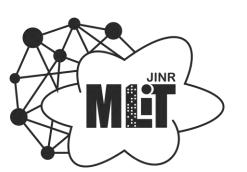




# Трекинг в Катодно-Стриповых Камерах эксперимента CMS

Войтишин Н.Н., Пальчик В.В.

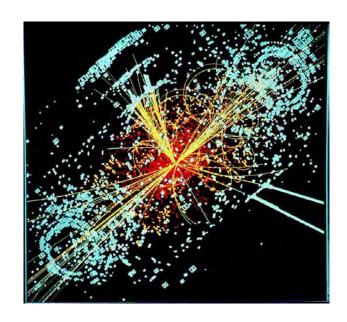


The Physics of the Dimuons at the LHC JINR, Dubna 24-06-2022

### Специфика современных экспериментов ФВЭ

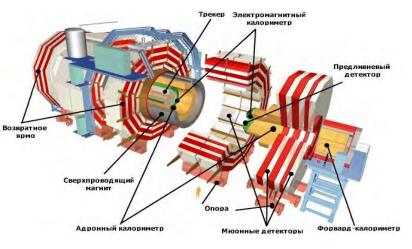
Восстановление траекторий заряженных частиц (трекинг) — одна из ключевых задач обработки экспериментальных данных.

- → 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

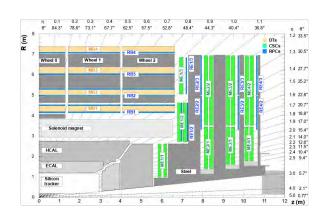


CMS событие с детектированным рождением бозона Хиггса

#### Реконструкция в Катодно-Стриповых Камерах (КСК) эксперимента CMS



#### Экспериментальная установка CMS

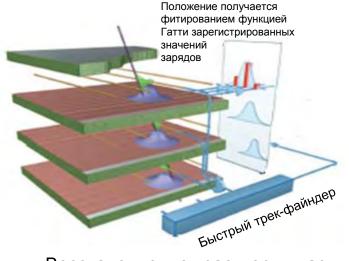


#### Псевдобыстрота

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

θ – полярный угол

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



#### Восстановление траектории частицы в КСК

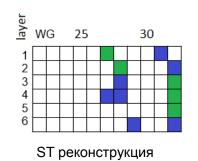
#### 2D точка (хит)

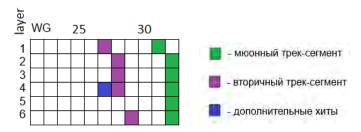
- ф координата восстанавливается по распределению заряда на стрипах (фитирование функцией Гатти)
- R координата восстанавливается по сработавшим проволокам.

#### 3D трек-сегменты

Определяются прямолинейным фитированием 2D точек с 6 слоёв камеры

#### Предыдущий алгоритм реконструкции сегментов





Идеальная реконструкция

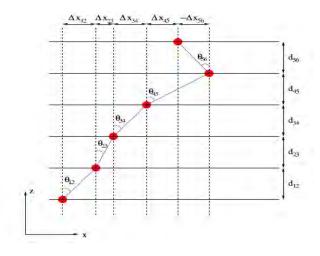
Spanning Tree (**ST**) - это остовное дерево графа, имеющее минимальный возможный вес.

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

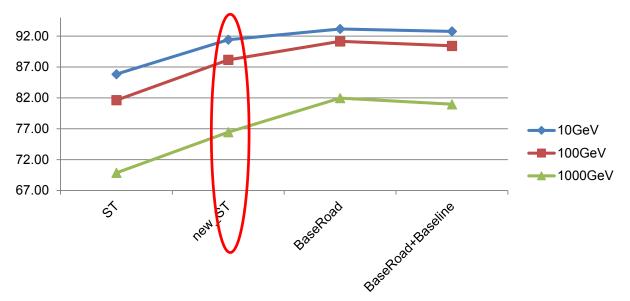
$$A = \left| \frac{\Delta x_{12}}{d_{12}} - \frac{\Delta x_{23}}{d_{23}} \right| + \left| \frac{\Delta x_{23}}{d_{23}} - \frac{\Delta x_{34}}{d_{34}} \right| + \left| \frac{\Delta x_{34}}{d_{34}} - \frac{\Delta x_{45}}{d_{45}} \right| + \left| \frac{\Delta x_{45}}{d_{45}} - \frac{\Delta x_{56}}{d_{56}}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

#### Недостатки:

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



## Эффективность реконструкции



Seg\_efficiency = 
$$\begin{cases} \frac{nr\ of\ \mu RH\ in\ segment}{nr\ of\ \mu RH\ in\ chamber}, nr\ of\ \mu RH\ in\ Segment \geq \frac{nr\ of\ \mu RH\ in\ chamber}{2} \\ 0,\ nr\ of\ \mu RH\ in\ Segment < \frac{nr\ of\ \mu RH\ in\ chamber}{2} \end{cases}, \mu RH - \text{MЮОНЫЙ XИТ}$$

#### 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

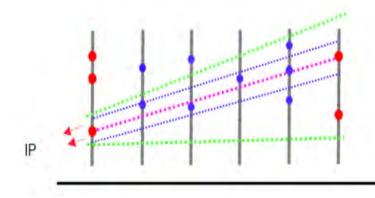
$$\left| \frac{R_2^2 Z_1 - R_1^2 Z_2}{Z_2} \right| < \Delta R$$
\_пороговое<sub>для</sub>луча

