

**Программно-алгоритмический комплекс для
реконструкции траекторий заряженных частиц
и
идентификация ионов
в эксперименте SRC на установке BM@N**

Ленивенко Василиса Викторовна

Специальность 1.2.2

Научные руководители:

к.ф.-м.н. Пальчик Владимир Владимирович

к.ф.-м.н. Пацюк Мария Александровна

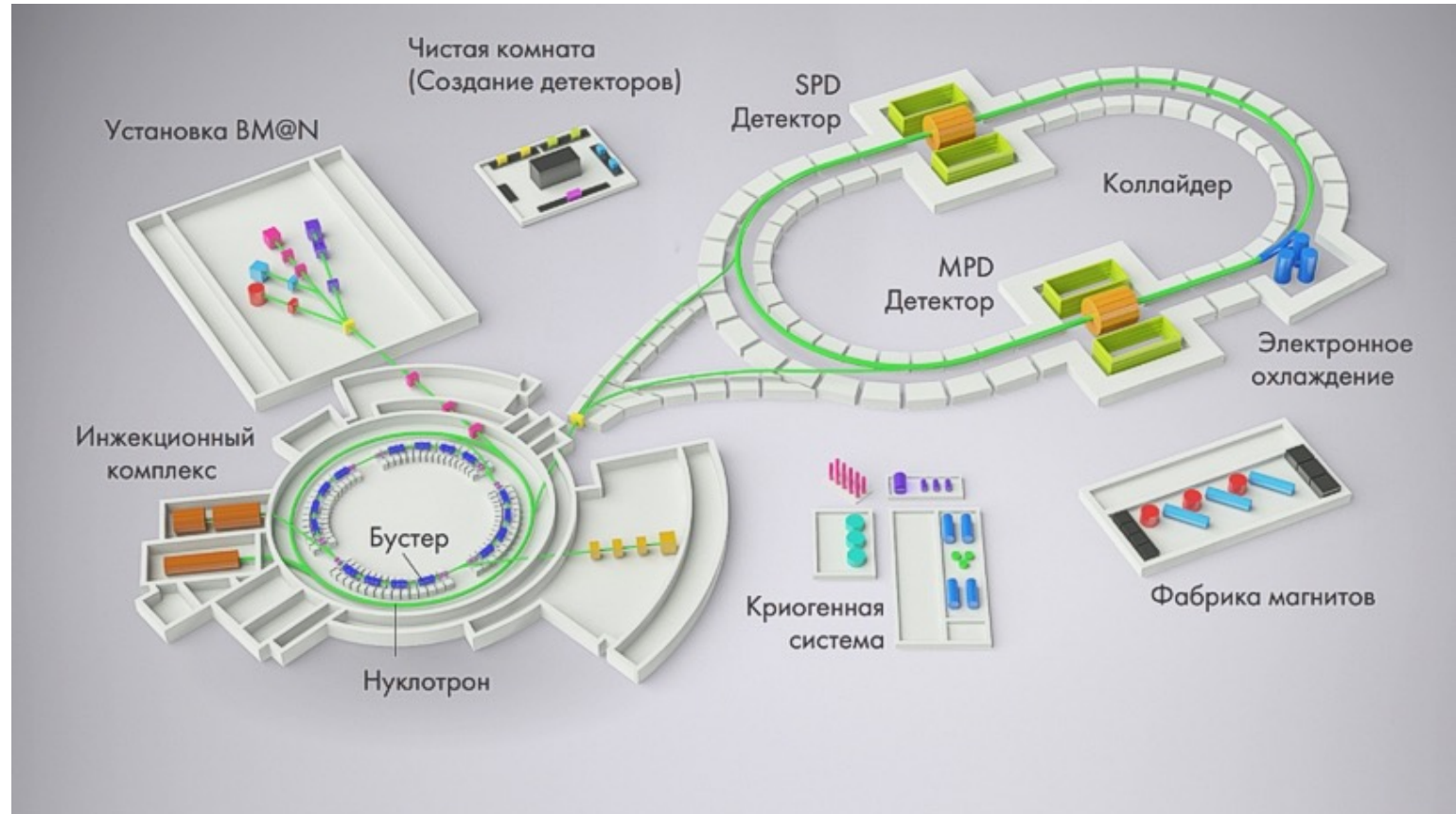
Актуальность исследования



NICA – новый ускорительный комплекс уровня мегасайенс

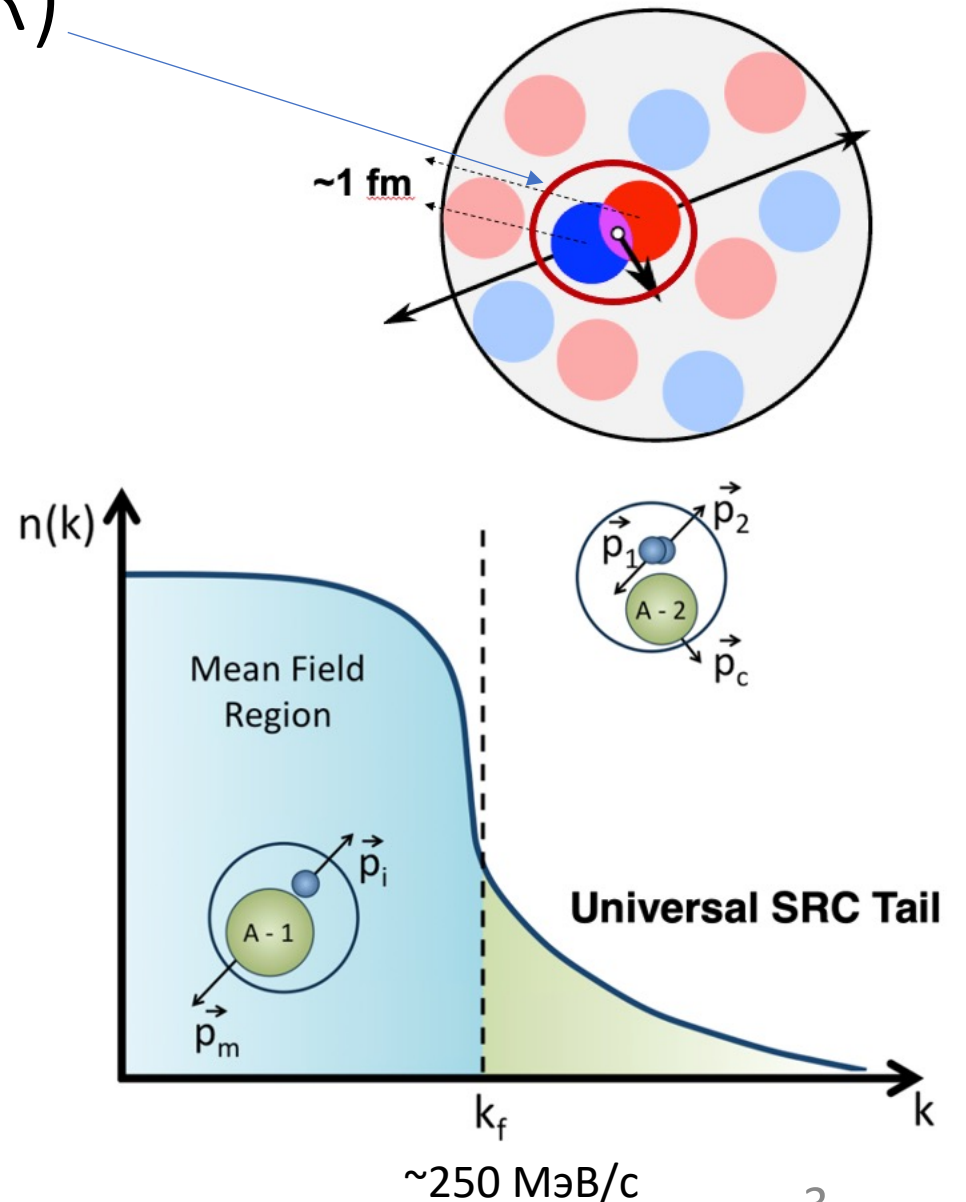
BM@N (Baryonic Matter at Nuclotron) – первый действующий эксперимент комплекса NICA.

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



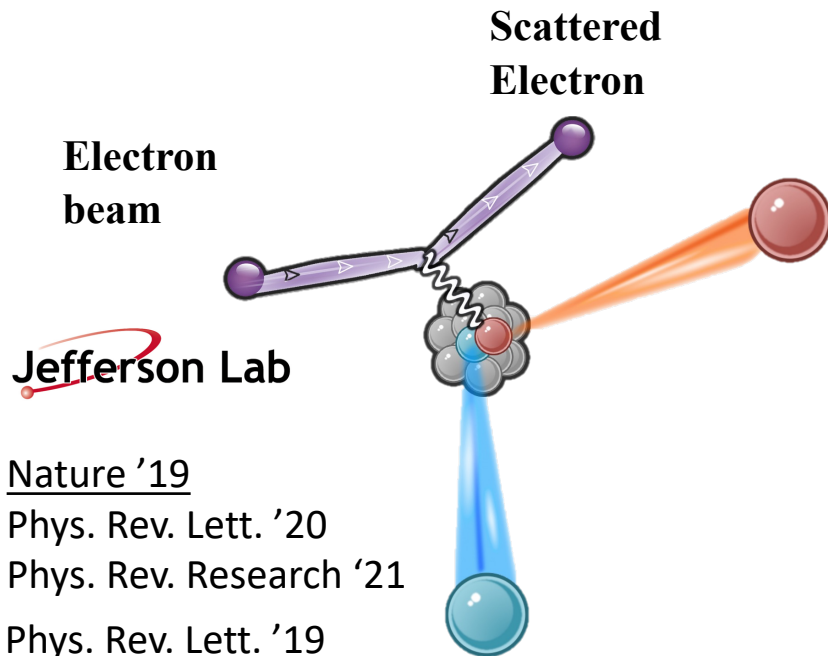
Модель Короткодействующих Двухнуклонных Корреляций (КДК)

- Нуклоны в КДК имеют большой абсолютный импульс и малый импульс центра масс пары относительно импульса Ферми
- КДК нуклоны занимают высокоимпульсную часть однонуклонного распределение импульсов в ядре
- 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

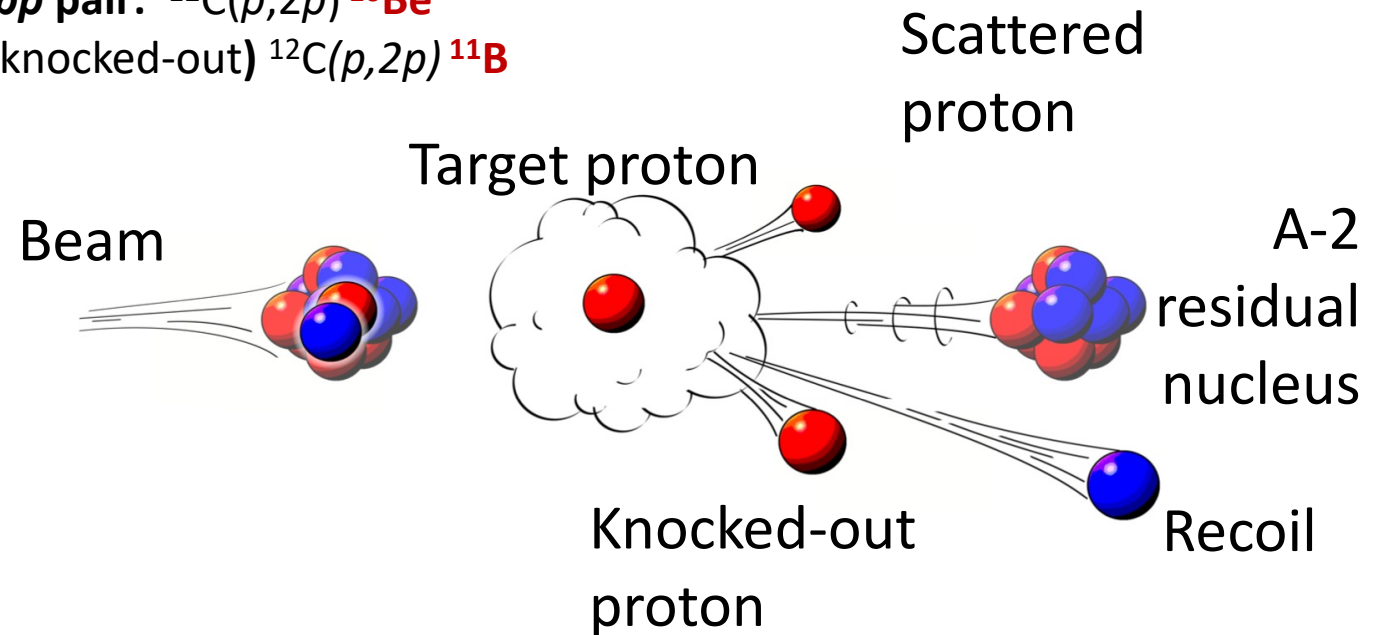
2022:
 Phys. Rev. C 105, 034001 (2022)

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

SRC на BM@N (2018г)

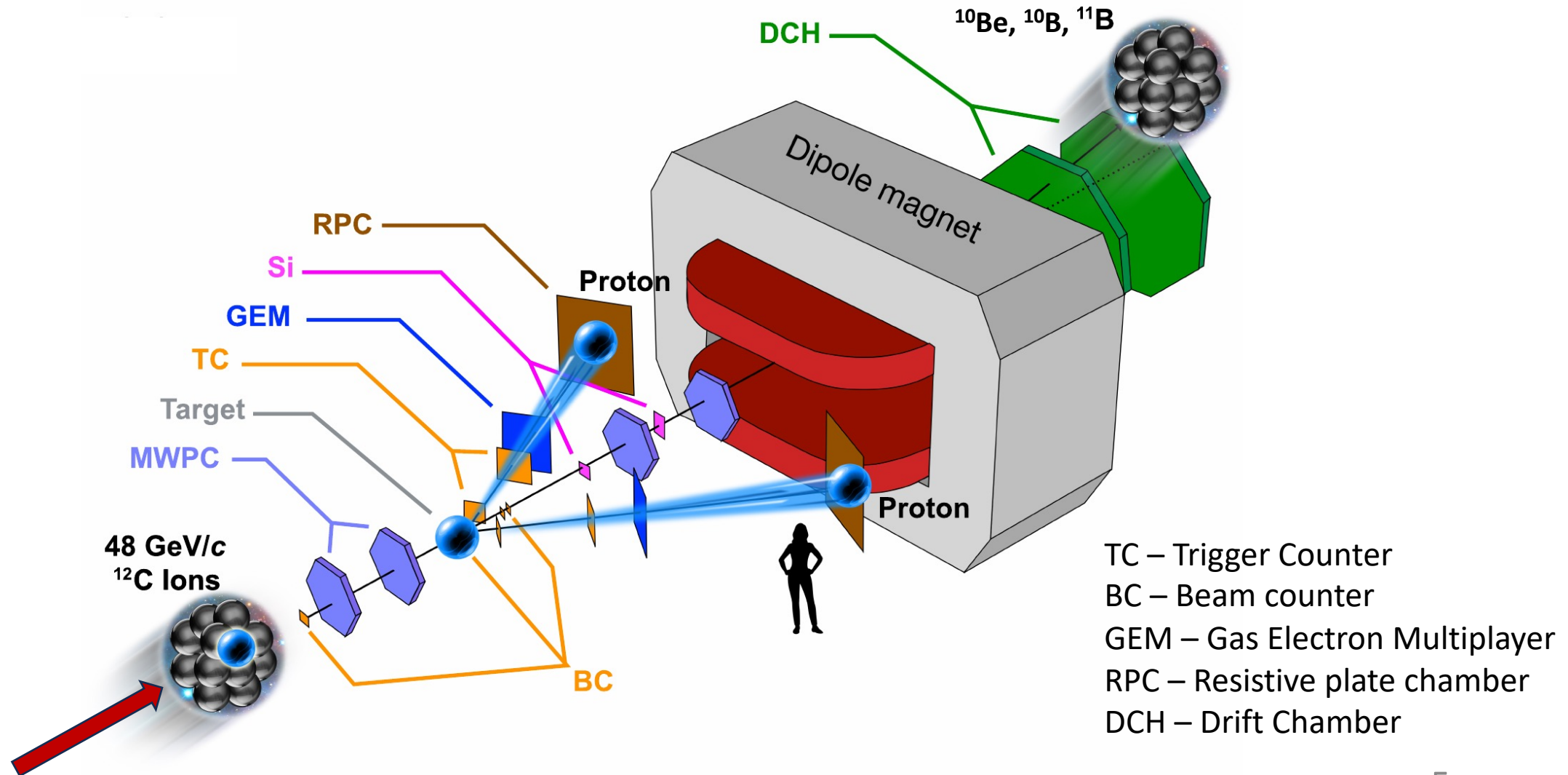


np pair: $^{12}\text{C}(p,2p)^{10}\text{B}$
pp pair: $^{12}\text{C}(p,2p)^{10}\text{Be}$
 A-1(knocked-out) $^{12}\text{C}(p,2p)^{11}\text{B}$



