



Алгоритмы и программное обеспечение для
реконструкции траекторий заряженных частиц в
детекторных системах перед анализирующим магнитом
и
идентификация ионов в эксперименте SRC на BM@N

Ленивенко Василиса Викторовна
ЛФВЭ



Научные руководители:
к.ф.-м.н. Пальчик Владимир Владимирович
к.ф.-м.н. Пацюк Мария Александровна

31 января 2024 год

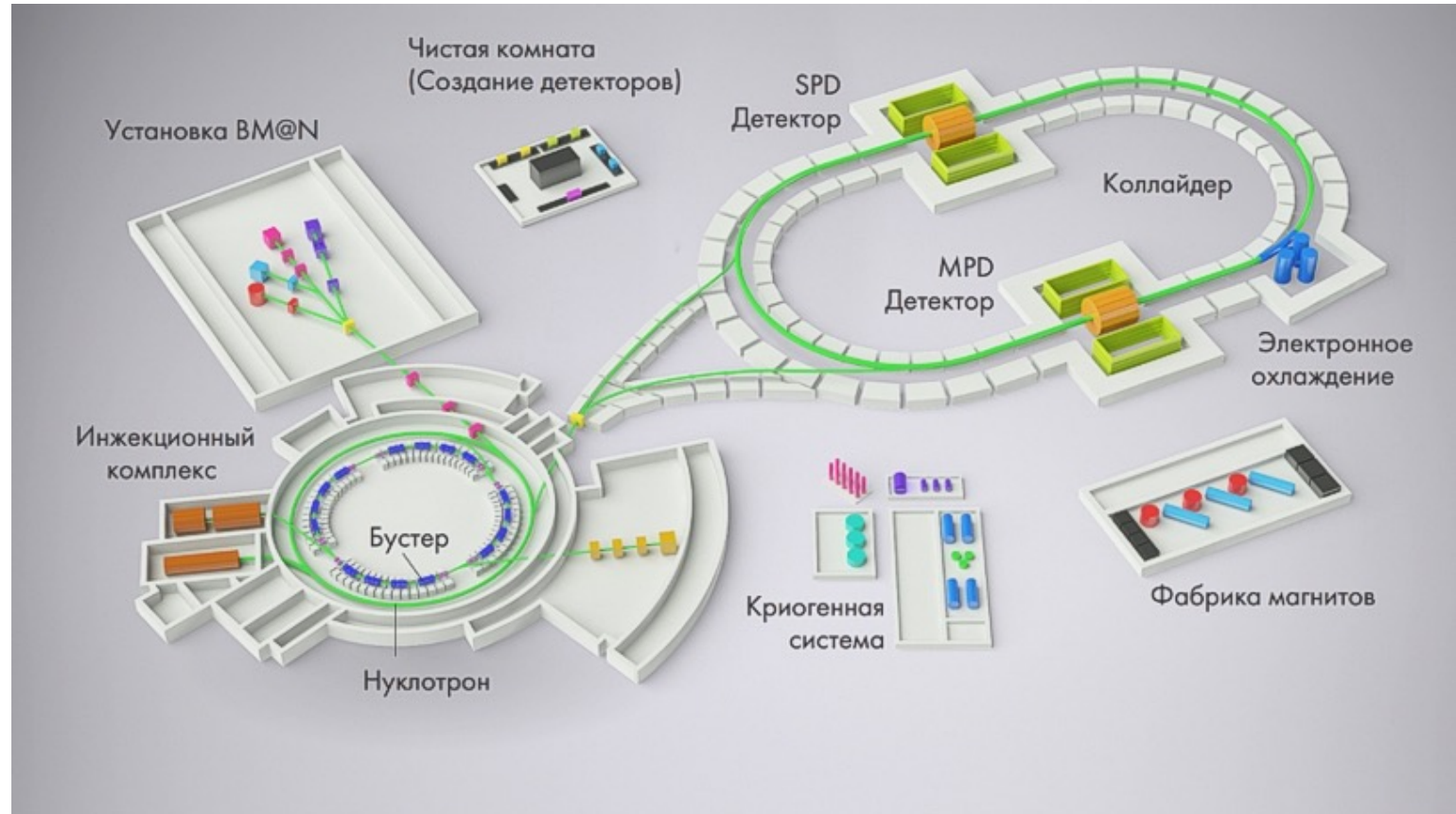
Актуальность исследования



NICA – новый ускорительный комплекс уровня мегасайенс

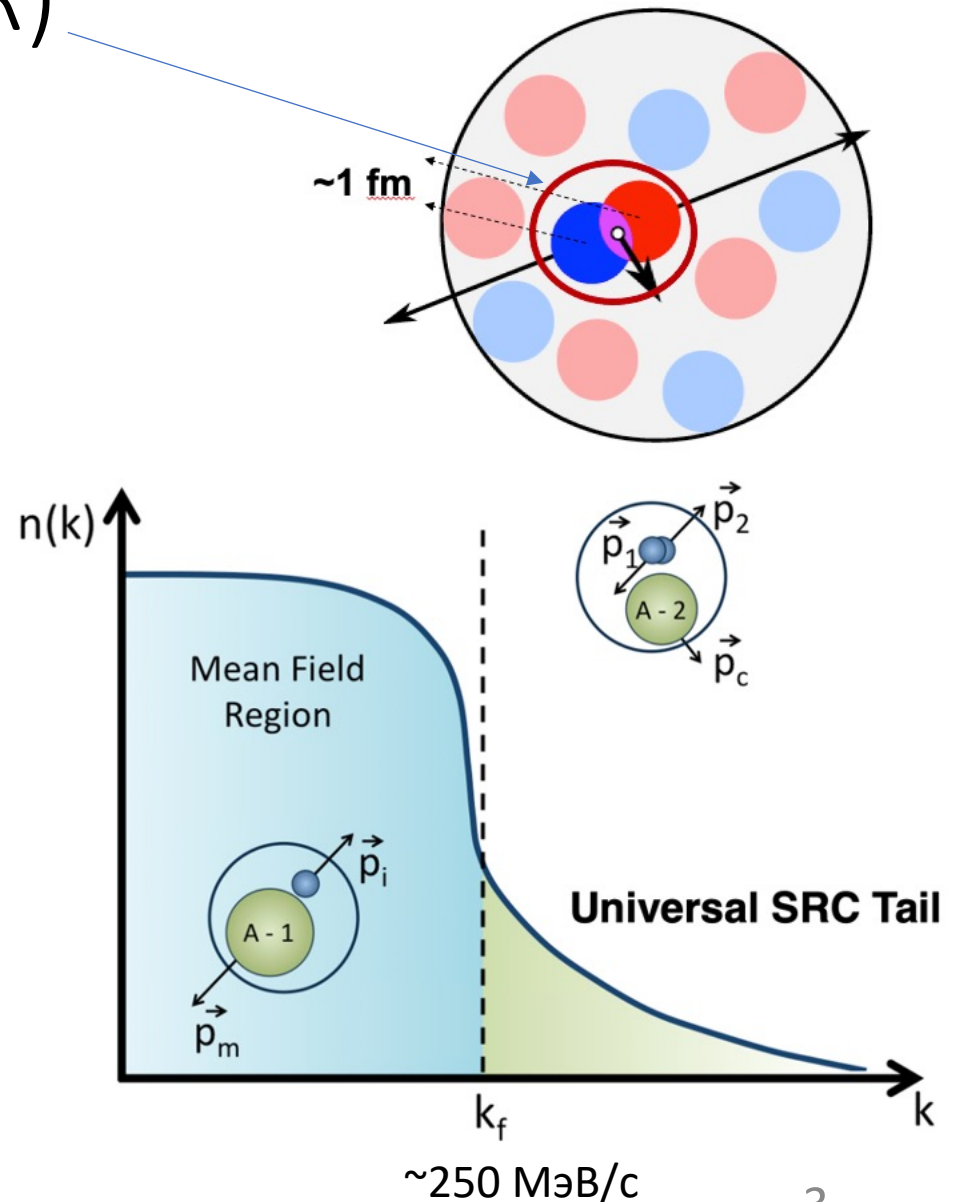
BM@N (Baryonic Matter at Nuclotron) – первый действующий эксперимент комплекса NICA.

SRC (Short Range Correlations) – эксперимент на установке BM@N для исследования свойств короткодействующих двухнуклонных корреляций (КДК) в ядре с импульсом $4 \text{ GeV}/c/n$



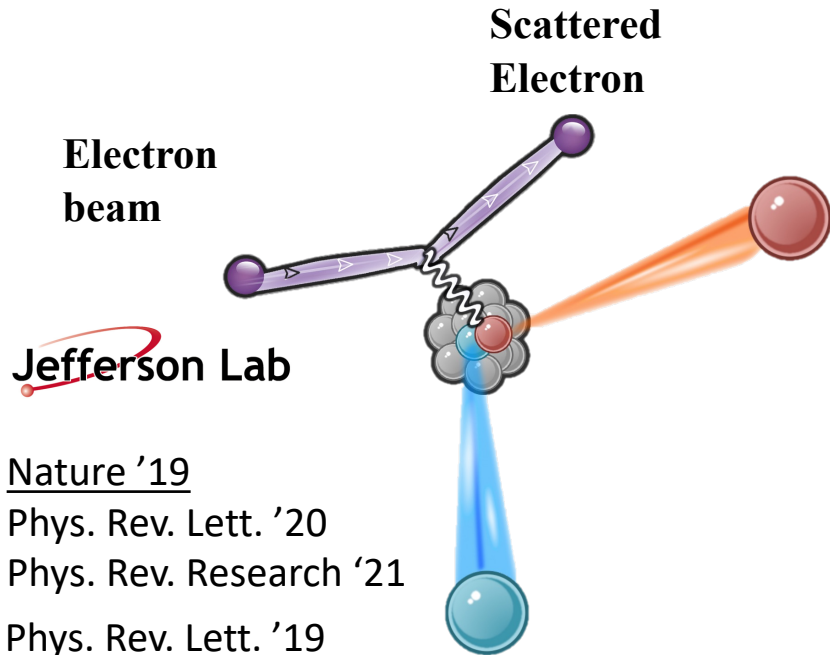
Модель короткодействующих двухнуклонных корреляций (КДК)

- Нуклоны в КДК имеют большой абсолютный импульс и малый импульс центра масс пары относительно импульса Ферми
- Почти все высокоимпульсные нуклоны в ядре относятся к КДК
- Большинство КДК протон-нейтронные
- КДК важны, например, для понимания плотной барионной материи и нейтронных звезд



SRC на BM@N - первое исследование КДК в обратной кинематике

Usual experiments



Nature '19
 Phys. Rev. Lett. '20
 Phys. Rev. Research '21
 Phys. Rev. Lett. '19
 Phys. Lett. B '19
 Nature Phys. '21a

Nature '20
 Phys. Rev. Lett. '20
 Phys. Lett. B '20
 Phys. Lett. B '21

Nature '18
 Phys. Rev. Lett. '18
 Phys. Lett. B '18a
 Phys. Lett. B '18b

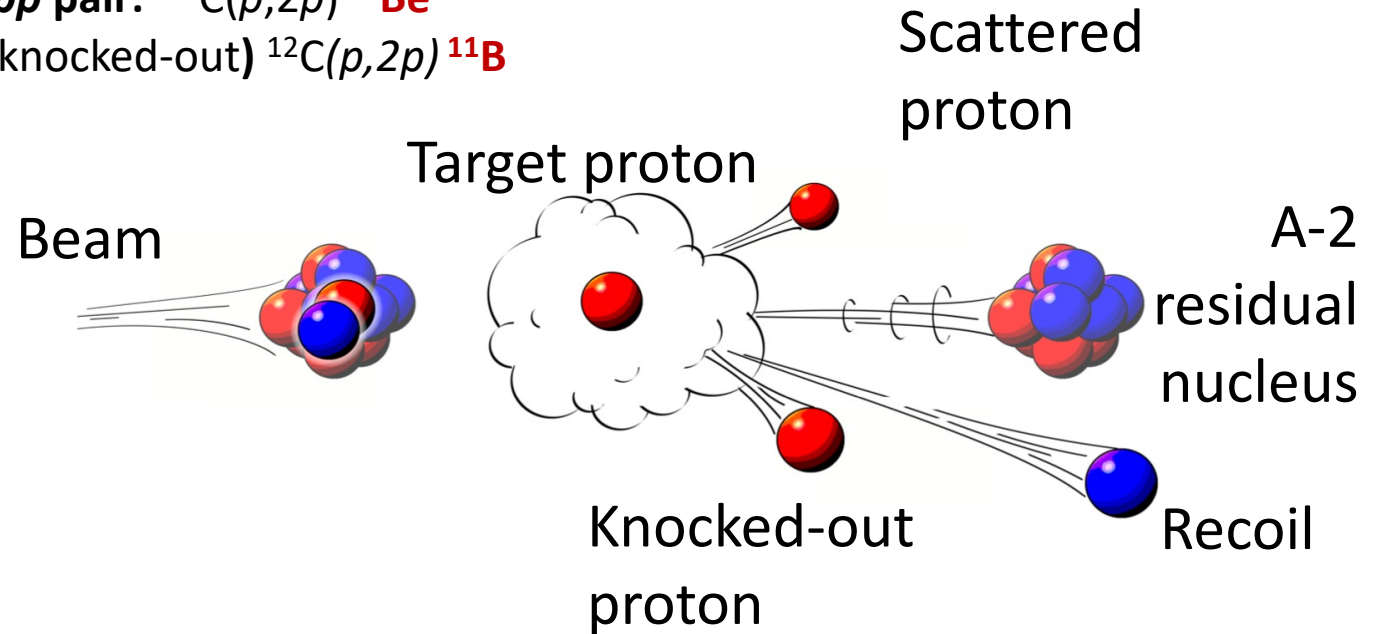
2022:
 Phys. Rev. C 105, 034001 (2022)

2023:
 Phys. Rev. C 107, L061301 (2023)
 Nucl. Instrum. Meth. A 1052,
 168238 (2023)

SRC на BM@N (2018г)

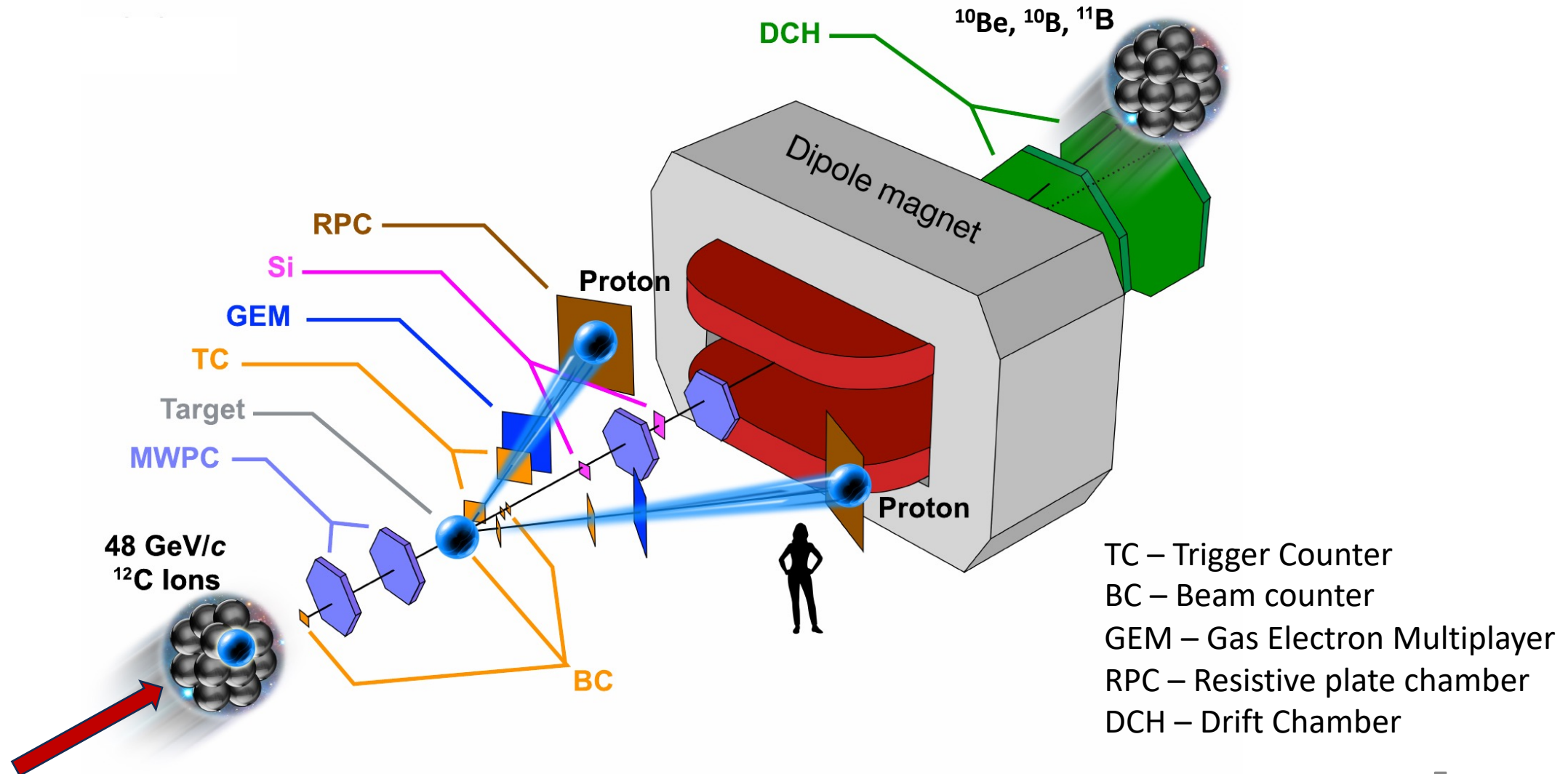


np pair: $^{12}\text{C}(p,2p)^{10}\text{B}$
pp pair: $^{12}\text{C}(p,2p)^{10}\text{Be}$
 A-1(knocked-out) $^{12}\text{C}(p,2p)^{11}\text{B}$



M. Patsyuk, J. Kahlbow, G. Laskaris, M. Duer, **V. Lenivenko**, et al., *Unperturbed inverse kinematics nucleon knockout measurements with a carbon beam*, **Nature Physics**, 17, 693 (2021)

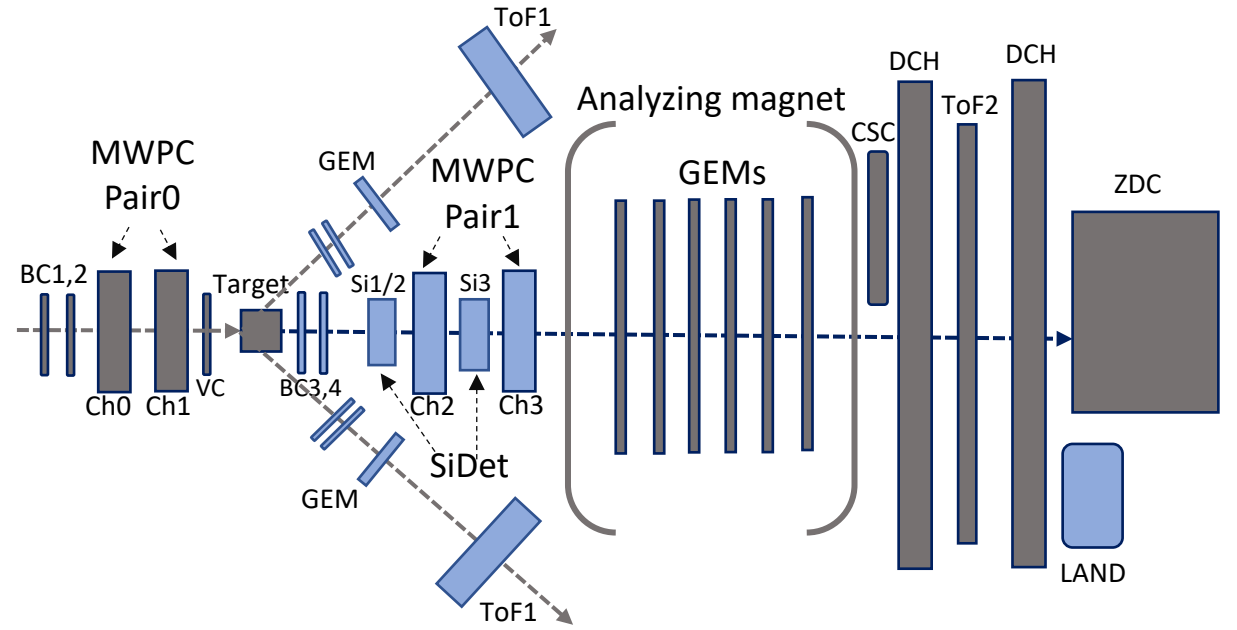
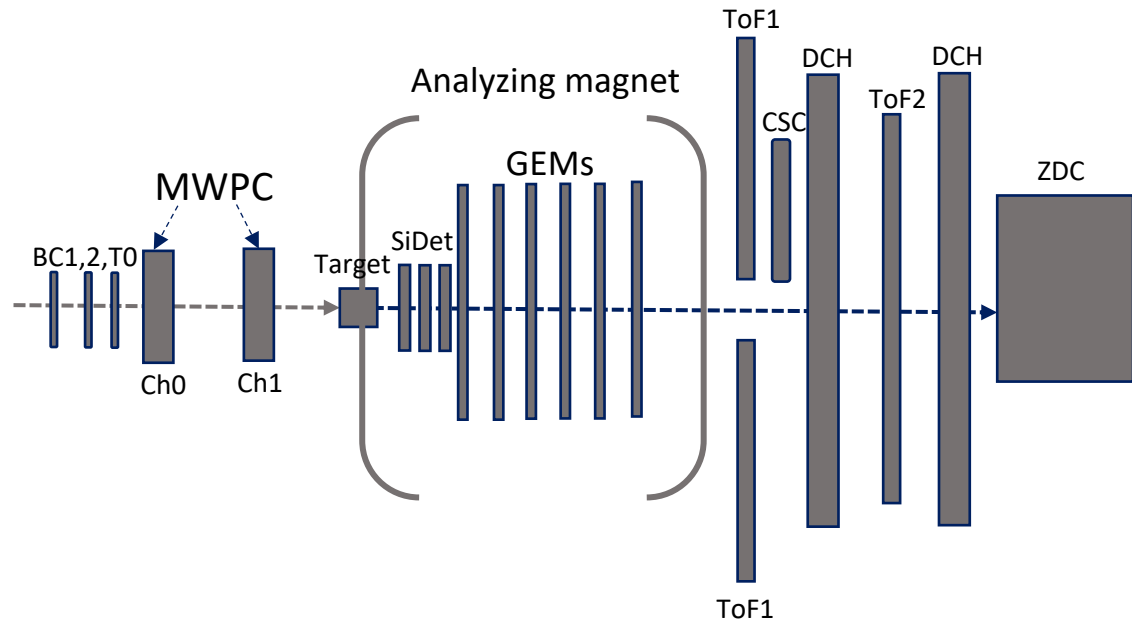
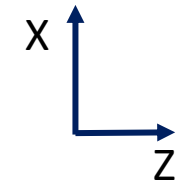
Экспериментальная установка SRC на BM@N