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

$$ig|R_{
m Kандидат} - R_{
m Oценочный}ig| < \Delta R$$
\_пороговое   
  $ig|\phi_{
m Kандидат} - \phi_{
m Oценочный}ig| < \Delta \phi$ \_пороговое

• Собранный трек-сегмент проверяется на условие по  $\chi^2$ 

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



#### Основные идеи реализованного RU(RoadUsage) алгоритма

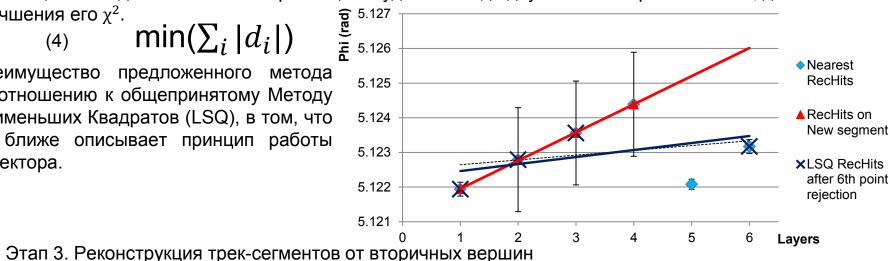
Этап 2. Улучшение кандидата в трек-сегменты

h2 h1 h3 h5 d2

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

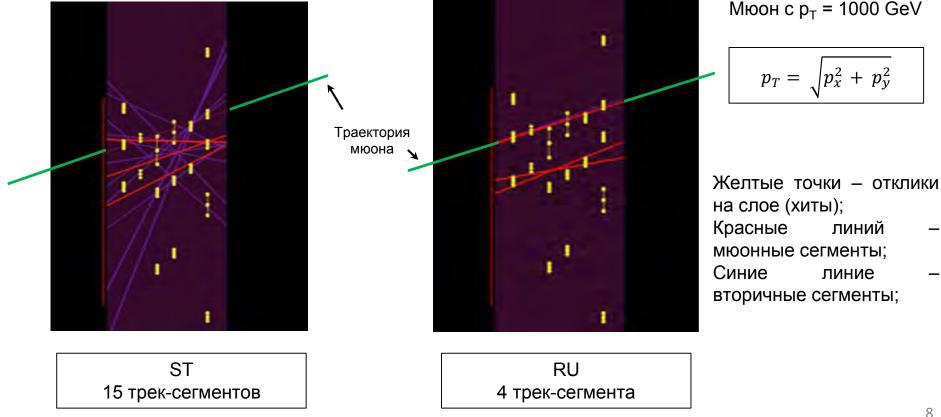
 $\min(\sum_i |d_i|)$ (4)

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

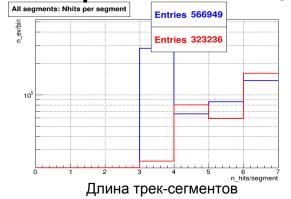


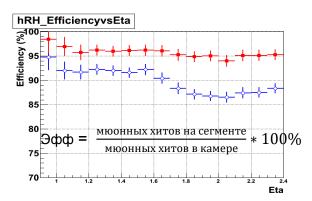
Если после предыдущих этапов реконструкции осталось достаточно неиспользованных хитов, то этапы повторяются, без учета ориентации кандидата относительно точки взаимодействия.

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

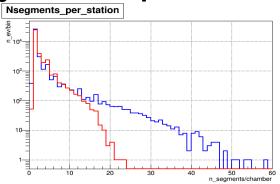


Сравнение двух алгоритмов

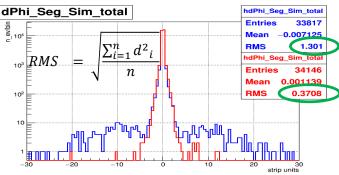




Эффективность реконструкции трек-сегментов



Количество реконструированных трек-сегментов в камере



Разница в точной координате между мюонным трексегментов и симулированной траекторией мюона

- Уменьшилось число коротких трек-сегментов **в 12 раз**
- Множественность трексегментов 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 трексегменты стали **в 3.5 раза** ближе к траектории мюона.

Данные симуляции. Мюоны с р<sub>т</sub> = 1000 GeV 10000 событий.

### Время, затрачиваемое на реконструкцию

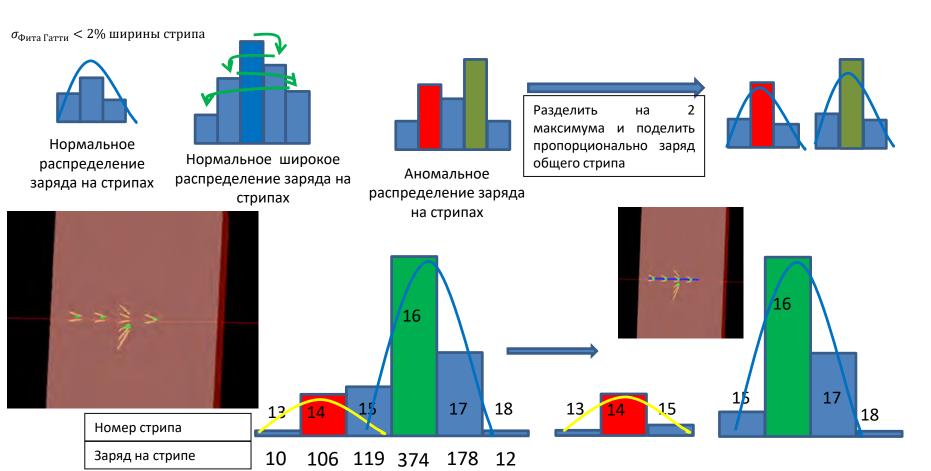
Оценка проводилась стандартной процедурой, при имплементации кода в пакет CMSSW (пакет программ CMS).

