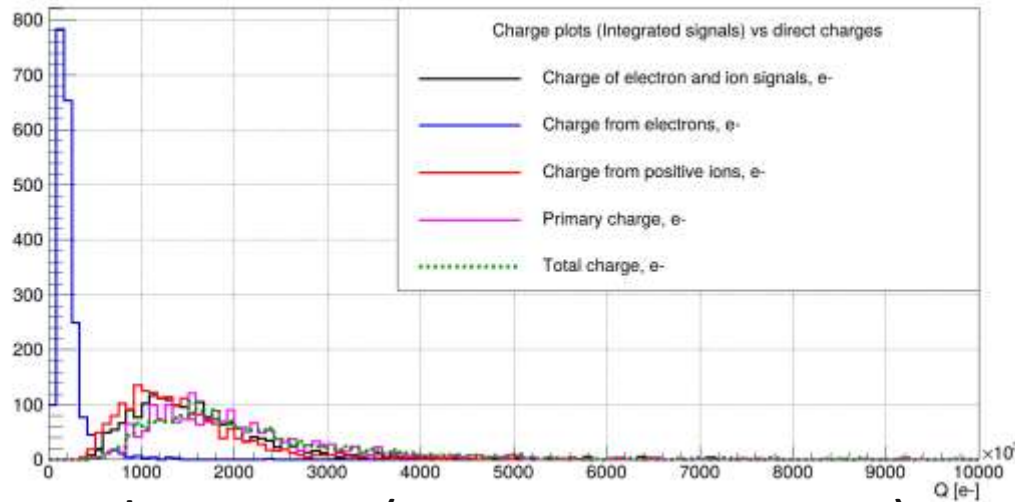


Зависимость относительной ширины распределения собранного заряда от времени интегрирования.



Распределение кластеров

Сигнал начинает развиваться, когда электроны первого кластера достигнут анодной проволоки. При малом времени формирования сигнала (например, 25 нс) электроника успевает зарегистрировать сигнал только от части кластеров, соответствующей расстоянию порядка 2.2 мм от анода. Вклад более удалённых кластеров теряется.

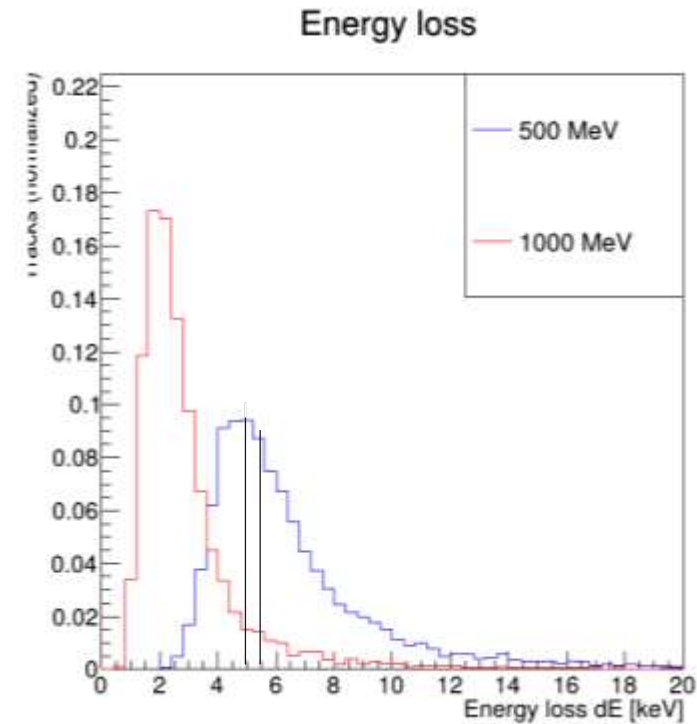
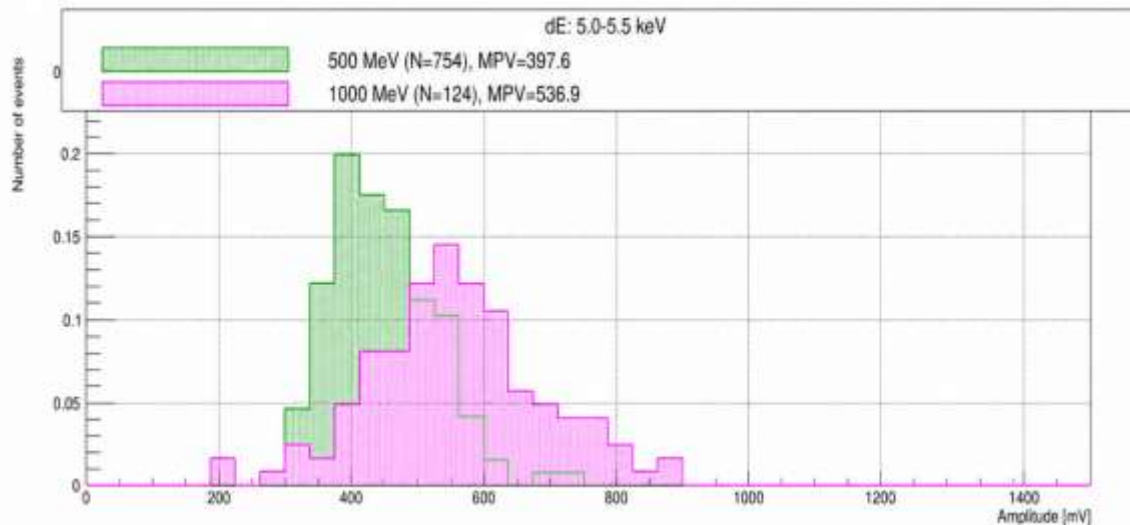


Графики зарядов (интегрированные сигналы) в сравнении с зарядами, полученными напрямую (10 мкс и 250 нс). Сигнал состоит из электронов и ионов. Электроны быстрые, ионы медленные. Не успеваем собрать всю ионную компоненту при малом времени. Если время формирования брать меньше времени прихода электронов, то флуктуации увеличатся.

Сравнение формы сигнала для различных импульсов протонов при фиксированных dE

Были смоделированы протоны с импульсами 500 и 1000 МэВ. На данном слайде изображены ионизационные потери на всем диапазоне.

Возьмем диапазон 5.0 - 5.5 keV.



При одинаковых энергетических потерях отклик сигнала получается разный. Почему?

