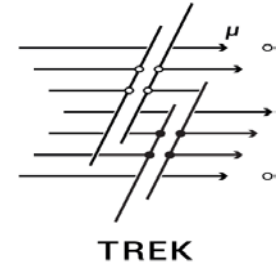
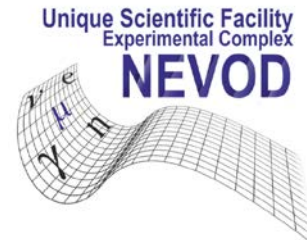


# 36 ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО КОСМИЧЕСКИМ ЛУЧАМ



## Моделирование отклика детектора ТРЕК при регистрации групп мюонов от первичных космических лучей сверхвысоких энергий

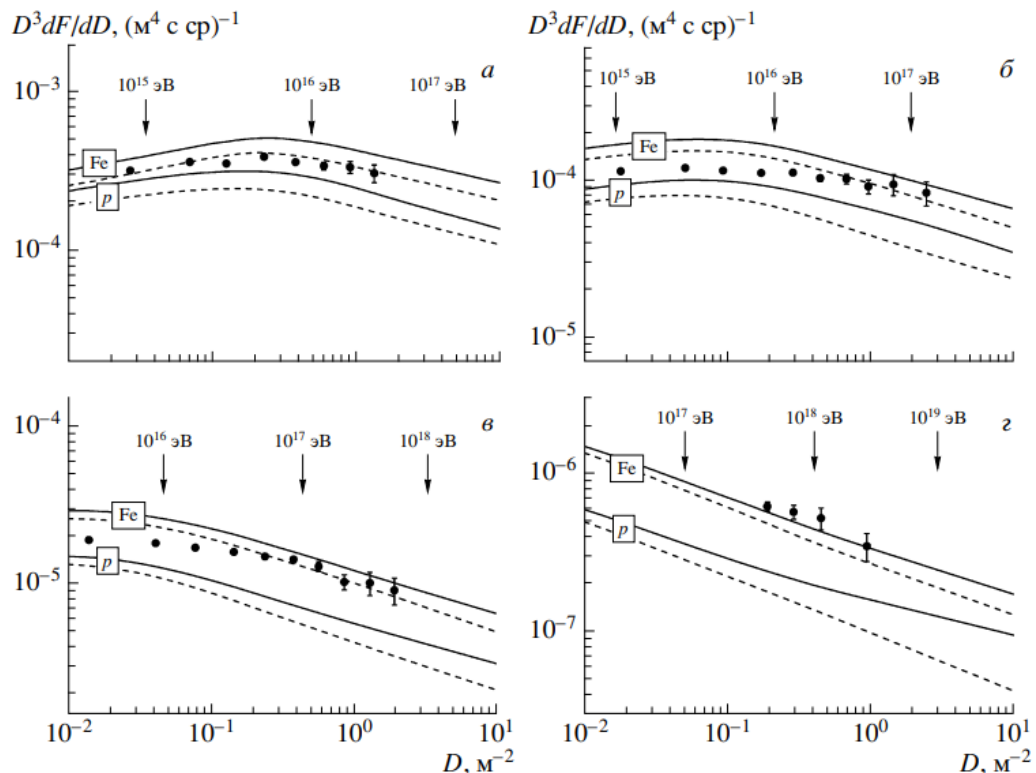
Николаенко Р.В., Богданов А.Г., Воробьёв В.С., Задеба Е.А., Хомчук Е.П.  
rvnikolaenko@mephi.ru

# Введение

## ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПОТОКА КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ СВЕРХВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА СПЕКТРОВ ЛОКАЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ МЮОНОВ