В качестве данных использовался датасет MC SingleMU(pT = 1 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.

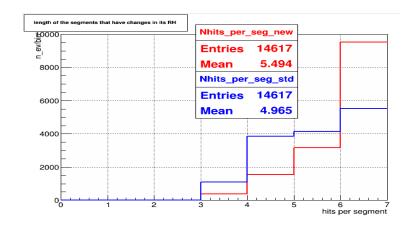
**Замечание.** Реализованный алгоритм более время-затратный, чем ST, но за счёт уменьшения количества ложных сегментов количество переборов на последующих этапах реконструкции траектории мюона уменьшается.

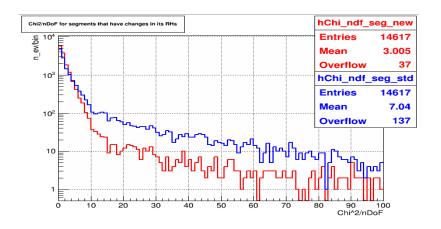
### Улучшение реконструкции хитов в КСК



#### Длина и качество сегментов с модифицированными хитами

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



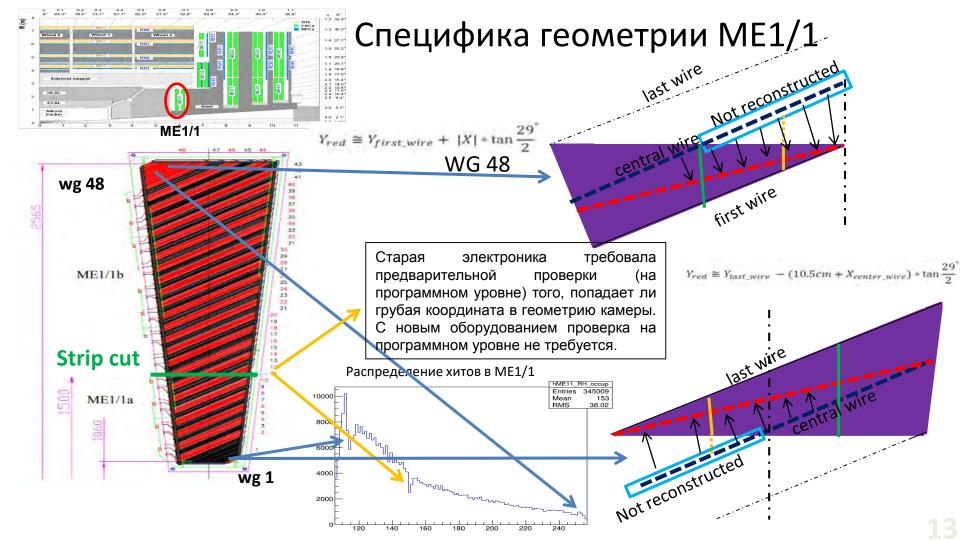


Длина трек-сегмента

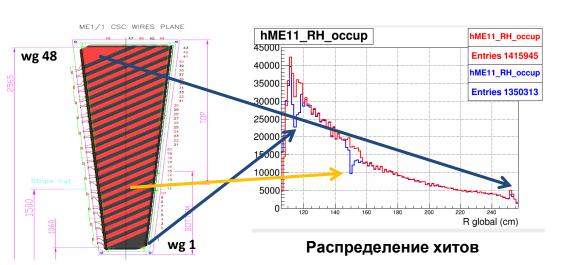
 $\chi^2$  трек-сегмента

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

- Длина изменившихся трек-сегментов увеличилась на 0.53 хита
- $\chi^2$  изменившихся трек-сегментов уменьшилась в 2.3 раза



### Улучшение реконструкции в МЕ1/1 камерах





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

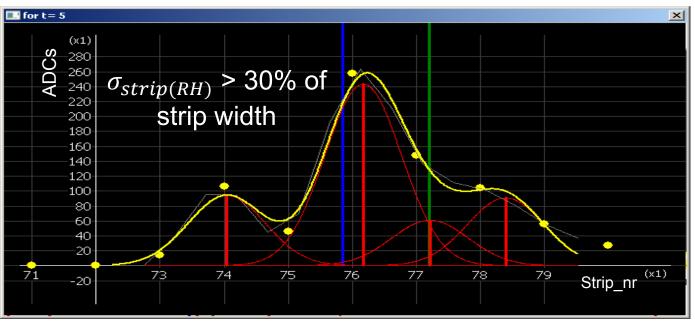
Комплекс программ по реконструкции сегментов в КСК эксперимента CMS:

- ✓ Внедрен в официальный пакет программного обеспечения СМS 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.