Сравнительный анализ кластерной структуры при одинаковом dE

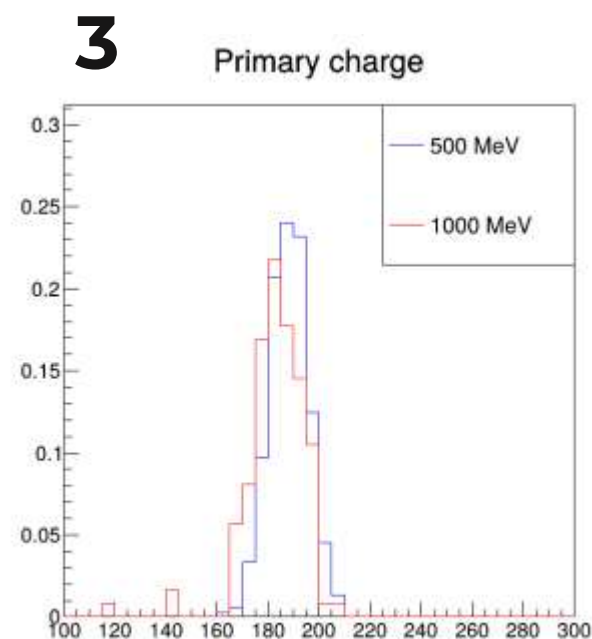
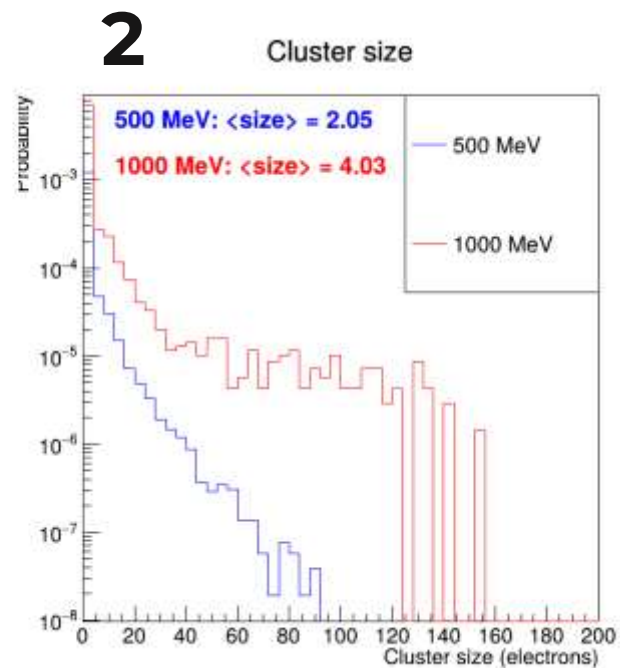
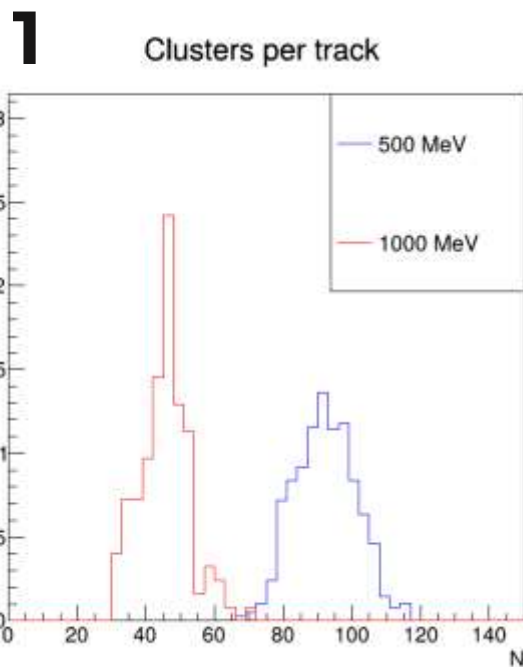
Идея: меняется ли структура кластеров при одинаковом dE ?

Были построены графики: **среднее число кластеров на трек, размер кластеров, начальный заряд.**

Первый график: показывает, сколько кластеров обычно образуется на треке.

Второй график: показывает, как распределяется число электронов в кластере.

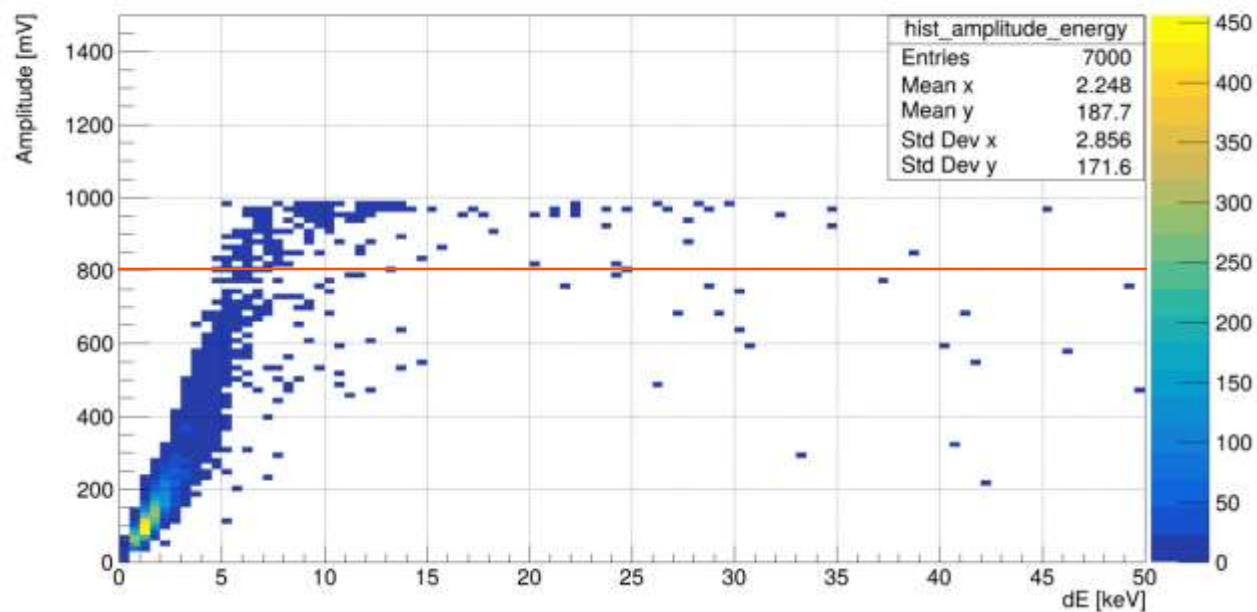
Третий график: показывает суммарное количество первичных электронов, образованных в треке



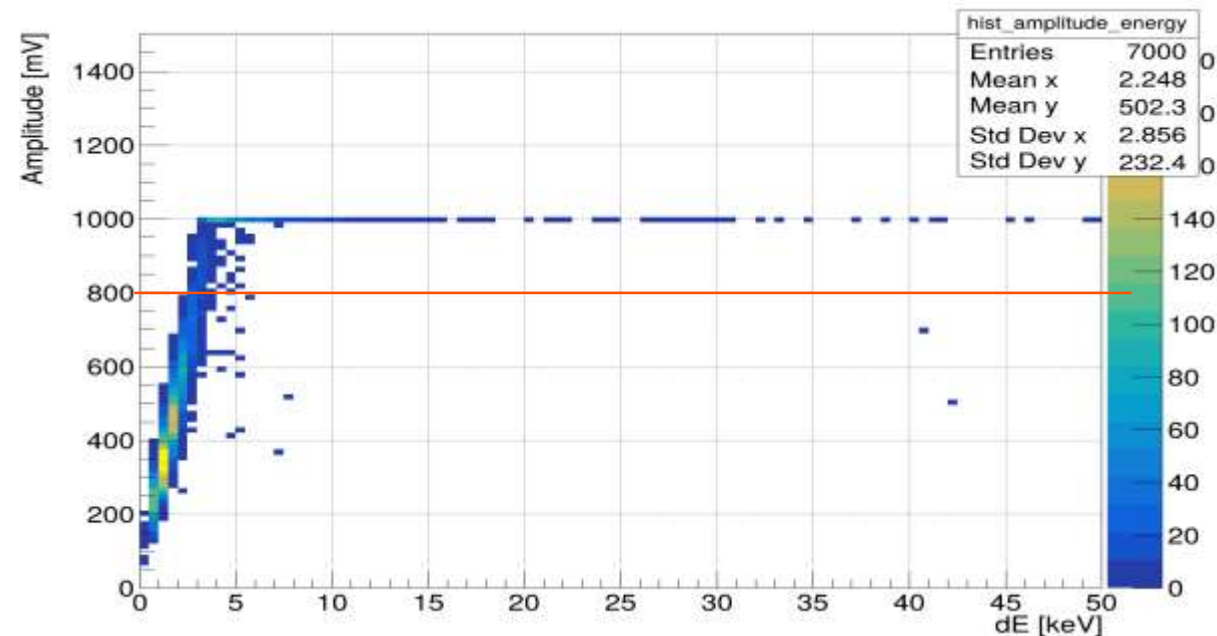
500 MeV N=754
clusters 91.7
size 2.05
e/track 187.6
1000 MeV N=124
clusters 45.1
size 4.03
e/track 181.6

