



Отделение Физики Высоких Энергий

НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ



Триггерная система эксперимента MPD на ускорителе NICA

Дмитрий Александрович Иванищев
ЛРЯФ

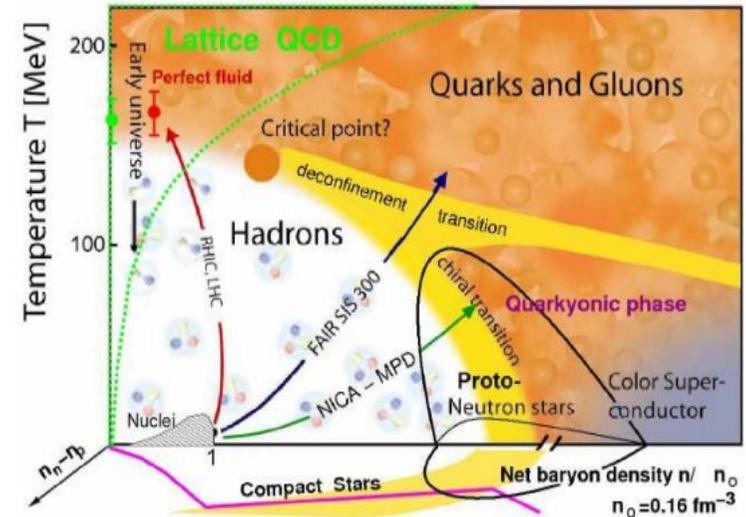
Семинар ОФВЭ
26 марта 2024 г.

План семинара

- Триггерная система эксперимента MPD
- Исследование возможностей триггерной системы эксперимента MPD для работы в столкновениях тяжелых и легких ядер при энергиях коллайдера NICA
- Заключение

Триггерная система эксперимента MPD

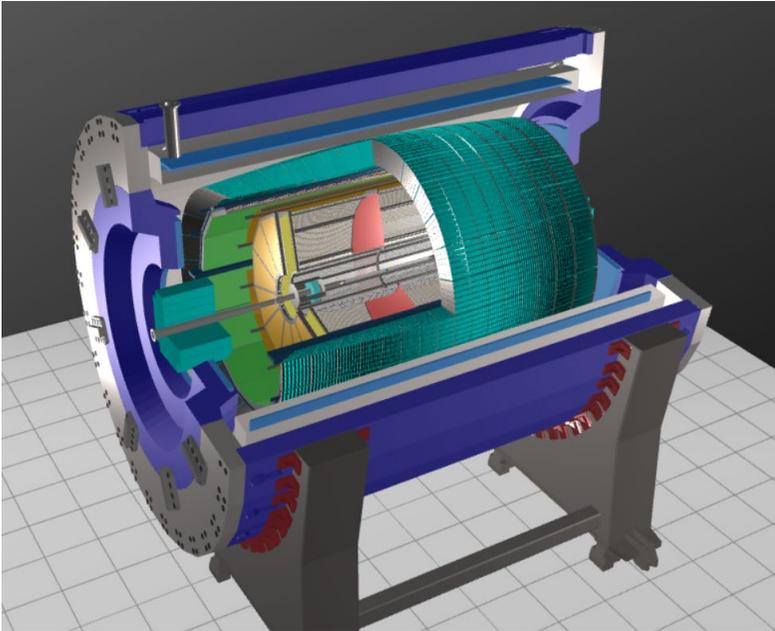
Ускоритель NICA



- Мегасайенс-проект «Комплекс NICA», г. Дубна, ОИЯИ
- Проектные параметры:
 - ✓ релятивистские ионы вплоть до ядер Au с энергией $\sqrt{s_{NN}} = 4-11$ ГэВ
 - ✓ светимость $10^{27} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$, частота столкновений 50 Гц – 7 кГц
- Оптимистичные параметры к запуску 2025 г:
 - ✓ Bi+Bi / Xe+Xe с энергией $\sqrt{s_{NN}} = 7$ ГэВ
 - ✓ неоптимальная оптика → широкое распределение z-вершины ($\sigma_z \sim 50$ см)
 - ✓ светимость ($\sim 10^{25}$), частота столкновений ~ 50 Гц
- Работающий эксперимент: BM@N
- Строящиеся эксперименты: MPD и SPD

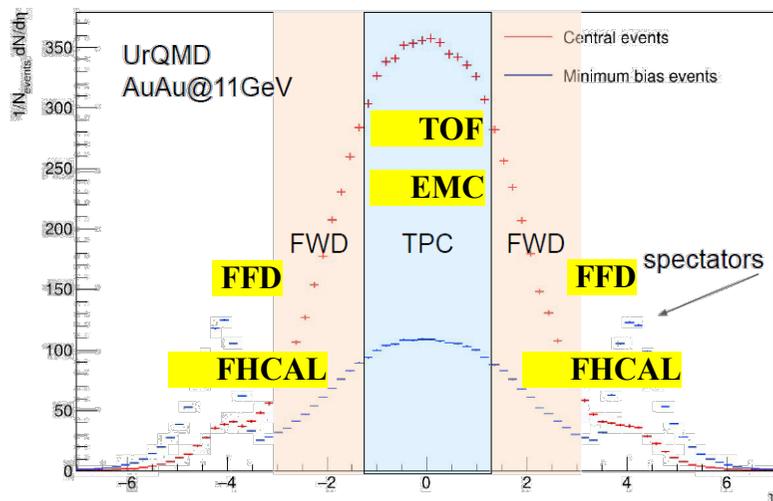
- Изучение фазовой диаграммы в области высоких барионных плотностей и умеренных температур
- Расширение программ по исследованию столкновений тяжёлых релятивистских ядер на LHC и RHIC в область малых энергий

Эксперимент MPD на ускорителе NICA

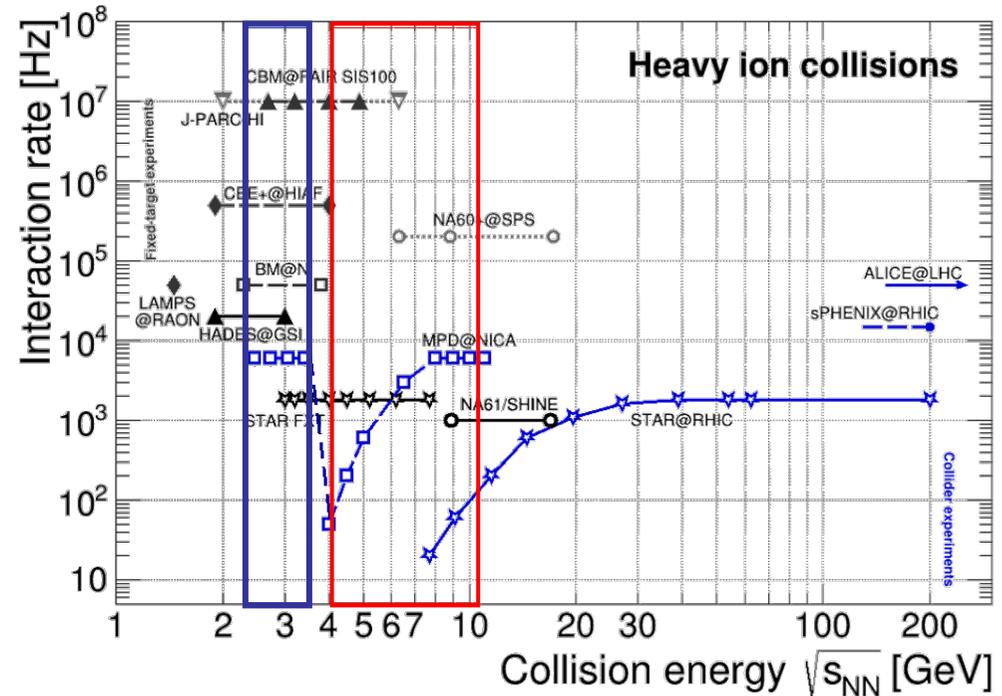
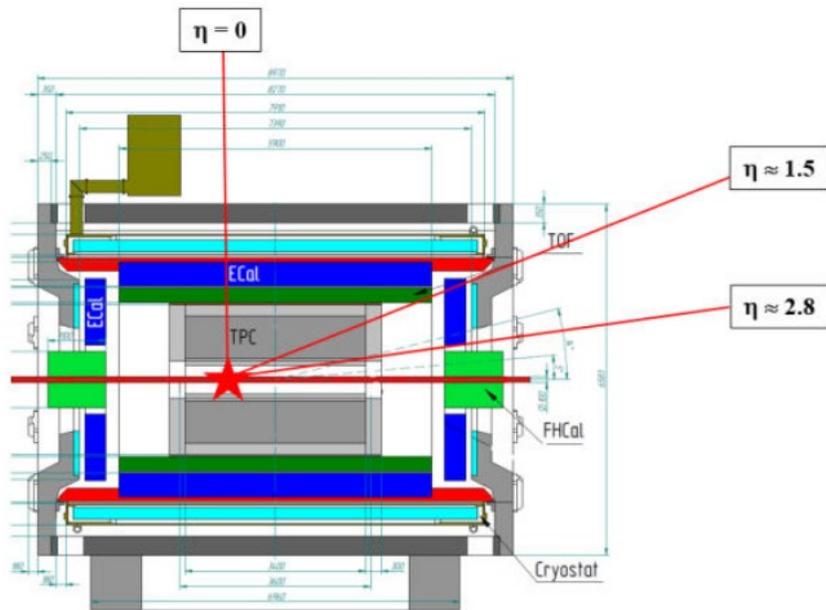


- 4π спектрометр (заряженные адроны, электроны и фотоны)
- Длина 340 см, внешний радиус 140, внутренний радиус 27 см
- Максимальная множественность заряженных частиц ~ 1000
- Сверхпроводящий магнит, однородное магнитное поле 0,5 Тл
- ТРС ($|\Delta\phi| < 2\pi$, $|\eta| \leq 1,6$): измерение треков заряженных частиц + измерение импульса + идентификация по dE/dx . Газовая смесь 90% Ar + 10% CH₄ (2 мбар)
- ТОФ $|\Delta\phi| < 2\pi$, $|\eta| \leq 1,4$: идентификация заряженных частиц по m^2/β
- ЕМС $|\Delta\phi| < 2\pi$, $|\eta| \leq 1,4$: измерение энергии и идентификация γ/e^\pm + идентификация заряженных частиц (частичная)
- FFD $|\Delta\phi| < 2\pi$, $2,7 < |\eta| < 4,1$ FHCAL $|\Delta\phi| < 2\pi$, $2 < |\eta| < 5$: отбор столкновений, геометрия столкновения, T_0
- Этап 2: ITS + форвардный детектор
- Система сбора данных: с триггерной системой, максимум 7кГц и 6,5 ГБ/с

Pseudorapidity coverage



Режимы работы NICA: коллайдерный и с фиксированной мишенью

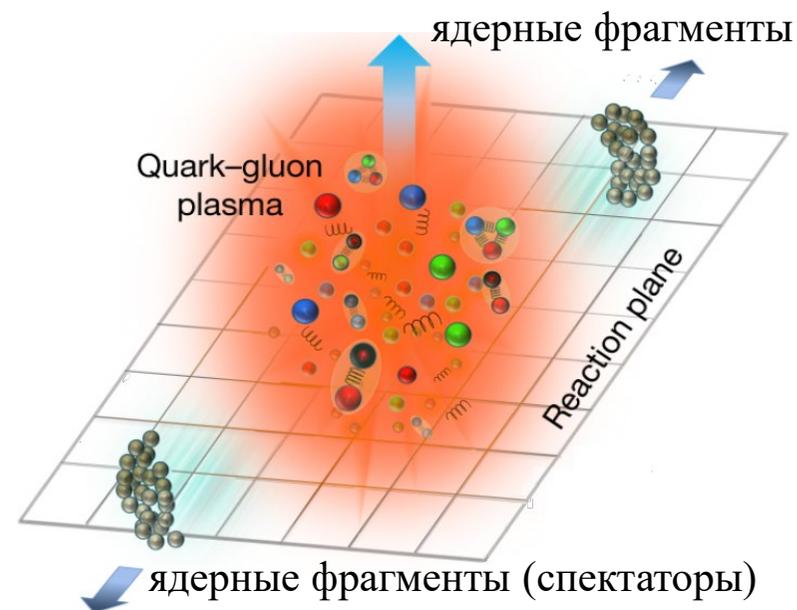


Два режима работы:

- С фиксированной мишенью (один пучок + мишень, например тонкая проволока Cu, Sn, W \sim 100 мкм):
 - ✓ основной вариант на первые годы до приведения характеристик NICA к проектным
 - ✓ расширяет область энергий столкновений для MPD до $\sqrt{s_{NN}} = 2,4 - 3,5$ ГэВ (пересечение с HADES, BM@N и CBM)
 - ✓ решает проблему с низкой частотой столкновений при малых энергиях и светимостях (~ 50 Hz для Au+Au при $\sqrt{s_{NN}} = 4$ ГэВ и проектной светимости)
- Встречные пучки. Столкновения тяжелых ядер Bi+Bi / Xe+Xe с энергией $\sqrt{s_{NN}} = 7$ ГэВ в первые годы

Роль триггерной системы

- Триггерная система – система отбора событий, триггер – пусковое устройство
- Задача: Эффективный отбор событий исследуемого процесса и подавление фоновых событий
- Характеристики:
 - ✓ быстрая принятие решения
 - ✓ возможность изменения критериев отбора событий
 - ✓ возможность отбора событий по разным критериям одновременно
- Minimum bias триггер (minimum bias):
 - ✓ отбор неупругих ядерных столкновений
 - ✓ фоновые процессы – шумы, специфичные для детекторов и электроники, космическое излучение, естественная и наведенная радиоактивность, гало пучка, взаимодействие пучка с газом и т.д.
 - ✓ отбор путем регистрации фотонов, ядерных фрагментов и т.д. в передней области, множественности заряженных частиц, заряженных частиц, фотонов и т.д. в центральной области.
 - ✓ измерение T_0 , z-вершины, геометрии столкновения. Быстрые детекторы, $\Delta T < 7-120$ пс

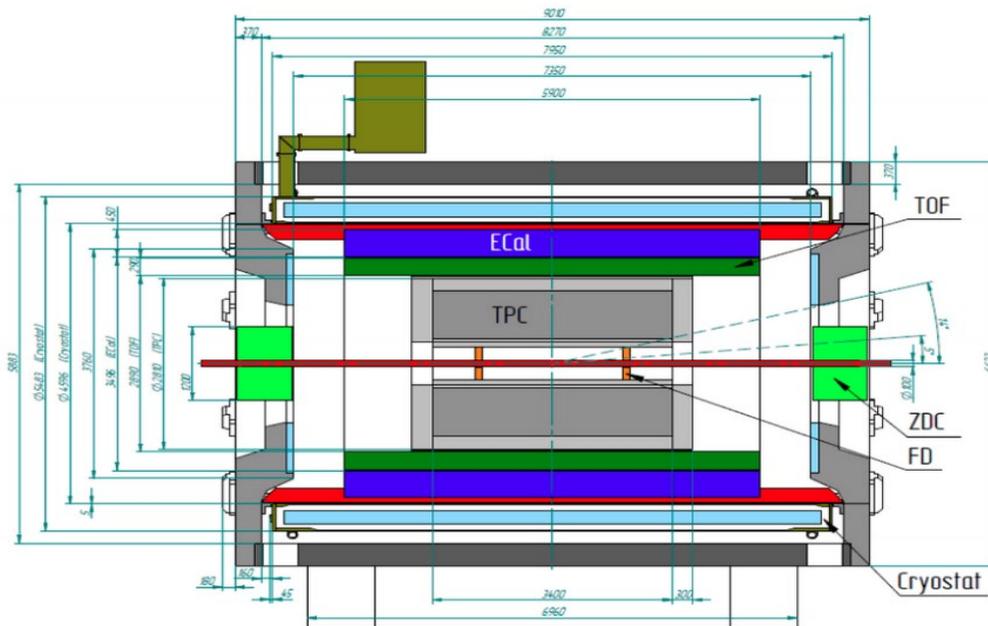


- Особые триггеры:
 - ✓ отбираются столкновения с особыми редкими физическими процессами из выборки с минимальным смещением по сигналам исследуемого процесса (особые лептоны, фотоны, адроны, барионы и их комбинации и т.д.). Необходима идентификация частицы, измерение импульса, энергии и т.д.

Особенности построения триггерной системы MPD

Особенности столкновений на NICA:

- Малая множественность ~ 1000 на событие ($\text{Au}+\text{Au}$ $\sqrt{s_{NN}}=11$ ГэВ)
- Большинство заряженных частиц не релятивистские
- Особые требования к детекторам передней области
- Частота столкновений 50 Гц – 7 кГц



MPD Триггерные подсистемы

FFD: $|\Delta\phi| < 2\pi$, $2,7 < |\eta| < 4,1$

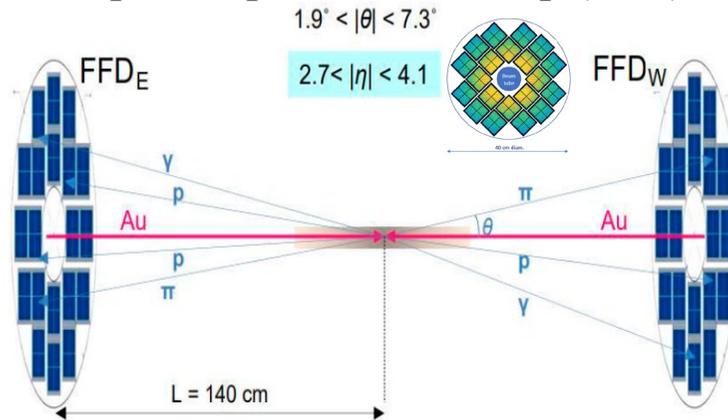
FHCAL: $|\Delta\phi| < 2\pi$, $2 < |\eta| < 5$

TOF: $|\Delta\phi| < 2\pi$, $|\eta| \leq 1,4$

- Достаточны быстры
- Оснащены подходящей электроникой
- Покрывают различные области псевдобыстрот
- Измеряют разные сигналы
- Дополняют друг друга

Детекторы триггерной системы, FFD

Быстрый передний детектор (FFD)



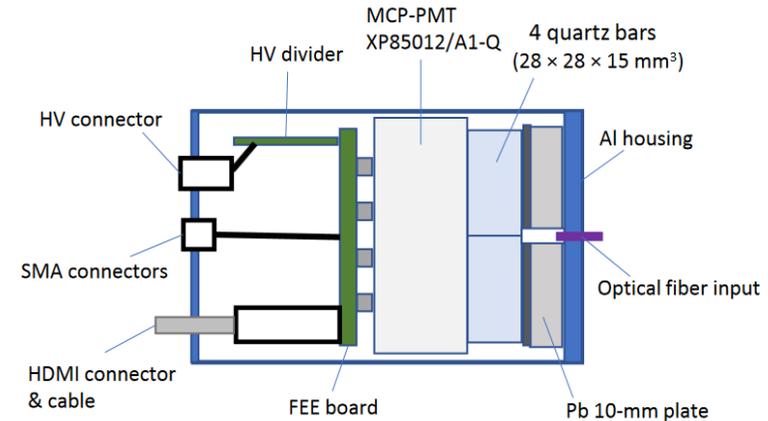
FFD: $|\Delta\phi| < 2\pi$, $2,7 < |\eta| < 4,1$

$$T_0 = (T_{\text{FFDB}} + T_{\text{FFD3}}) / 2 - L/c$$

$$z\text{-вершины} = (T_{\text{FFD3}} - T_{\text{FFDB}}) / 2 \times c$$

- 2×20 (черенковских модулей) × 4 (канала) = 2×80 каналов
- Регистрирует фотоны и релятивистские заряженные частицы
- Измеряет T_0 для TOF и EMC
- Измеряет z-вершину
- Проектное временное разрешение ≤ 50 пс (временное разрешение TOF ≤ 60 пс)
- Разрешение z-вершины ~ 2 см

Concept

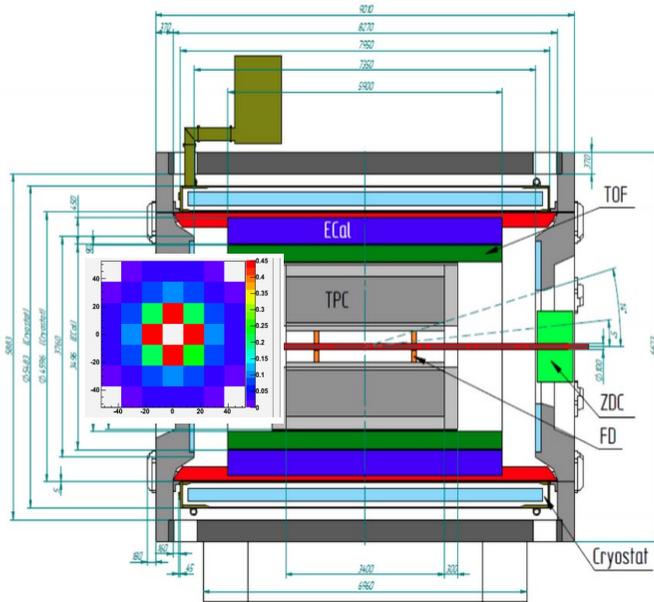


- Установлены свинцовые пластины конвертеры для регистрации фотонов
- Три триггерных сигнала с FFD (T_E , T_W и сигнал обнаружения вершины)

Детекторы триггерной системы, FHCAL

Передний адронный калориметр (FHCAL)