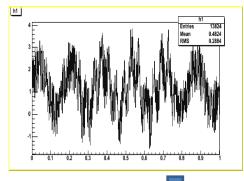
Модификация реконструкции хитов в КСК эксперимента CMS:

✓ В 2020 году были имплементированы все представленные изменения.

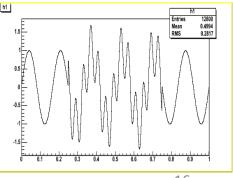
#### Распознавание сложных перекрывающихся сигналов



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

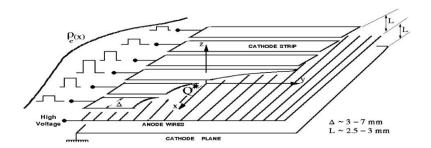




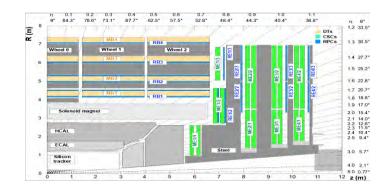


## backup

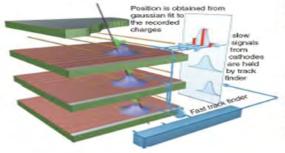
### Катодно-стриповые камеры



Принцип работы одного слоя КСК



Расположение КСК в экспериментальной установке CMS



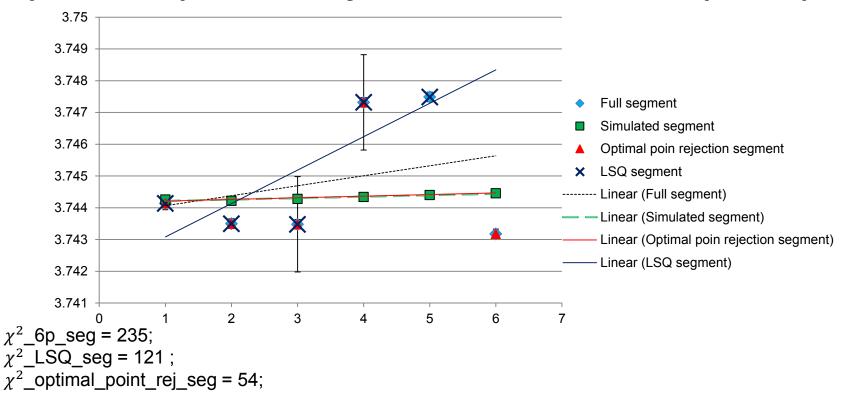
#### 2D points

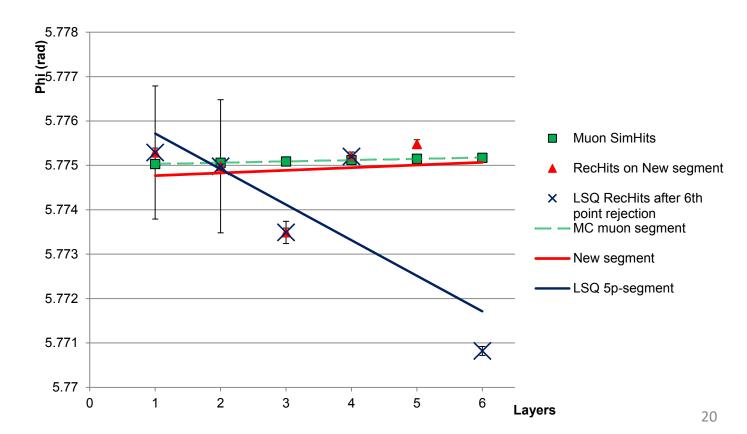
- o coordinate measured by charge distribution on strips (fit with the Gatti function)
- R coordinate measured by wires

#### 3D segments

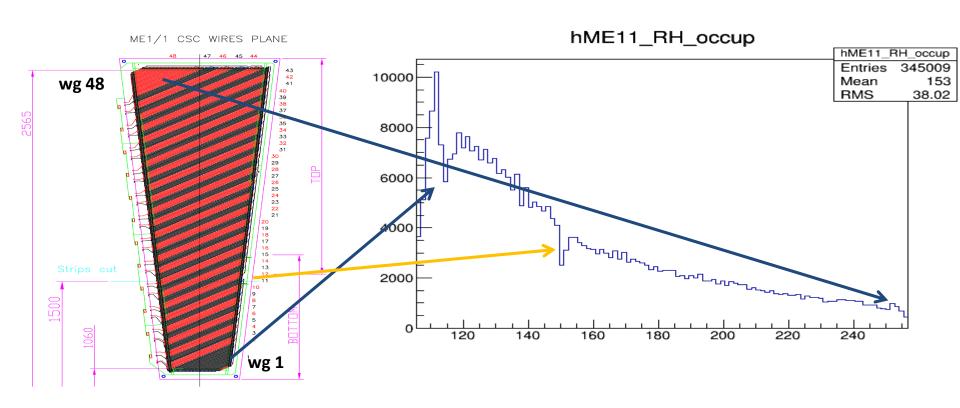
Determined by fitting the 2D points from the 6 layers of each chamber

