

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М.В. ЛОМОНОСОВА»

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

КАФЕДРА ФИЗИКИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

**«РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНЫХ МЕТОДОВ  
3D ВИЗУАЛИЗАЦИИ СОБЫТИЙ СТОЛКНОВЕНИЙ ЧАСТИЦ В  
ЭКСПЕРИМЕНТЕ MPD/NICA»**

Выполнил студент 209М группы  
Крылов Александр Викторович

---

(подпись студента)

Научный руководитель к.ф.-м.н.  
Леонтьев Владимир Викторович

---

(подпись научного руководителя)

Научный консультант к.ф.-м.н.  
Рогачевский Олег Васильевич

---

(подпись научного консультанта)

Допущен к защите \_\_\_\_\_

Зав. кафедрой

академик РАН Матвеев В.А.

---

(подпись зав. кафедрой)

Москва

2021

# Оглавление

<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>4</b>
<b>1. Технологии Дисплея Событий в других экспериментах .....</b>	<b>6</b>
1.1. ROOT EVE .....	6
1.2. Unity.....	7
1.3. FROG .....	8
<b>2. Эксперимент MPD/NICA .....</b>	<b>10</b>
2.1. Коллайдер тяжелых ионов NICA.....	10
2.2. Многоцелевой детектор.....	12
2.2.1. <i>Время-проекционная камера (TPC)</i> .....	14
2.2.2. <i>Времяпролетная система (TOF)</i> .....	18
2.2.3. <i>Электромагнитный калориметр (ECal)</i> .....	22
2.2.4. <i>Адронный калориметр (FHCAL)</i> .....	26
<b>3. Технологии.....</b>	<b>29</b>
3.1. JavaScript .....	29
3.2. WebGL .....	31
3.3. ThreeJS .....	32
3.4. NodeJS .....	32
3.5. WebSocket .....	34
3.6. RabbitMQ Message Broker.....	34
<b>4. Описание работы MPD EDS.....</b>	<b>36</b>
4.1. Формат геометрии MPD .....	36
4.2. Чтение файлов событий.....	38
4.3. Схема работы MPD EDS.....	39
<b>5. Результаты.....</b>	<b>40</b>
5.1. Интерфейс приложения.....	40

5.2. Визуализация событий .....	45
5.2.1. TPC.....	45
5.2.2. TOF .....	46
5.2.3. ECal.....	47
5.2.4. FHCAL.....	47
<b>ВЫВОДЫ.....</b>	<b>49</b>
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....</b>	<b>50</b>
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....</b>	<b>51</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЯ .....</b>	<b>53</b>

## ВВЕДЕНИЕ

Современные эксперименты в ядерной физике делятся годами и требуют огромных человеческих и энергетических ресурсов.

Для наблюдения за ходом таких экспериментов необходимо управлять огромным количеством параметров как самой установки и сопутствующих с ней комплексов обеспечения, так и осуществлять контроль над потоками данных, которые генерируются в процессе их работы. Цена ошибки при недостаточном контроле над всеми процессами многократно возрастает, учитывая продолжительность эксперимента.

Существуют различные методы мониторинга инженерных, сетевых и компьютерных систем эксперимента. Как правило, они имеют общее для всех название – Дисплей Событий (Event Display) и включают в себя целый комплекс систем наблюдения и контроля. Оператор установки должен получать исчерпывающую информацию о ходе эксперимента в понятной и интуитивной форме для своевременного внесения изменений в процесс сбора данных. Возможность получать информацию в трехмерном виде, которая наиболее полно отражает реальные физические процессы – одна из современных тенденций в экспериментальной ядерной физике.

В данной работе была исследована возможность создания Дисплея Событий с элементами трёхмерной визуализации и использованием языка высокого уровня – JavaScript, встроенного в любой стандартный интернет браузер. Современные технологии позволяют не учитывать платформу и тип операционной системы, на которых запускается интернет браузер. Программа, написанная на языке JavaScript, является кроссплатформенной и будет выполняться везде одинаково, в том числе на любых мобильных устройствах и планшетах с доступом в интернет.

Работа проводилась в рамках строящегося детектора MPD (Multi-Purpose Detector) ускорительного комплекса NICA (Nuclotron-based Ion Collider fAcility) в Объединенном Институте Ядерных Исследований (ОИЯИ, Дубна, Россия).

**Цель работы:**

Создание прототипа Web интерактивного Дисплея Событий с элементами трехмерной визуализации для эксперимента MPD/ NICA.

**Задачи:**

- перевод геометрии детекторов в формат, необходимый для визуализации в веб-приложении;
- создание интерфейса для чтения файлов событий на стороне сервера;
- визуализация откликов детекторов в трехмерном пространстве на стороне клиента;
- создание пользовательского интерфейса.

## 1. Технологии Дисплея Событий в других экспериментах

Дисплей Событий предназначен для визуализации экспериментальных данных в физике высоких энергий, показывая структуру детектора и информацию о произошедшем событии. Данный инструмент применяется для разнообразных целей:

- Инженерными службами он используется в пункте управления экспериментом для контроля работы отдельных частей детектора;
- Физиками он может использоваться для улучшения алгоритмов реконструкции и физического анализа. С помощью данной системы физики могут быстро понять структуру детектора и наблюдать за интересующими событиями;
- Дисплей Событий может использоваться для презентации особых событий, а также для популяризации физики высоких энергий среди школ и университетов.

### 1.1. ROOT EVE

Для эксперимента JUNO на основе пакета ROOT и библиотеки EVE был создан Дисплей Событий SERENA [1].

ROOT - это пакет библиотек, написанный на языке C++, для анализа данных в физике высоких энергий.

Библиотека EVE – это библиотека визуализации, написанная для пакета ROOT. Она может управлять геометрией объектов и компонентами графического интерфейса и отображать их, используя OpenGL.

На рисунке 1 показан графический интерфейс данного Дисплея Событий. В центре показано распределение хитов в центральном детекторе. Слева находится интерфейс выбора объектов, с помощью которого пользователь может выбрать интересующую его структуру детектора. Справа находится интерфейс выбора событий, для которых выводится распределение хитов детектора. С помощью SERENA физики эксперимента JUNO могут получить

трехмерное распределение хитов события, отметить вершину установки и произвести сравнение симуляционных и реконструированных данных, для настройки алгоритма реконструкции.

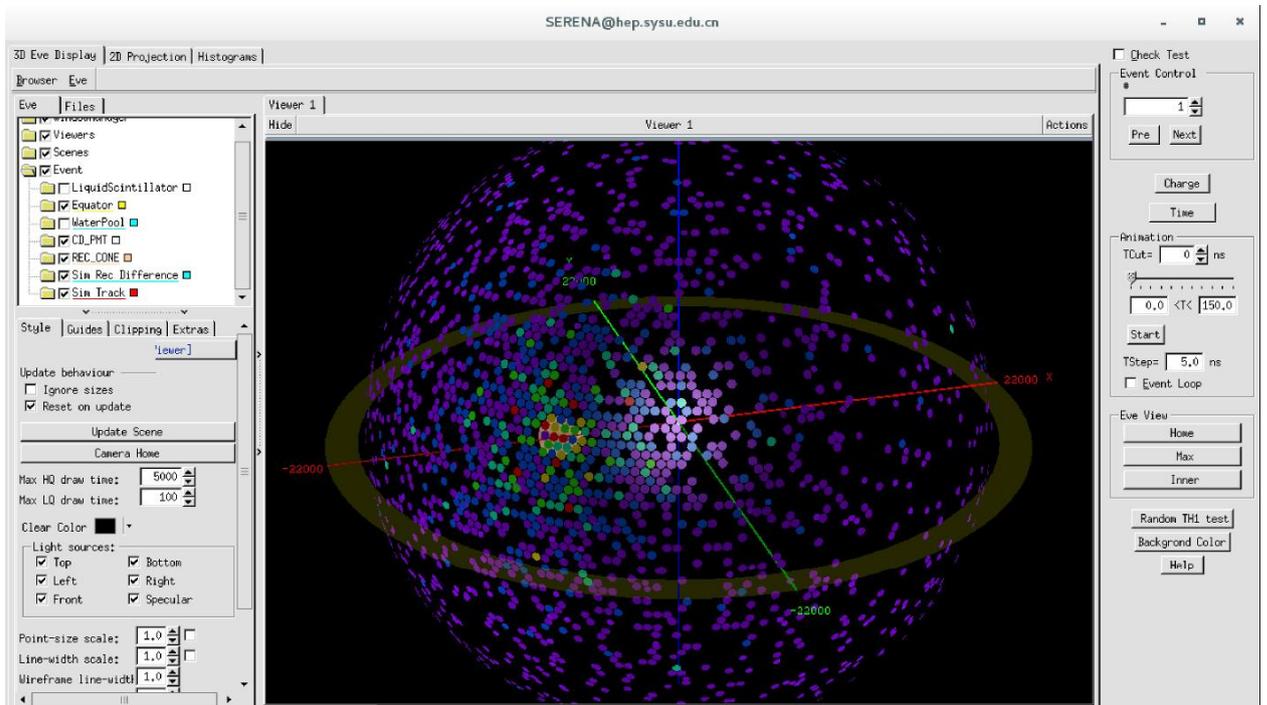


Рисунок 1. Интерфейс ROOTEVE эксперимента JUNO [1]

В прошлом данный способ визуализации событий использовался на эксперименте ALICE и CBM.

## 1.2. Unity

Также для эксперимента JUNO был разработан еще один Дисплей Событий основанный на Unity. [1]

Unity – это среда разработки компьютерных игр. В отличие от пакета ROOT, данная среда является кроссплатформенной, то есть разработчикам не нужно прикладывать больших усилий для того, чтобы сделать своё приложение доступным на различных платформах (Windows, Linux, macOS и т.д.).

Также, в отличие от Дисплея Событий, основанного на пакете ROOT, основанный на Unity Дисплей Событий, создан в виде локального приложения, что позволяет ему быть менее зависимым от программного обеспечения JUNO

и запускаться с персонального компьютера пользователя без установки дополнительного программного обеспечения (ПО).

Данный вариант визуализатора событий выполняет те же функции, как и Дисплей Событий, основанный на пакете ROOT, но в то же время, на нем возможна онлайн визуализация событий.

На рисунке 2 показан графический интерфейс данного Дисплея Событий. На нем также показано распределение хитов в центральном детекторе. Справа выводится информация о, выбранной пользователем, компоненте детектора (id, координаты и время срабатывания детектора).

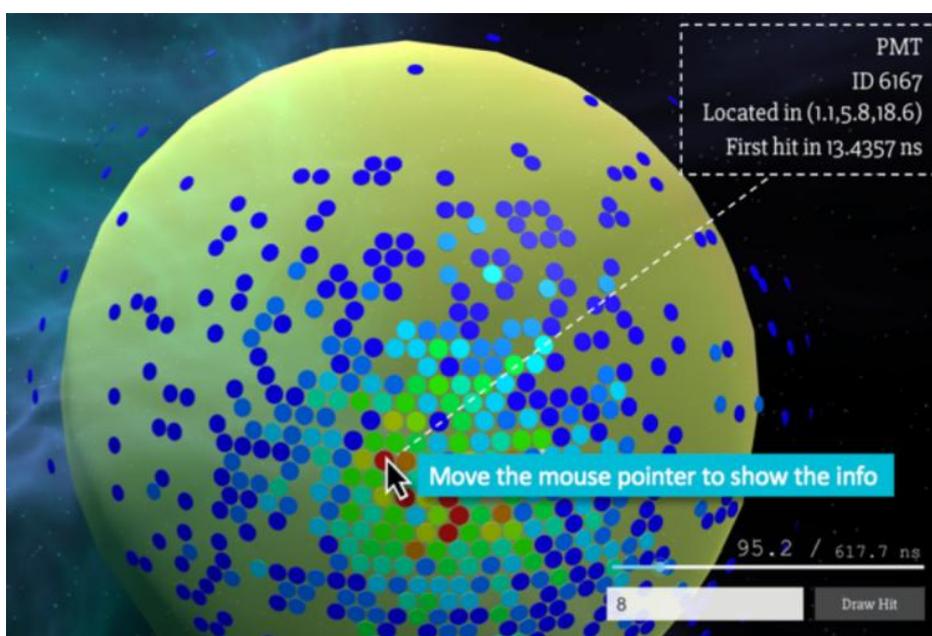


Рисунок 2. Основанный на Unity дисплей событий эксперимента JUNO [1]

### 1.3. FROG

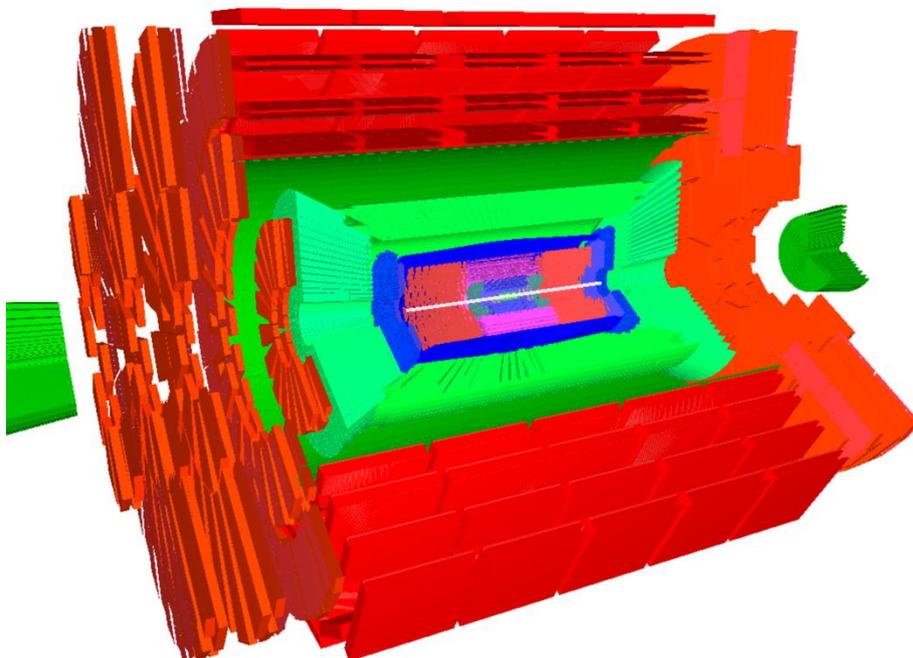
FROG (*The Fast and Realistic OpenGL event display*) – это, основанный на OpenGL, Дисплей Событий, разработанный специально для физики высоких энергий.

Он состоит из 2-ух частей:

- **Displayer** – инструмент визуализации данных. Он написан на языке Java для того, чтобы гарантировать совместимость с большинством стандартных программных обеспечений;

- Producer – код (C++ или Java) реализующий интерфейс между Displayer и программным обеспечением эксперимента.

На рисунке 3 показан графический интерфейс данного Дисплея Событий для эксперимента CMS.



*Рисунок 3. Основанный на FROG Дисплей Событий  
эксперимента CMS [2]*

## 2. Эксперимент MPD/NICA

### 2.1. Коллайдер тяжелых ионов NICA

Одной из актуальных задач в современной физике высоких энергий является изучение экстремально горячей и плотной ядерной материи. В современной теории сильного взаимодействия - квантовой хромодинамике (КХД), было предсказано существование состояния материи, называемой кварк-глюонной плазмой (КГП).

В физике высоких энергий существует предположение: если плотно сжать ( $\rho > 5\rho_0$ ,  $\rho_0$  - обычная ядерная плотность) и/или сильно разогреть ( $T > 130$  МэВ) макроскопическую среду с большим количеством протонов и нейтронов, то принадлежавшие им изначально кварки могут “оторваться от своих родителей-нуклонов”. Данный процесс называется деконфаймент, а итоговое состояние и есть КГП. Считается, что данное состояние присутствует в современной Вселенной в центрах нейтронных звезд, а также было до  $10^{-10}$  сек после рождения вселенной.

При изучении свойств КГП можно исследовать наиболее фундаментальные проблемы физики:

- проявление и свойства фазового перехода в состояние деконфаймента;
- свойства вакуума КХД и восстановление киральной симметрии;
- уравнение состояния ядерной материи при высоких плотностях;
- наличие критической точки на фазовой диаграмме;
- механизмы образования нейтронных звезд;
- эволюция вселенной.

В Объединенном институте ядерных исследований (ОИЯИ) для изучения данной проблемы создается ускорительный комплекс NICA (Nuclotron-based Ion Collider fAcility).