Конфигурация детекторов в 2018г

BM@N

SRC на BM@N

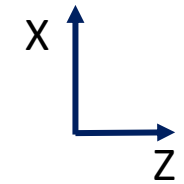


ToF - time-of-flight detector
LAND - Large-Area Neutron Detector
ZDC – Zero Degrees Calorimeter
CSC – Cathode Strip Chamber

Конфигурация детекторов в 2018г

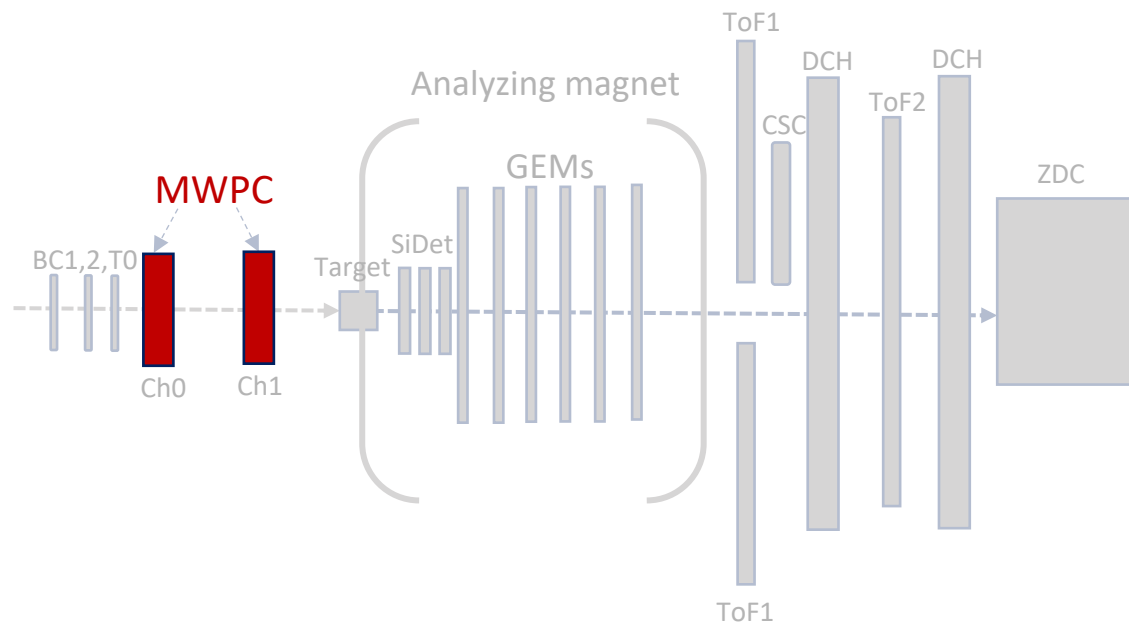
BM@N

SRC на BM@N



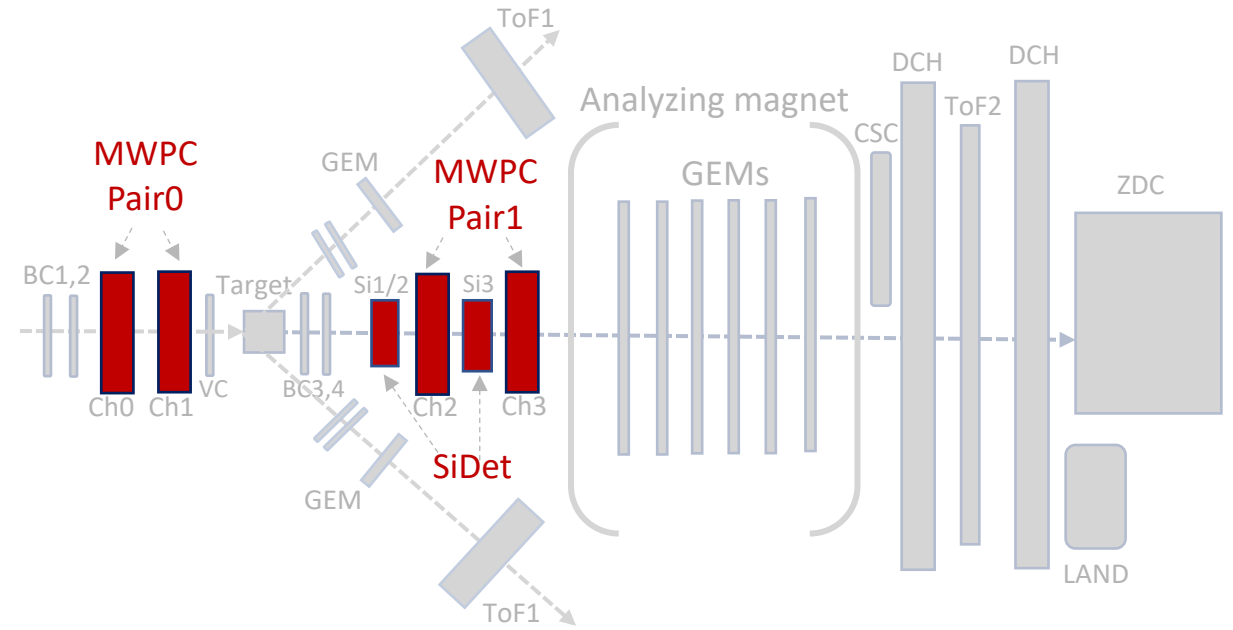
Пропорциональные камеры:

- Две MWPC (Ch0 и Ch1) до мишени



Пропорциональные камеры и кремниевые детекторы:

- Четыре MWPC:
(Ch0 и Ch1) до мишени - Pair0
(Ch2 и Ch3) после мишени - Pair1
- Три SiDet



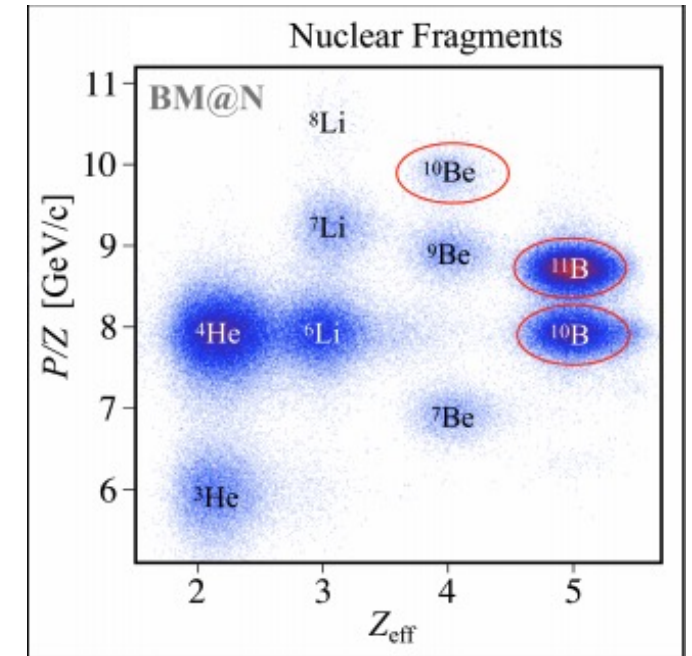
Актуальность исследования

В физическом анализе экспериментальных данных ключевую роль играет реконструкция треков заряженных частиц.

В основе реконструкции треков лежат данные, полученные с помощью системы многопроводных пропорциональных камер (**MWPC** – MultiWire Proportional Chambers) и системы новых кремниевых детекторов (**SiDet** - Silicon Detectors), располагающихся до магнита.

Для получения результатов требовалось:

- разработать алгоритмы и реализовать комплексы программ, включающие в себя восстановление траекторий заряженных частиц, начиная от формирования хитов и до полной реконструкции треков частиц в этих детекторах.
- идентифицировать ионы конечного состояния



Идентификация ионов конечного состояния
 $^{12}\text{C}(p,2p)^{11}\text{B}$, $^{12}\text{C}(p,2p)^{10}\text{Be}$, $^{12}\text{C}(p,2p)^{10}\text{B}$
на реальных данных

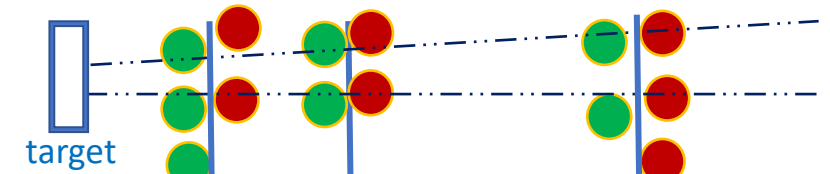
Основные цели и задачи

Цель работы: реконструировать траектории заряженных частиц в системе камер MWPC и детекторов SiDet и провести идентификацию ионов конечного состояния.

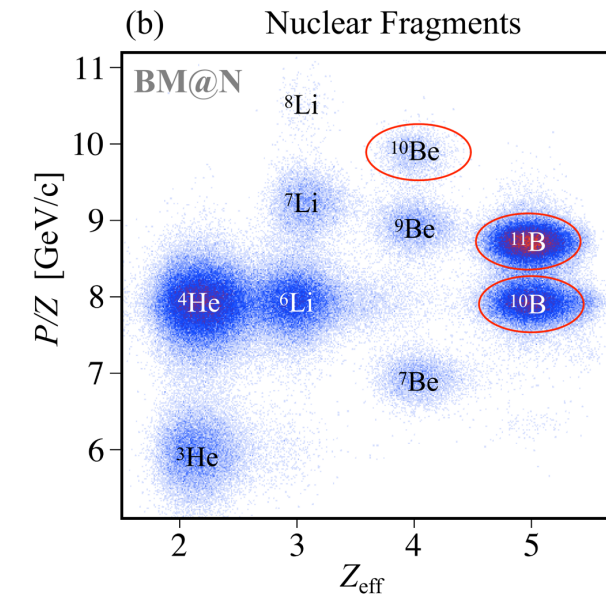
Для достижения поставленной цели были решены следующие **основные задачи:**

- **разработка алгоритмов** реконструкции траекторий заряженных частиц для системы камер **MWPC** и детекторов **SiDet** в условиях неоптимальной рабочей точки и больших фоновых загрузок в этих детекторах;
- **разработка алгоритма для объединения** траекторий заряженных частиц, реконструированных в камерах MWPC и детекторах SiDet;
- обеспечение возможности работы с **данными моделирования**. **Тестирование** алгоритмов реконструкции треков в системах камер MWPC и детекторов SiDet на экспериментальных и моделированных данных;
- **расширение** программного комплекса(ПО) VmnRoot **классами** восстановления траекторий заряженных частиц в камерах MWPC и детекторах SiDet для работы с экспериментальными и моделированными данными эксперимента BM@N в двух конфигурациях с целью получения физических результатов;
- **идентификация** и оценка выхода ядер B^{10}, B^{11}, Be^{10} с помощью уточненного импульсного разрешения пучка углерода полученного методом MDF (Multi-dimensional Fit).

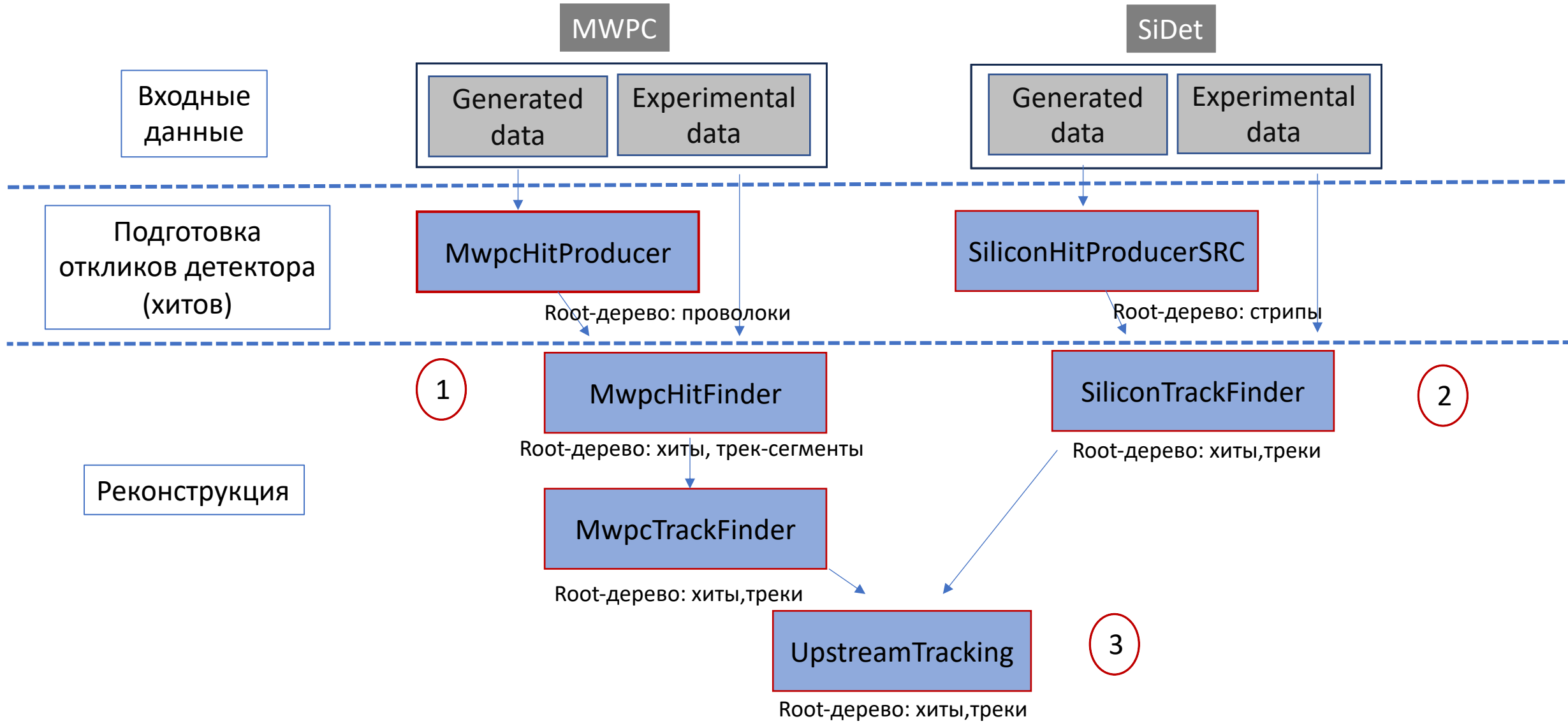
- Восстановление траекторий заряженных частиц



- Идентификация ионов



Этапы реконструкции треков в SiDet и MWPC и соответствующие им классы, входящие в BmnRoot



1 Алгоритм реконструкции треков по сигналам в MWPC

- Каждая камера имеет 6 плоскостей:
две X, две U и две V, с углами $0^\circ, \pm 60^\circ$.
- Шаг между проволоками $dw = 2.5 \text{ мм}$
- Координатное разрешение $\sigma_i = \frac{dw}{\sqrt{12}} = 0.72 \text{ мм}$
- Координаты связаны соотношением:

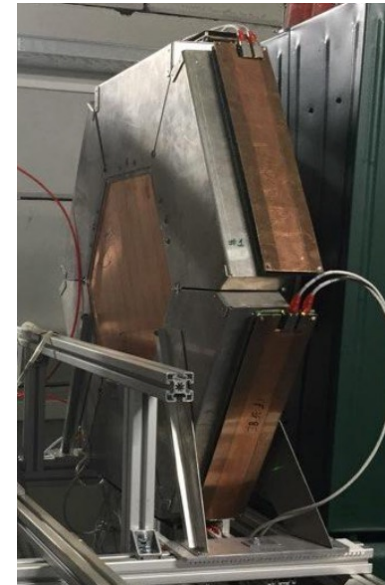
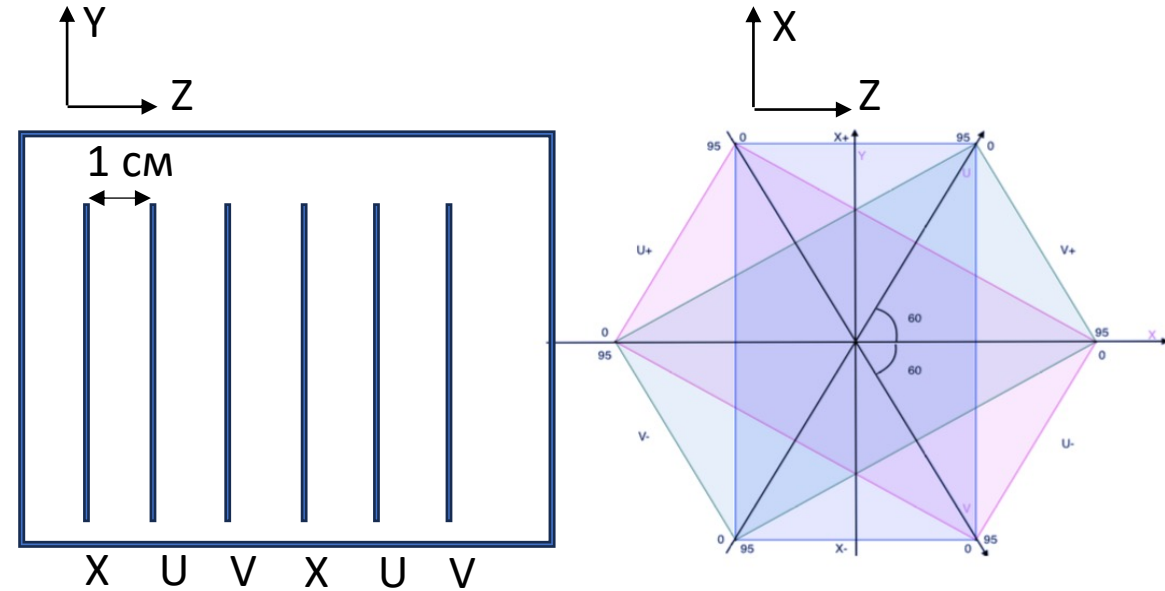
$$y = (U+V)/\sqrt{3}, U = \frac{(x+y)\sqrt{3}}{2}, V = \frac{(x-y)\sqrt{3}}{2},$$