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

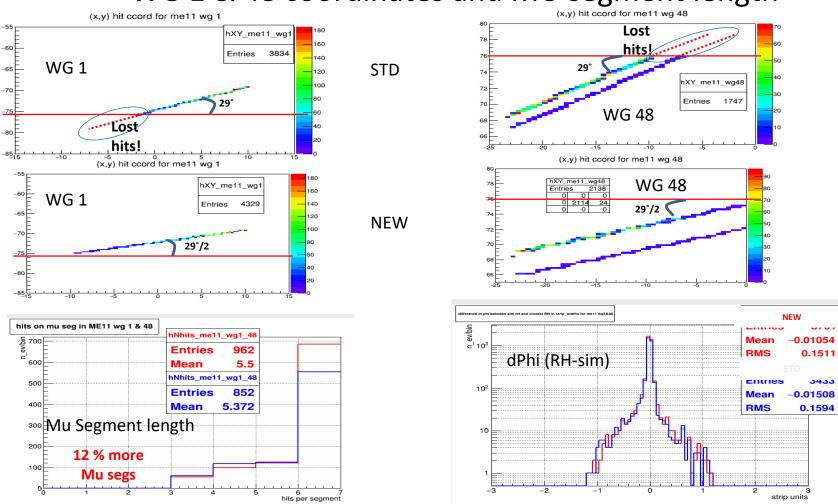




## МЕ1/1 специфическая геометрия



#### WG 1 & 48 coordinates and MU segment length



### 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)

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

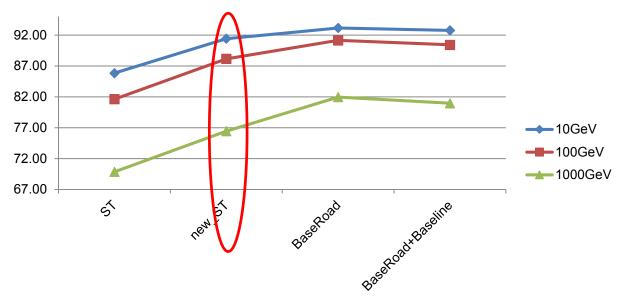
$$qWG = \Delta z_{anode-anode} * \tan(\theta)$$

 $lower\_bound = qWG\_min - 1.5*maxWG\_width$ 

 $upper\_bound = qWG\_max + 1.5*maxWG\_width$ 

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



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

### 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;
  - 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.

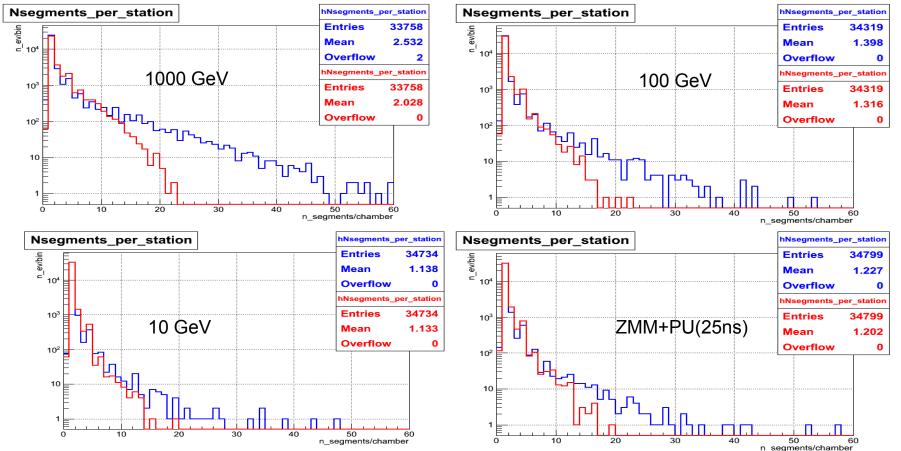
Displaced Muons;Halo Muons;

JPsi;

Single Muon Pt1000GeV;

