

**Расчет карты электрического поля для VM@N GEM  
камеры при помощи GMSH и Elmer**

*Баранов Дмитрий  
Александрович*

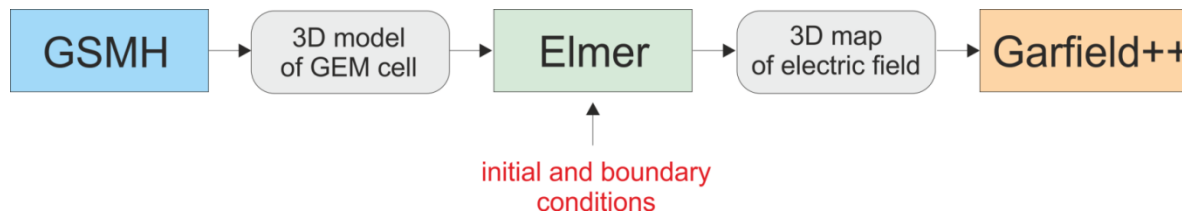
Для генерации карты электрического поля внутри gem holes и последующей работы с ней использовалась связка следующих программ:

- **GMSH**
- **ELMER**
- **GARFIELD++**

**GMSH** – средство построения геометрической модели GEM ячейки (в виде 3D сетки).

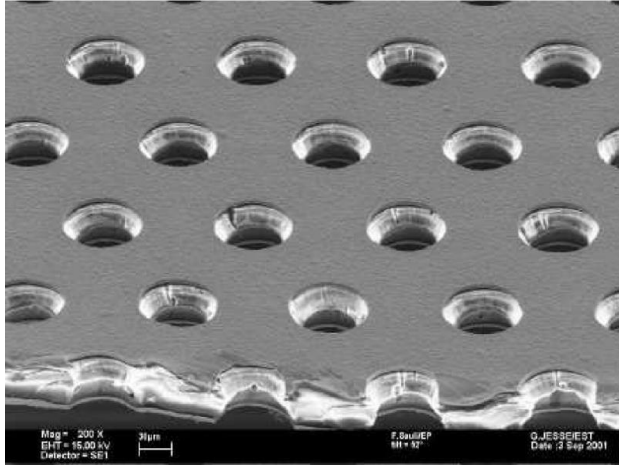
**ELMER** – программный продукт, который был использован в качестве инструмента для расчета электростатического поля в GEM камере.

**GARFIELD++** - набор библиотек на C++ для моделирования физических процессов внутри газовых и полупроводниковых детекторов.



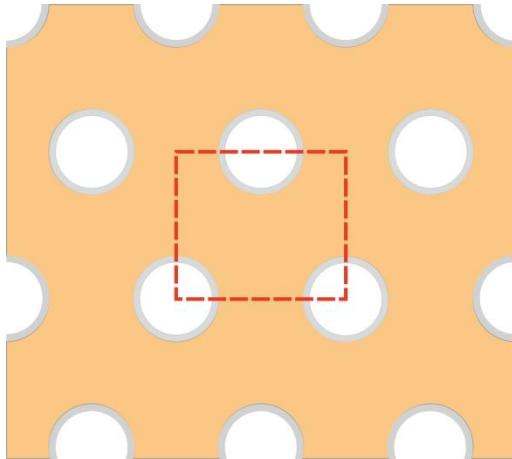
*Этапы детального моделирования GEM детектора*

## GEM foil

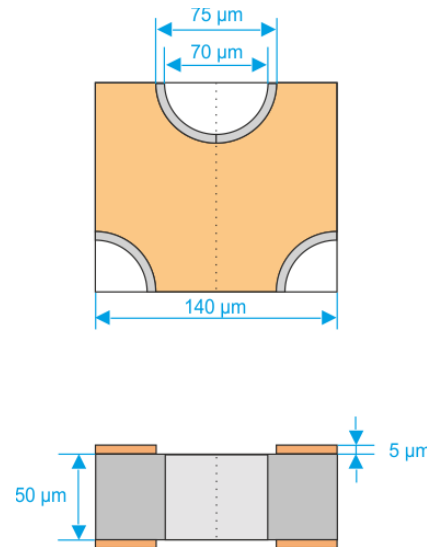


Усиливающий слой в GEM камере представляет собой диэлектрик, покрытый с двух сторон слоями меди. Он имеет множество микроотверстий, внутри которых образуется сильное электрическое поле, если на медные электроды подается напряжение.

**Задача:** рассчитать трехмерную карту электрического поля, образуемого внутри отверстий



“Вырезаем” область, которая будет являться базовым элементом (*periodic cell*) для построения поверхности GEM слоя.



### Параметры:

диаметр отверстия:

в диэлектрике: **70 μm**  
в медном слое: **75 μm**

толщины:

диэлектрик: **50 μm**  
металлический слой: **5 μm**

форма отверстия: cylindrical

материалы:

диэлектрик: **kapton**  
электрод: **copper**

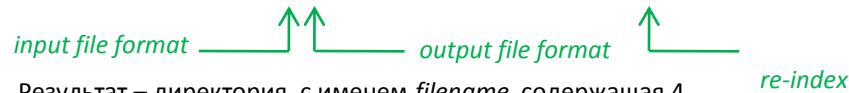


# Расчет карты электрического поля в Elmer

## Этапы расчета карты поля в Elmer:

1. Преобразуем сеточную 3D-модель из GMSH формата (\*.msh-файл), в рабочий формат Elmer при помощи команды:

**ElmerGrid 14 2 filename.msh -autoclean**



Результат – директория, с именем *filename*, содержащая 4 файла (полная информация о сетке модели):

- mesh.header
- mesh.nodes
- mesh.elements
- mesh.boundary

2. Создаем \*.sif-файл (*Solver Input File*), содержащий параметры, необходимые для расчета карты электрического поля (initial and periodicity conditions, description of bodies and materials, potentials applied to electrodes, etc.)

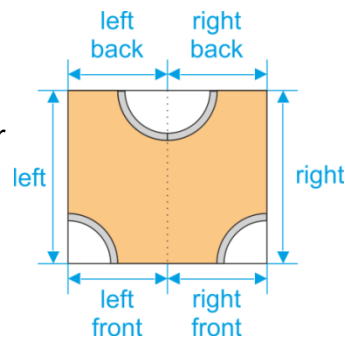
3. Проводим расчет карты поля при помощи команды:

**ElmerSolver filename.sif**

Результат – два файла: один с результатами расчета, другой - с POST данными для визуализации (файлы \*.result и \*.ep соответственно).

## Особенности:

Для корректного задания *periodicity* (для стыковки элементов друг с другом) в *Elmer* конфигурация нашей ячейки должна быть следующей: должна состоять из 6-ти независимых боковых поверхностей. Это нужно учитывать уже на этапе построения модели в *GMSH*.