$$V + U - X = 0$$

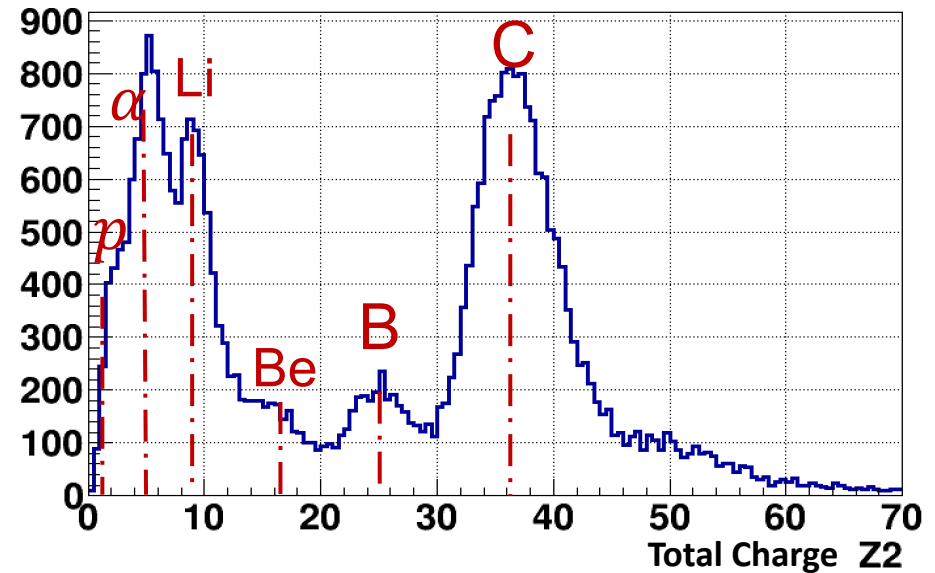
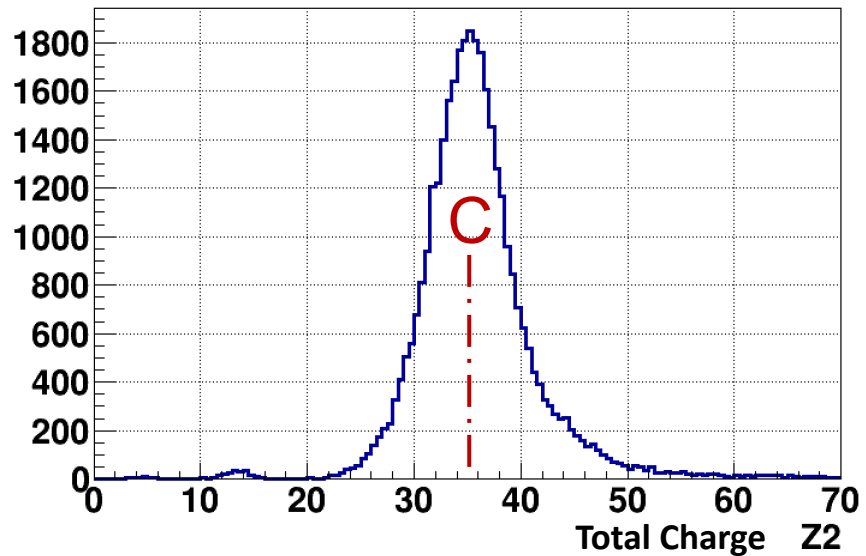
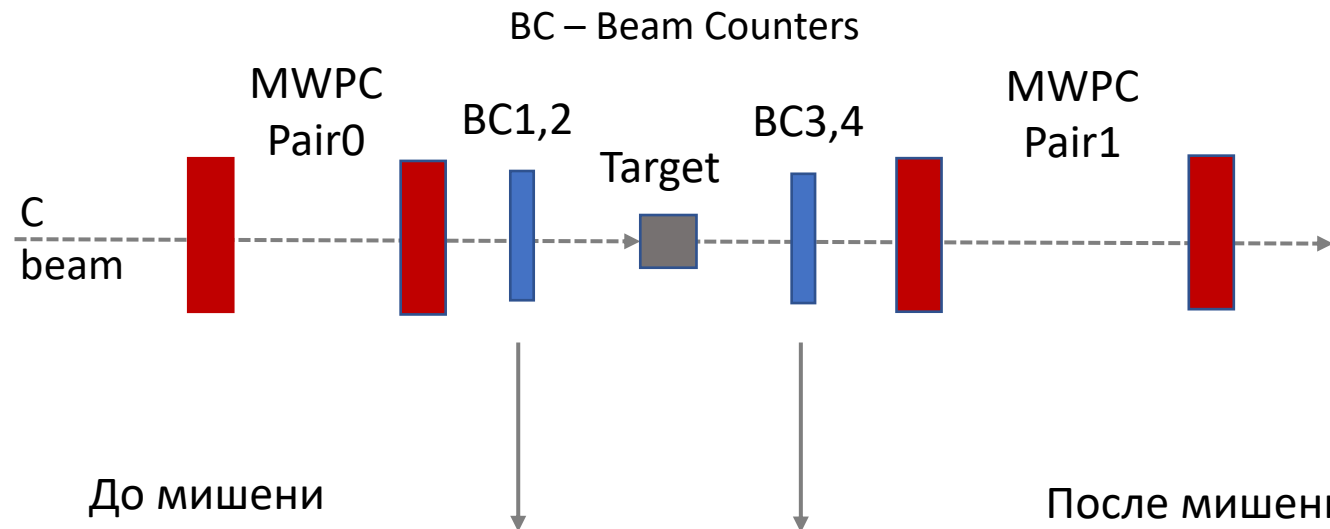
- Между камерами в паре $\sim 1\text{м}$

Проблема: большое количество сработавших проволок (шумов),
кроме проволок сработавших от реальных частиц

➤ Разработан разный способ поиска хитов до и после мишени
по времени прихода сигнала на проволоки

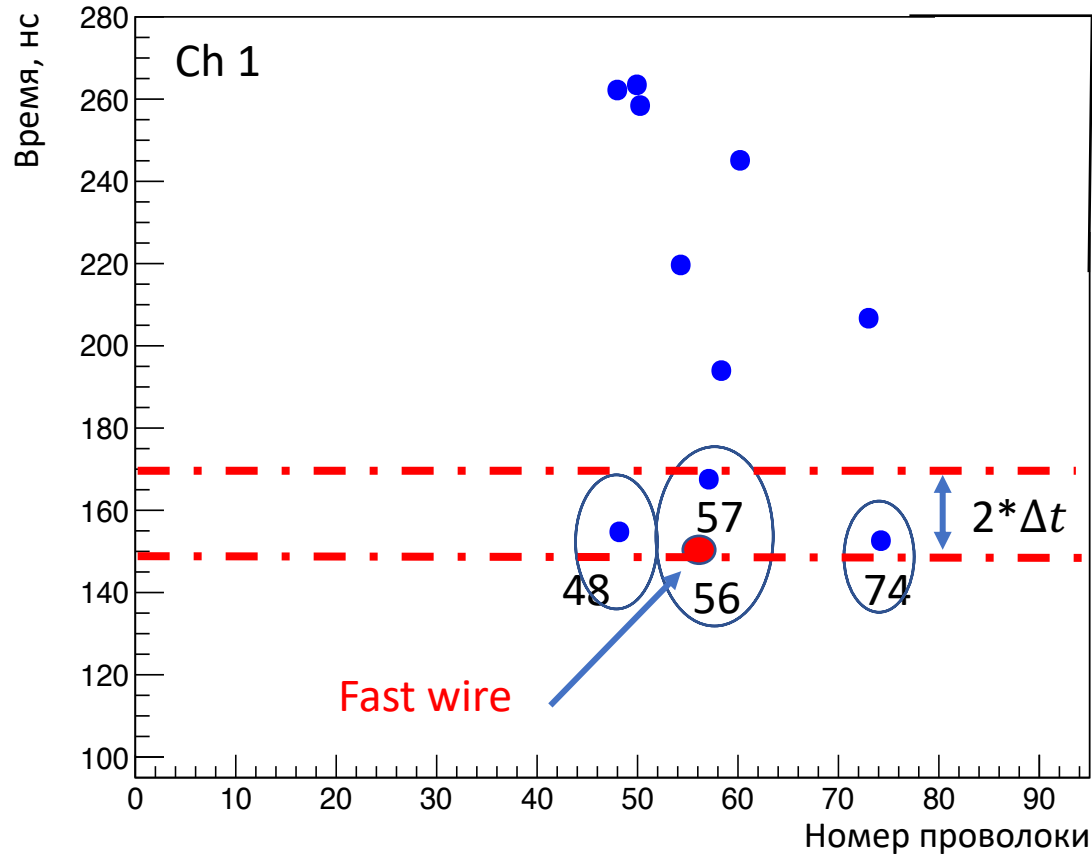


Разное количество частиц до и после мишени



Run 3338, H2 target

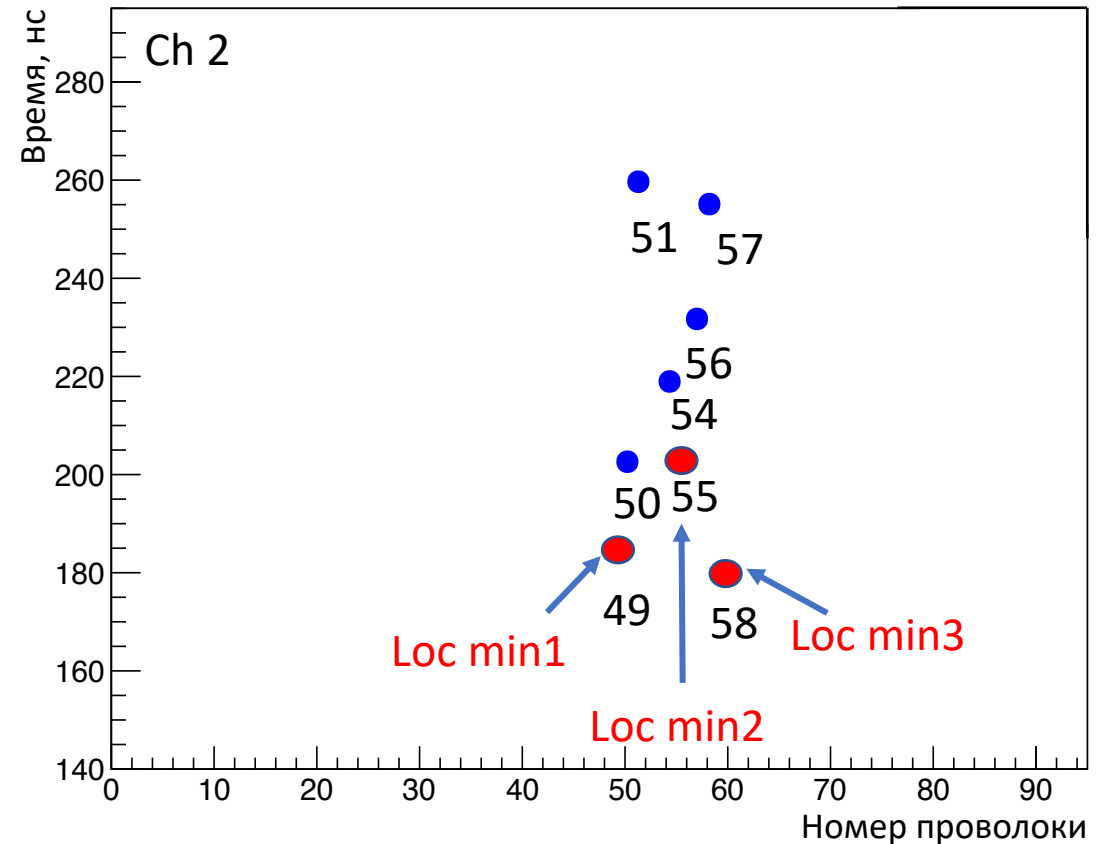
Улучшенный алгоритм поиска кластеров в MWPC



Камеры до мишени:

Цель: реконструкция одного трека (ион углерода)

1. Поиск сигнала с проволоки с самым наименьшим временем
2. Поиск проволок в диапазоне $2 * \Delta t$ (Δt = временной шаг = 8 нс)
3. Объединение соседних проволок в один кластер



Камеры после мишени

Цель: реконструкция нескольких треков

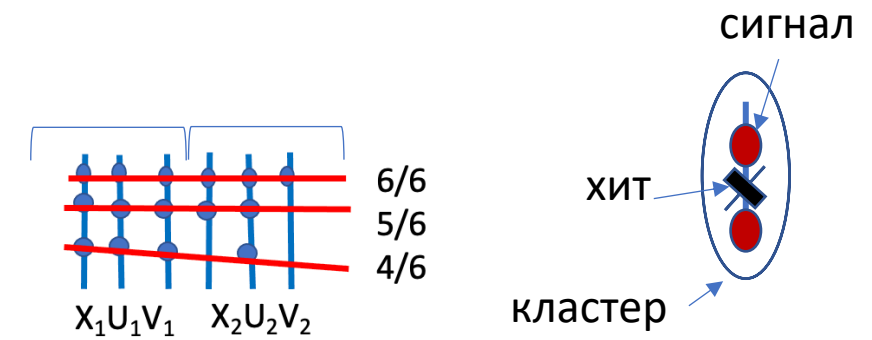
Координата кластера определяется временным локальным минимумом

1 Алгоритм реконструкции треков по сигналам в MWPC

1. Чтение сигналов с проволок и объединение сигналов в кластер.

Кластер – объединение рядом сработавших проволок.

Хит – координата кластера на плоскостях X, U, V.



2. Создание кандидатов в трек-сегменты (N = 6,5,4 хитов) min = 4.

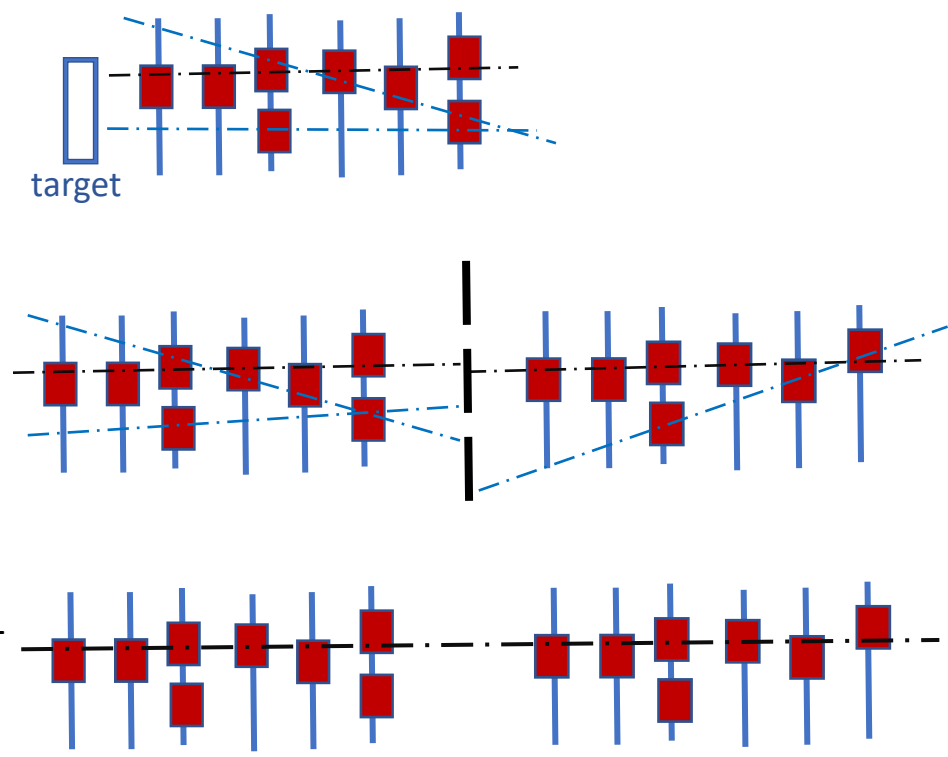
2.1 Набор в кандидаты используя уравнение: $|u_i + v_i - x_i| < 3 * dw$ разными комбинациями

2.2 Вычисление параметров сегментов с помощью МНК $\sum \frac{d_i^2}{\sigma_i^2} \rightarrow \min$

где d_i - разность между измеренной и аппроксимированной координатой в i-й плоскости

2.3 Выбор лучшего сегмента по χ^2 -критерию: $\frac{1}{N-4} \sum \frac{d_i^2}{\sigma_i^2}$; ($\frac{1}{N} \sum \frac{d_i^2}{\sigma_i^2}$ для N=4)

2.4 Критерий на геометрический размер мишени трека: трек экстраполирован в область мишени.

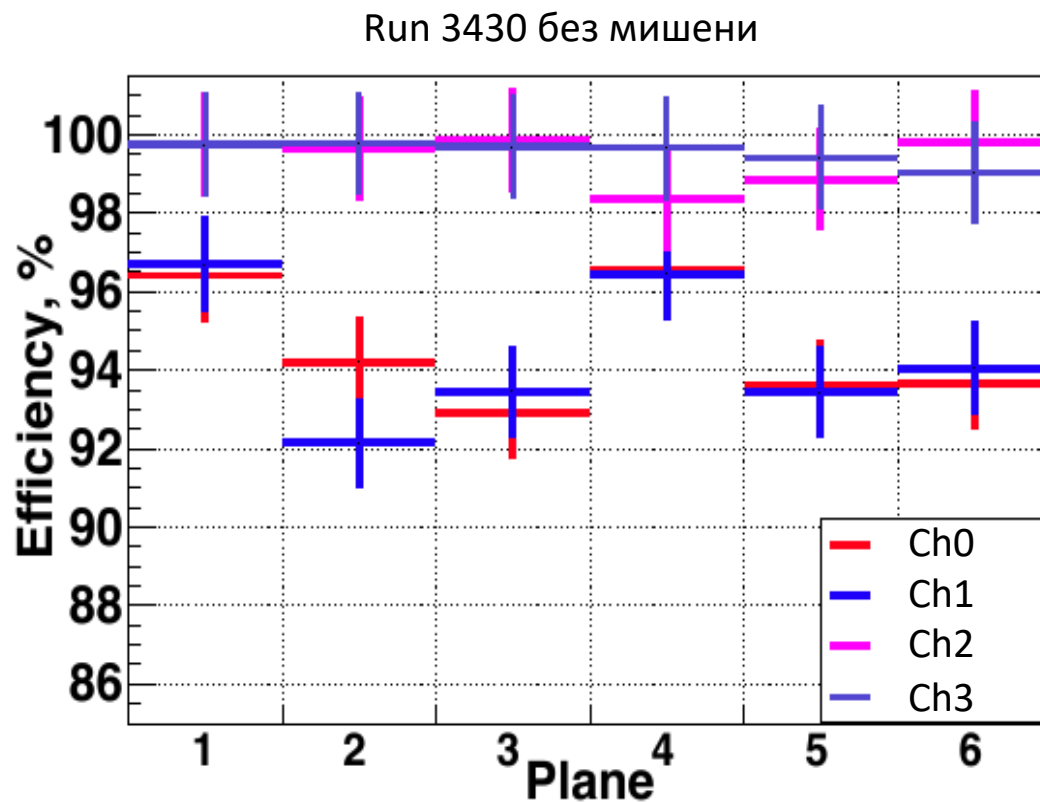


3. Сопоставление сегментов между разными камерами в плоскости между ними с помощью критерия: $\chi_m^2 = \frac{dx^2}{\sigma_x^2} + \frac{dy^2}{\sigma_y^2}$; где dx, dy – разницы между координатами проекций параметров трек-сегментов в среднюю плоскость между камерами, а σ_i – ширины их распределения

4. Аппроксимация результирующего трека по хитам в двух камерах (min = 8, max = 12)