Для экспериментов на коллайдере NICA была выбрана промежуточная область фазовой диаграммы (рисунок 4) с максимальной барионной плотностью и

умеренной температурой. В данной области интересно не только обнаружение деконфаймента, но и возможное наличие так называемой критической точки, которая, согласно последними вычислениями в рамках решеточной модели КХД, предсказывается при температуре  $T_E = (162 \pm 2)$  МэВ и барио-химическом потенциале  $\mu_E = (360 \pm 40)$  МэВ.

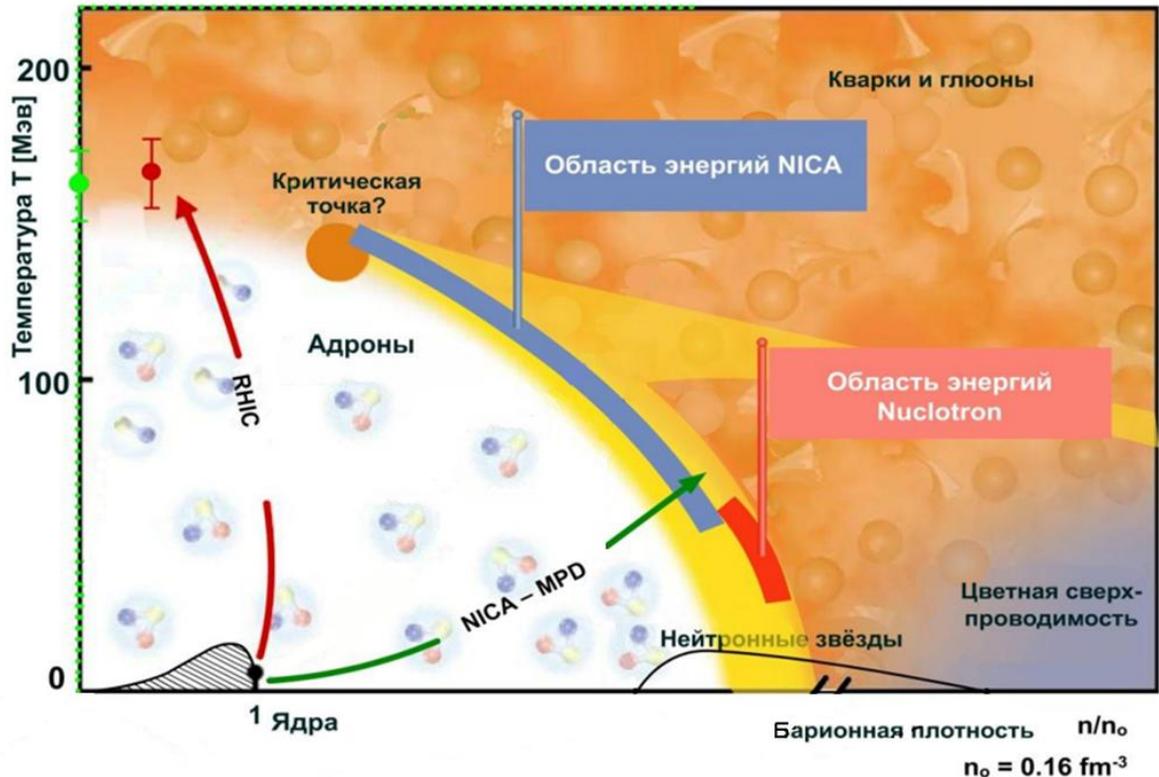


Рисунок 4. Фазовая диаграмма [3]

Если данная критическая точка существует, тогда, по результатам эксперимента, следует ожидать значительные флуктуации множественности в выходах частиц и кинематических спектрах.

Исследование фемтоскопии и коллективных потоков тождественных адронов позволят извлечь информацию об уравнении состояния ядерной материи при высоких барионных плотностях.

Изучение свойств плотной ядерной материи будет происходить, основываясь на анализе выхода частиц и их кинематических характеристик, как в периферийных, так и в центральных столкновениях. Эти частицы – заряженные адроны ( $\pi^+$ ,  $\pi^-$ ,  $K^+$ ,  $K^-$ , протон, антипротон), а также нейтральные и заряженные

странные частицы ( $K^0$ ,  $\Lambda$ ,  $\Xi$ ,  $\Omega$ ).

Указателем на восстановление киральной симметрии будет являться изменение свойств векторных мезонов. Их свойства могут быть исследованы с помощью измерений дилептонных мод распада.

Схема ускорительного комплекса NICA показана на рисунке 5. На коллайдере предусмотрено два места встречи пучков, что позволяет установить два детектора и проводить одновременно два эксперимента.

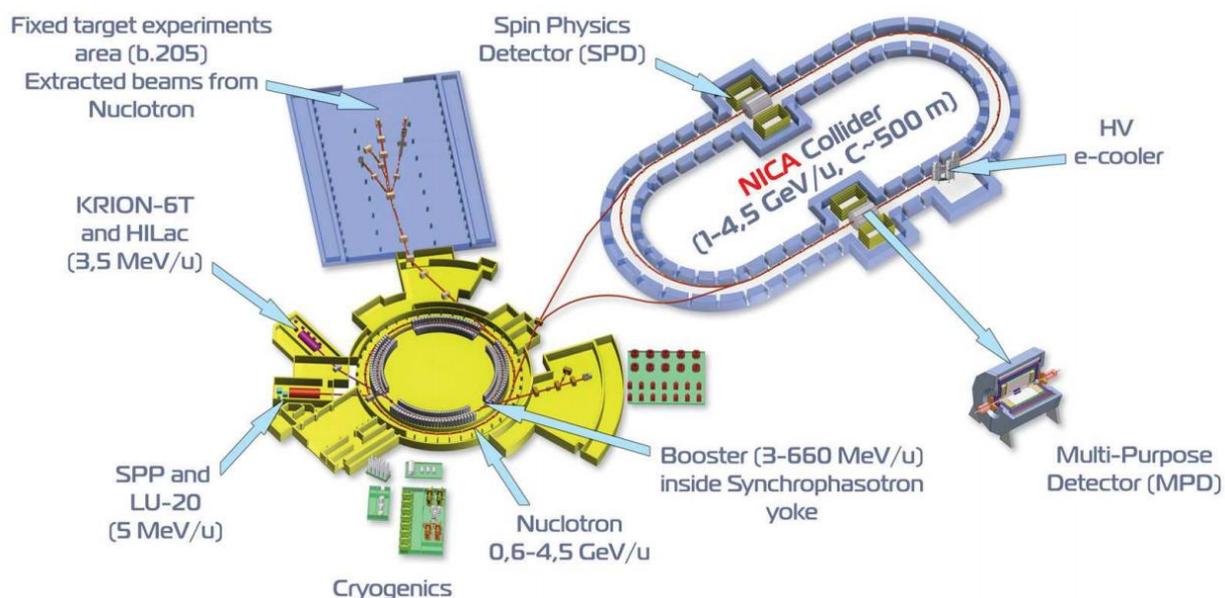


Рисунок 5. Схема ускорительного комплекса NICA [3]

Заявленная светимость ускорителя  $L = 10^{27} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ . Для протонных пучков светимость должна быть на уровне  $L = 10^{30} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ , а энергия столкновений  $\sqrt{s_{pp}} = 20 \text{ ГэВ}$ . Соответственно для проведения эксперимента на коллайдере NICA требуется детектор способный использовать все преимущества ускорителя с высокой светимостью.

## 2.2. Многоцелевой детектор

Для описанных выше задач был создан многоцелевой детектор (Multi Purpose Detector или MPD). Диаметр (400 см) и длина (800 см) детектора были выбран исходя из компромисса между длиной трека (для увеличения точности

идентификации частиц и их импульсов) и требованием к однородности магнитного поля.

На рисунке 6 показаны схема и основные размеры детектора.

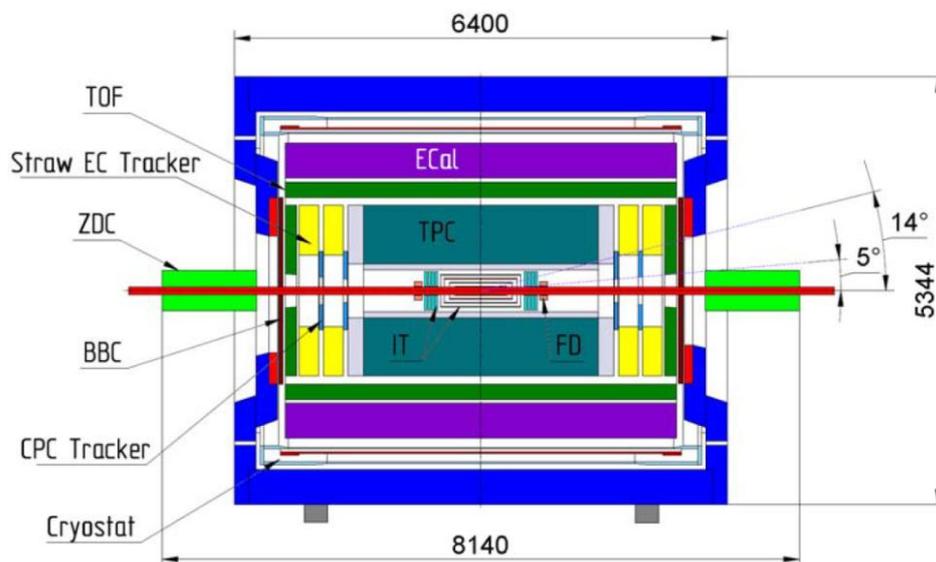


Рисунок 6. Схема размеров детектора MPD [3]

Детектор MPD находится в магнитном поле 0.5 Тл, созданном внешним сверхпроводящим магнитом, и состоит из цилиндрической и двух торцевых частей. Цилиндрическая часть состоит из различных типов детекторов, расположенных вокруг области столкновения пучков. Основное назначение детекторов цилиндрической части - определение типа нейтральных и заряженных частиц и их импульса в диапазоне псевдобыстрот  $|\eta| < 1.2$ . Детекторы в торцевых частях идентифицируют частицы и измеряют их параметры в диапазоне псевдобыстрот  $1.2 < |\eta| < 2$ .

MPD включает в себя трековую систему, представленную в виде время-проекционной камеры (Time Projection Chamber или TPC) и систему идентификации частиц, представленную в виде время-пролетной системы (Time of Flight или TOF) и электромагнитного и адронного калориметров (ECal и FHCAL). Трековая система дополняется внутренней трековой системой на основе кремниевых полупроводниковых детекторов (Inner Tracker System или ITS), расположенной вокруг области столкновения пучков.

Быстрый передний детектор (Fast Forward Detector или FFD) обеспечивает

стартовый сигнал для TOF системы, а детектор столкновения пучков (Beam-Beam Counter или BBC) работает как счетчик столкновений.

### 2.2.1. Время-проекционная камера (TPC)

Время-проекционная камера (TPC) является основным трековым детектором MPD в центральной области быстрот. Данный детектор имеет несколько предназначений в интервале псевдобыстрот  $|\eta| < 1.2$  и поперечных импульсов  $p_t$  от 100 МэВ/с до 1 ГэВ/с:

- измерение импульса и идентификация заряженных частиц;
- определение вершины взаимодействия;
- измерение потерь энергии  $dE/dx$  для заряженных частиц;
- разделение двух треков идущих рядом с точностью порядка 1 см.

#### 2.2.1.1. Структура детектора

TPC имеет внутренний и внешний диаметры 54 см и 280 см соответственно и длину по движению пучка - 340 см (основные параметры TPC см. Приложение 1). Вследствие того, что TPC является внутренним детектором (то есть количество вещества, из которого он состоит, влияет на работу внешних детекторов), баланс вещества должен быть как можно меньше (в настоящее время поперечная толщина равна 5-6 %  $X_0$ ).

Наиболее чувствительным недостатком время-проекционной камеры является её большое мёртвое время. Время дрейфа электронного кластера на расстояние 2 метров составляет около 40 мкс. Преимуществами же является минимальное количество активного вещества, высокая пространственная точность, а также хорошее двухтрековое разрешение.

Корпус TPC (рисунок 7) состоит из четырех цилиндров C1-C4 (толщина C1 и C2 – 3 мм, C3 – 4 мм, C4 – 6 мм) и каркаса из алюминиевых трубок. Пространство между C1-C2 и C3-C4 заполнено  $N_2$  для защиты от высоковольтных разрядов и попадания кислорода и воды в рабочий объем TPC.

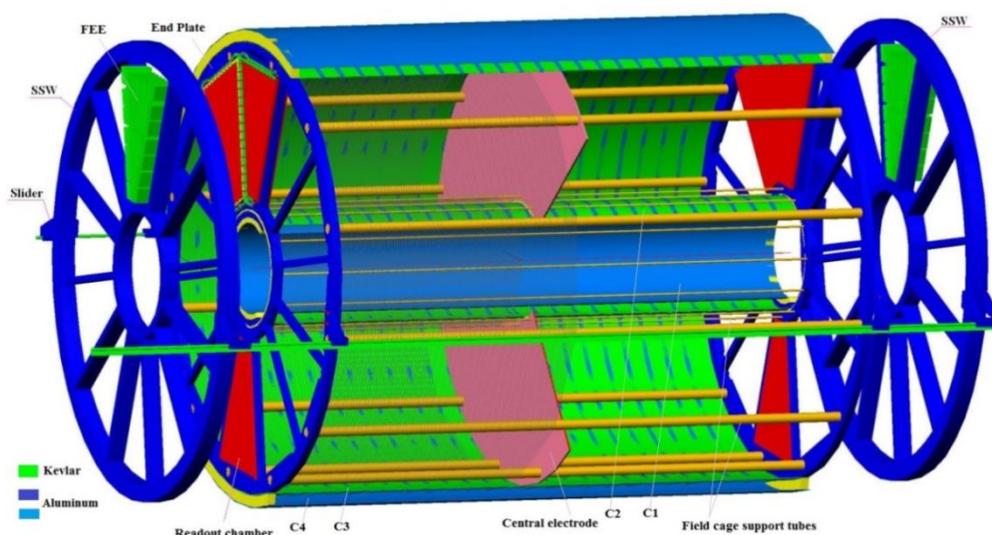


Рисунок 7. Структура детектора TPC [4]

В центре детектора располагается высоковольтная катодная плоскость (HVE), предназначенная для создания дрейфового электрического поля. С торцов, находится система считывания TPC основанная на многопроволочных пропорциональных камерах (Multi-Wired Proportional Chamber или MWPC) с катодным съемом информации. Между HVE и торцами детектора располагается так называемая алюминиевая “клетка”, поддерживающая однородное электрическое поле.

Рабочий объем детектора TPC заполнен смесью газов (90% аргон и 10% метан). Избыточное давление газа должно быть как можно меньше, чтобы уменьшить многократное рассеяние в TPC. Активный объем TPC должен быть достаточно газонепроницаемым, чтобы поддерживать уровень кислорода ниже примерно 5 ppm для минимизации потерь первичной ионизации в дрейфовом объеме TPC. Работа на пике кривой зависимости напряжения от скорости (для смеси аргон-метан  $E = 140$  В/см) делает скорость дрейфа стабильной и малочувствительной к небольшим изменениям температуры и давления.

На рисунке 8 (справа) показана система считывания TPC, основанная на MWPC. Плоскость считывания торцевой крышки покрыта 12 трапецевидными секторами, состоящими из 53-х рядов считывающих катодных площадок

(падов). Один из секторов показан на рисунке 8 (слева). Общее количество падов в ТРС ~ 97 000.

