

Трекинг в Катодно-Стриповых Камерах эксперимента CMS

Войтишин Н.Н., Пальчик В.В.



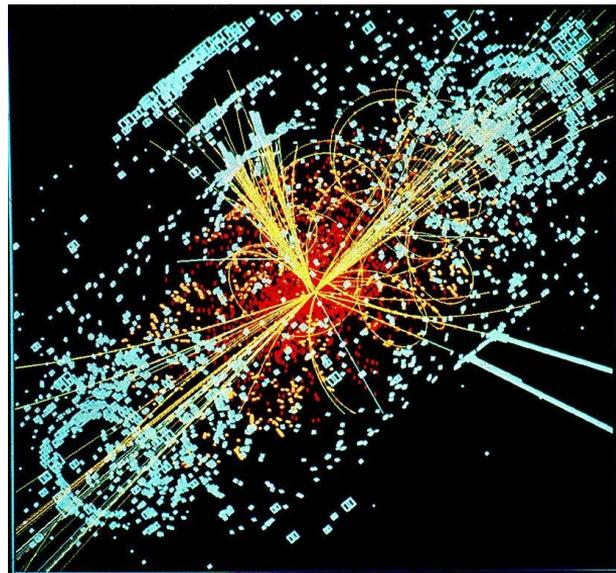
The Physics of the Dimuons at the LHC
JINR, Dubna
24-06-2022

Специфика современных экспериментов ФВЭ

Восстановление траекторий заряженных частиц (трекинг) – одна из ключевых задач обработки экспериментальных данных.

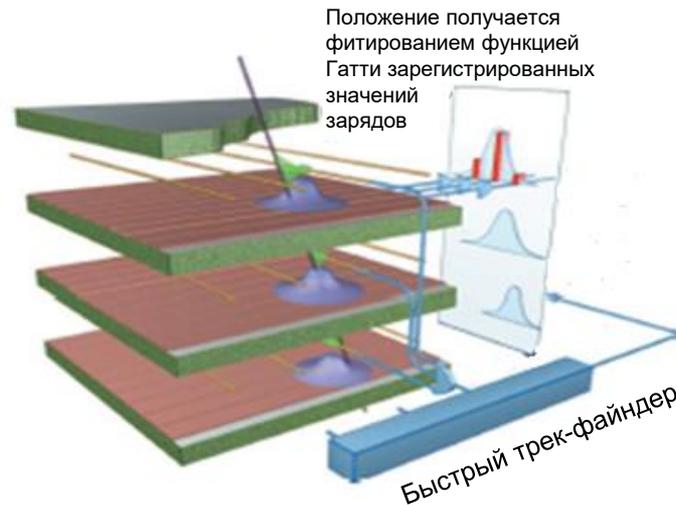
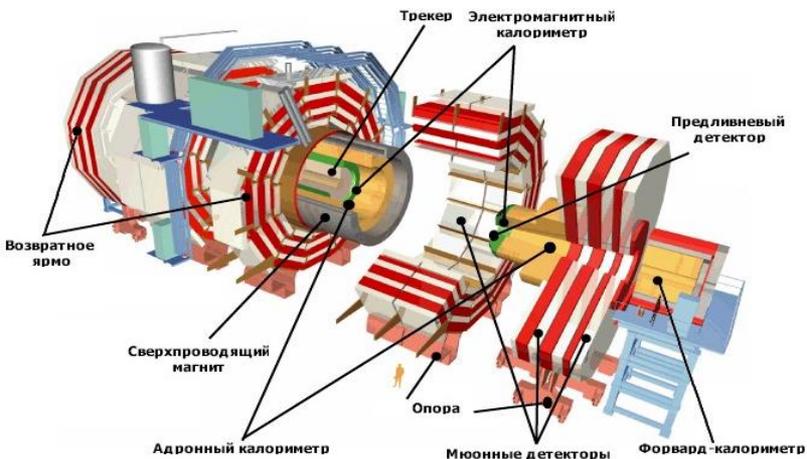
→ **необходимы быстрые и эффективные алгоритмы трекинга, устойчивые к высокому уровню загрузок в детекторах**

- высокая множественность и плотность летящих заряженных частиц
- высокая частота соударений
- большая плотность потока данных
- наличие массивных слоев вещества – калориметры и ярмо в мюонной системе CMS
- сложная структура детекторов и “мертвые зоны” детекторов

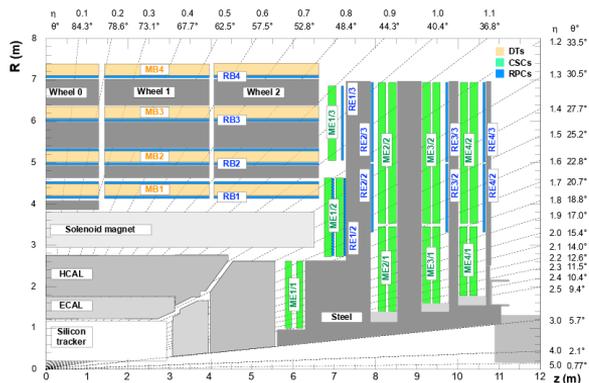


CMS событие с детектированным рождением бозона Хиггса

Реконструкция в Катодно-Стриповых Камерах (КСК) эксперимента CMS



Экспериментальная установка CMS



Псевдобыстрота

$$\eta = -\ln\left(\tan\left(\frac{\theta}{2}\right)\right)$$

θ – полярный угол

Торцевая часть мюонной системы
 $0.9 < \eta < 2.4$

Восстановление траектории частицы в КСК

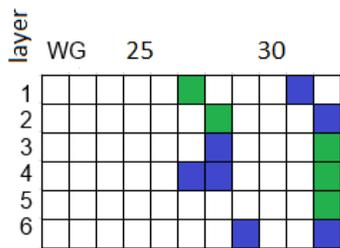
2D точка (хит)

- ϕ координата восстанавливается по распределению заряда на стрипах (фитирование функцией Гатти)
- R координата восстанавливается по сработавшим проволокам.

3D трек-сегменты

Определяются прямолинейным фитированием 2D точек с 6 слоёв камеры

Предыдущий алгоритм реконструкции сегментов



ST реконструкция



Идеальная реконструкция

- - мюонный трек-сегмент
- - вторичный трек-сегмент
- - дополнительные хиты

Недостатки:

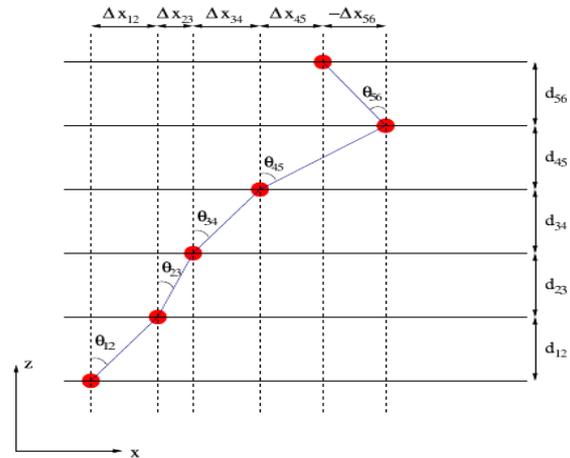
- Большое количество ложных 3х точечных трек-сегментов;
- При большой загруженности камеры, реконструкция не производится.

Spanning Tree (**ST**) - это остовное дерево графа, имеющее минимальный возможный вес.

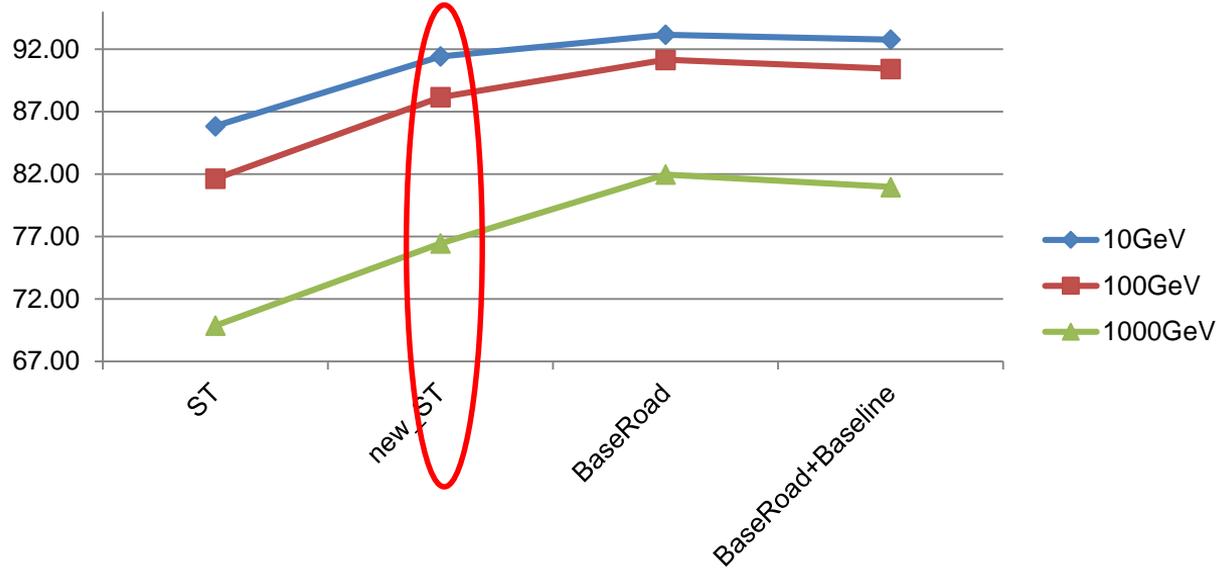
$$A = |\theta_{12} - \theta_{23}| + |\theta_{23} - \theta_{34}| + |\theta_{34} - \theta_{45}| + |\theta_{45} - \theta_{56}|$$

$$\theta_{12} \sim \frac{\Delta x_{12}}{d_{12}}$$

$$A = \left| \frac{\Delta x_{12}}{d_{12}} - \frac{\Delta x_{23}}{d_{23}} \right| + \left| \frac{\Delta x_{23}}{d_{23}} - \frac{\Delta x_{34}}{d_{34}} \right| + \left| \frac{\Delta x_{34}}{d_{34}} - \frac{\Delta x_{45}}{d_{45}} \right| + \left| \frac{\Delta x_{45}}{d_{45}} - \frac{\Delta x_{56}}{d_{56}} \right|$$



Эффективность реконструкции



$$\text{Seg_efficiency} = \begin{cases} \frac{\text{nr of } \mu RH \text{ in segment}}{\text{nr of } \mu RH \text{ in chamber}}, & \text{nr of } \mu RH \text{ in Segment} \geq \frac{\text{nr of } \mu RH \text{ in chamber}}{2} \\ 0, & \text{nr of } \mu RH \text{ in Segment} < \frac{\text{nr of } \mu RH \text{ in chamber}}{2} \end{cases} \quad , \mu RH - \text{МЮОННЫЙ ХИТ}$$

Основные идеи реализованного RU(RoadUsage) алгоритма

❖ Этап 1. Построение кандидата в трек-сегменты:

- Базовые хиты выбираются внутри луча. Таким образом будущий трек-сегмент ориентирован относительно допустимой области вокруг точки взаимодействия

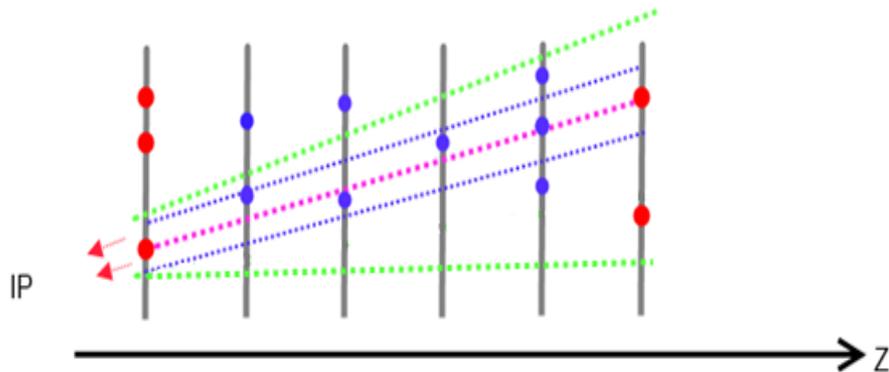
$$(1) \quad \left| \frac{R_2^2 Z_1 - R_1^2 Z_2}{Z_2} \right| < \Delta R_{\text{пороговое}}_{\text{для луча}}$$

- Относительно базовых хитов строятся коридоры (опорные дорожки) по координатам R и ϕ для последующего набора хитов с остальных слоёв

$$(2) \quad \begin{aligned} |R_{\text{кандидат}} - R_{\text{оценочный}}| &< \Delta R_{\text{пороговое}} \\ |\Phi_{\text{кандидат}} - \Phi_{\text{оценочный}}| &< \Delta \Phi_{\text{пороговое}} \end{aligned}$$

- Собранный трек-сегмент проверяется на условие по χ^2

$$(3) \quad \chi_N^2 = \frac{1}{2(N-1)} \sum_1^N \frac{d_i^2}{\sigma_i^2} < \chi_{\text{пороговое}}$$



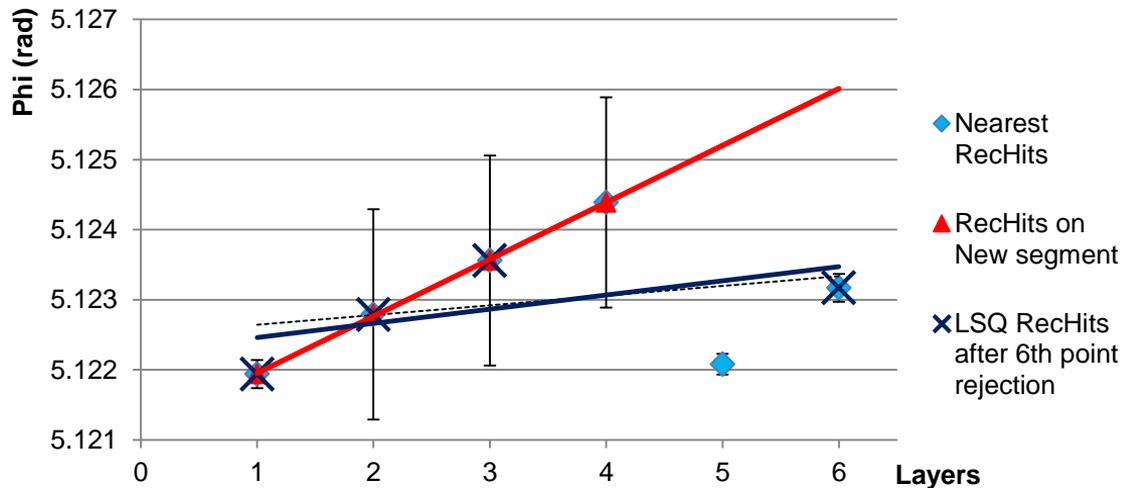
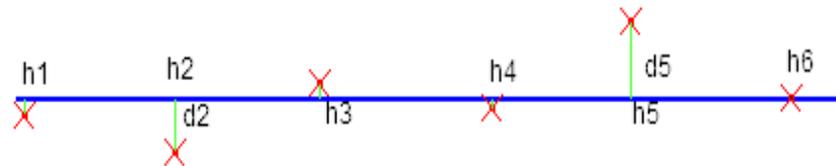
Основные идеи реализованного RU(RoadUsage) алгоритма

❖ Этап 2. Улучшение кандидата в трек-сегменты

С помощью метода «Оптимальной режекции» удаляются до двух хитов из трек-сегмента, для улучшения его χ^2 .

$$(4) \quad \min(\sum_i |d_i|)$$

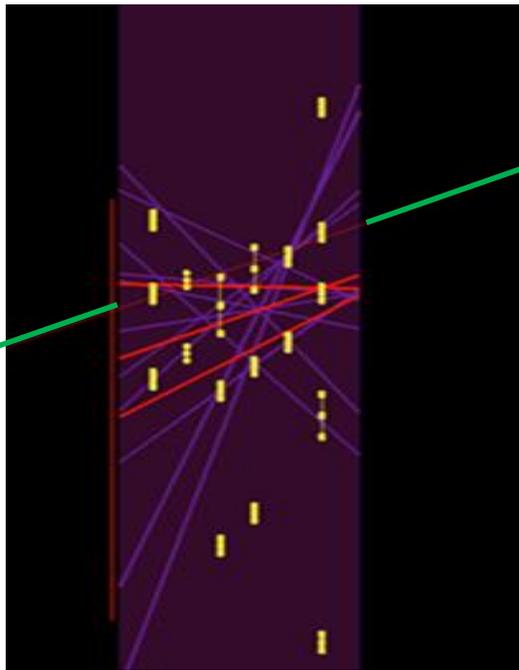
Преимущество предложенного метода по отношению к общепринятому Методу Наименьших Квадратов (LSQ), в том, что он ближе описывает принцип работы детектора.