Эффективность восстановления ХИТОВ на плоскость в MWPC

экспериментальные данные (SRC 2018г)



$$Eff(Ch0,1) = 94.5 \pm 0.5\%$$

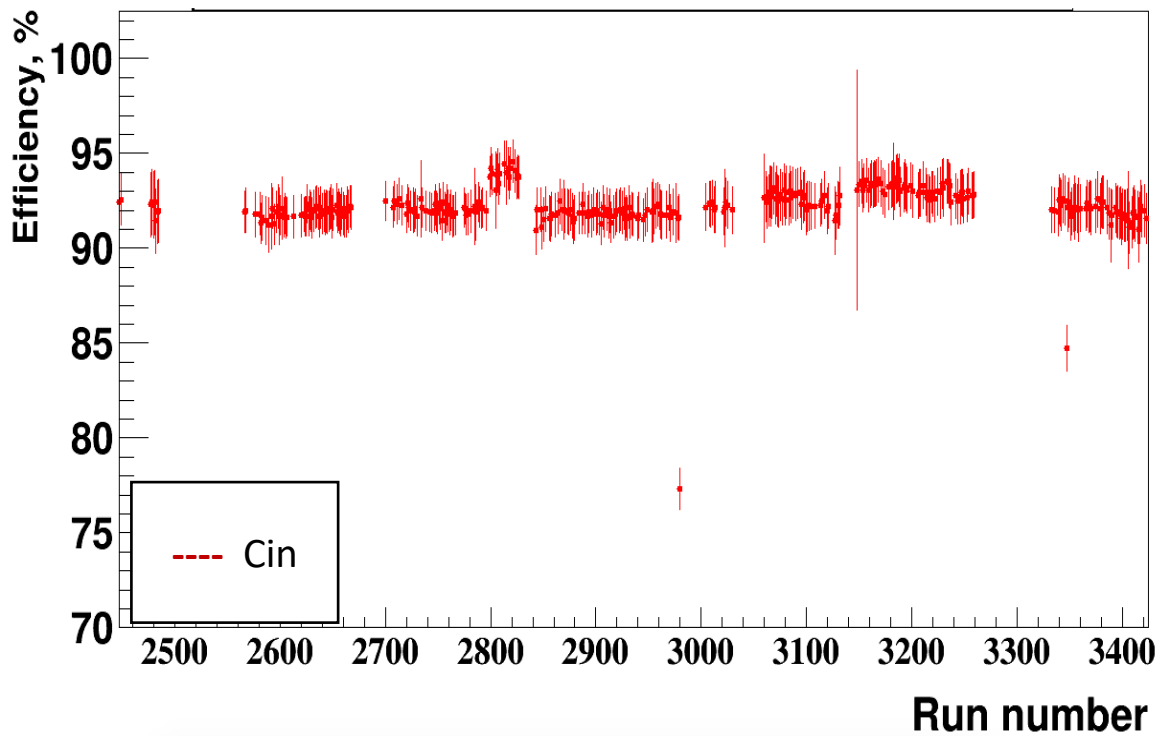
$$Eff(Ch2,3) = 98.9 \pm 0.5\%$$

$$\frac{\sum_i^{N_{tracks}} (1, \text{if hit on plane})}{N_{track-segments}}$$

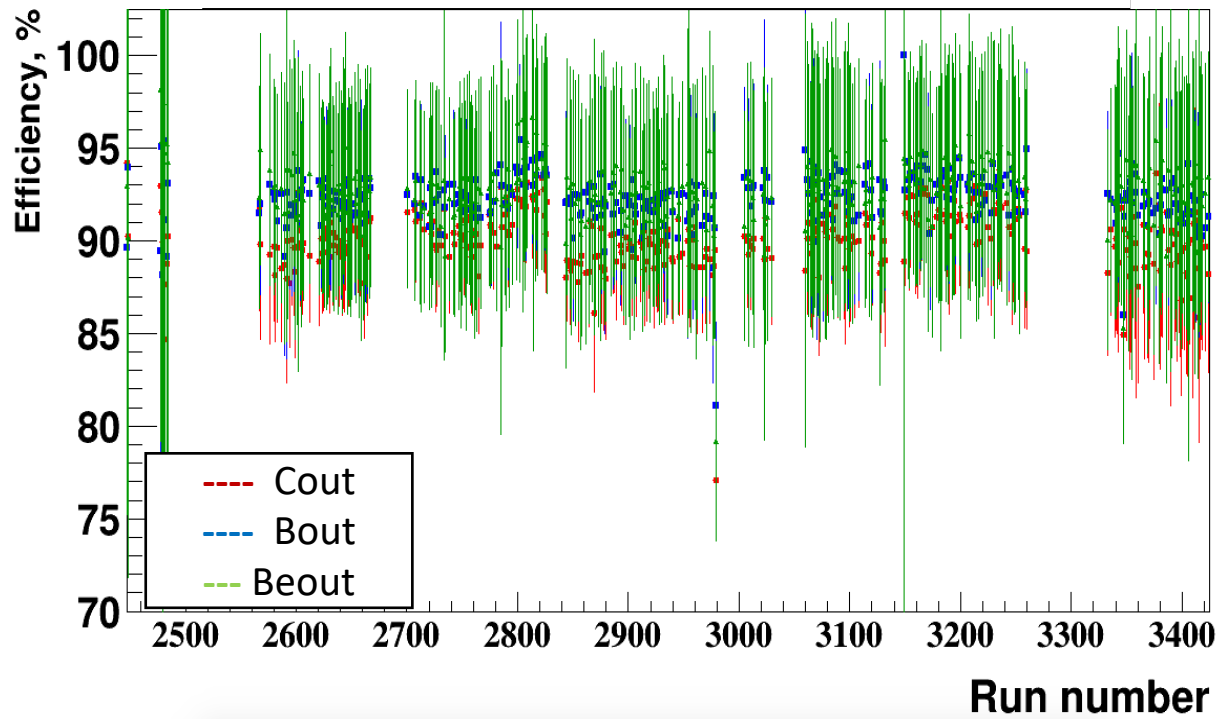
$$\frac{\text{if was hit per track in plane (0 or 1)?}}{\text{track-segments(1)}}$$

Эффективность восстановления треков в MWPC относительно другой дет. системы

экспериментальные данные (SRC 2018г)



$$Eff_{Cin}(Pair0) = \frac{N_{ev Cin \cap MWPC(Pair0)}}{N_{ev Cin}} = 92.2 \pm 0.1 \%$$



$$Eff_{CinCout}(Pair1) = 90.4 \pm 0.3 \%$$

$$Eff_{CinBout}(Pair1) = 92.3 \pm 0.4 \%$$

$$Eff_{CinBeout}(Pair1) = 92.6 \pm 0.5 \%$$

Пример вычисления эффективности реконструкции треков Pair1

Последовательность накладываемых условий для оценки эффективности

Действие	Количество событий
N_{all} – общее количество триггерных событий	200 тыс.
Отбор по заряду: N_{Cin} – число событий, где сцинтиллятор до мишени (BC1/2) зарегистрировал ион углерода (^{12}C) и N_{Bout} – число событий, где сцинтиллятор после мишени (BC3/4) зарегистрировал ион бора (^{11}B)	110 тыс.
N_{pair0} – число событий из отобранных по заряду, где был реконструирован трек в MWPC(Pair0)	100 тыс.
N_{pair1} – число событий (из N_{pair0}), где был реконструирован трек в MWPC(Pair1)	90 тыс.

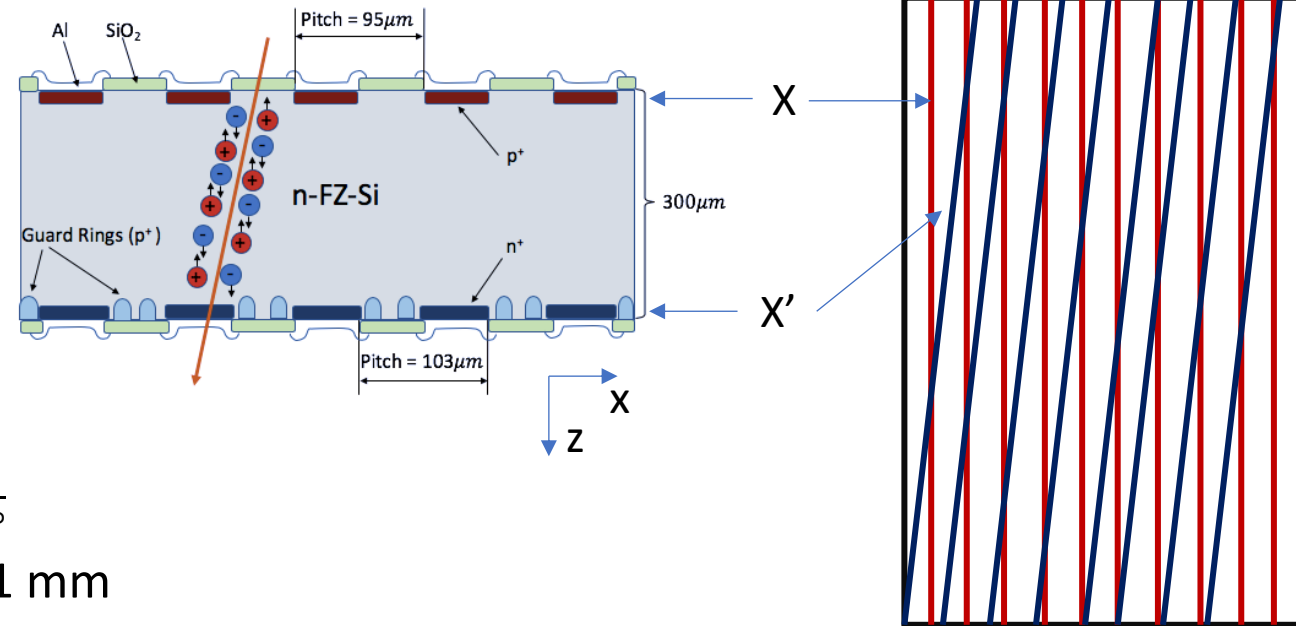
$$\text{Эффективность } Eff_{CinBout}(Pair1) = \frac{N_{pair1}}{N_{pair0}} = \frac{90 \text{ тыс.}}{100 \text{ тыс.}} = 90\%$$

2

Алгоритм реконструкции треков в системе SiDet

- Каждая станция имеет:
прямые X стрипы с шагом $d = 95 \mu\text{m}$,
наклонные X' (2.5°) стрипы, $d = 103 \mu\text{m}$
- С каждого сработавшего стрипа считывается амплитуда сигнала A_i

- Координаты связаны соотношением: $Y = \frac{X' - X}{\text{tg}2.5^\circ}$
Координатное разрешение $\sigma_{XX'} \sim 50 \mu\text{m}$; $\sigma_Y \sim 1 \text{mm}$



Проблема:

- Станции были поставлены единственным образом, расположение получилось неоптимальным по Z – координате ($Z_1 = -426$, $Z_2 = -430$, $Z_3 = -314$ [см])
- Эффективность считывания по X' -координате несколько ниже, чем по X

➤ Разработан новый алгоритм набора трек-кандидатов



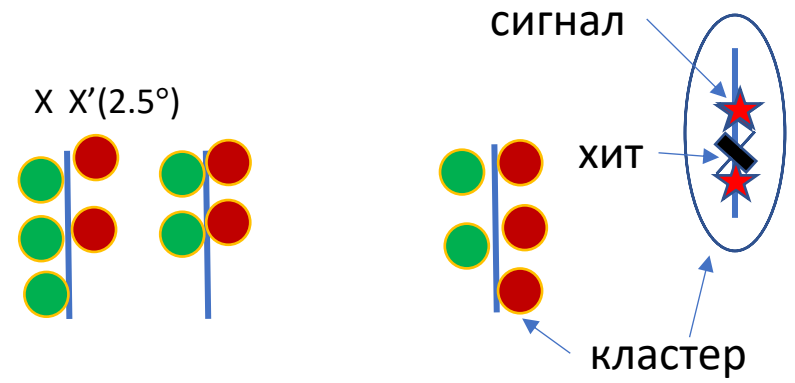
Double-Sided
Silicon Detectors
(DSSD)

2

Алгоритм реконструкции треков в системе SiDet

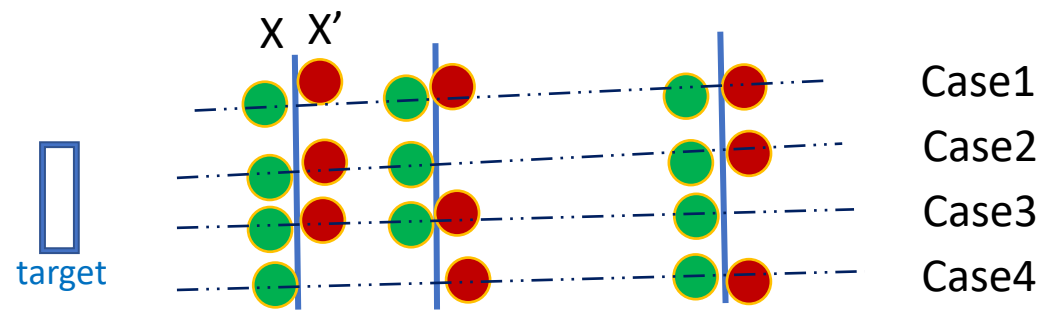
1. Чтение сигналов со стрипов и создание кластеров.
Кластер – объединение соседних сработавших стрипов (X или X' слоя).

Хит – центр кластера, координата которого рассчитывается как центр тяжести: $CoG = \frac{\sum^N A_i * i}{\sum^N A_i}$,
 A_i – амплитуда измерения на i -м стрипе



2. Кандидаты в треки отбираются 2 методами:

- стандартный метод - 6 хитов (3 пары X+X')
- **по оставшимся хитам - методом, близким к слежению по треку:**
 - 4 хита + хит X/X' (станция 2)
 - 4 хита + хит X/X' (станция 3)
 - 2 хита(ст.3) + 2 хита (X ст.1 + X' ст.2)



✓ Проверка на попадание в геометрический размер мишени

2

Алгоритм реконструкции треков в системе SiDet

3. Создание кандидатов в треки и выбор лучшего.

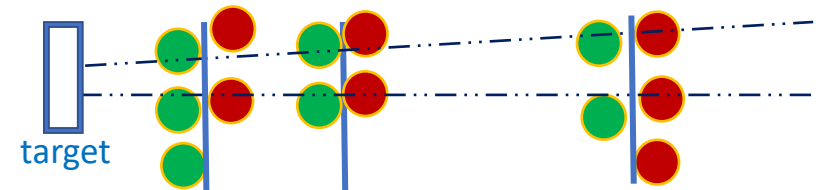
Вычисление параметров кандидата в треки (N = 6,5,4 хитов)

с помощью МНК $\sum \frac{d_i^2}{\sigma_i^2} \rightarrow \min$

Выбор лучшего кандидата по χ^2 -критерию: $\frac{1}{N-4} \sum \frac{d_i^2}{\sigma_i^2}$;

($\frac{1}{N} \sum \frac{d_i^2}{\sigma_i^2}$ для N=4);

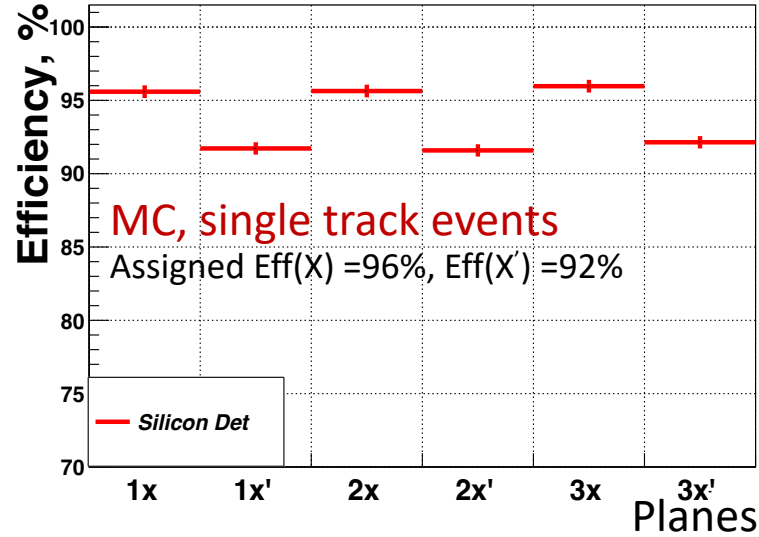
4. Критерий на геометрический размер мишени: трек экстраполируется в область мишени.



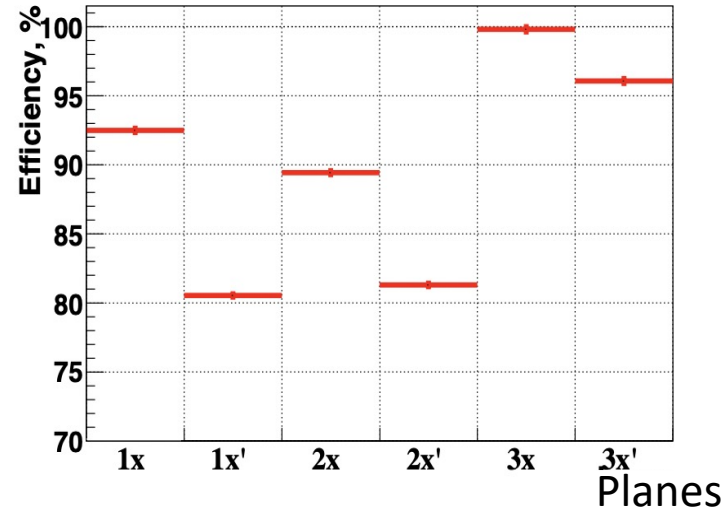
2

Эффективность восстановления хитов/треков в SiDet относительно другой дет. системы экспериментальных данных SRC 2018г

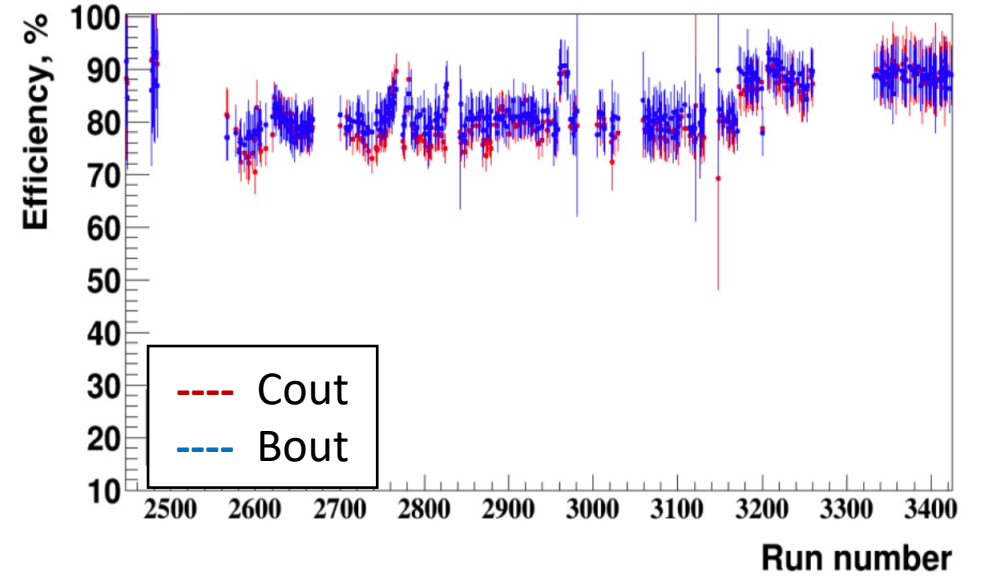
Проверка алгоритма на данных моделирования



Эффективность реконструкции хитов на плоскость,
Run 3430 без мишени



Эффективность реконструкции SiDet треков



MC data:

Алгоритм возвращает
заданную эффективность
→ реконструкция работает
корректно

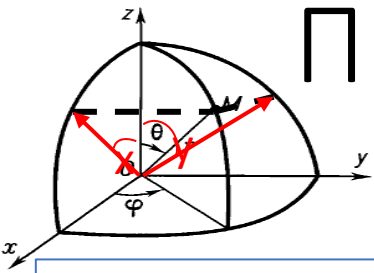
$$\frac{\sum_i^{N_{tracks}} (1, \text{if hit on plane})}{\text{Number of tracks}}$$

$$Eff(Hit) = 90.0 \%$$

$$\frac{N_{ev} MWPC(Pair0) \cap SiDet}{N_{ev} MWPC(Pair0)}$$

--- Cout	$Eff_{CinCout} = 81.5 \pm 0.7 \%$
--- Bout	$Eff_{CinBout} = 82.6 \pm 0.7 \%$