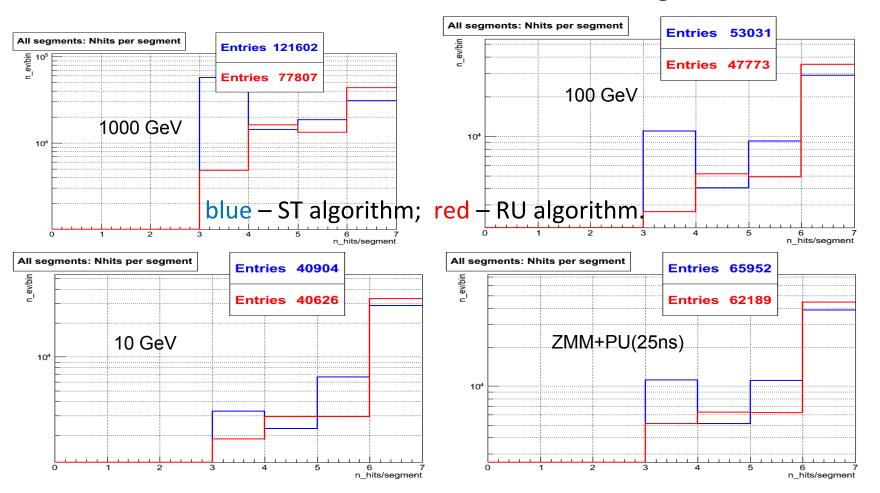
25

## Segment multiplicity per station



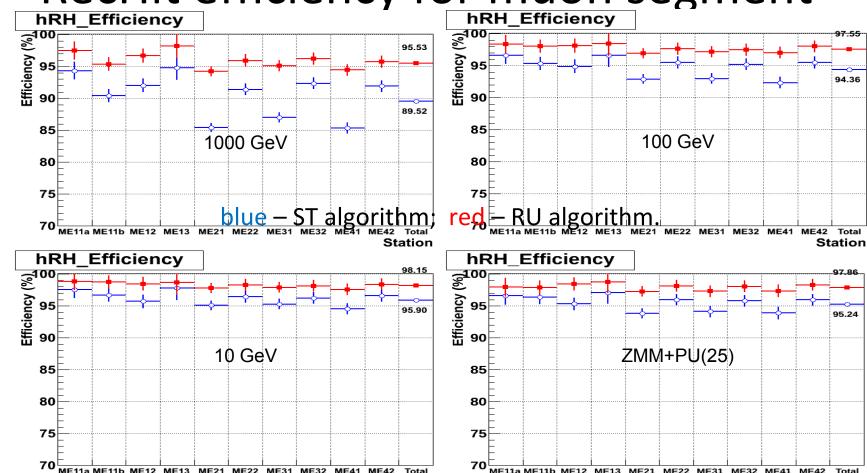
blue – ST algorithm: red – RU algorithm.

#### Number of RecHits in all reconstructed segments



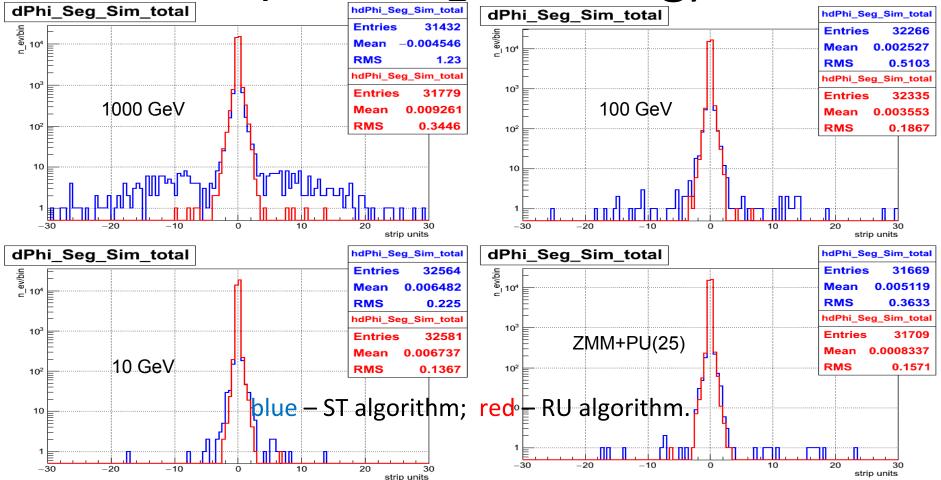
Station

RecHit efficiency for muon segment

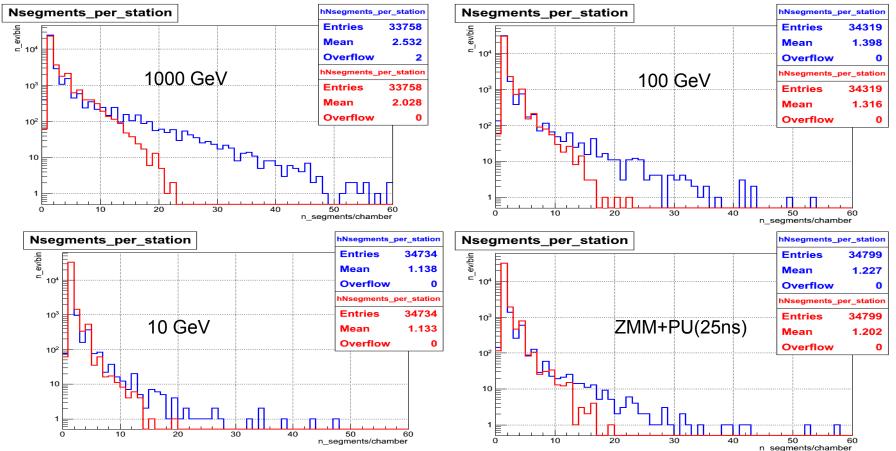


Station

dPhi (RecoSeg - SimSeg)