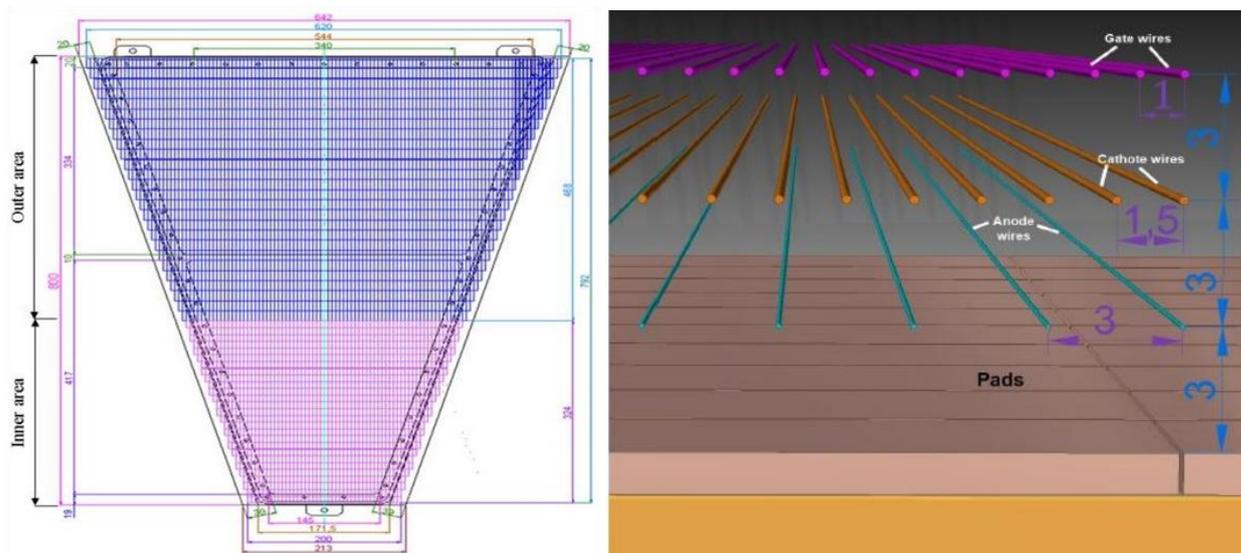


Рисунок 8. Сектор считывания сигнала (слева) и MWPC(справа) [4]

### 2.2.1.2. Принцип работы

Пролетая активный объем ТРС, частица начинает порождать кластеры, которые содержат десятки электронов, пространственно разделенных друг от друга (рисунок 9). Данные кластеры под действием внешнего поля дрейфуют к торцам детектора, где расположена многопроволочная пропорциональная камера. Вследствие наличия сильного магнитного поля, приложенного параллельно, диффузия электронов сводится к минимуму.

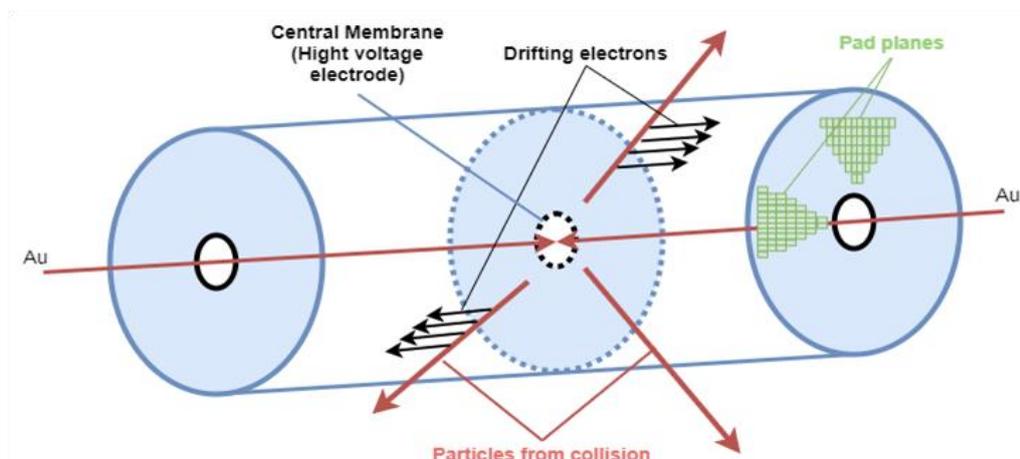


Рисунок 9. Принцип работы ТРС

Электронно-ионные лавины, образованные электронными кластерами, подошедшими к анодным проволочкам, создают индуцированные заряды на катодных пэдах. Вследствие этого измеряются координаты  $x$ ,  $y$  каждого кластера в отдельности. Координата  $z$  измеряется по времени дрейфа кластера от места своего образования до анодной проволоки, с которой снимается сигнал.

Вследствие того, что в объеме ТРС заряженная частица летит по спирали, проекцией данной траектории на падовую плоскость является дуга окружности. Измеряя сагитту этой дуги можно измерить радиус кривизны, который в свою очередь пропорционален поперечному импульсу частицы.

Скорость дрейфа электронов в газе описывается уравнением Ланжевена:

$$\vec{v}_d = \frac{\mu}{1 + (\omega\tau)^2} \left( \vec{E} + (\omega\tau) \frac{\vec{E} \times \vec{B}}{|\vec{B}|} + (\omega\tau)^2 \frac{(\vec{E} \cdot \vec{B})\vec{B}}{|\vec{B}|^2} \right)$$

Где  $\mu$  – подвижность электронов,  $\omega$  – циклотронная частота,  $\tau$  – средний свободный пробег между столкновениями с молекулами газа.

Во время дрейфа электроны диффундируют. После дрейфа до торца детектора электронный кластер можно описать 3-мерным гауссовым распределением:

$$P(x, y, z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x} \exp \left[ -\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma_x^2} \right] \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y} \exp \left[ -\frac{(y-y_0)^2}{2\sigma_y^2} \right] \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_z} \exp \left[ -\frac{(z-z_0)^2}{2\sigma_z^2} \right],$$

где  $(x, y, z)$  – точка образования электрона,  $D_T$  и  $D_L$  – коэффициенты поперечной и продольной диффузии,  $\sigma_T = D_T \sqrt{L_{Drift}}$  и  $\sigma_L = D_L \sqrt{L_{Drift}}$ .

Разрешение по поперечному импульсу как функция  $p_t$  показано на рисунке 10.

Как видно,  $\Delta p_t/p_t$  меньше 2% в интервале поперечных импульсов  $0,2 < p_t < 1$  ГэВ/с. Пространственное разрешение:  $\sigma_x \sim 0.6$  mm,  $\sigma_y \sim 0.8$  mm,  $\sigma_z \sim 1$  mm.

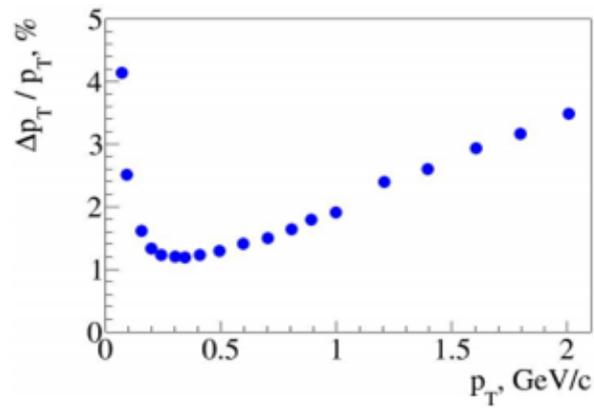


Рисунок 10. График зависимости импульсного разрешения от поперечного импульса [4]

### 2.2.2. Времяпролетная система (TOF)

Для достижения целей эксперимента, детектору MPD необходим механизм точной идентификации частиц. Идентификация заряженных адронов с импульсами (от 0.1 до 2 ГэВ) достигается во времяпролетной системе (TOF), дополненной информацией о потерях энергии ( $dE/dx$ ) с TPC и ITS детекторах. Активная цилиндрическая поверхность детектора позволяет покрыть диапазон псевдобыстрот  $|\eta| < 1.2$ .

Данный детектор имеет несколько предназначений:

- разделение пионов и каонов с поперечными импульсам до 1.5 ГэВ/с;
- разделение (анти) протонов с поперечными импульсами до 3 ГэВ/с;
- вычисление времени пролета частицы от точки столкновения пучков до активного сенсора детектора.

#### 2.2.2.1. Структура детектора

TOF система состоит из многозонных камер с резистивными пластинами (Multigap Resistive Plate Chambers или MRPC), которые широко используются в таких экспериментах как ALICE, STAR, PHENIX.

Преимуществами данного детектора является хорошее временное разрешение ( $\sim 100$  пс), простая сборка и дешевые и доступные материалы.

MRPC состоят из набора резистивных пластин, разделенных друг от друга равными промежутками, создающими серию газовых зазоров. На внешние поверхности внешних резистивных электродов нанесено высоковольтное покрытие.

Каждая MRPC (рисунок 11) состоит из 5-ти газовых зазоров шириной 200 мкм, разделенных тонким (280 мкм) стеклом (основные параметры MRPC см. Приложение 2).

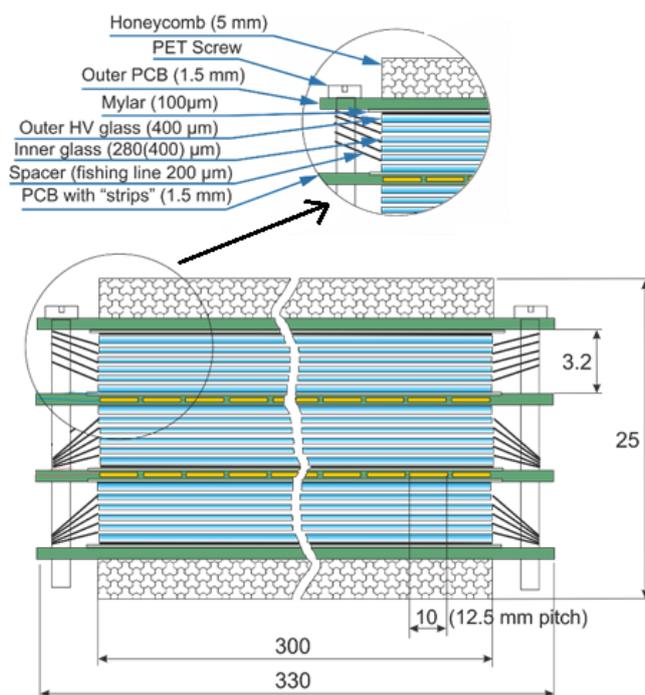


Рисунок 11. Схема модуля RPC [5]

Данная толщина стекла улучшает быстродействие, а также уменьшает радиационную длину детектора. Активная площадь MRPC определяется размером стекла (300 × 600 мм). Считывание сигналов осуществляется с двух сторон 24-мя полосками считывания (стрипами) шириной 10 мм.

Цилиндрическая часть TOF расположена между детекторами TPC и ECal. Внутренний радиус детектора 1.5 м, внешний 1.7 м. Общая площадь цилиндрической системы TOF составляет около 52 м<sup>2</sup>. Времяпролетная система организована по модульному принципу, чтобы минимизировать количество компонентов и снизить стоимость.

Каждый сегмент системы состоит из 2-ух частей. Внутренняя часть заполнена смесью газов и содержит 10 MRPC. Во внешней части находится электроника и кабели.

#### 2.2.2.2. Принцип работы

Когда мюон проходит через камеру, электроны выбиваются из атомов газа. Эти электроны вызывают электрон-ионную лавину, которая улавливается металлическими полосками в центре после небольшой, но точной временной задержки (рисунок 12). Резистивные электроды гасят стример и предотвращают искровой пробой. MRPC работает с высоким коэффициентом усиления в лавинном режиме.

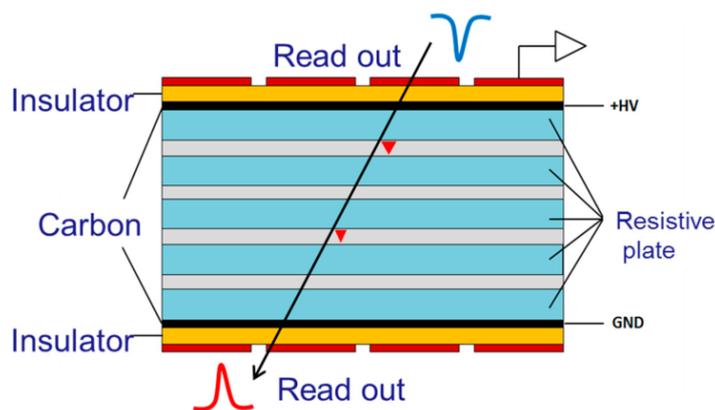


Рисунок 12. Принцип работы MRPC

Для идентификации заряженной частицы должны быть измерены следующие параметры: импульс частицы, длина трека и время пролета до точки взаимодействия с TOF детектором.

$$m^2 = \frac{p^2}{c^2} \left[ \left( \frac{1}{\beta} \right)^2 - 1 \right],$$

Где  $m$  – масса частицы,  $p$  – импульс.

Ширина пика в распределении квадратов массы зависит от разрешения по импульсу и времени пролета. Аналитическая форма для ширины пика по  $m^2$ , как функция разрешений по импульсу и времени пролета, определена уравнением:

$$\sigma_{m^2}^2 = 4m^4 \left( \frac{\sigma_p}{p} \right) + 4p^4 \left( \frac{\sigma_t}{\beta_t} \right).$$

Средний импульс пионов для энергии 4 ГэВ и 11 ГэВ показан на рисунке 13 и составляет около 300 МэВ/с и 400 МэВ/с.

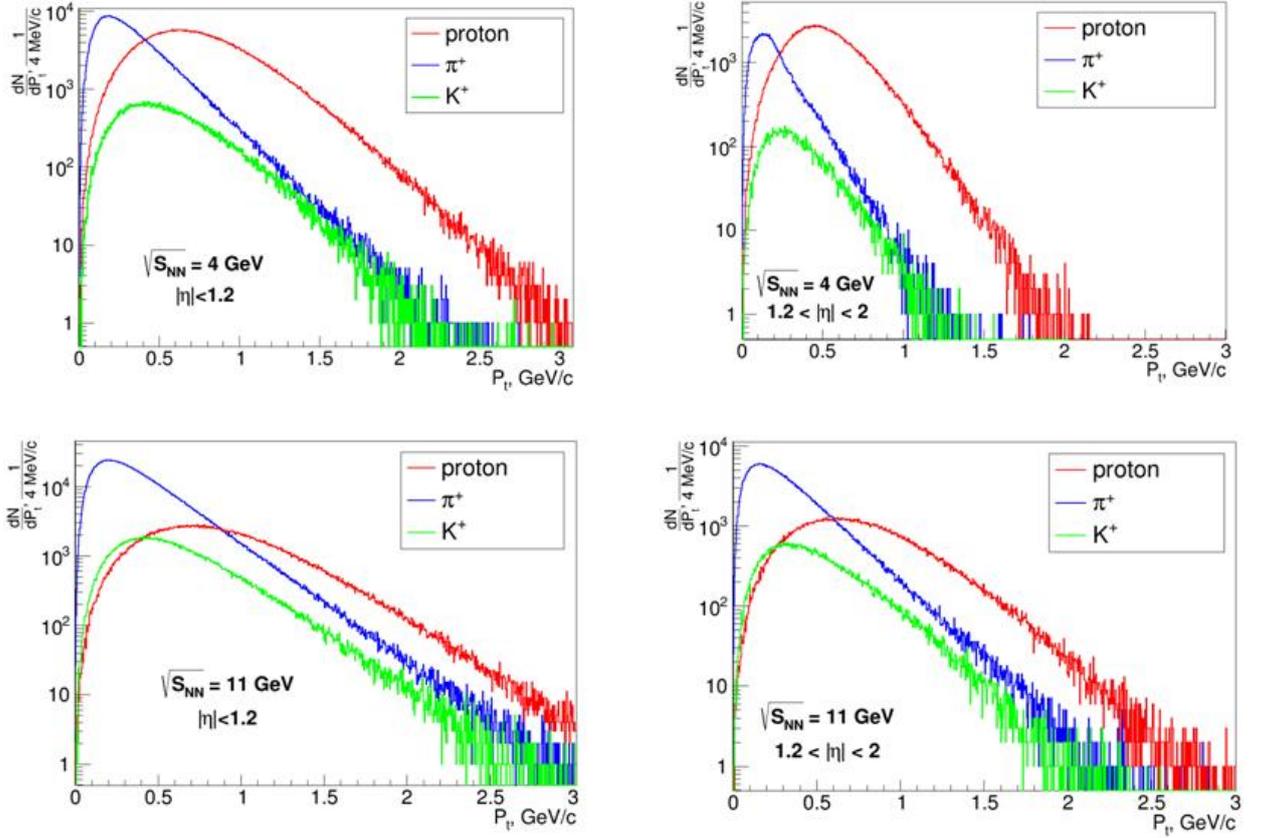


Рисунок 13. Средний импульс частиц энергии столкновения 4 ГэВ (сверху) и 11 ГэВ (снизу) [5]

Как известно из общей теории относительности, частица с массой  $m$  и импульсом  $p$  имеет скорость:

$$\beta = \frac{p}{\sqrt{p^2 + m^2}}.$$

Время прохождения  $T$  расстояния  $L$  для любой частицы со скоростью  $\beta$  определяется выражением:

$$T = \frac{L}{c\beta},$$

Используя эти уравнения, можно сказать, что мощность разделения частиц с использованием метода времени пролета определяется как число стандартных

отклонений между распределениями времени пролета двух частиц с разными массами, но с одинаковым импульсом и длиной трека:

$$N_{\sigma_{\text{TOF}}} = \frac{\Delta T}{\sigma_{\text{TOF}}} = \frac{L}{c\sigma_{\text{TOF}}} \left( \sqrt{1 + \frac{m_1^2}{p^2}} - \sqrt{1 + \frac{m_2^2}{p^2}} \right).$$

### 2.2.3. Электромагнитный калориметр (EMCal)

Экспериментальное изучение дилептонов в столкновениях тяжелых ионов является важной, но достаточно сложной задачей. Главной сложностью является сильный фон от некоррелированных лептонов, возникающих вследствие распада Далитца и преобразования фотонов в материале детектора. Основное внимание уделяется именно уменьшению данных фонов. Основная задача электромагнитного калориметра (EMCal) - в значительной степени уменьшить ложную идентификацию адронов как электронов (позитронов).