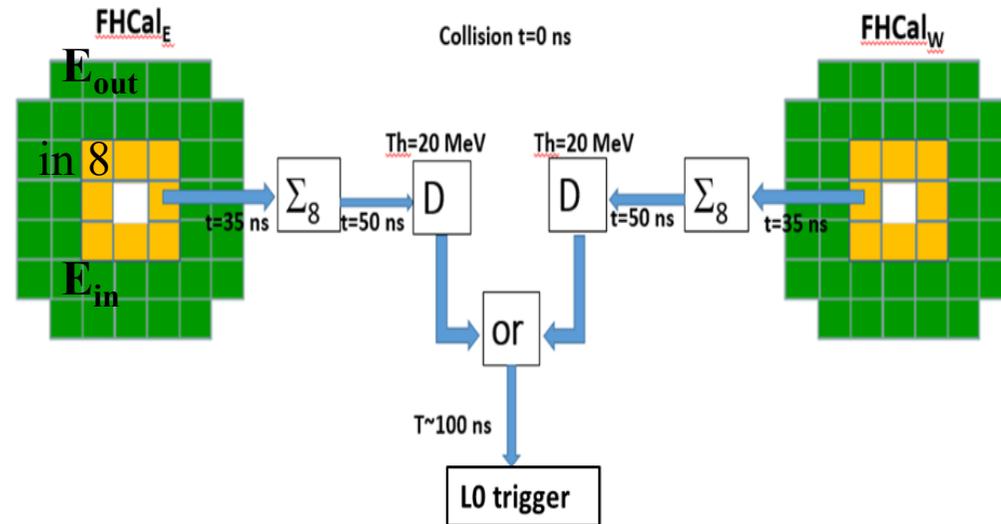
Scheme of FHCAL trigger



FHCAL: $|\Delta\phi| < 2\pi, 2 < |\eta| < 5$

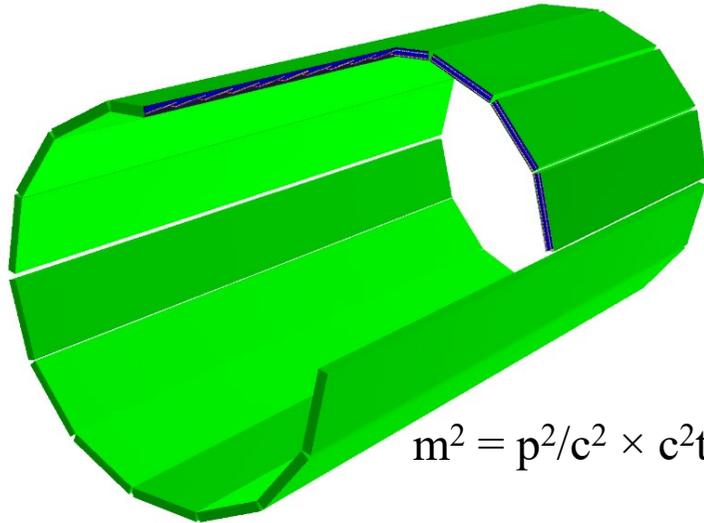
z-вершины = $(T_{\text{FHCAL3}} - T_{\text{FHCALB}})/2 \times c$

- 2x44 калориметрических модулей – многослойная структура перемежающихся слоев свинец/сцинтилятор
- Измерение энергетических и пространственных распределений нуклонов и ядерных фрагментов (спектаторов) – центральность и плоскость реакции
- Временное разрешение $\leq 1,3$ нс
- Разрешение z-вершины ~ 30 см
- Аксептанс $> \text{FDD}$
- Энергетическое разрешение $60\%/\sqrt{E}$



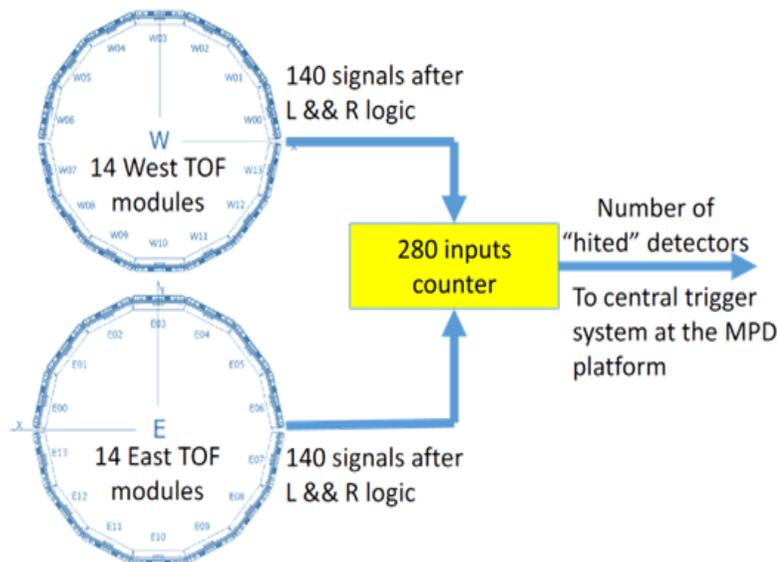
Детекторы триггерной системы, TOF

Время-пролетный детектор (TOF)



$$m^2 = p^2/c^2 \times c^2 t^2 / L^2 - 1$$

TOF: $|\Delta\phi| < 2\pi$, $|\eta| \leq 1,4$



- Классический TOF детектор на основе многозачорных резистивных плоских камер (МРПК)
- 14 (секторов) \times 2(модулей) \times 10 МРПК детекторов = 2 \times 140 МРПК детекторов
- Временное разрешение ≤ 60 пс
- Идентификация пионов/каонов до 1,5 ГэВ/с
- Идентификация (анти)протонов до 3 ГэВ/с
- Триггерный сигнал – число сработавших детекторов

Исследование возможностей триггерной системы эксперимента MPD для работы в столкновениях тяжелых и легких ядер при энергиях коллайдера NICA

Цели работы

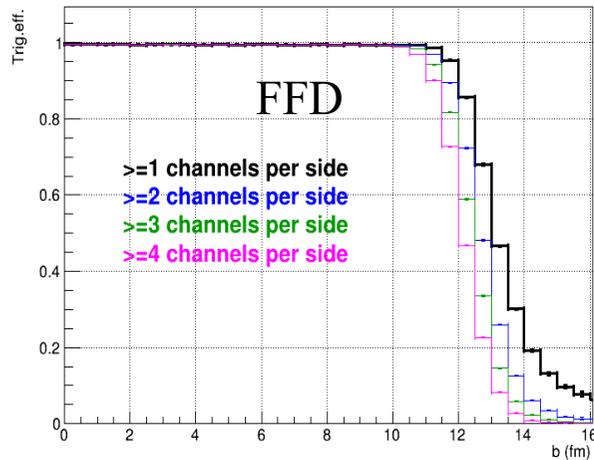
- Оценить эффективность триггерной системы и разрешение определения T_0 и z-вершины для столкновений легких, промежуточных масс и тяжелых ядер в коллайдерном и с фиксированной мишенью режимах при энергиях коллайдера NICA:
 - ✓ пучок Xe + мишень Cu(29,64), Sn(50,119) или W(74,184) при $E_{\text{kin}} = 2,5 \times A$ ГэВ
 - ✓ Xe+Xe(54,131), Bi+Bi(83,209) при $\sqrt{s_{NN}} = 4 - 11$ ГэВ
 - ✓ p+p, p+Bi, C+C(6,12) при $\sqrt{s_{NN}} = 4 - 11$ ГэВ
- Определить оптимальную логику работы триггерной системы
- DCM-QGSM-SMM:
 - ✓ описывает экспериментальные данные NA61
 - ✓ центральная область + больших быстрот
 - ✓ легкие частицы + ядерные фрагменты и гиперфрагменты
- PУТНIA8 для p+p и p+Bi (TOF)
- Прохождение частиц через MPD посредством MPDRoot (GEANT)

Столкновения тяжелых ядер, коллайдерный режим

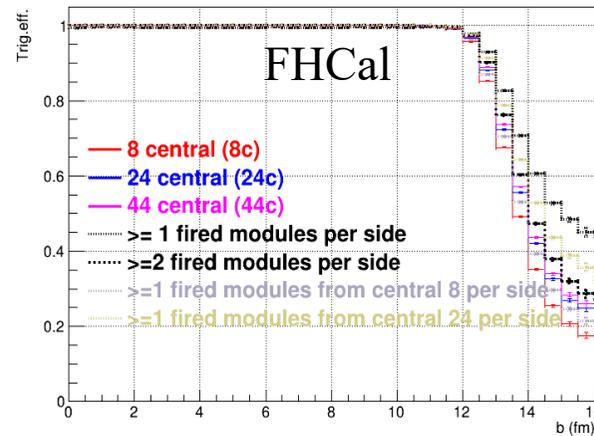
Эффективность Триггера, Vi+Vi 7 ГэВ

Зависимость эффективности триггера от прицельного параметра b (Фм)

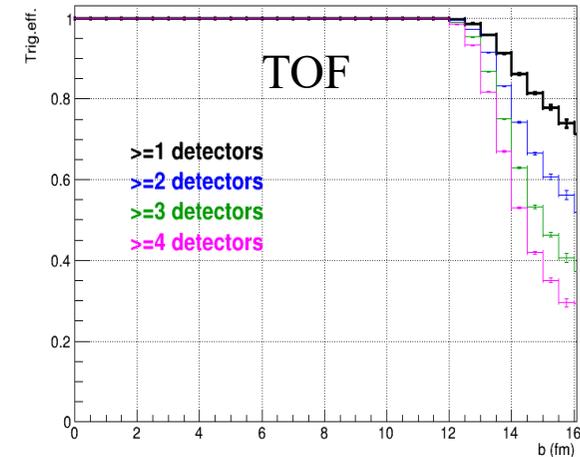
FFD trigger efficiency vs. impact parameter



FHCAL trigger efficiency vs. impact parameter



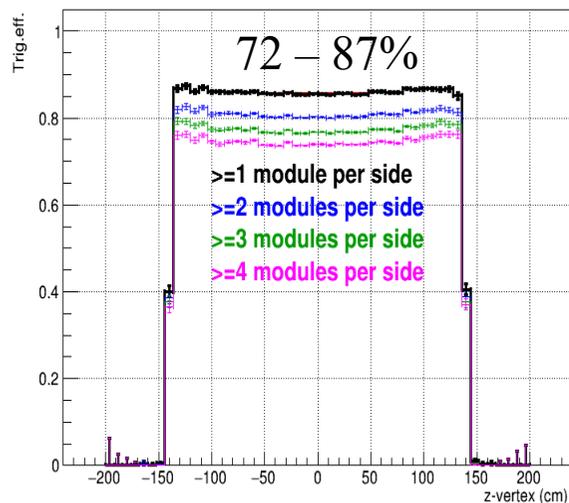
TOF trigger efficiency vs. impact parameter



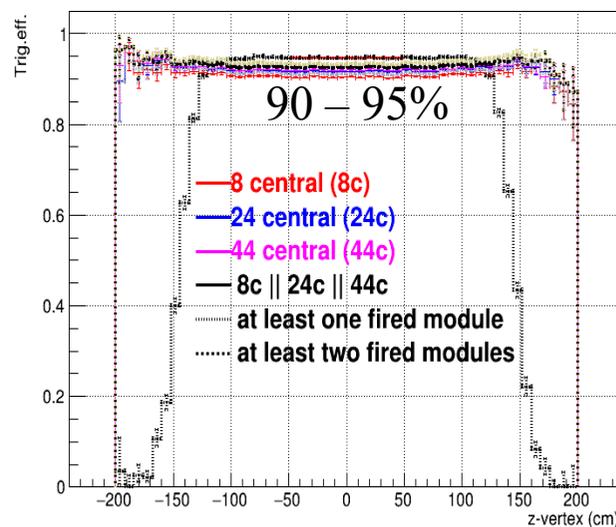
$$\text{Trigg.eff.} = N_{\text{отобр}} / N_{\text{полн}}$$

Зависимость эффективности триггерной системы от z-вершины (см)