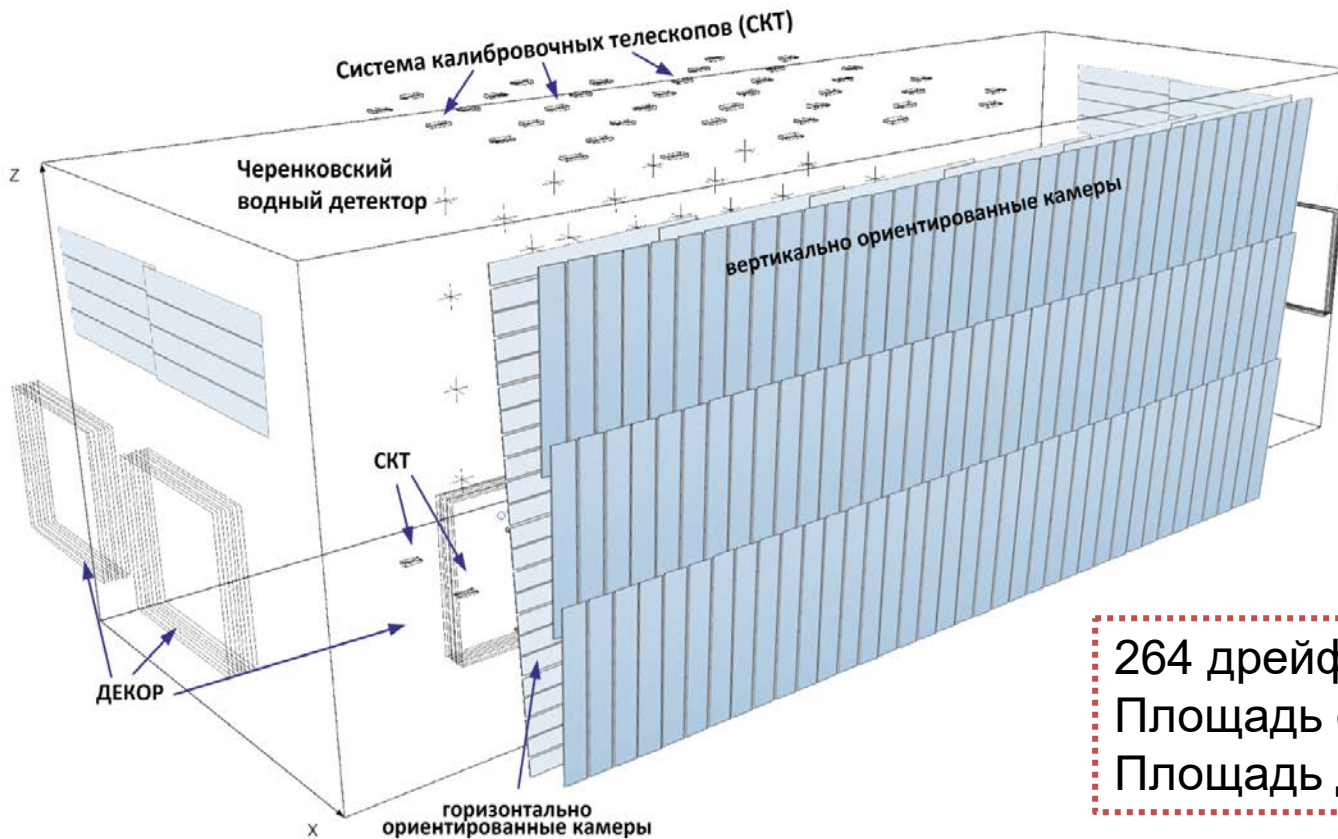
Координатно-трековый детектор ТРЕК, строящийся в УНУ НЕВОД НИЯУ МИФИ, должен стать мощным инструментом для исследования массового и энергетического распределений первичных космических лучей высоких и сверхвысоких энергий методом спектров локальной плотности мюонов. Его технические возможности позволят получить экспериментальные данные в широком диапазоне первичных энергий:  $10^{14}$ - $10^{19}$  эВ.

Для интерпретации экспериментальных результатов необходимо математическое моделирование работы установки, главным образом, процесса образования вторичных частиц в элементах конструкции детектора.



Экспериментальные и расчетные дифференциальные спектры локальной плотности мюонов для зенитных углов  $35^\circ$  (а),  $50^\circ$  (б),  $65^\circ$  (в) и  $78^\circ$  (з). Точки — экспериментальные данные; сплошные и штриховые кривые — расчет с моделями QGSJET01 и SIBYLL 2.1 соответственно. Нижние пары кривых на каждом рисунке — первичные протоны, верхние — ядра железа.

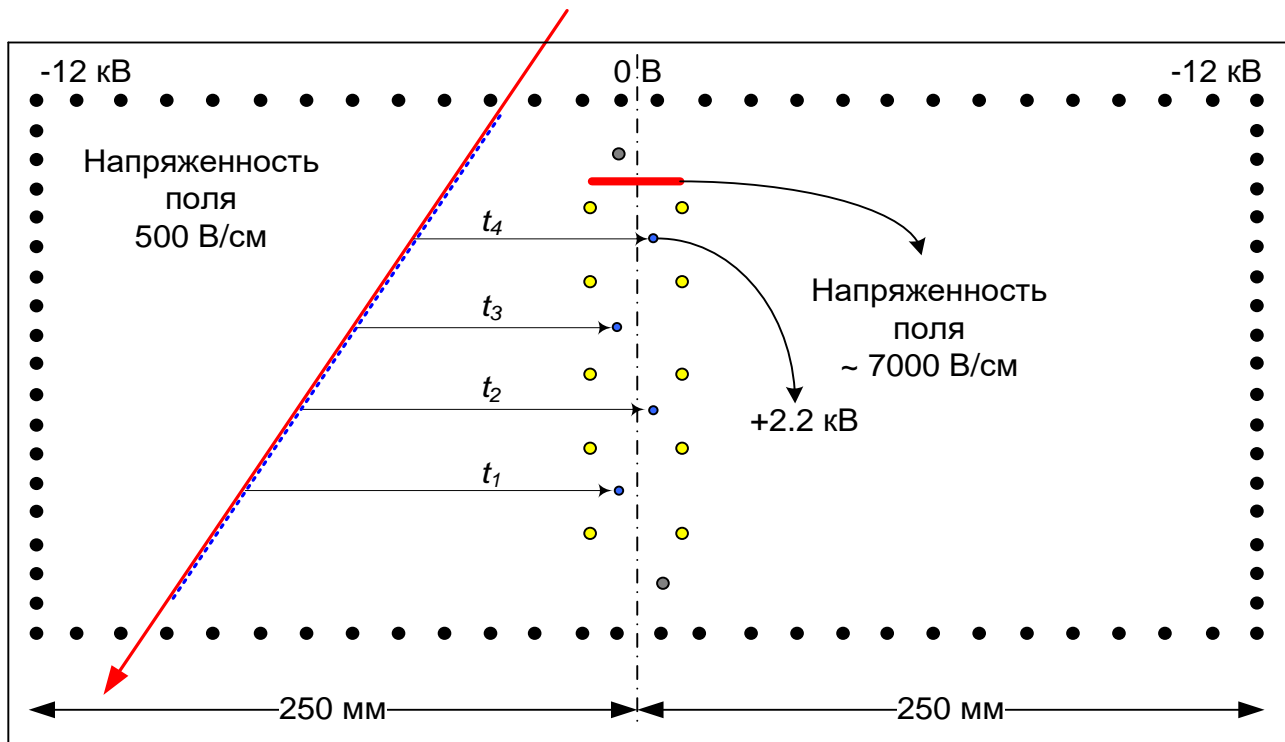
# Координатно-трековый детектор ТРЕК



264 дрейфовые камеры  
Площадь одной камеры  $2 \text{ м}^2$   
Площадь детектора –  $250 \text{ м}^2$

Детектор ТРЕК состоит из 264 дрейфовых камер, расположенных поровну в двух его плоскостях, в одной плоскости камеры расположены горизонтально, а в другой - вертикально, что позволяет восстанавливать пространственные углы регистрируемой группы.