Основной задачей EMCal является измерение пространственного положения и энергии фотонов для таких последующих задач как:

- измерение величины выхода и распределения по поперечному импульсу и азимутальному углу фотонов,  $\pi^0$  (и  $\eta$ -мезонов) и электрон-позитронных пар, образующихся при столкновении тяжелых ионов с энергиями 4-11 ГэВ;
- детальное изучение эффектов коллективных потоков электромагнитных зондов в столкновениях тяжелых ионов;
- поиск фемтоскопических корреляционных эффектов в двух- (и четырех-) фотонных распределениях;
- получение новых экспериментальных данных о величине выхода нейтральных мезонов в столкновениях Au + Au из двух-, трех- и четырех- фотонных распределений инвариантных масс;
- поиск теплового и прямого излучения фотонов в столкновениях Au+Au на NICA (или определение их верхнего предела).

Ожидаемая высокая множественность событий (более 1000 частиц на событие) устанавливает определенные требования к сегментации детектора, расстоянию от вершины взаимодействия и плотности активной среды детектора. Для достижения хорошего пространственного разрешения, а также разделения перекрывающихся ливней, поперечный размер ячейки детектора должен быть порядка радиуса Мольера. Также калориметр должен работать в магнитном поле 0.5 Тл и иметь временное разрешение не меньше 1 нс, для исключения наложений и шумовых явлений.

По причине данных требований электромагнитный калориметр представлен типом “шашлык” со съемом в виде микропиксельных лавинных фотодиодов (Micropixel Avalanche Photodiode или MAPD). [6]

#### 2.2.3.1. Структура детектора

Цилиндрическая часть детектора ECal находится между детектором TOF и сверхпроводящим магнитом.

Каждая башня (ячейка) детектора представляет собой набор из 220 пар свинец-сцинтиллятор. Свинцовые плитки (толщиной 0,3 мм каждая) перемежаются 220 плитками пластикового сцинтиллятора (толщиной 1,5 мм каждая).

Свинцовая и сцинтилляционная плитки показаны на рисунке 14.

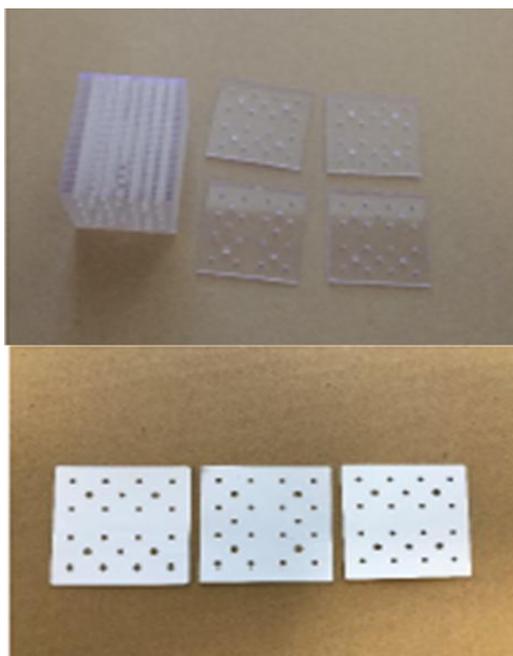


Рисунок 14. Сцинтилляторы (сверху) и свинцовые пластины (снизу) [6]

Общая толщина башни составляет примерно 42 см, что равно 12 радиационным длинам (основные параметры ECal см. Приложение 3).

К сожалению, пространство, доступное для ECal в MPD, невелико (40 см для активной части), что априори делает недостижимым максимальное энергетическое разрешение.

Утечка ливня даже для частиц с низкой энергией довольно велика (рисунок 15 слева).

Было проведено исследование толщины свинца для выбора оптимальной толщины свинца [6]. Увеличение толщины свинца снижает утечку ливня, но увеличивает вклад в разрешение по энергии и наоборот. Сравнение энергетического разрешения для свинцовых пластин 0,5 мм и 0,3 мм (рисунок 15 справа) наглядно иллюстрирует эту особенность. Толщина свинцовой пластины была выбрана на уровне 0,3 мм, поскольку дальнейшее уменьшение этого значения сделает калориметр слишком прозрачным.

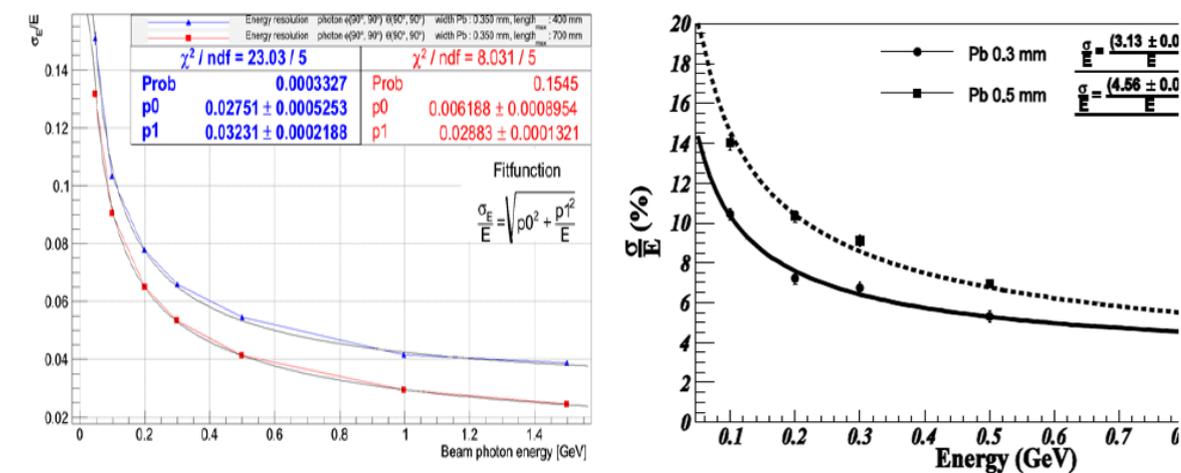
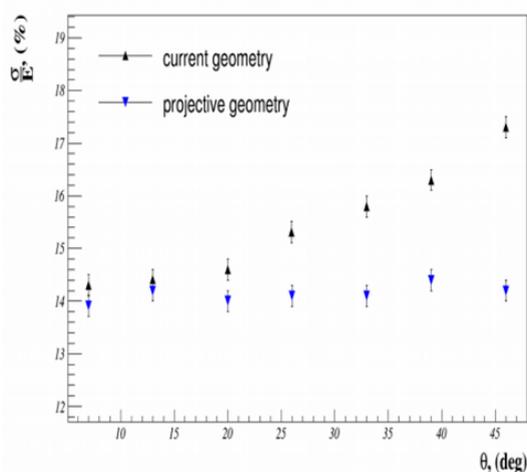
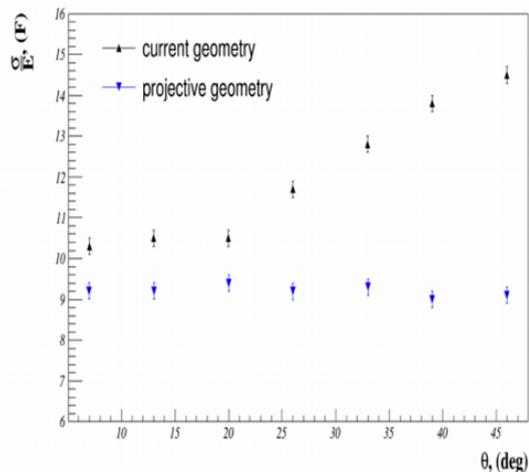


Рисунок 15. Слева - зависимость энергетического разрешения от энергии фотонов слева - для длин башен 40 см (синий цвет) и 70 см (красный цвет) [6], справа – для толщины свинцовой пластины [6]

Также проведены расчеты по выбору угла наклона модулей [6] (рисунок 16).



**Figure 2.3.10:** Distribution of the energy resolution vs angle  $\theta$  (Photons with energy 100MeV).



**Figure 2.3.11:** Distribution of the energy resolution vs angle  $\theta$  (Photons with energy 500MeV).

*Рисунок 16. Зависимость энергетического разрешения от типа геометрии [6]*

Целью расчетов был выбор единого для всех модулей угла наклона, при котором отклонение точки прицеливания от центра MPD будет минимальным. Этот угол был принят равным 0,9 градуса.

### 2.2.3.2. Принцип работы

Частица, залетая в ячейку калориметра, попадает в слой свинца и, сталкиваясь с его атомами, порождает электронный ливень. Так как энергия отдельных частиц ливня невелика по сравнению с энергией первичной частицы, электронный ливень “застревает” в слое сцинтиллятора, его частицы поглощаются и аннигилируют, после чего известная доля энергии выделяется в виде гамма частиц (рисунок 17).

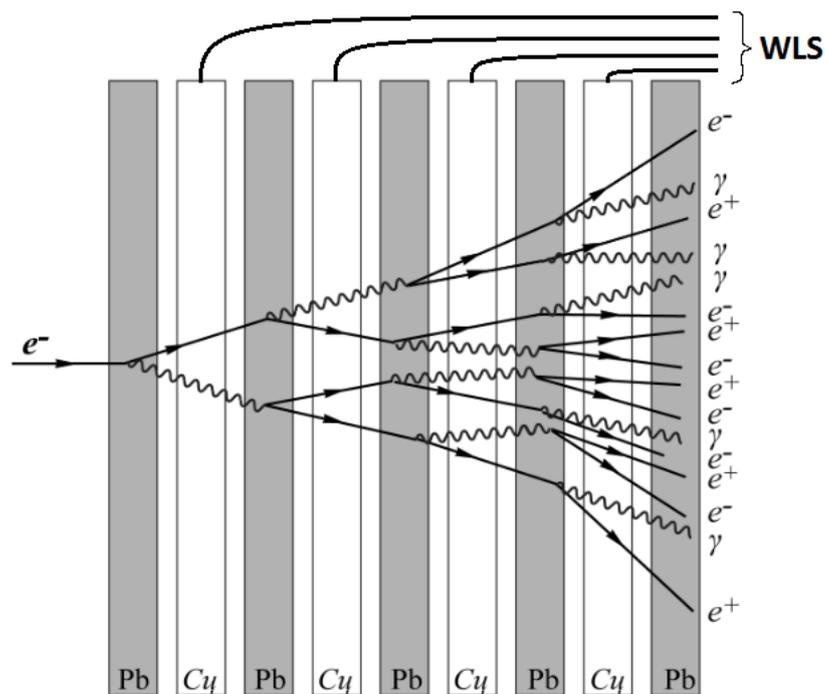


Рисунок 17. Принцип работы ECal

Сцинтилляционный свет собирается через 16 волокон со сдвигом длины волны (wavelength shifter или WLS), которые проходят через отверстия в сцинтилляторе и свинцовых плитках. Каждый пучок из 16 волокон WLS с площадью поперечного сечения около  $25 \text{ мм}^2$  считывается с помощью устройств Hamamatsu S13360-6025 MAPD с чувствительной площадью  $6 \times 6 \text{ мм}^2$ .

#### 2.2.4. Адронный калориметр (FHCAL)

При взаимодействии тяжелых ионов определение центральности столкновения события используется для изучения таких наблюдаемых, как коллективный поток, множественность частиц и флуктуации, которые сильно меняются с изменением центральности. Центральность столкновения может быть определена либо по множеству образовавшихся частиц, либо путем измерения энергии, переносимой невзаимодействующими нуклонами (спектаторами). Последнее можно сделать, используя адронные калориметры. Измерение количества спектаторов позволяет оценить количество участников и, следовательно, параметр удара  $b$ , которые сильно коррелированы.

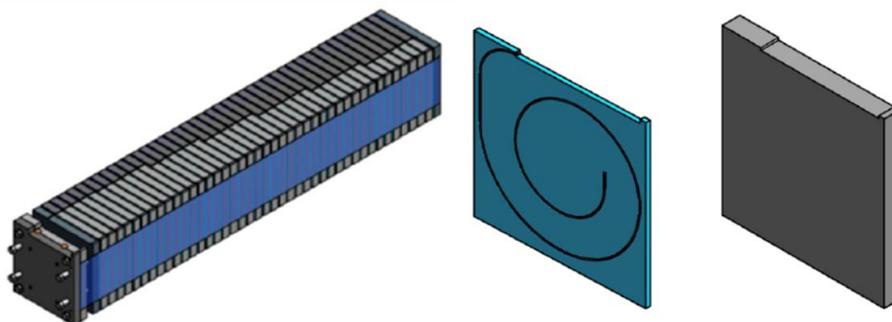
Адронный калориметр используется для таких задач как:

- определение центральности столкновений;
- определение ориентации плоскости реакции;
- измерение энергии непрореагировавших нуклонов и их фрагментов;

Работа в поле соленоидного магнита подразумевает, что FHCa1 изготовлен из немагнитных материалов.

#### 2.2.4.1. Структура детектора

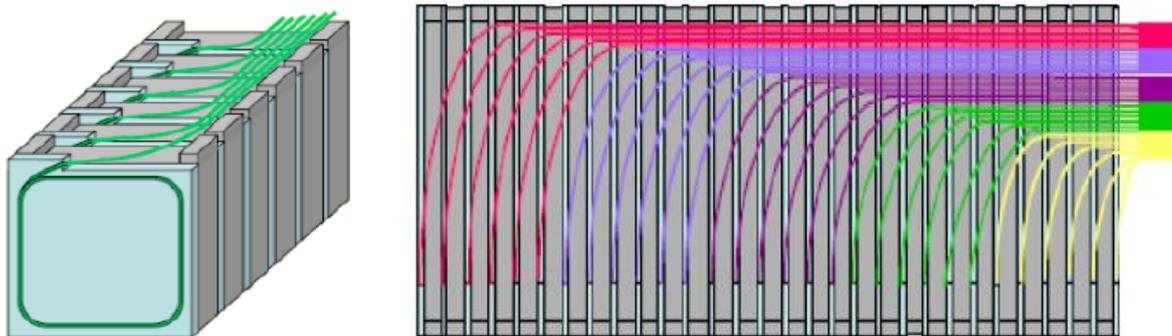
Адронный калориметр, состоит из 88 модулей (башен). Каждый модуль состоит из 42-х слоев последовательно расположенных пар свинец-сцинтиллятор, толщины которых относятся как 4:1 (рисунок 18).



*Рисунок 18. Модуль адронного калориметра (слева), пара свинец-сцинтиллятор (справа) [7]*

Считывание света обеспечивается WLS-волоконными, встроенными в углубления сцинтилляционных пластин (рисунок 19 слева), что обеспечивает высокую эффективность и равномерность сбора света по сцинтилляционной пластине с точностью до нескольких процентов.

WLS-волокна от каждых 6 последовательных сцинтилляционных плиток собираются вместе (рисунок 19 справа) и просматриваются одним фотодетектором на конце модуля. Итоговая продольная сегментация на 7 секций обеспечивает равномерность сбора данных вдоль модуля. Для продольной сегментации модулей калориметра требуется 7 компактных фотоприемников, подключенных к концам WLS-волокон на задней стороне модуля. Этими фотоприемниками являются микропиксельные лавинные фотодиоды (MAPD).



*Рисунок 19. Вид расположения WLS-волокон (слева),  
продольная сегментация модуля калориметра (справа) [7]*

Принцип работы адронного калориметра аналогичен принципу работы электромагнитного калориметра, с разницей в том, что адронный калориметр нацелен на детектирование адронных ливней.

### 3. Технологии

Современные подходы к созданию Дисплея Событий обладают как положительными, так и отрицательными сторонами. К примеру, дисплей, основанный на библиотеке ROOTEVE, работает, затрагивая исключительно центральный процессор (CPU), не используя для обработки графические процессоры (GPU). Вследствие этого скорость выполнения, а также используемая память программы сильно ограничиваются. Также данный способ визуализации требует предустановки множества сторонних библиотек, таких как ROOT, GEANT и т.п.