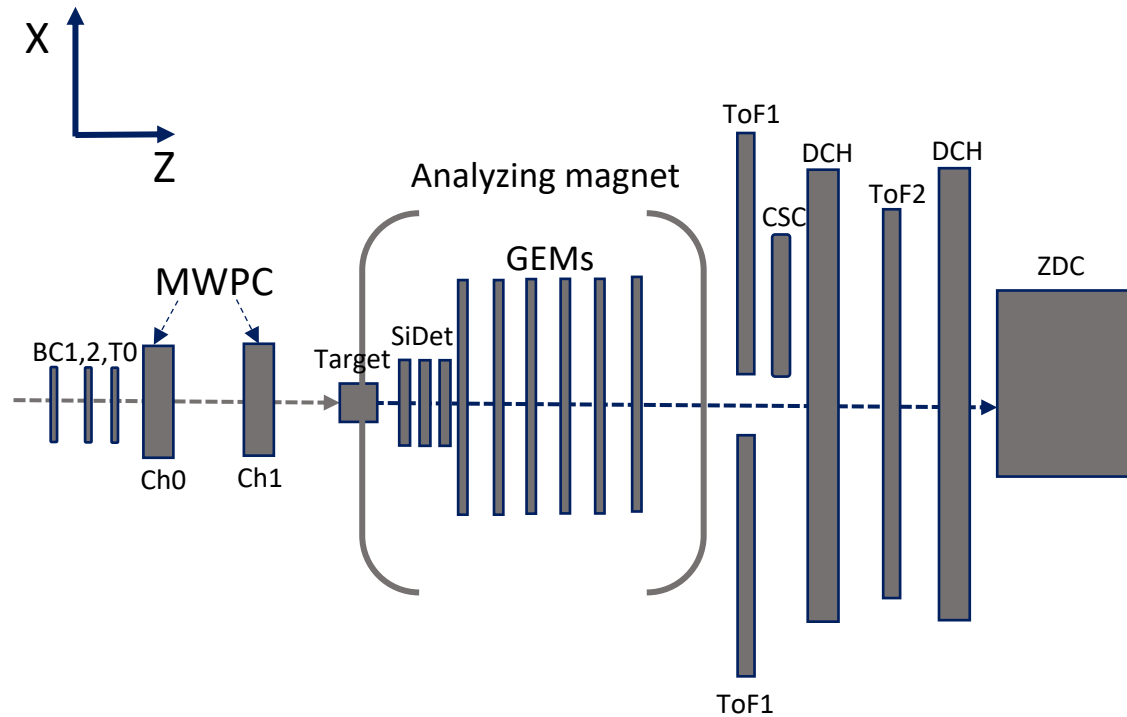
M. Patsyuk, J. Kahlbow, G. Laskaris, M. Duer, **V. Lenivenko**, et al., *Unperturbed inverse kinematics nucleon knockout measurements with a carbon beam*, **Nature Physics**, **17**, 693 (2021)

Экспериментальная установка SRC на BM@N



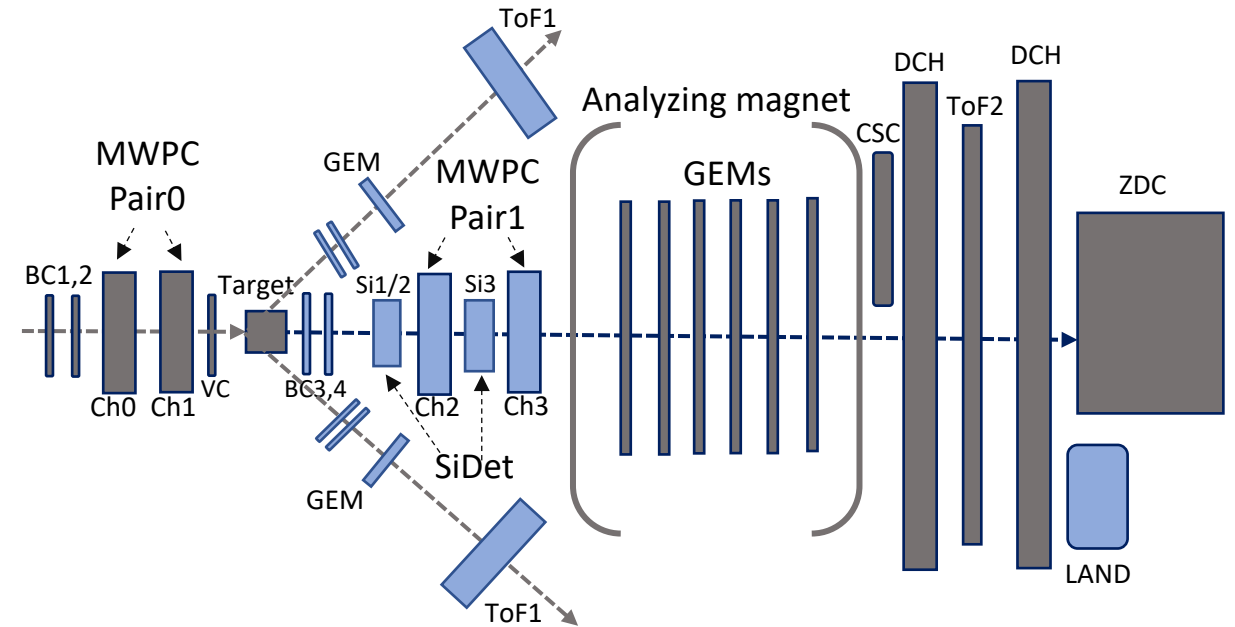
Конфигурация детекторов в 2018г

BM@N



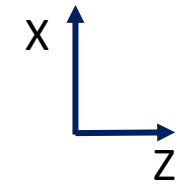
SRC на BM@N

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



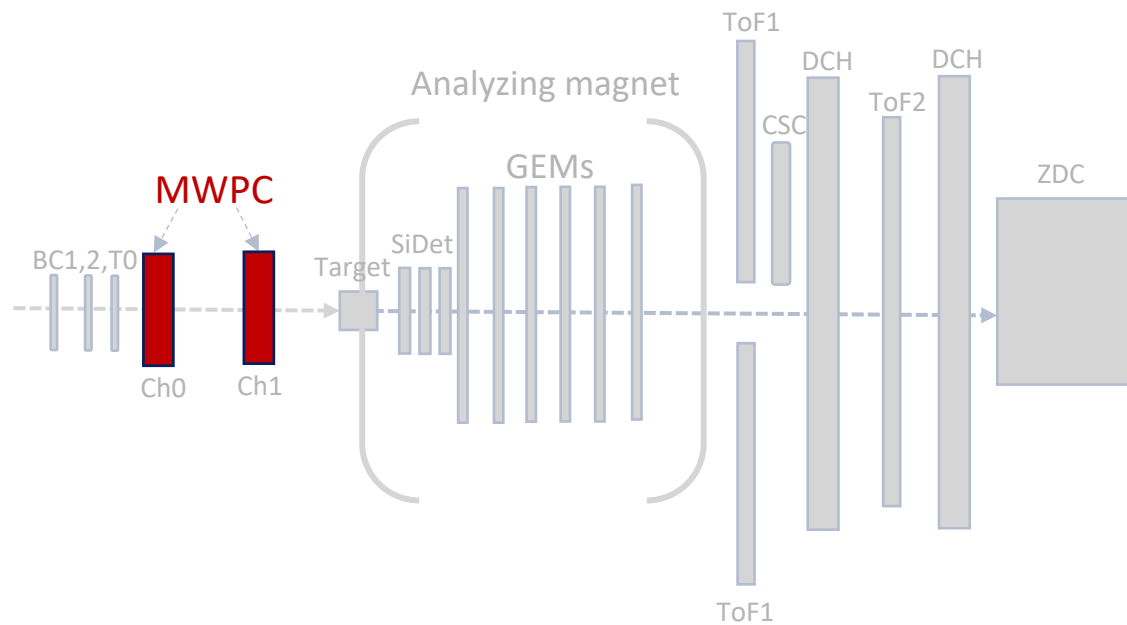
Конфигурация детекторов в 2018г

BM@N



Пропорциональные камеры:

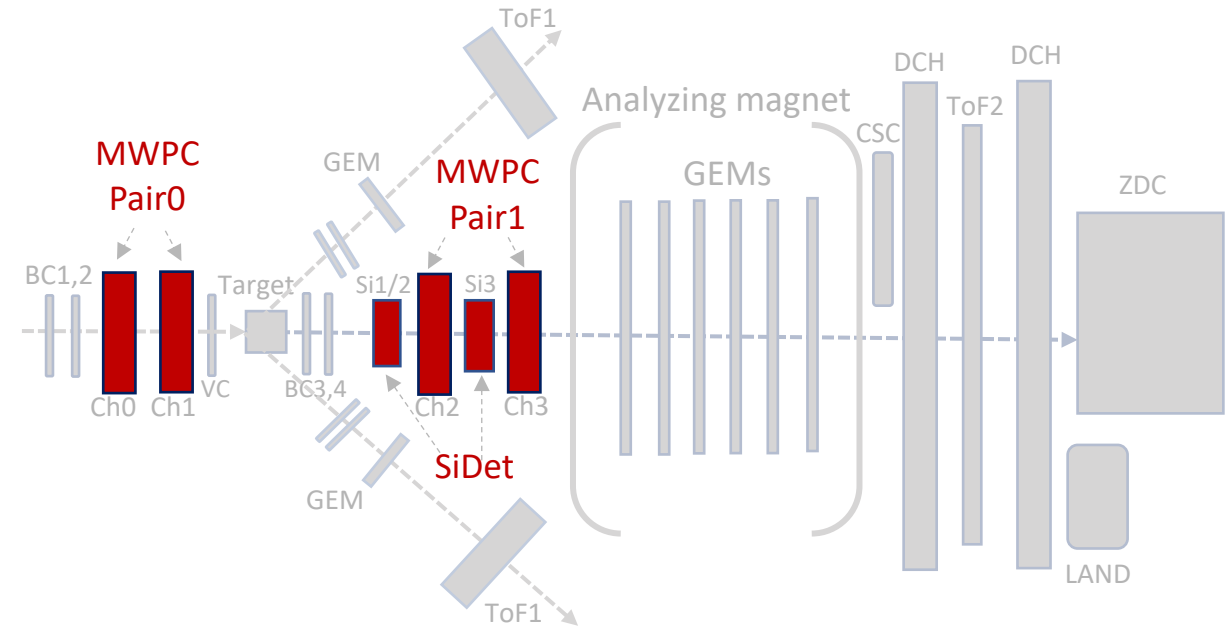
- Две MWPC (Ch0 и Ch1) до мишени



SRC на BM@N

Пропорциональные камеры и кремниевые детекторы:

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



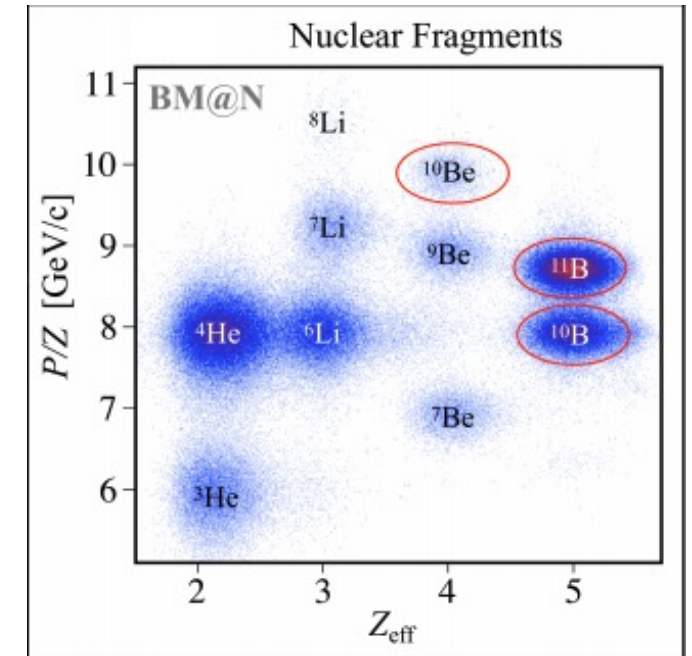
Актуальность исследования

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

В основе реконструкции треков до магнита 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

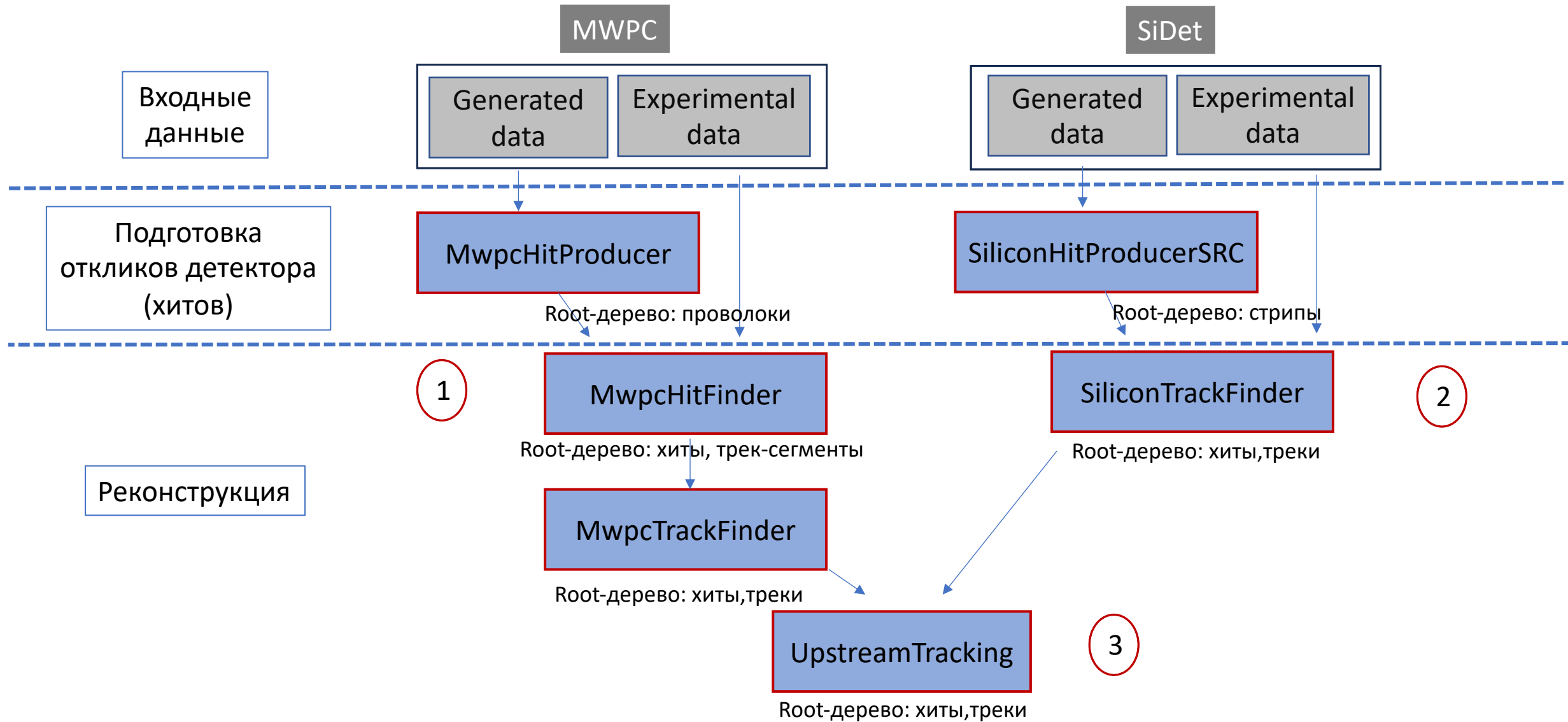
Основные цели и задачи

Цель работы включает в себя разработку методов и комплексов программ реконструкции траекторий заряженных частиц в системе камер *MWPC* и детекторов *SiDet*, а также идентификацию ионов конечного состояния, что является неотъемлемой частью численного анализа данных эксперимента *SRC* на установке *BM@N* 2018 года.