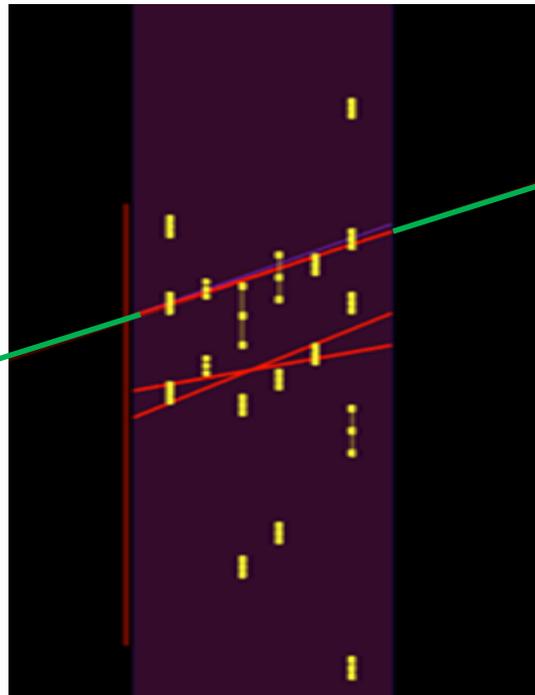
❖ Этап 3. Реконструкция трек-сегментов от вторичных вершин

Если после предыдущих этапов реконструкции осталось достаточно неиспользованных хитов, то этапы повторяются, без учета ориентации кандидата относительно точки взаимодействия.

Пример события с большой множественностью хитов (84) в отдельно-взятой камере



ST
15 трек-сегментов



RU
4 трек-сегмента

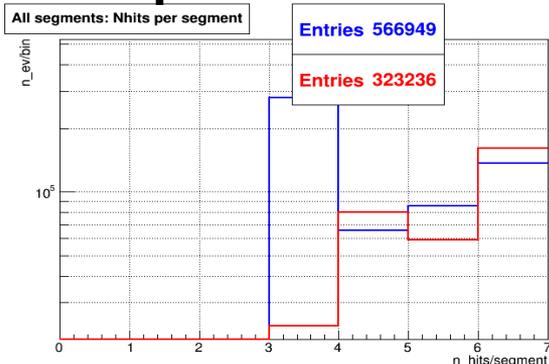
Траектория мюона

Мюон с $p_T = 1000 \text{ GeV}$

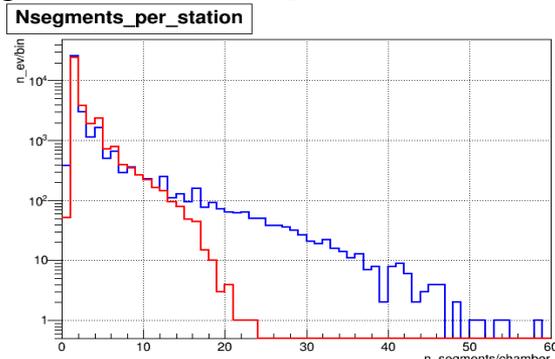
$$p_T = \sqrt{p_x^2 + p_y^2}$$

Желтые точки – отклики на слое (хиты);
Красные линии – мюонные сегменты;
Синие линии – вторичные сегменты;

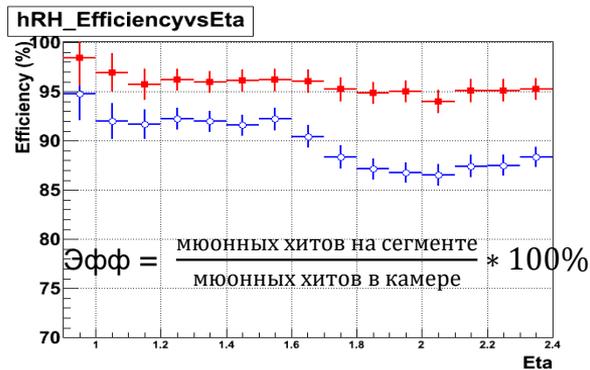
Сравнение двух алгоритмов



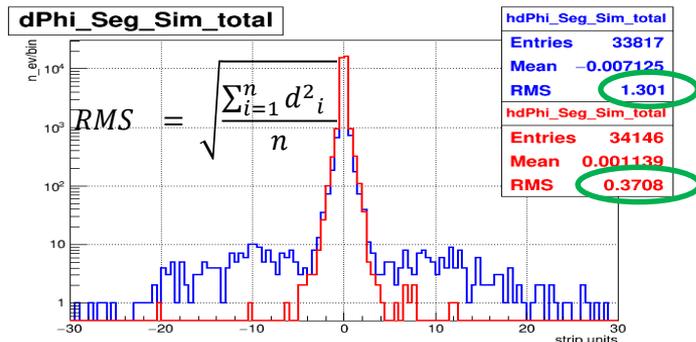
Длина трек-сегментов



Количество реконструированных трек-сегментов в камере



Эффективность реконструкции трек-сегментов



Разница в точной координате между мюонным трек-сегментов и симулированной траекторией мюона

- Уменьшилось число коротких трек-сегментов **в 12 раз**
- Множественность трек-сегментов снизилась, при этом число случаев когда в камере не удалось реконструировать ни одного трек-сегмента уменьшилось **в 8 раз**;
- Эффективность реконструкции повысилась и стала более однородной в зависимости от псевдобыстроты;
- Реконструированные трек-сегменты стали **в 3.5 раза** ближе к траектории мюона.

Данные симуляции.
Мюоны с $p_T = 1000 \text{ GeV}$
10000 событий.

Синий – ST алгоритм; Красный – RU алгоритм.

Время, затрачиваемое на реконструкцию

Оценка проводилась стандартной процедурой, при имплементации кода в пакет CMSSW (пакет программ CMS) .

В качестве данных использовался датасет MC SingleMU($p_T = 1 \text{ TeV}$).

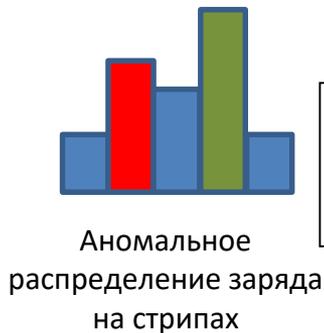
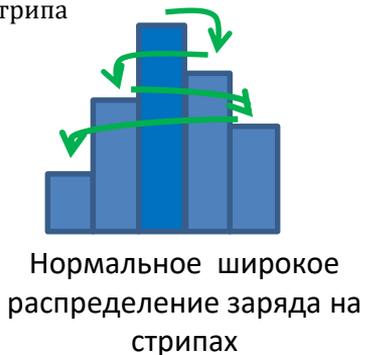
Результаты среднеарифметического 5 испытаний:

- Реконструкция трек-сегментов RU в ~ 2 раза медленнее чем ST;
- Среднее время полной реконструкции события на 18% быстрее при использовании RU.

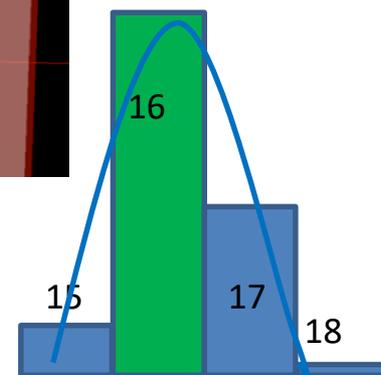
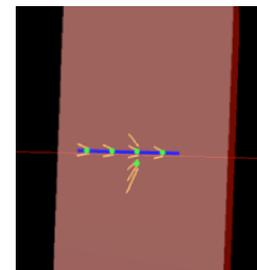
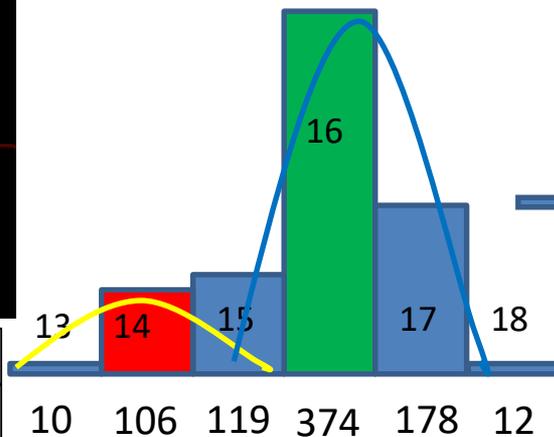
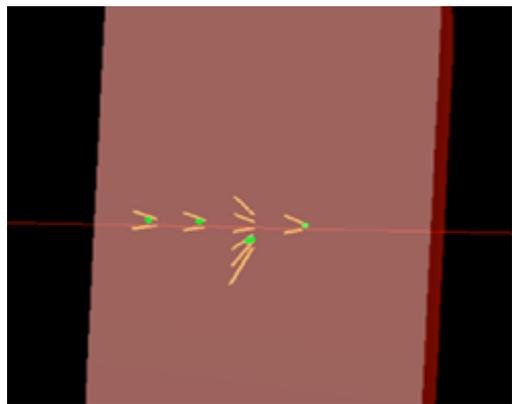
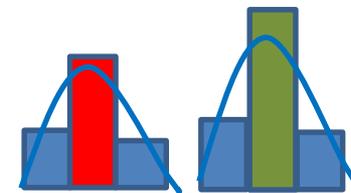
Замечание. Реализованный алгоритм более время-затратный, чем ST, но за счёт уменьшения количества ложных сегментов количество переборов на последующих этапах реконструкции траектории мюона уменьшается.

Улучшение реконструкции хитов в КСК

$\sigma_{\text{Фита Гагги}} < 2\%$ ширины стрипа



Разделить на 2 максимума и поделить пропорционально заряд общего стрипа

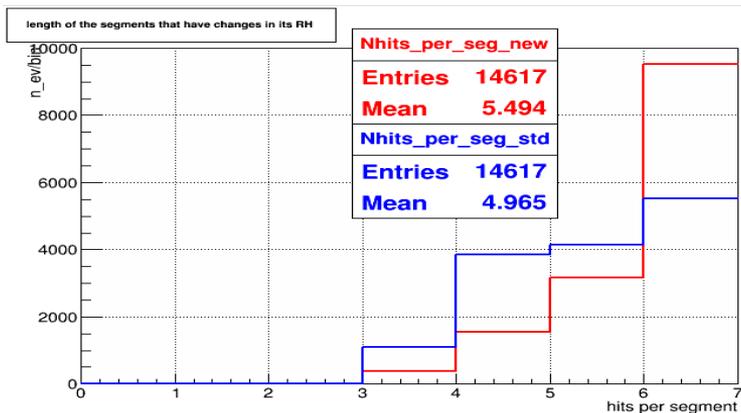


Номер стрипа
13
14
15
16
17
18

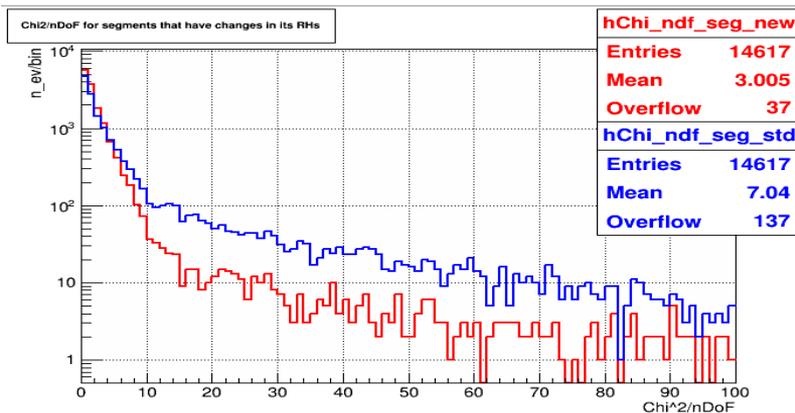
Заряд на стрипе
10
106
119
374
178
12

Длина и качество сегментов с модифицированными хитами

Симулированные данные. Мюоны с $p_T = 1000$ GeV. 10000 событий



Длина трек-сегмента



χ^2 трек-сегмента

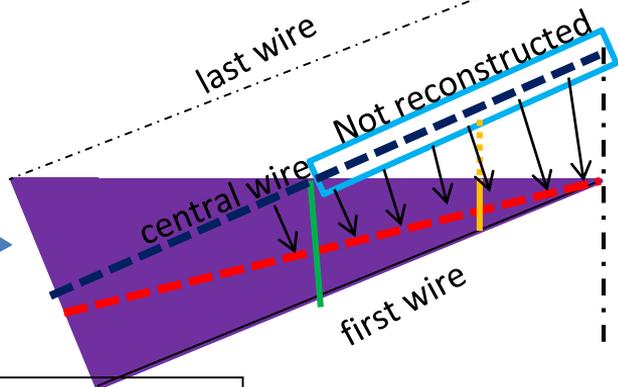
ГОЛУБОЙ – стандартный подход к реконструкции широких кластеров;
КРАСНЫЙ – использование алгоритма разделения перекрывающихся сигналов

- Длина изменившихся трек-сегментов увеличилась на 0.53 хита
- χ^2 изменившихся трек-сегментов уменьшилась в 2.3 раза

Специфика геометрии ME1/1

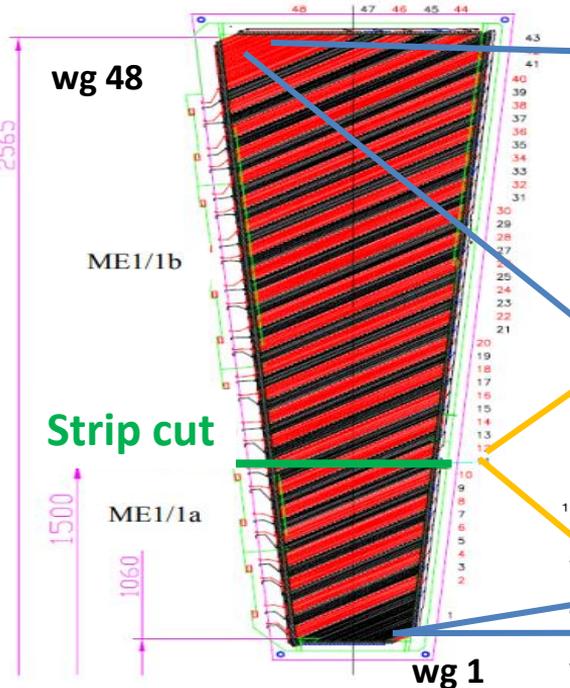


$$Y_{red} \cong Y_{first_wire} + |X| * \tan \frac{29^\circ}{2}$$

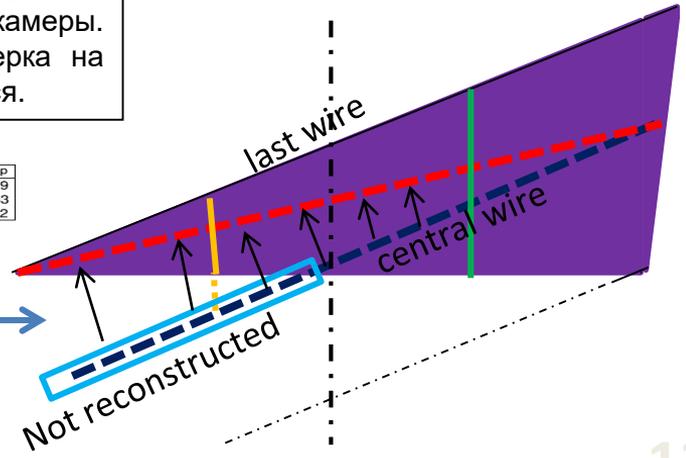
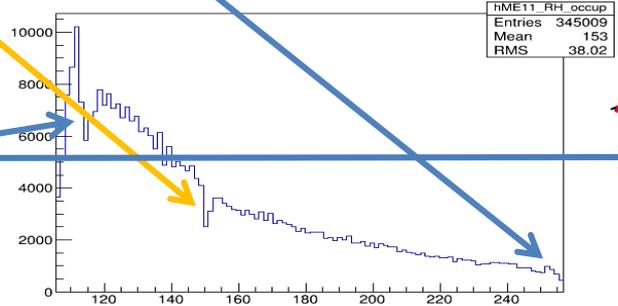


Старая электроника требовала предварительной проверки (на программном уровне) того, попадает ли грубая координата в геометрию камеры. С новым оборудованием проверка на программном уровне не требуется.