Процедура математического выравнивания



Уравнение прямой $f(x) = T_x * Z + X_0$, $f(y) = T_y * Z + Y_0$

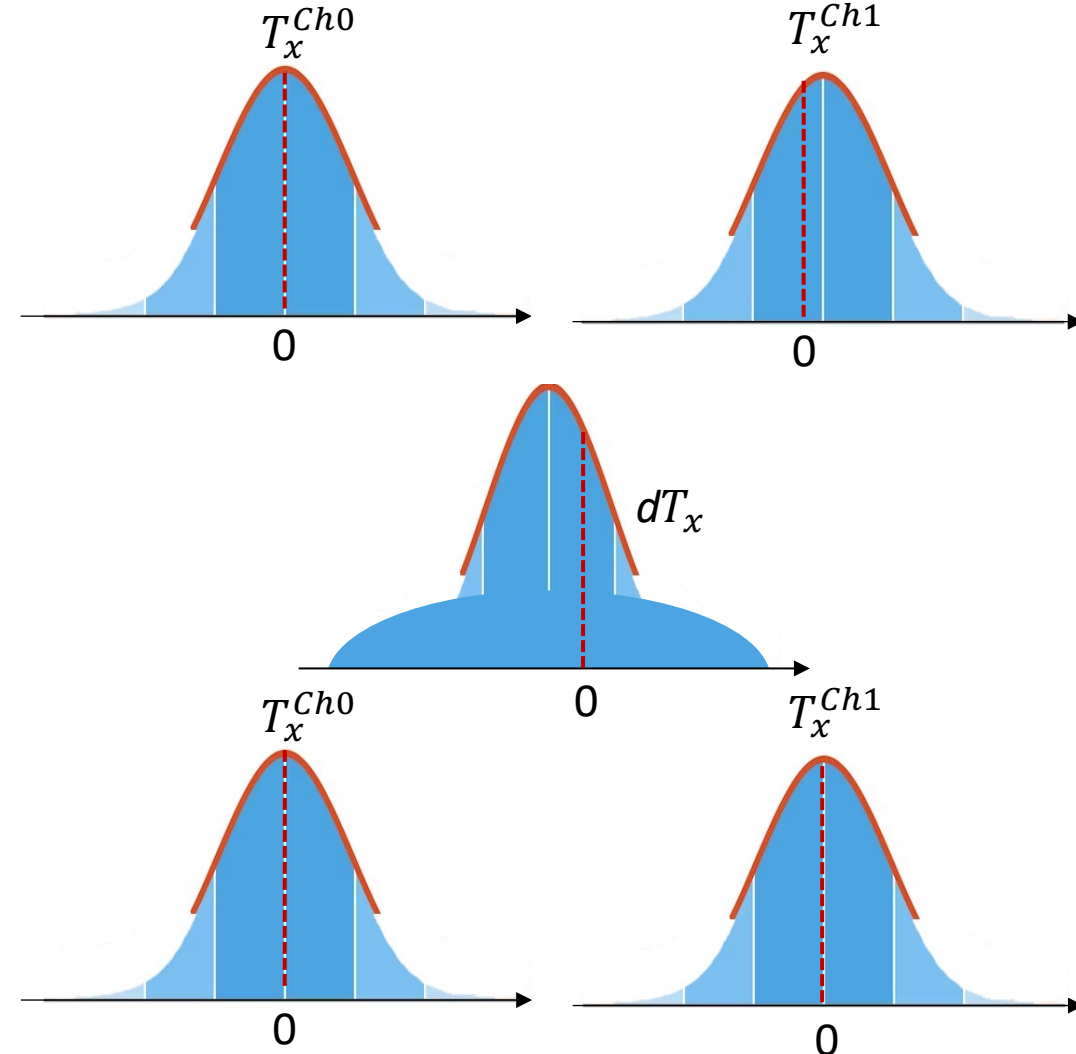
1. Выравнивание углов трек-сегментов

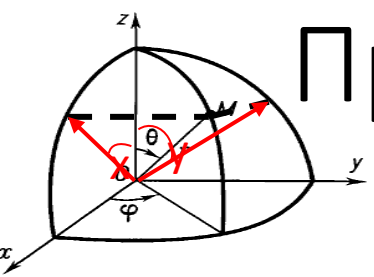
- Невязки между углами трек-сегментов рассчитываются для каждой возможной комбинации между камерами в направлениях X и Y:

$$dT_x = T_x^{Ch0} - T_x^{Ch1}, \quad dT_y = T_y^{Ch0} - T_y^{Ch1}$$

- Распределения dT_x и dT_y имеют корреляционный пик на фоне ложных сочетаний. Пик фитируется функцией Гаусса и извлекаются средние значения.
- Каждый трек-сегмент поворачивается на значения dT_x и dT_y , то есть корректируются его углы:

$$T_x^{Ch1} = T_x^{Ch0} - dT_x, \quad T_y^{Ch1} = T_y^{Ch0} - dT_y.$$





Процедура математического выравнивания

Уравнение прямой $f(x) = T_x * Z + X$, $f(y) = T_y * Z + Y$

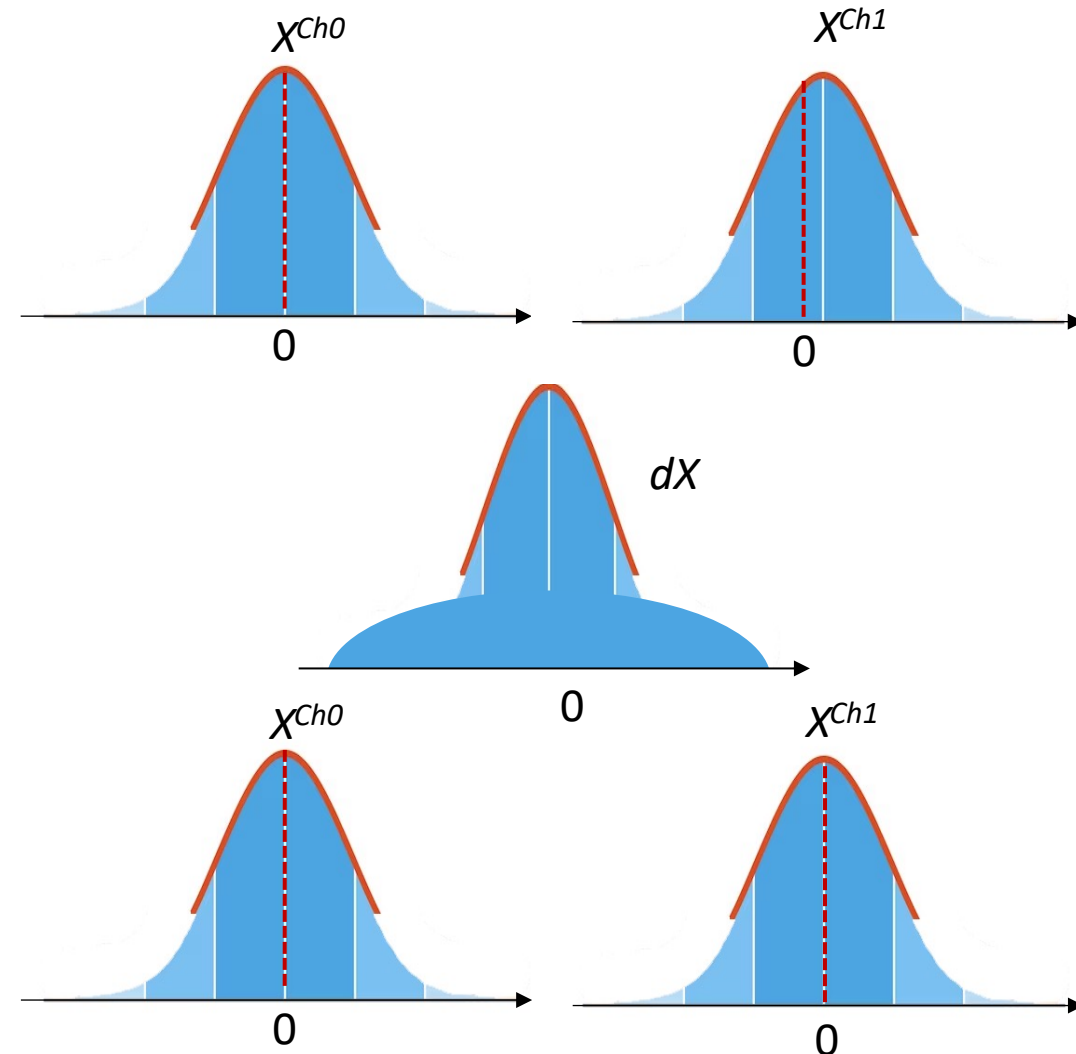
2. Выравнивание координат трек-сегментов

- Каждый трек-сегмент экстраполируется в среднюю плоскость между камерами Z_m .
- Разница между координатами X и Y рассчитываются для каждой возможной комбинации:

$$dX = X^{Ch0} - X^{Ch1}, \quad dY = Y^{Ch0} - Y^{Ch1}$$

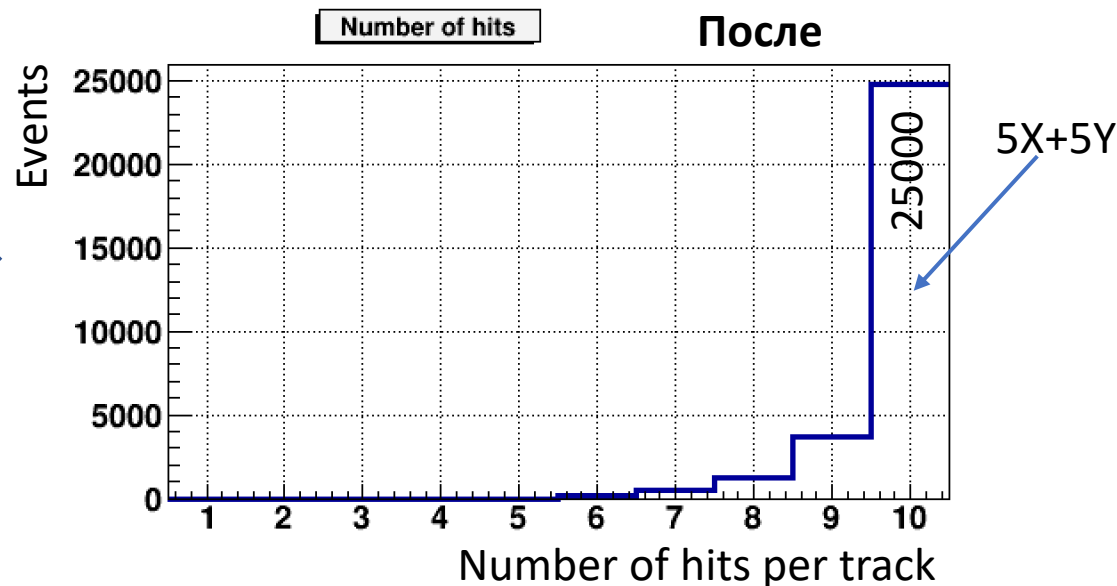
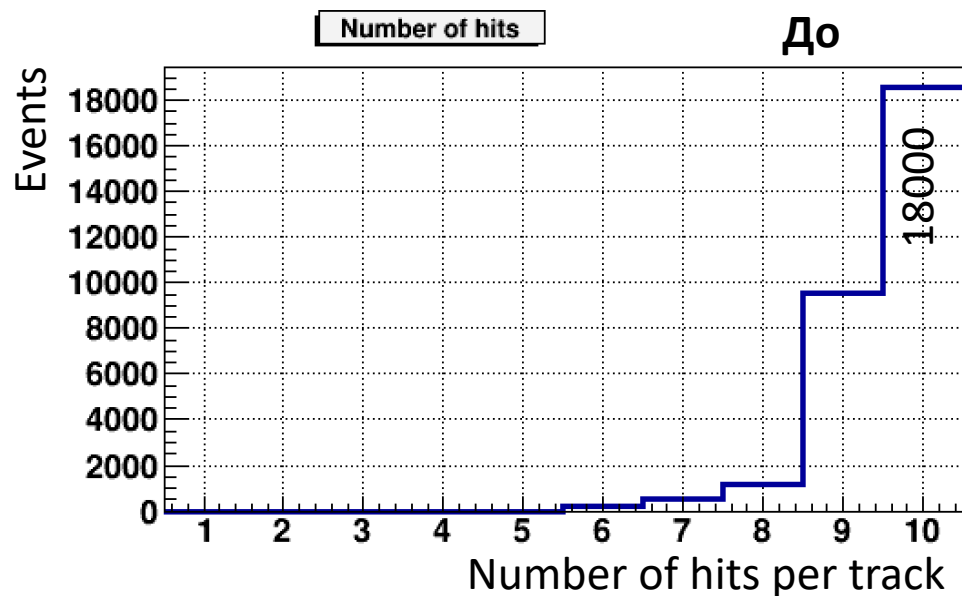
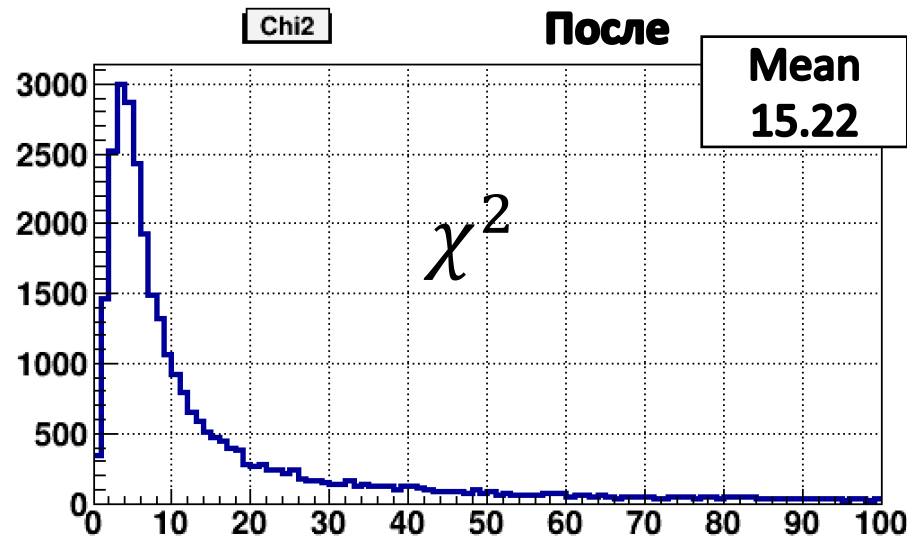
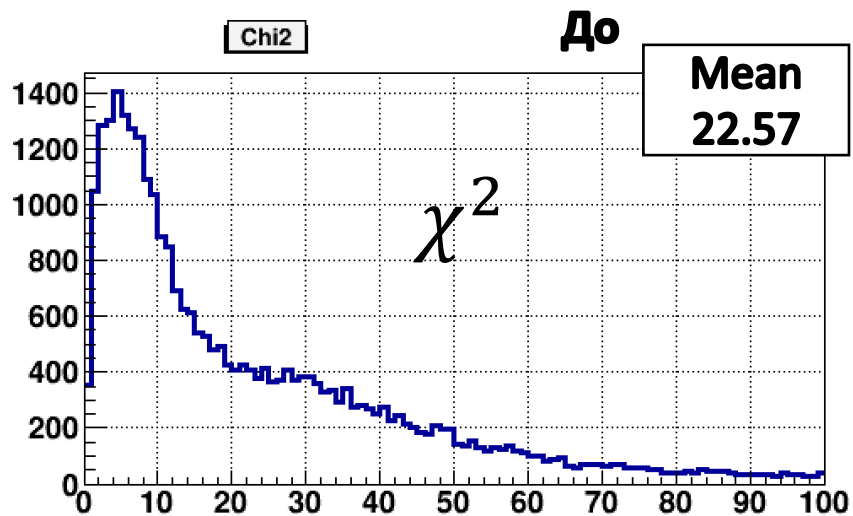
- Корреляционные пики распределений dX и dY фитируются функцией Гаусса и извлекаются средние значения.
- Каждый трек-сегмент из первой камеры смещается на значения dX и dY , то есть корректируются его положения в векторе:

$$X^{Ch1} = X^{Ch0} - dX \quad \text{и} \quad Y^{Ch1} = Y^{Ch0} - dY.$$



Процесс выравнивания систем детекторов Pair1+SiDet

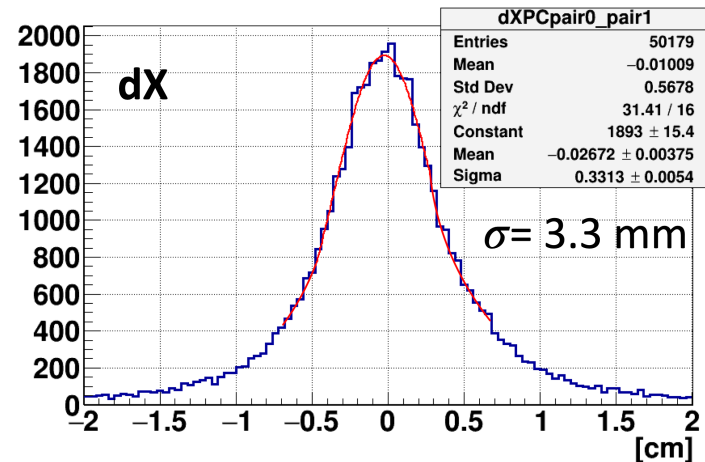
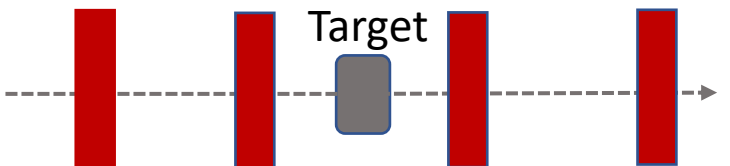
Run 3430 (empty target); Cut: C_{in} & C_{out}



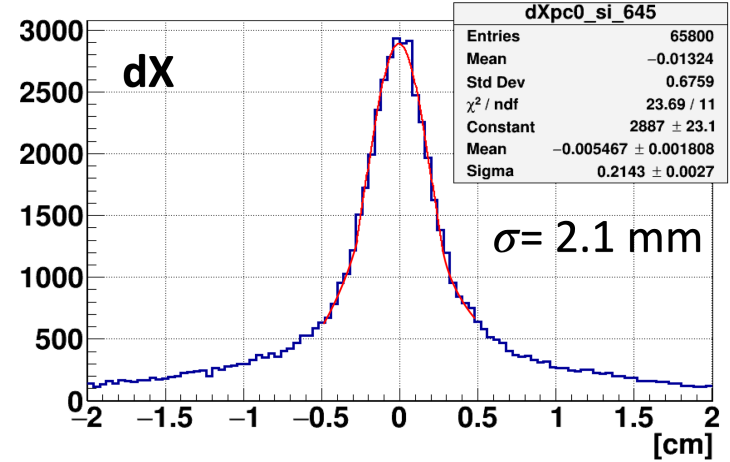
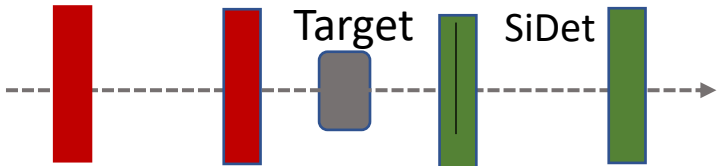
Результат выравнивания систем детекторов друг относительно друга

Треки экстраполированы в Z_{target}

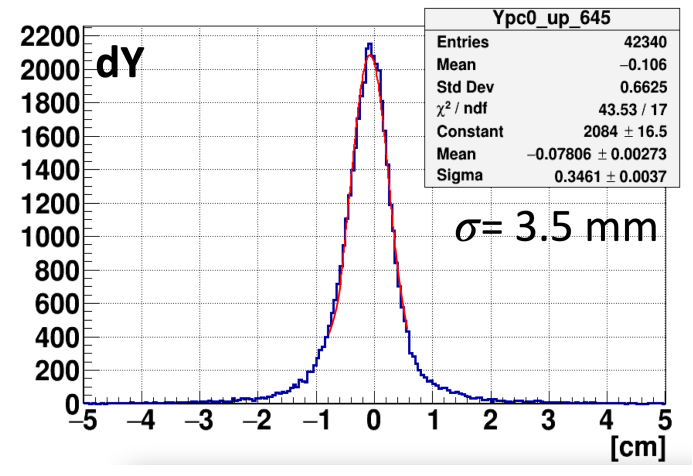
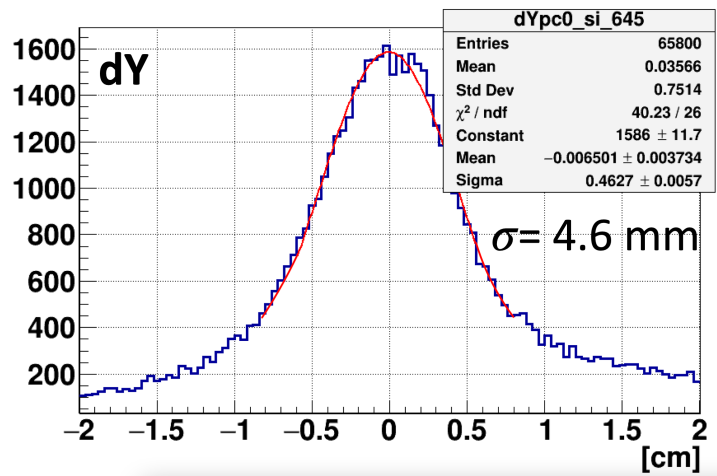
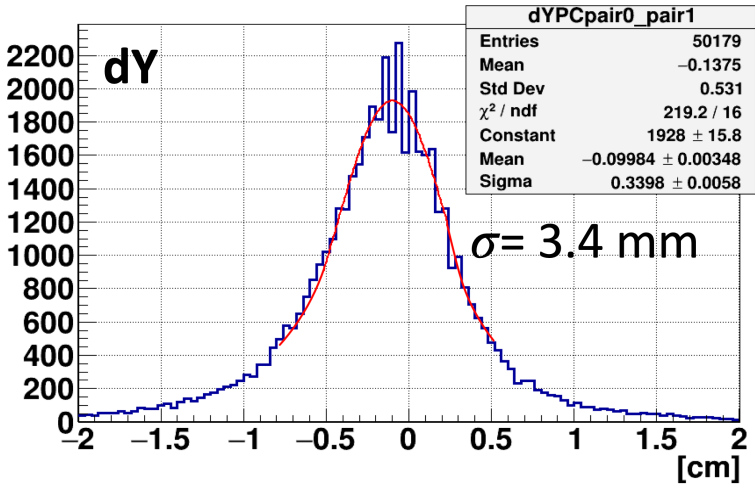
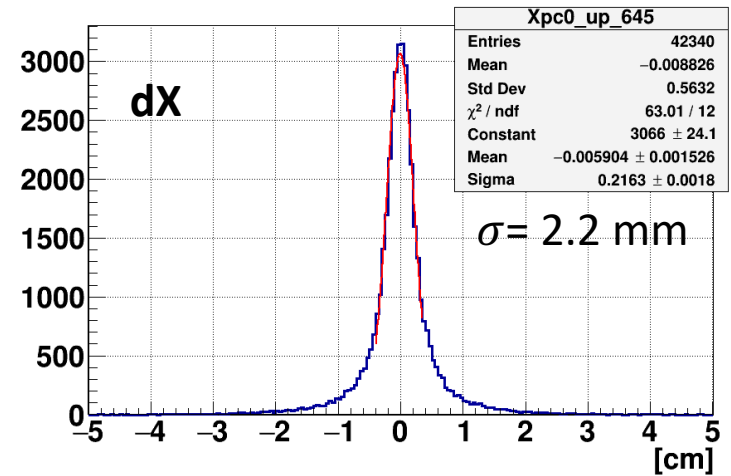
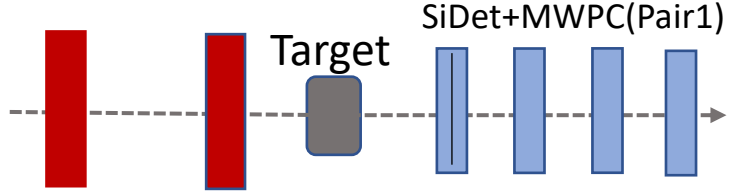
MWPC(Pair0 – Pair1) matching