Для достижения поставленной цели требовалось решить следующие основные задачи:

- **разработка алгоритмов** реконструкции траекторий заряженных частиц для системы камер *MWPC* и детекторов *SiDet* для эксперимента *SRC* на установке *BM@N*;
- **обеспечение возможности** работы с моделированными данными для данных детекторов, а также **тестирование** и проверка алгоритмов реконструкции треков в системах камер *MWPC* и детекторов *SiDet* на **экспериментальных и моделированных данных**;
- **разработка программного обеспечения** *BmnRoot* эксперимента *BM@N* и оформление комплекса программ в виде классов восстановления траекторий заряженных частиц, а также моделирование отклика в камерах *MWPC* и детекторах *SiDet*, т.е. унификация реконструкции на экспериментальных и моделированных данных;
- **разработка метода идентификации ядер** в конечном состоянии для эксперимента *SRC* на установке *BM@N* по прямым отрезкам траекторий ядер до и после анализирующего магнита с применением алгоритмов, направленных на минимизацию многомерного функционала, основанных на программе FUMILI.

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



MWPC

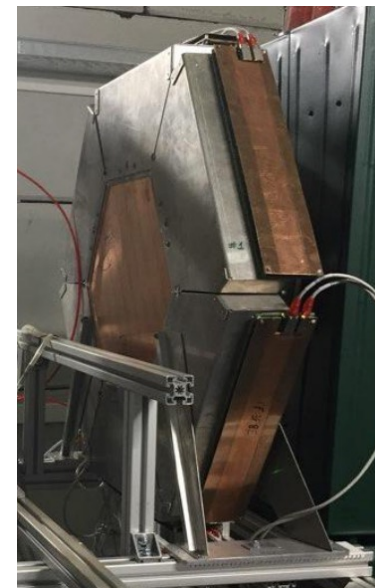
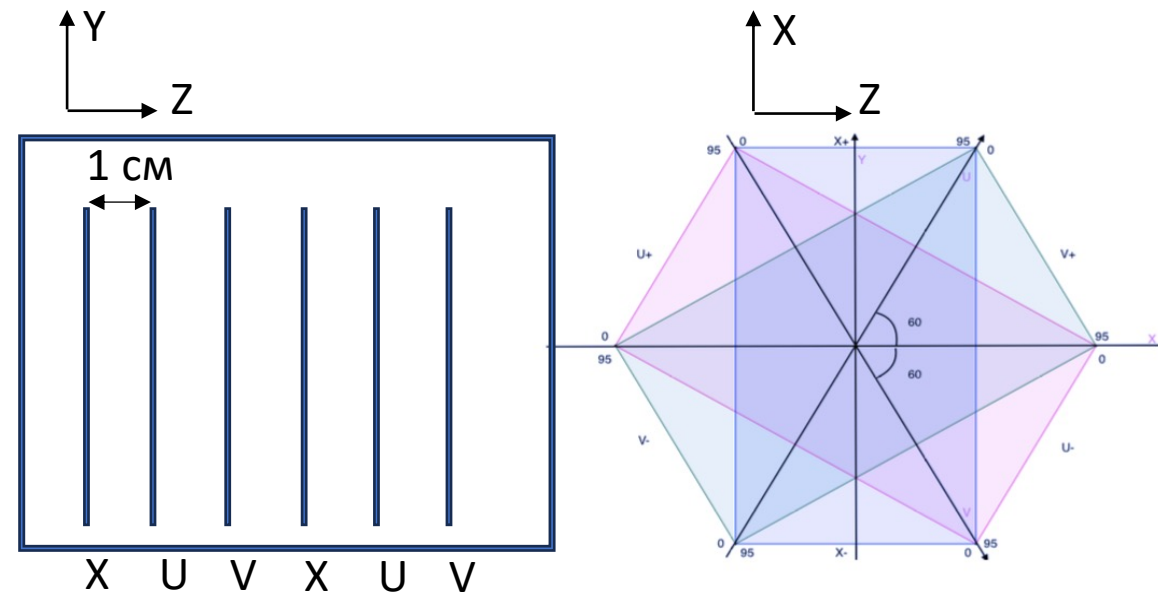
- Каждая камера имеет 6 плоскостей:
две X, две U и две V, с углами $0^\circ, \pm 60^\circ$.
- Шаг между проволоками $dw = 2.5 \text{ мм}$
- Координатное разрешение $\sigma_i = \frac{dw}{\sqrt{12}} = 0.72 \text{ мм}$
- Координаты связаны соотношением:
$$y = (U+V)/\sqrt{3}, U = \frac{(x+y)\sqrt{3}}{2}, V = \frac{(x-y)\sqrt{3}}{2},$$

$$V + U - X = 0$$

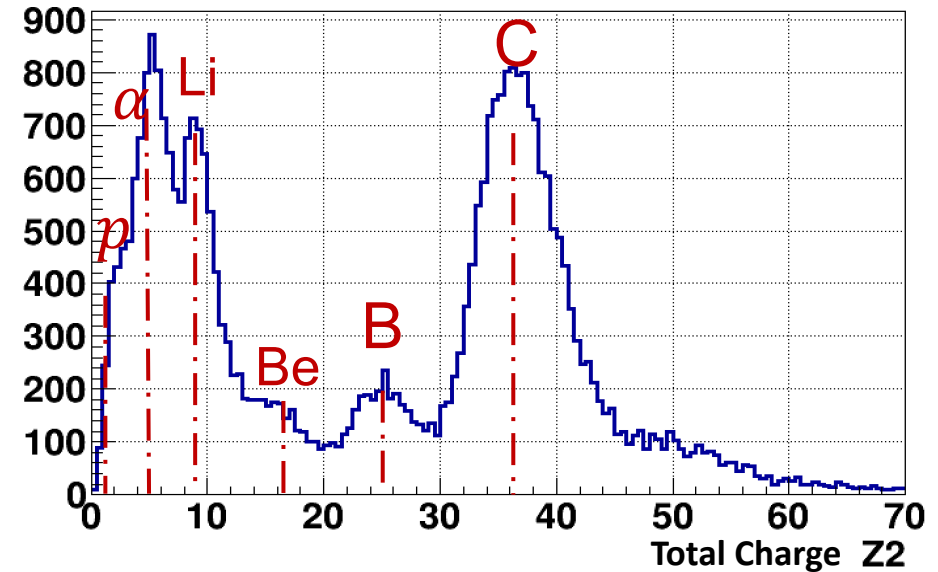
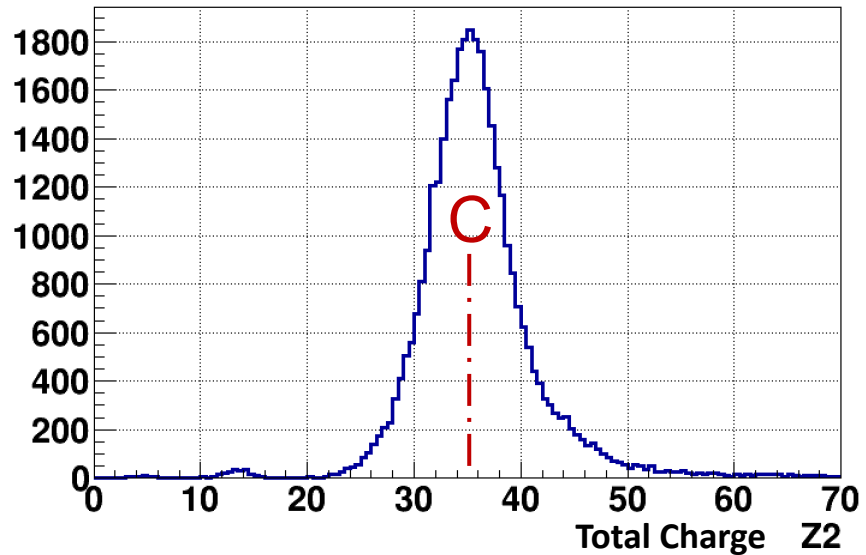
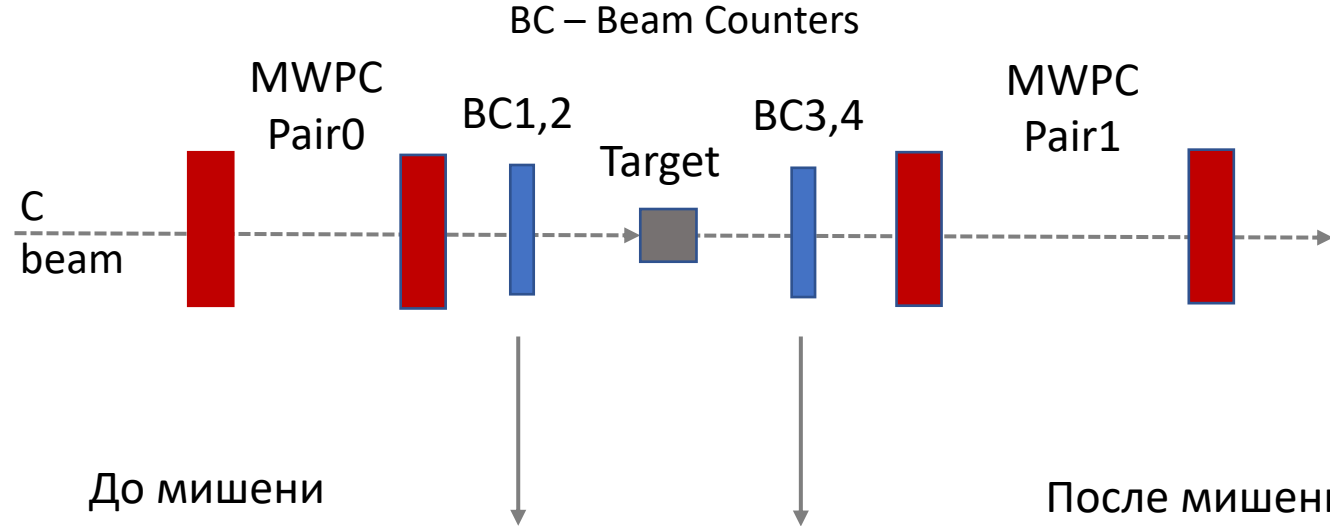
- Между камерами в паре $\sim 1 \text{ м}$

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

➤ Разработаны разные способы поиска хитов до и после мишени
в зависимости от времени прихода сигнала на проволоки

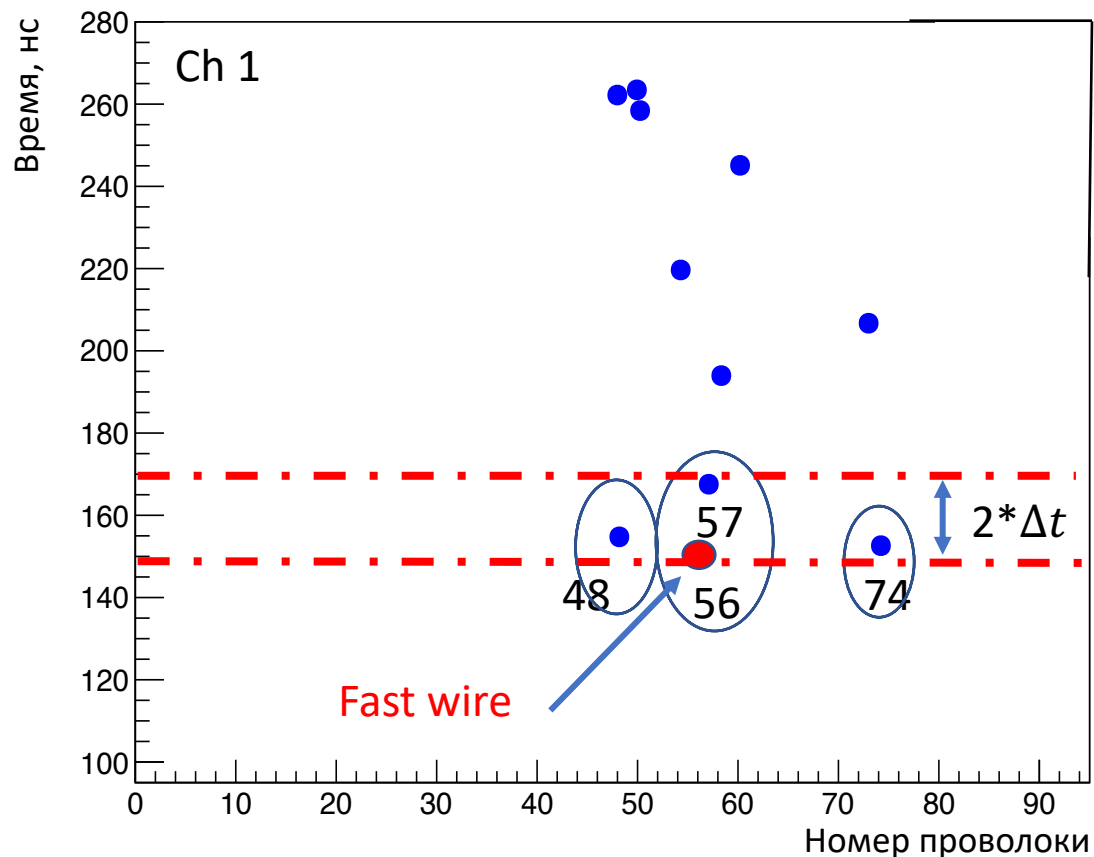


Разное количество частиц до и после мишени



Run 3338, H2 target

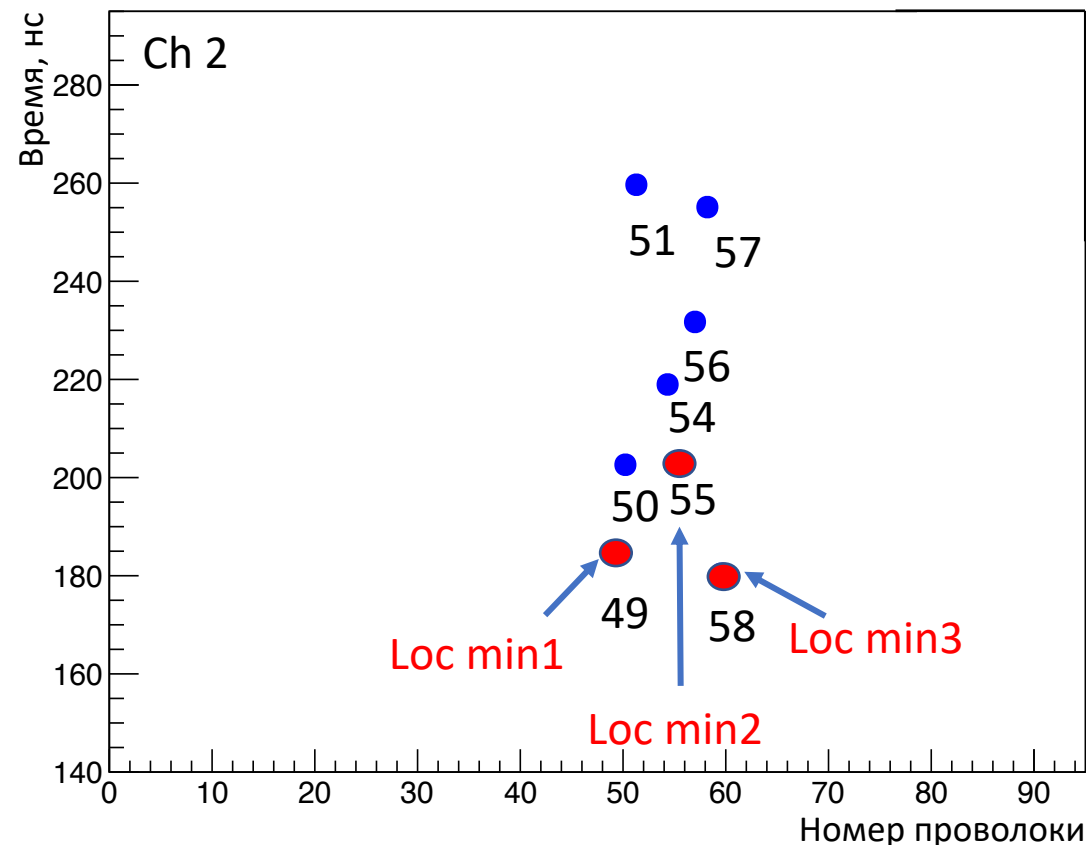
Два алгоритма поиска кластеров в MWPC до и после мишени



Камеры до мишени

Цель: реконструкция одного трека (ион углерода)

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



Камеры после мишени

Цель: реконструкция нескольких треков

Координата кластера определяется временным локальным минимумом

Алгоритм реконструкции треков 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 N = 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 $\sum \frac{d_i^2}{\sigma_i^2} \rightarrow \min$.