Двумерное распределение амплитуд и dE

Каон 1 GeV, 90 degrees,
25 ns peaking time

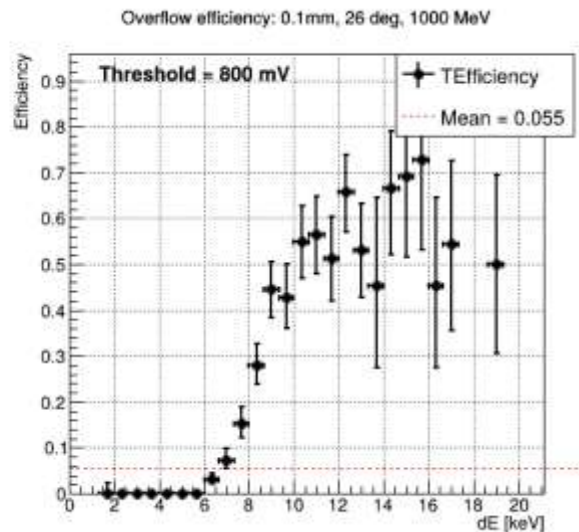
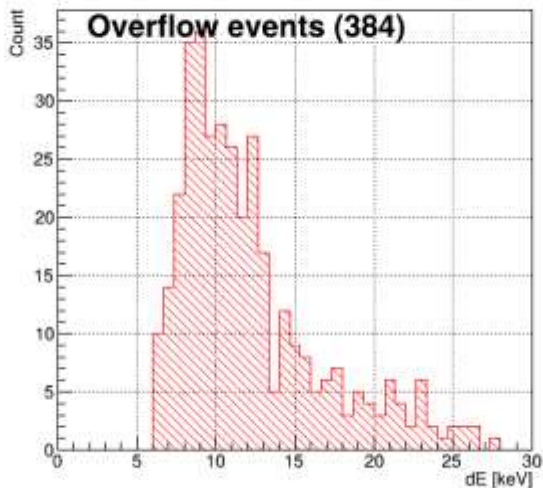
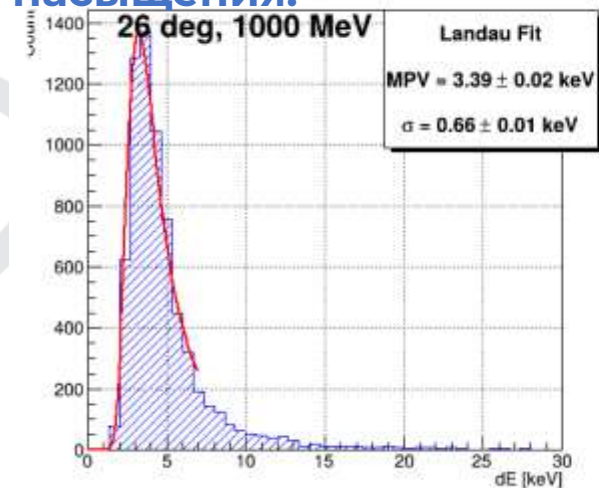


Каон 1 GeV, 90 degrees,
200 ns peaking time



Анализ вероятности насыщения усилителя для каонов

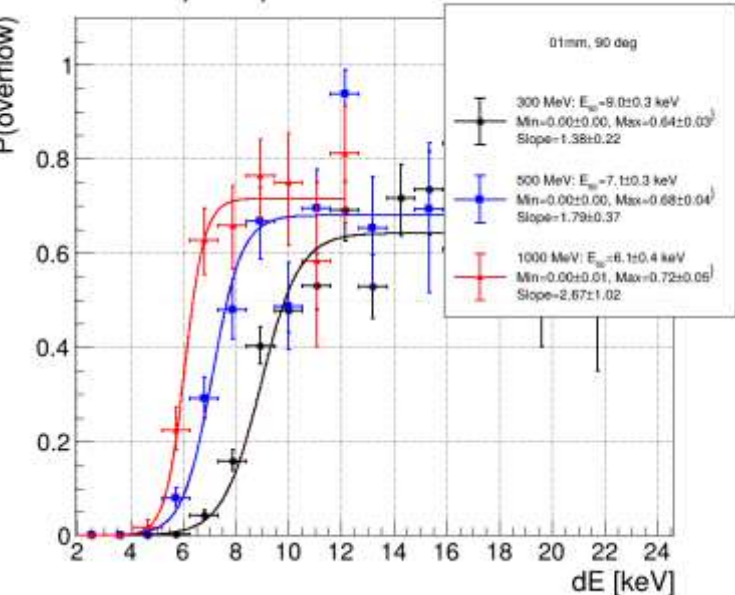
Вычисление вероятности насыщения:



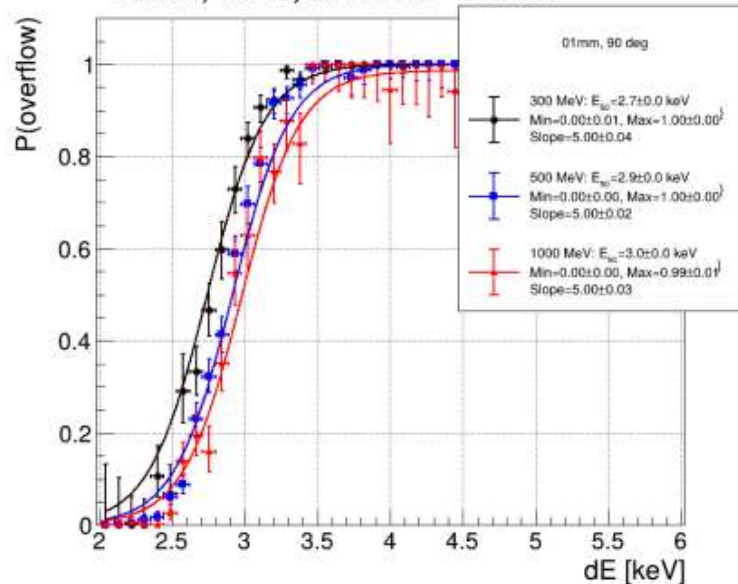
$$P(\text{overflow}) = p_0 + \frac{p_1 - p_0}{1 + e^{-p_2 \cdot (dE - p_3)}}$$

Зависимость вероятности насыщения от reaking time (на расстоянии 0.1 мм):