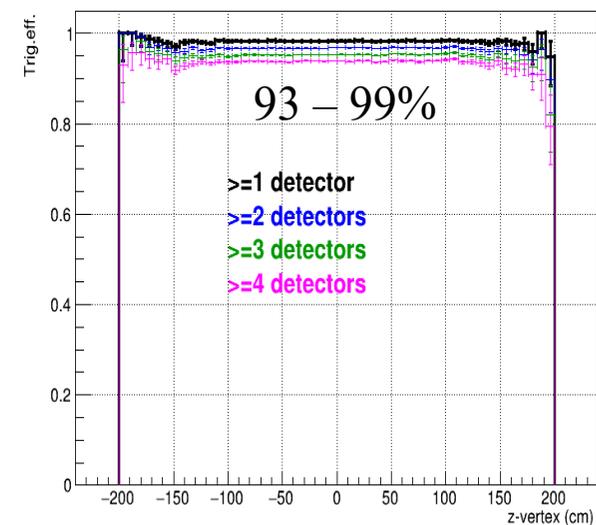
FFD trigger efficiency vs. z-vertex



FHCAL trigger efficiency vs. z-vertex

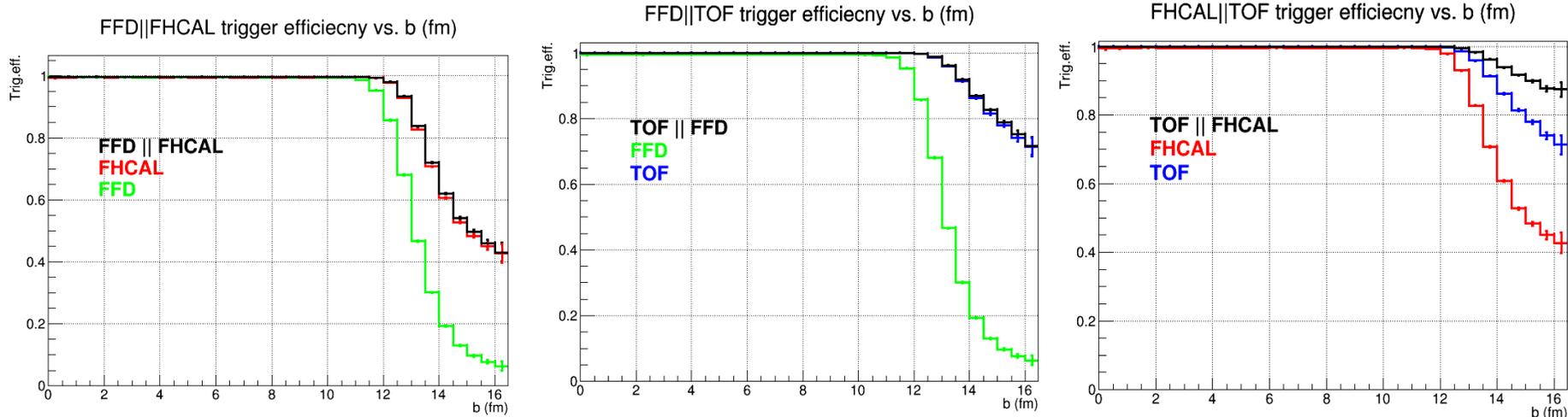


TOF trigger efficiency vs. z-vertex

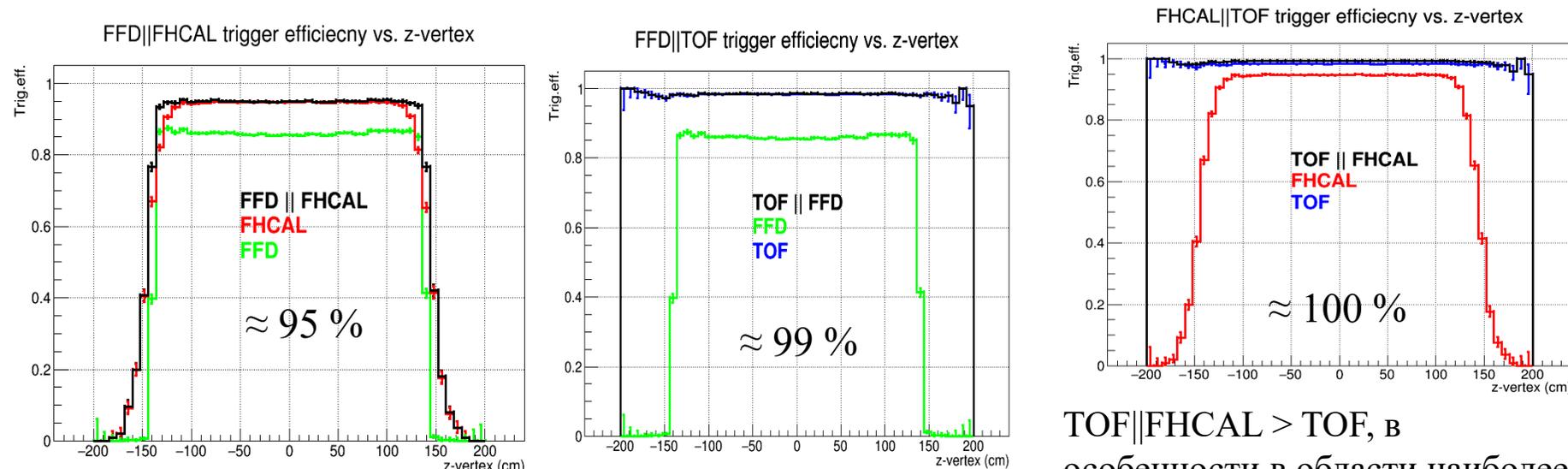


Комбинации триггерных детекторов, V_i+V_i 7 ГэВ

Эффективность триггера в зависимости от прицельного параметра (Φ_m)



Эффективность триггера в зависимости от z-вершины (см)



FFD||FHCAL \sim FHCAL

TOF||FFD \sim FFD

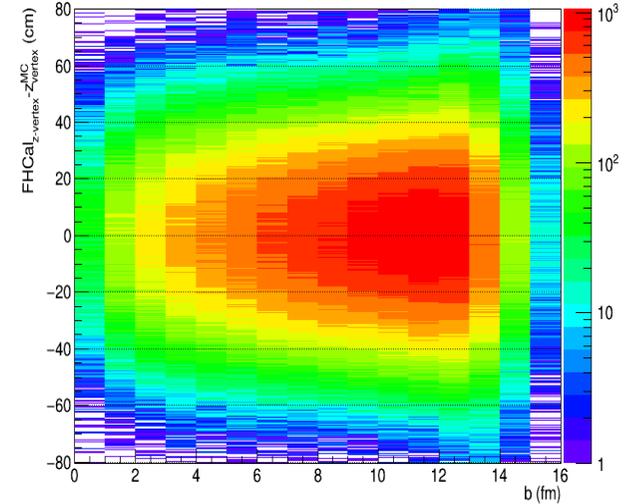
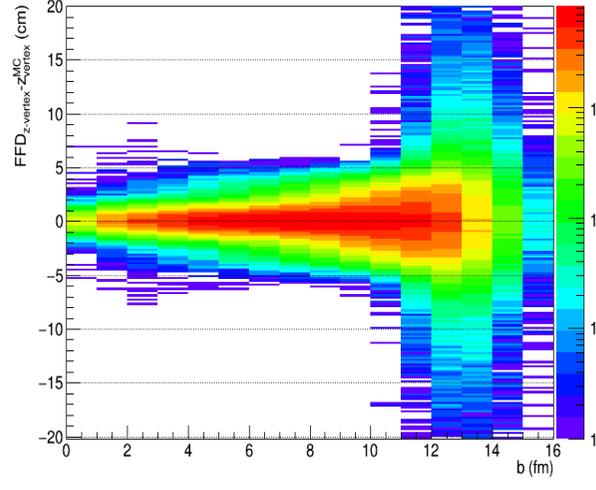
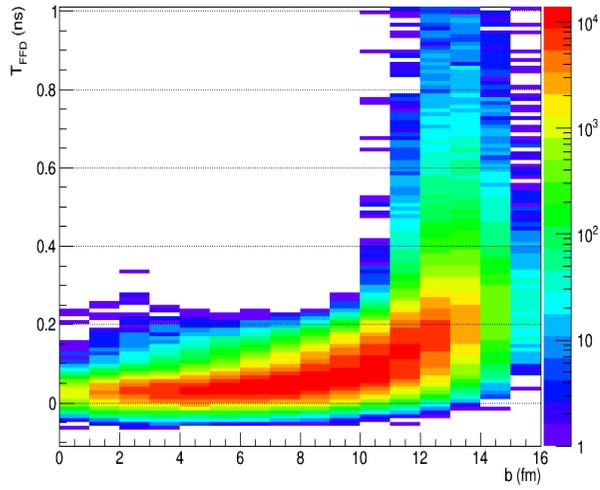
TOF||FHCAL $>$ TOF, в особенности в области наиболее периферийных столкновений

Разрешения T_0 и z-вершины, V_i+V_i 7 ГэВ

FFD, T_0

FFD, z-вершины

FHCal, z-вершины

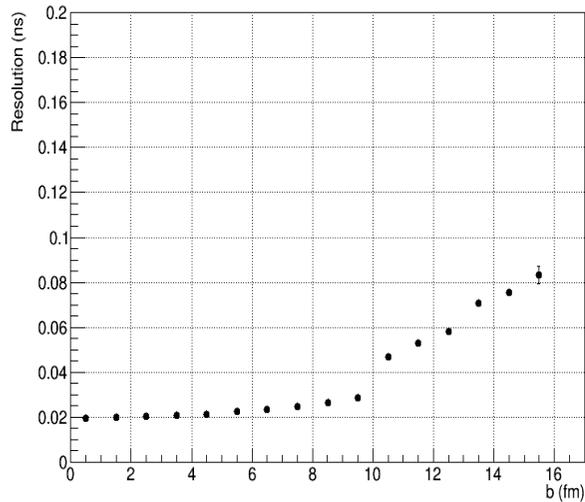


$$T_0 = (T_{FFDB} + T_{FFD3})/2 - L/c$$

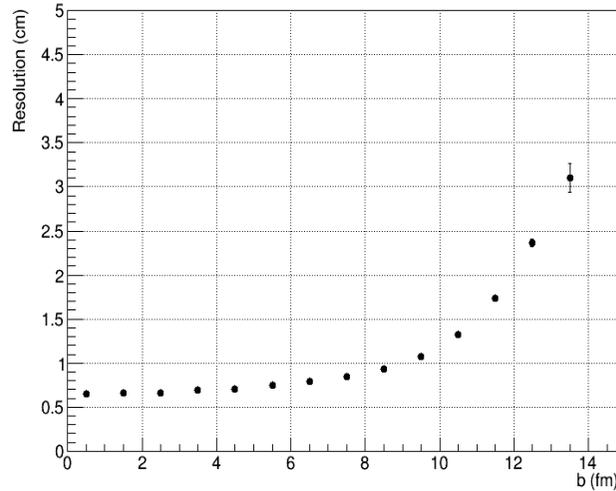
$$z\text{-вершины} = (T_{FFD3} - T_{FFDB})/2 \times c$$

$$z\text{-вершины} = (T_{FHCal3} - T_{FHCalB})/2 \times c$$

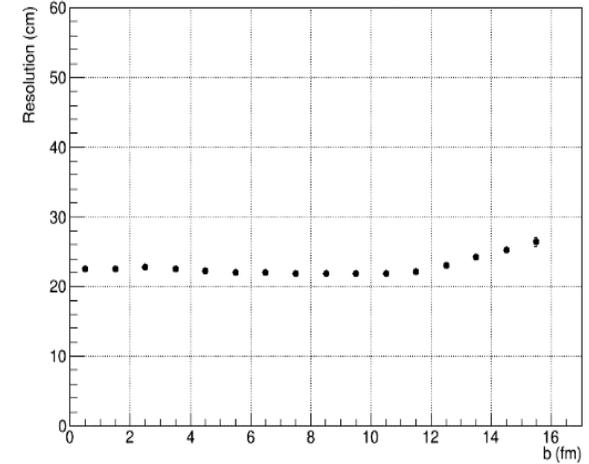
Time resolution



Vertex resolution



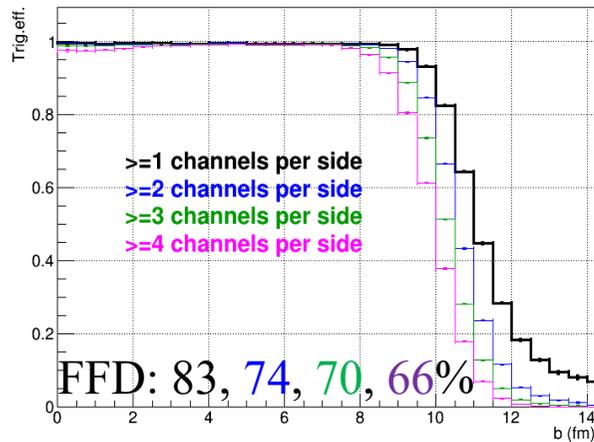
Vertex resolution



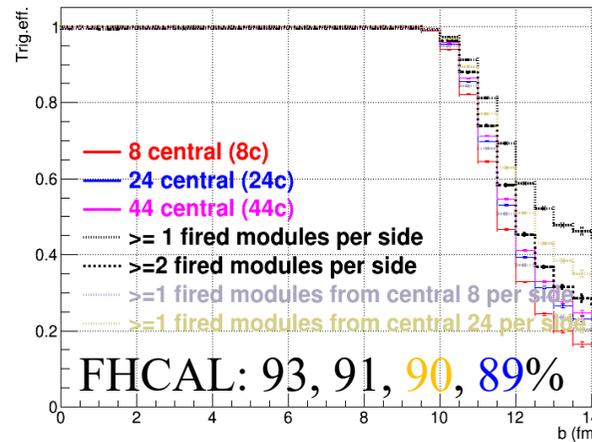
Эффективность Триггера, Хе+Хе 7 ГэВ

Зависимость эффективности триггера от прицельного параметра b (Фм)