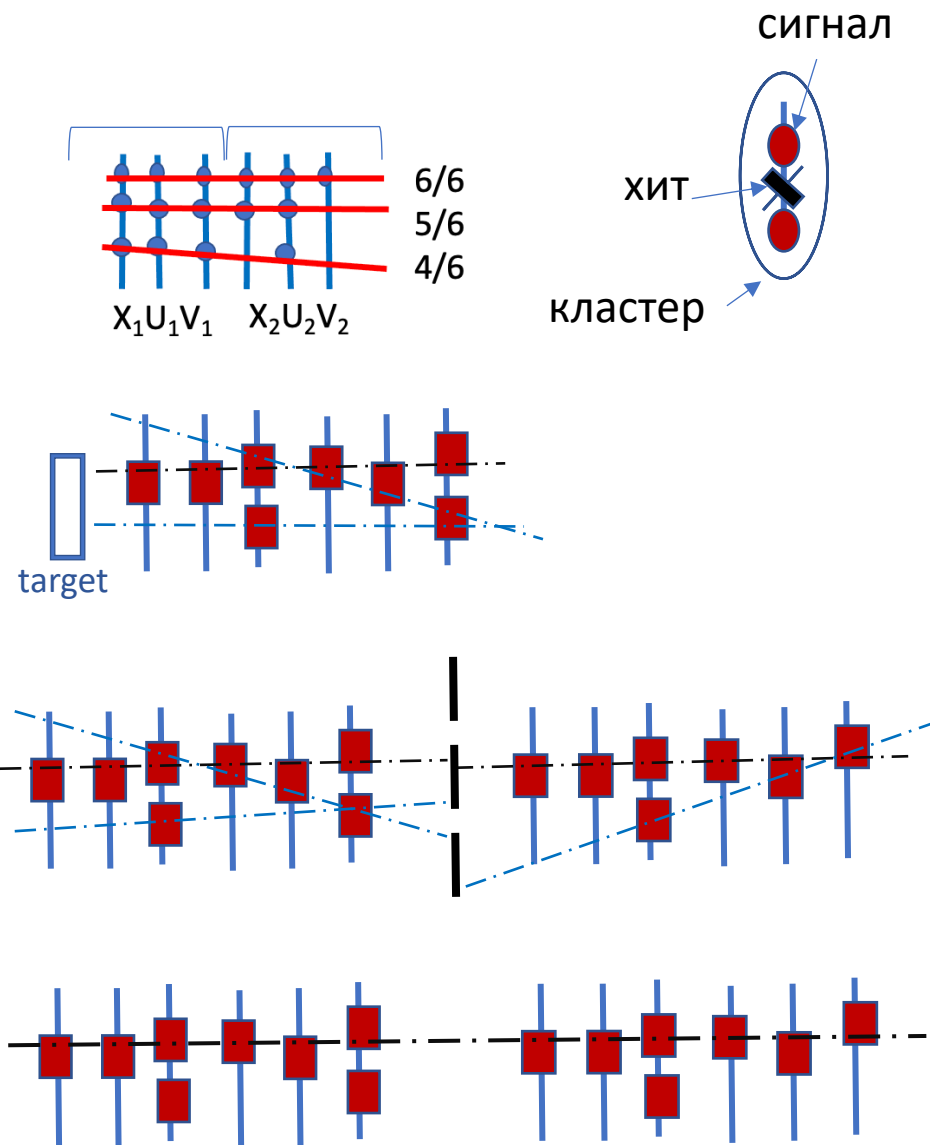
где d_i - разность между измеренной и аппроксимированной координатой в i-й плоскости.

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 Проверка экстраполированного трека на попадание в мишень.

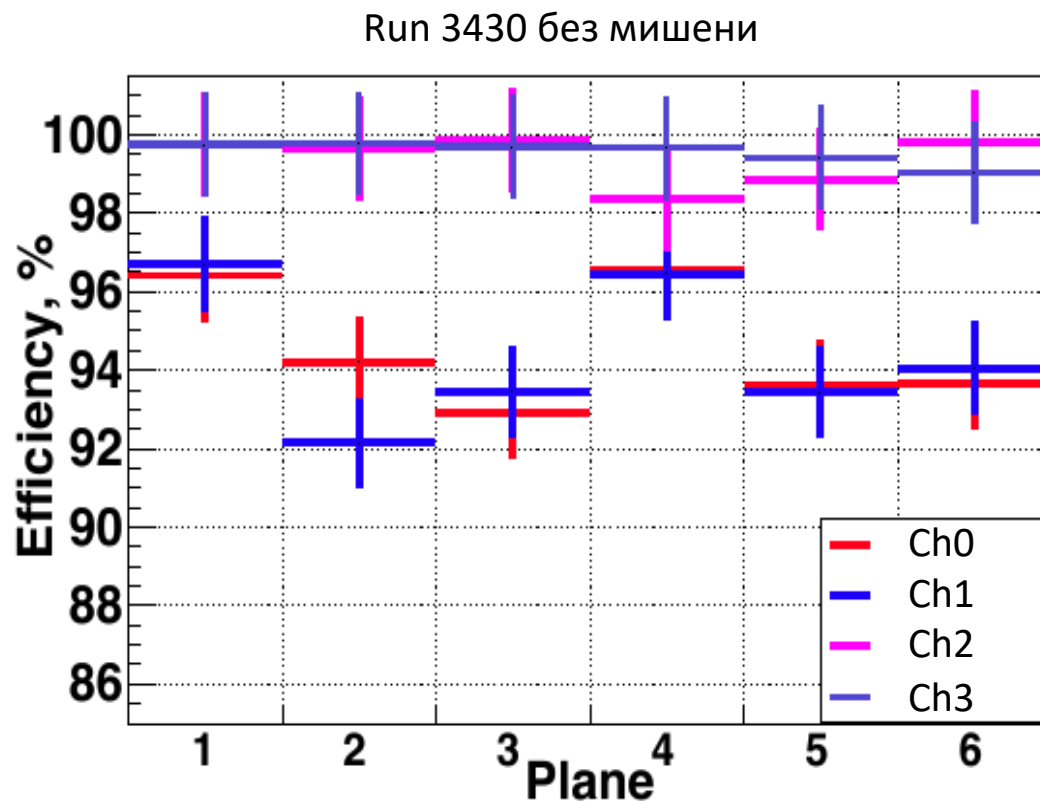
3. Сопоставление сегментов между разными камерами в плоскости между ними с помощью критерия: $\chi_m^2 = \frac{dx^2}{\sigma_x^2} + \frac{dy^2}{\sigma_y^2}$; где dx, dy – разницы между координатами проекций параметров трек-сегментов в среднюю плоскость между камерами, а σ_i – ширины их распределения.

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



Эффективность восстановления хитов на плоскость в MWPC

экспериментальные данные (SRC 2018г)



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

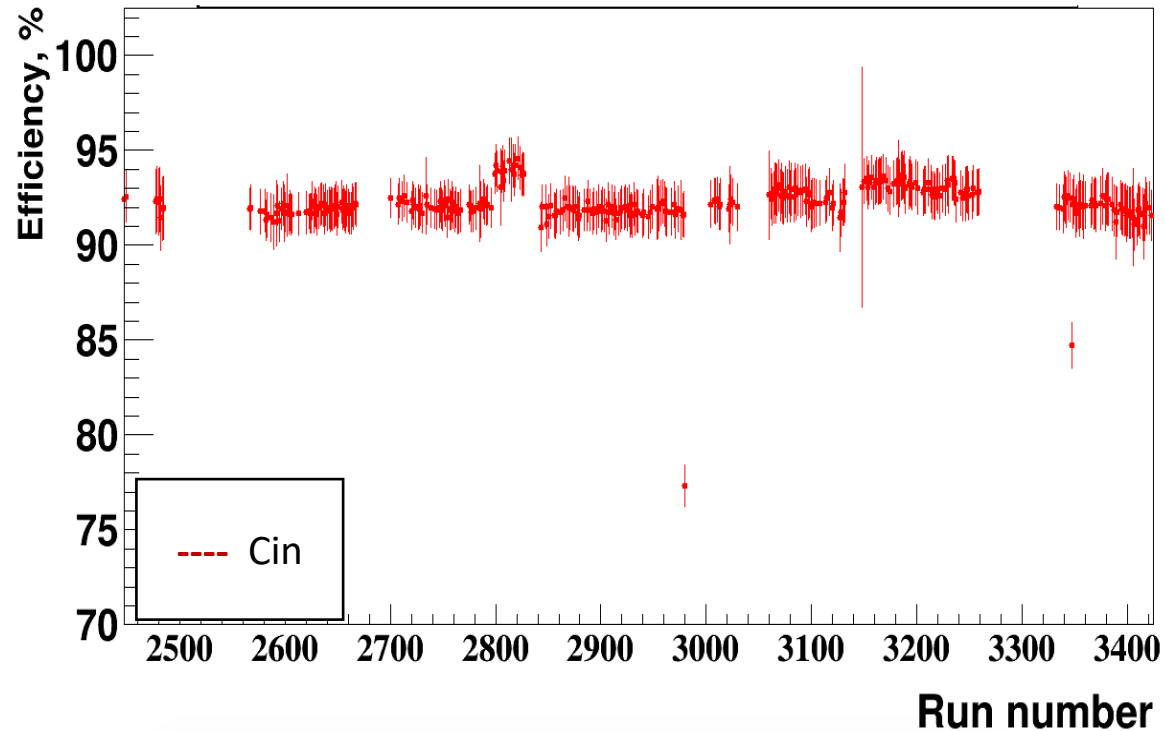
$$Eff(Ch2,3) = 98.9 \pm 0.5\%$$

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

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

Эффективность восстановления треков в MWPC относительно другой дет. системы

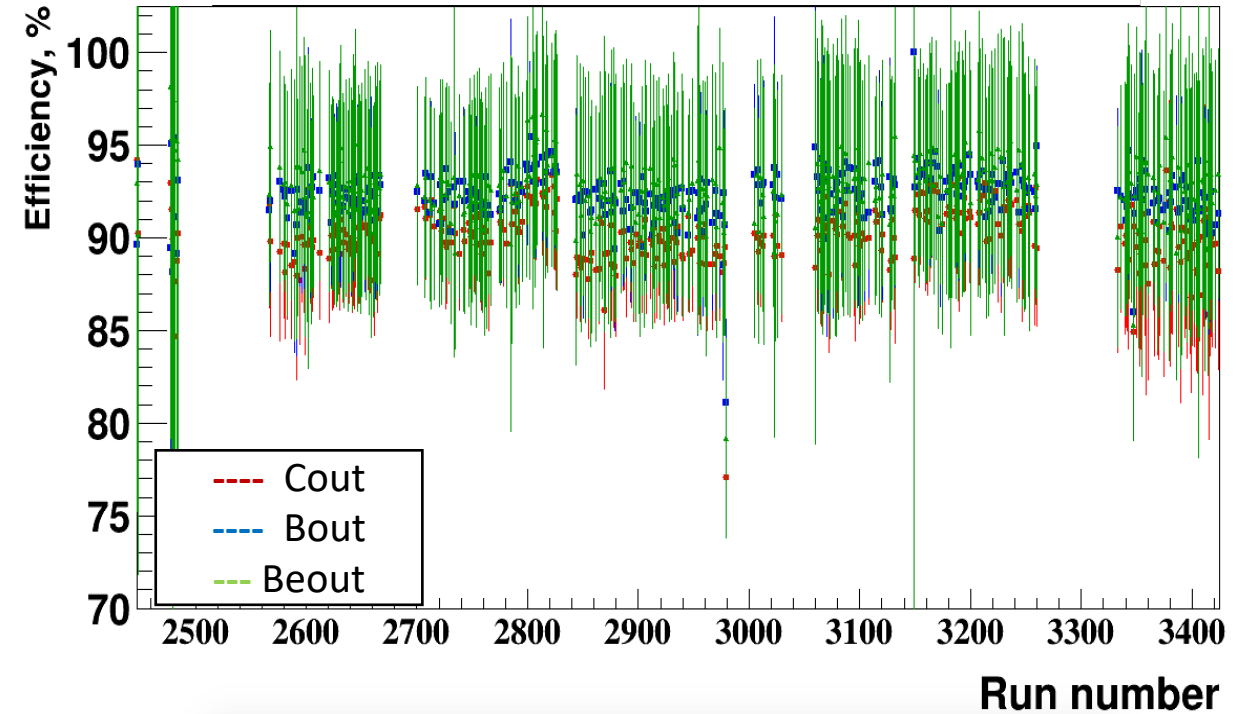
экспериментальные данные (SRC 2018г)



$$\frac{N \text{ ev Cin} \cap \text{MWPC(Pair0)}}{N \text{ ev Cin}}$$

--- Cin

$$\text{Eff}_{\text{Cin}}(\text{Pair0}) = 92.2 \pm 0.1 \%$$



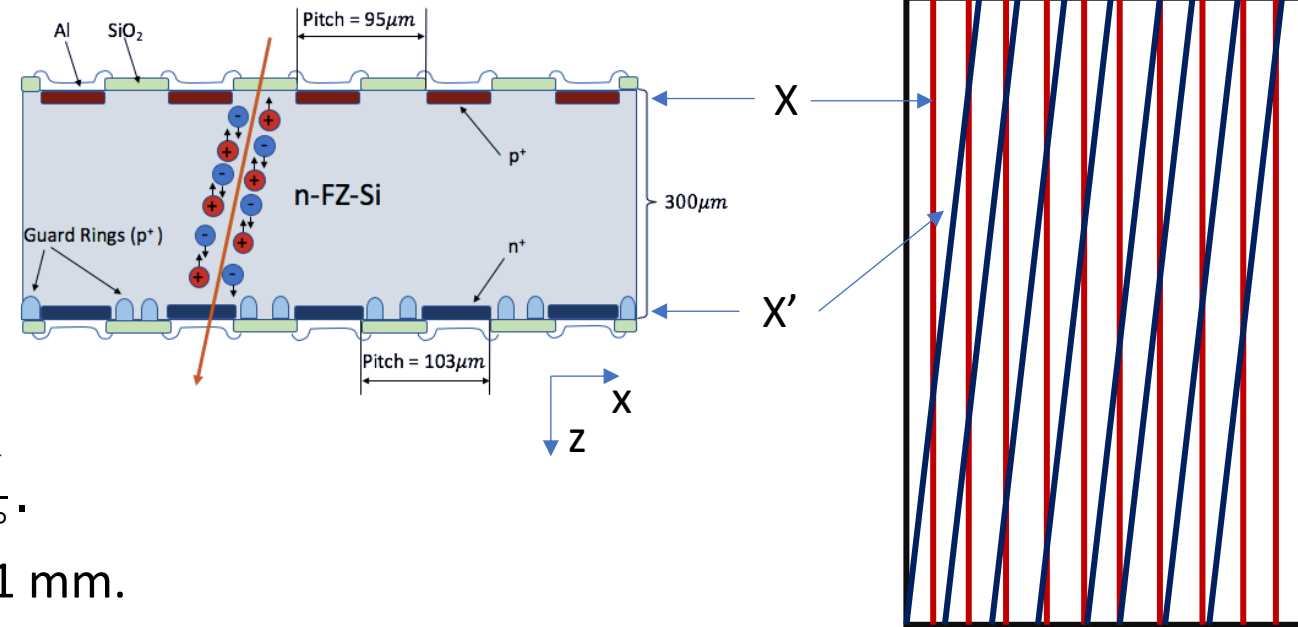
$$\frac{N \text{ ev MWPC(Pair0)} \cap \text{MWPC(Pair1)}}{N \text{ ev MWPC(Pair0)}}$$

--- Cout
--- Bout
--- Beout

$$\begin{aligned} \text{Eff}_{\text{CinCout}}(\text{Pair1}) &= 90.4 \pm 0.3 \% \\ \text{Eff}_{\text{CinBout}}(\text{Pair1}) &= 92.3 \pm 0.4 \% \\ \text{Eff}_{\text{CinBeout}}(\text{Pair1}) &= 92.6 \pm 0.5 \% \end{aligned}$$

SiDet

- Каждая станция имеет:
прямые X стрипы с шагом $d = 95 \mu\text{m}$,
наклонные $X'(2.5^\circ)$ стрипы, $d = 103 \mu\text{m}$
- С каждого сработавшего стрипа считывается амплитуда сигнала A_i .
- Координаты связаны соотношением: $Y = \frac{X' - X}{\tan 2.5^\circ}$.
Координатное разрешение $\sigma_{XX'} \sim 50 \mu\text{m}$; $\sigma_Y \sim 1 \text{ mm}$.