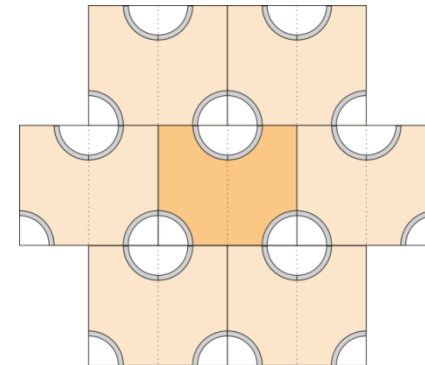
## Типы входных и выходных форматов Elmer:

The first parameter defines the input file format:

- 1) .grd : Elmergrid file format
- 2) .mesh.\* : Elmer input format
- 3) .ep : Elmer output format
- 4) .ansys : Ansys input format
- 5) .inp : Abaqus input format by Ideas
- 6) .fil : Abaqus output format
- 7) .FDNEUT : Gambit (Fidap) neutral file
- 8) .unv : Universal mesh file format
- 9) .mphtxt : Comsol Multiphysics mesh format
- 10) .dat : Fieldview format
- 11) .node,.ele: Triangle 2D mesh format
- 12) .mesh : Medit mesh format
- 13) .msh : GID mesh format
- 14) .msh : Gmsh mesh format
- 15) .ep.i : Partitioned ElmerPost format

The second parameter defines the output file format:

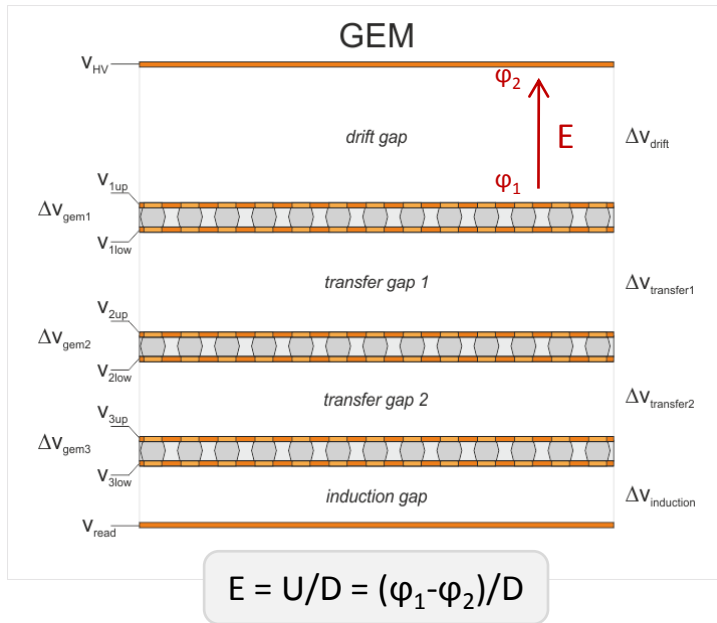
- 1) .grd : ElmerGrid file format
- 2) .mesh.\* : ElmerSolver format (also partitioned)
- 3) .ep : ElmerPost format
- 4) .msh : Gmsh mesh format
- 5) .vtu : VTK ascii XML format



Именно так ячейки с данной конфигурацией должны стыковаться друг с другом для образования поверхностей в *GEM* камере (*Elmer*)

# Параметры GEM для расчета карты электрического поля

Карта электрического поля была рассчитана на основе следующих параметров:



## Напряженность эл. поля:

$E_{drift} = 0.88 \text{ kV/cm}$   
 $E_{trans1} = 1.92 \text{ kV/cm}$   
 $E_{trans2} = 2.78 \text{ kV/cm}$   
 $E_{induct} = 3.16 \text{ kV/cm}$

## Толщины промежутков:

$D_{drift} = 0.3 \text{ cm}$   
 $D_{trans1} = 0.25 \text{ cm}$   
 $D_{trans2} = 0.20 \text{ cm}$   
 $D_{induct} = 0.15 \text{ cm}$

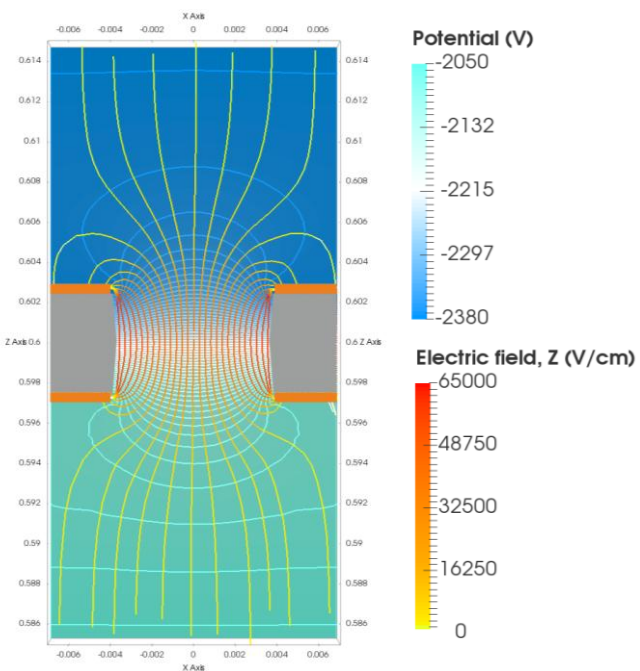
## Напряжение:

$\Delta V_{drift} = 265.0 \text{ V}$   
 $\Delta V_{trans1} = 481.0 \text{ V}$   
 $\Delta V_{trans2} = 555.0 \text{ V}$   
 $\Delta V_{induct} = 473.6 \text{ V}$   
 $\Delta V_{gem1} = 303.4 \text{ V}$   
 $\Delta V_{gem2} = 288.6 \text{ V}$   
 $\Delta V_{gem3} = 273.8 \text{ V}$

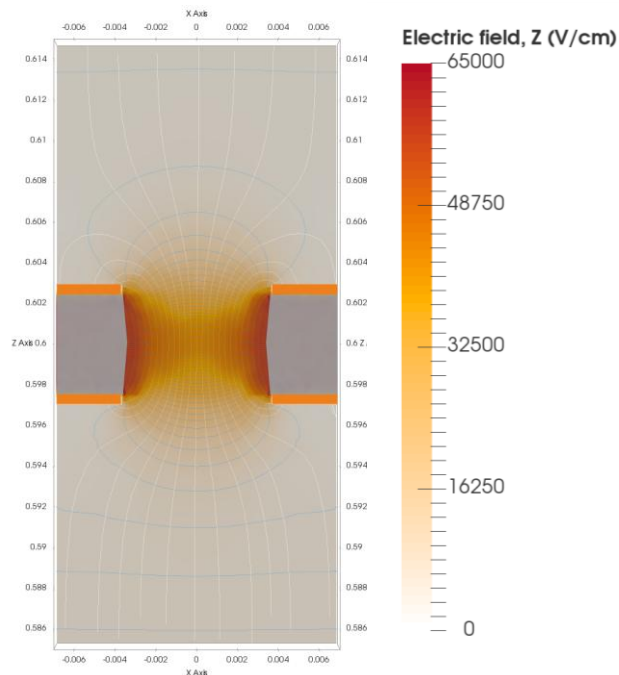
## Потенциалы на электродах:

$V_{HV} = -2640.4 \text{ V}$   
 $V_{1up} = -2375.4 \text{ V}$   
 $V_{1low} = -2072.0 \text{ V}$   
 $V_{2up} = -1591.0 \text{ V}$   
 $V_{2low} = -1302.4 \text{ V}$   
 $V_{3up} = -747.4 \text{ V}$   
 $V_{3low} = -473.6 \text{ V}$   
 $V_{read} = 0.0 \text{ V}$

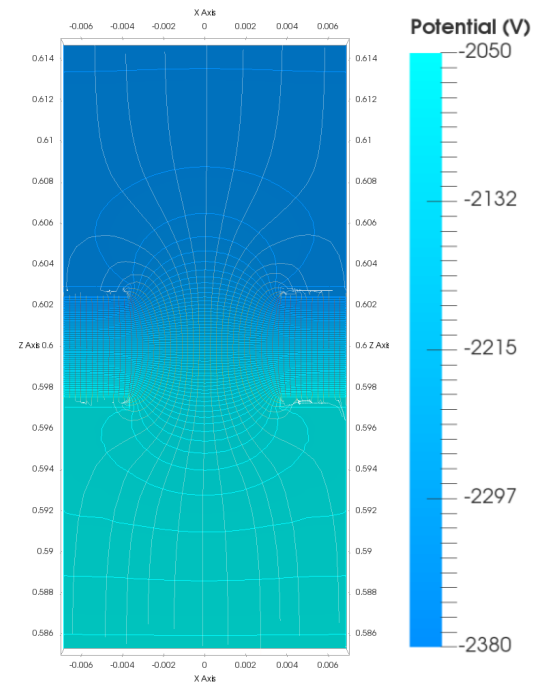
## Визуализация: карта электрического поля (вблизи GEM hole)



Эквипотенциальные и силовые линии  
электрического поля  
(GEM hole, GEM1 = 0.6 cm)

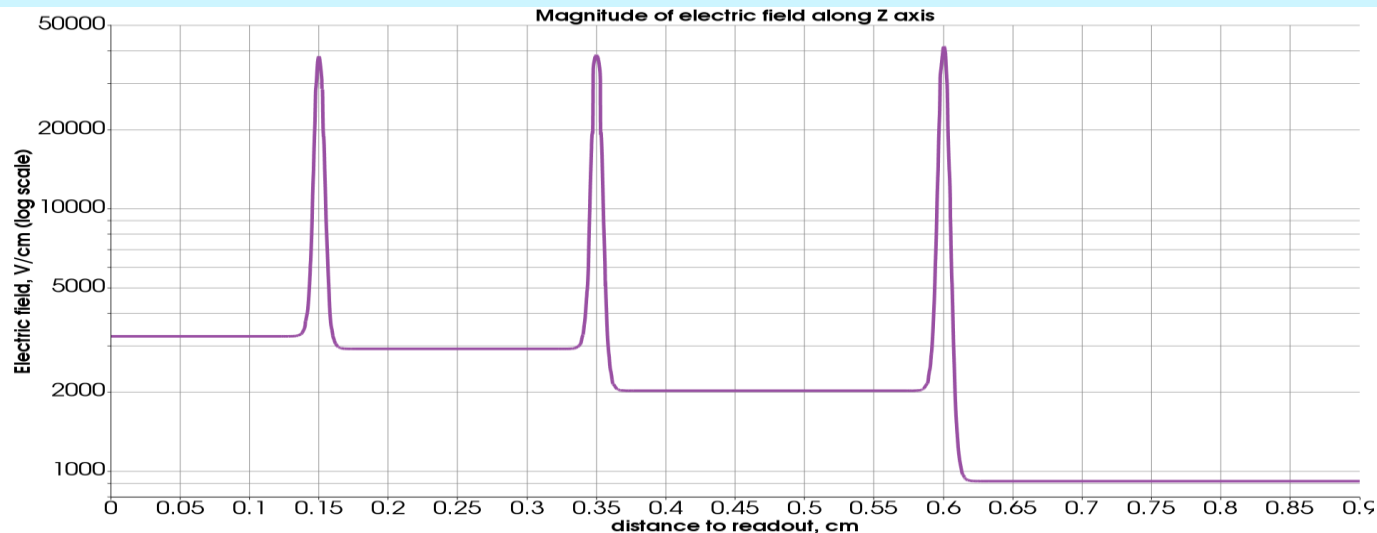
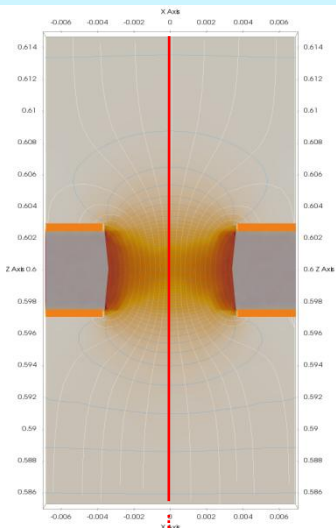


Интенсивность электрического поля  
(GEM hole, GEM1 = 0.6 cm)