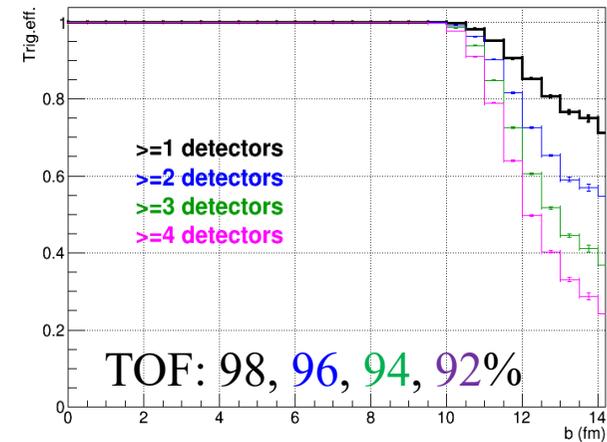
FFD trigger efficiency vs. impact parameter



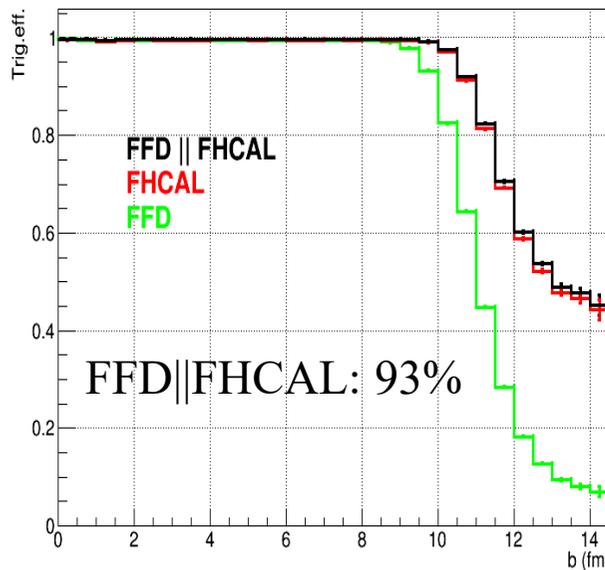
FHCAL trigger efficiency vs. impact parameter



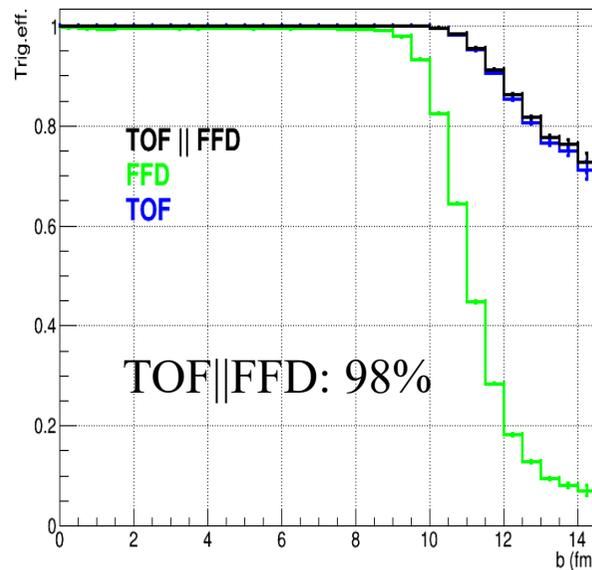
TOF trigger efficiency vs. impact parameter



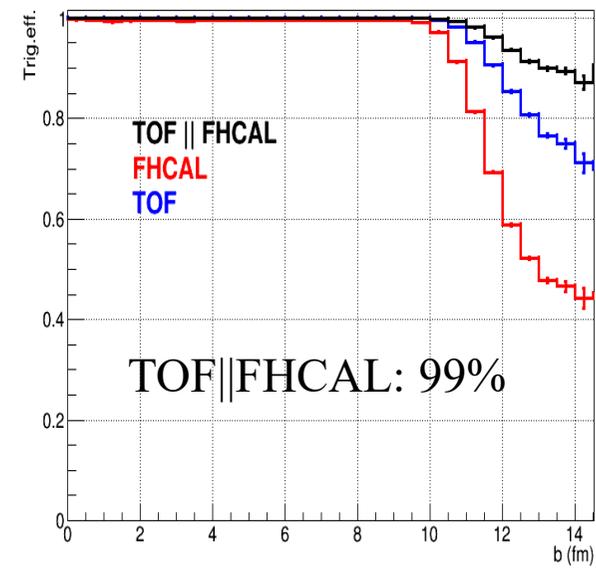
FFD||FHCAL trigger efficiency vs. b (fm)



FFD||TOF trigger efficiency vs. b (fm)



FHCAL||TOF trigger efficiency vs. b (fm)

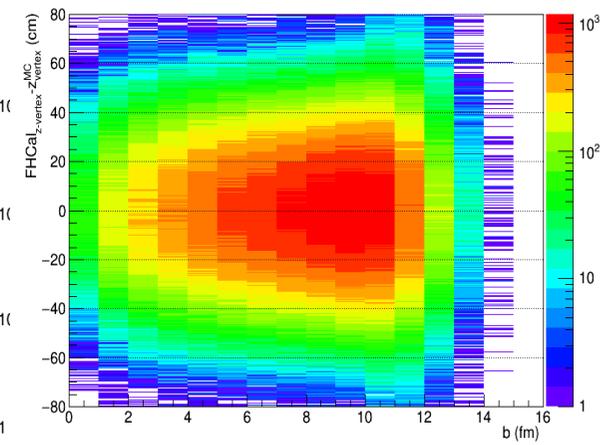
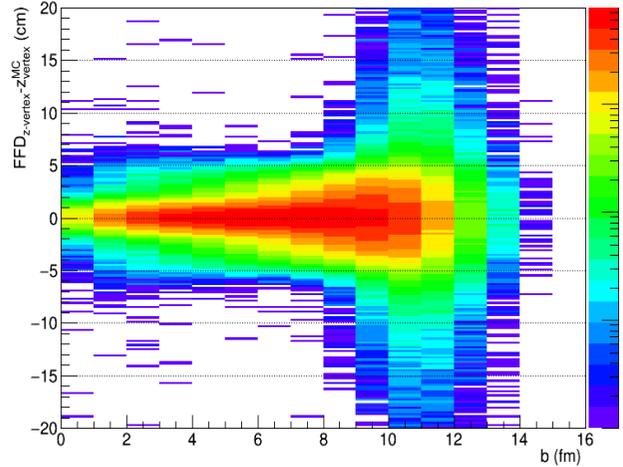
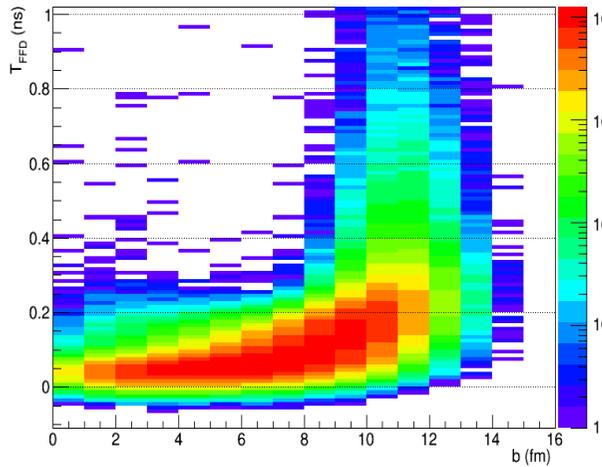


Разрешения T_0 и z-вершины, Xe+Xe 7 ГэВ

FFD, T_0

FFD, z-вершины

FHCal, z-вершины

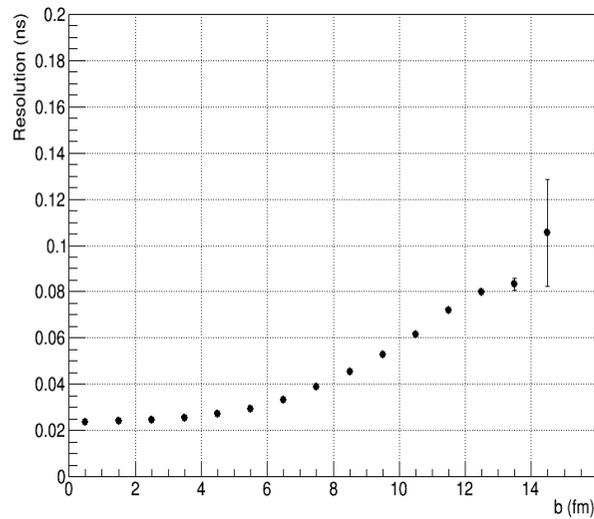


$$T_0 = (T_{FFDB} + T_{FFD3}) / 2 - L/c$$

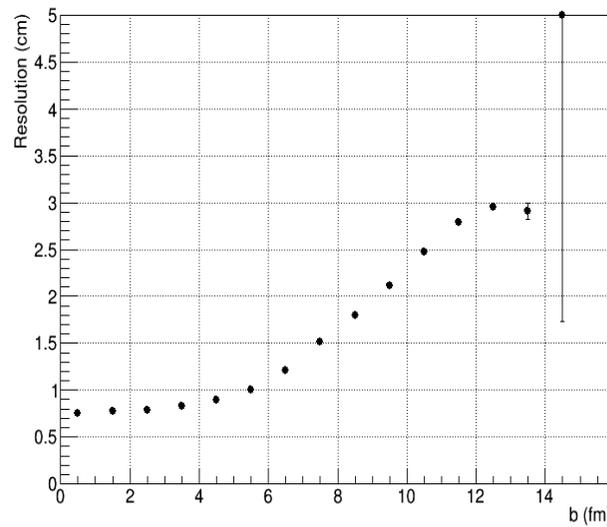
$$z\text{-вершины} = (T_{FFD3} - T_{FFDB}) / 2 \times c$$