Проблема:

- Станции были поставлены единственным возможным 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)



Алгоритм реконструкции треков в системе SiDet

1. Чтение сигналов со стрипов и создание кластеров.

Кластер – объединение соседних сработавших стрипов (X или X' слоя).

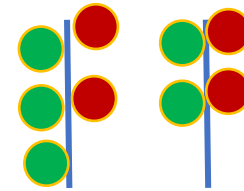
Хит – центр кластера, координата которого рассчитывается как центр тяжести: $CoG = \frac{\sum^N A_i * i}{\sum^N A_i}$,

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)

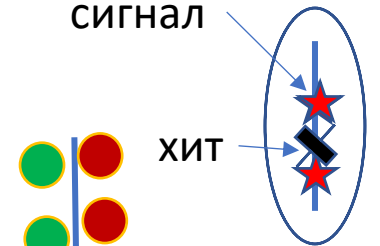
X X'(2.5°)



сигнал

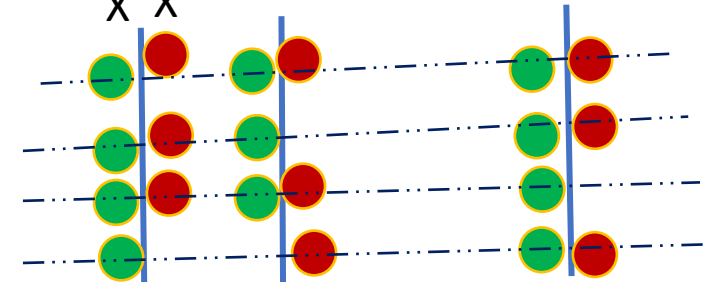
ХИТ

кластер



X X'

target



Case1

Case2

Case3

Case4

2

Алгоритм реконструкции треков в системе SiDet

3. Создание кандидатов в треки и выбор лучшего.

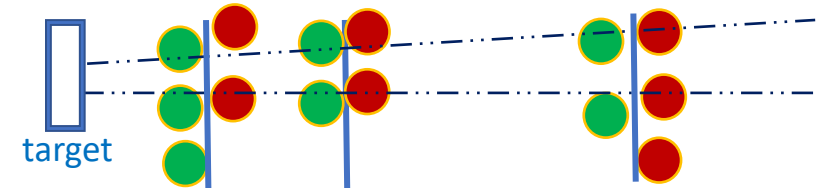
Вычисление параметров кандидата в треки ($N = 6, 5, 4$ хитов)

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 $N=4$);

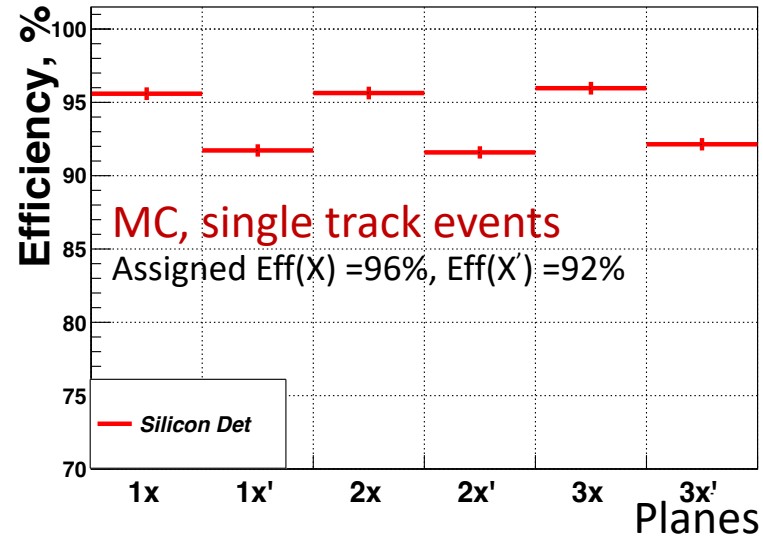
4. Проверка экстраполированного трека на попадание в мишень



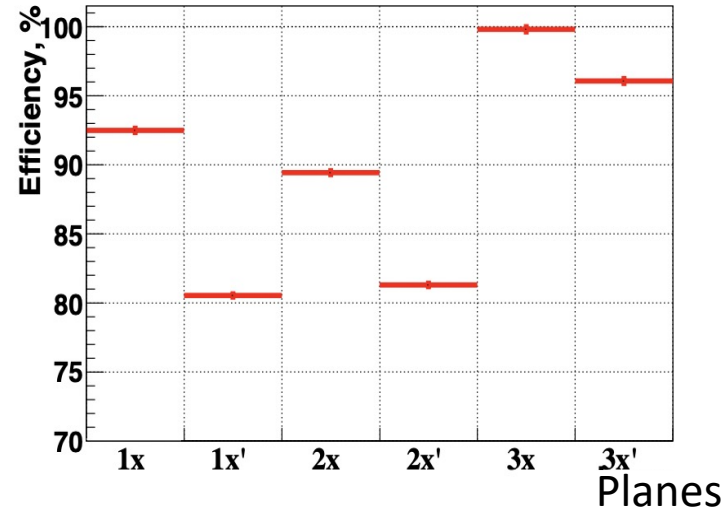
2

Эффективность восстановления хитов/треков в SiDet относительно другой дет. системы экспериментальные данные SRC 2018г

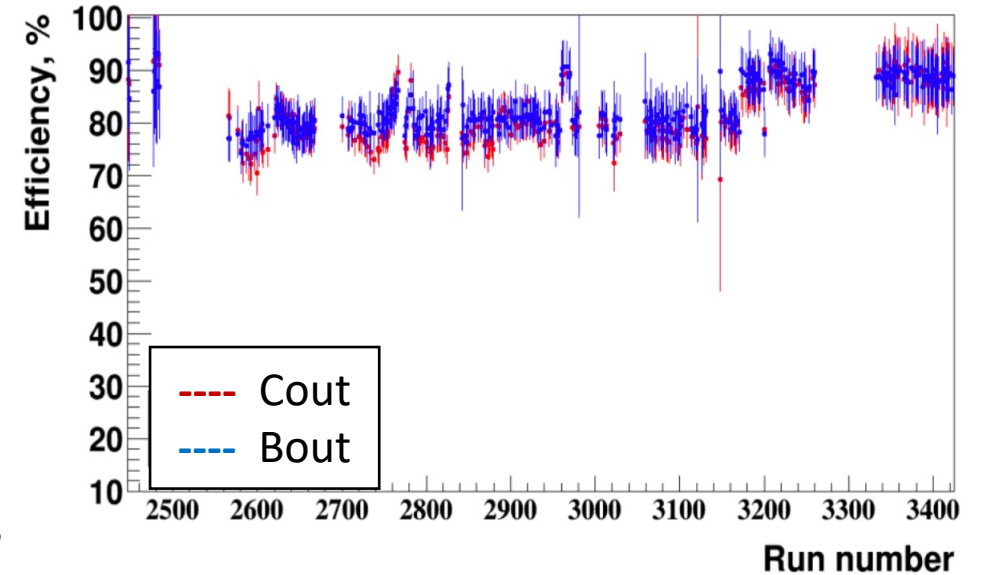
Проверка алгоритма на данных моделирования



Эффективность реконструкции хитов на плоскость,
Run 3430 без мишени



Эффективность реконструкции SiDet треков



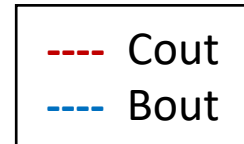
MC data:

Алгоритм возвращает
заданную эффективность
→ реконструкция работает
корректно

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

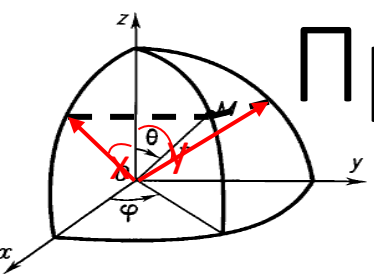
$$Eff(Hit) = 90.0 \%$$

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



$$Eff_{CinCout} = 81.5 \pm 0.7 \%$$

$$Eff_{CinBout} = 82.6 \pm 0.7 \%$$



Процедура математического выравнивания

Уравнение прямой $X(z) = T_x * Z + X_0$, $Y(z) = T_y * Z + Y_0$

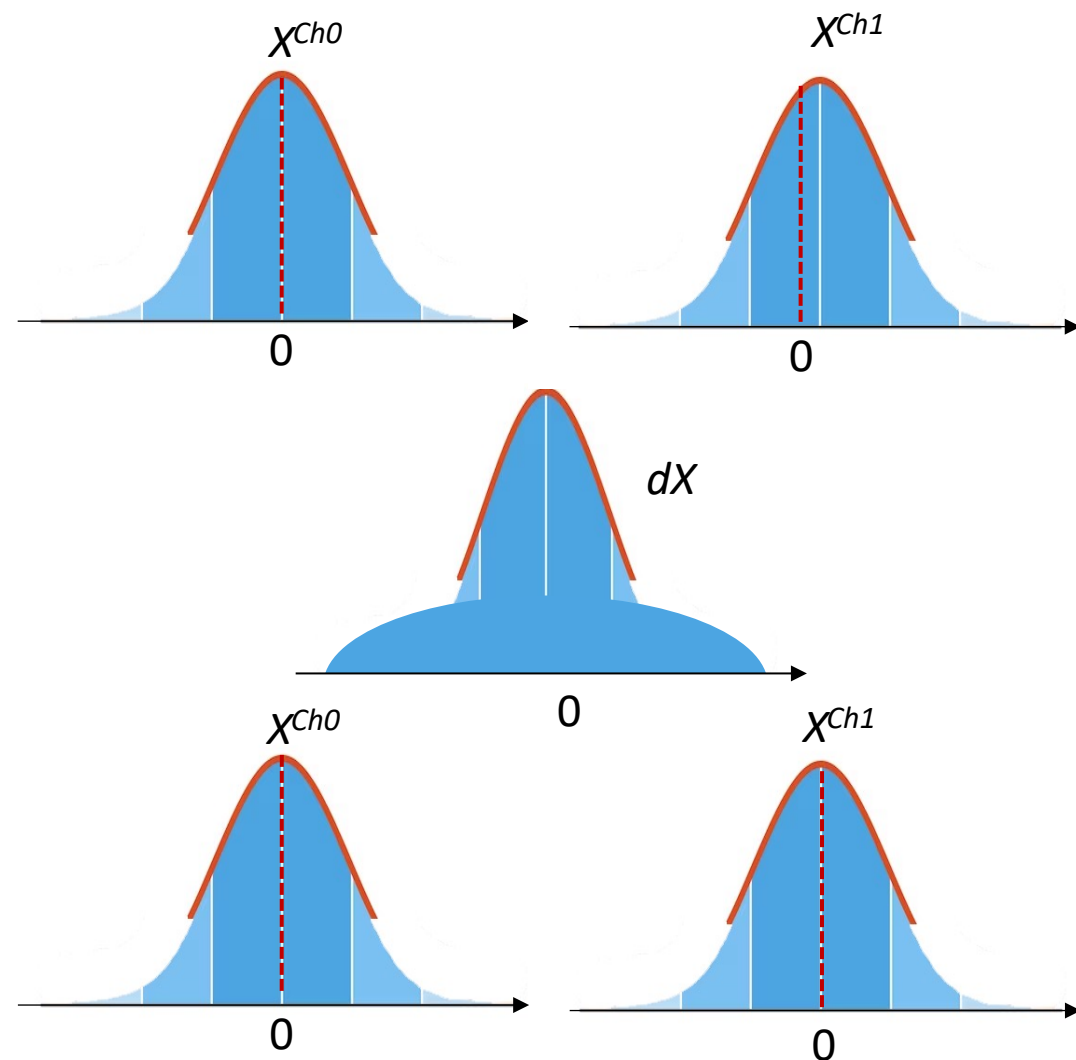
1. Выравнивание координат трек-сегментов

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

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

- 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:

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



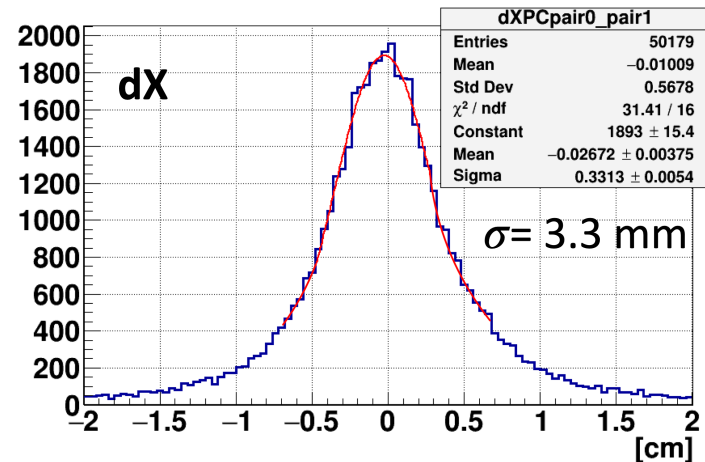
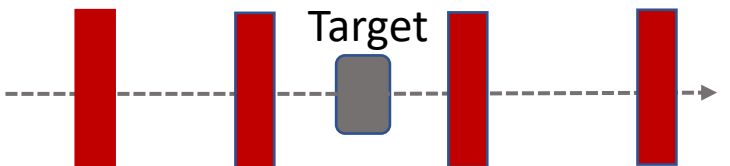
2. Выравнивание углов трек-сегментов

Данная процедура повторяется для MWPC(Pair1), между MWPC(Pair0) и MWPC(Pair1), SiDet и MWPC(Pair1) и т.д.

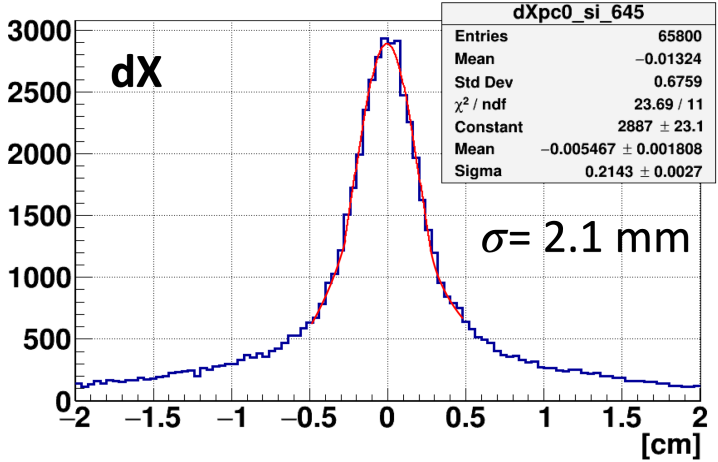
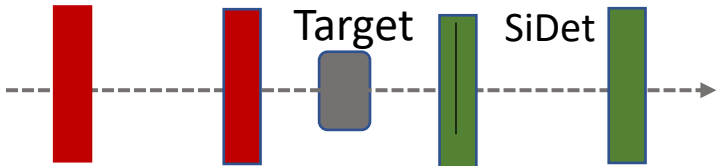
Результат выравнивания систем детекторов друг относительно друга