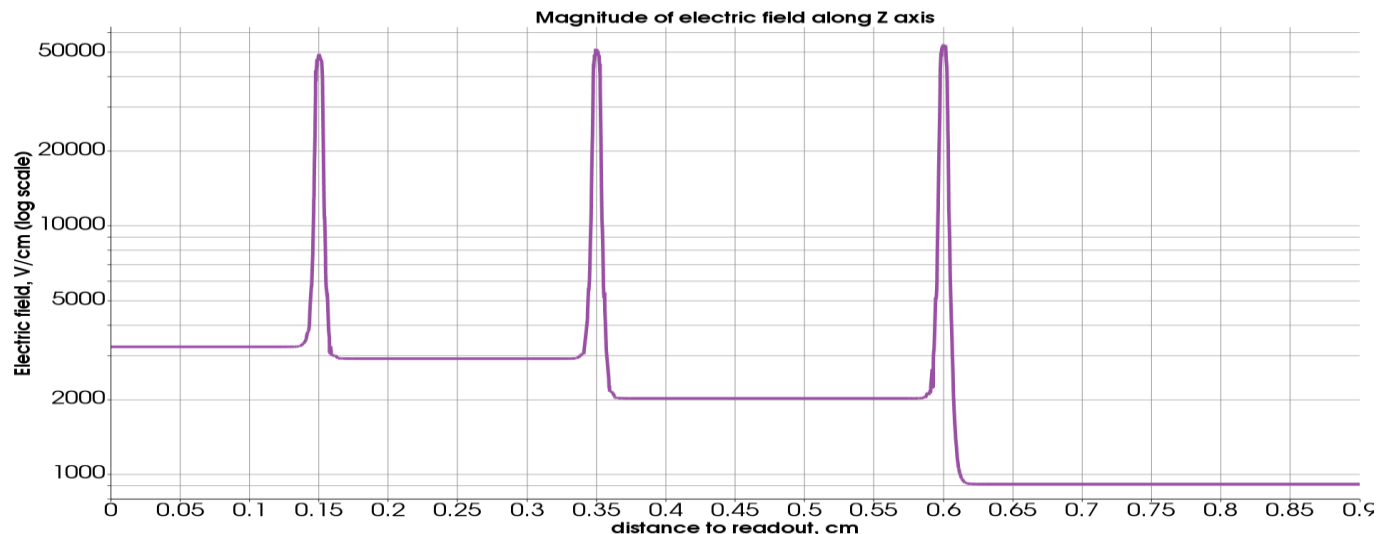
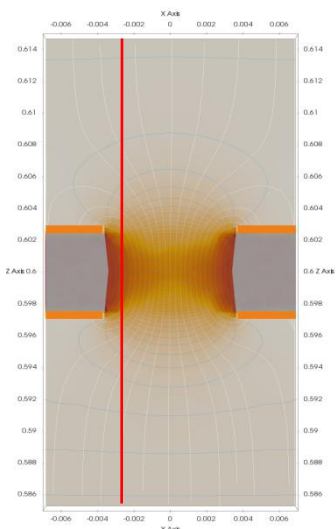


Потенциалы  
(GEM hole, GEM1 = 0.6 cm)

# Значения электрического поля по всей толщине GEM камеры

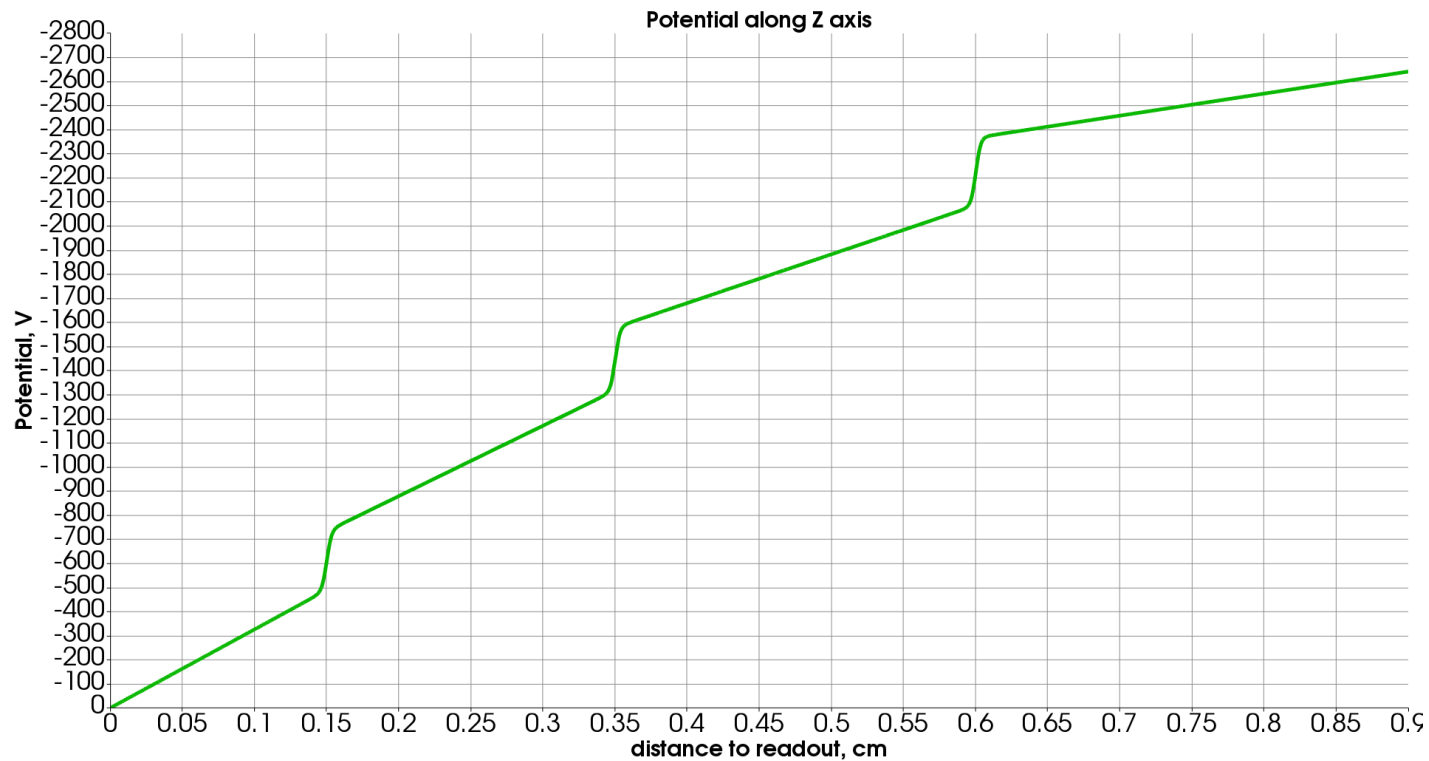
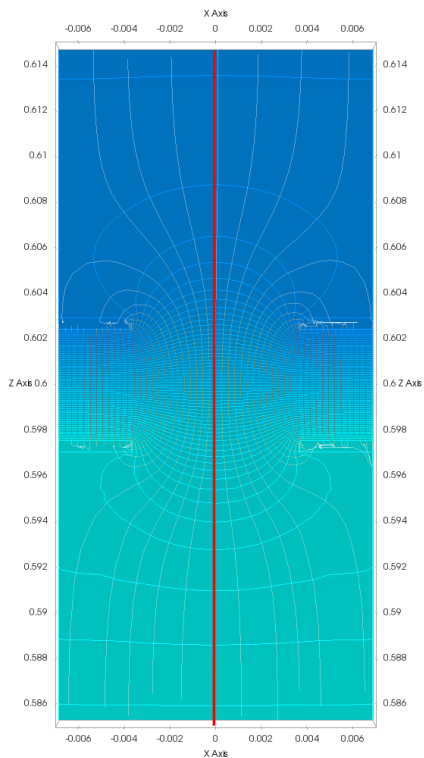