$$z\text{-вершины} = (T_{FHCAL3} - T_{FHCALB}) / 2 \times c$$

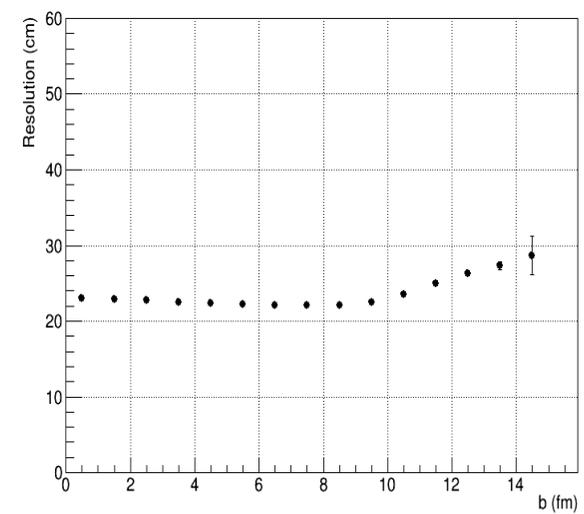
Time resolution



Vertex resolution



Vertex resolution



Выводы

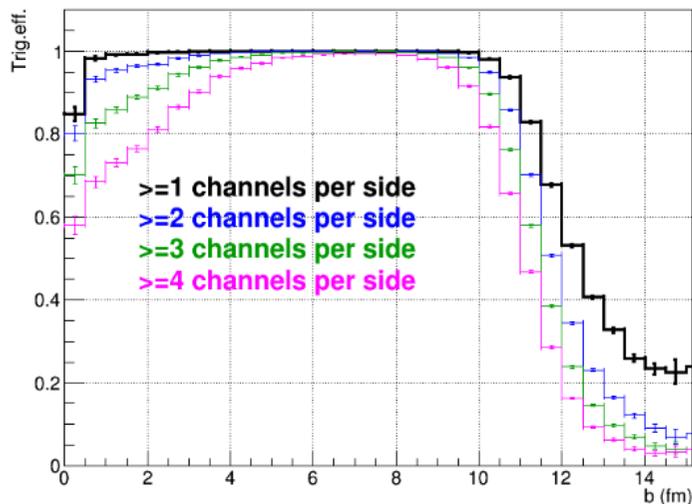
- Отбор столкновения тяжелых ядер ($\text{Bi}+\text{Bi}$, $\text{Xe}+\text{Xe}$) при энергиях $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 4 - 11$ ГэВ возможен с использованием детекторов FFD, FHCAL и TOF и их комбинаций.
- Эффективность TOF (99%) > FFD (81 – 88%) и FHCAL (95%).
- Наибольшая эффективность у TOF||FHCAL – покрывает наибольший аксептанс.
- T_0 может быть измерено с помощью детектора FFD с разрешением лучше 60 пс в зависимости от центральности и сталкивающейся системы.
- Z-вершины может быть измерена с помощью детектора FFD с разрешением лучше 2 см, а также с помощью детектора FHCAL с разрешением 20 – 40 см.

Столкновения тяжелых ядер, фиксированная мишень

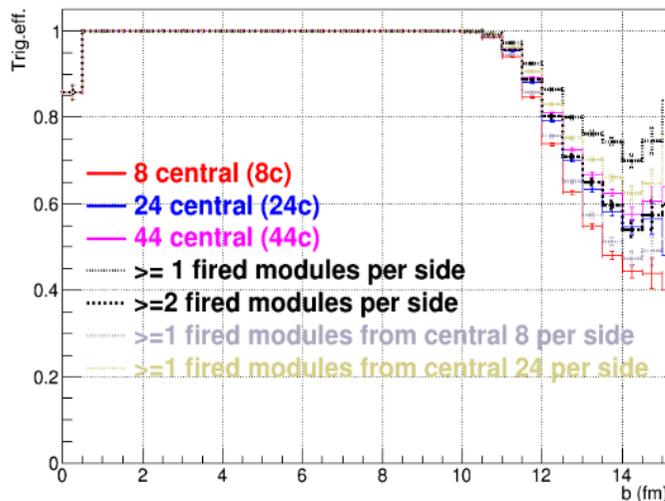
Эффективность Триггера, Xe + W 2,5×A ГэВ

Зависимость эффективности триггера от прицельного параметра b (Фм)

FFD trigger efficiency vs. impact parameter

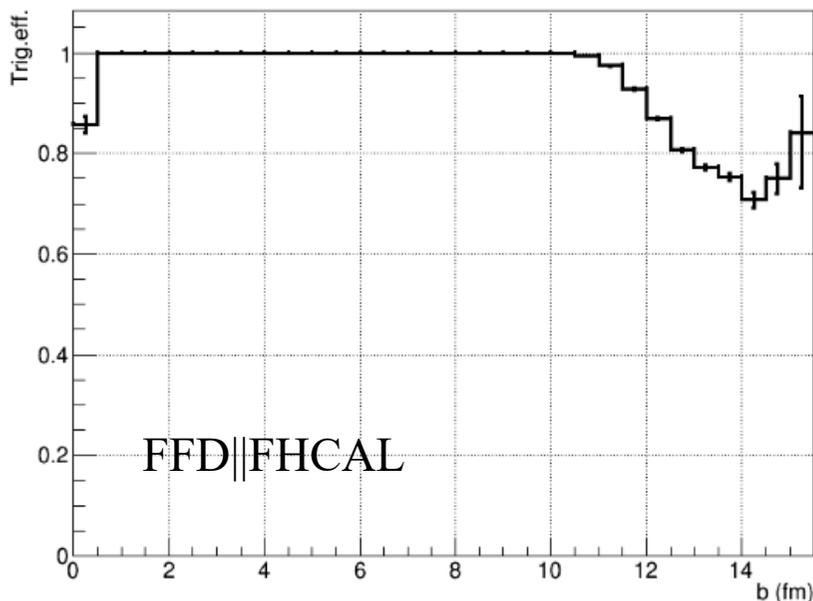


FHCAL trigger efficiency vs. impact parameter

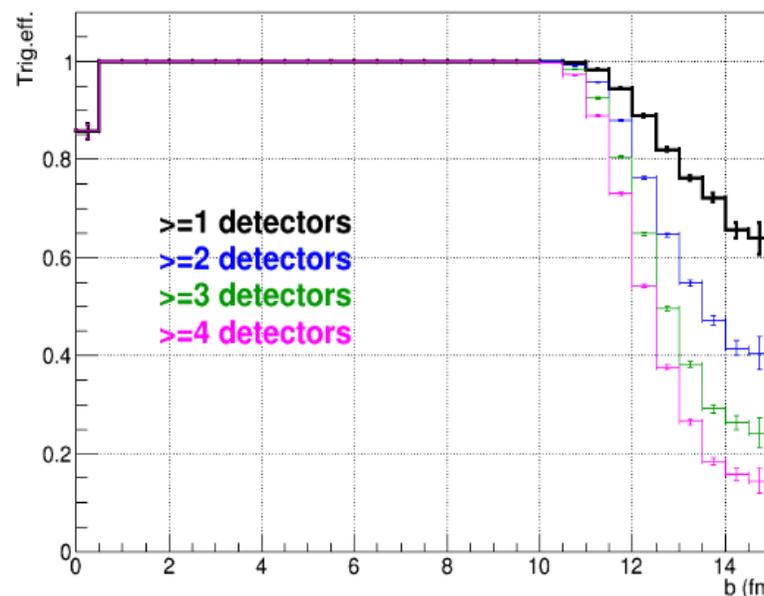


Эффективности:

- FFD: 88, 82, 78, 74%
- FHCAL: 97, 96, 96, 95%
- FFD||FHCAL: 97%
- TOF: 97, 94, 91, 89%



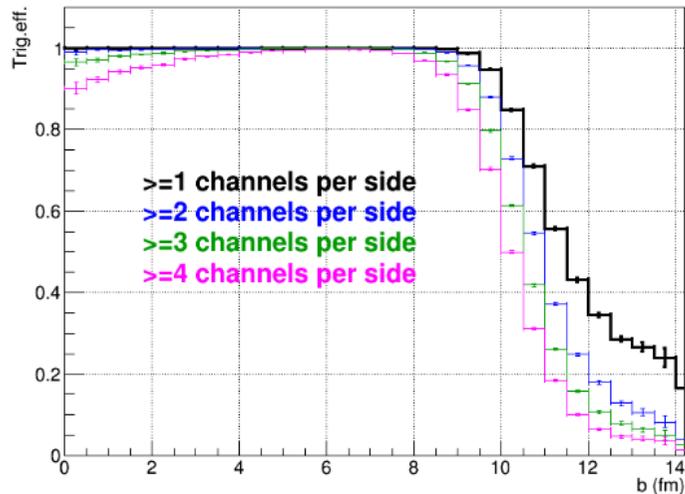
TOF trigger efficiency vs. impact parameter



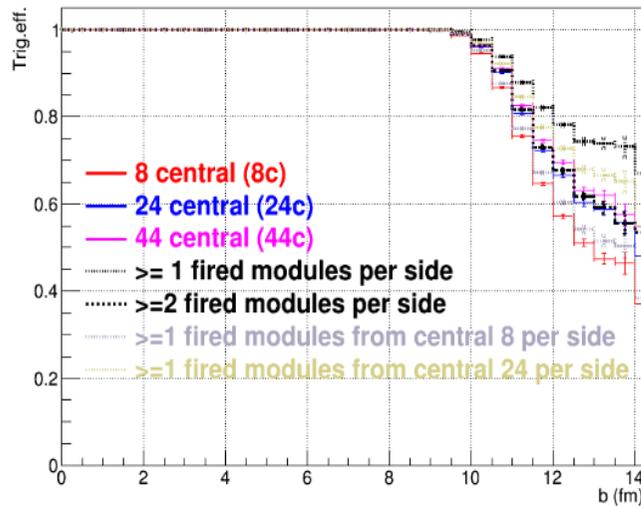
Эффективность Триггера, Хе + Sn, 2,5×А ГэВ

Зависимость эффективности триггера от прицельного параметра b (Фм)

FFD trigger efficiency vs. impact parameter



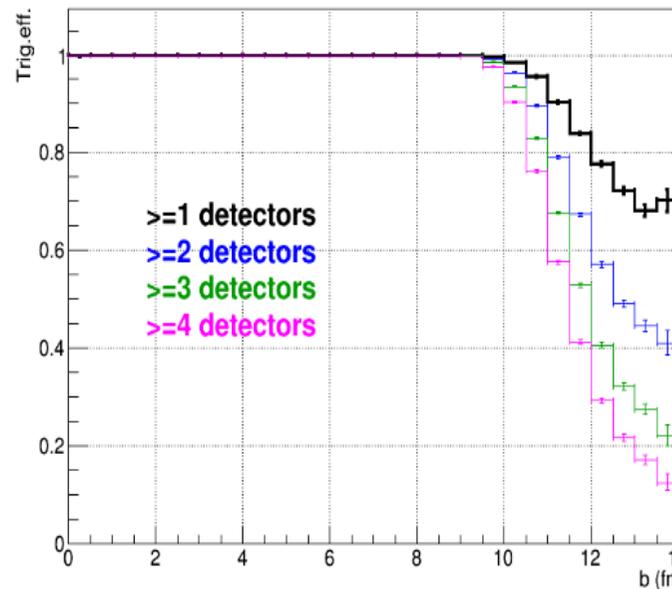
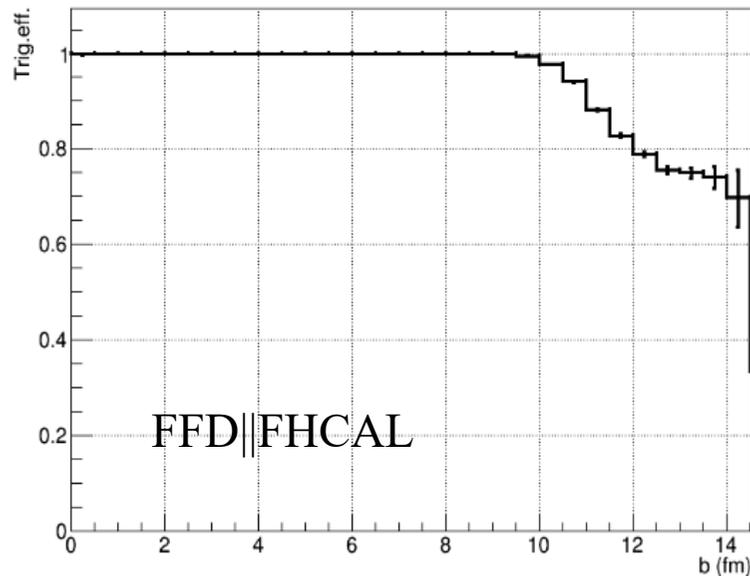
FHCAL trigger efficiency vs. impact parameter