Треки экстраполированы в Z_{target}

MWPC(Pair0 – Pair1) matching

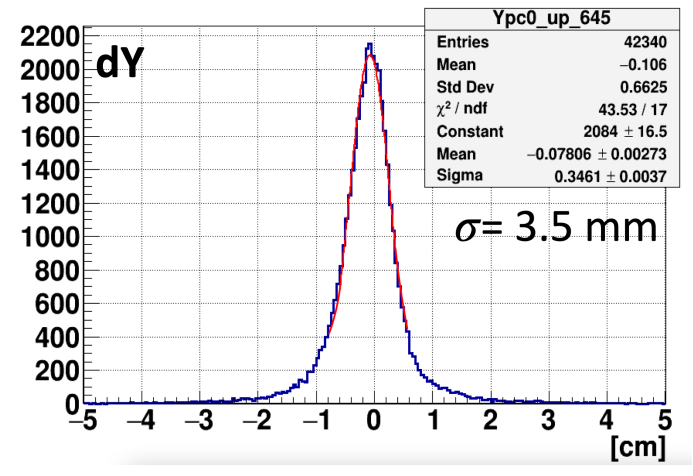
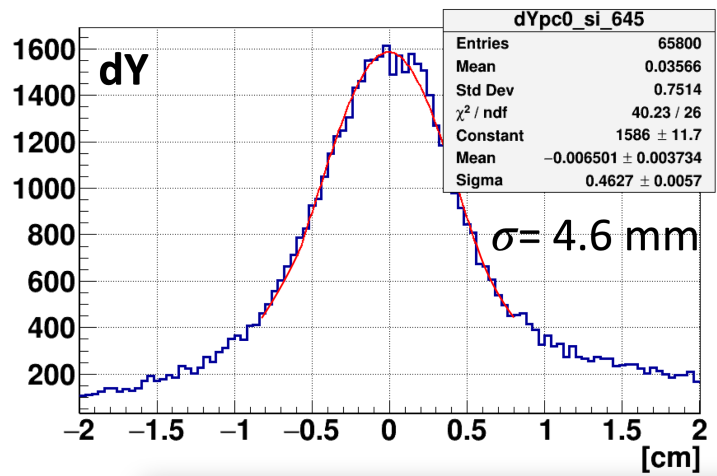
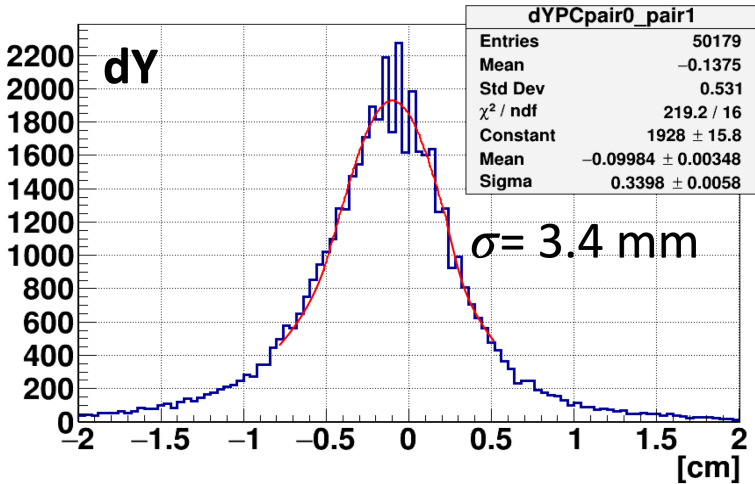
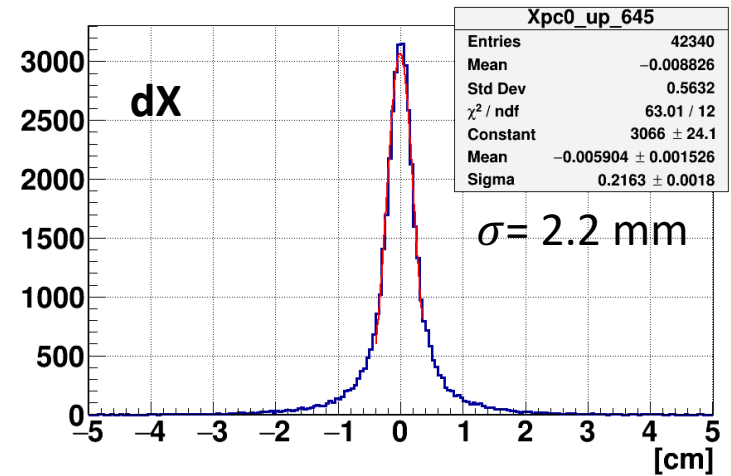
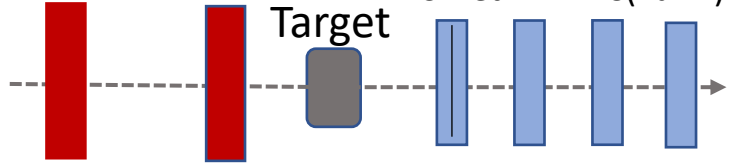


MWPC(Pair0) – SiDet matching



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

SiDet+MWPC(Pair1)



3 Алгоритм реконструкции Upstream-трека : MWPC(Pair1)+SiDet

1. Поиск соответствия Si-треков и MWPC(Pair1)-треков, минимальное расстояние в средней плоскости $Z_m = -271$ см с помощью критерия $\chi^2_{match} = \frac{dx^2}{\sigma_x^2} + \frac{dy^2}{\sigma_y^2} + \frac{dT_x^2}{\sigma_{Tx}^2} + \frac{dT_y^2}{\sigma_{Ty}^2}$;

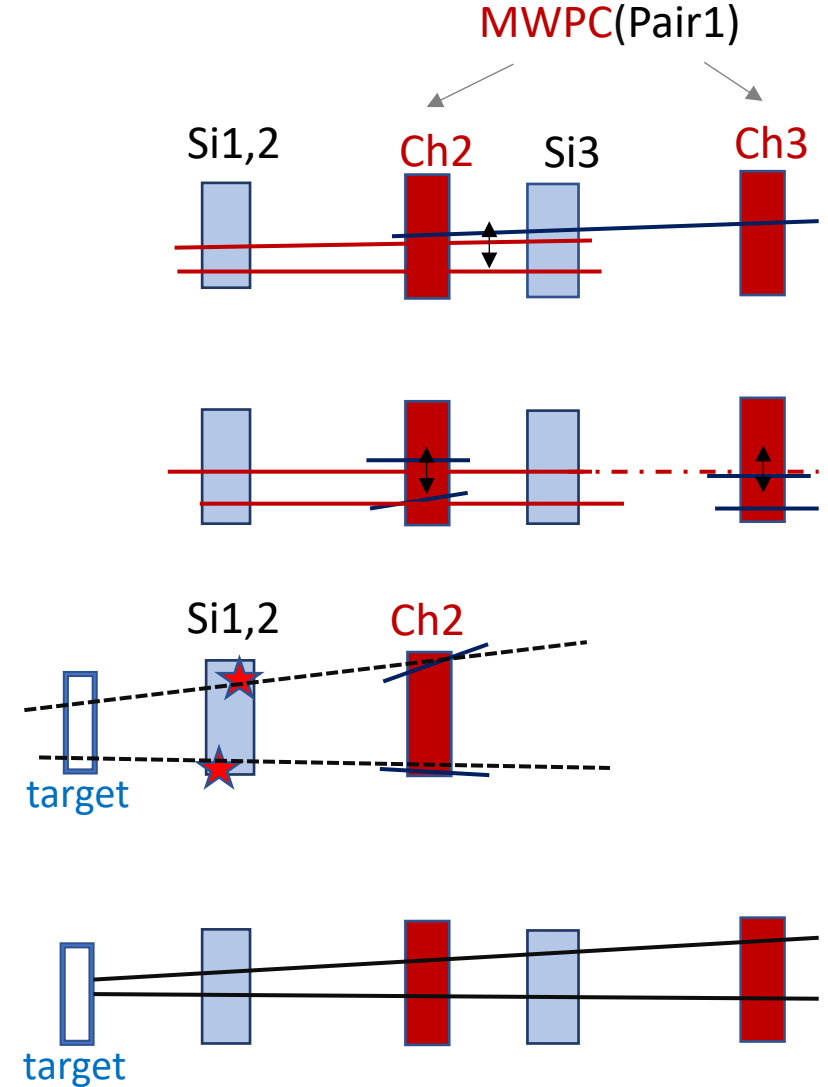
где d_x , d_y , и d_{Tx} , d_{Ty} - разницы между координатами и углами проекций параметров треков в средней плоскости, а σ_i - масштабные коэффициенты, соответствующие разбросу этих величин.

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

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.

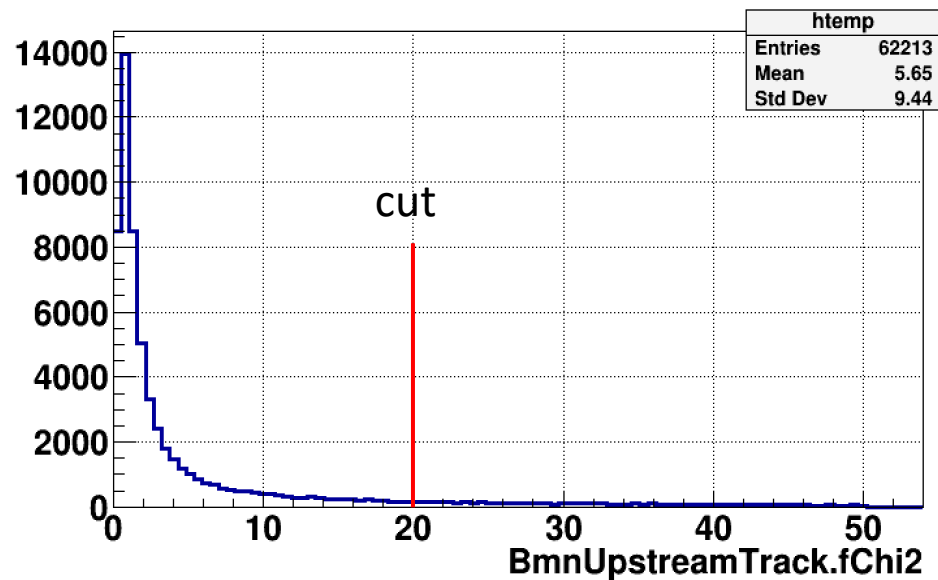
4. Аппроксимация по хитам из двух систем (Upstream track)

- Выбор лучшего трека по критерию $\chi^2 = \frac{1}{N-4} \sum \frac{d_i^2}{\sigma_i^2}$, $N > 5$
- Проверка экстраполированного трека на попадание в мишень.



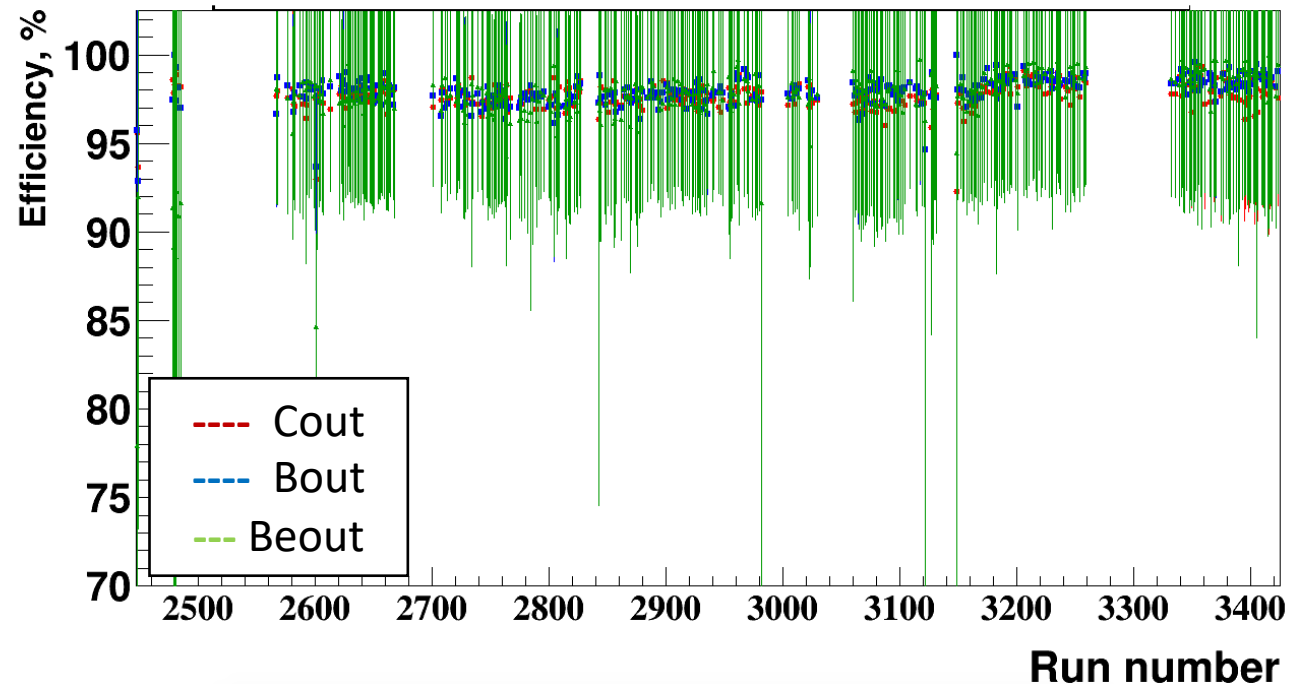
Результат восстановления Upstream-треков (MWPC+SiDet) на экспериментальных данных (SRC 2018г)

Критерий χ^2 , Run 3430 данные без мишени

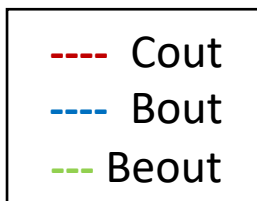


$$\chi^2 = \frac{1}{N-4} \sum \frac{d_i^2}{\sigma_i^2}, N > 5$$

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



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



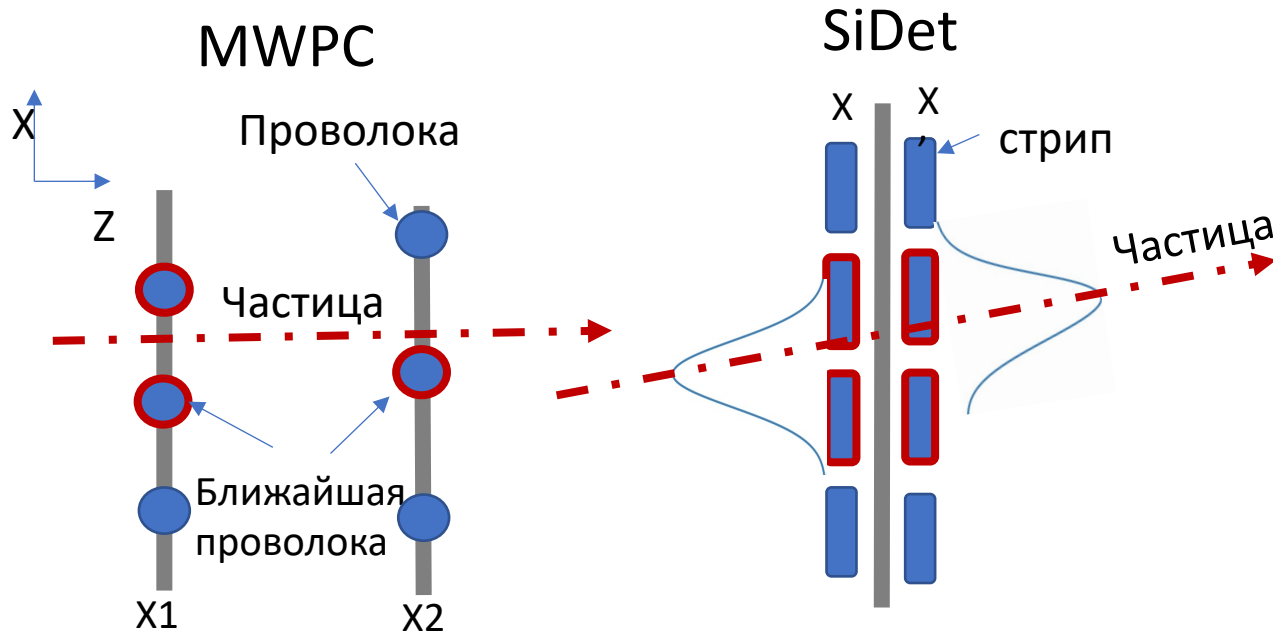
$$Eff_{CinCout} = 97.7 \pm 0.2 \%$$

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

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

Моделирование отклика детектора и эффективность реконструкции треков на данных моделирования

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

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

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

Генератор/ Детектор	Pair1 (%)	SiDet (%)	Upstream (%)
Ion [^{12}C]	99.2	100.0	99.0
DCM-SMM*	96.4	97.4	96.0

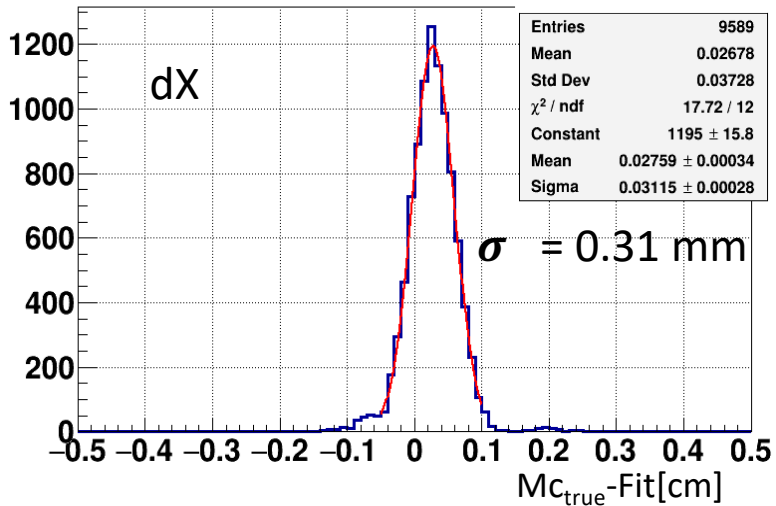
Более низкая эффективность реконструкции с генератором DCM-SMM объясняется сложной топологией генерированных физических событий.