# Дрейфовая камера ИФВЭ



Схематический  
разрез камеры,  
вид с торца

Координатная точность ~ 1 мм  
Угловая точность ~ 1.7°  
Состав газовой смеси:  
94% Ar + 6% CO<sub>2</sub>

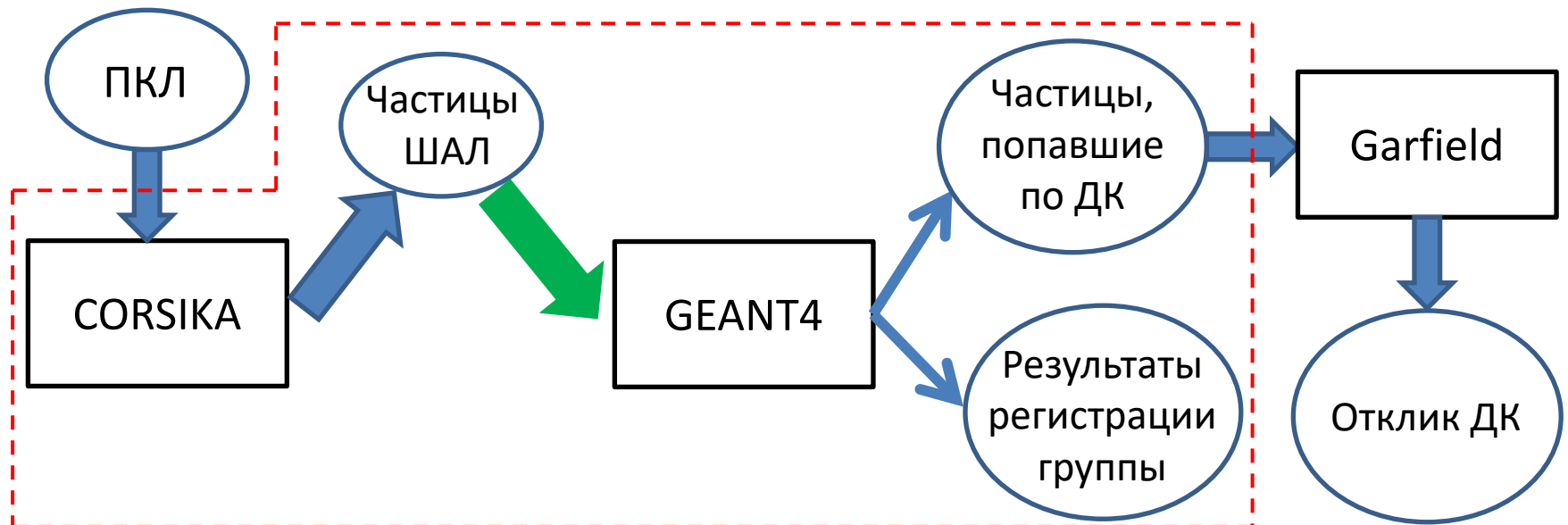
Время дрейфа электронов ~ 6 мкс  
Скорость дрейфа – 0.04 мм/нс