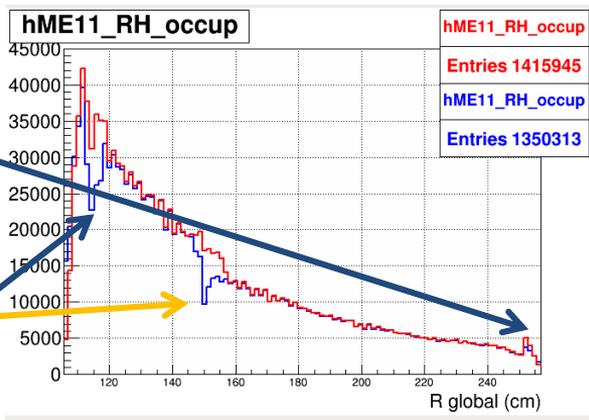
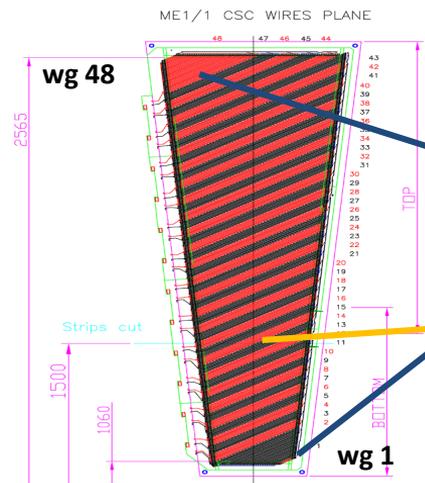
$$Y_{red} \cong Y_{last_wire} - (10.5cm + X_{center_wire}) * \tan \frac{29^\circ}{2}$$



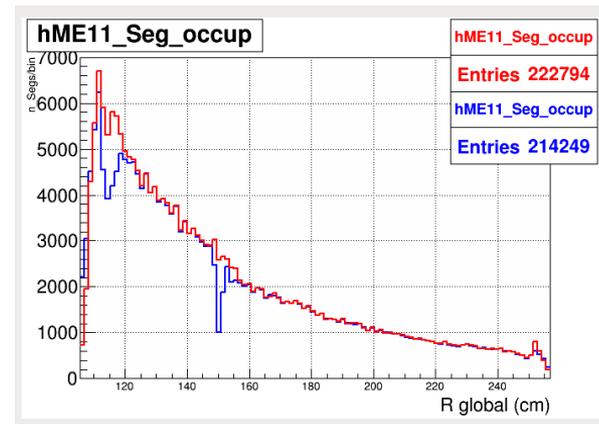
Распределение хитов в ME1/1



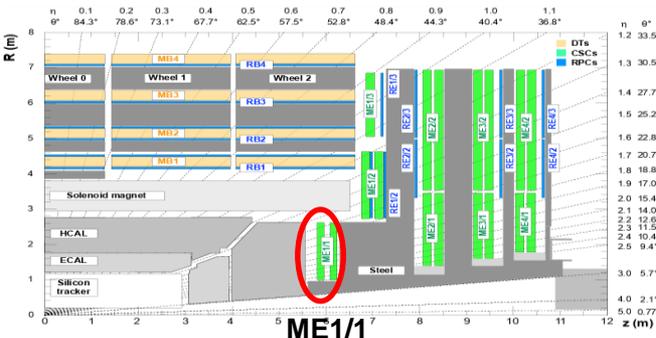
Улучшение реконструкции в ME1/1 камерах



Распределение хитов



Распределение трек-сегментов



ГОЛУБОЙ – стандартный подход к реконструкции в камере ME1/1;

КРАСНЫЙ – использование всех предложенных улучшений для специфической геометрии камеры ME1/1.

Распределение хитов и трек-сегментов в камере стало более регулярным – без провалов.

Имплементация алгоритмов реконструкции хитов и трек-сегментов в КСК и GEM детекторах в официальный пакет программ CMSSW

Комплекс программ по реконструкции сегментов в КСК эксперимента CMS:

- ✓ Внедрен в официальный пакет программного обеспечения CMS в июле 2016г;
- ✓ Начиная с набора экспериментальных данных в 2017 этот алгоритм стал алгоритмом по умолчанию для реконструкции в КСК;
- ✓ Начиная с 2019 был адаптирован для реконструкции в GEM детекторах эксперимента CMS;
- ✓ Начиная с 2021 этот алгоритм стал алгоритмом по умолчанию для HighLevelTrigger в КСК.

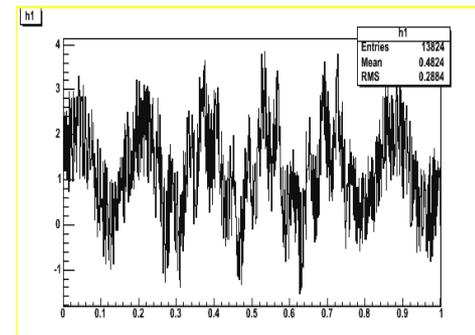
Модификация реконструкции хитов в КСК эксперимента CMS:

- ✓ В 2020 году были имплементированы все представленные изменения.

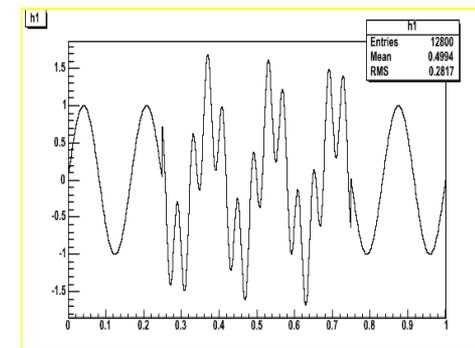
Распознавание сложных перекрывающихся сигналов



- Yellow line – initial charge distribution;
- Green line – simulated muon coordinate;
- Red line – wavelet analysis;
- Blue line – standard approach (CoG like).

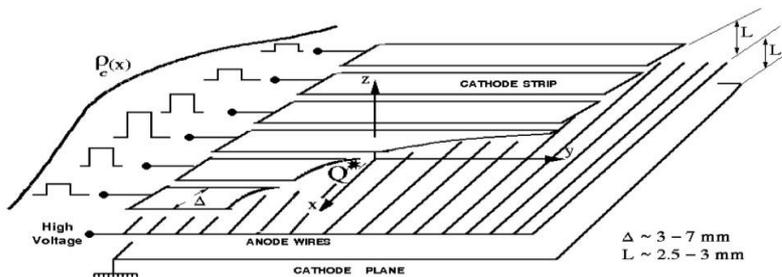


Wavelet-filter

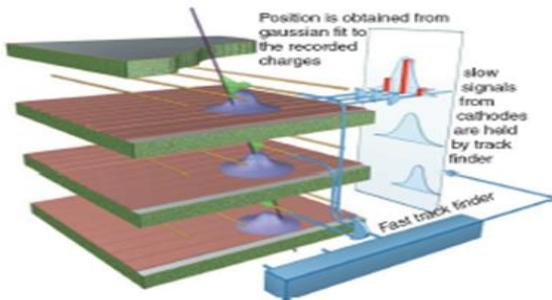


backup

Катодно-стриповые камеры



Принцип работы одного слоя КСК

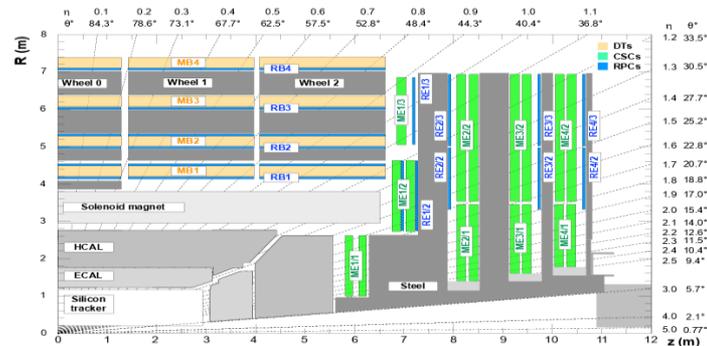


2D points

- > ϕ coordinate measured by charge distribution on strips (fit with the Gatti function)
- > R coordinate measured by wires

