

RHIC (Relativistic Heavy Ion Collider) 2000 г.

p + p, d + Au, Cu + Cu и Au + Au

Тандем (1970 г.) протоны – ионы урана 2 Ван де Граафа по 15 МВ каждый

Бустер (1991 г.)

С помощью бустера стало возможным продвинуться от кремния до золота

AGS (Alternating Gradient Synchrotron) 1960 г. 33 ГэВ, до 1968 г. был самым мощным

ускорителем в мире.

Тинг – Ј/ф-мезон

в распаде нейтральных К-мезонов Ледерман, Шварц, Стейнбергер – мюонное нейтрино

До сих пор AGS остается самым

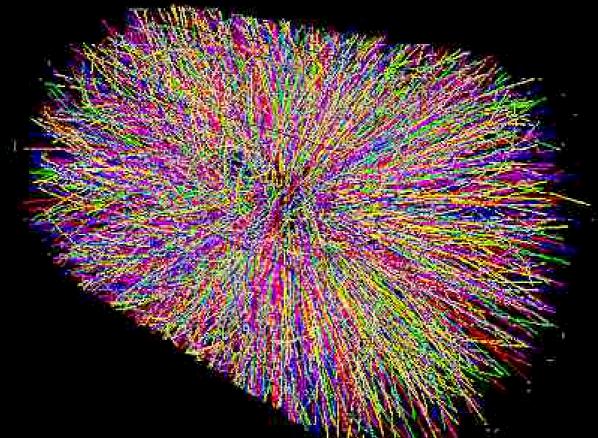
интенсивным источником протонов высокой энергии.



Тандем -1 МэВ/нуклон (Q = +31) Бустер -95 МэВ/нуклон (Q = +77) $AGS - 10.8 \Gamma эВ/нуклон (Q = +79)$ RHIC – 100 ГэВ/нуклон. Средняя светимость 2×10<sup>27</sup> см<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup>

# Детекторы

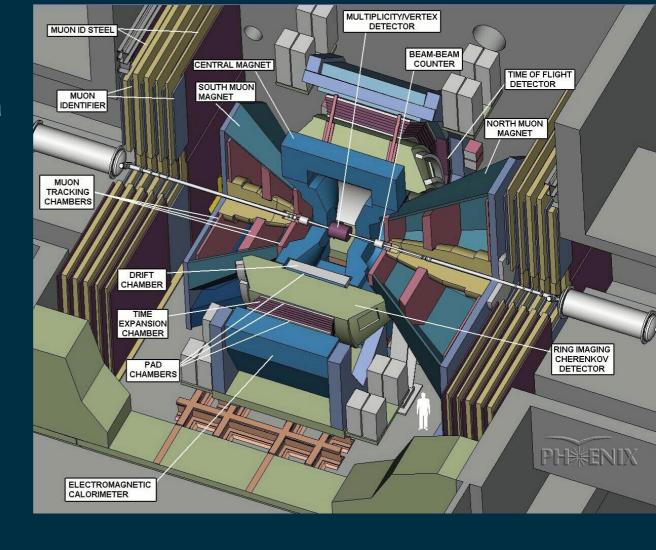
В коллайдере два кольца длиной 3.8 км. Пучки пересекаются в шести местах. В четырех из них находятся детекторы BRAHMS, PHENIX, PHOBOS и STAR.



В каждом столкновении ультрарелятивистских ионов рождается большое количество частиц. Так при центральных столкновениях Au—Au образуется свыше 1000 первичных частиц. Кроме того при взаимодействии первичных частиц с веществом детектора и распаде короткоживущих частиц возникают большие потоки вторичных частиц.

# **PHENIX**

Специализация детектора PHENIX – исследование редких событий. Он «быстрее», чем STAR, и, соответственно, у него меньшее мертвое время при больших загрузках.



Детекторный комплекс PHENIX состоит из набора детекторов, которые сгруппированы в два центральных плеча, позволяющих измерять характеристики различных частиц, как то пионов, протонов, каонов, дейтронов, фотонов, электронов..., и два мюонных плеча. Кроме того, имеются дополнительные детекторы (Event Characterization Detectors).