Дисплей Событий, основанный на Unity или FROG, использует графические процессоры, но все также требует установки программного обеспечения (ПО) для работы. Вследствие этого встает вопрос об использовании данного ПО на различных платформах (Windows, MacOS, Linux, Android и т.д.).

Современное развитие компьютерных ресурсов и веб-технологий заставляет заказчиков и разработчиков программного обеспечения менять подходы к созданию новых программных продуктов с ранее невозможным функционалом.

Основная тенденция последних десяти лет - создание кроссплатформенных приложений с распределенными вычислениями в архитектуре клиент-сервер.

В данной работе рассматривается вариант создания Дисплея Событий в виде веб-приложения с использованием языка программирования JavaScript (JS) и интерпретатора JS Engine V8.

#### 3.1. JavaScript

Начиная с 2010 года вроде всеми забытый язык высокого уровня JavaScript (*первоначально «LiveScript», разработанный Brendan Eich и сооснователями Netscape и Sun*) обрел новую жизнь после того, как Google представил новый интерпретатор JavaScript Engine V8 встроенный в клиентский браузер Chrome и построенный на его основе NodeJS для управления веб-сервером.

Название «JavaScript» является зарегистрированным товарным знаком корпорации Oracle в США.

Основные преимущества V8 Chromium перед другими JavaScript движками<sup>1</sup> (JScript, SpiderMonkey, JavaScriptCore, Nitro...):

- Компиляция исходного кода написанного на языке JavaScript в собственный машинный код, минуя стадию промежуточного байт-кода, в отличии, например от компиляции в языке Java;
- Очень эффективная система управления памятью, которая обеспечивает быстрое объектное выделение памяти и небольшие паузы для сборки «мусора» в процессе ожидания;
- Высокая производительность за счет встроенной быстродействующей буферной памяти (cache memory) при вызове функций;
- Возможность использования вычислительных ресурсов графического ускорителя (GPU);
- Открытый исходный код.

Благодаря движку V8 скорость выполнения веб-приложения стала сравнима с аналогичным приложением, работающим нативно, поэтому появилась возможность создания сложных приложений как Дисплей Событий.

Для упрощения создания пользовательских интерфейсов, для языка JS создано множество библиотек. Для достижения цели данной работы была выбрана библиотека React, из-за её популярности в мире и общепризнанной простоты.

React – это библиотека языка JavaScript, предназначенная для создания пользовательских интерфейсов. Данная библиотека значительно облегчает создание интерфейсов благодаря разбиению каждой HTML страницы на небольшие фрагменты - компоненты.

Для реализации визуальной части Дисплея Событий необходим графический пакет, позволяющий использовать трехмерную графику в браузерах. Такой библиотекой была выбрана WebGL от Khronos Group.

---

<sup>1</sup> Движок JavaScript – это программа, преобразующая код, написанный на языке JavaScript в машинный код.

## 3.2. WebGL

WebGL (Web-based Graphics Library) — программная библиотека для JavaScript, позволяющая создавать и отрисовывать трехмерную графику в браузере.

В отличие от других технологий для работы с трехмерной графикой (таких как OpenGL и Direct3D), библиотека WebGL предназначена для использования в веб-приложениях и не требует установки специализированных библиотек и расширений.

Преимущества использования WebGL:

- Кроссплатформенность и отсутствие привязки к определенной платформе. Windows, MacOS, Linux — все это неважно, главное, чтобы браузер поддерживал WebGL;
- Использование языка JavaScript, который достаточно популярен;
- Автоматическое управление памятью. В отличие от OpenGL (на котором написаны современные Дисплеи Событий, упомянутые ранее), в WebGL не надо выполнять специальные действия для выделения и очистки памяти;
- использование графического процессора (GPU) для отображения графики. Для этой технологии характерна высокая производительность.

Несмотря на широкие возможности, WebGL отличается от других технологий доступностью и простотой использования (благодаря множеству библиотек, написанных разработчиками поверх WebGL), что способствует её применению для данной задачи.

Работа с WebGL, и с шейдерами<sup>1</sup> — это довольно трудоемкий процесс. В процессе разработки необходимо описать каждую точку, линию, грань и т.д. Чтобы все это визуализировать, нам необходимо прописать довольно объемный кусок кода. Для повышения удобства и скорости разработки, была использована библиотека ThreeJS.

---

<sup>1</sup> Шейдеры – тип компьютерной программы, предназначенной для создания трехмерной графики и исполняемой графическими процессорами (GPU).

### 3.3. ThreeJS

ThreeJS – это библиотека JavaScript, содержащая набор готовых примитивов для создания и отображения интерактивной трехмерной графики в WebGL.

При использовании ThreeJS отпадает необходимость в написании шейдеров, так как появляется возможность оперировать привычными понятиями, такими как сцена, свет, камера, объекты и их материалы.

Основные понятия в библиотеке ThreeJS являются:

- Scene (сцена) — своеобразная платформа, где размещаются все объекты, которые создает пользователь;
- Camera (камера) — по сути — это “глаз”, который будет направлен на сцену. Камера снимает и отображает объекты, которые расположены на сцене;
- Object – пользовательский объект, который состоит из 2-ух частей:
  - Geometry (геометрия) – описание формы объекта (положение вершин, грани, радиус и т.п.);
  - Material (материал) – описание внешнего вида объекта (цвет, текстура, прозрачность);
- Light (свет) – освещение сцены и объектов;
- Renderer (визуализатор) — визуализатор, который позволяет показывать сцену, снятую камерой.

Далее было необходимо выбрать среду, в которой будет работать веб-сервер, управляющий работой Дисплея Событий. Подходящей средой для данной задачи является NodeJS, основанный на движке V8.

### 3.4. NodeJS

NodeJS — это среда разработки веб-приложений в архитектуре клиент-сервер, превращающая JavaScript из узкоспециализированного языка для управления веб-страницами в язык общего назначения.

NodeJS добавляет в JavaScript возможность взаимодействовать с устройствами ввода-вывода и подключать другие внешние библиотеки, написанные на разных языках, обеспечивая вызовы к ним из JavaScript кода. Благодаря этому появилась возможность запускать исполнение JS кода на локальной машине или сервере в качестве отдельного приложения.

У движка V8 есть особенность — он умеет исполнять код псевдопараллельно. Эта технология называется событийно-ориентированным программированием. Программа выполняет отдельные куски кода (функции) по приходу определенных событий. Таких событий можно предусмотреть много и получается, что процессы как будто выполняются параллельно. Более того, процессы асинхронны, а это означает, что, при запросе программой информации из внешних источников программа может ждать сколь угодно долго прихода данной информации, не останавливая другие свои процессы, а при получении этой информации, продолжит её обработку и последующее выполнение кода.

При разработке программ на стороне сервера может возникнуть множество таких асинхронных событий. Для решения проблемы приоритетов, NodeJS делает бесконечный цикл, в котором предоставляется процессорное время для каждой функции. Именно такое равномерное распределение задач в цикле событий и даёт NodeJS преимущество при создании серверных приложений.

Для передачи данных клиенту с сервером необходим протокол обмена. Стандартный протокол HTTP (“запрос-ответ”), который используется для веб-страниц не подходит для использования при непрерывной передаче данных больших объемов, вследствие большого объема служебной информации при соединении с сервером и необходимости множественных запросов и их подтверждении.

Самый подходящий протокол связи для таких задач – WebSocket.

### 3.5. WebSocket

WebSocket – это протокол связи, используемый для обмена сообщениями между клиентом и сервером. Особенность данного вида связи заключается в том, что данные по этому протоколу передаются без разрыва соединения и дополнительных запросов. А значит, приложения, работающие в реальном времени (как и Дисплей Событий), не будут тратить время на множественные запросы к серверу.

Также, в отличие от HTTP протокола, WebSocket позволяет работать с двунаправленными потоками данных.

Для работы Дисплея Событий необходим буфер, отвечающей за синхронизацию доступа к потоку данных, который будет хранить обработанные события.

### 3.6. RabbitMQ Message Broker

RabbitMQ – это брокер сообщений, который выполняет функцию вышеупомянутого буфера. RabbitMQ работает по протоколу AMQP<sup>1</sup> (Advanced Message Queuing Protocol).

Данный брокер состоит из 3-ех частей:

- Producer (поставщик) – код, отправляющий сообщения;
- Consumer (потребитель) – код, принимающий сообщения;
- Queue (очередь) – буфер хранения сообщений; Любое количество поставщиков может отправлять сообщение в любую очередь, а также любое количество потребителей может получать сообщение из одной очереди.

На рисунке 20 указана схема имплементации данного брокера в MPD EDS (синий цвет). Очередь MPD Events может хранить в себе до 64-ех обработанных событий и возвращать их (все или только последнее) по запросу пользователя.

---

<sup>1</sup> AMQP – открытый протокол связи для передачи сообщений между компонентами системы.

**MPD Event Display and Event Broker relations**

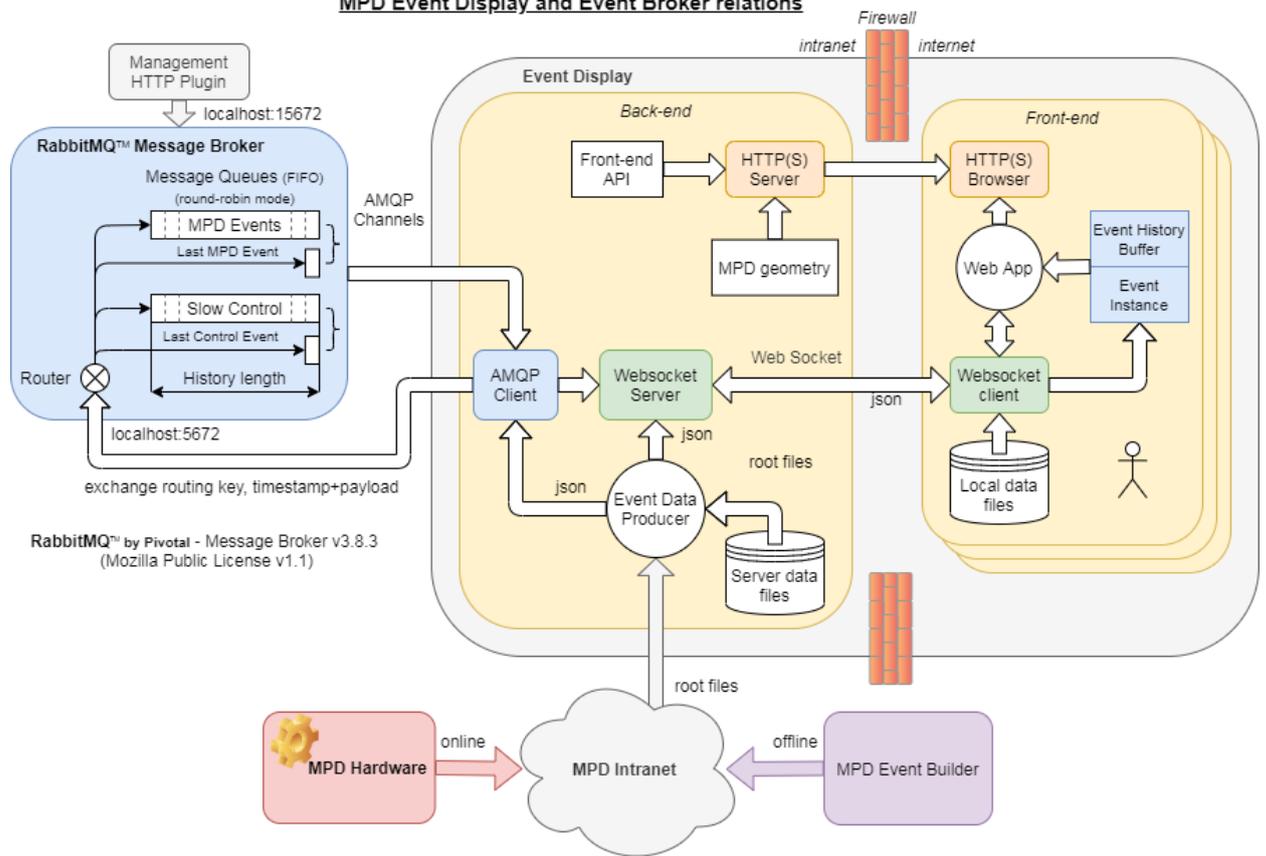


Рисунок 20. Схема использования брокера событий в MPD EDS (синий цвет)

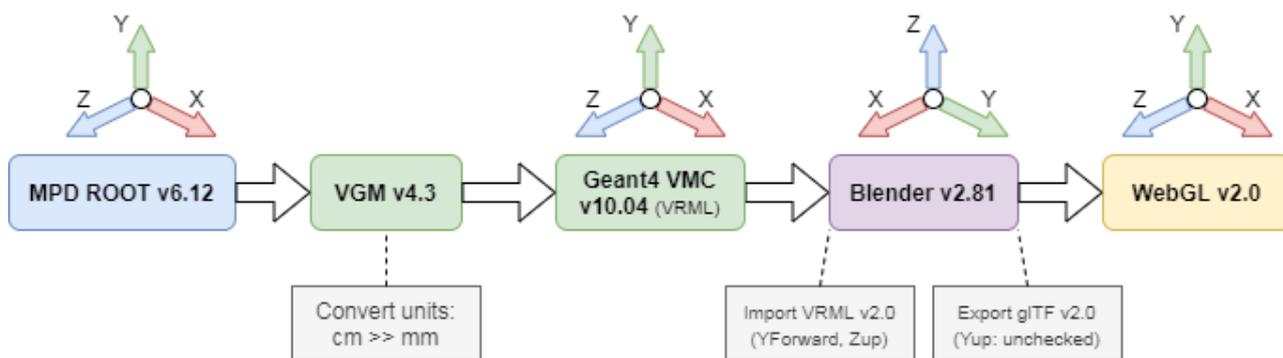
## 4. Описание работы MPD EDS

### 4.1. Формат геометрии MPD

Первоначально, геометрия детекторов MPD находится в виде файла библиотеки ROOT (библиотека для анализа данных в физике высоких энергий). Данный формат не подходит для использования в разрабатываемом веб-приложении, и поэтому был найден способ перевода данной геометрии в необходимый формат.

Конечным форматом является формат glTF (Graphics Library Transmission format. glTF - формат файла для хранения трехмерных сцен и моделей, который сжимает размер трехмерных сцен и минимизирует обработку во время визуализации приложениями, использующими WebGL.

На рисунке 21 показана схема перевода геометрии из файла формата MPDROOT в формат glTF.



**MpdRoot** - offline software framework for simulation, reconstruction and physics analyses of the simulated or experimental data for MPD experiment;  
**Virtual Geometry Model (VGM)** - geometry conversion tool between Geant4 VMC and ROOT TGeo geometry models;  
**Blender** - free and open source 3D creation suite. Starting from v2.81 Blender support plugin for export to glTF format;  
**VRML** - Virtual Reality Modeling Language  
**glTF™** - GL Transmission Format from Khronos Group Inc.;

*Рисунок 21. Метод перевода геометрии из файла формата MPDROOT в формат glTF*

В начале, файл геометрии посредством утилиты Virtual Geometry Model (VGM) переносится в Geant4<sup>1</sup>, из которого, с помощью внутреннего визуализатора VRML2FILE, геометрия переводится в формат Virtual Reality Modeling Language (VRML). Данная геометрия состоит из множества примитивов, которые, для использования в Дисплее Событий, необходимо объединить в необходимые структуры детектора в отдельных файлах. Это проделывается посредством скрипта, написанного на Shell и с использованием специализированного С-подобного языка обработки текста - AWK. На рисунке 22 представлен фрагмент кода, выделяющий в отдельный файл цилиндрическую систему охлаждения TPC (ThermoScreenBarrel).

```

248 GetThermoScrBarrel() {
249     awk '
250     BEGIN { nKEY=0; nGROUP=0; nUSE=-1;
251           print "# Block: ThermoScrRad\nDEF ThermoScrHold Group {\n\tchildren [";
252     }
253     /^#----- SOLID: tpc01ThermoScrHold/ { nKEY=NR; }
254     /^#----- SOLID: tpc01ThermoScrRad/ { nKEY=NR; }
255     ./ {
256         if ( nUSE <= 0 && nKEY != 0 && nKEY != NR ) {
257             nKEY=NR;
258             if ( substr($0,0,1) != "#" ) {
259                 if ( $1 == "appearance" && $3 == "{" ) {
260                     if ( nUSE == -1 ) {
261                         print "\t\tappearance DEF ThermoScrHold Appearance {\n\t\t\tmaterial Material {\n\t\t\t\ttdiffuseCol
262                         nUSE=0;
263                     } else
264                         print "\t\tappearance USE ThermoScrHold";
265                     nUSE++;
266                     next;
267                 } else if( $1 == "solid" && $2 == "FALSE" ) {
268                     print "\t\t\ttsolid TRUE";
269                 } else print $0;
270             } else nKEY=0;
271         }
272         if ( nUSE > 0 && nKEY != NR ) { if ( $3 == "{" ) nUSE++; if ( $1 == "}" ) nUSE--; }
273     }
274     END {
275         print "\t]\n}\n# End: ThermoScrHold";
276     }' $1
277 }

```

*Рисунок 22. Фрагмент кода, реализующий обработку файла геометрии*

Далее данные файлы импортируются в Blender v2.81 с параметрами YForward и ZUp, и затем экспортируются в конечный формат GLTF.