*Dubna Cascade Model Statistical Multifragmentation Model

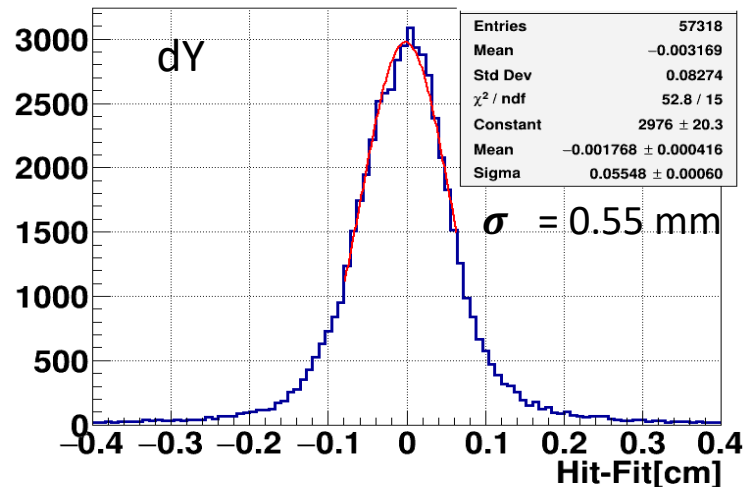
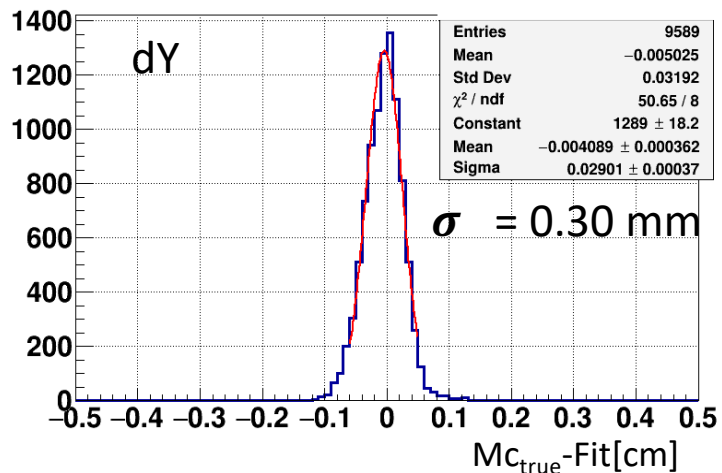
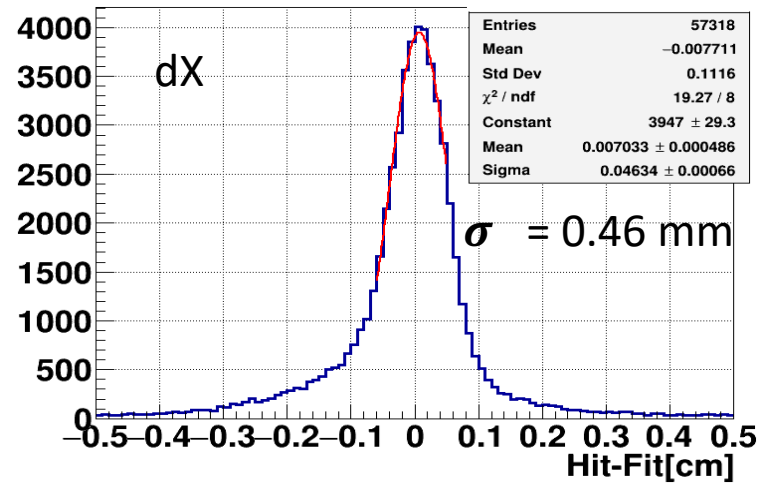
Сравнение реконструкции трек-сегментов данных моделирования и эксперимента

Пространственное разрешение в камере MWPC Ch3

MC (DCM-SMM)



Экспериментальные данные



Стандартное отклонение (Sigma) распределения для MC 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

Multi-Dimensional Fit

или поиск максимума функции правдоподобия методом линеаризации

И.Н. Силин, ЛИТ ОИЯИ [I.N. Silin, CERN Program Library, D510, FUMILI, 1983]

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

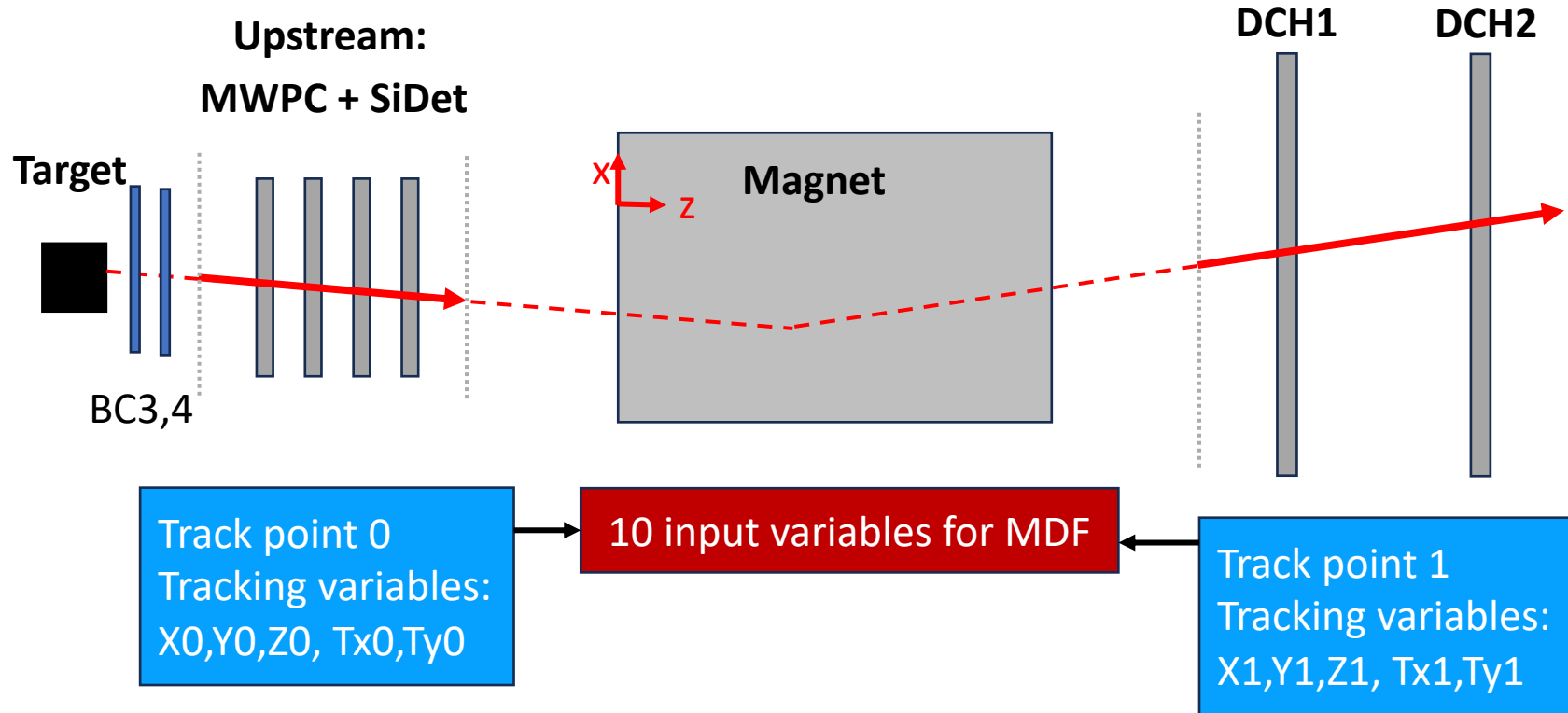
$$F_p(\mathbf{x}_j) = \sum_{l=1}^L c_l f_l(\mathbf{x}_j)$$

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

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

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

MDF в нашем случае



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

$$S = \sum_{j=1}^M (F_j - F_p(\mathbf{x}_j))^2 / \sigma_j^2$$

F_p – искомое $TX0_{\text{mdf}} = f_9(X0, Y0, Z0, TY0, X1, Y1, Z1, TX1, TY1)$ или

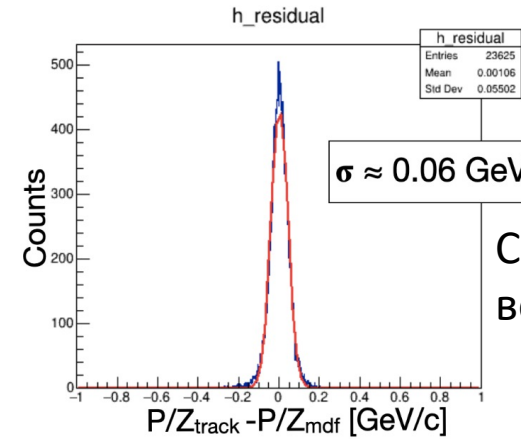
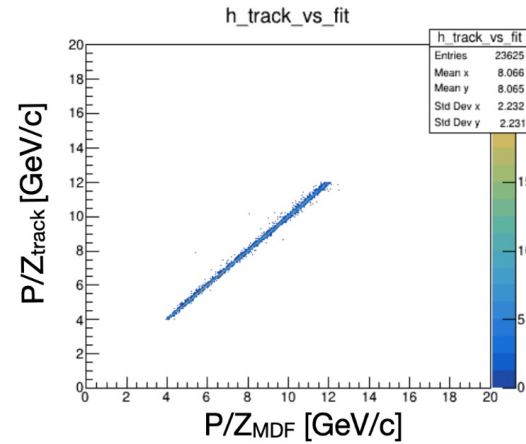
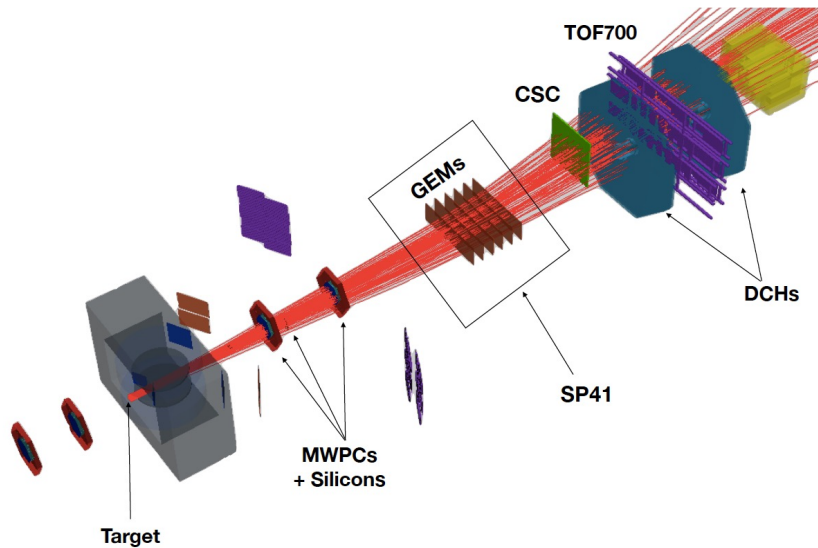
$P/Z_{\text{mdf}} = f_{10}(X0, Y0, Z0, TX0, TY0, X1, Y1, Z1, TX1, TY1)$

\mathbf{x}_j - от 1...10 – параметры трека в одном событии: до магнита (положение X0, Y0, Z0 и тангенсы углов TX0, TY0) и после магнита X1, Y1, Z1, TX1, TY1.

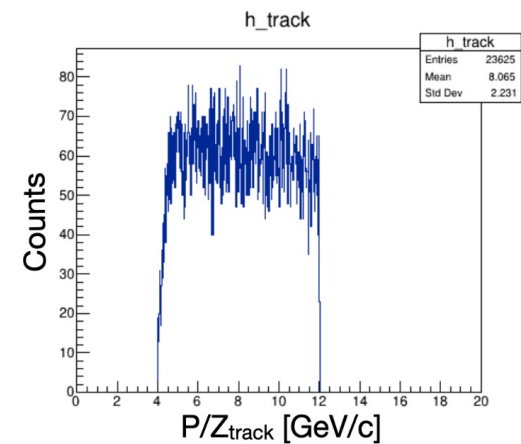
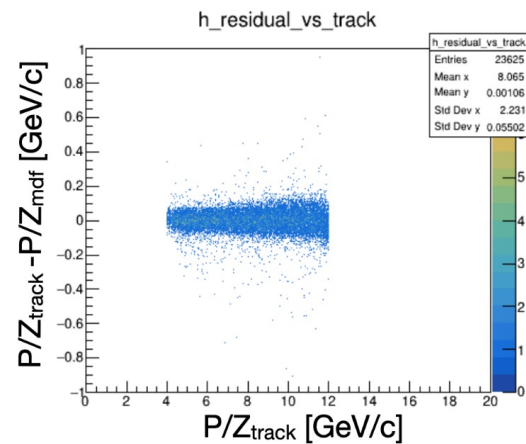
c_l - искомые коэффициенты

F_j - известные величины $TX0_{\text{mdf}}$ и P/Z_{mdf} , полученные из моделирования

Моделирование для MDF



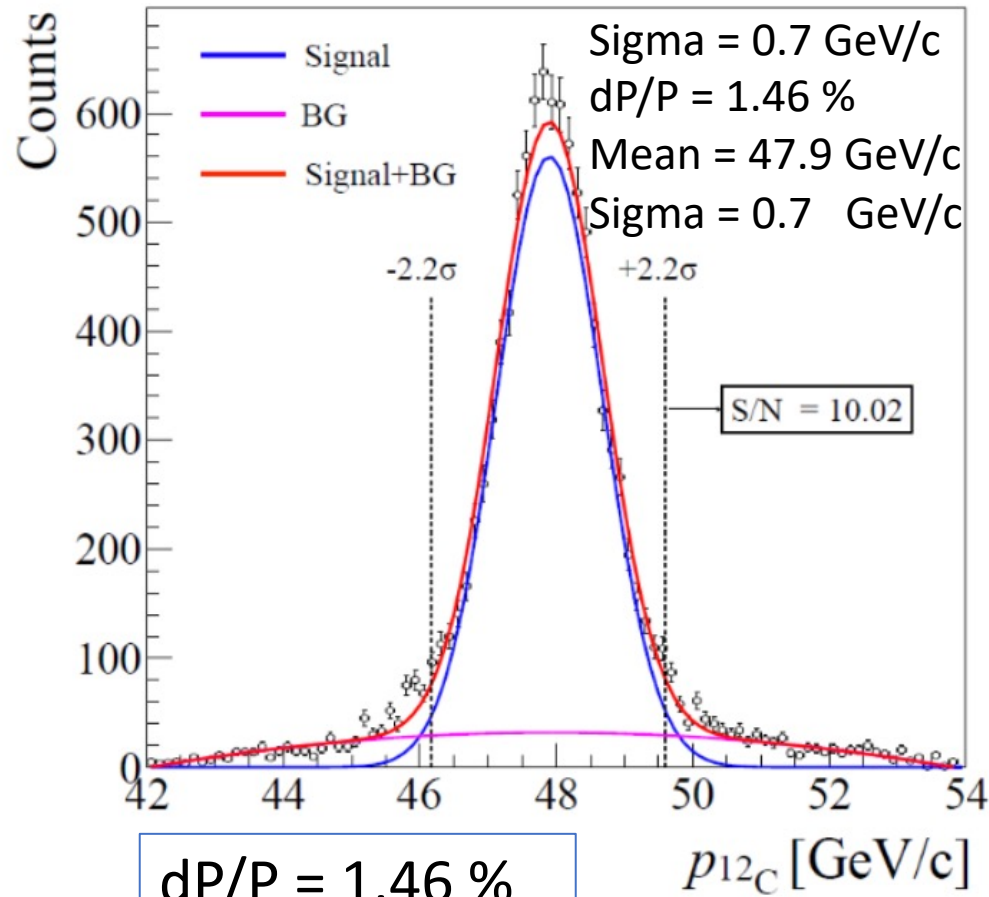
С хорошей точностью
восстанавливается P/Z



- 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 акцептанта спектрометра BM@N