# Детекторы центрального плеча

- •Drift Chamber Определение координат и импульсов заряженных частиц.
- •Pad Chambers Прецизионное определение координат заряженных частиц.
- •Ring Imaging Cerenkov Идентификация электронов.
- •Hadron Blind Detector Идентификация электронов без детектирования адронов.
- •Time Expansion Chamber Определение координат и импульсов заряженных частиц. Идентификация частиц.
- •Time-of-Flight Определение координат заряженных частиц. Идентификация частиц.
- •Aerogel Cerenkov Counter Идентификация частиц с большими поперечными импульсами.
- •Time-of-Flight West Идентификация частиц с высоким разрешением.
- •Electromagnetic Calorimeter Определение координат и энергий заряженных и нейтральных частиц. Идентификация фотонов и заряженных частиц.

# Детекторы мюонного плеча

Muon Tracker – Определение координат и импульсов мюонов
Muon Identifier – Идентификация мюонов
Muon Piston Calorimeter – Определение энергии, оставленной в направлении
"вперед".

# Детекторы характеризующие событие

- Beam-Beam Counters Определяют точку взаимодействия и центральность.
- Zero Degree Calorimeters and Shower Max Detectors Определяют точку взаимодействия и центральность.
- Forward Calorimeters Позволяют измерять "выжившие" нейтроны и протоны от первичных дейтронов (используется для d+Au).
- Multiplicity Vertex Detector Определяет точку взаимодействия и множественность заряженных частиц.
- Reaction Plane Detector Прецизионное определение плоскости реакции для каждого взаимодействия.

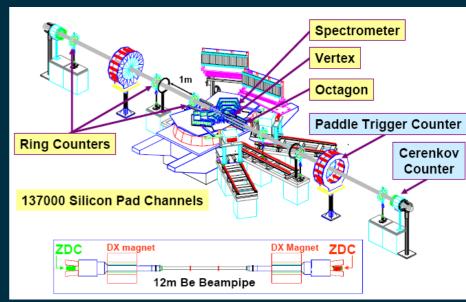
## **PHOBOS**

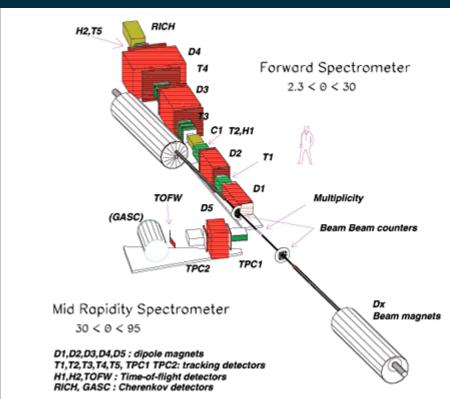
У детектора PHOBOS был наибольший диапазон по псевдобыстроте. Измерения на этом детекторе закончились в 2005 г.

### **BRAHMS**

Broad RAnge Hadron Magnetic Spectrometer

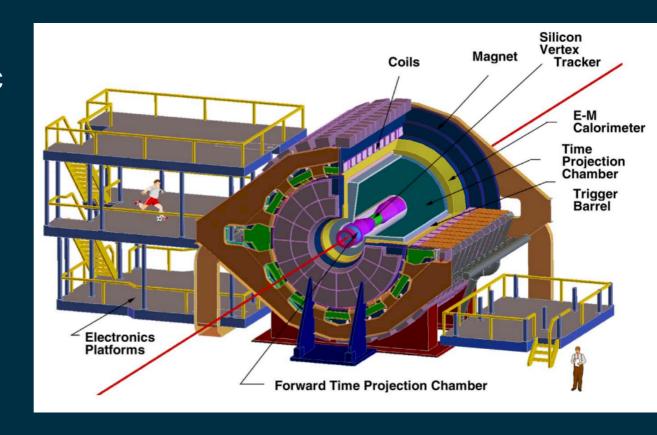
Детектор BRAHMS был предназначен для измерения заряженных адронов в широком диапазоне псевдобыстрот и поперечных импульсов. Измерения на этом детекторе закончились в 2006 г.