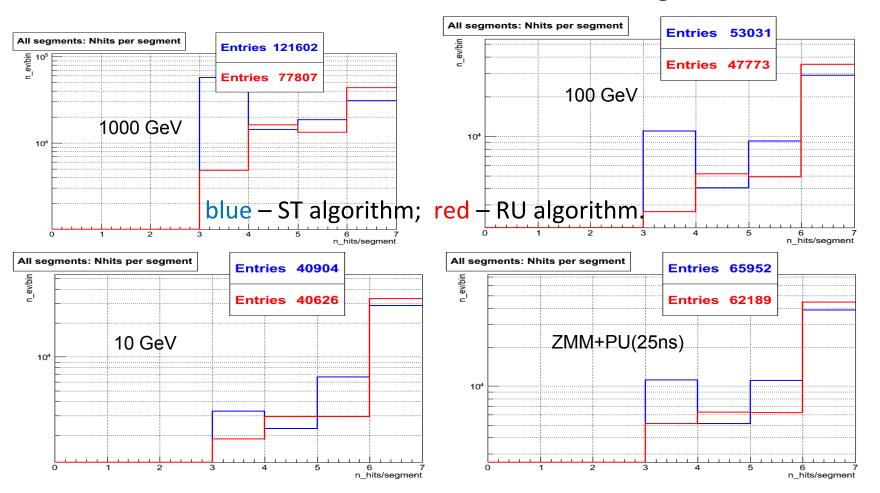


## Segment multiplicity per station



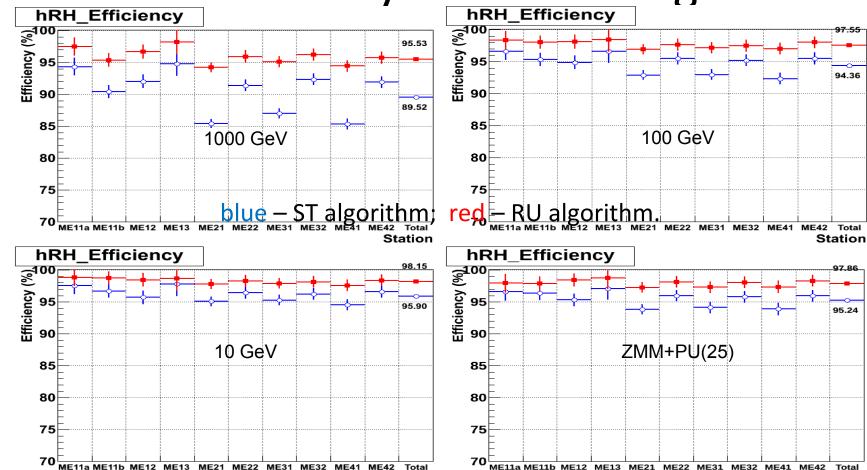
blue – ST algorithm: red – RU algorithm.

#### Number of RecHits in all reconstructed segments



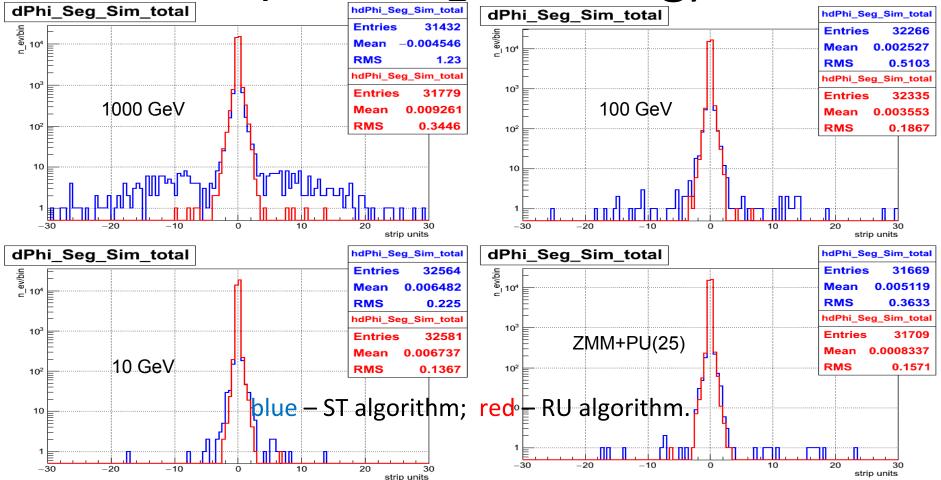
Station

### RecHit efficiency for muon segment

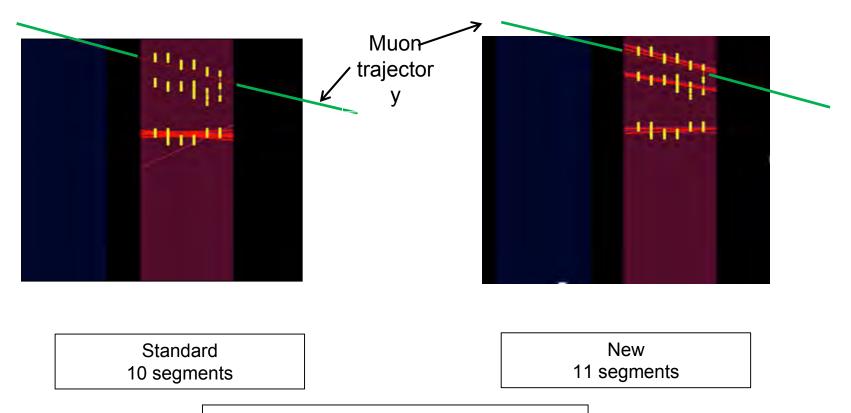


Station

dPhi (RecoSeg - SimSeg)