Величина электрического поля вдоль *линии*, проходящей через центр *gem hole* по всей толщине GEM камеры (перпендикулярно к плоскостям *gem foil*)



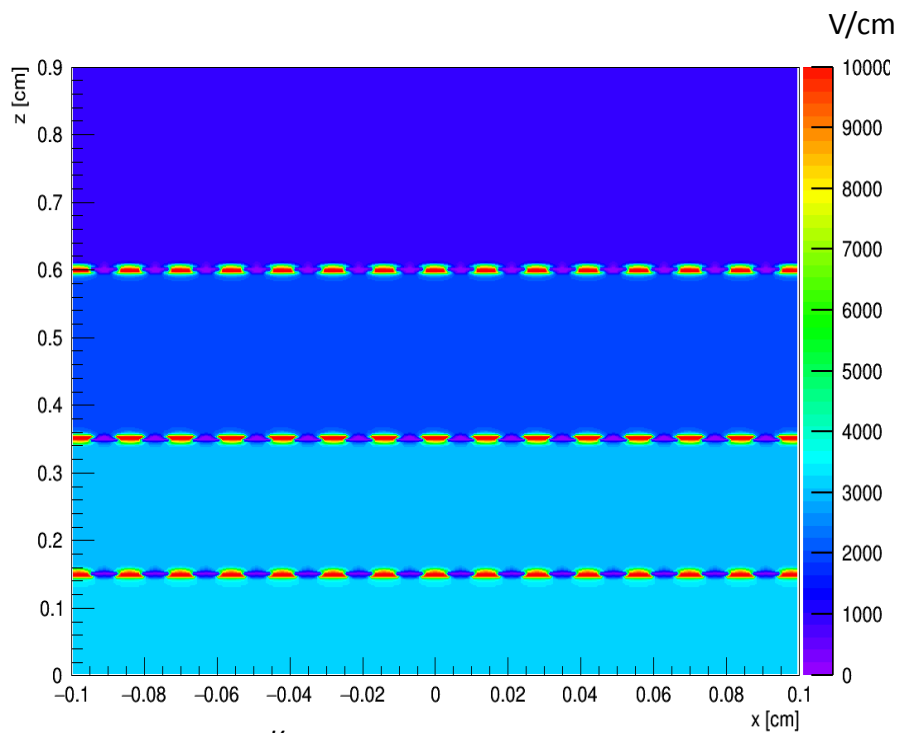
Величина электрического поля вдоль *линии*, проходящей через *gem hole* со смещением  $-25 \mu\text{m}$  от центра по всей толщине GEM камеры

# Потенциал по всей толщине GEM камеры

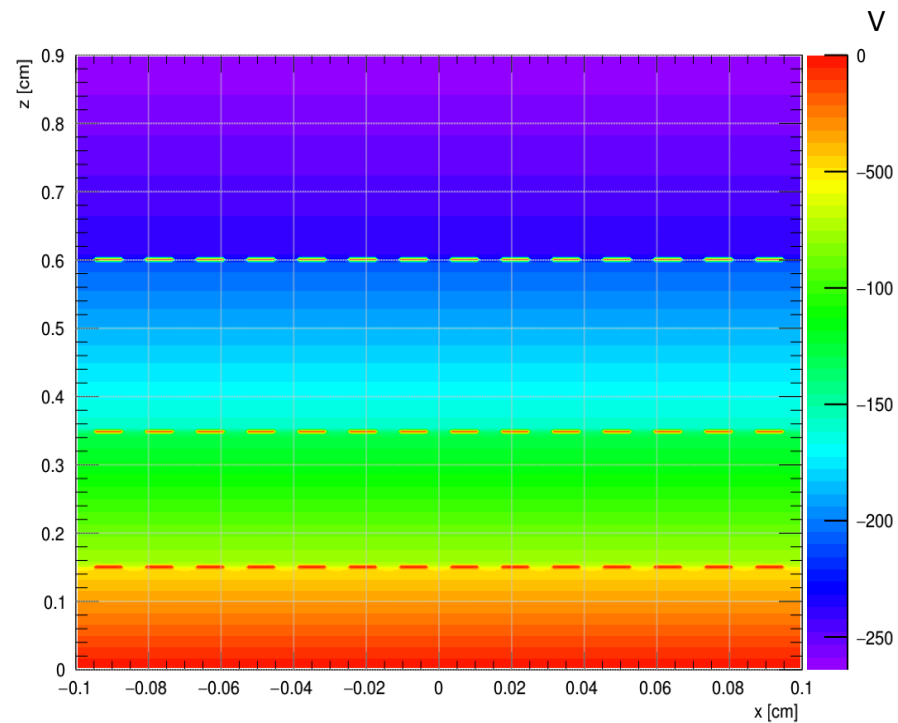


Потенциал вдоль *линии*, проходящей через центр *gem hole* по всей толщине GEM камеры (перпендикулярно к плоскостям *gem foil*)

# Garfield++ визуализация: карта электрического поля и потенциалов для GEM камеры

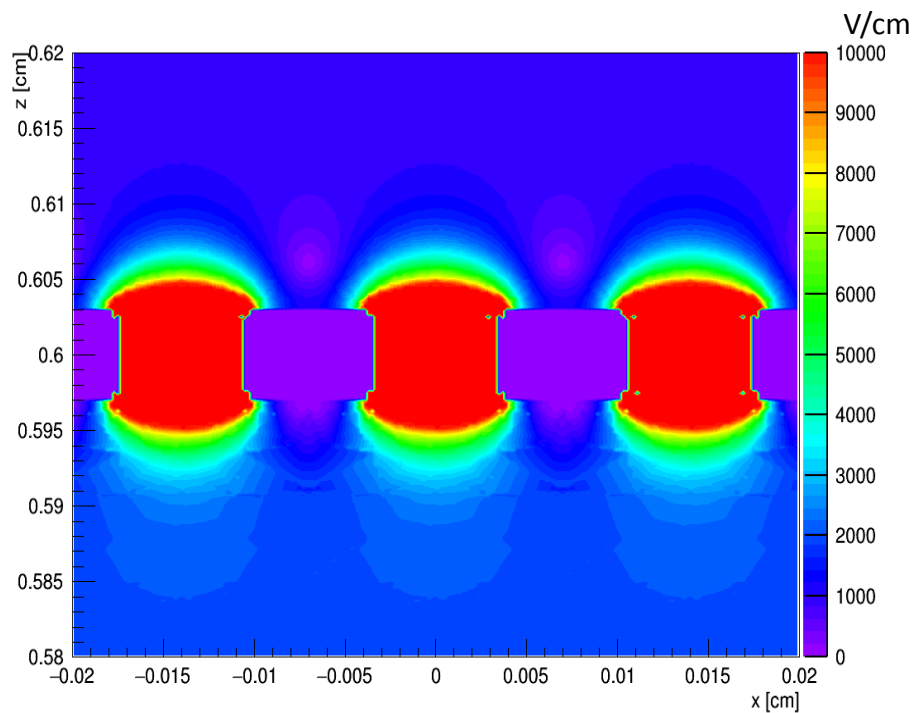


Карта электрического поля  
вдоль всей толщины GEM камеры  
(Garfield++ визуализация)