MWPC(Pair0) – SiDet matching



MWPC(Pair0) – Upstream matching (см.далее)



Алгоритм реконструкция Upstream-трека после мишени: MWPC+SiDet

3

1. Поиск соответствия Si-треков и MWPC(Pair1)-треков, минимальное расстояние в средней плоскости $Z_m = -271$ см с

помощью критерия $\chi_{match}^2 = \frac{dx^2}{\sigma_x^2} + \frac{dy^2}{\sigma_y^2} + \frac{dT_x^2}{\sigma_{T_x}^2} + \frac{dT_y^2}{\sigma_{T_y}^2}$;

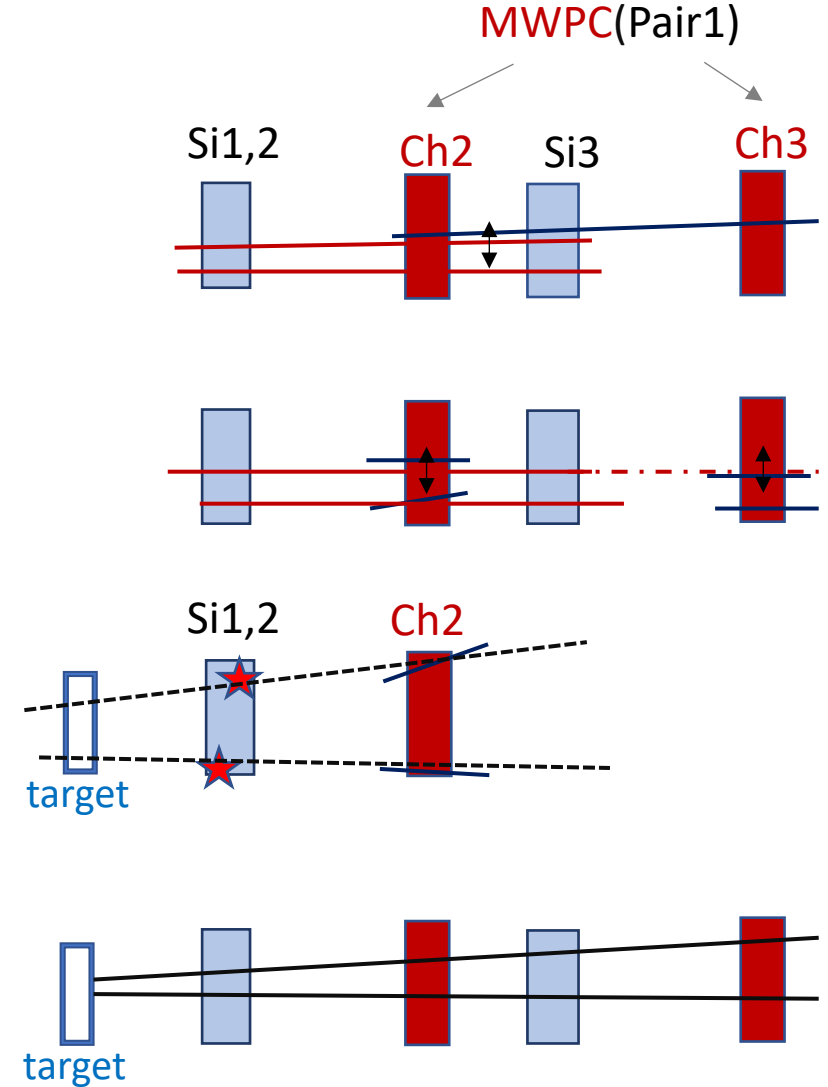
где d_x , d_y , и d_{T_x} , d_{T_y} - разницы между координатами и углами проекций параметров треков в средней плоскости, а σ_i - масштабные коэффициенты, соответствующие разбросу этих величин.

2. Сопоставление оставшихся Si-треков с сегментами MWPC с помощью критерия χ_{match}^2 .

3. По оставшимся точкам в Si1/2 и трек-сегменту в MWPC (Ch2) ищутся сочетания из 4х хитов в SiDet и оставшимся после предыдущих этапов трек-сегментов MWPC(Ch2). Такие треки могут проходить по краям Si1/2 и Ch2, не попадая в Si3 и Ch3.

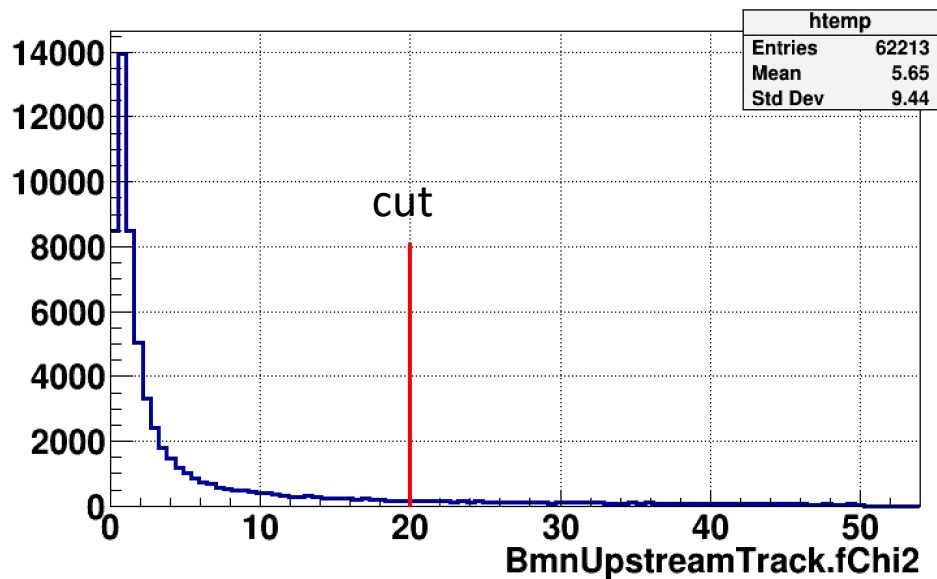
4. Аппроксимация по значениям из двух систем (Upstream track)

- Выбор лучшего трека по χ^2 -критерию: $\chi^2 = \frac{1}{N-4} \sum \frac{d_i^2}{\sigma_i^2}$, $N > 5$
- Проверка экстраполированного трека на геометрические размеры мишени



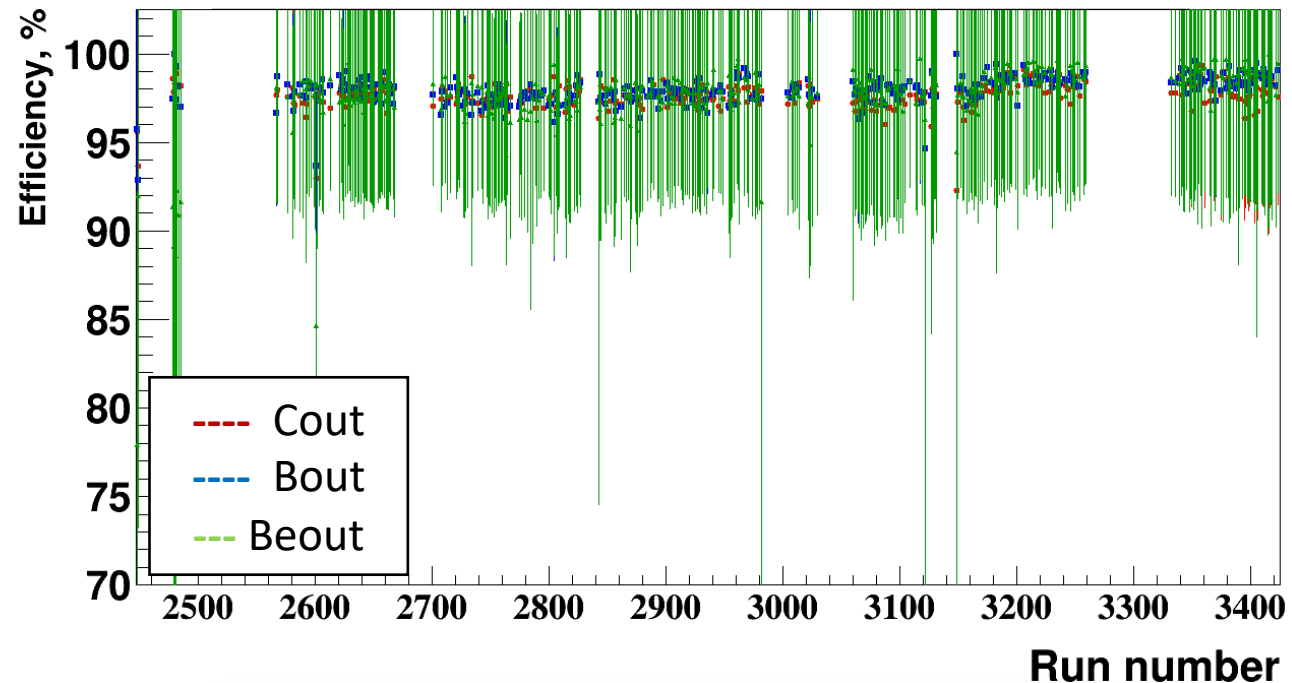
Результат восстановления Upstream-треков (MWPC+SiDet) на экспериментальных данных (SRC 2018г)

Критерий χ^2 , Run 3430 данные без мишени

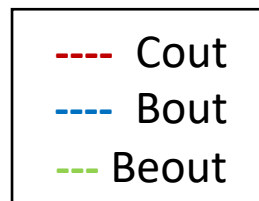


$$\chi^2 = \frac{1}{N-4} \sum \frac{d_i^2}{\sigma_i^2}, N > 5$$

Эффективность реконструкции треков за мишенью (Upstream или Si или Pair1)



$$\frac{N \text{ ev MWPC}(Pair0) \cap (\text{Upstream or SiDet or MWPC}(Pair1))}{N \text{ ev MWPC}(Pair0)}$$



$$Eff_{CinCout} = 97.7 \pm 0.2 \%$$

$$Eff_{CinBout} = 97.9 \pm 0.2 \%$$

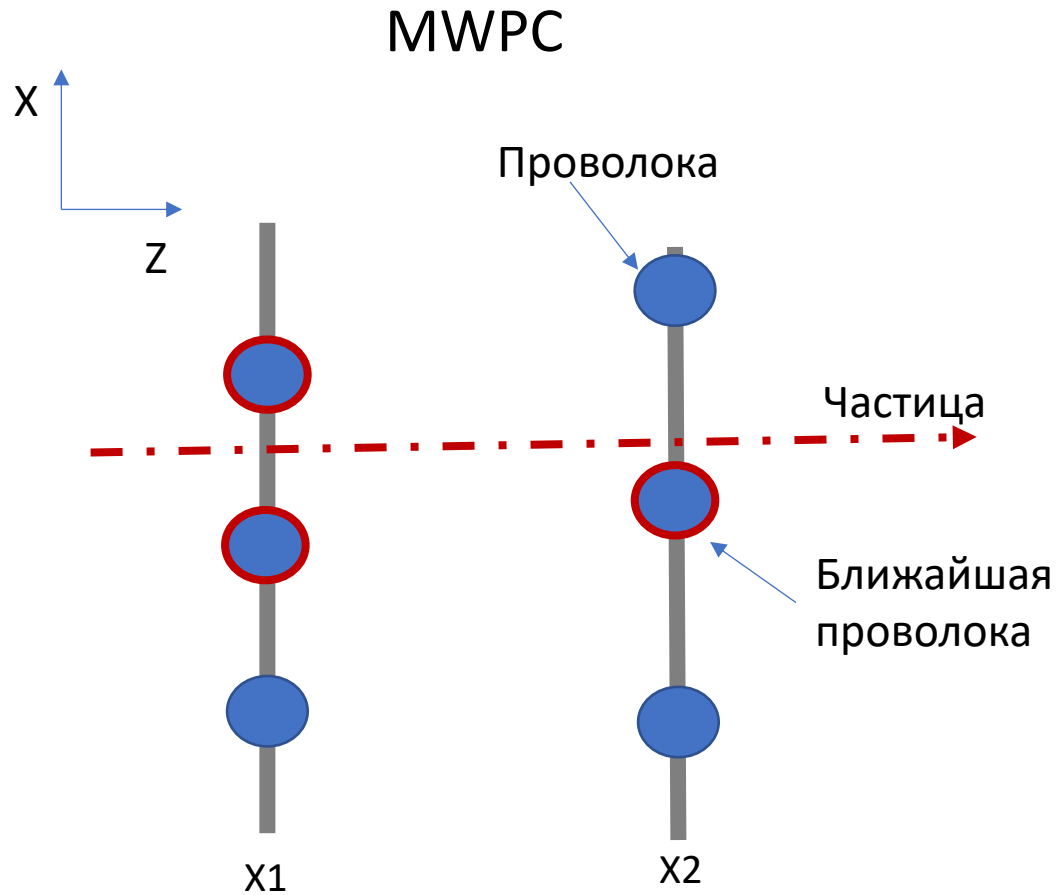
$$Eff_{CinBeout} = 97.8 \pm 0.3 \%$$

4

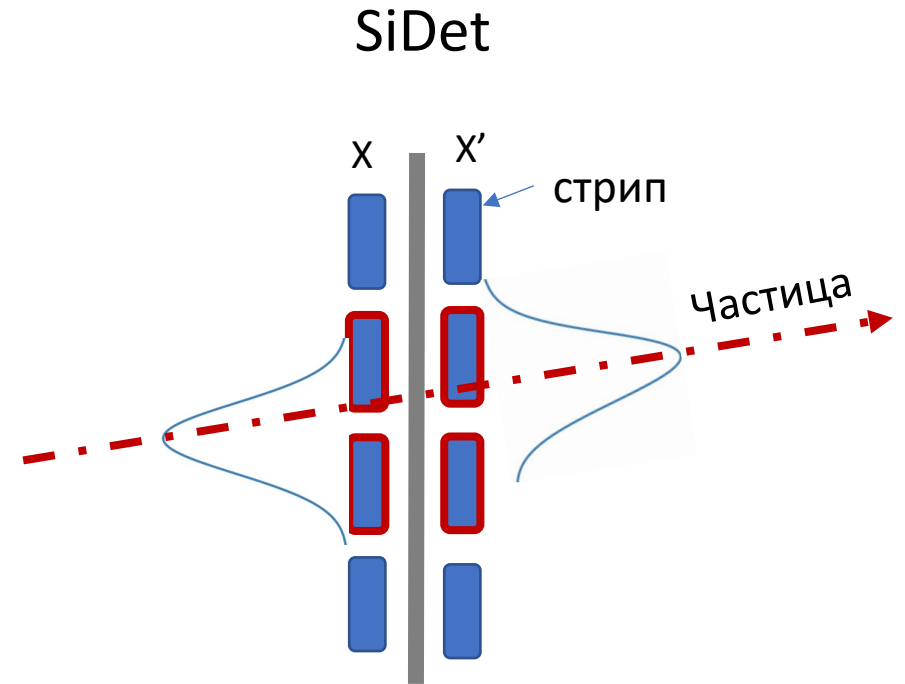
Моделирование отклика детектора

Первым шагом в моделировании отклика детекторов является трассировка траекторий частиц из мишени через детекторы и вещество установки с учетом магнитного поля и всех физических эффектов (Geant).

В каждой детектирующей плоскости MWPC или SiDet регистрируются точки вдоль генерированного трека.



Координата ближайшей проволоки к генерированной точке



В детекторе SiDet генерированная точка размывается датчиком случайных чисел с гауссовой функцией с

неопределенностью
($\sigma = 30\mu\text{m}(x), 35\mu\text{m}(x')$)

4 Оценка эффективности реконструкции треков на данных моделирования

$$Efficiency = \frac{MC\ reco\ track}{MC\ true\ track}$$

MC true track – общее число генерированных треков, прошедших через детекторную систему;

MC reco track – число реконструированных треков.

Генератор/Детектор	Ch2(%)	Ch3(%)	Pair1(%)	SiDet (%)	Upstream(%)
Ion [¹² C]	99.9	99.9	99.2	100.0	99.0
DCM-SMM*	97.4	98.3	96.4	97.4	96.0

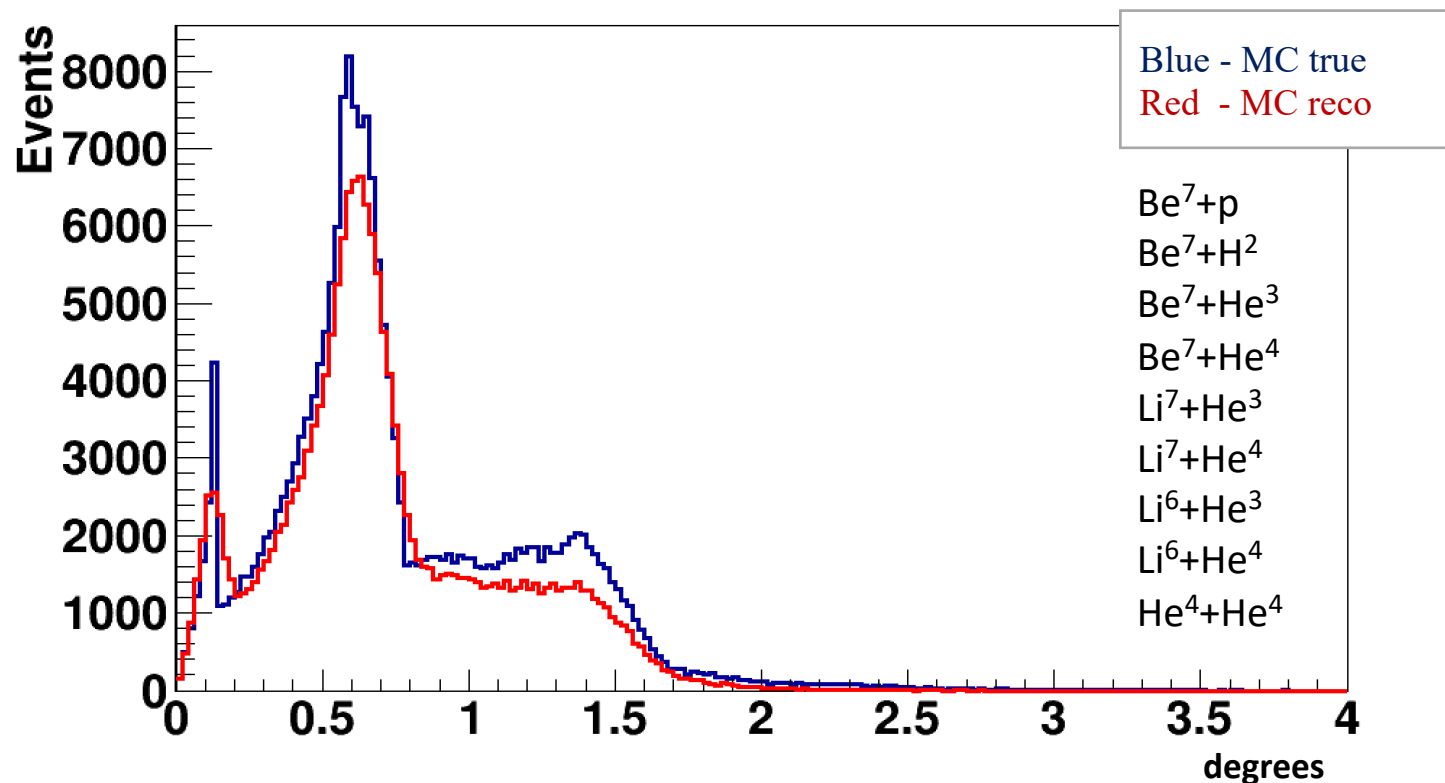
Более низкая эффективность реконструкции с генератором DCM-SMM объясняется сложной топологией генерированных физических событий.