# Схема процесса моделирования. Geant4

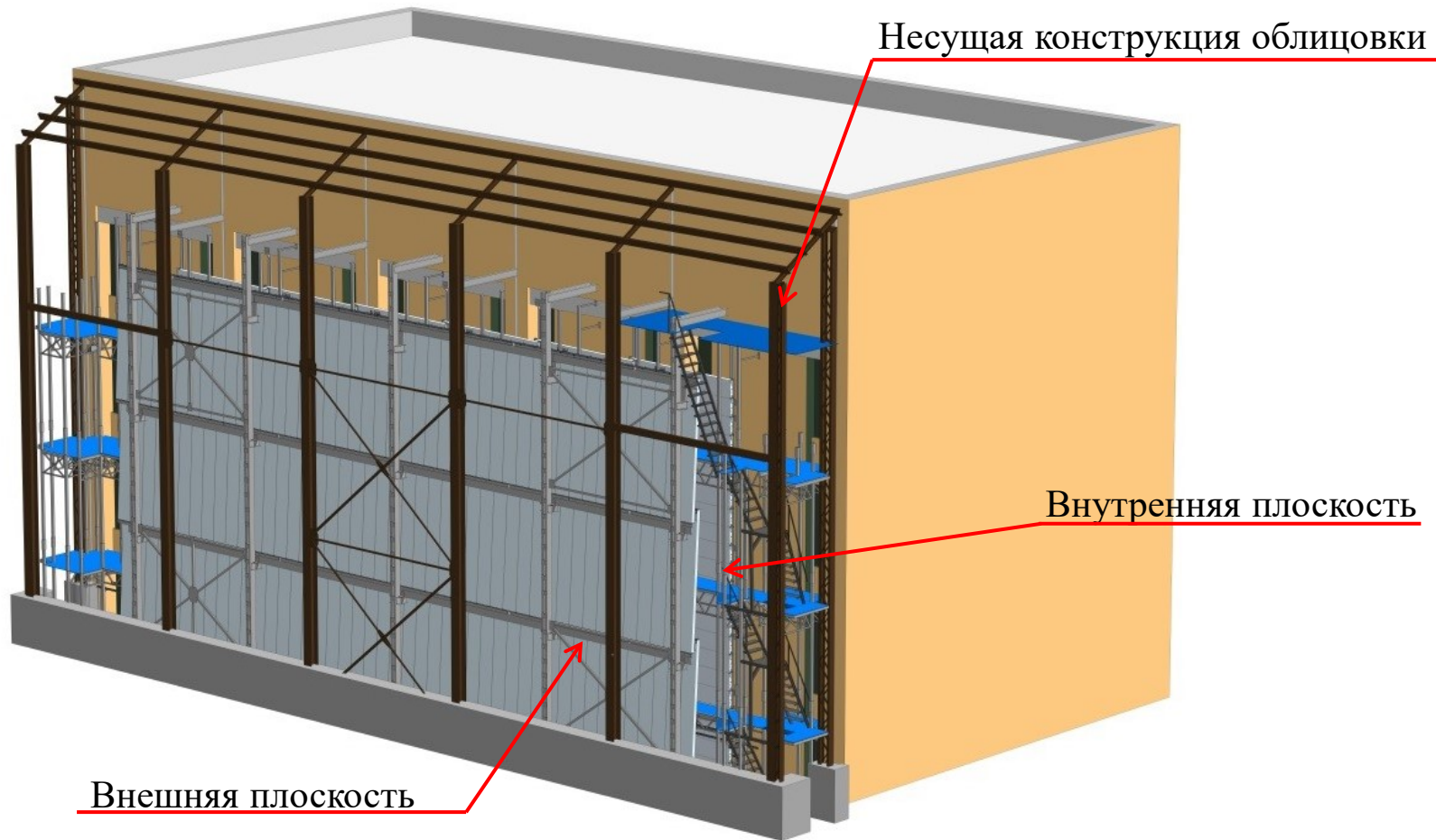
Представлена схема процесса моделирования отклика детектора ТРЕК при регистрации потока частиц ШАЛ. Красной пунктирной линией выделены процессы, описание которых приведено в данном докладе.

Geant4 (от англ. **GE**ometry **ANd** Tracking) – пакет программ, использующий подход Монте-Карло для моделирования прохождения элементарных частиц через вещество. Geant4 является основным этапом в процессе моделирования работы детектора ТРЕК.

Загрузка данных о частицах ШАЛ в Geant4 показана на схеме другим цветом не просто так. В действительности она представляет из себя отдельный алгоритм; его описание будет представлено ниже.



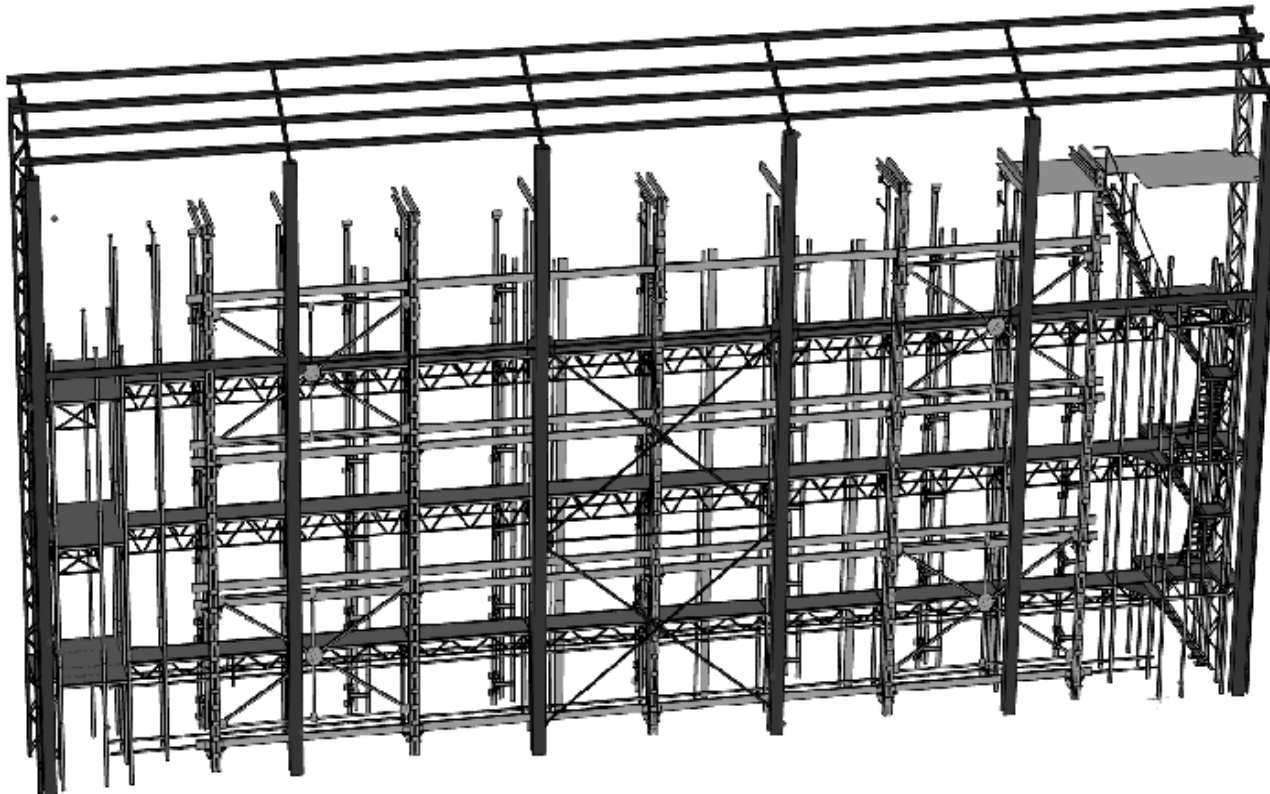
# Создание модели детектора ТРЕК



Представлена модель здания НЕВОД и пристройки с расположенным в ней детектором ТРЕК (отображения облицовки и крыши пристройки отключены для наглядности). Такая же геометрия должна быть воплощена и в Geant4, поскольку необходимо учитывать влияние всех несущих конструкций вокруг детектора на образование вторичных частиц.