Эффективности:

- FFD: 87, 82, 78, 73%
- FHCAL: 97, 96, 95, 95%
- FFD||FHCAL: 97%
- TOF: 97, 94, 91, 88%

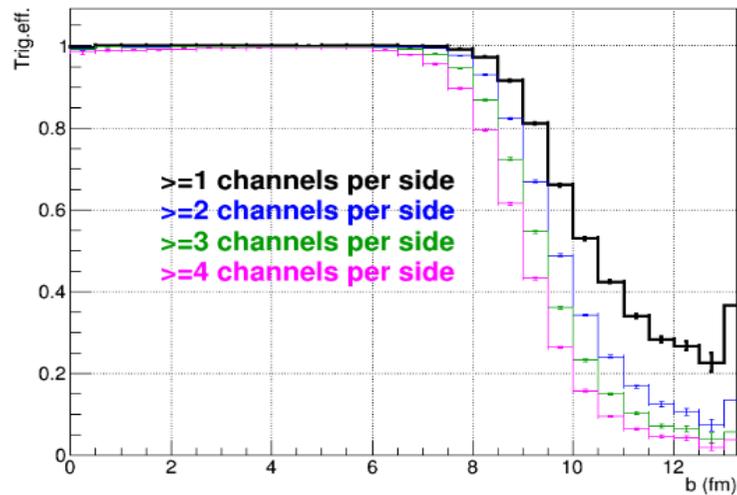
TOF trigger efficiency vs. impact parameter



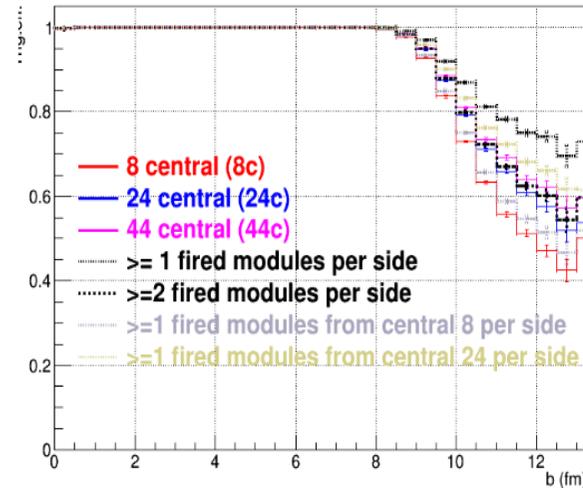
Эффективность Триггера, Хе + Си, 2,5×А ГэВ

Зависимость эффективности триггера от прицельного параметра b (Фм)

FFD trigger efficiency vs. impact parameter

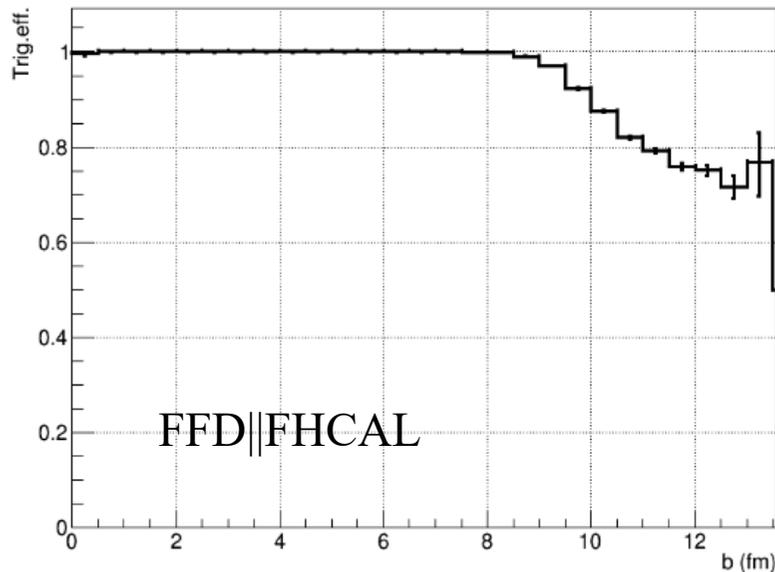


FHCAL trigger efficiency vs. impact parameter

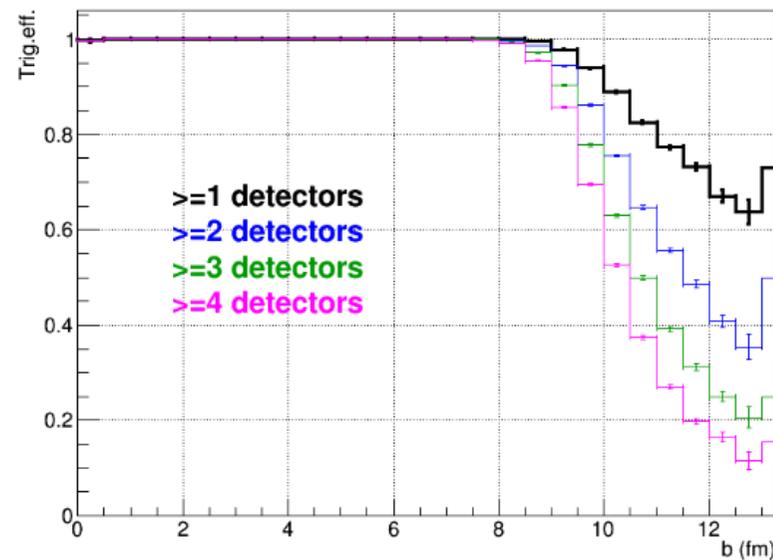


Эффективности:

- FFD: 86, 80, 74, 70%
- FHCAL: 96, 95, 95, 94%
- FFD||FHCAL: 96%
- TOF: 96, 93, 89, 86%



TOF trigger efficiency vs. impact parameter



Выводы

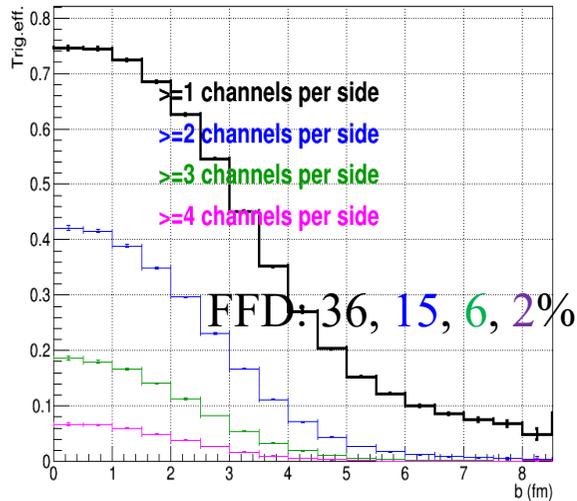
- Отбор столкновения тяжелых ядер в режиме фиксированной мишени (пучок Хе + мишень Cu, Sn или W) при $E_{kin} = 2,5 \times A$ ГэВ возможен с использованием детекторов FFD, FHCAL и TOF и их комбинаций.
- Эффективность TOF (97 – 96%) сопоставима с FHCAL (97 – 96 %) и FFD||FHCAL (97 – 96%) \geq FFD (88 – 86%).
- Измерение осуществляется одной стороной передних детекторов.
- Отбор столкновений будет затруднен фоновыми процессами и требуется дополнительные механизмы их подавления (совпадение с TOF, и т.д.).

Столкновения легких ядер, коллайдерный режим

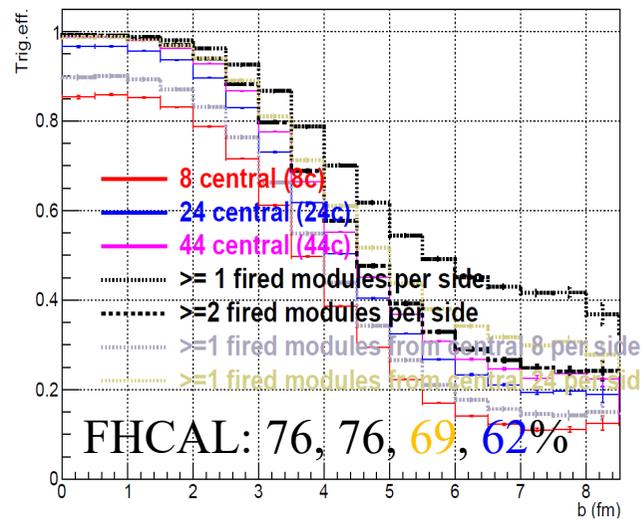
Эффективность Триггера, С+С, 9,2 ГэВ

Зависимость эффективности триггера от прицельного параметра b (Фм)

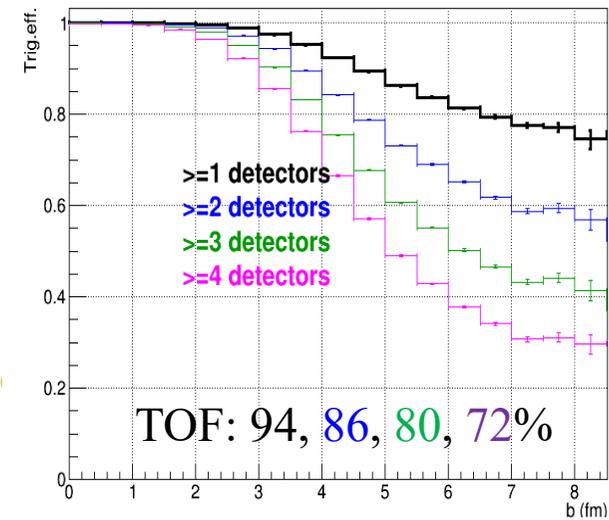
FFD trigger efficiency vs. impact parameter



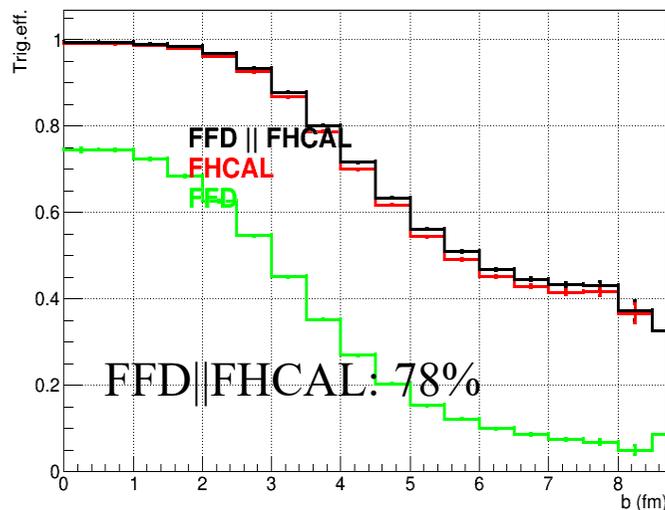
FHCAL trigger efficiency vs. impact parameter