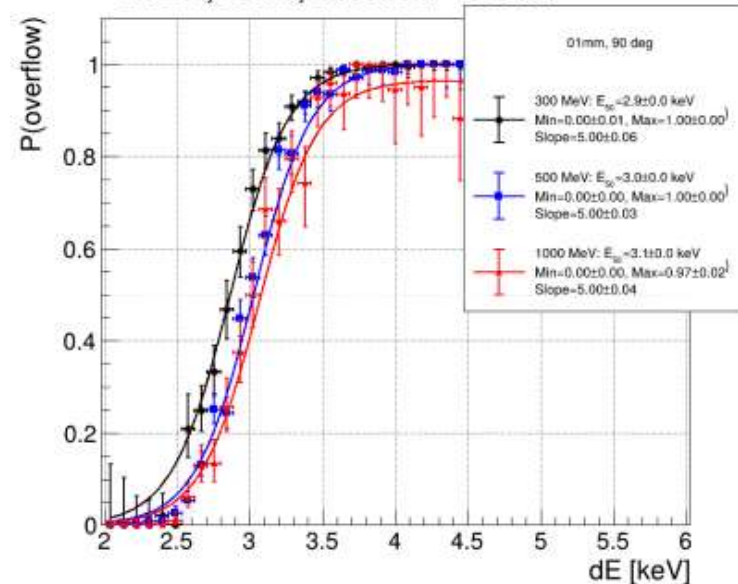
Каон+, 25ns, threshold = 800 mV



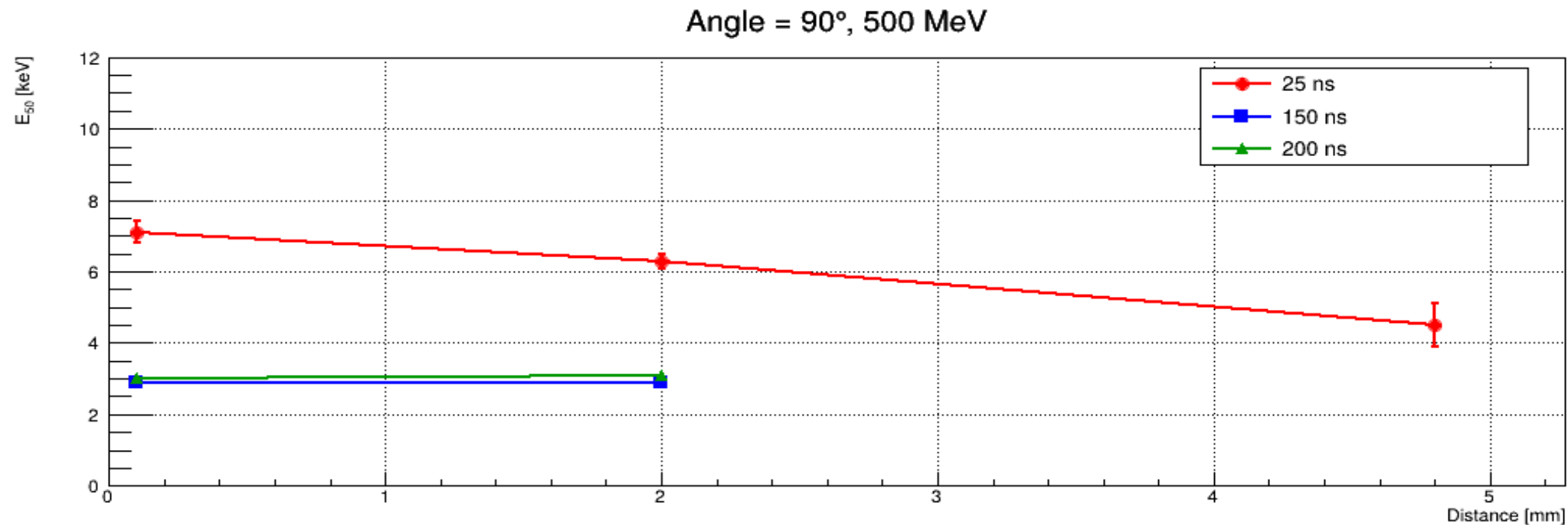
Каон+, 150ns, threshold = 800 mV



Каон+, 200ns, threshold = 800 mV



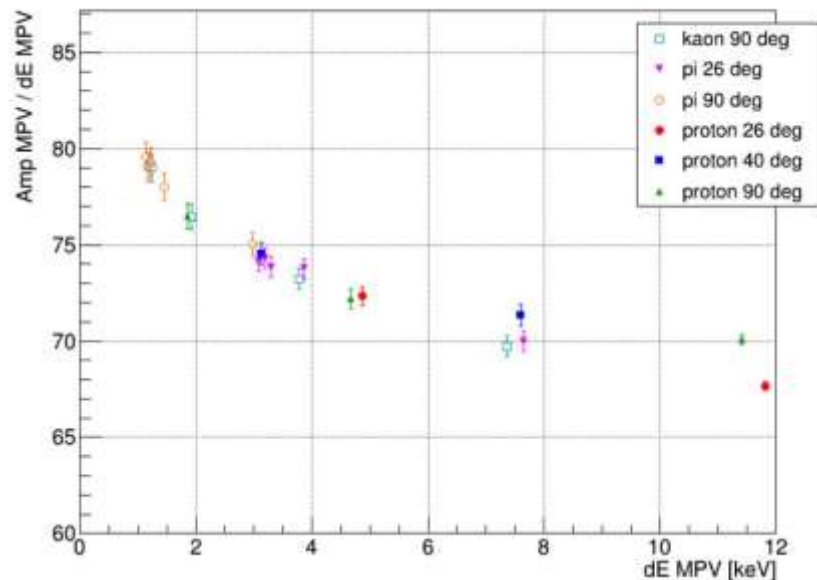
Зависимость выхода в насыщение на 50% от расстояния между треком и анодной проволокой



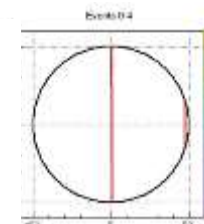
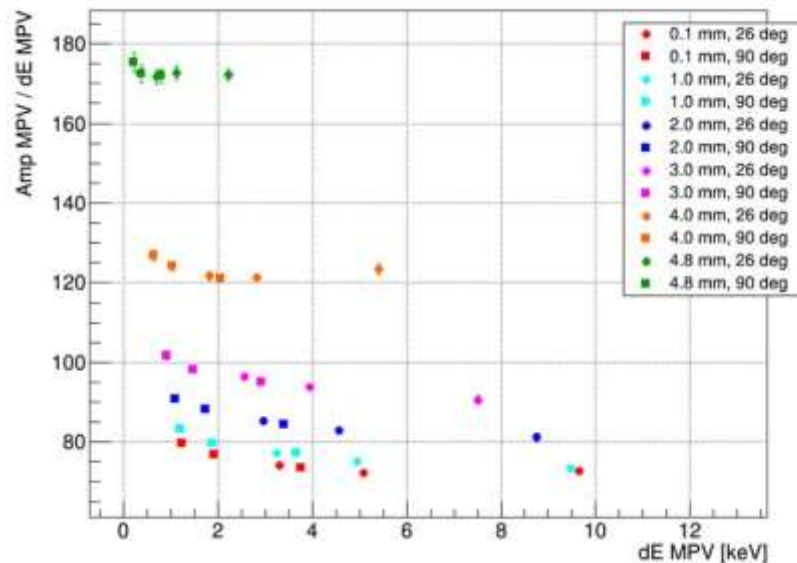
Применение в SPDroot. Peaking time 25 ns



Amp MPV / dE MPV vs dE MPV

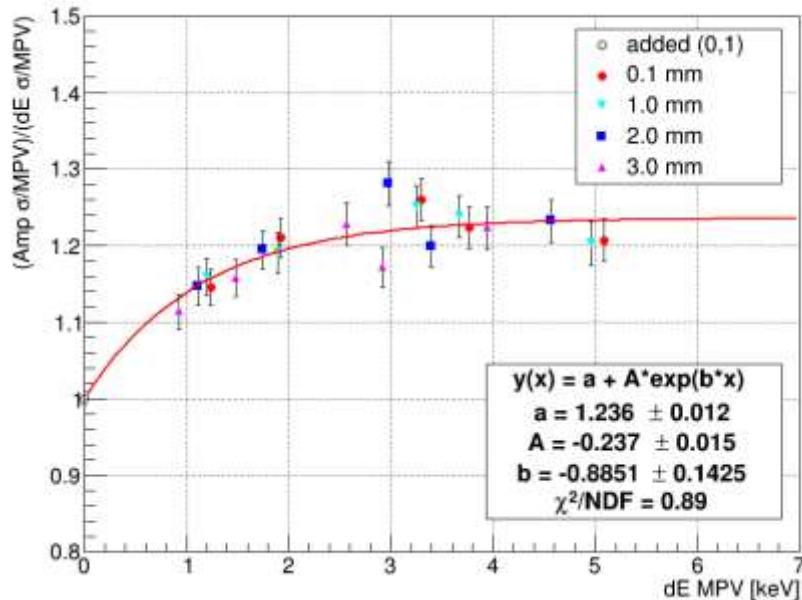


Amp MPV / dE MPV

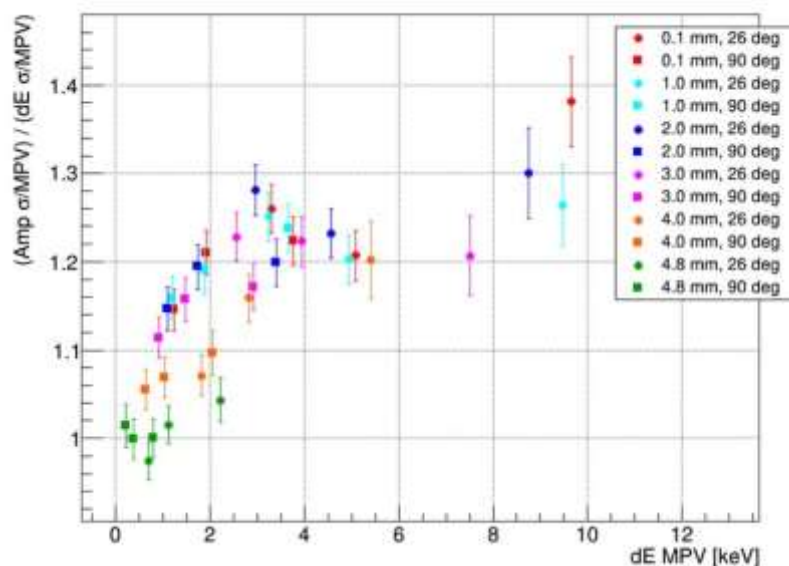


1. Отношение амплитуды сигнала к ионизационным потерям как функция ионизационных потерь для трех типов частиц с разными углами для 0.1мм
2. Каоны для различных расстояний и углов.