# Создание модели детектора ТРЕК

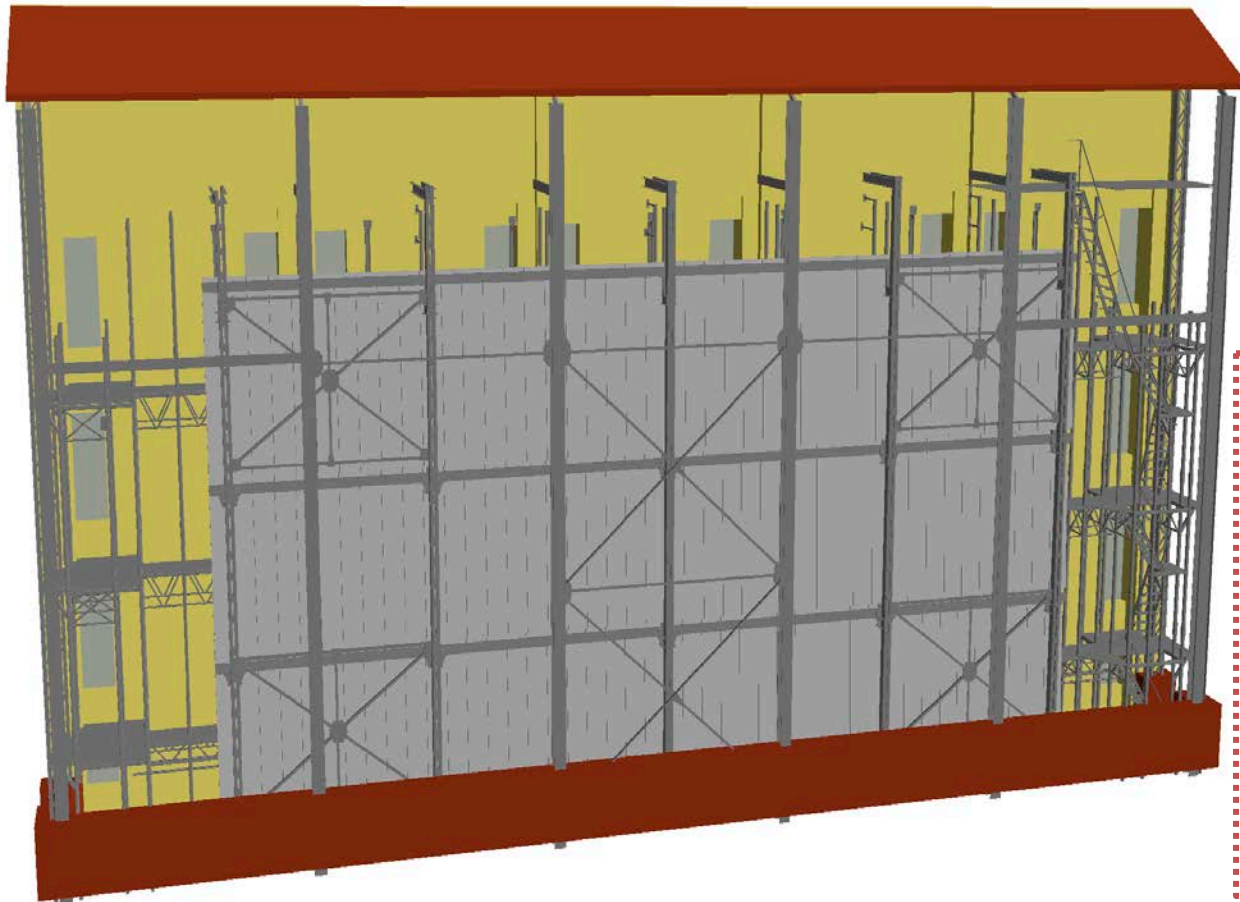
Геометрия металлоконструкции детектора ТРЕК достаточно сложна, и задать её при помощи инструментария самого Geant4 затруднительно. Поэтому для получения модели в программе использовался другой подход, основанный на методе трансляции 3D-моделей, созданных в программе САПР, в физические тела в Geant4.



Полная сборка всей металлоконструкции детектора ТРЕК.