Несмотря на многоступенчатый перевод из одних форматов в другие, геометрия детекторов остается неизменной, а пакет Blender позволяет

<sup>1</sup> Geant4 – инструмент для моделирования прохождения частиц через вещество, используя методы Монте-Карло.

добавлять и манипулировать с их цветом, отражающей способностью и другими визуальными параметрами.

Таким методом были переведены и добавлены в Дисплей Событий все необходимые детекторы.

## 4.2. Чтение файлов событий

Данные события находятся в файле формата библиотеки MPDROOT. Файл содержит две структуры данных TTree (дерево данных) библиотеки ROOT: одна содержит моделированные данные (mpdsim), другая отклики детекторов (mpddst).

Дерево mpdsim содержит в себе набор данных, в виде структур TBranch (ветвь), о прохождении частиц, возникших вследствие моделирования столкновения, через 4 основных детектора MPD: TPC (TpcPoint), TOF (TOFPoint), ECal (EmcPoint), FHCAL (ZdcPoint).

Дерево mpddst сделано аналогично и включает в себя данные откликов детекторов и данные реконструкции. В Дисплее Событий используются следующие ветви:

- MpdTpcDigit – сигналы, пришедшие на падовую плоскость, детектора TPC;
- TpcRecPoints - реконструированные данные (хиты) TPC;
- TOFHit - реконструированные данные (хиты) TOF системы;
- MpdEmcHit - реконструированные данные (хиты) ECal;
- ZdcDigi - реконструированные данные (хиты) FHCAL;
- Vertex – данные о центре взаимодействия конкретного события.

Распаковка и чтение файлов событий происходит на стороне сервера. С помощью программного интерфейса NAPI создается аддон (расширение) для основной программы. Данный аддон написан на языке C++ и используется для реализации интерфейса между JavaScript на NodeJS и библиотеками C/C++, которые используются при реализации метода чтения файла событий.

### 4.3. Схема работы MPD EDS

На рисунке 23 показана схема работы MPD EDS.

Первое подключение клиента к веб-серверу происходит по HTTP протоколу. По итогу подключения, клиент получает полный пакет функций (front-end API) для управления веб-приложением, а также файлы геометрии детекторов.

Для работы с событиями, по запросу клиента, открывается соединение по протоколу WebSocket. После выбора пользователем файла событий производится чтение данного файла с помощью NAPI аддона и, прочитанное единичное событие в формате JSON<sup>1</sup>, отправляется в брокер сообщений RabbitMQ, из которого данное событие отправляется клиенту.

Визуализация геометрии детектора и прочитанных событий производится на стороне клиента, с использованием его графических ресурсов.

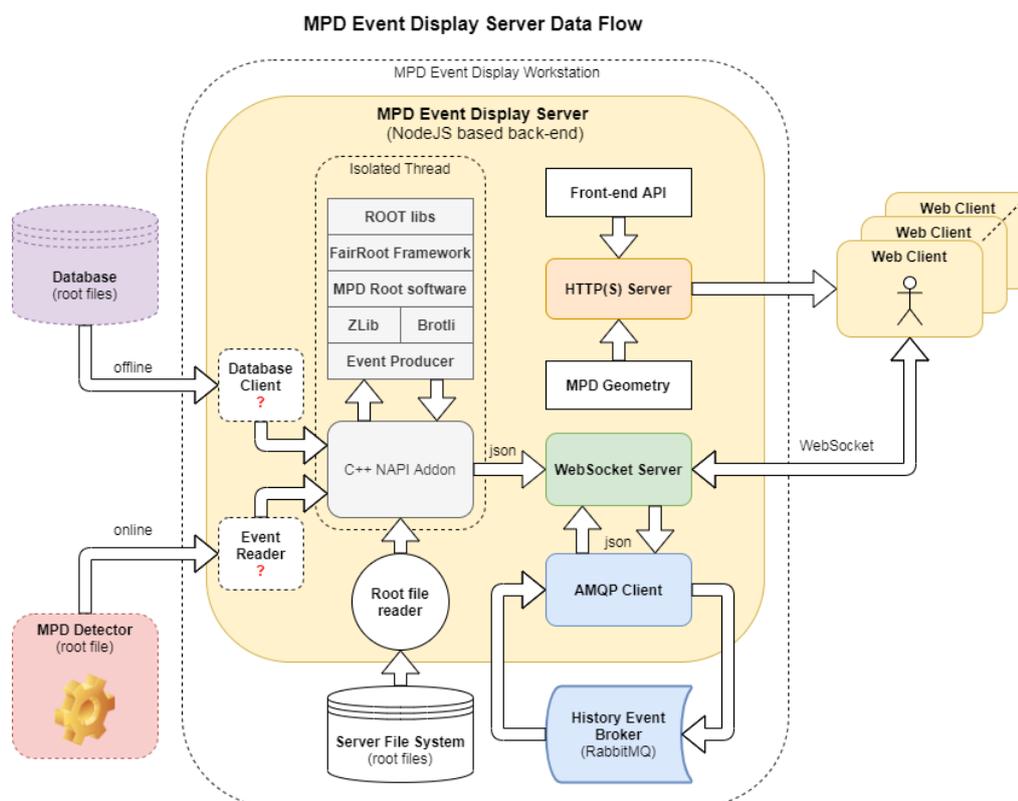


Рисунок 23. Схема работы MPD EDS

<sup>1</sup> JSON (JavaScript Object Notation) – текстовый формат обмена данными

## 5. Результаты

### 5.1. Интерфейс приложения

Интерфейс приложения состоит из 8-ми веб-страниц (рисунок 24).

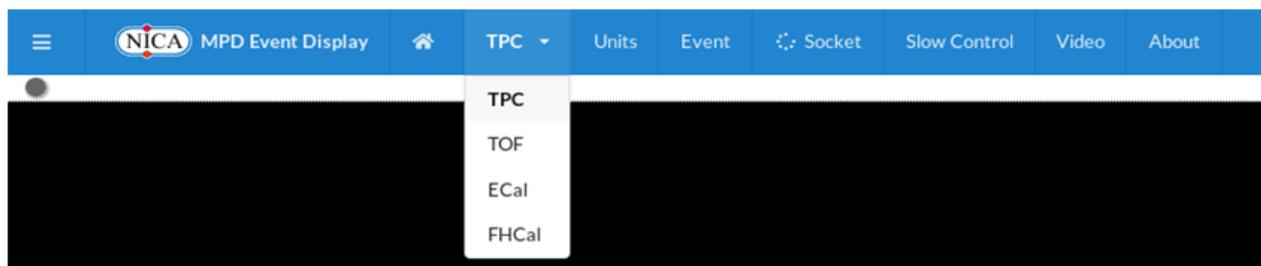


Рисунок 24. Структура MPD EDS

На первой странице представлен общий вид всех детекторов MPD (рисунок 25), с отсутствующими сенсорными площадками (пады для TPC, стрипы для TOF). Геометрия MPD каждого состоит из различных детекторов, которые, по желанию пользователя, могут быть отключены с помощью выпадающего меню.

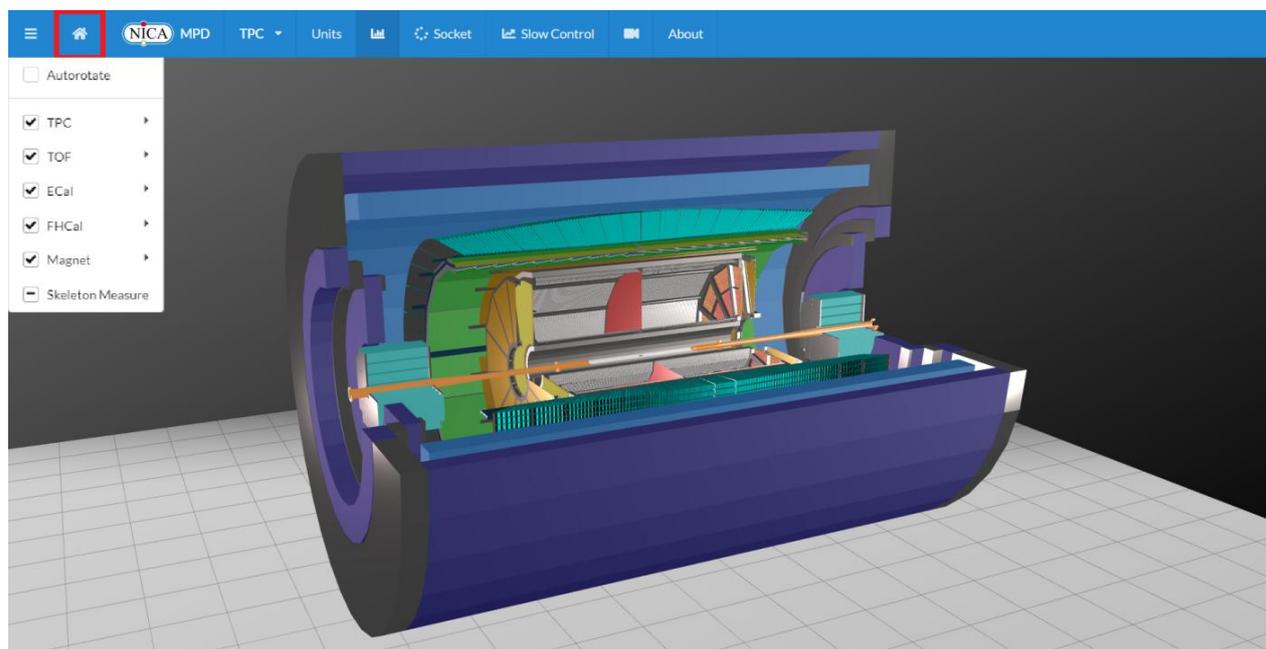
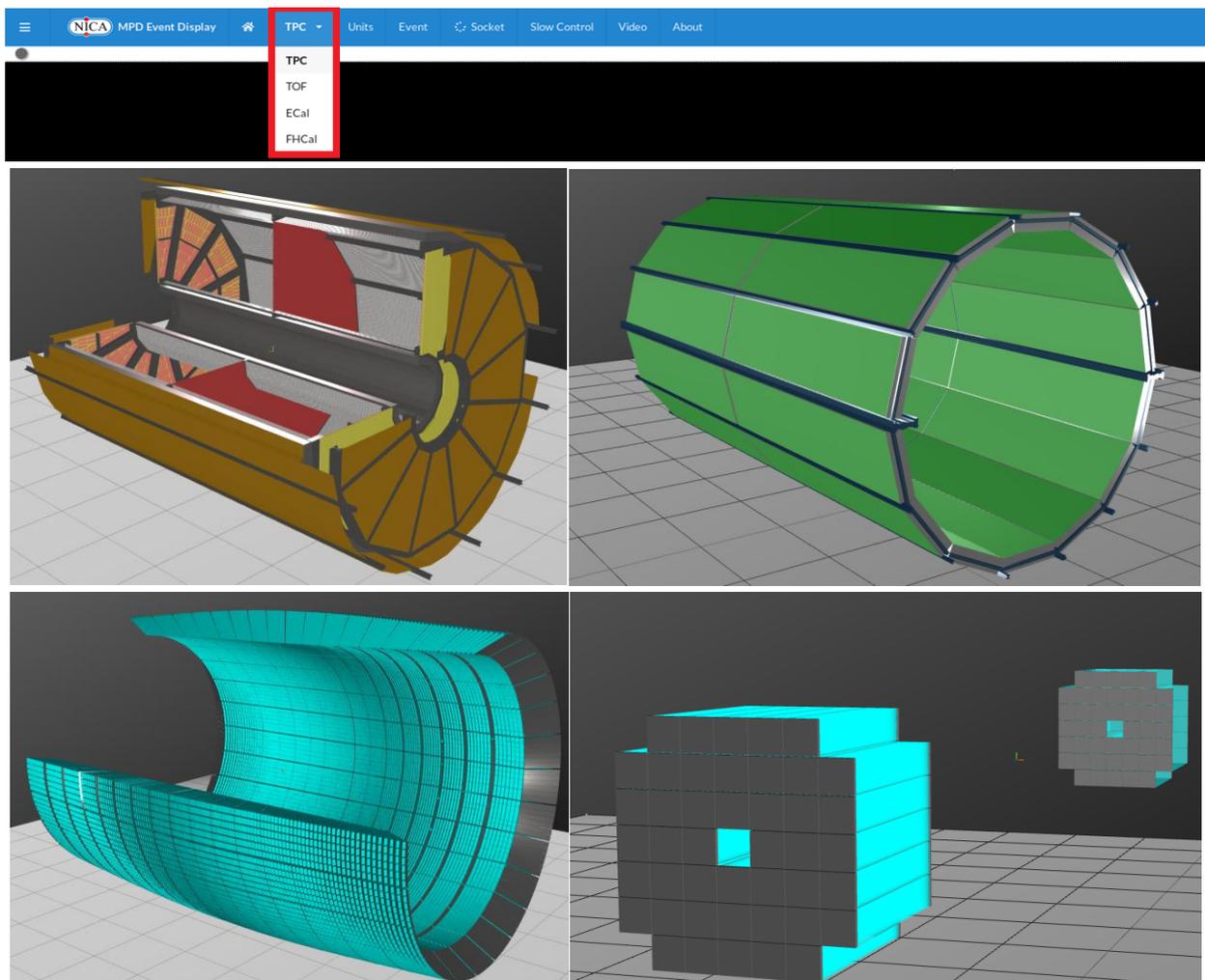


Рисунок 25. Главная страница MPD EDS

Следующая страница (рисунок 26) состоит из 4-ех вариантов и представляет геометрию детекторов (TPC, TOF, ECal, FHCal) по отдельности.



*Рисунок 26. Страницы детекторов*

Геометрии каждого детектора является составной. К примеру, TPC состоит из 7-ми частей (рисунок 27): каркас (field cage & ROC support), алюминиевая решетка для поддержания постоянного электрического поля (field cage), внутренний и внешний цилиндры (inner & outer walls), система охлаждения (thermoscreen), считывающая камера (readout chamber) и высоковольтная центральная мембрана (central membrane).