Коэффициент перехода из Eloss в амплитуду нелинейный. Не зависит от типа частицы и угла. Зависит от расстояния.



(Amp σ/MPV) / (dE σ/MPV)



С ростом dE увеличивается размытие сигнала. Размытие на 25%. Несущественно зависит от расстояния, типа частицы и угла.

Итоги:

- 1. Выполнено моделирование отклика STRAW-трубок.**
- 2. Получены количественные данные о зависимостях амплитуды, зарядового разрешения и вероятности насыщения предусилителя от dE , R и $peaking\ time$.**
- 3. Предоставлена основа для построения параметризованной модели отклика трубки. Эта модель, после внедрения в SPDrOOT, позволит корректно моделировать PID в STRAW трекаре при реальных параметрах считывающей электроники.**

Более детальную параметризацию и моделирование в SPDrOOT можно найти в презентации А. Нартова и А. Гуровой на XI коллаборационном совещании эксперимента SPD
<https://indico.jinr.ru/event/5928/contributions/34993/>

Параметризация в SPDroot

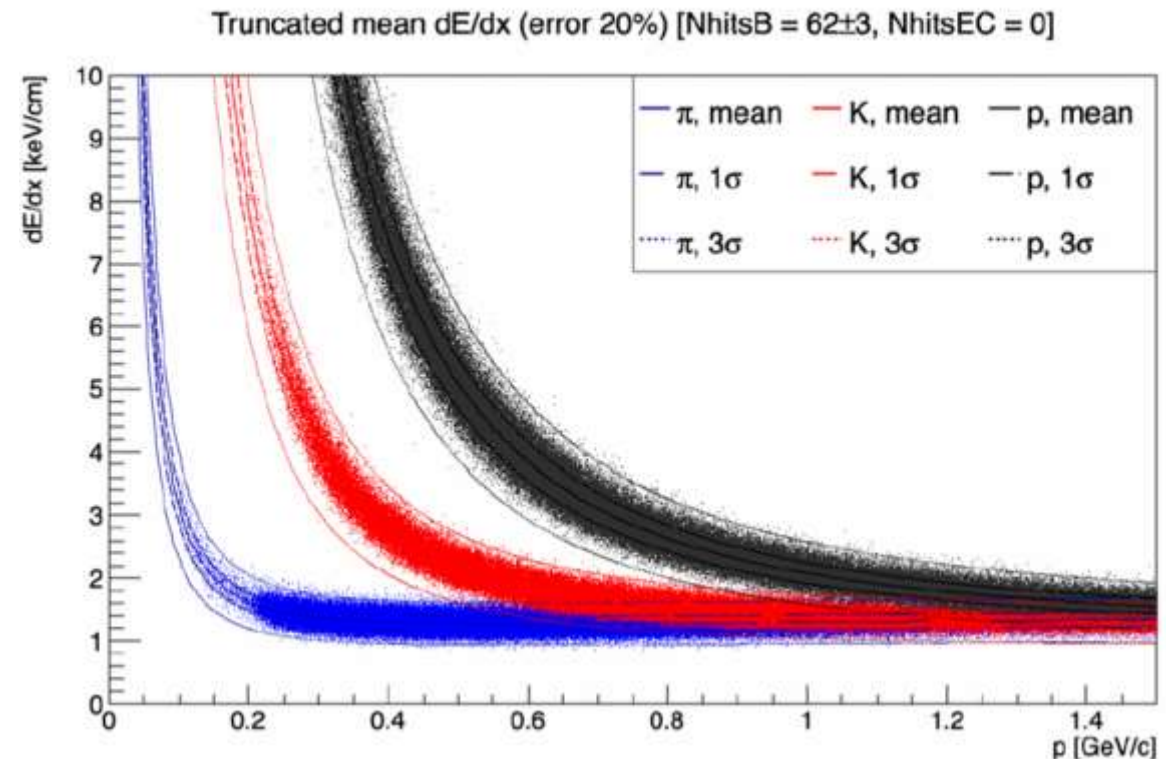
SPDroot - программа для моделирования физических процессов эксперимента SPD. Результатами моделирования являются базовые характеристики взаимодействия частиц с элементами детектора (напр. ионизационные потери частицы при прохождении одной STRAW трубки)

Почему возникла необходимость новой параметризации:

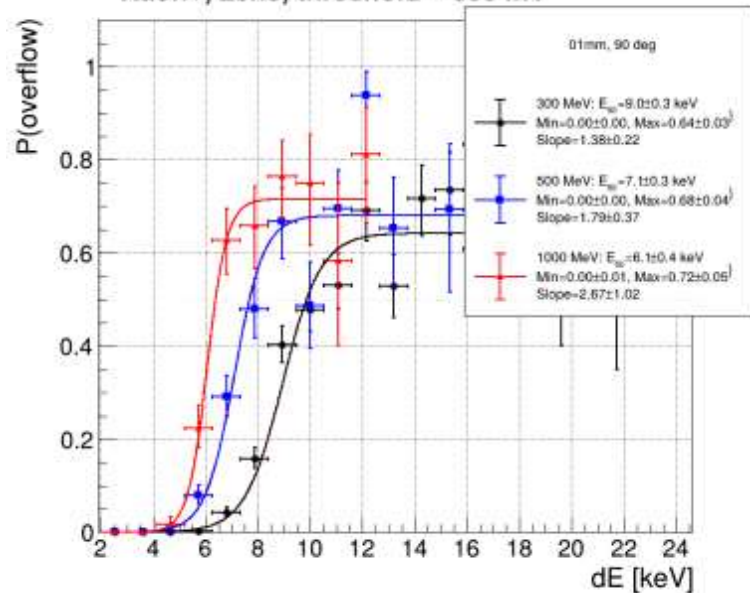
Подход по умолчанию в SPDroot:

Потери энергии e_{loss} преобразовывались в отклик $Resp$ простым размытием по Гауссу с шириной 20%. Отклик — в ГэВ.

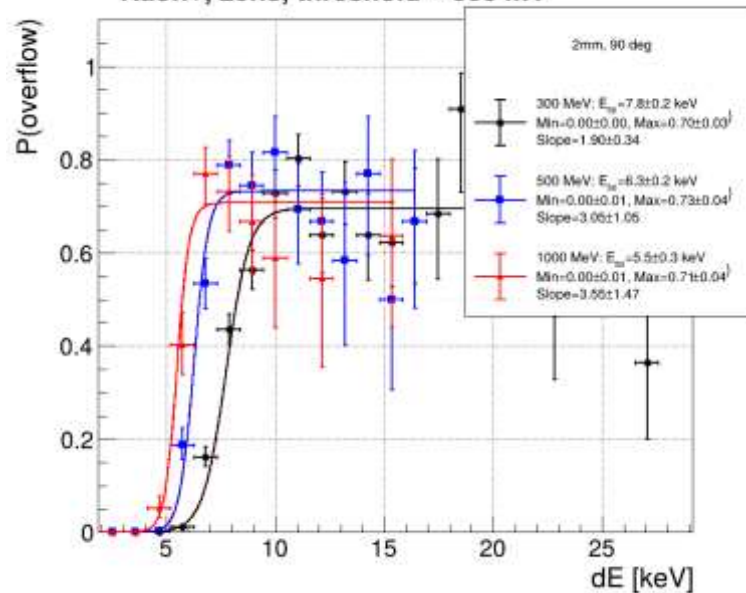
Этот подход использовался в TDR (Technical Design Report) для оценки PID с dE/dx при 35% усечённом среднем. **Но он не учитывает изменение формы сигнала и вероятность насыщения предусилителя при использовании реальной считывающей электроники.**