# Пакет CADMesh

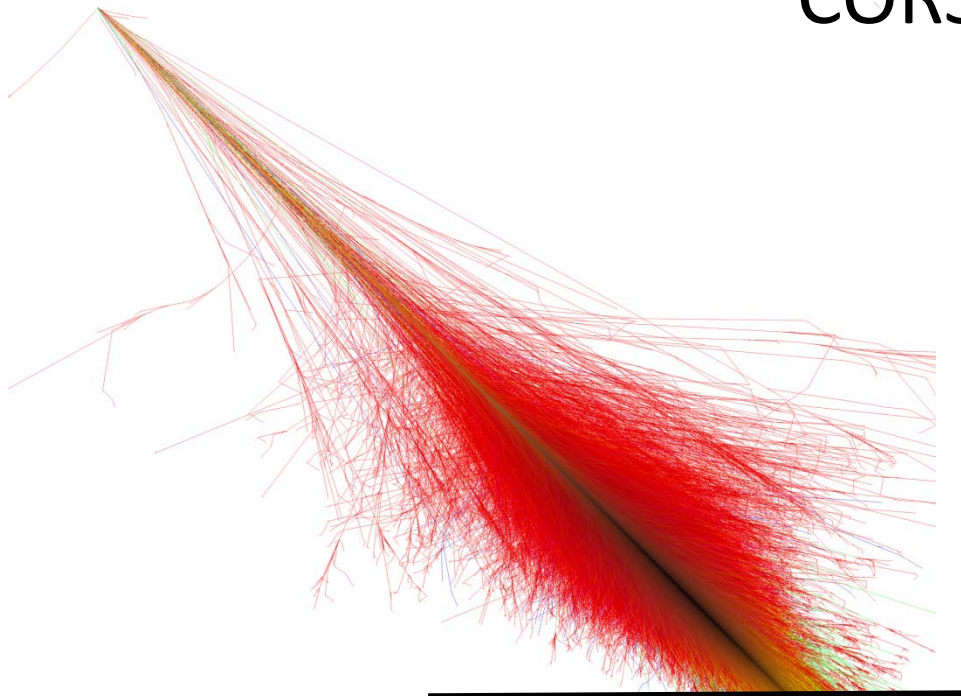
Пакет CADMesh позволяет Geant4 создавать тела при инициализации геометрии напрямую из stl-файлов, созданных в САПР. Для полученного тела доступны любые стандартные процедуры в Geant4.



Здесь представлен результат трансляции геометрии металлоконструкции детектора ТРЕК, вместе со зданием НЕВОД и размещёнными дрейфовыми камерами. Отображение облицовки также отключено.



# CORSIKA



Уровень записи частиц

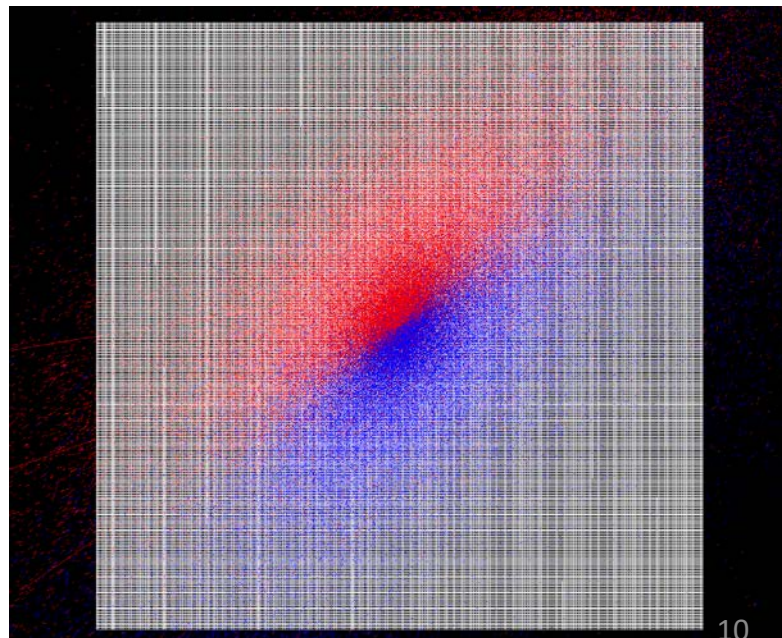
CORSIKA (COsmic Rays Simulation for KAskade) – программа моделирования взаимодействия первичных космических лучей с атмосферой Земли. Она используется для получения распределений пространственных и энергетических характеристик частиц, близких к наблюдаемым в реальных ШАЛ, которые затем могут использоваться в Geant4.

Пользователь задаёт положение уровней записи частиц – при достижении какой-либо частицей этой высоты над уровнем моря CORSIKA записывает информацию о частице в файл вывода. Это очевидный подход, однако для моделирования детектора ТРЕК он не подходит. Поскольку ТРЕК является вертикально расположенным детектором, невозможно описать алгоритм, который позволит выделять такую область на плоскости записи частиц, что по расположенному в определённом месте детектору ТРЕК попадут только частицы, запущенные из этой области. Следовательно, для перевода данных из CORSIKA в Geant4 необходим дополнительный алгоритм, преобразовывающий формат записи данных о частицах.