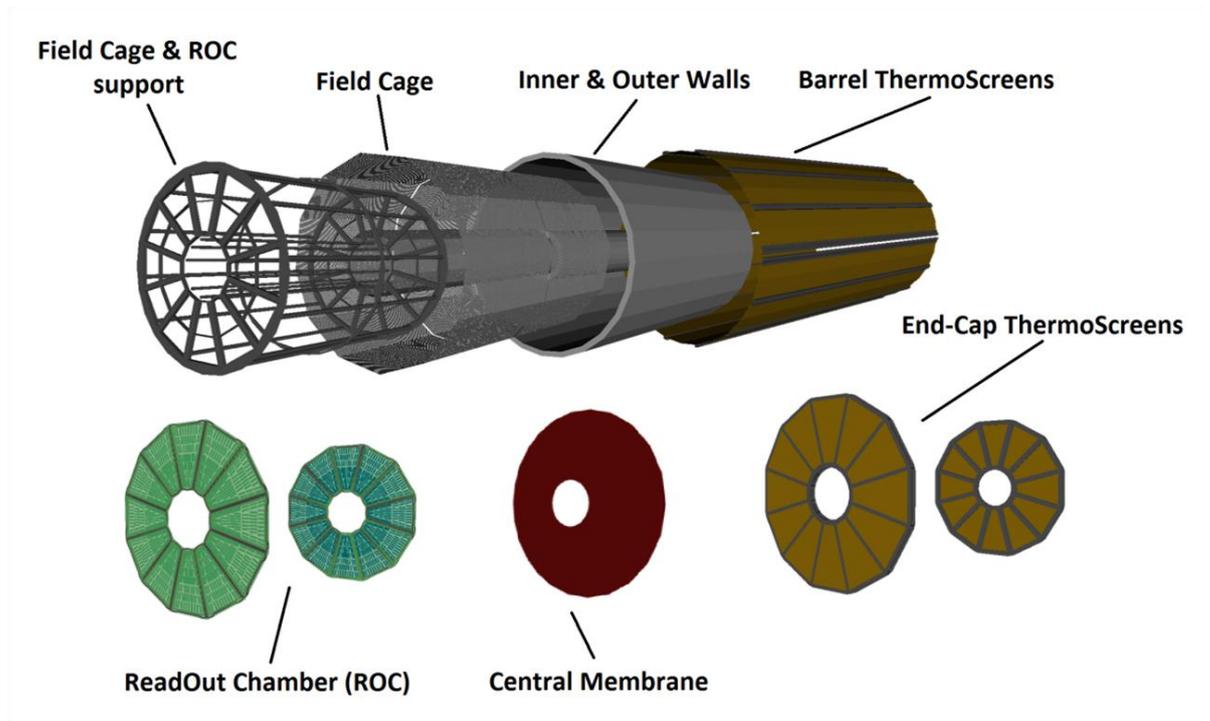


Рисунок 27. Составные части геометрии TPC в MPD EDS

На странице Units, на примере детектора TPC пользователю предлагается вид выбранного детектора в 4-ех разных независимых окнах, с возможностью выбора частей детектора в каждом (рисунок 28).

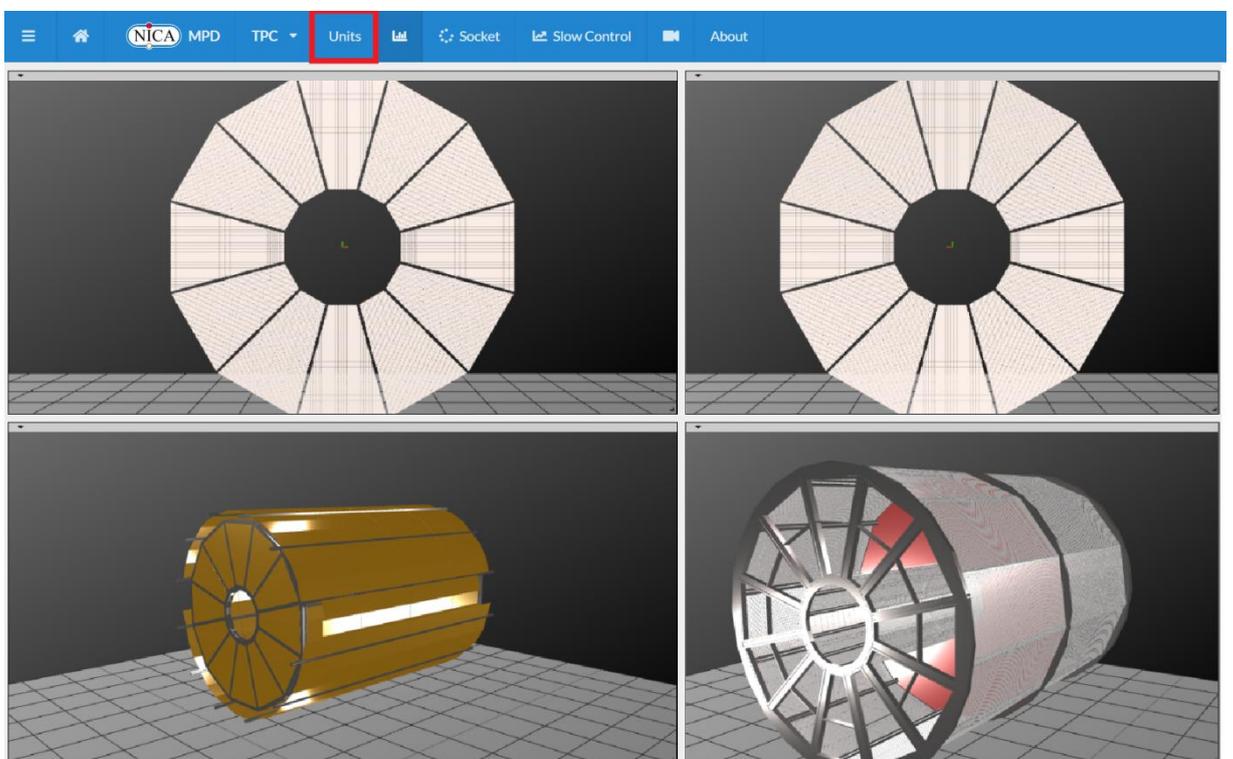


Рисунок 28. Страница Units

На странице Event показывается информация о конкретном событии для выбранного детектора (рисунок 29). На гистограммах выводится загруженность каждого из 24-ех секторов TPC в зависимости от времени прихода электронного кластера.

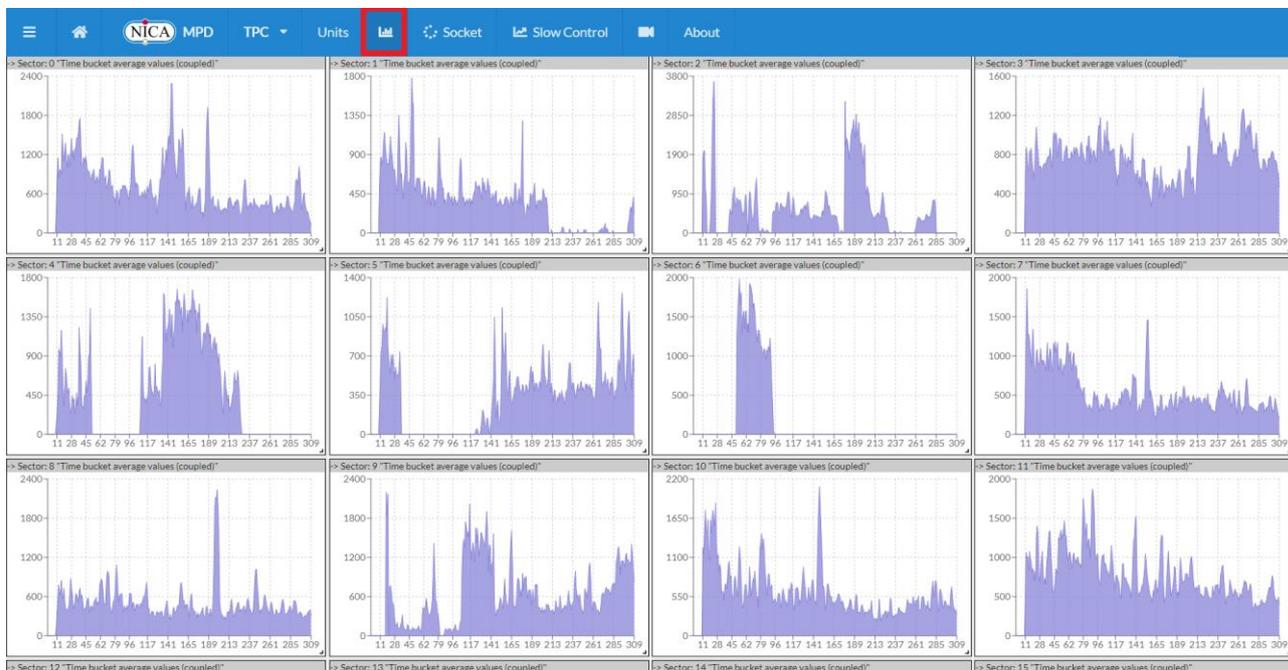


Рисунок 29. Страница Event

Страница Socket отвечает за подключение к веб-серверу для последующего получения и визуализации событий (рисунок 30). При включении соединения WebSocket (цифра 1), пользователь выбирает файл из уже имеющихся на сервере, или загружает на сервер локальный файл (цифра 2). После выбора или загрузки файла событий пользователь может выбрать временной промежуток визуализации различных событий, а также детектор (один из или все), данные которого будут прочитаны (цифра 3). После запуска чтения файлов (цифра 4) на общей странице MPD и частных страницах детекторов будут визуализироваться отклики детекторов и реконструированные треки частиц.

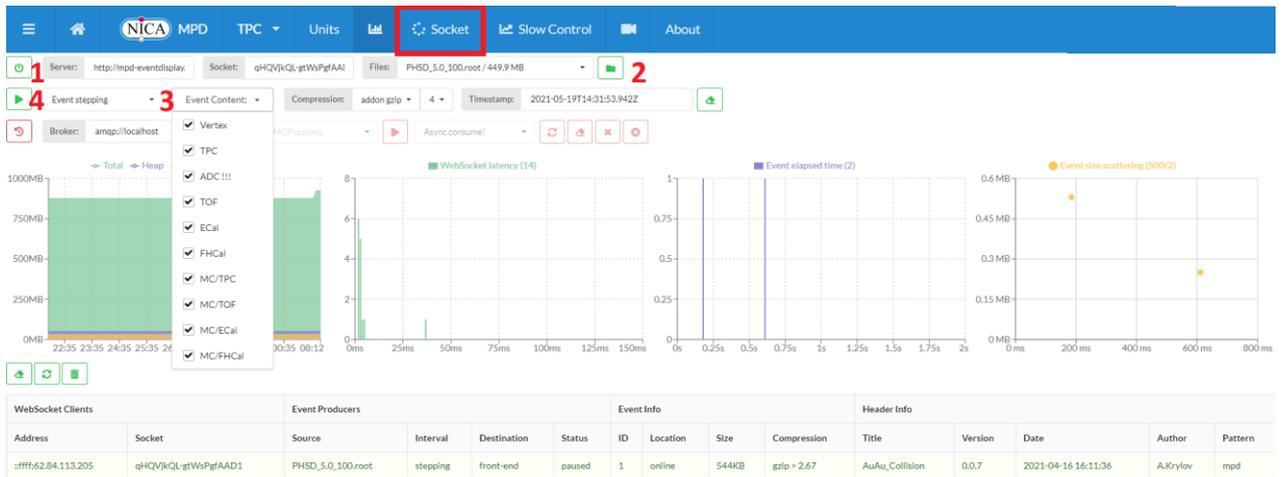


Рисунок 30. Страница Socket управления соединением с сервером

На странице Slow Control планируется выводить такую инженерную информацию как температурных датчиках, манометрах, данные об электрическом напряжении различных модулей детектора и т.п.

Страницу Video предполагается использовать как видео мониторинг детектора в реальном времени, а на странице About находится информация о используемых технологиях и команде разработчиков данного Дисплея Событий (рисунок 31).

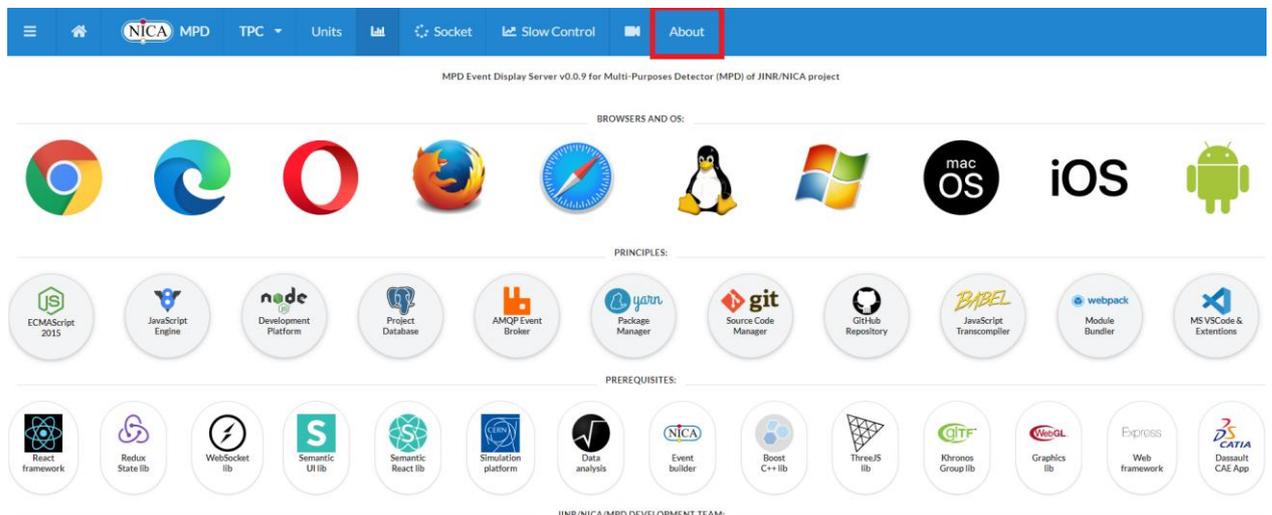


Рисунок 31. Страница About

## 5.2. Визуализация событий

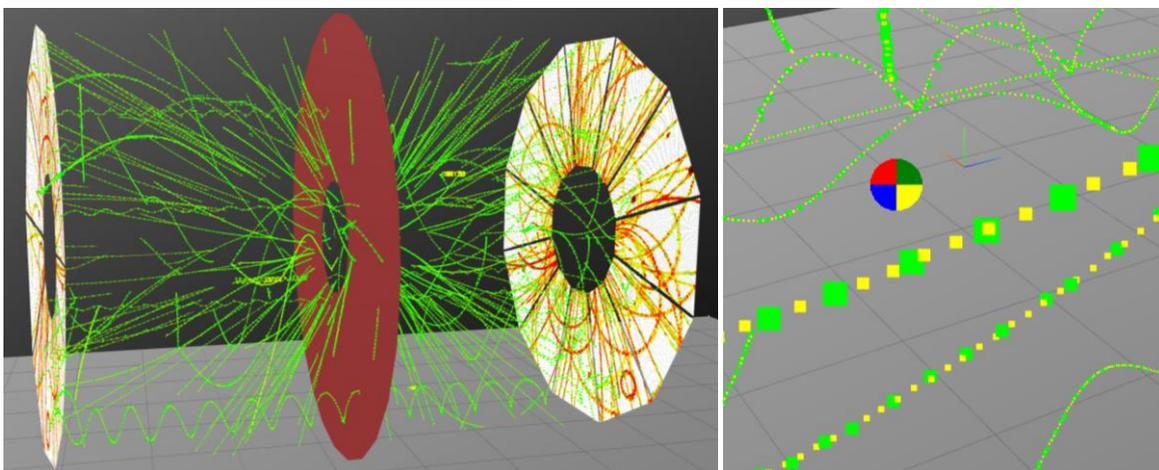
### 5.2.1. TPC

Данные событий для время-проекционной камеры делятся на 3 типа:

- данные моделирования с помощью Geant4 – монте карло 3D точки;
- проекции данных хитов на плоскость сенсорных падов;
- данные хитов восстановленных с помощью библиотеки MPDROOT.

В Дисплее Событий MPD EDS эти данные представлены на странице детектора TPC (рисунок 32). Geant4 хиты представлены в виде точек желтого цвета.

Данные восстановленных хитов – зеленым.



*Рисунок 32. Визуализация данных события  
для TPC (слева – общий вид, справа – ближний)*

На катодных площадках сенсоров, цветом выделяются сигналы электронных кластеров, пришедших к торцу детектора (рисунок 33). Уровень сигнала, поступившего на текущую площадку для всего события, имеет значение в диапазоне от 1 до  $10^5$ .

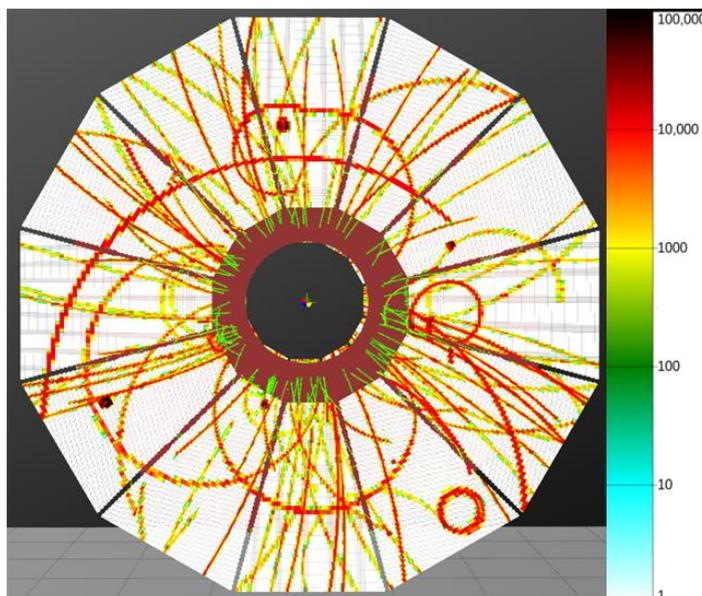


Рисунок 33. Визуализация данных события для TPC

### 5.2.2. TOF

Данные TOF системы представлены в виде времени, прошедшего от начала события до пролета частицы через данный стрип. Эти данные выделяются с помощью диапазона цвета (от черного до голубого). Также, пользователь может выбрать необходимый стрип и получить числовую информацию о его расположении и значении времени (рисунок 34).