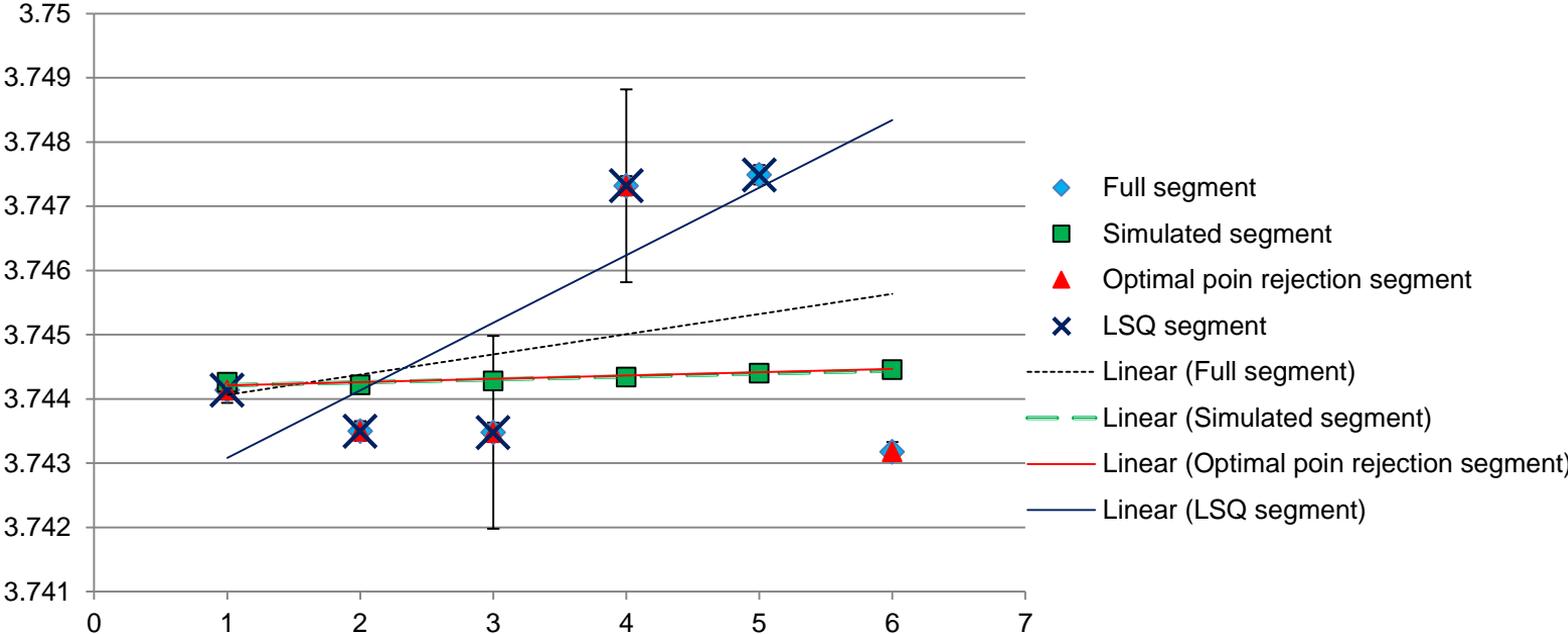
3D segments

Determined by fitting the 2D points from the 6 layers of each chamber

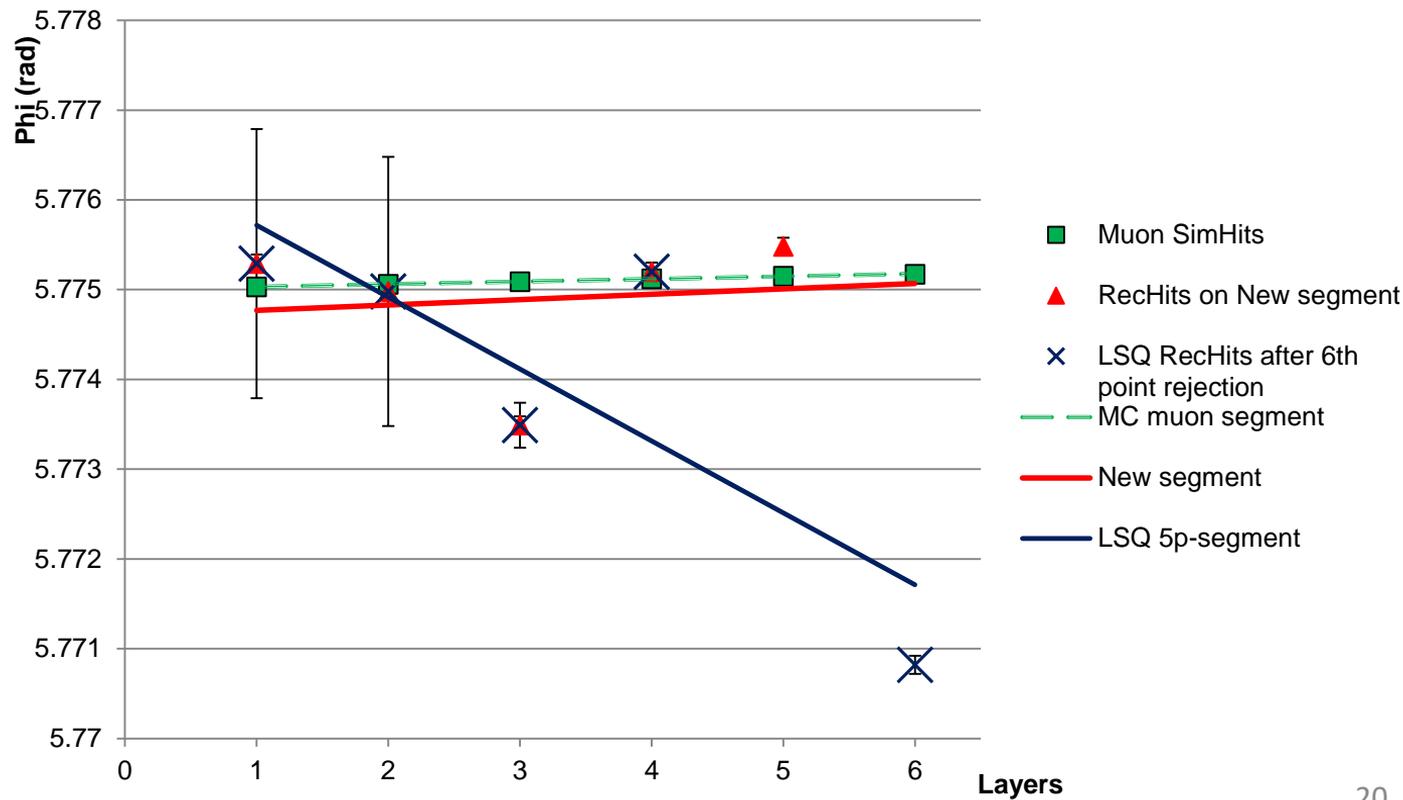


Расположение КСК в экспериментальной установке CMS

Optimal point rejection vs. LSQ 6p->5p

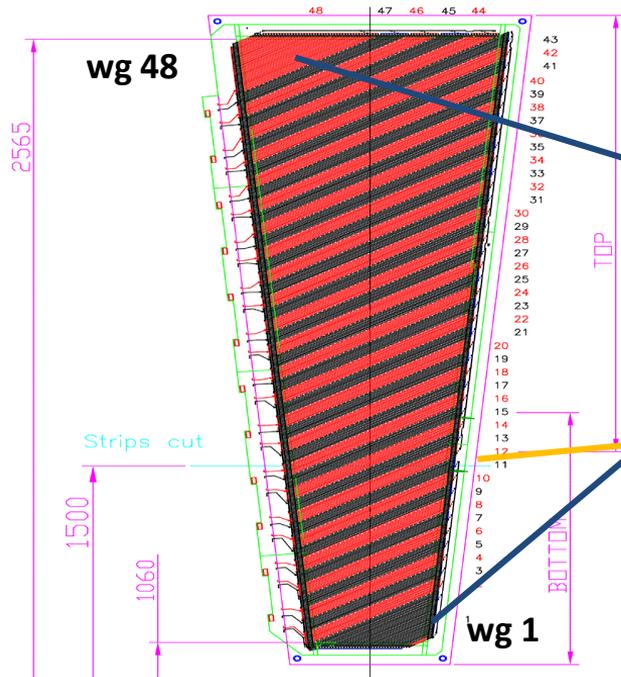


$\chi^2_{6p_seg} = 235;$
 $\chi^2_{LSQ_seg} = 121 ;$
 $\chi^2_{optimal_point_rej_seg} = 54;$

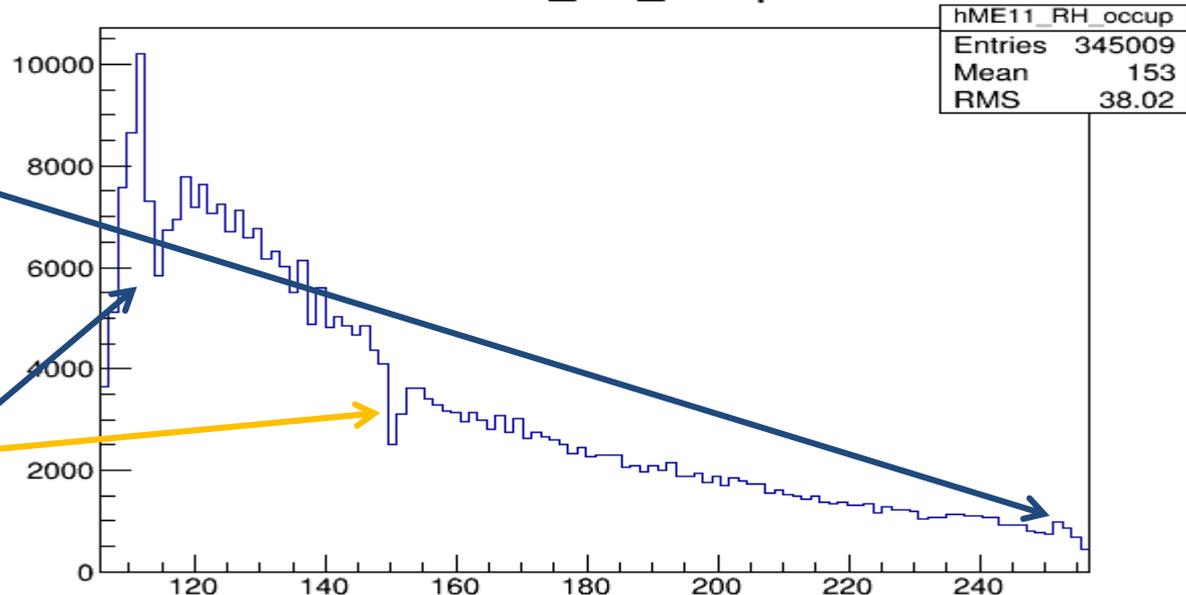


ME1/1 специфическая геометрия

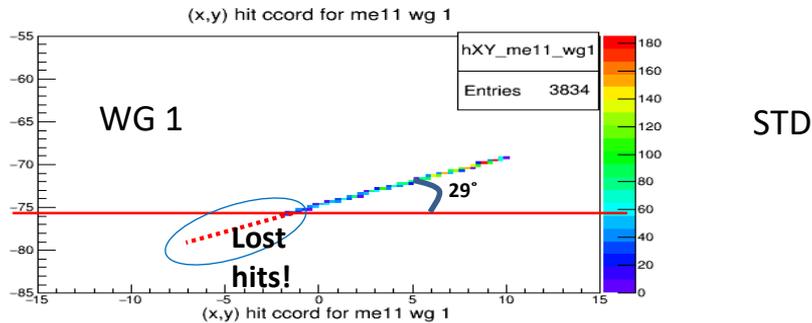
ME1/1 CSC WIRES PLANE



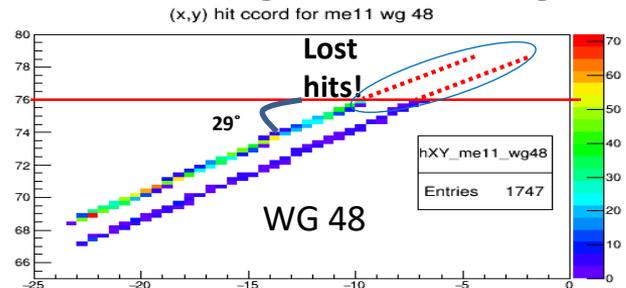
hME11_RH_occup



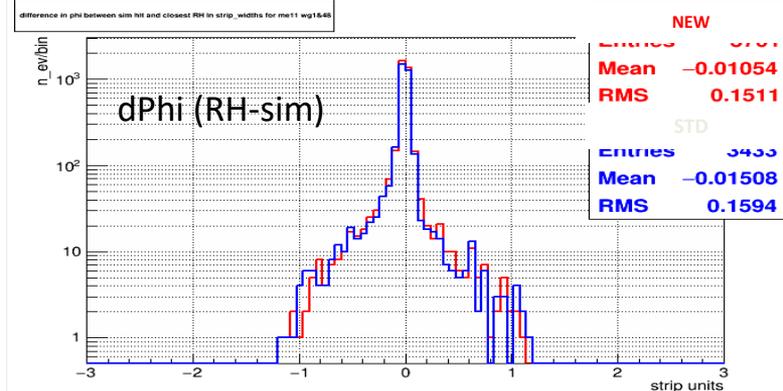
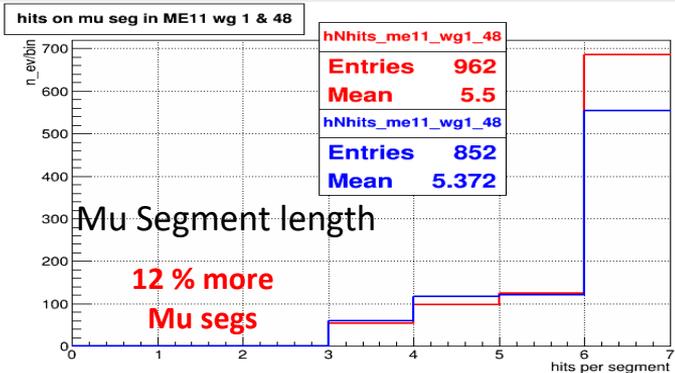
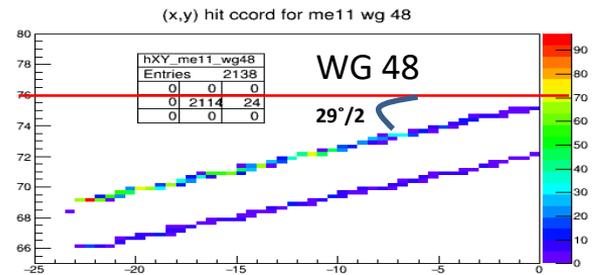
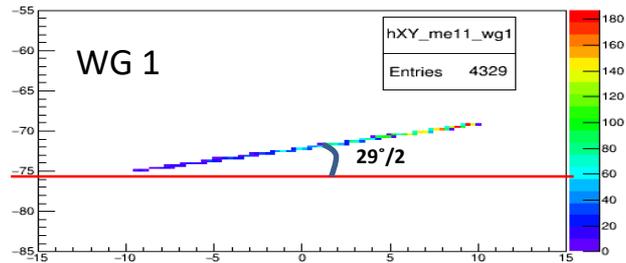
WG 1 & 48 coordinates and MU segment length



STD



NEW



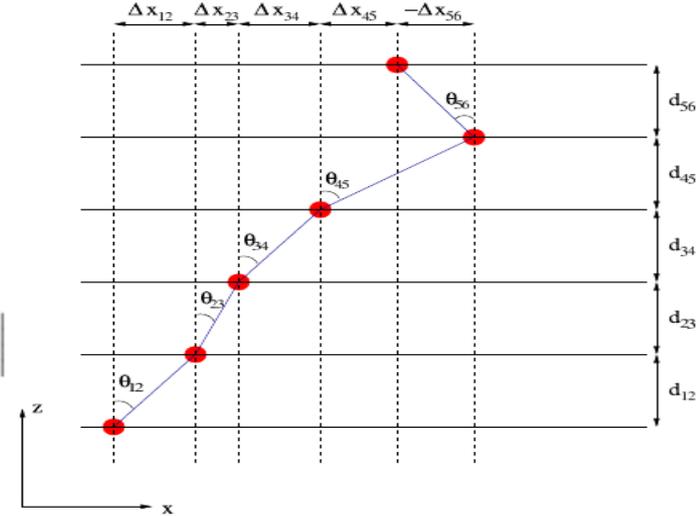
Modified ST algo

- Spanning Tree (ST)

(1)
$$A = |\theta_{12} - \theta_{23}| + |\theta_{23} - \theta_{34}| + |\theta_{34} - \theta_{45}| + |\theta_{45} - \theta_{56}|$$

(2)
$$\theta_{12} \sim \frac{\Delta x_{12}}{d_{12}}$$

(3)
$$A = \left| \frac{\Delta x_{12}}{d_{12}} - \frac{\Delta x_{23}}{d_{23}} \right| + \left| \frac{\Delta x_{23}}{d_{23}} - \frac{\Delta x_{34}}{d_{34}} \right| + \left| \frac{\Delta x_{34}}{d_{34}} - \frac{\Delta x_{45}}{d_{45}} \right| + \left| \frac{\Delta x_{45}}{d_{45}} - \frac{\Delta x_{56}}{d_{56}} \right|$$



- Modified Spanning Tree (newST)

$$\Delta z_{anode-anode} = \begin{cases} 2.2\text{cm}, ME11 \\ 2.54\text{cm}, !ME11 \end{cases}$$

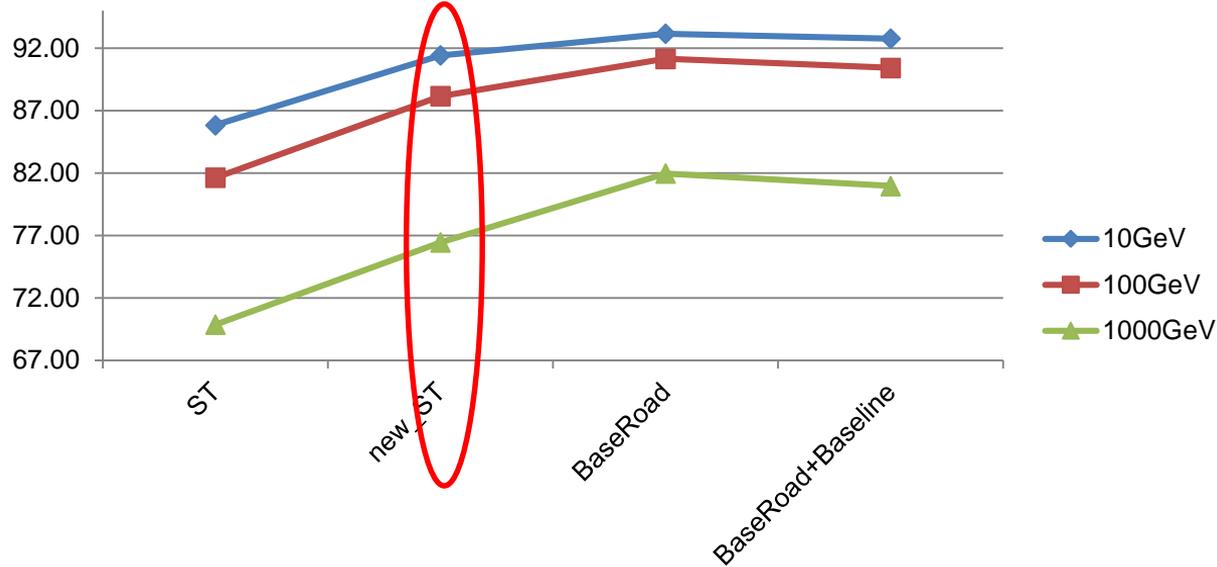
$$qWG = \Delta z_{anode-anode} * \tan(\theta)$$

$$lower_bound = qWG_{min} - 1.5 * maxWG_width$$

$$upper_bound = qWG_{max} + 1.5 * maxWG_width$$

While adding hits on the next layer use *lower_bound* and *upper_bound* cuts in order for the segment to point towards the interaction point.