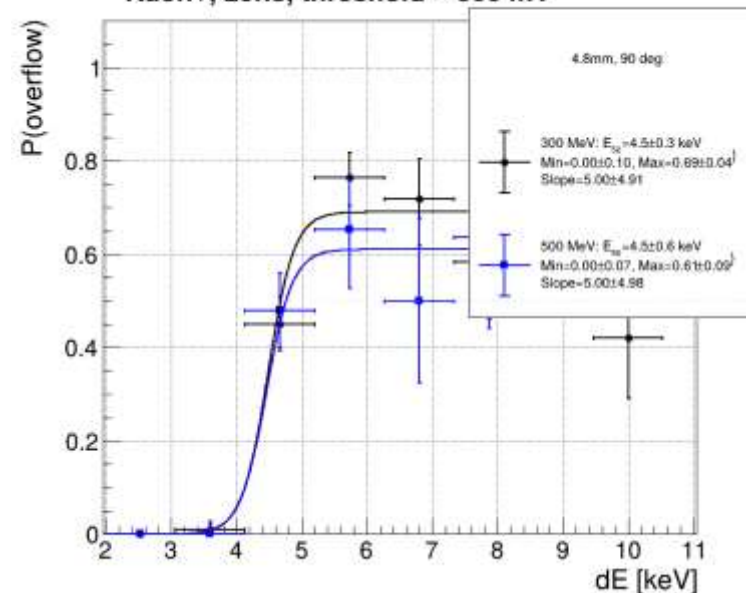
Kaon+, 25ns, threshold = 800 mV



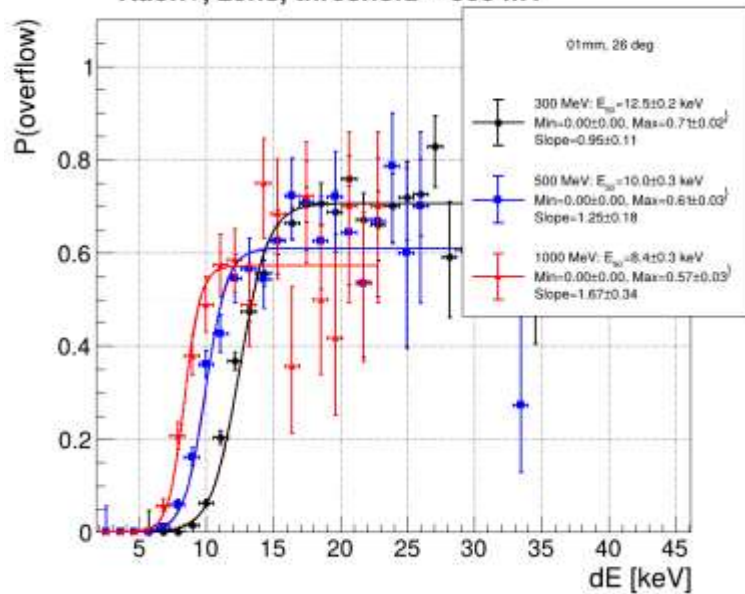
Kaon+, 25ns, threshold = 800 mV



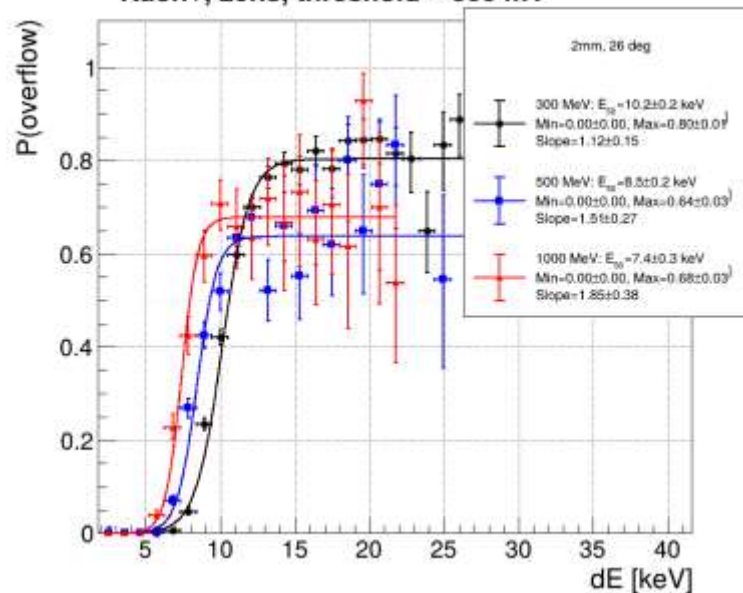
Kaon+, 25ns, threshold = 800 mV



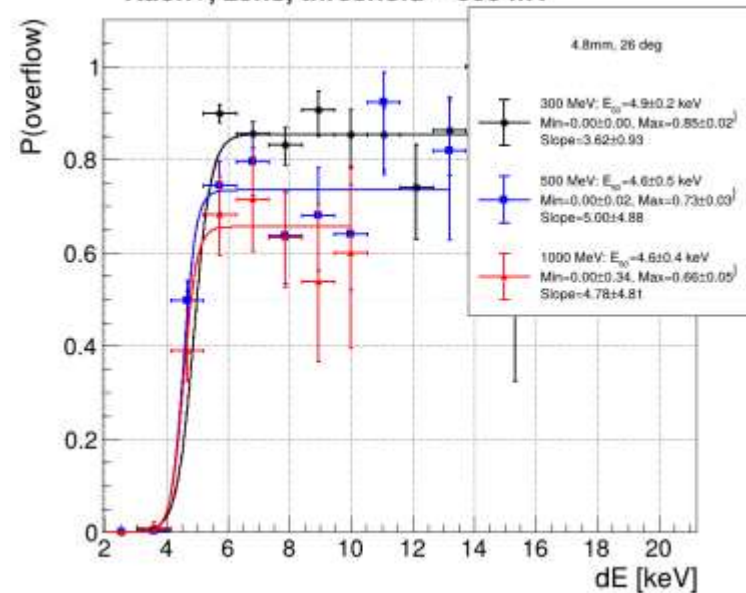
Kaon+, 25ns, threshold = 800 mV



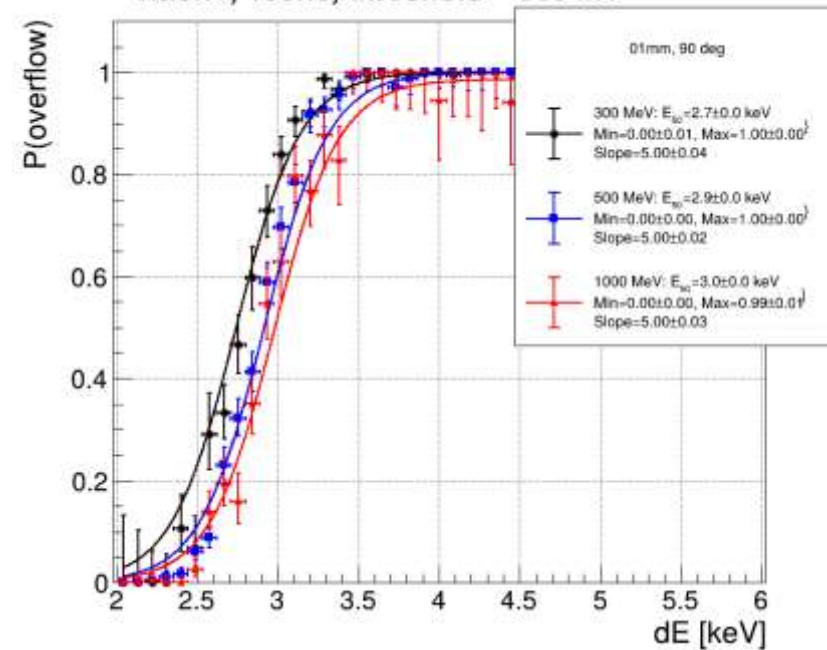
Kaon+, 25ns, threshold = 800 mV



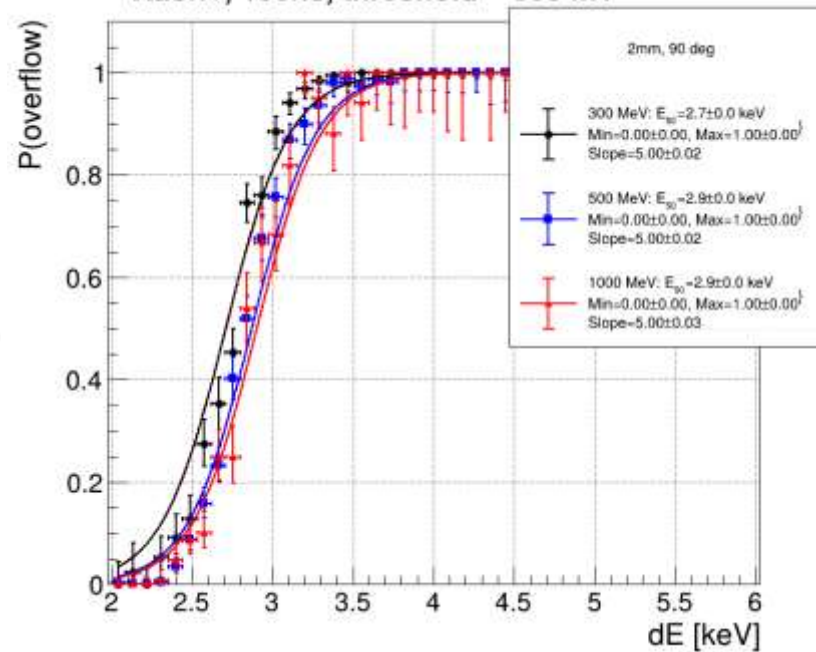