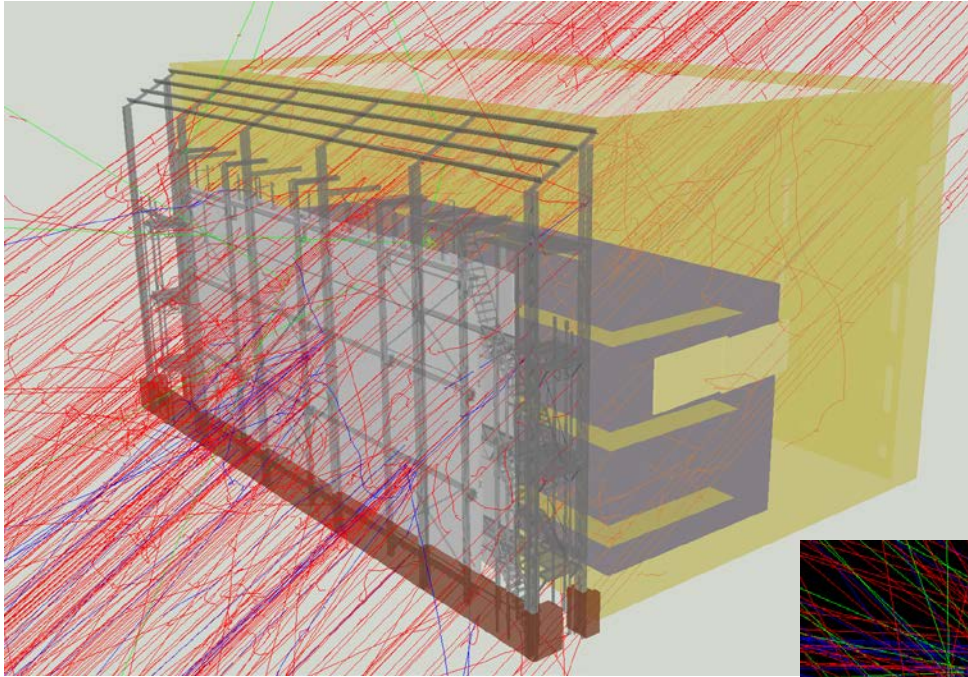
# IGESICA

Данный алгоритм получил название IGESICA (*Input for GEant4 Simulation from Corsika data generation Algorithm*). В своей основе он имеет программу предварительного моделирования в Geant4, в которой все частицы ливня, смоделированного в CORSIKA, запускаются через слой воздуха, размерами больше сотни километров в длину и ширину, но лишь чуть более 20 метров в высоту. Слой воздуха состоит из матрицы одинаковых параллелепипедов, расположенных вплотную друг к другу. Один такой параллелепипед представляет собой поверхность, охватывающую здание НЕВОД и детектор ТРЕК. Таким образом, моделируя прохождение частиц ШАЛ через этот слой достаточно записывать параметры частиц, влетевших в объёмы отдельных параллелепипедов, чтобы получить серию событий (запись с каждого параллелепипеда есть отдельное событие), для моделирования детектора ТРЕК.

Здесь показан вид сверху на матрицу из параллелепипедов, на которую был запущен ШАЛ от протона энергии  $10^{18}$  эВ, пришедший под зенитным углом около 70 градусов. Красным отображаются отрицательно заряженные частицы, синим – положительно.