Segment Efficiency



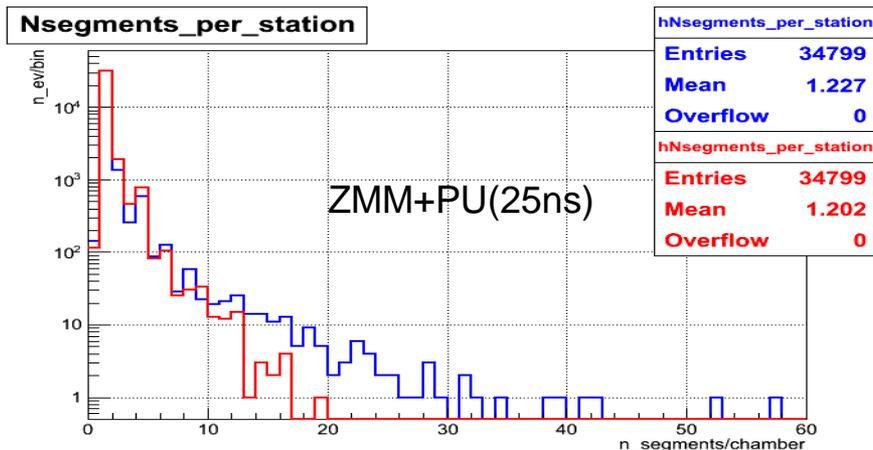
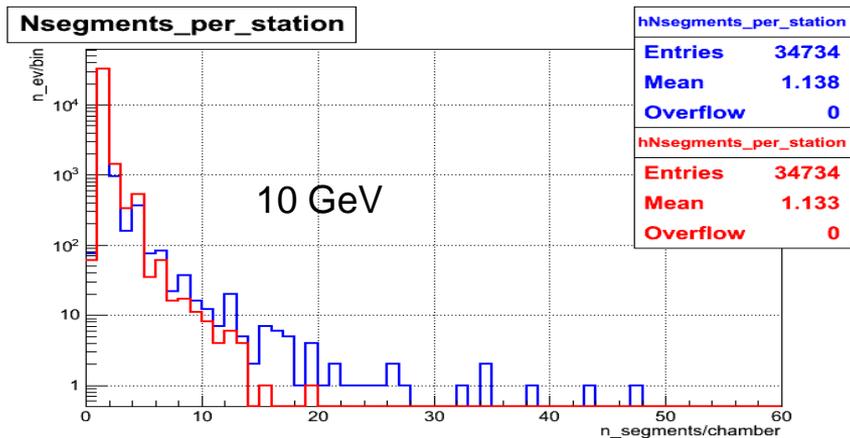
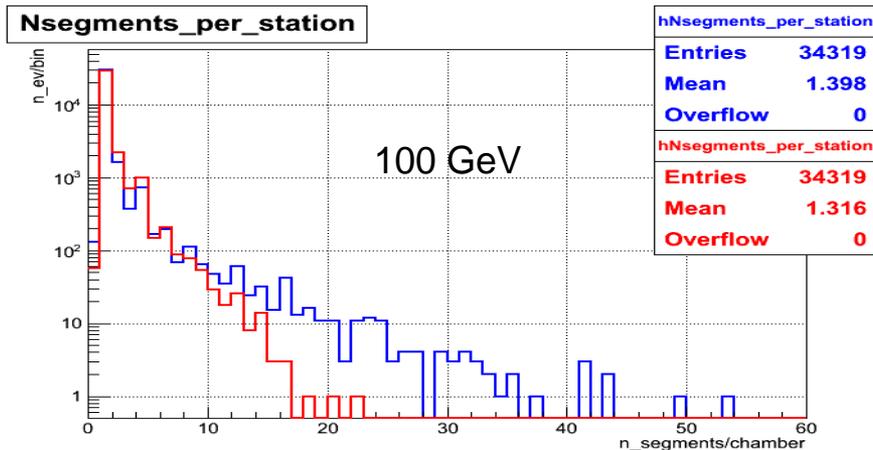
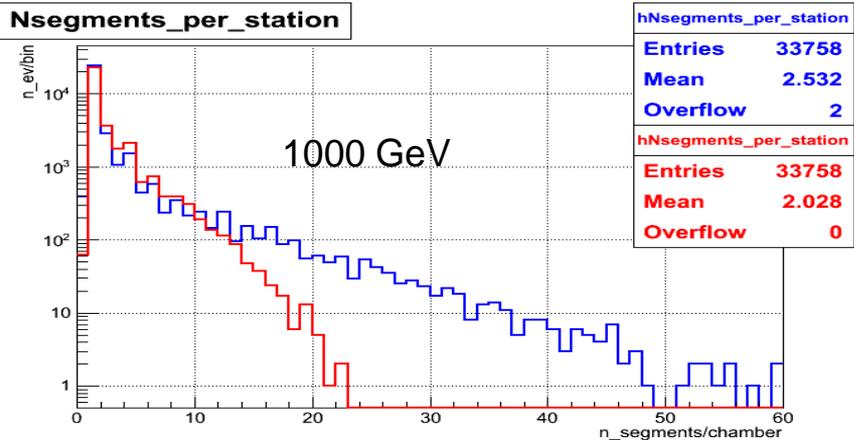
$$\text{Seg_efficiency} = \begin{cases} \frac{\text{nr of GRH in segment}}{\text{nr of GRH in chamber}}, & \text{nr of GRH in Segment} \geq \frac{\text{nr of GRH in chamber}}{2} \\ 0, & \text{nr of GRH in Segment} < \frac{\text{nr of GRH in chamber}}{2} \end{cases}$$

New algorithm promotion

- A specialized validation code made for MC data analysis;
- TnP analyzer modified for collisions analysis;
- Multiple data analyzed:
 - Private MC:
 - Single Muon Pt10GeV;
 - Single Muon Pt100GeV;
 - Single Muon Pt1000GeV;
 - MC RelVals:
 - ZpMM;
 - ZMM;
 - ZMM+PU(25ns);
 - ZMM+PU(50ns);
 - TTBar;
 - Displaced Muons;
 - Halo Muons;
 - JPsi;
 - Single Muon Pt1000GeV;
 - Collisions data (with various cuts on muon Pt):
 - 2012, 2015, 2016, 2018 collisions;

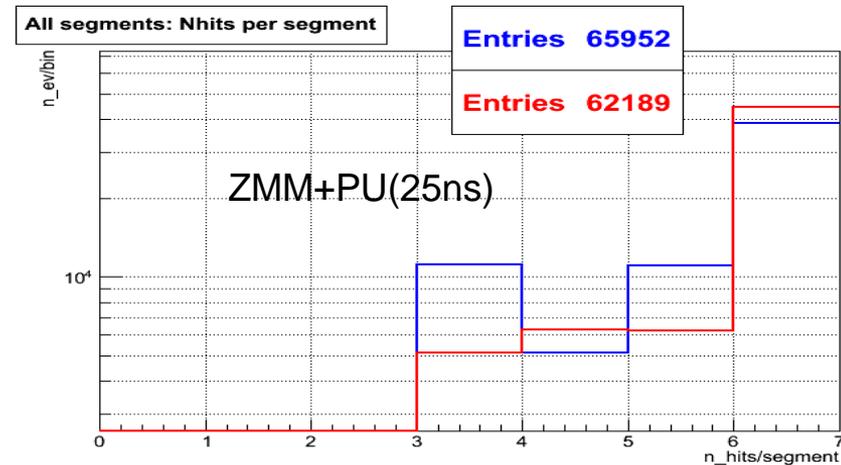
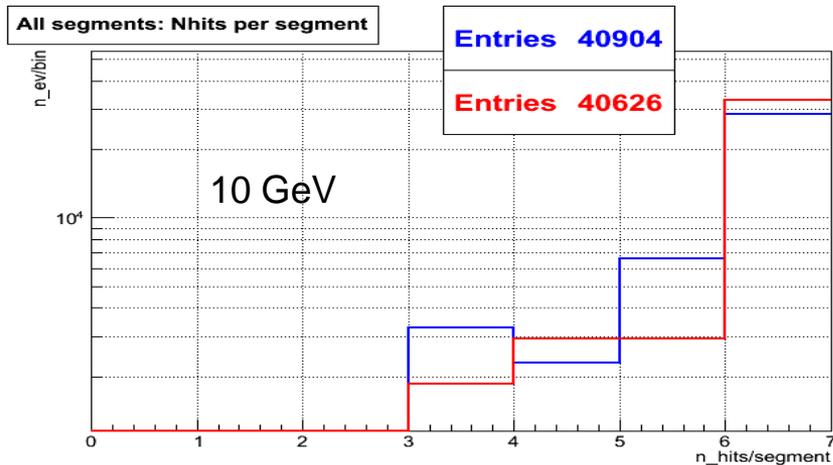
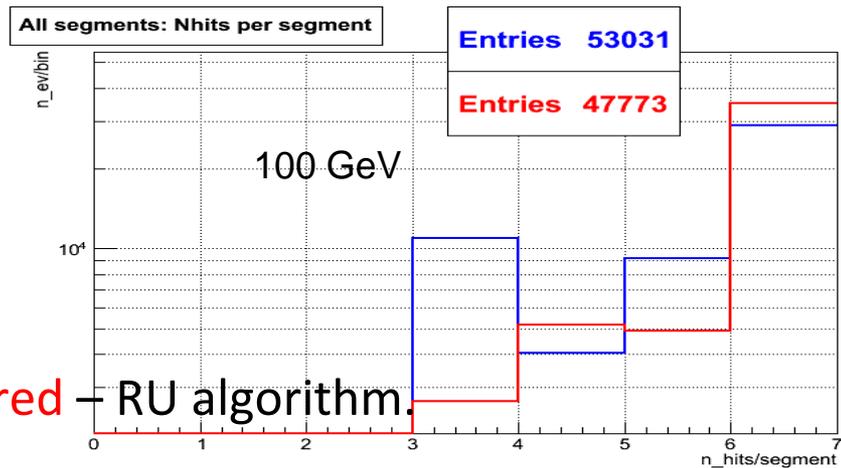
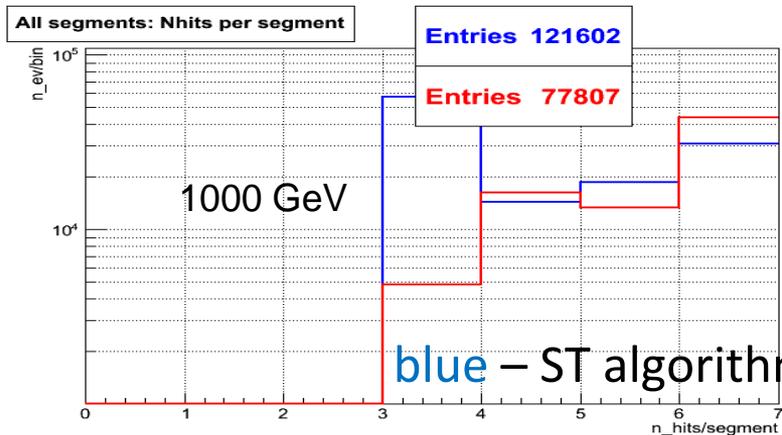
14 talks given on different meetings (CSC Weekly, MuPOG, RECO/AT) showing the comparison results and progress status of the new algorithm.

Segment multiplicity per station

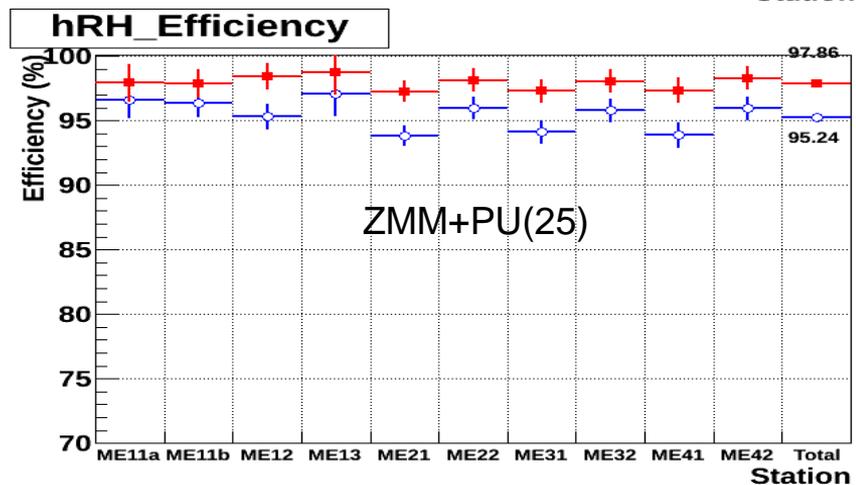
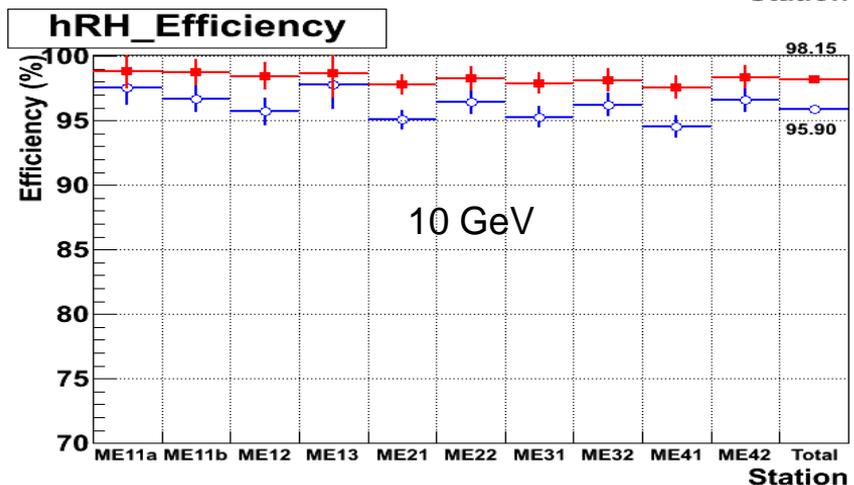
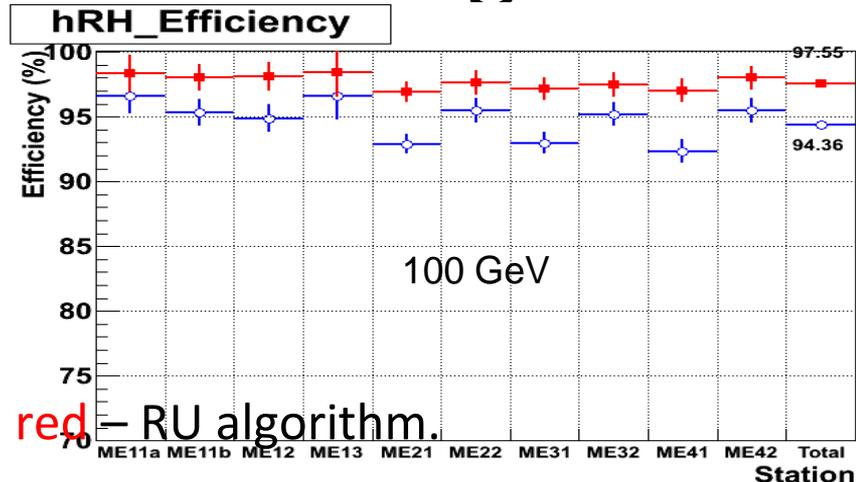
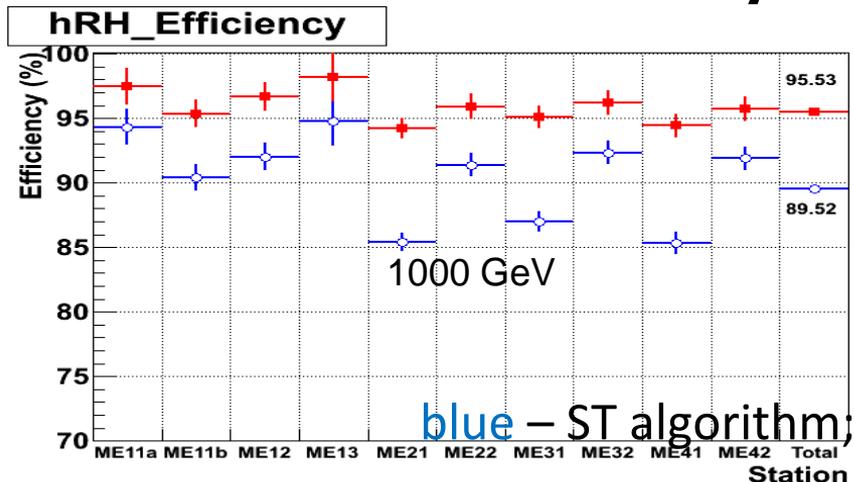


blue – ST algorithm; red – RU algorithm.