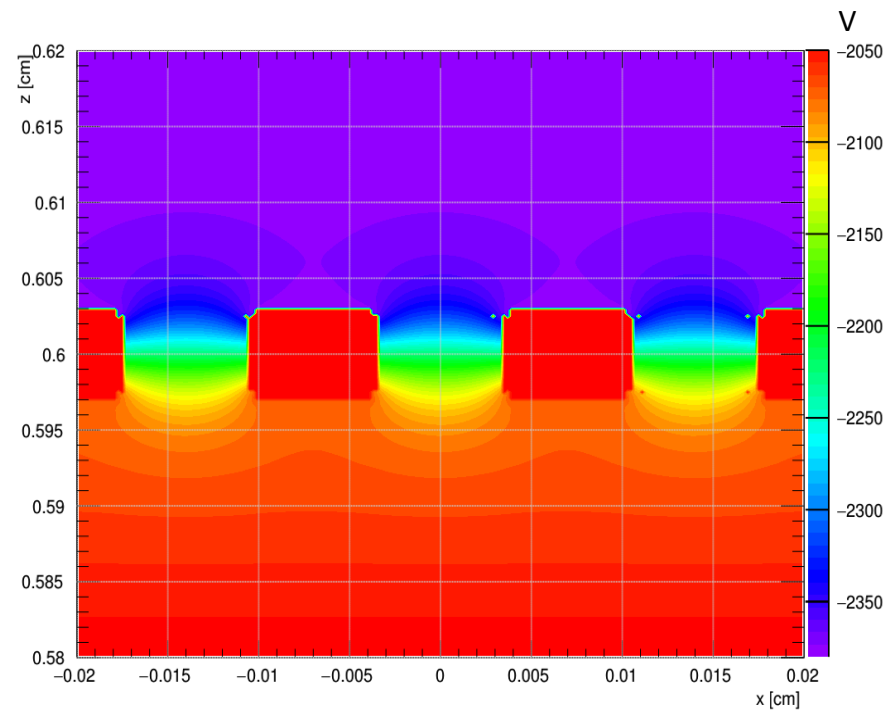


Карта потенциалов  
вдоль всей толщины GEM камеры  
(Garfield++ визуализация)

## Garfield++ визуализация: карта электрического поля и потенциалов (вблизи GEM1)

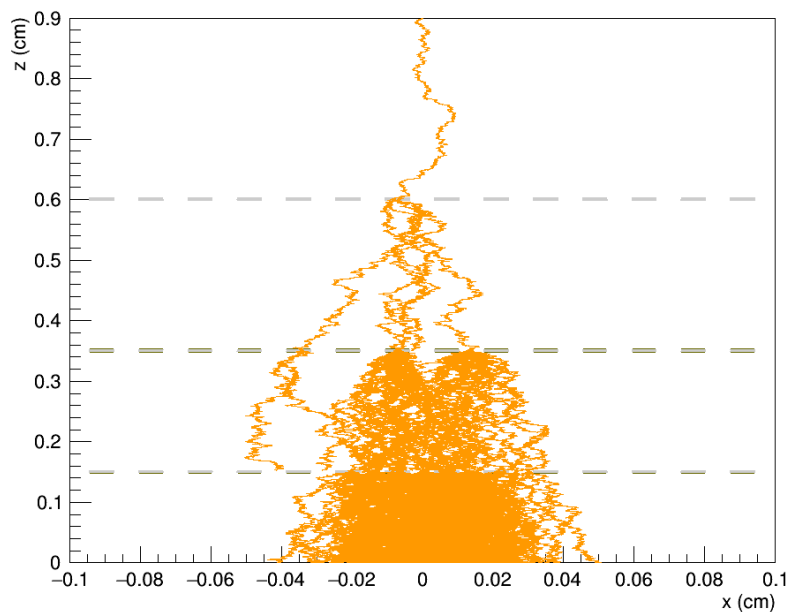


*Карта электрического поля  
на уровне GEM1 (0.6 см от readout)  
(Garfield++ визуализация)*

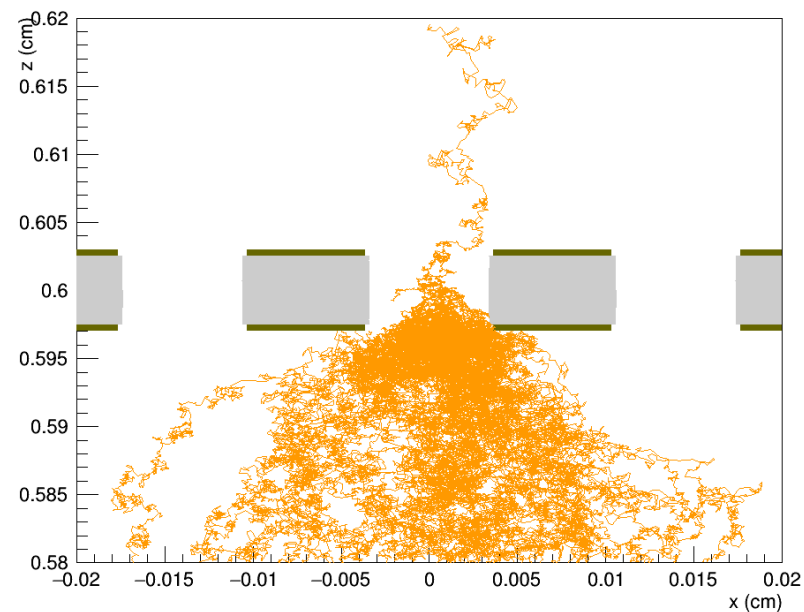


*Карта потенциалов  
на уровне GEM1 (0.6 см от readout)  
(Garfield++ визуализация)*