*Dubna Cascade Model Statistical Multifragmentation Model

Сравнение MC-reco и MC-true для Upstream треков

Генератор: DCM-SMM

Скалярный угол между двумя Upstream треками

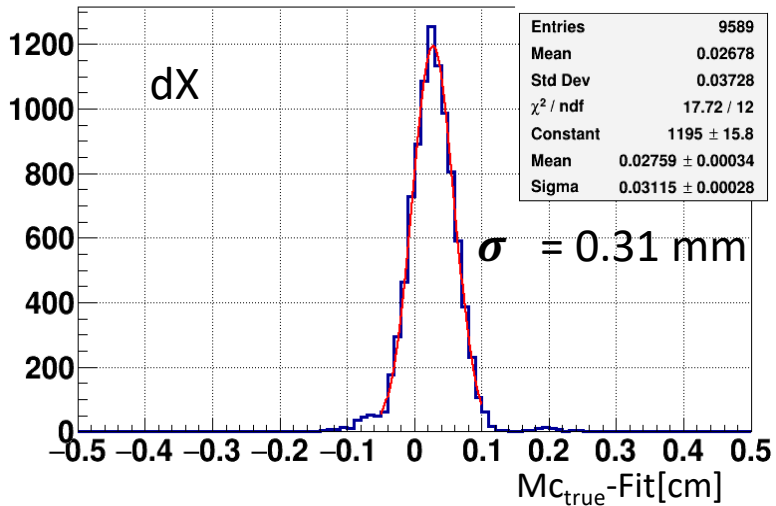


Реконструкция хорошо воспроизводит
угол между двумя близко проходящими
фрагментами на MC данных

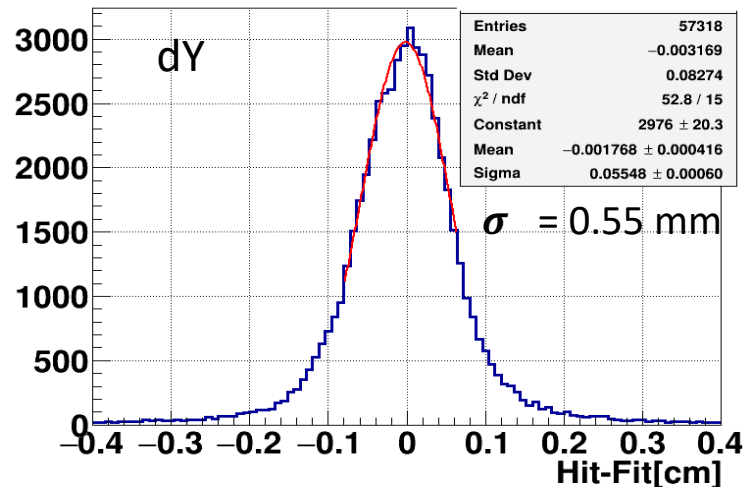
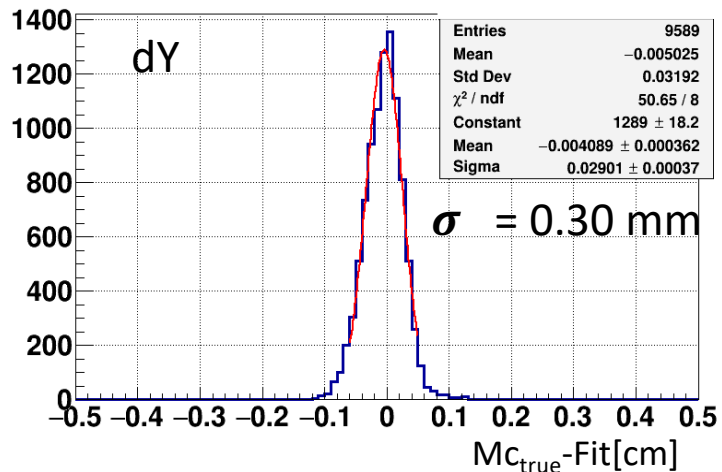
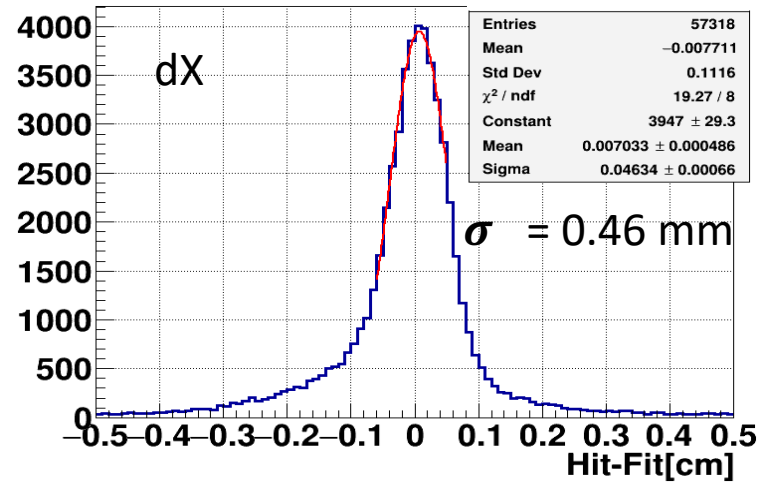
Сравнение реконструкции трек-сегментов данных моделирования и эксперимента

Пространственное разрешение в камере MWPC Ch3

МС (DCM-SMM)



Экспериментальные данные



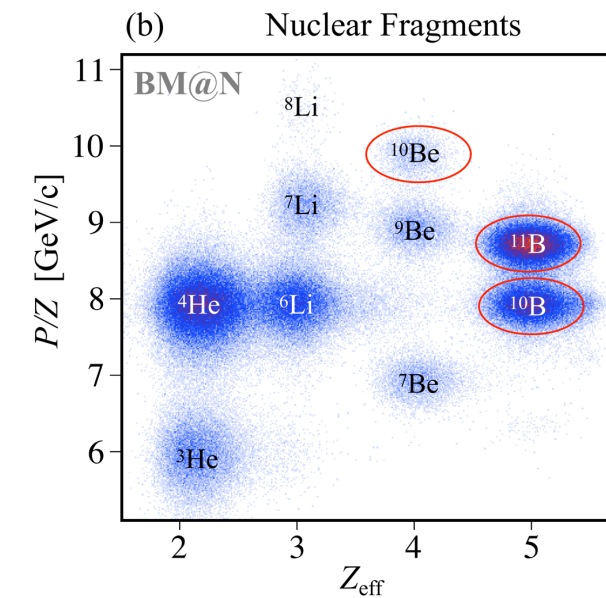
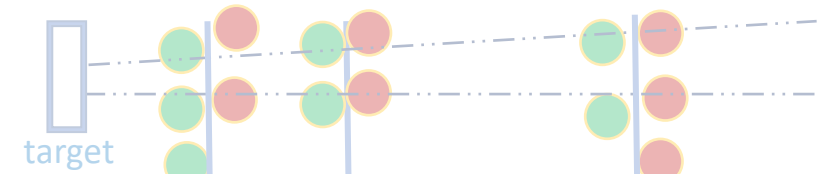
Стандартное отклонение (Sigma) распределения для МС и экспериментальных данных находятся в неплохом согласии.

Разницу в результатах можно объяснить:

- неэффективностью работы детекторов;
- большой множественностью ложных срабатываний (шумов) детектора на exper. данных.
- идеальные условия на моделированных данных

- Восстановление траекторий заряженных частиц

- Идентификация ионов



Multi-Dimensional Fit

или поиск максимума функции правдоподобия методом линеаризации
(И.Н. Силин, ЛИТ ОИЯИ)

Предположим, что \mathbb{P} — известная **интересующая величина**, которая зависит от N наблюдаемых величин $\mathbf{x}_j = (x_{1j}, \dots, x_{Nj})$ в событии j . Параметризация для искомой величины:

$$\mathbb{P}_p(\mathbf{x}_j) = \sum_{l=1}^L c_l f_l(\mathbf{x}_j)$$

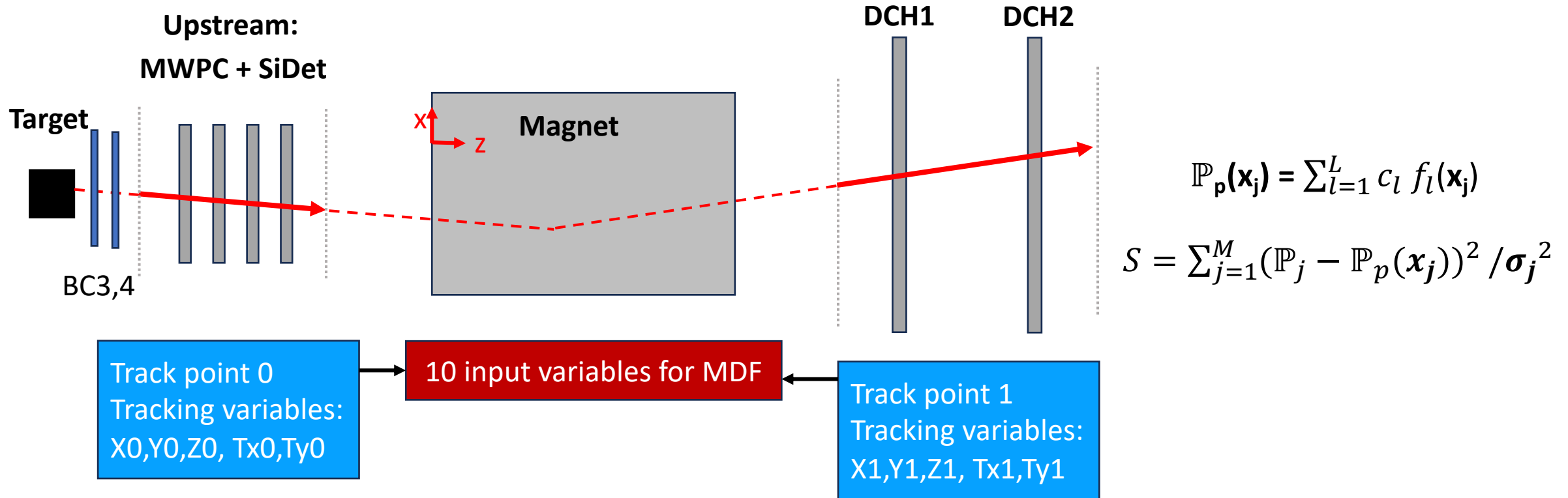
где $f_l(\mathbf{x}_j)$ - подгоняемые под измерения $\mathbb{P}_{1j} \pm \sigma_{1j}, \dots, \mathbb{P}_{Nj} \pm \sigma_{Nj}$ в точках x_1, \dots, x_N функции, где c_l – коэффициенты, определяемые фитированием, такие что S минимально:

$$S = \sum_{j=1}^M (\mathbb{P}_j - \mathbb{P}_p(\mathbf{x}_j))^2 / \sigma_j^2.$$

*I.N. Silin, CERN Program Library, D510, FUMILI, 1983

*<https://root.cern.ch/doc/master/classTMultiDimFit.html>

MDF в нашем случае

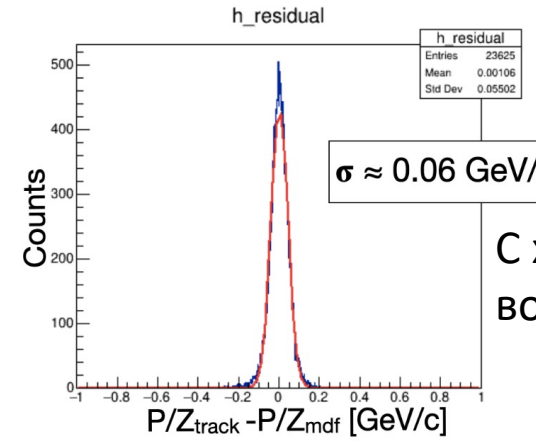
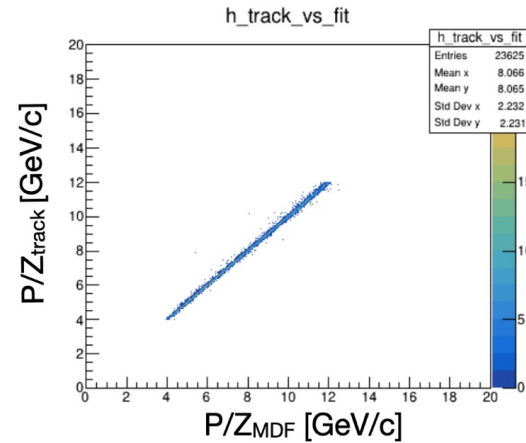
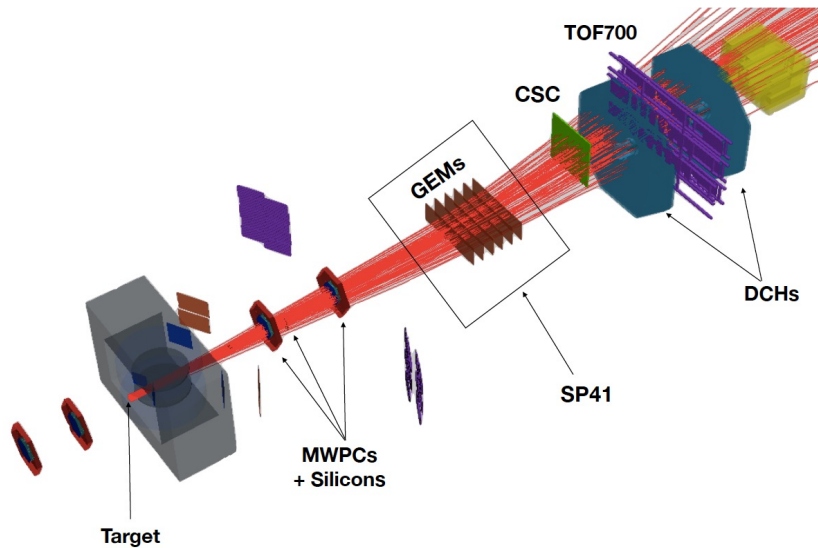


\mathbb{P}_p это $T_{X0_mdf} = f_9(X_0, Y_0, Z_0, T_{Y0}, X_1, Y_1, Z_1, T_{X1}, T_{Y1})$ или $P/Z_{mdf} = f_{10}(X_0, Y_0, Z_0, T_{X0}, T_{Y0}, X_1, Y_1, Z_1, T_{X1}, T_{Y1})$
 \mathbf{x}_j - от 1...10 – параметры трека в одном событии: до магнита (положение X_0, Y_0, Z_0 и тангенсы углов T_{X0}, T_{Y0}) и после магнита $X_1, Y_1, Z_1, T_{X1}, T_{Y1}$.

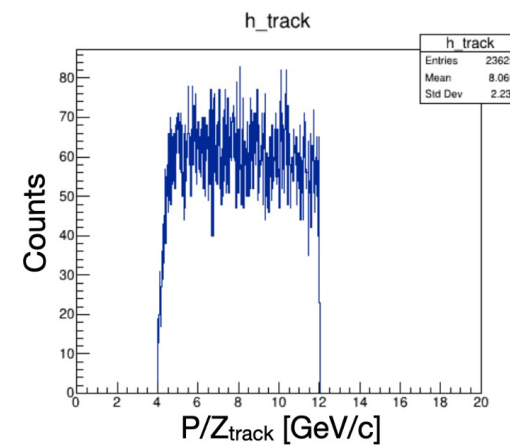
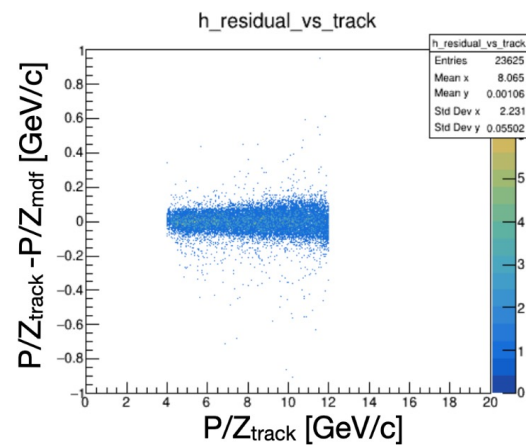
c_l - искомые коэффициенты

\mathbb{P}_j - известные величины T_{X0_mdf} и P/Z_{mdf} , полученные из моделирования

Моделирование для MDF

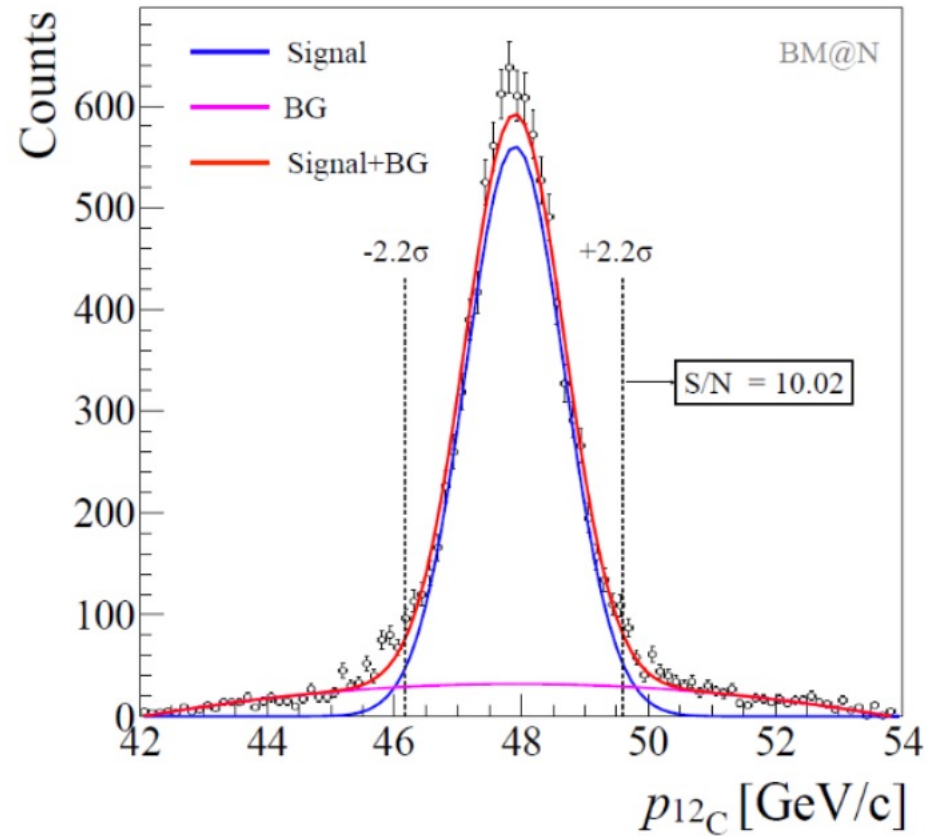


С хорошей точностью
восстанавливается P/Z



- Реальная геометрия спектрометра, вещество детекторов установки и карта магнитного поля включены в моделирование
- 10^6 событий ^{12}C в широком диапазоне (импульс, угол, координата) для перекрытия всего геометрического acceptance спектрометра BM@N