Kaon+, 25ns, threshold = 800 mV



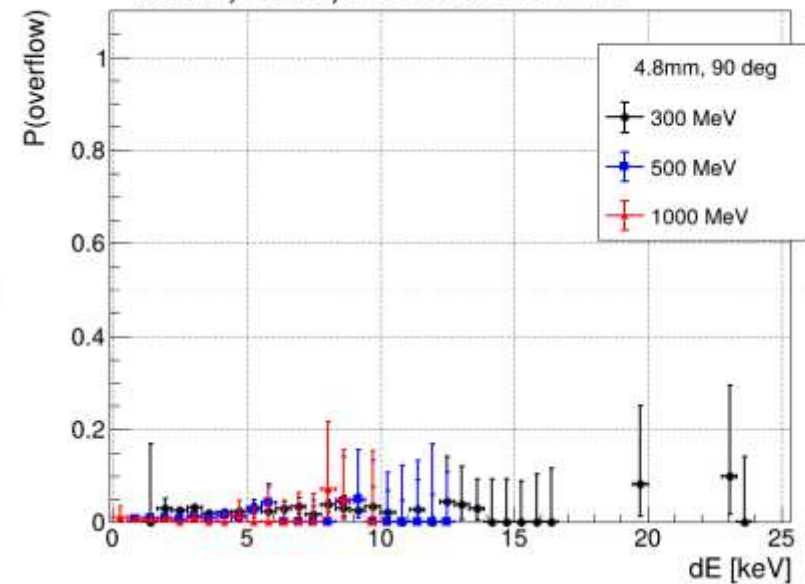
Kaon+, 150ns, threshold = 800 mV



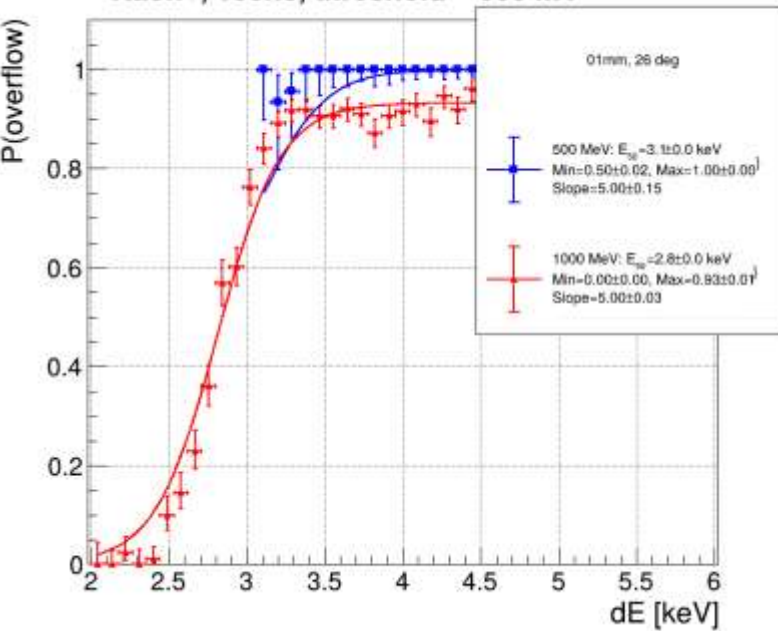
Kaon+, 150ns, threshold = 800 mV



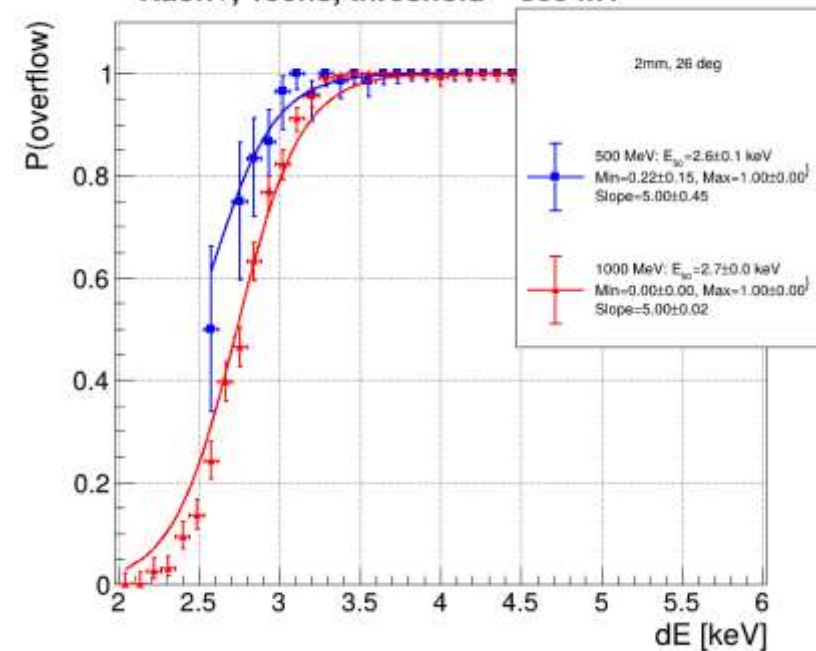
Kaon+, 150ns, threshold = 800 mV



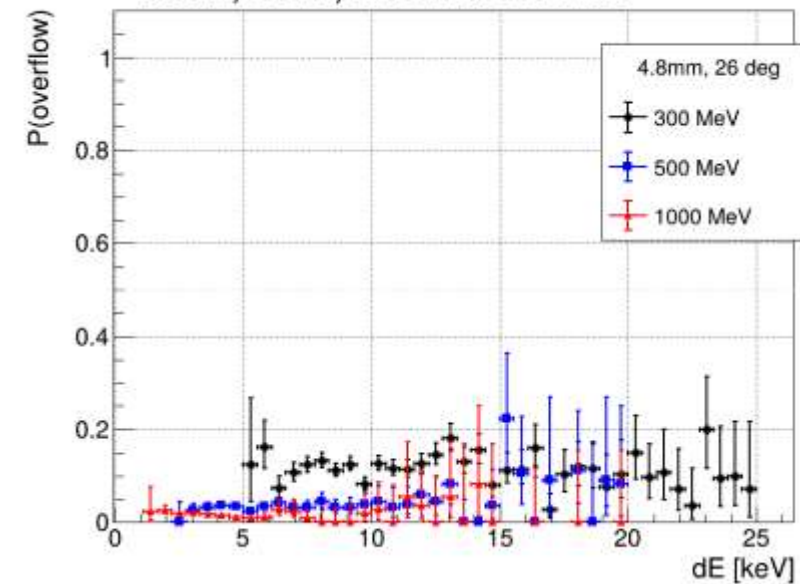
Kaon+, 150ns, threshold = 800 mV



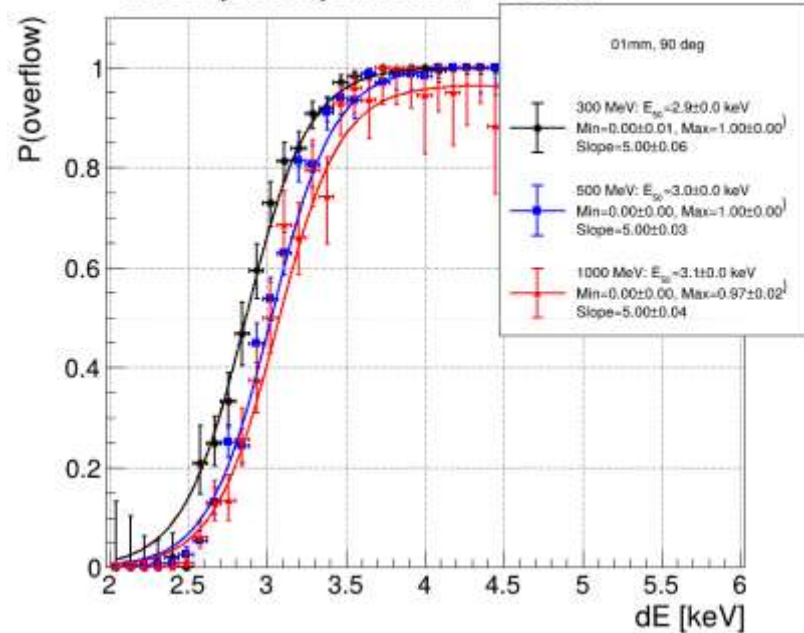
Kaon+, 150ns, threshold = 800 mV