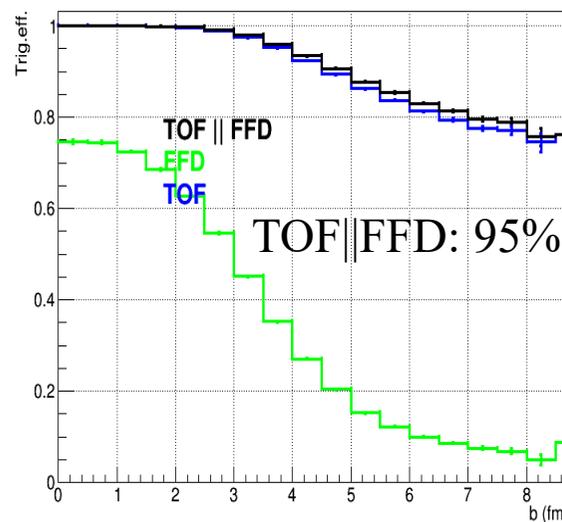
TOF trigger efficiency vs. impact parameter



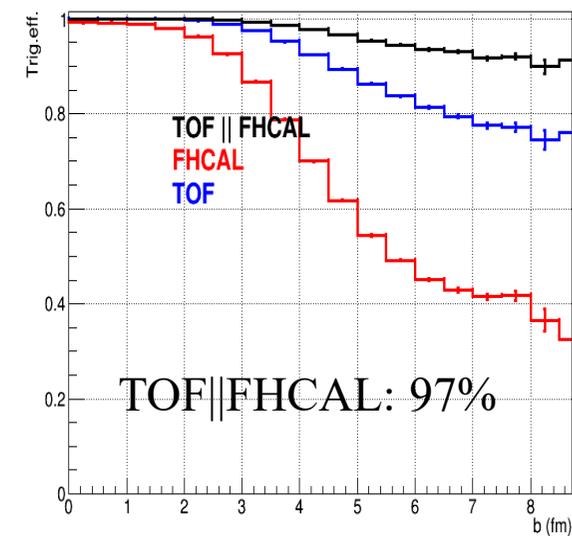
FFD||FHCAL trigger efficiency vs. b (fm)



FFD||TOF trigger efficiency vs. b (fm)

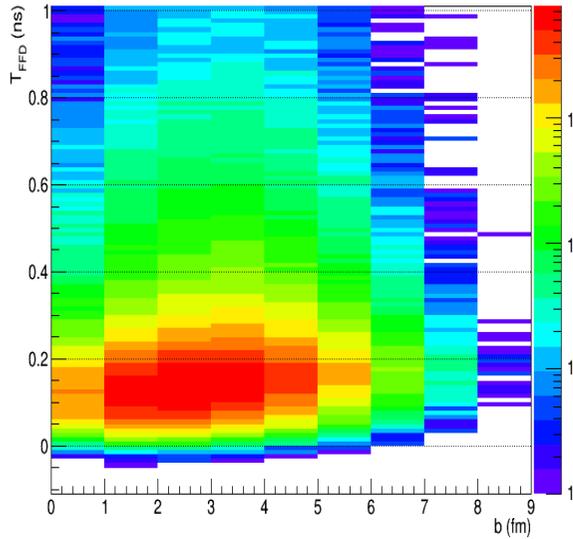


FHCAL||TOF trigger efficiency vs. b (fm)



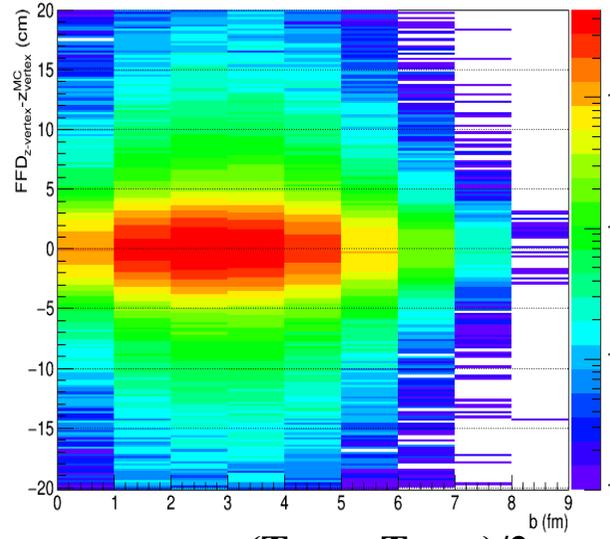
Разрешения T_0 и z-вершины, C+C 9,2 ГэВ

FFD, T_0



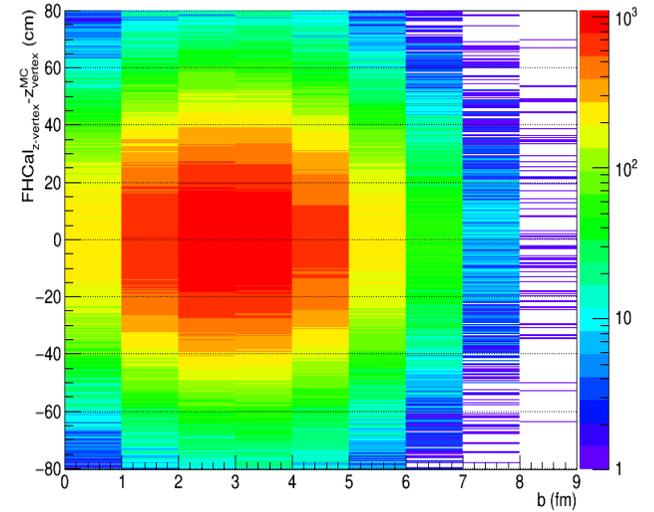
$$T_0 = (T_{FFDB} + T_{FFD3})/2 - L/c$$

FFD, z-вершины



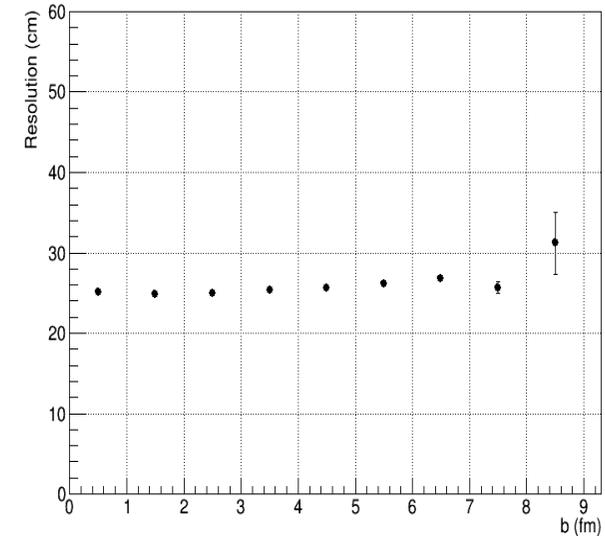
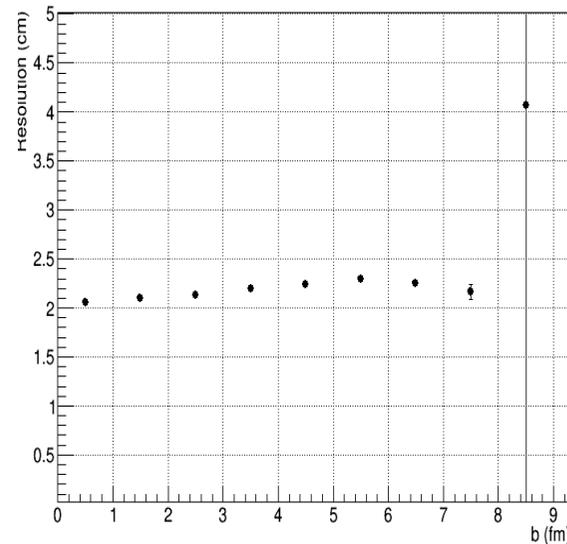
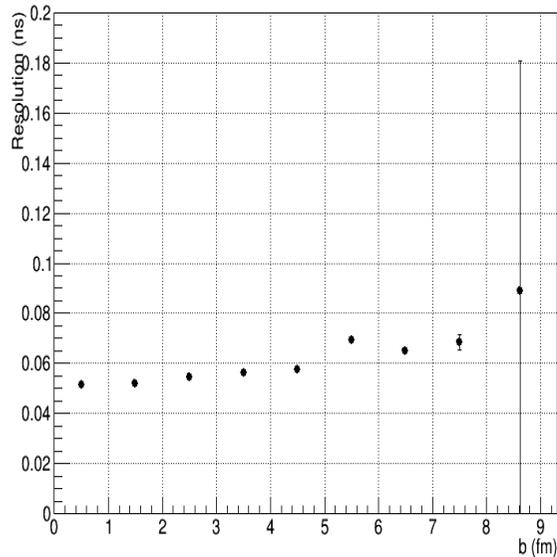
$$z\text{-вершины} = (T_{FFD3} - T_{FFDB})/2 \times c$$

FHCal, z-вершины



$$z\text{-вершины} = (T_{FHCal3} - T_{FHCalB})/2 \times c$$

Vertex resolution



Выводы

- Отбор столкновения легких ядер (C+C, p+V_i и p+p) при энергиях $\sqrt{s_{NN}} = 4 - 11$ ГэВ возможен только с использованием детектора TOF и его комбинаций.
- Эффективность TOF (97 – 92%) > FFD (0,5 – 42%), FHCAL (2 – 90%) и FFD||FHCAL(2 – 90%).
- Наибольшая эффективность у TOF||FHCAL – покрывает наибольший аксептанс.
- Сложности с измерением T_0 FDD для симметричных легких систем. Разрешение хуже 40 – 60 пс и 2 см. Разрешение FHCAL z-вершины 25 – 30 см (для центральных и полу-центральных).
- Аналогично фиксированной мишени отбор столкновений в p+V_i будет затруднен фоновыми процессами. Отбор одной стороной.

Заключение

- Отбор столкновения тяжелых и промежуточных по массе ядер в коллайдерном и с фиксированной мишенью режимах при $\sqrt{s_{NN}} = 4-11$ ГэВ и $E_{kin} = 2,5 \times A$ ГэВ возможен с использованием детекторов FFD, FHCAL и TOF и их комбинаций:
 - ✓ Для коллайдерного режима эффективность TOF (99%) > FFD (81 – 88%) и FHCAL (95%). TOF||FHCAL наиболее перспективный вариант
 - ✓ Для фиксированной мишени эффективность TOF (97 – 96%) сопоставима с FHCAL (97 – 96 %) и FFD||FHCAL (97 – 96%) \geq FFD (88 – 86%)
- Отбор столкновений легких ядер при $\sqrt{s_{NN}} = 4 - 11$ ГэВ может осуществляться только с использованием детектора TOF:
 - ✓ Эффективность TOF (97 – 92%) > FFD (0,5 – 42%), FHCAL (2 – 90%) и FFD||FHCAL(2 – 90%)
 - ✓ Детекторы FDD и FHCAL менее эффективны в таких системах
- T_0 и z-вершины может быть измерено с помощью детектора FFD в столкновениях тяжелых ядер в коллайдерном режиме с разрешением лучше 60 пс и 2 см.
- В столкновениях легких ядер в коллайдерном режиме FDD не достаточно эффективен для измерения T_0 и z-вершины. ITS может улучшить ситуацию.
- В столкновениях с фиксированной мишенью измерение осуществляется одной стороной.
- Отбор столкновений в таком режиме будет затруднен фоновыми процессами и требуется дополнительные механизмы их подавления (совпадение с TOF, и т.д.).