## Garfield++ визуализация: образование лавин электронов



*Образование лавин при прохождении одного электрона через весь объем GEM камеры*



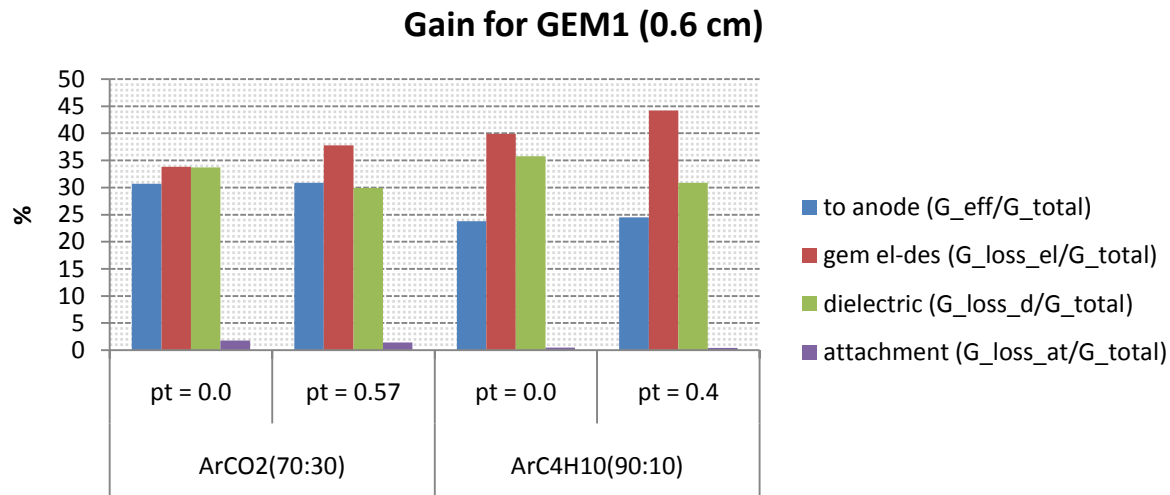
*Образование лавины при прохождении одного электрона через первый усиливающий слой (GEM1 0.6 см от readout-плоскости)*

## Эффективность электронного усиления и потери электронов: $G_{\text{eff}}$ и $G_{\text{loss}}$

Количество образуемых электронов в результате ионизации под влиянием сильного электрического поля в *gem holes* определяет общий коэффициент усиления (***total gain***).

Часть дрейфующих электронов (как первичных, так и вторичных) оседает на различных элементах *GEM foil*: медных электродах (верхнем и нижнем), а также внутри отверстий на диэлектрике. Некоторая часть электронов теряется в результате рекомбинации с ионами (*attachment*). Не дошедшие до анодной плоскости (*readout*) электроны относятся к потерянными (***gain loss***).

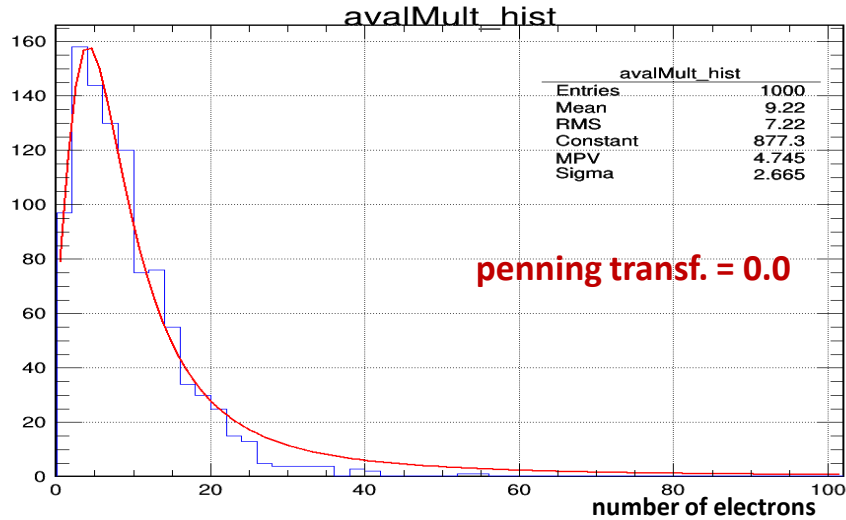
Электроны, дошедшие до анодной плоскости, участвуют в формировании сигнала. Их количество определяет эффективный коэффициент усиления (***effective gain***).



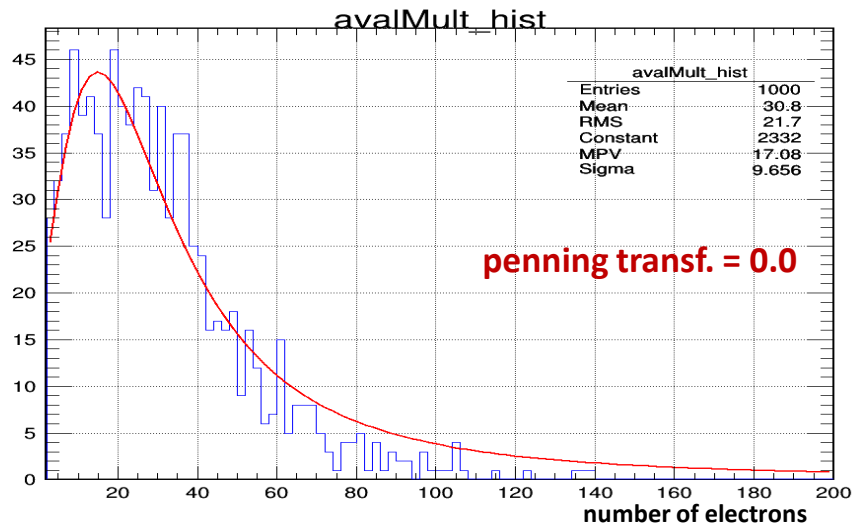
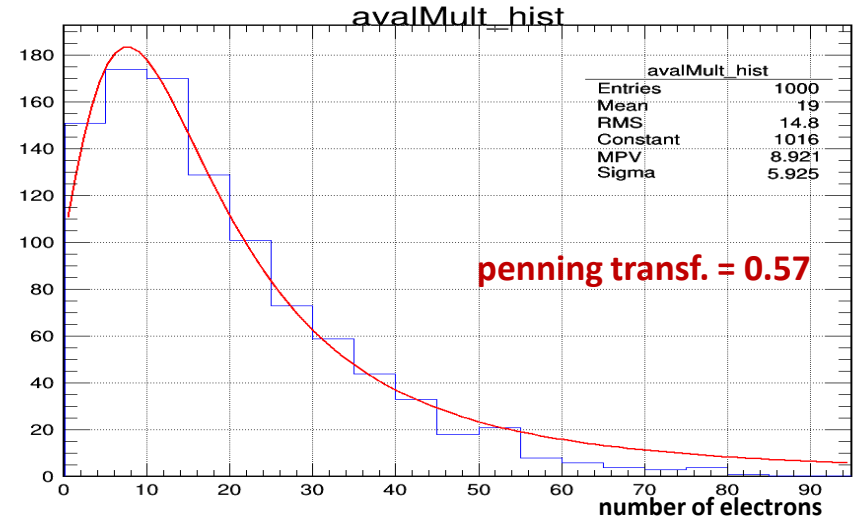
Процентное соотношение “эффективных” и “потерянных” электронов для различных сред и значений коэффициента *penning-transfer* (вероятность ионизации для эффекта Пеннинга):