Оценка импульсного разрешения пучка углерода



Mean = 47.9 GeV/c
Sigma = 0.7 GeV/c

MDF: MWPC+Si + DCH

$dP/P = 1.46 \%$

Без мишени

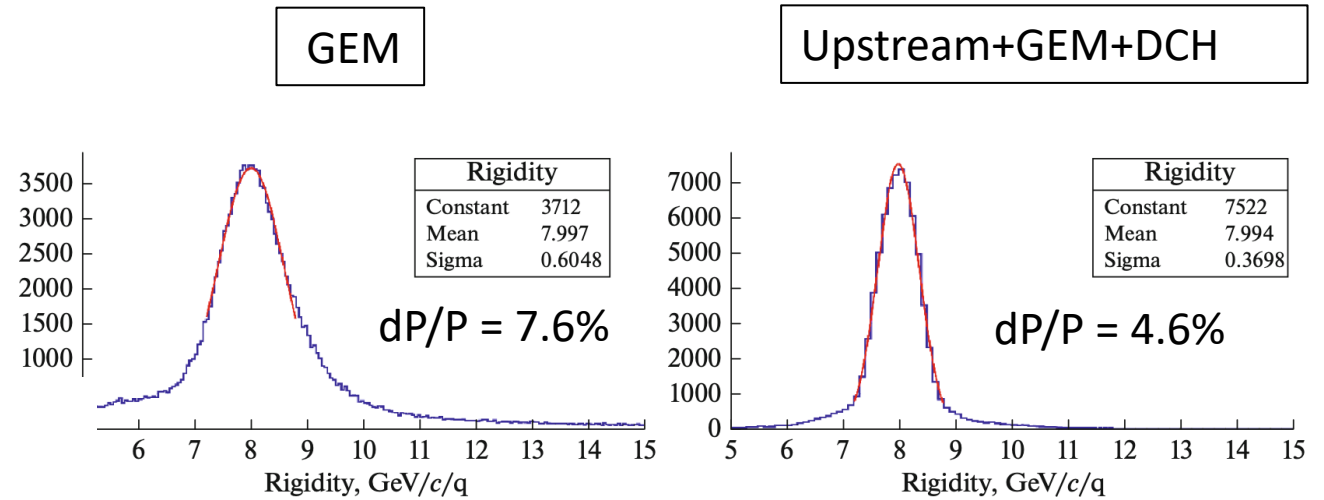
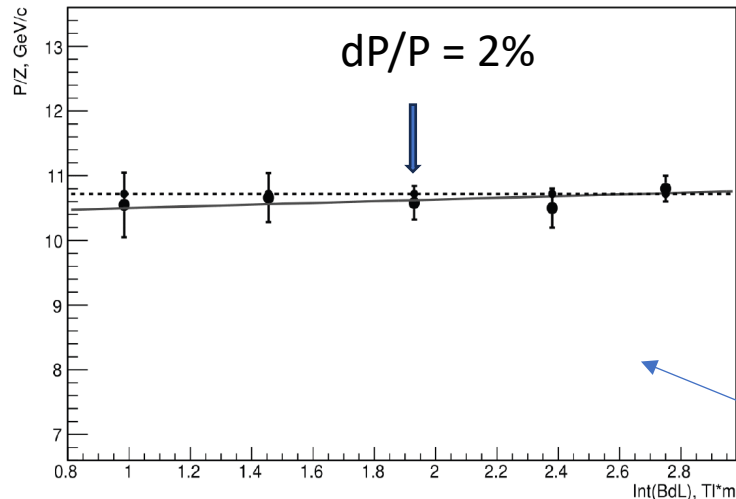
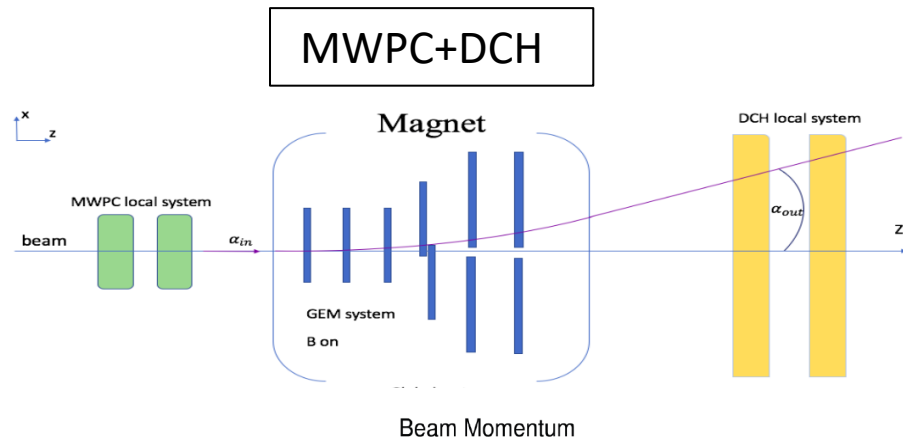
Импульс углерода 4 GeV/c/nucleon

Карта магнитного поля была
выровнена относительно детекторов

Сравнение с другими методами данные 2018 года

M. Kapishin, V. Lenivenko, V. Palichik, and N. Voytishin,
EPJ Web of Conferences 173, 04008 (2018)

Drjuk, S. Merts, and S. Nemnyugin,
ISSN 1063-7796 (2022), Vol. 53, No. 2



Momentum distribution of the carbon beam reconstructed by GEM only (left) and by combining GEM, upstream and downstream information (right).

$$P_{beam} = \frac{A}{Z} \cdot \sqrt{(E/n + M_p)^2 - M_p^2}$$

A – массовое число
 Z – число протонов
 E/n – энергия пучка
 M_p – масса протона

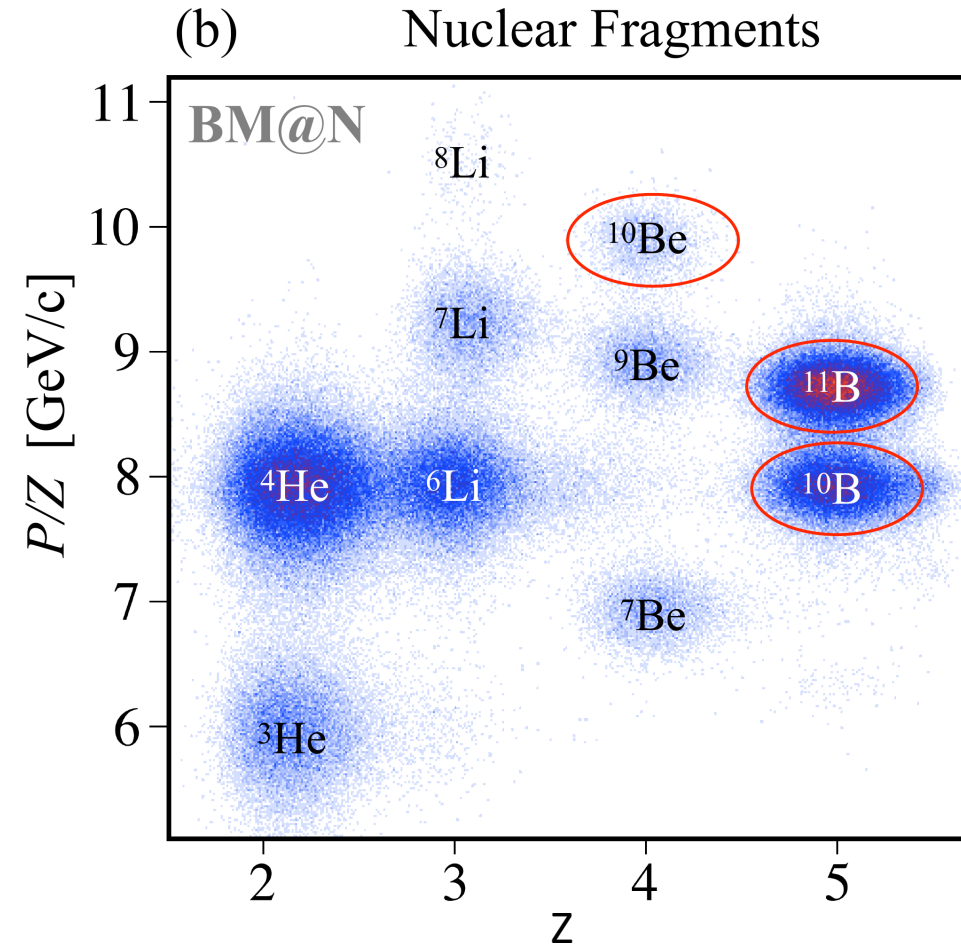
Без дополнительных выравнивания карты магнитного поля к детекторам

Figure 3. C beam energy 4.5 GeV/nucleon momentum estimation. The dashed line is the nominal beam momentum value. The points are the beam momentum values estimated from experimental data.

Идентификация частиц

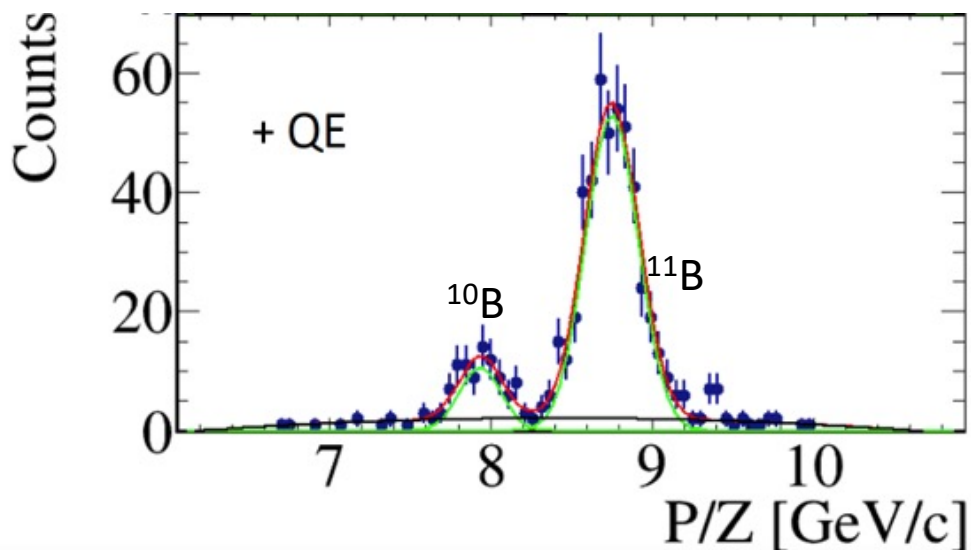
MDF метод \rightarrow P/Z вылетевшего иона

Информация о заряде иона:
со сцинтилляционных счетчиков $\rightarrow Z$



Статистическая ошибка эффективности трекинга определяется эффективностью идентификации заряда.

Результаты P/Z с помощью MDF для бора



Ион, единичный трек	Сигнал к шуму (Signal-to-noise)	BG/Integral (%)
^{11}B	12.7 ± 4.7	7.3 ± 2.5
^{10}B	2.6 ± 0.6	28.6 ± 4.6

P – импульс трека иона, Z – заряд иона со сцинтилляционных счетчиков (BC3,4)
Систематическая ошибка MDF определяется отношением BG/Integral

Эффективность восстановления глобальных треков

Good Track	ϵ_{track} (%)
$Z_{\text{in}}=6, Z_{\text{out}} = 6$ selection	100
Upstream track (*)	98
DCH track	93
Upstream and DCH tracks	91
Global track	70
Good P/Z for carbon ions	40

Tracking efficiency 39.5 ± 1.7 (stat) ± 2.6 (sys)%

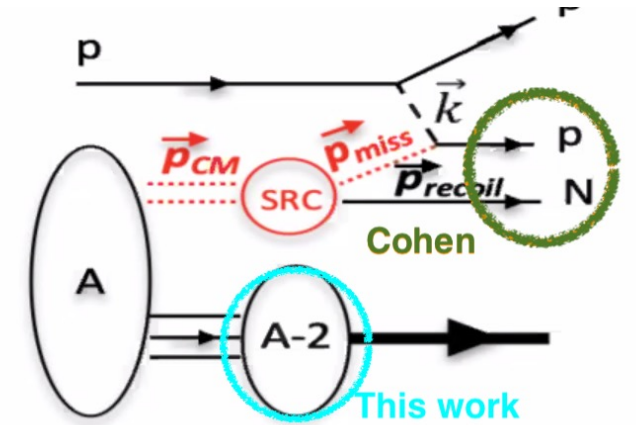
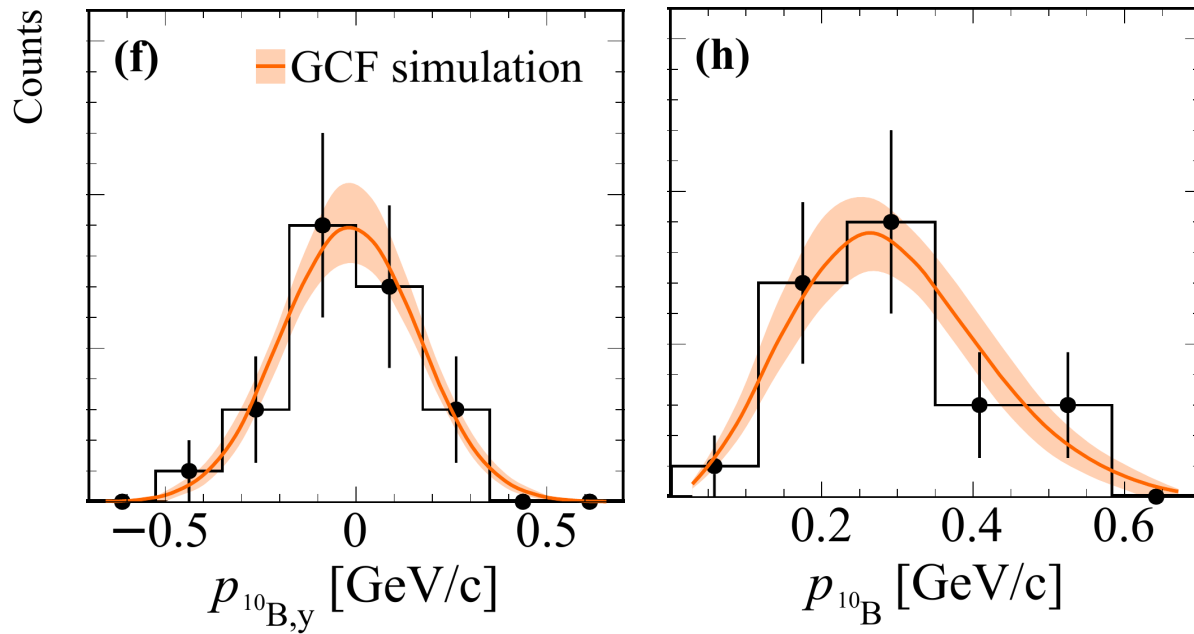


В эффективность трекинга входит эффективность реконструкции

(*)Эффективность «Upstream» относится ко всем возможным комбинациям: комбинированные треки, либо только Si, либо MWPC(Pair1)

На этом слайде обзор решенных задач и методов заканчивается

Импульс фрагмента ^{10}B (КДК)

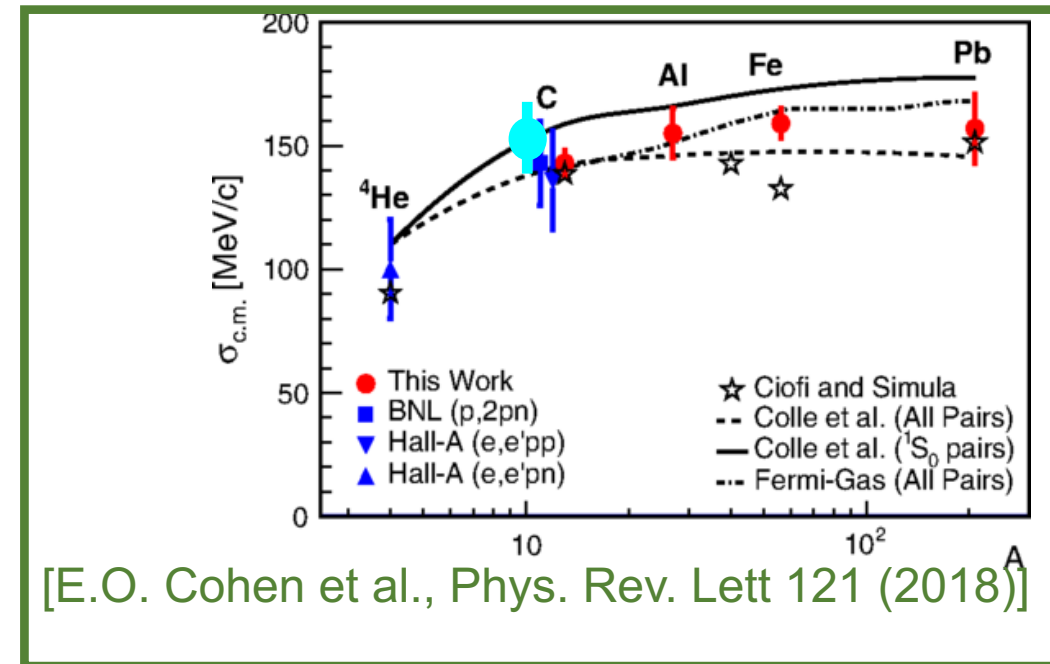


Прямое измерение (впервые):

$$\sigma = (156 \pm 27) \text{ MeV/c}$$

-> малый импульс центра масс пары относительно импульса Ферми

M. Patsyuk, J. Kahlbow, G. Laskaris, M. Duer, V. Lenivenko, et al., *Unperturbed inverse kinematics nucleon knockout measurements with a carbon beam*, *Nature Physics*, **17**, 693 (2021)



Результаты

- **Разработан и протестирован** на экспериментальных и моделированных данных алгоритм реконструкции траекторий заряженных частиц в системе камер **MWPC** до и после мишени и алгоритм реконструкции в системе кремниевых детекторов **SiDet** эксперимента BM@N.
- **Разработан и протестирован** алгоритм реконструкции траекторий заряженных частиц через **объединённую систему** MWPC и SiDet, с помощью которого были реконструированы треки на экспериментальных данных (500 миллионов экспериментальных событий).
- **Комплексы программ** были интегрированы в VmnRoot использованы для первого физического анализа данных, полученных в эксперименте SRC на BM@N. Предложенные методы и алгоритмы являются универсальными и используются в двух разных конфигурациях установки (SRC на BM@N и основного эксперимента BM@N)
- **Выполнена идентификация** ионов B^{10}, B^{11}, Be^{10} в эксперименте SRC на BM@N методом MDF с помощью уточненного импульса углеродного пучка из Нуклотрона спектрометром SRC на BM@N.

Публикации

По теме опубликовано 7 научных работ в рецензируемых изданиях.

1. **V. Lenivenko**, V. Palichik, M. Patsyuk, Reconstruction of simulated and experimental data in coordinate detector systems of SRC experimental setup at BM@N, *Physics of Particles and Nuclei Letters*, 20, 1403–1408 (2023)
2. **V. Lenivenko**, M. Patsyuk, V. Palichik, *SRC at BM@N: reconstruction of tracks upstream and downstream the target using the MWPC and Silicon detector systems*, *AIP Conference Proceedings*, 2377, 030010 (2021)
3. **V. Lenivenko**, V. Palichik, *Reconstruction of Charged-Particle Trajectories in Multiwire Proportional Chambers at the BM@N Experiment*, *Physics of Particles and Nuclei Letters*, 15, 637-649 (2018)
4. M. Patsyuk, J. Kahlbow, G. Laskaris, M. Duer, **V. Lenivenko**, et al., *Unperturbed inverse kinematics nucleon knockout measurements with a 48 GeV/c carbon beam*, *Nature Physics*, 17, 693 (2021)
5. M. Patsyuk, T. Atovullaev, A. Corsi, O. Hen, G. Johansson, J. Kahlbow, **V. Lenivenko**, et al., *BM@N data analysis aimed at studying SRC pairs: one-step single nucleon knockout measurement in inverse kinematics out of a 48 GeV/c ^{12}C nucleus*, *Physics of Particles and Nuclei*, 52, 631–636 (2021)
6. A. Galavanov, S. Khabarov, Y. Kirushin, E. Kulish, **V. Lenivenko**, et al., *Studies of Short Range Correlations in inverse kinematics at BM@N at the NICA facility*, *J. Phys.: Conf. Ser.*, 1390, 012025, (2019)
7. S. Khabarov, E. Kulish, **V. Lenivenko**, A. Makankin, A. Maksymchuk, V. Palichik, et al., *First glance at the tracking detectors data collected in the first BM@N SRC run*, *EPJ Web of Conferences*, 201, 04002 (2019)

Отзывы руководителей экспериментов

- Д.ф.м.н. Капишин М.Н. (BM@N):

Ленивенко В.В. ... реконструировала траектории ионов пучка до магнита в эксперименте по исследованию коротко-действующих корреляций нуклонов (Sort Range Correlations) на установке BM@N, что играет **ключевую роль** в получении физических результатов.

- Prof. Eli Piassetzky (SRC at BM@N):

Vasilisa's **most significant contribution** to the SRC project was her work on the reconstruction of the coordinate detector systems of multi-wire proportional chambers and silicon detectors...

Her results were essential to reconstruct the kinematics of the SRC and Quasi-elastic reactions of interest and were **critical for the first publication** of the 2018 data.

Спасибо за внимание!

Ленивенко Василиса Викторовна
vasilisa@jinr.ru