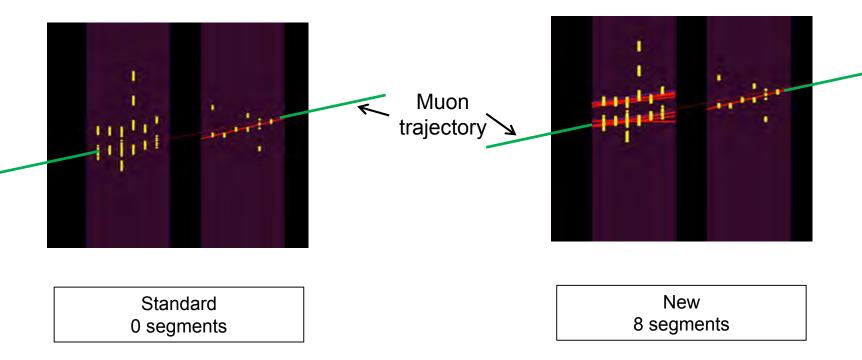


### High multiplicity example - 72 RecHits in ME21

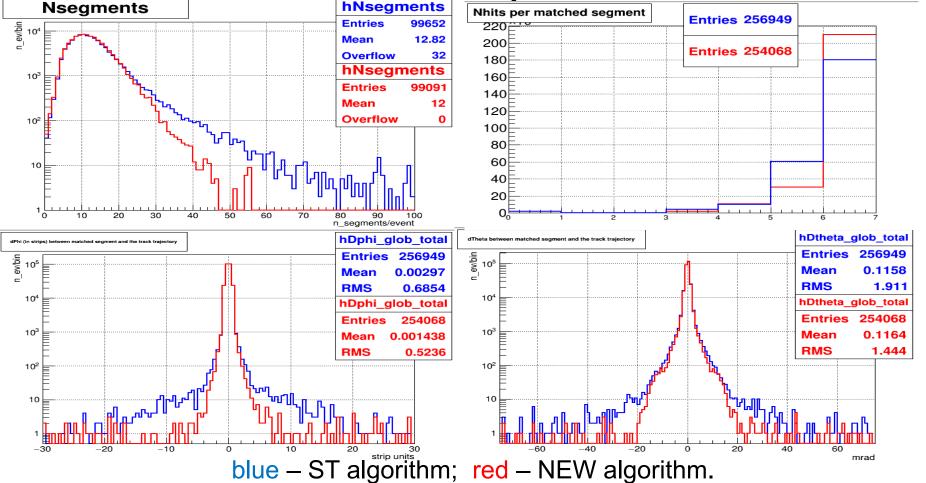


Collisions2015 256630:26:34248876

### High multiplicity example - 44 RecHits in ME21

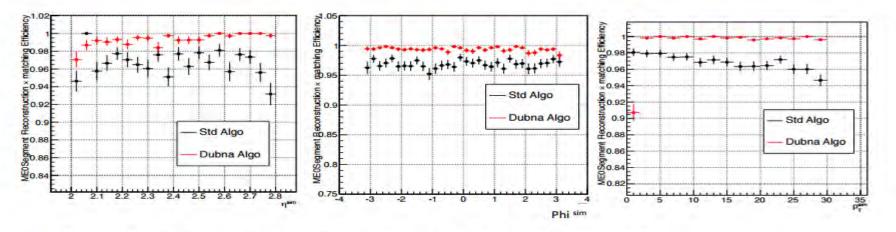


## Collision data cut p>100GeV



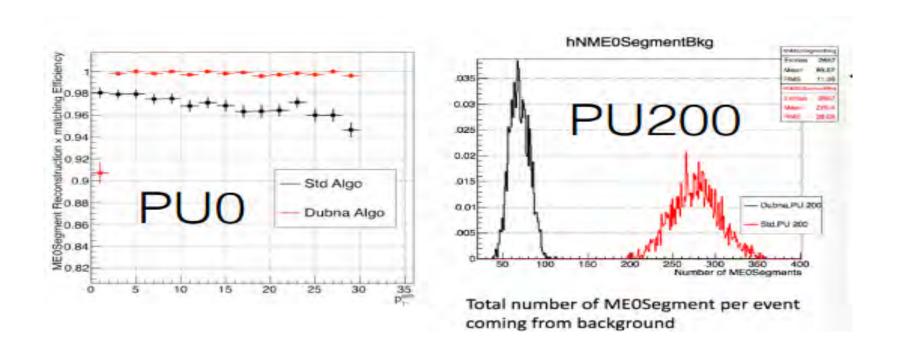
https://indico.cern.ch/event/593396/contributions/2397609/attachments/13871 00/2111275/ME0SegmStatus.pdf talk by **R. Venditti 16-12-12** Mini-Workshop on GEM Simulations for Phase-2

### **Example: Std vs Dubna Efficiency**

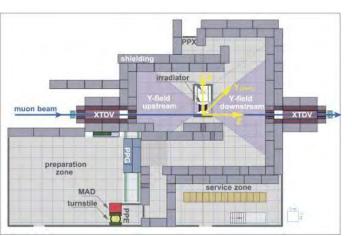


- ✓ Single Mu sample with PU=0, without noise, CMSSW\_8\_1\_0\_pre16
- Flat pT in 0-30 GeV, Flat eta in MEO acceptance
- Rechits are Smeared points with perfect spatial resolution (thus, no realistic readout yet)
- Overall, the performance of Dubna algo are the better, as expected

## https://indico.cern.ch/event/611558/contributions/2465877/talk by **Cesare Calabria**, 17-02-06 MuPOG Meeting



## Апробация алгоритма на экспериментальных данных с GIF++



600 400 U6 11 D4 10<sup>6</sup> 10<sup>4</sup> 10<sup>4</sup> 10<sup>4</sup> 10<sup>4</sup> 10<sup>4</sup> 10<sup>4</sup> 10<sup>4</sup> 10<sup>4</sup> 10<sup>4</sup>

Схема установки

Радиационное поле

#### 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.

синий – ST; красный – RU.