1. электронов, дошедших до анода.
2. электронов, задержанных медными электродами *gem foil*.
3. электронов, задержанных на диэлектрике внутри *gem holes*.
4. электронов, потерянных в результате рекомбинации

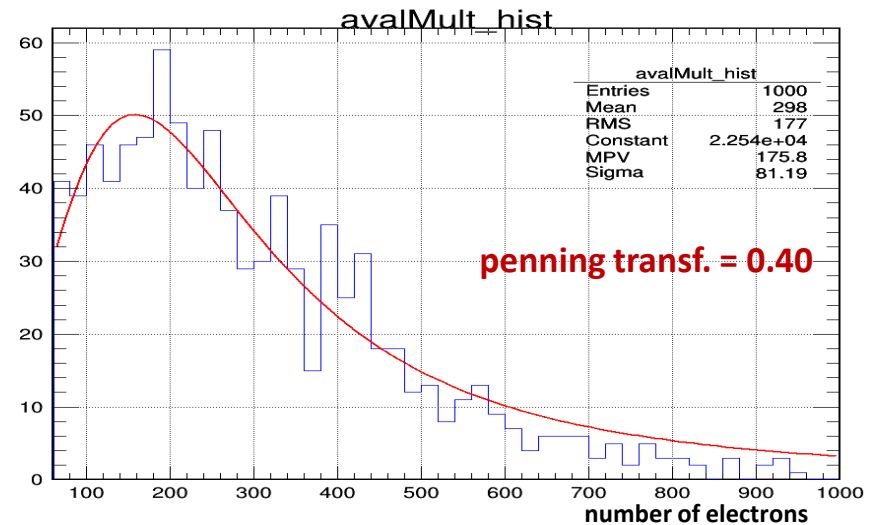
# Распределения общего количества рожденных электронов (один GEM каскад)



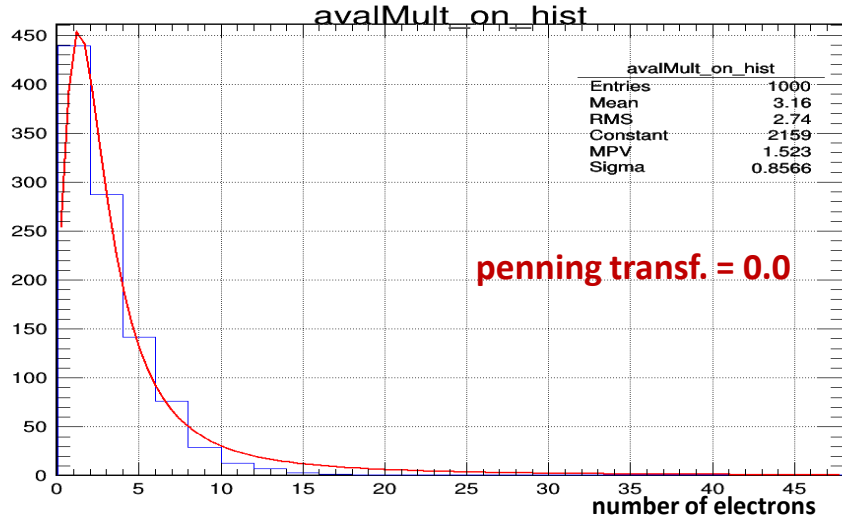
Распределение общего числа электронов (total gain), образовавшихся в результате ионизации в GEM1 для ArCO2 (70:30)



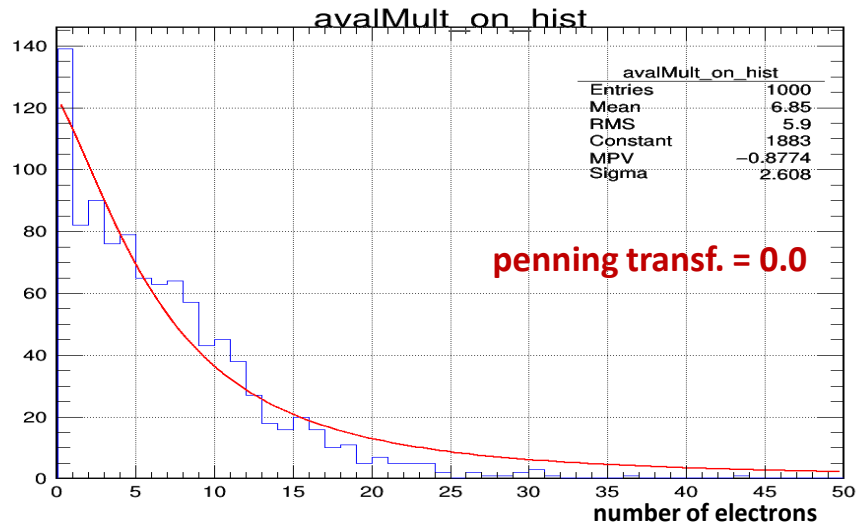
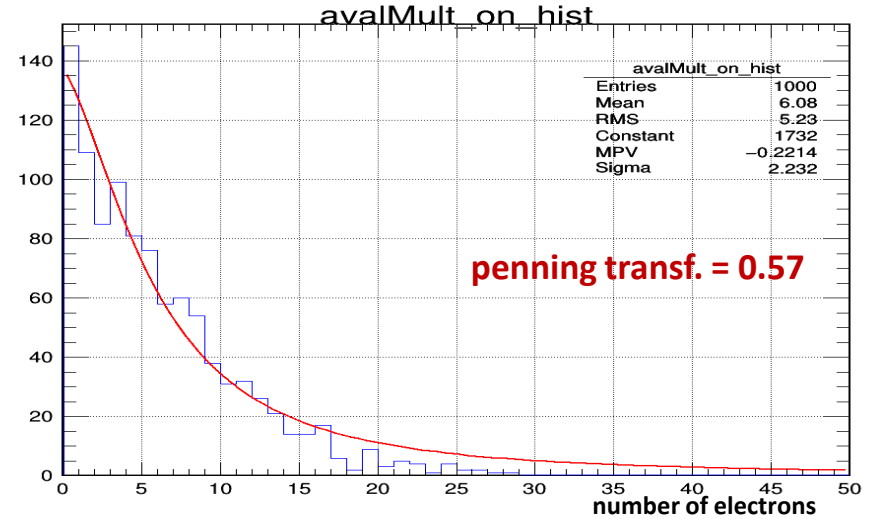
Распределение общего числа электронов (total gain), образовавшихся в результате ионизации в GEM1 для ArC4H10 (90:10)



# Распределения “эффективных” электронов (один GEM каскад)



Распределение “эффективного” числа электронов (effective gain) в GEM1 для ArCO2 (70:30)



Распределение “эффективного” числа электронов (effective gain) в GEM1 для ArC4H10 (90:10)