Оценка импульсного разрешения пучка углерода

MDF: Upstream + DCH

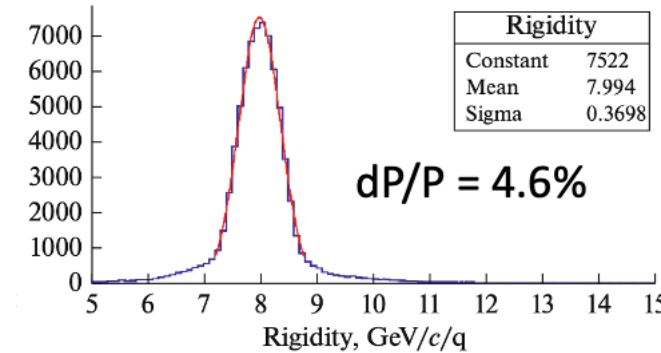


Без мишени

Импульс углерода 4 GeV/c/nucleon

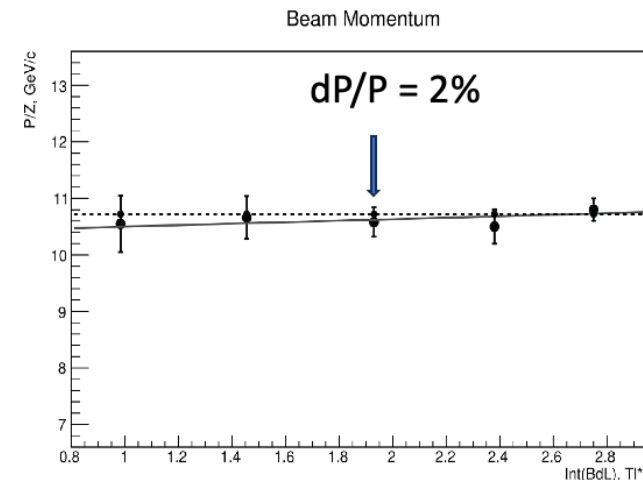
Была использована карта магнитного поля: выровнена относительно детекторов с помощью MDF

Upstream+GEM+DCH



Driuk A., Merts S., and
Nemnyugin S.,
ISSN 1063-7796 (2022),
Vol. 53, No. 2
(Данные 2018 года)

MWPC + DCH



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

Был использован
ожидаемый интеграл
магнитного поля

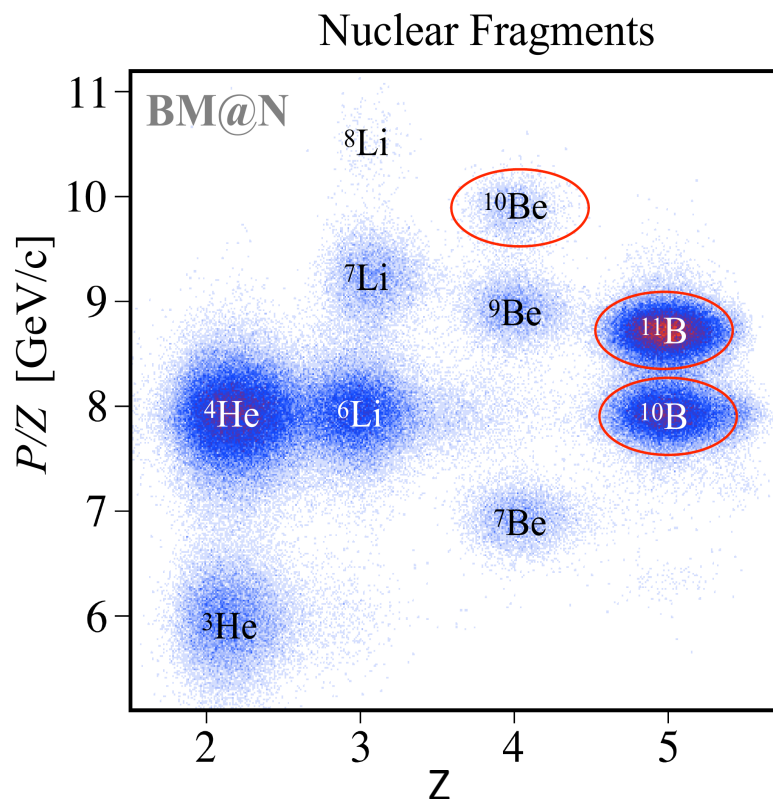
Идентификация частиц

MDF метод \rightarrow P/Z вылетевшего иона

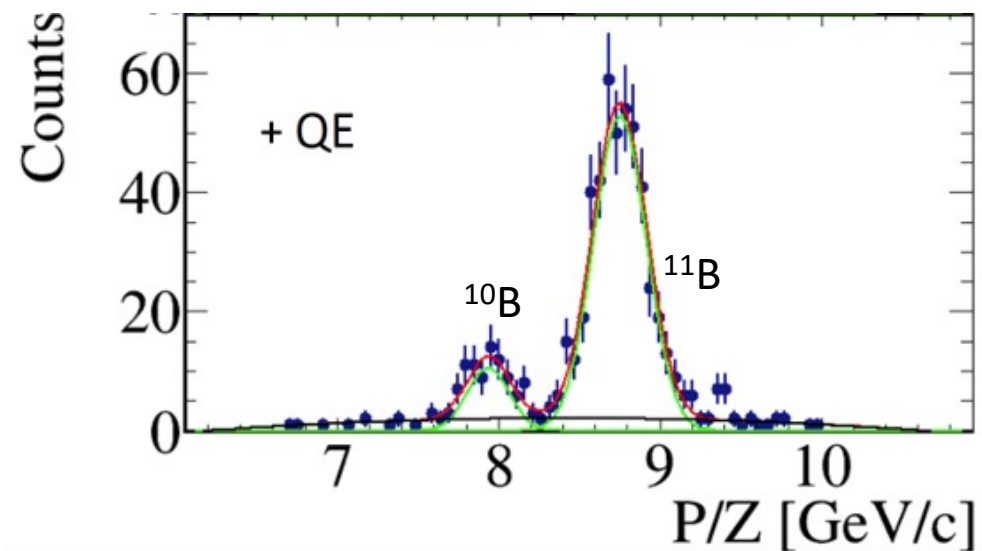
P – импульс трека иона

Информация о заряде иона:

со сцинтилляционных счетчиков $\rightarrow Z$



Статистическая ошибка эффективности трекинга определяется эффективностью идентификации заряда.



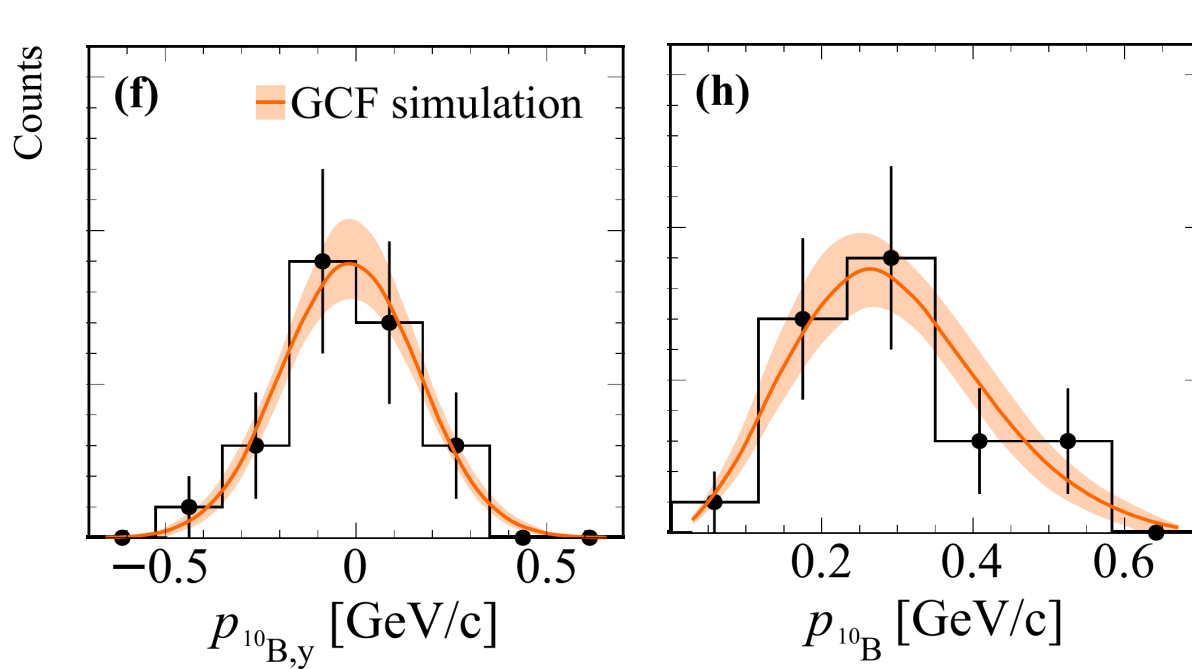
Ион, единичный трек	BG/Integral (%)
^{11}B	7.3 ± 2.5
^{10}B	28.6 ± 4.6

Систематическая ошибка MDF определяется отношением BG/Integral

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

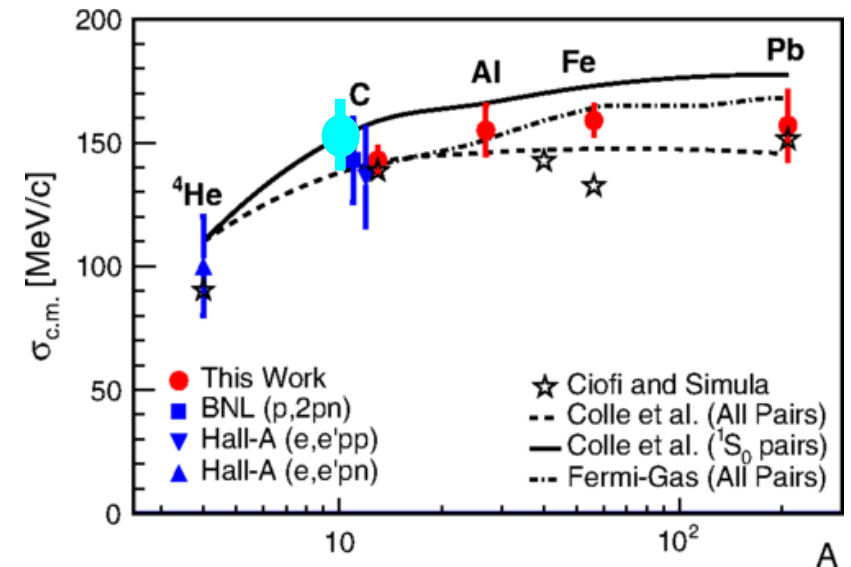
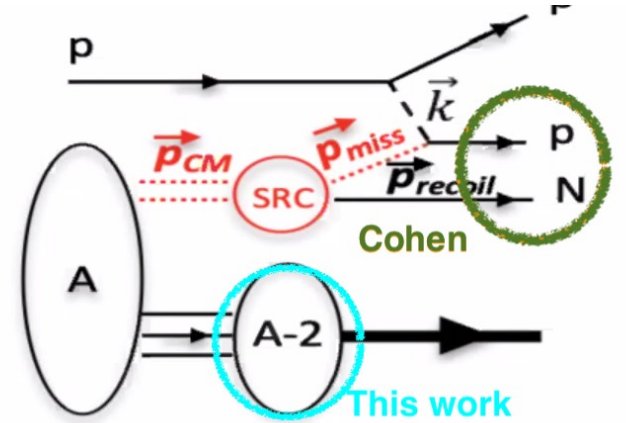
На этом слайде обзор решенных задач и методов заканчивается. 31

Импульс фрагмента ^{10}B (КДК)



Прямое измерение (впервые):

$\sigma = (156 \pm 27) \text{ MeV/c} \rightarrow$ малый импульс центра масс пары относительно импульса Ферми ($\sim 250 \text{ МэВ/с}$)



[E.O. Cohen et al., Phys.Rev. Lett 121 (2018)]

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)

Основные положения, выносимые на защиту

- **Алгоритмы локальной и глобальной** реконструкции заряженных частиц для систем многопроводочных пропорциональных камер и кремниевых детекторов в условиях неоптимального геометрического расположения и пониженной эффективности считывания *SiDet*, а также повышенной ионизации *MWPC*. Эффективность реконструкции для *MWPC* и *SiDet* или *Upstream* составила 98%.
- **Методика идентификации ионов** конечного состояния в исследуемых реакциях методом *MDF*, основанного на методе минимизации многомерного функционала для эксперимента *SRC* на установке *BM@N*.
- **Комплекс программ** в рамках *BmnRoot* в виде набора классов, реализующий разработанные алгоритмы с возможностью работы как с экспериментальными данными, так и с моделированием.
- **Результаты проведенного** на основе методов и комплексов программ численного исследования идентификации ионов конечного состояния эксперимента *SRC* на установке *BM@N* на данных, набранных в 2018 году.

Научная новизна

- С учетом особенностей установки (неоптимальное считывание части информации и расположение *SiDet* и повышенная ионизация в *MWPC*) эксперимента SRC на установке *BM@N* **разработан алгоритм** построения трек-сегментов для камер *MWPC* и алгоритм поиска треков в системе станций *SiDet* вдоль пучка.
- Разработан и внедрен **алгоритм глобальной реконструкции** траекторий заряженных частиц через две детекторные системы *MWPC* и *SiDet* перед магнитом для эксперимента SRC на установке *BM@N*.
- Впервые **проведена идентификация ядерных фрагментов** для эксперимента SRC на установке *BM@N*.
- С помощью разработанных алгоритмов **успешно выполнен численный анализ данных**, позволивший получить физически значимые результаты. В том числе, **впервые напрямую измерена ширина импульсного распределения КДК-пары**.

Научно-практическая значимость

- Разработанные алгоритмы реализованы в комплексах программ и внедрены в программное обеспечение эксперимента *BM@N*. Всего на текущий момент при помощи созданного программного обеспечения **обработано около 500 миллионов** экспериментальных событий.
- **Улучшен отбор сигналов в *MWPC*** с исключением ложных срабатываний с учетом временных отсчетов в условиях большой зашумленности на экспериментальных данных.
- Разработанные методы позволили проводить реконструкцию траекторий заряженных частиц с **эффективностью 98%** относительно системы сцинтилляционных счетчиков, а также оценить разрешение камер *MWPC* и детекторов *SiDet* и **получить высокую точность импульсного разрешения** спектрометра *BM@N* (1.46%).
- **Разработанные алгоритмы являются универсальными** и используются как для конфигурации эксперимента *SRC* на установке *BM@N*, так и для основной конфигурации эксперимента *BM@N*. Разработанные алгоритмы могут быть применены на других экспериментах, где используются детекторы *MWPC* и *SiDet*.

Апробация работы (1)

- Collaboration Meetings of the BM@N Experiment at the NICA Facility – 2021, 2020, 2019 годы.
- Международная научная конференция молодых ученых и специалистов ОИЯИ – 2021, 2020, 2018, 2016 годы.
- Школа-конференция молодых ученых и специалистов ОИЯИ Алушта – 2021, 2016
- Meetings of the PAC for Particle Physics, Дубна, 2020, 2019, 2017 (стендовый доклад)
- The 18th International Conference on Strangeness in Quark Matter (SQM 2019), Бари, Италия, 2019 (стендовый доклад)
- The International Conference on Particle Physics and Astrophysics ICPPA – 2018, 2017 годы.
- International Conference on Mathematical Modeling and Computational Physics (ММСП), Дубна, 2017
- Выступления на внутренних еженедельных совещаниях профильных рабочих групп на постоянной основе.

Апробация работы (2)

Работа выполнена в Лаборатории физики высоких энергий имени В.И. Векслера и А.М. Балдина ОИЯИ в рамках Проблемно-тематического плана 02-0-1065-2007/2023 - Комплекс NICA: создание комплекса ускорителей, коллайдера и экспериментальных установок на встречных и выведенных пучках ионов для изучения плотной барионной материи, спиновой структуры нуклонов и легких ядер, проведения прикладных и инновационных работ.

При поддержке следующих грантов, стипендий и премий:

- Грант РФФИ 18-02-40046 «Анализ данных в эксперименте BM@N по изучению короткодействующих двухнуклонных корреляций во взаимодействии пучка ядер углерода с протонной мишенью»
- Грант ОМУС 2023 год;
- Стипендии имени А.М. Балдина – 2022, 2021, 2020 годы.

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)

Соответствие диссертации паспорту специальности 1.2.2

Диссертационная работа включает результаты исследований, соответствующих трем пунктам, указанным в паспорте специальности:

2. Разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий.
3. Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента.
4. Разработка новых математических методов и алгоритмов интерпретации натурного эксперимента на основе его математической модели.

Личный вклад

Положения и результаты, представленные в диссертации и в публикациях по теме диссертации, получены при определяющем участии соискателя либо при активном его участии.

Спасибо за внимание!

Ленивенко Василиса Викторовна
vasilisa@jinr.ru