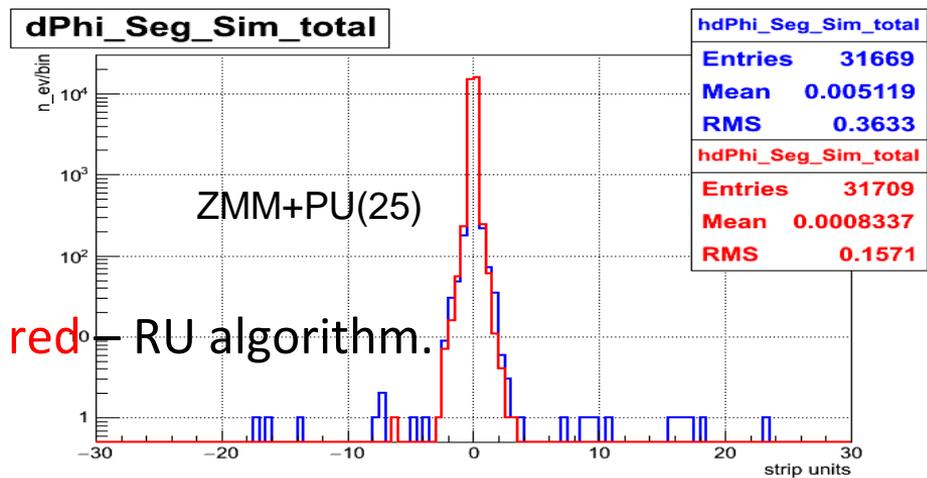
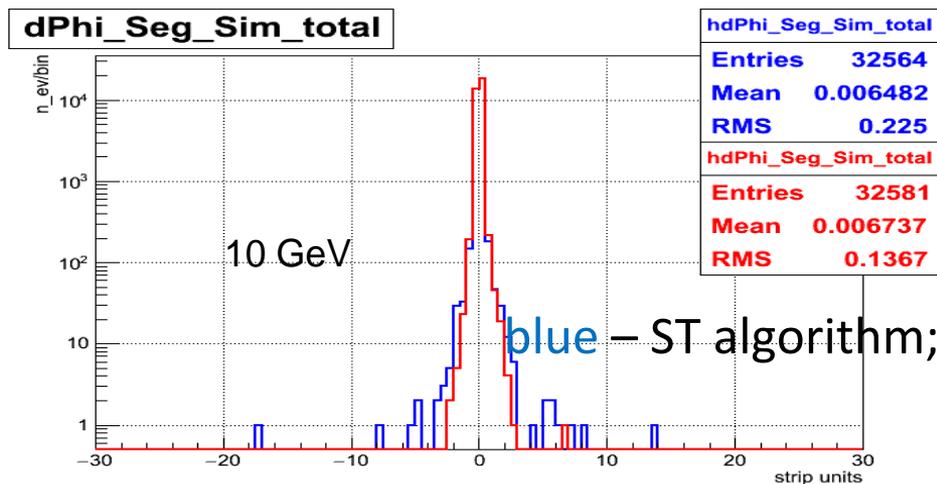
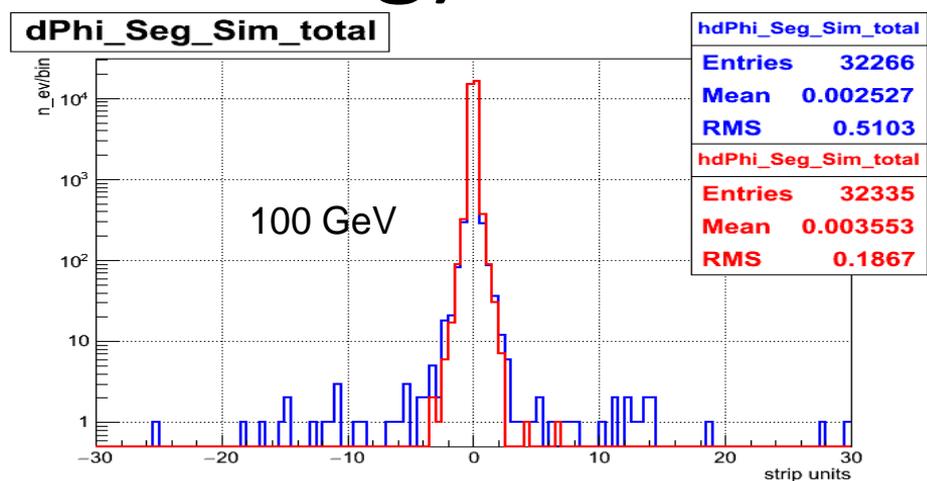
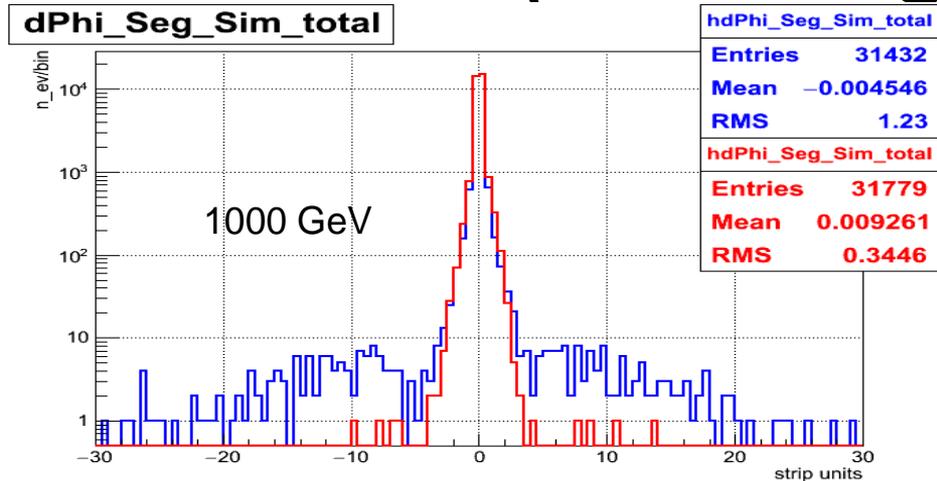
Number of RecHits in all reconstructed segments



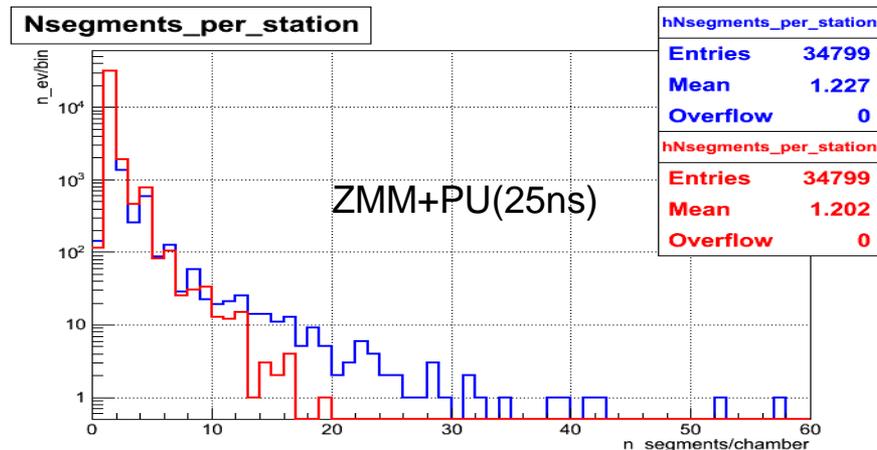
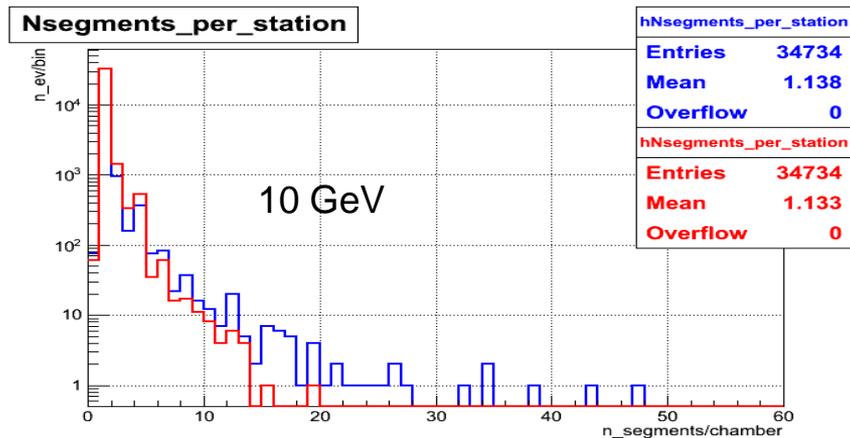
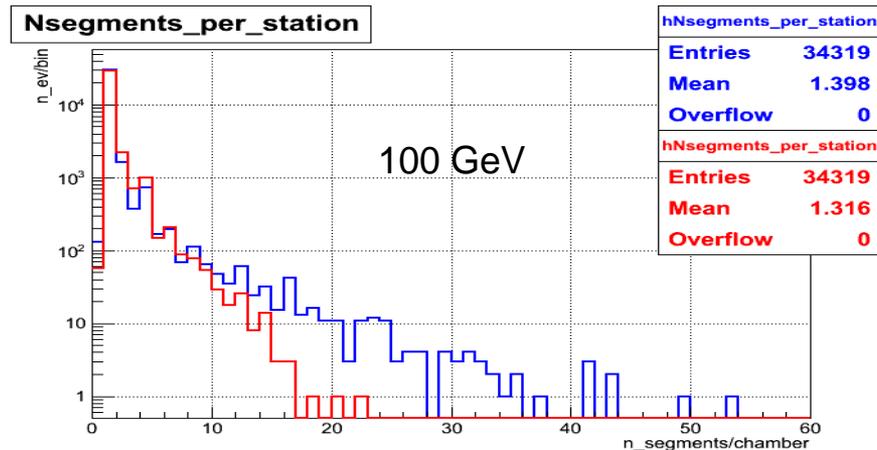
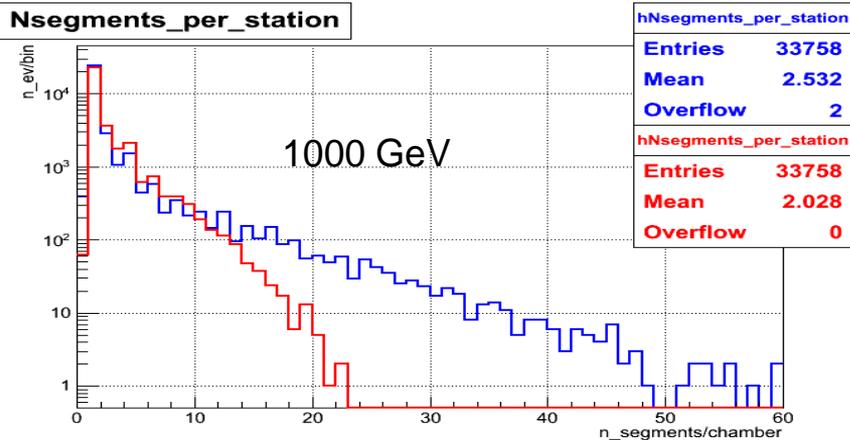
ReHit efficiency for muon segment



dPhi (RecoSeg - SimSeg)

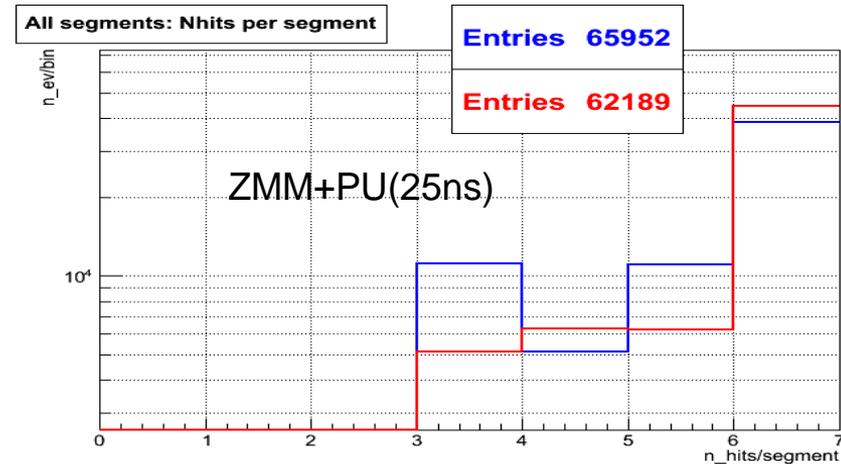
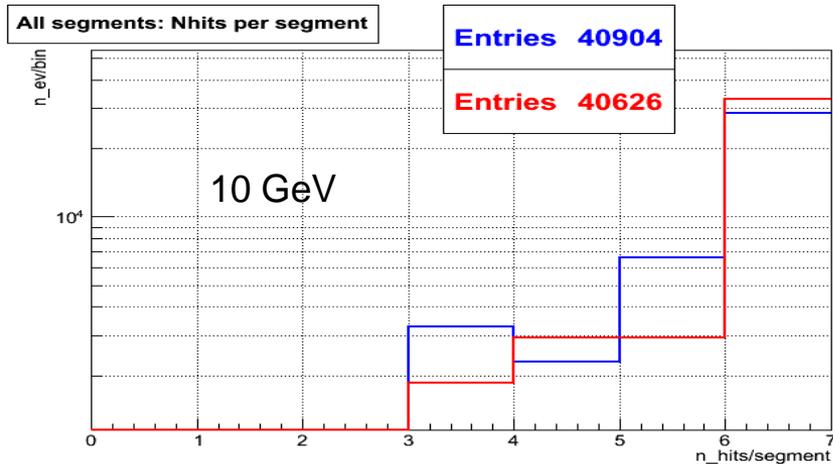
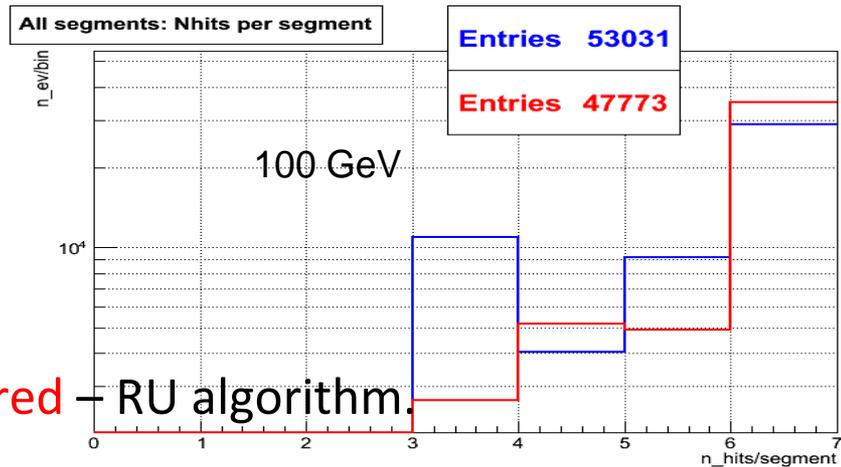
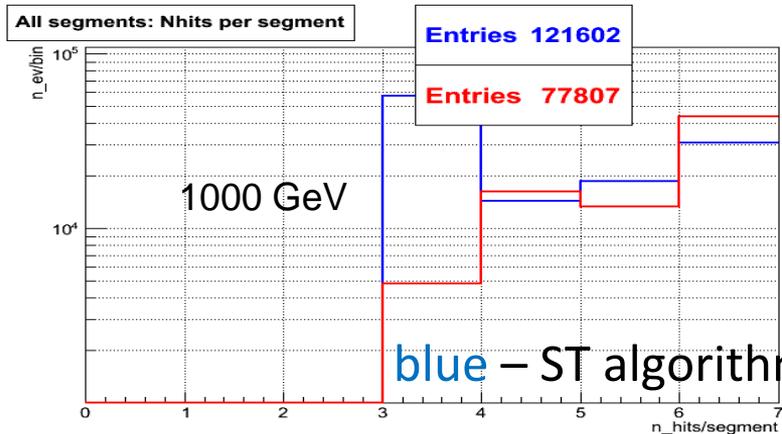