Количество сигнала (время), поступившего на текущую полосу для всего события, имеет диапазон от 1 до  $10^5$  наносекунд.

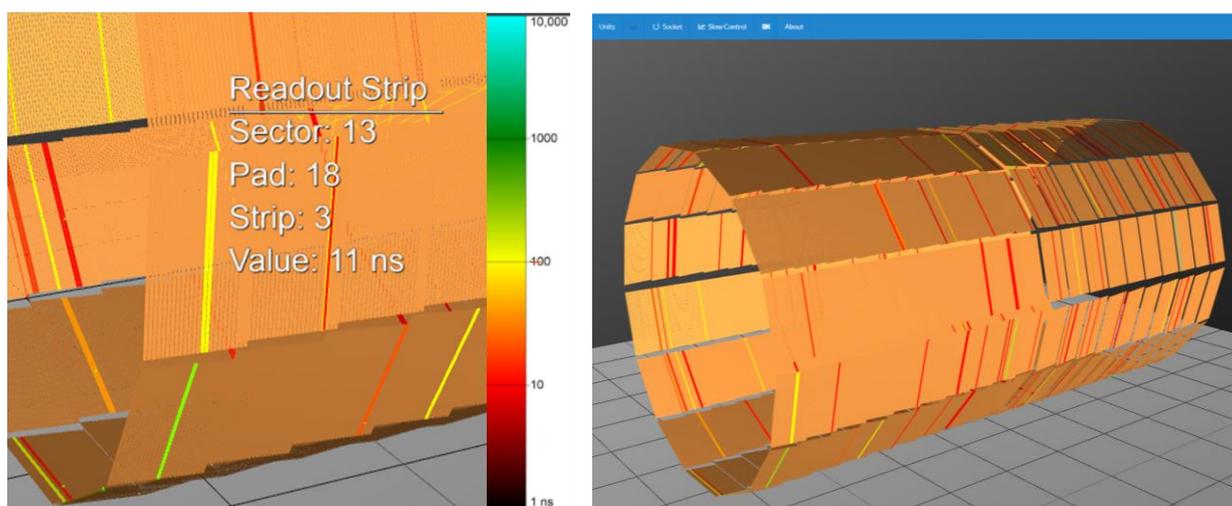


Рисунок 34. Визуализация данных события для TOF

### 5.2.3. ECal

Данные ECal представляют собой суммарное энерговыделение каждой башни за событие. В зависимости от энергии длина отдельных башен увеличивается по сравнению с высотой по умолчанию. Также, количество энергии в каждой башни выделяется цветовым диапазоном (от голубого до черного).

Количество сигнала для каждой башни варьируется по цвету от 1 до 1000 МэВ (рисунок 35).

Пользователю предоставляется возможность выбора (путем зажатия клавиши CTRL) конкретной башни с выводом информации о её расположении и значении энергии.

Несмотря на количество трехмерных башен (более 38000), визуализация событий работает быстро даже при масштабных событиях, в которых используются 60% всех башен.

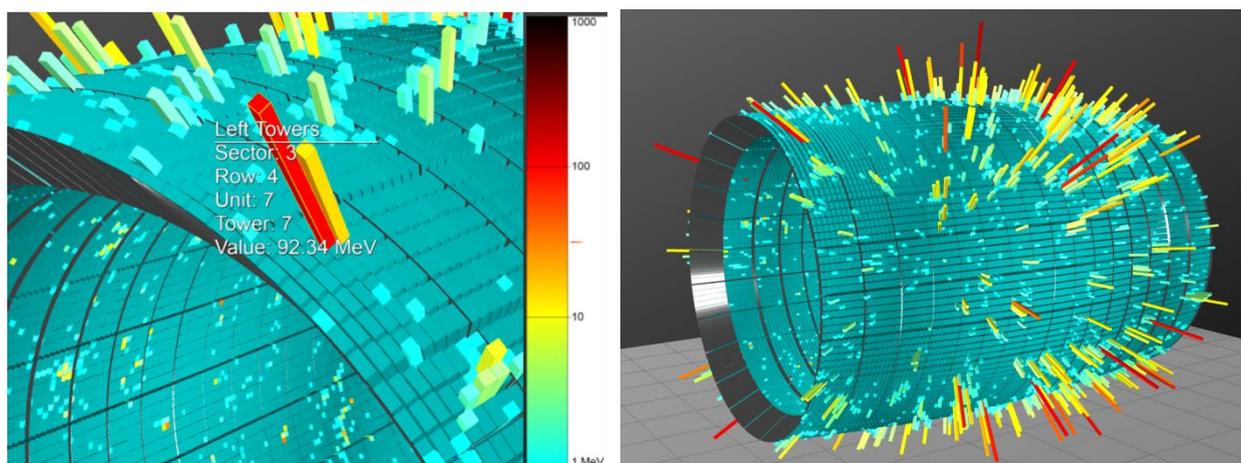
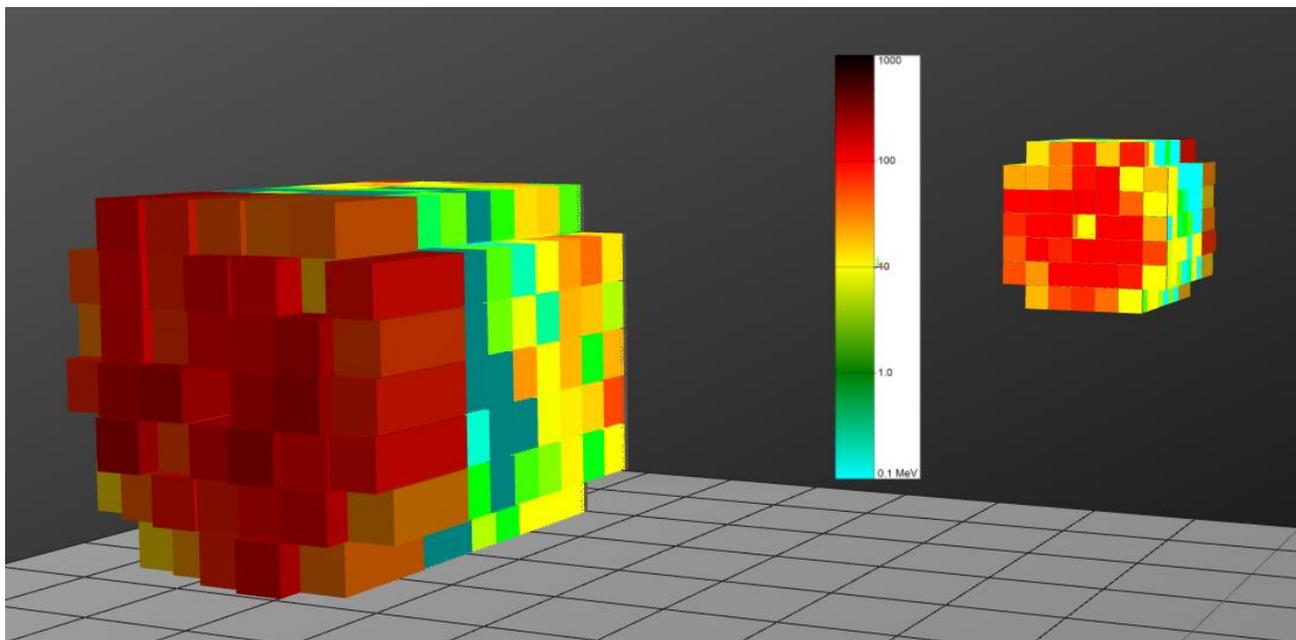


Рисунок 35. Визуализация данных события для ECal

### 5.2.4. FHCAL

Для FHCAL данные события показывают суммарное энерговыделение каждого модуля. В зависимости от энергии длина отдельного модуля увеличивается по сравнению с высотой по умолчанию. Также, количество сигнала для каждого модуля варьируется по цвету от 0.1 до 1000 МэВ (рисунок 36).

В дополнение к основной информации, визуализируются данные о каждой из 7-ми секций модуля (одна секция представляет собой WLS-волокна от каждых 6 последовательных сцинтилляционных плиток).



*Рисунок 36. Визуализация данных событий для FHCAL*

## ВЫВОДЫ

Веб-интерактивный Дисплей Событий детектора MPD находится на стадии разработки. Однако по итогам проведенной работы его прототип уже сейчас приступил к тестированию на моделированных событиях.

Задачи, выполненные в процессе работы:

- перевод геометрии детекторов в необходимый для веб-приложения формат (C++ код для перевода файла библиотеки ROOT в Geant4, Shell скрипт для создания необходимых структур детектора из общего файла геометрии, работа с Blender);
- визуализация данной геометрии на стороне клиента (JavaScript код, написанный посредством библиотек React и ThreeJS);
- чтение файлов событий на стороне сервера для каждого из детекторов (C++ аддон, подключаемый посредством NAPI);
- создание пользовательского интерфейса (JavaScript код, написанный посредством библиотеки React).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работу пробной версии приложения можно посмотреть по адресу: <http://mpdroot.jinr.ru> -> software -> Event Display (или <http://mpd-eventdisplay.jinr.ru>).

Данная технология трехмерной визуализации событий практически впервые используется в экспериментах физики высоких энергий и имеет многообещающие перспективы.

Работоспособность MPD EDS проверена на всех основных платформах и браузерах, в том числе и на мобильных устройствах.

Время обработки и визуализации событий размером превышающих 10 МВ составляет не более 1 секунды, а это значит, что данную технологию можно будет использовать в режиме онлайн для мониторинга работы детектора.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Jiang Zhu Event Display in the JUNO Experiment /Zhengyun You, Yumei Zhang // Journal of Physics: Conf. Series 1085 – 2018 – 032038.
2. Loïc Q., Vincent R. FROG: The Fast & Realistic OpenGL Displayer // Journal of Physics: Conf. Series 219 – 2010 – 042049.
3. Sissakian, A.N. The Multipurpose Detector (MPD) to study Heavy Ion Collisions at NICA (Conceptual Design Report) v1.4 /A.N. Sissakian, A.S. Sorin, V.D. Kekelidzeб etc. – Электрон. текст. дан. – Дубна, 2007 Режим доступа: [http://mpdroot.jinr.ru/wp-content/uploads/2020/01/MPD\\_CDR\\_en.pdf](http://mpdroot.jinr.ru/wp-content/uploads/2020/01/MPD_CDR_en.pdf)
4. Chernenko, S. Time Projection Chamber for Multi-Purpose Detector at NICA, Technical Design Report (rev.07) /F.Levchanovsky, Yu.Zanevsky, etc – Электрон. текстовые дан. – Дубна, 2018 Режим доступа: <http://mpdroot.jinr.ru/wp-content/uploads/2020/01/ТрcТdr-v07.pdf>
5. Babkin, V.A. MPD NICA Technical Design Report of the Time of Flight System (TOF) /S.N. Bazylev, M.G. Buryakov etc. – Электрон. текстовые дан. – Дубна, 2018 Режим доступа: [http://mpdroot.jinr.ru/wp-content/uploads/2020/01/TDR\\_TOF\\_MPD\\_v3\\_0-08\\_11\\_2018.docx](http://mpdroot.jinr.ru/wp-content/uploads/2020/01/TDR_TOF_MPD_v3_0-08_11_2018.docx)
6. MPD NICA Technical Design Report of the Electromagnetic calorimeter (ECal) – Электрон. текстовые дан. – Дубна, 2018 Режим доступа: [http://mpdroot.jinr.ru/wp-content/uploads/2020/01/TDR\\_ECAL\\_v3.6\\_2019.pdf](http://mpdroot.jinr.ru/wp-content/uploads/2020/01/TDR_ECAL_v3.6_2019.pdf)
7. Golubeva, M. MPD NICA Technical Design Report of the Forward Hadron Calorimeter (ECal) /F. Guber, A. Ivashkin etc. – Электрон. текстовые дан. – Дубна, 2018 Режим доступа: [http://mpdroot.jinr.ru/wp-content/uploads/2020/01/MPD\\_TDR\\_FHCal\\_28\\_05\\_2018.pdf](http://mpdroot.jinr.ru/wp-content/uploads/2020/01/MPD_TDR_FHCal_28_05_2018.pdf)
8. I. Arsene et al. Quark gluon plasma and color glass condensate at RHIC. The Perspective from the BRAHMS experiment //Nuclear Physics. 2005. A757. P. 1-28.

9. J. Adams et al. Experimental and theoretical challenges in the search for the quark gluon plasma: The STAR Collaboration's critical assessment of the evidence from RHIC collisions //Nuclear Physics. 2005. A757. P. 102-201.
10. Bianchi, R.M. Event visualization in ATLAS /J.Boudreau, N.Konstantinidis etc. //Journal of Physics: Conf. Series 898 – 2017 – 072014.
11. McCauley, T. A browser-based event display for the CMS Experiment at the LHC using WebGL // Journal of Physics: Conf. Series 898 – 2017 – 072030.
12. Kovalskyi, D. Fireworks: A Physics Event Display for CMS /M. Tadel, A. Mrak-Tadel etc. // Journal of Physics: Conference Series 219 – 2010 – 032014.
13. Коичи, М. WebGL: программирование трехмерной графики / М. Коичи, Л. Роджер; перевод с английского А. Н. Киселев. — Москва: ДМК Пресс, 2015. — 494 с. — ISBN 978-5-97060-146-4.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1 Параметры время-проекционной камеры (TPC) [4]

Item	Dimension
Length of the TPC	340 cm
Outer radius of vessel	140 cm
Inner radius of vessel	27 cm
Outer radius of the drift volume	133 cm
Inner radius of the drift volume	34 cm
Length of the drift volume	163 cm (of each half)
Electric field strength	~ 140 V/cm
Magnetic field strength	0.5 Tesla
Drift gas	90% Ar + 10% Methane
Gas amplification factor	~ 10 <sup>4</sup>
Drift velocity	5.45 cm/μs
Drift time	< 30 μs
Temperature stability	< 0.5 °C
Number of readout chambers	24 (12 per each end-plate)
Segmentation in φ	30°
Pad size	5x12 mm <sup>2</sup> and 5x18 mm <sup>2</sup>
Number of pads	97232
Pad raw numbers	53
Zero suppression	Up to 90%
Maximal event rate	< 7 kHz (Lum. 10 <sup>27</sup> )
Electronics shaping time	~ 180-190 ns
Signal-to-noise ration	30:1
Signal dynamical range	10 bits
Sampling rate	10 MHz
Sampling depth	310 time buckets
Two-track resolution	~ 1 cm

Приложение 2 Параметры MRPC времяпролетной системы (TOF) [5]

<b>Name of material or component</b>	<b>Dimensions</b>
Aramide honeycomb panel	640x300x5 mm <sup>3</sup>
Fiberglass PCB with strips (inner)	645x330x2 mm <sup>3</sup>
Fiberglass PCB without strips (outer)	645x330x2 mm <sup>3</sup>
Float glass (inner)	640x300x0.27 mm <sup>3</sup>
(outer)	640x300x0.4 mm <sup>3</sup>
Monofilament fishing line	∅ 0.2 mm
PET screws with nuts	M5 x 20 mm
Mylar sheets	640x300x0.1 mm <sup>3</sup>
Kapton adhesive tape	10 mm width
Copper adhesive tape	10 mm width
Double-sided adhesive tape	20-30 mm width
Special conductive paint	none
Twisted pair cable 3M (16 pairs)	0.25 m
Teflon coated wire	0.35 mm <sup>2</sup>

Приложение 3 Параметры электромагнитного калориметра (ECal) [6]

<b>Parameters</b>	
Maximum transverse dimensions of the tower, mm <sup>2</sup>	40x40
Maximum transverse dimensions of the module, mm <sup>2</sup>	80x320
Numbers of layers	219 ÷ 221
Paint free lead absorber thickness, mm	0.3
Paint lead absorber thickness, mm	0.4
Thickness of scintillator plate, mm	1.5
Effective radiation length, mm	32.4
Moliere radius, mm	62
Radiation length, X <sub>0</sub>	11.8