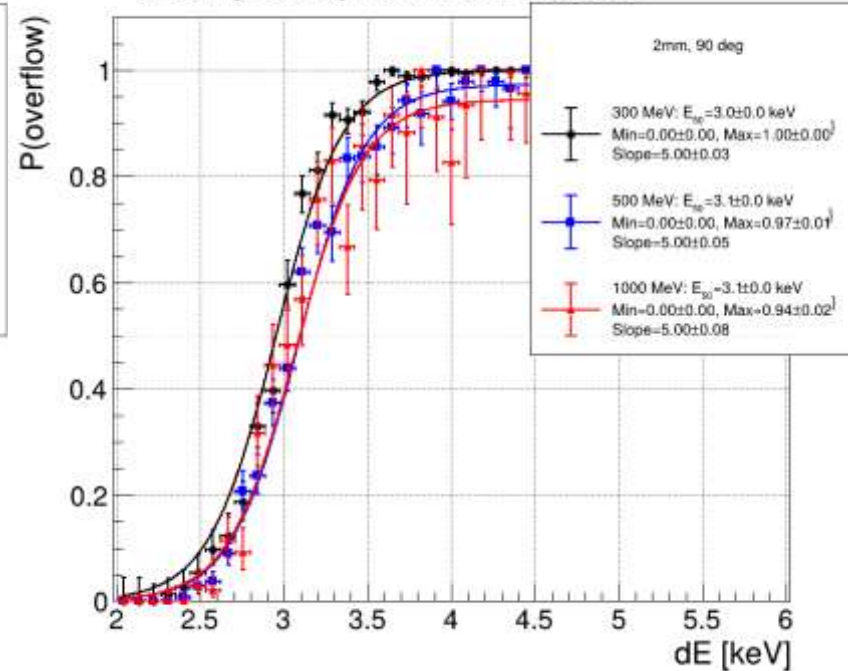
Kaon+, 150ns, threshold = 800 mV



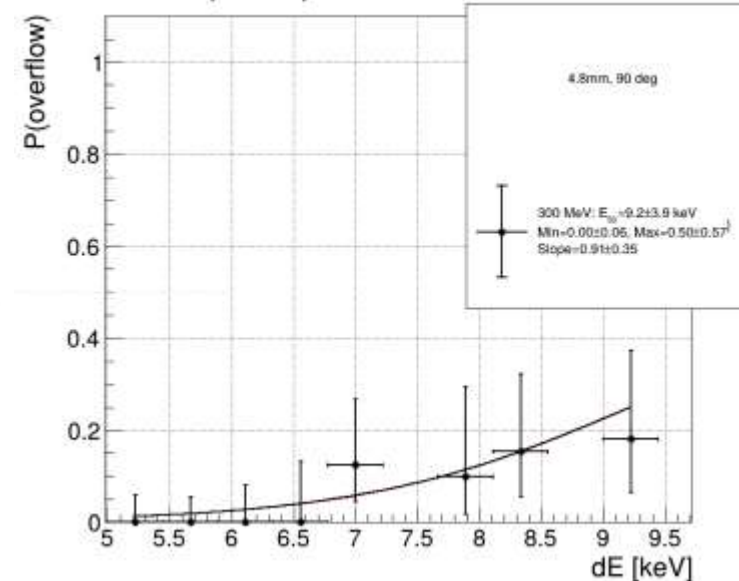
Kaon+, 200ns, threshold = 800 mV



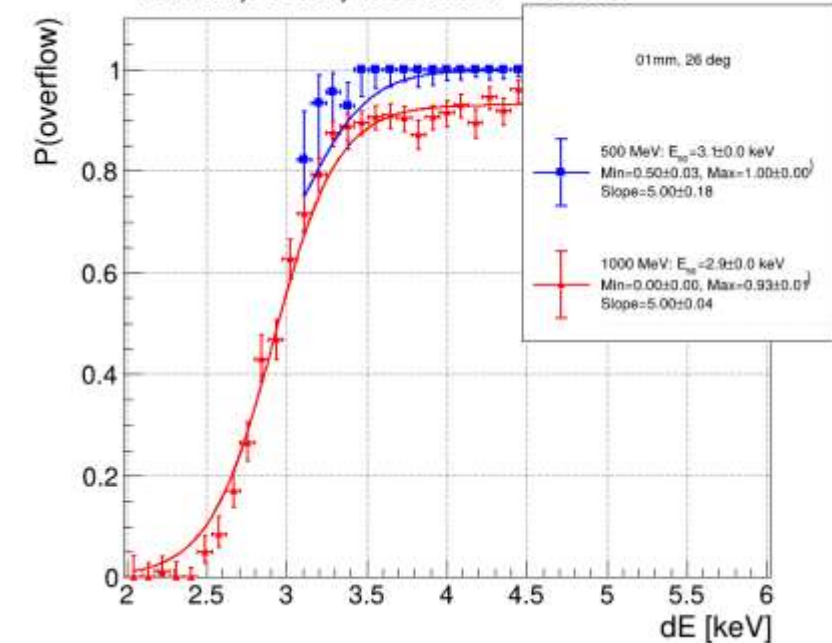
Kaon+, 200ns, threshold = 800 mV



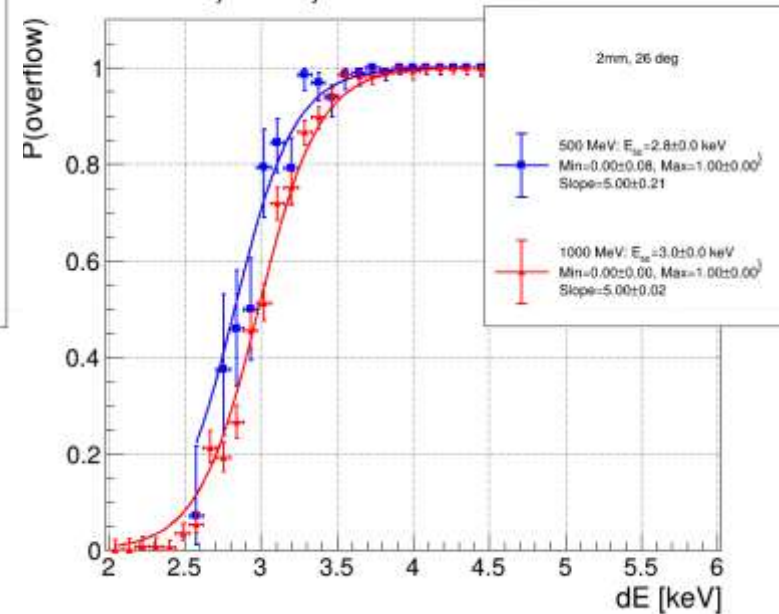
Kaon+, 200ns, threshold = 800 mV



Kaon+, 200ns, threshold = 800 mV



Kaon+, 200ns, threshold = 800 mV



Kaon+, 200ns, threshold = 800 mV