Segment multiplicity per station

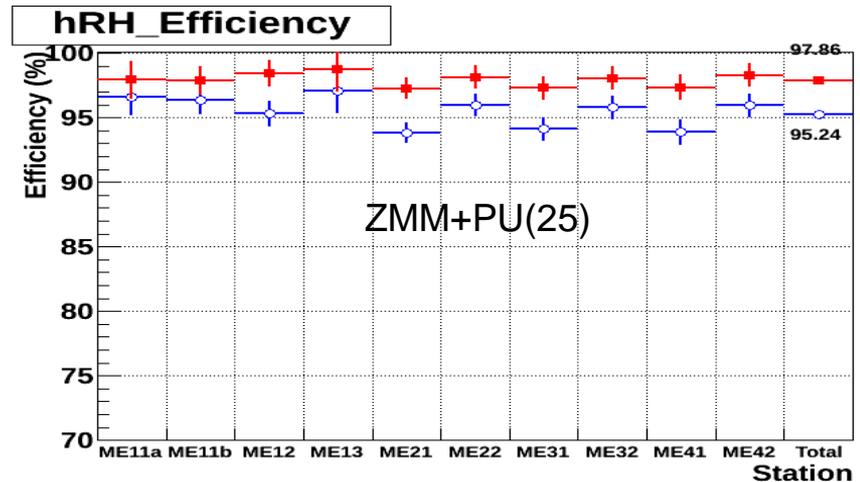
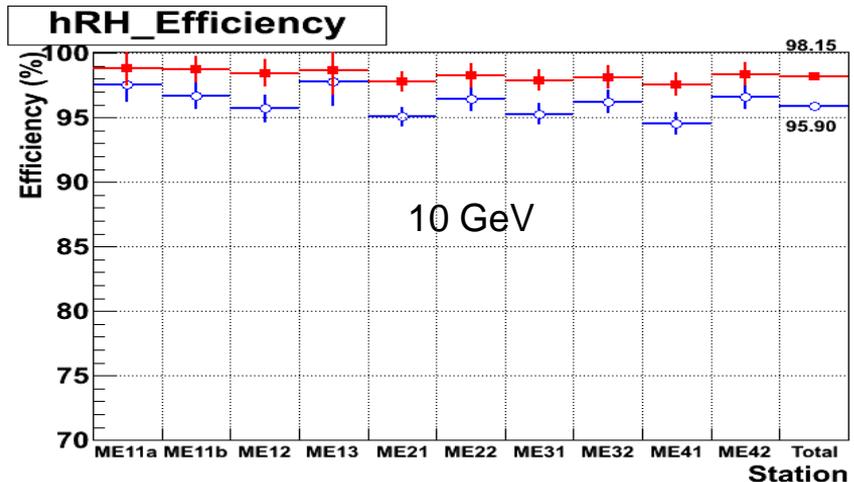
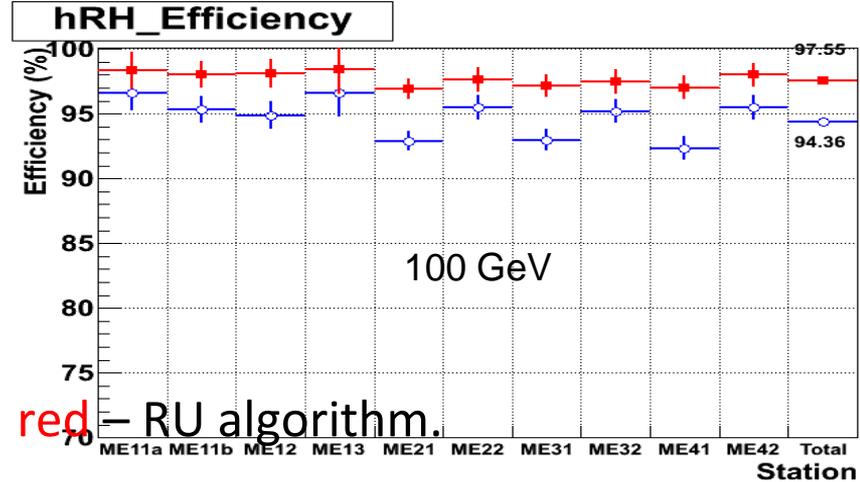
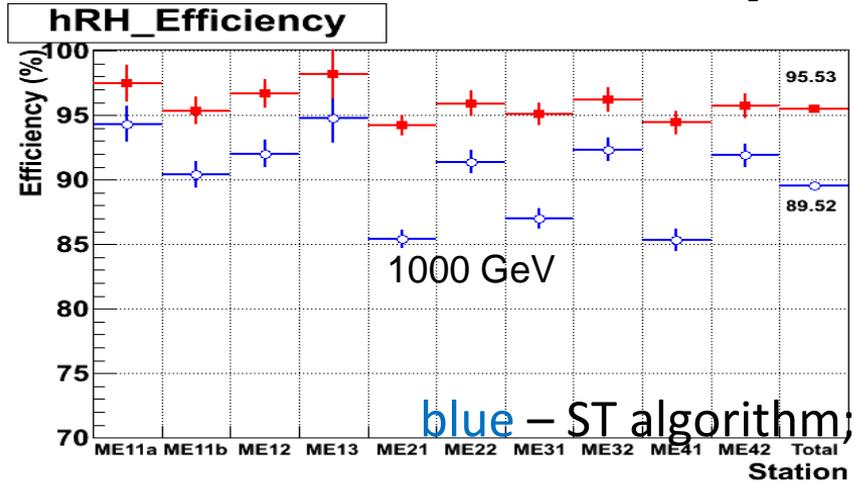


blue – ST algorithm; red – RU algorithm.

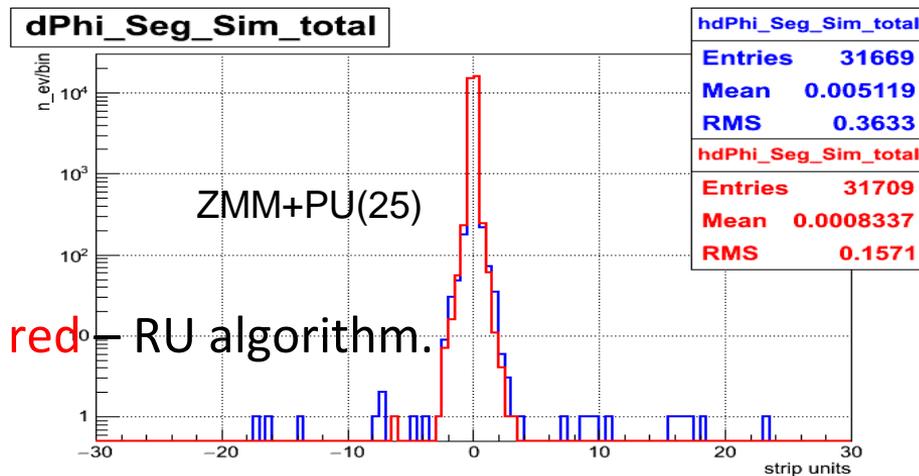
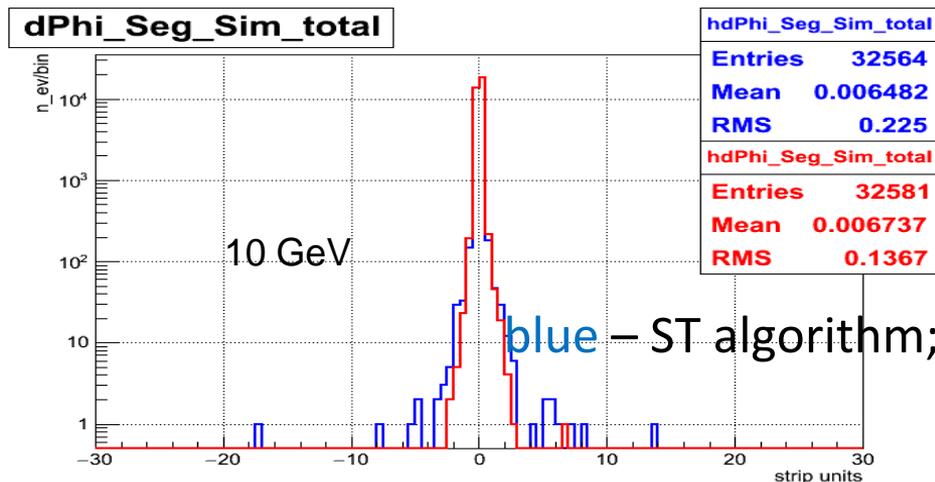
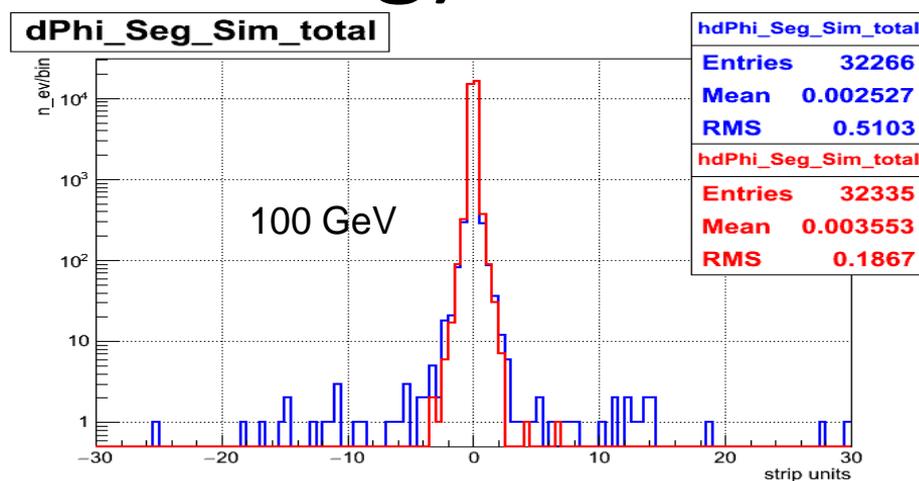
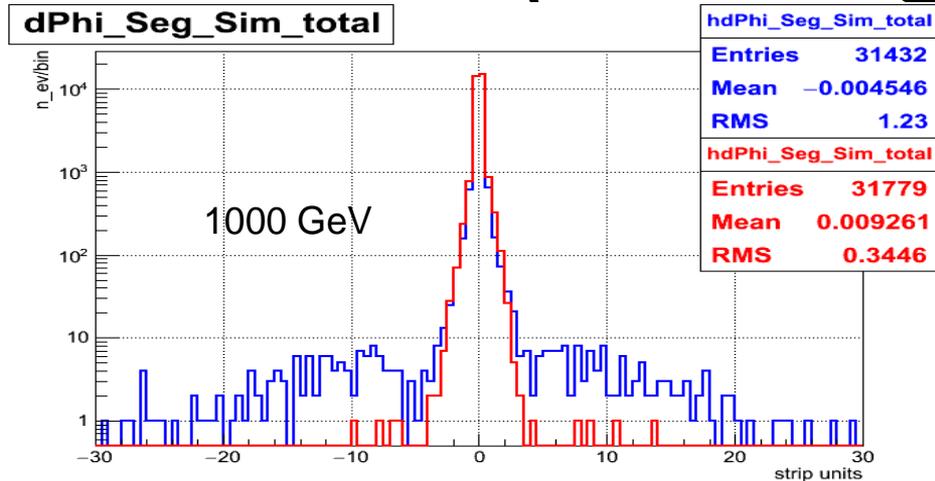
Number of RecHits in all reconstructed segments



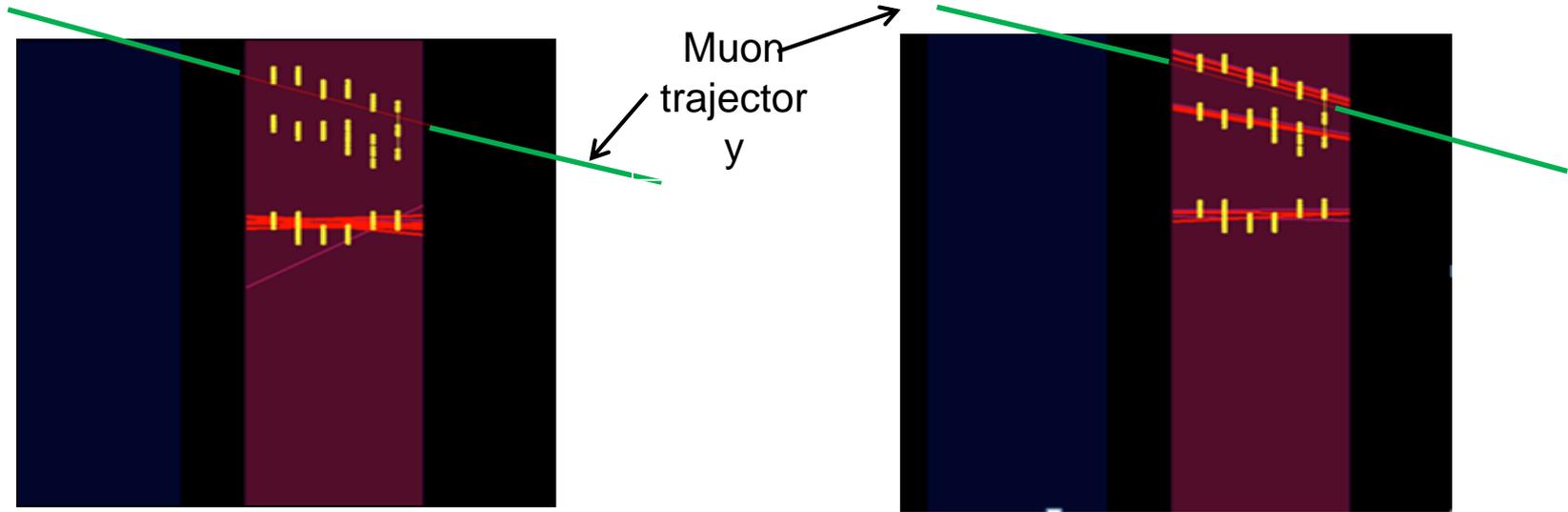
ReHit efficiency for muon segment



dPhi (RecoSeg - SimSeg)