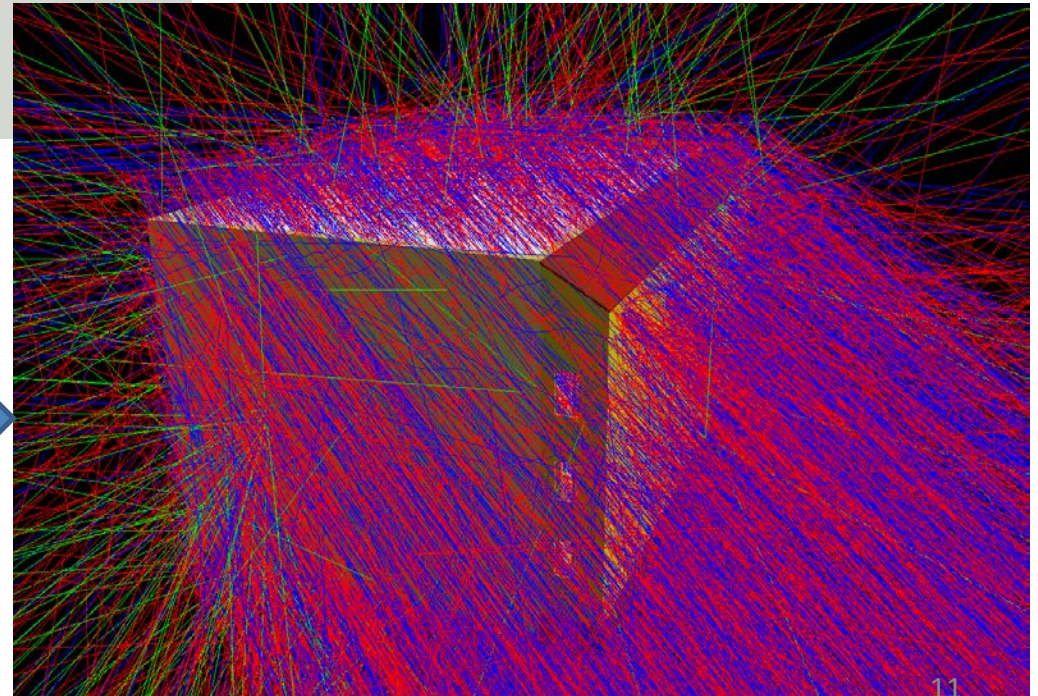


# Примеры событий



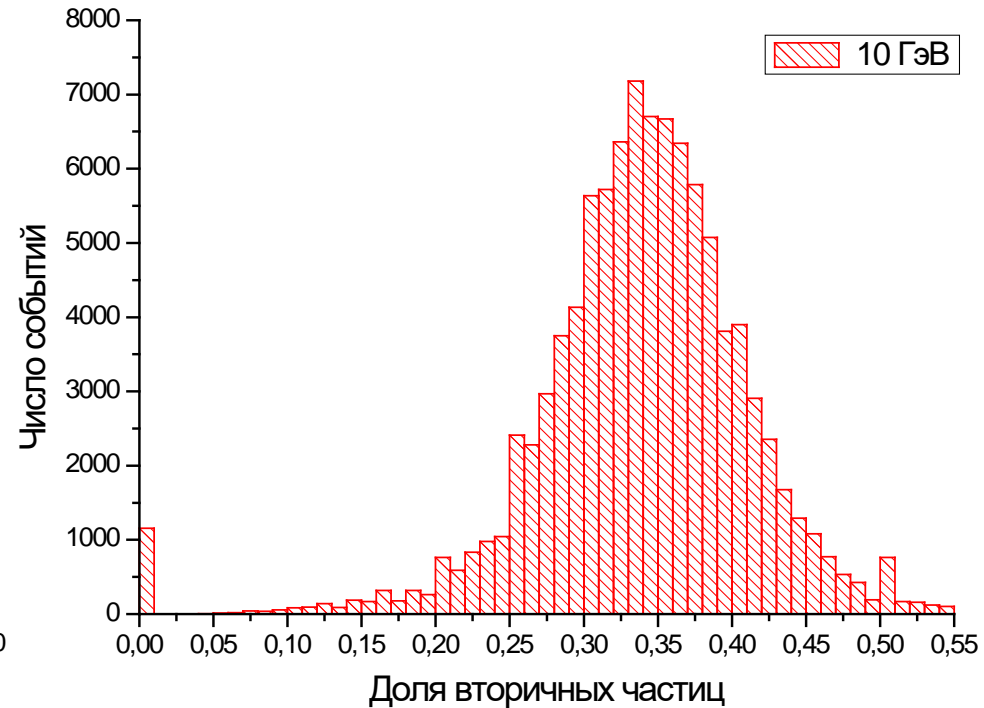
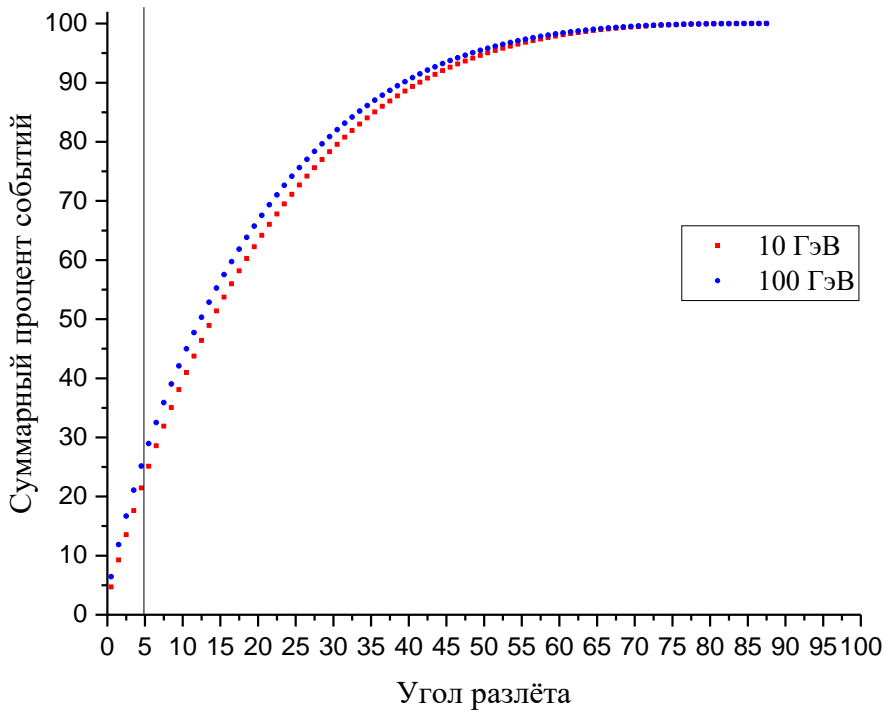
Пример моделирования регистрации группы мюонов энергии 100 ГэВ (загрузка из CORSIKA не используется). Отображение геометрии здания сделано частично прозрачным для наглядности.

Пример моделирования события с высокой плотностью мюонов в группе по данным из CORSIKA (отчетливо видна поверхность параллелепипеда, с которой запускались частицы).



# Обработка данных о событиях

## Ошибки в определении множественности мюонов



Слева представлено интегральное распределение угла разлёта между частицами в дрейфовой камере, справа — дифференциальное распределение доли вторичных частиц в событии. Распределения получены по данным моделирования большого числа событий с зенитным углом в пределах  $30 \div 75$  градусов и азимутальным в пределах  $0 \div 360$  градусов, при фиксированной энергии запускаемых мюонов — 10 ГэВ и 100 ГэВ. По интегральному распределению угла разлёта видно, что примерно в 25% случаев он меньше  $5^\circ$ . А среднее значение доли вторичных частиц за событие по дифференциальному распределению составляет 34%. Значит, около 8% треков, определяемых как треки мюонов в группе, на самом деле являются треками вторичных частиц.

# Заключение

- Создана программа, предназначенная для моделирования всего процесса регистрации потока частиц ШАЛ в детектора ТРЕК от первого взаимодействия частицы ПКЛ с атмосферой до срабатывания дрейфовых камер.
- На текущий момент программа моделирования проводит базовый анализ событий на предмет образования вторичных частиц и определения доли вторичных частиц в событии. Алгоритмы пригодны к загрузке событий из CORSIKA.
- Программа включает алгоритмы формирования выходных файлов, содержащих информацию, необходимую для расчета отклика дрейфовой камеры в среде моделирования газовых детекторов Garfield.
- Создан и протестирован алгоритм преобразования формата записи данных о частицах ШАЛ, полученных при помощи моделирования в программе CORSIKA.
- В программе CORSIKA смоделирован ряд ливней с энергиями  $10^{17}$ - $10^{19}$  эВ, генерируемых первичным протоном. Около 30 ливней переведены посредством алгоритма IGESICA в формат серий событий, пригодных для использования в моделировании детектора ТРЕК в Geant4.

**Спасибо за внимание!**