High multiplicity example - 72 RecHits in ME21

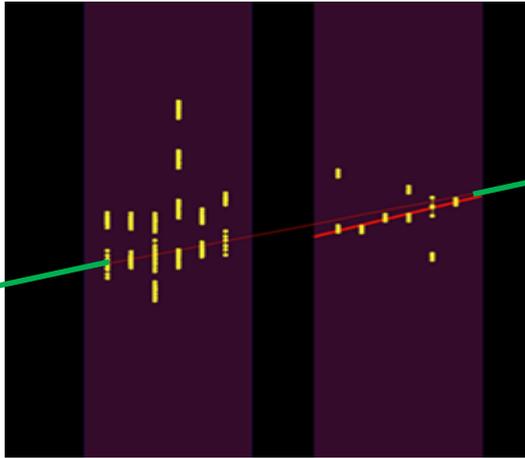


Standard
10 segments

New
11 segments

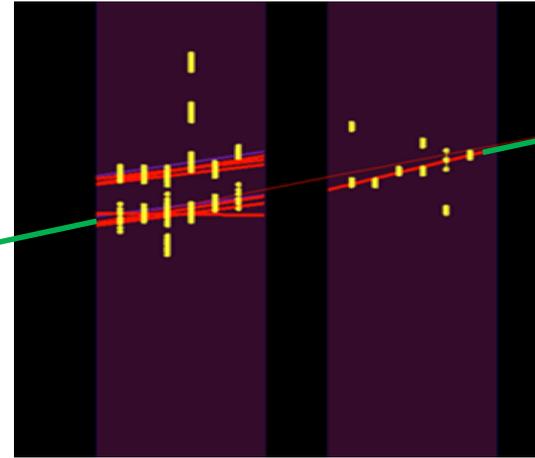
Collisions2015 256630:26:34248876

High multiplicity example - 44 RecHits in ME21



Standard
0 segments

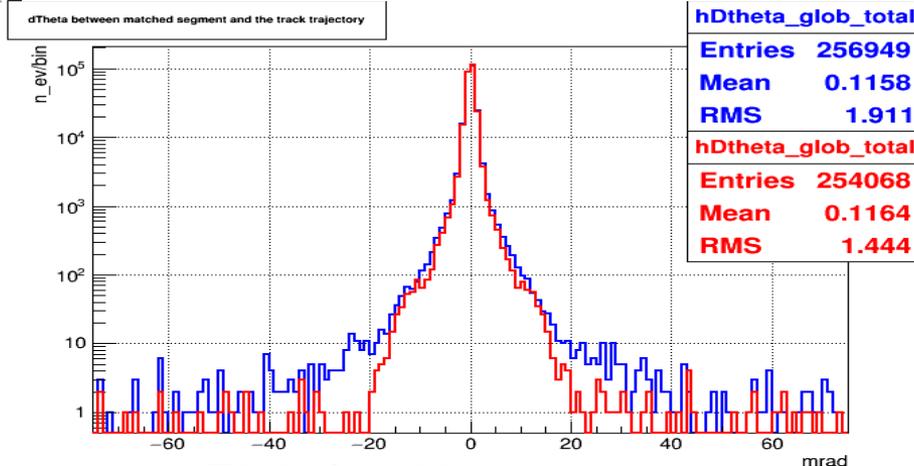
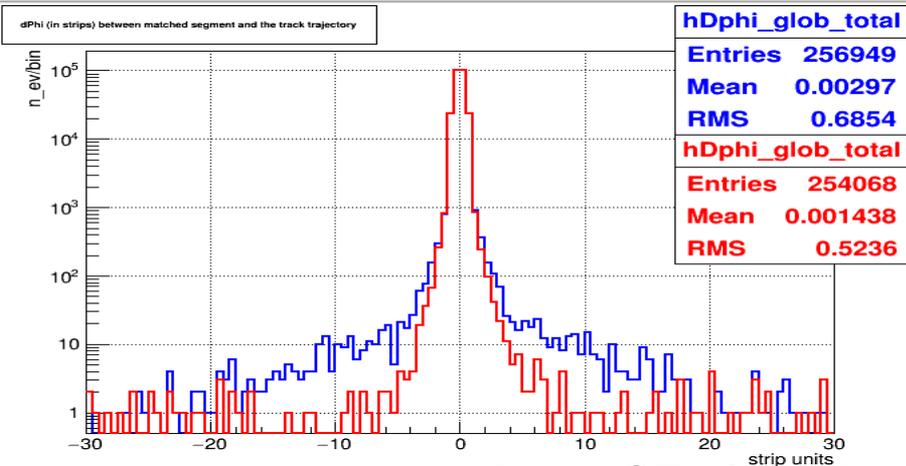
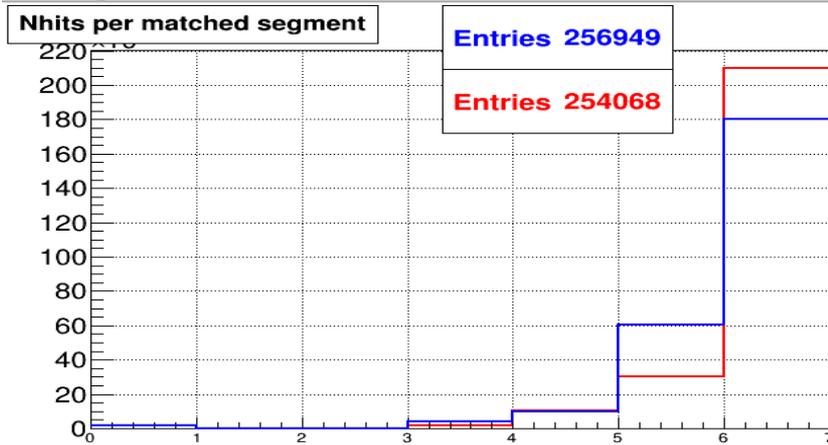
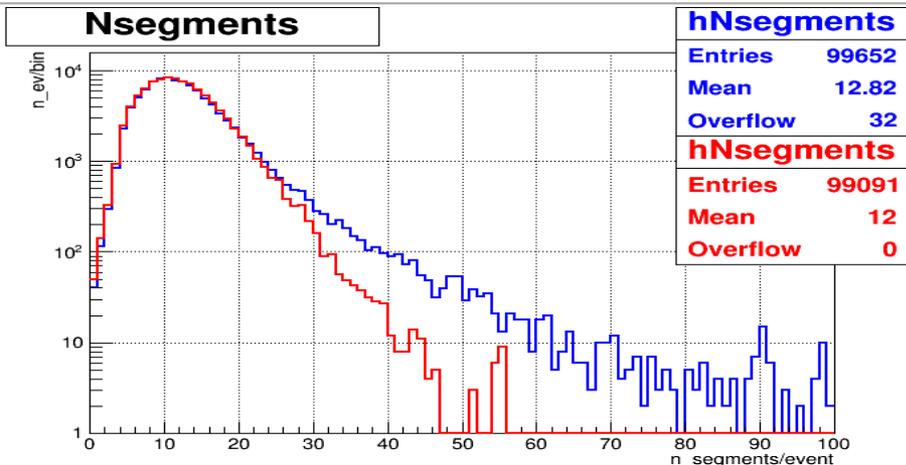
Muon
trajectory



New
8 segments

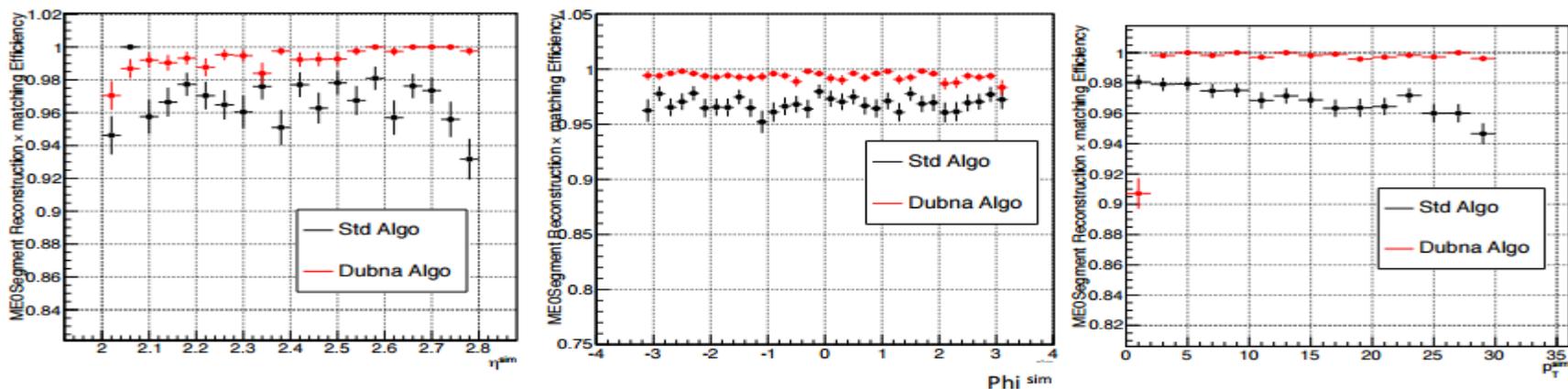
Collisions2015 256630:22:28500814

Collision data cut $p > 100\text{GeV}$

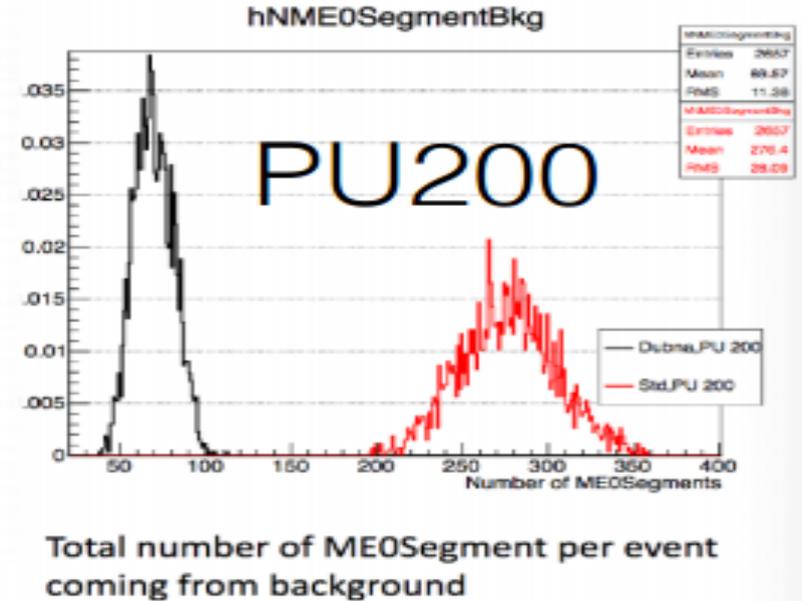
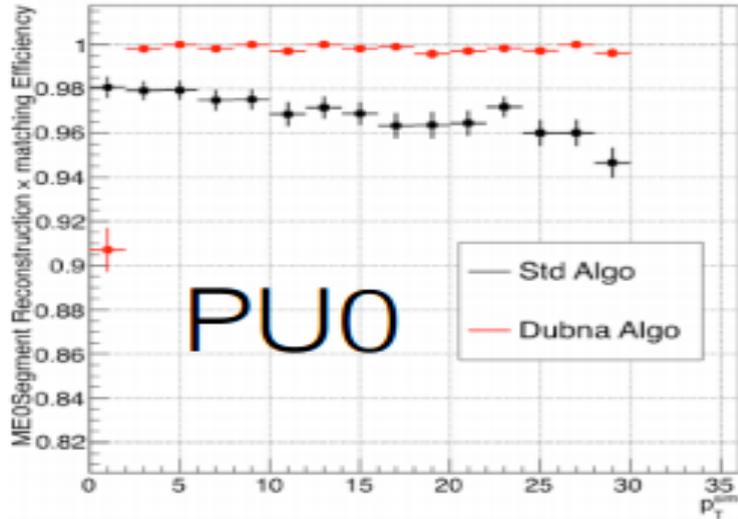


blue – ST algorithm; red – NEW algorithm.

Example: Std vs Dubna Efficiency



- ✓ Single Mu sample with PU=0, without noise, CMSSW_8_1_0_pre16
- ✓ Flat p_T in 0-30 GeV, Flat eta in ME0 acceptance
- ✓ Rechits are Smeared points with perfect spatial resolution (thus, no realistic readout yet)
- Overall, the performance of Dubna algo are the better, as expected



Апробация алгоритма на экспериментальных данных с GIF++

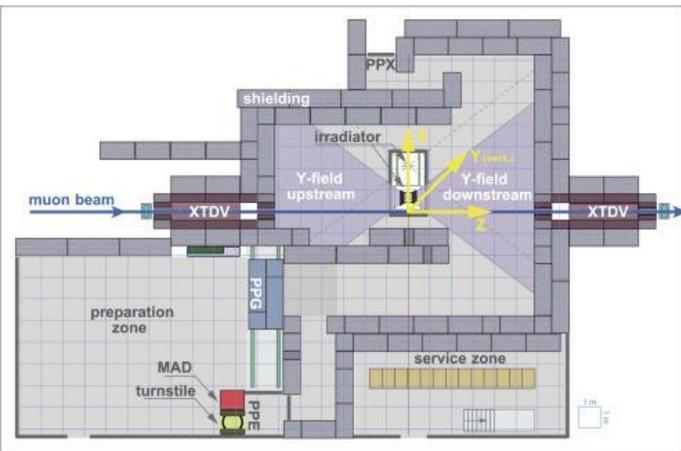
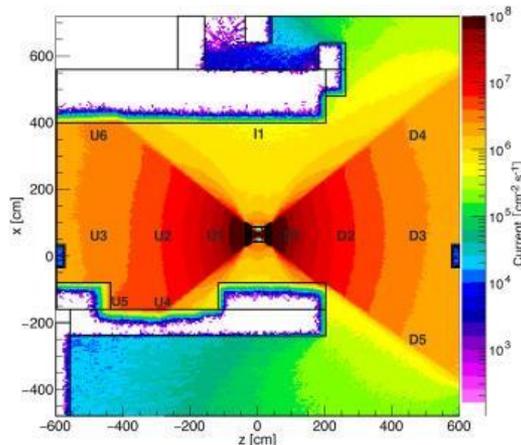
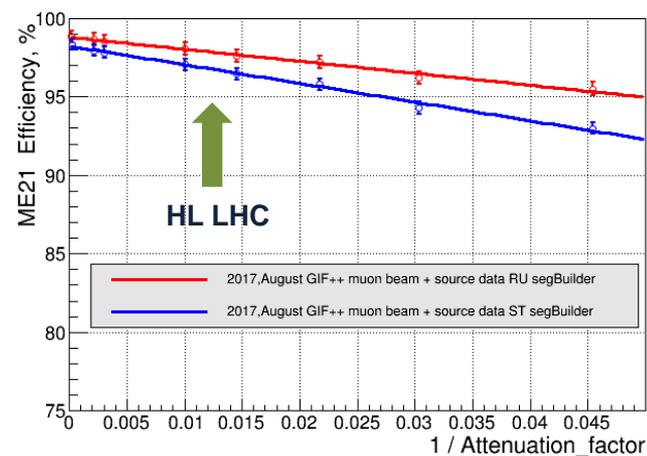


Схема установки



Радиационное поле



Эффективность реконструкции в зависимости от уровня фона
синий – ST; **красный** – RU.

Установка для гамма-облучения (GIF ++)

Цель: изучения характеристик и стабильности детекторов на LHC и будущих обновлений HL-LHC (LHC при большой светимости) в ЦЕРНе

Методика: пучки заряженных частиц высокой энергии (в основном мюоны) комбинируются с гамма-излучением от источника цезия 14 ТБк 137 для имитации фона, ожидаемого в экспериментах на LHC.

Доказано, что КСК способны выдержать условия ожидаемые на HL-LHC.