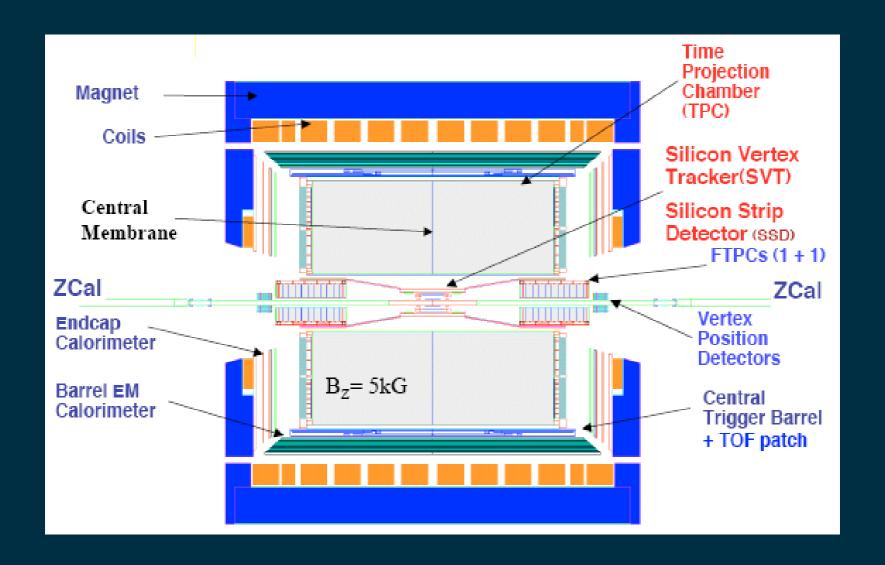


# STAR

Solenoidal Tracker At RHIC



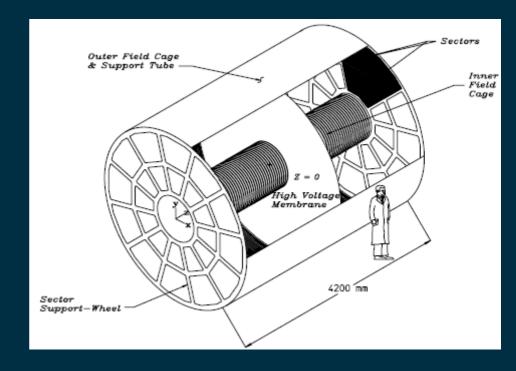
Один из основных детекторных комплексов RHIC – STAR предназначен для детектирования заряженных и нейтральных частиц, возникающих в результате взаимодействия релятивистских тяжелых ионов. Большинство данных поступает от относительно медленных детекторов: TPC, SVT, FTPC, EMC.



#### **TPC** (Time Projection Chamber)

Сердцевиной детекторного комплекса STAR является большой детектор — время-проекционная камера (**TPC**), которая служит для трекинга и идентификации частиц с помощью измерения удельных потерь.

ТРС покрывает диапазон по псевдобыстроте |η| ≤ 1.8 и азимутальному углу Δφ = 2π.



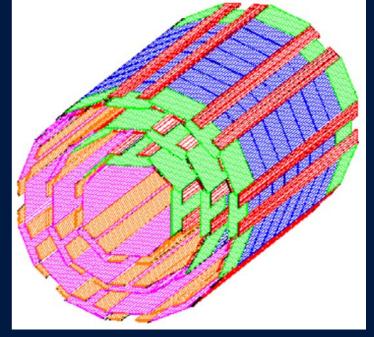
ТРС (длина 4.2 м, внешний диаметр 4 м, внутренний диаметр 1 м) расположен внутри тороидального магнита (до 0.5 Т) на расстоянии от 50 до 200 см от оси пучка. Объем ТРС заполнен газовой смесью (10% метана, 90% аргона). Посередине камеры находится катод под потенциалом 28 кВ. В камере создано однородное электрическое поле параллельно оси.

Время-проекционная камера это комбинация дрейфовой и пропорциональной камер. Поперечные координаты фиксируются пропорциональными камерами. Продольная координата определяется по времени дрейфа.

#### **SVT** (Silicon Vertex Tracker)

Вершинный трекер SVT находятся внутри TPC. SVT покрывает область по псевдобыстроте -  $1 \le \eta \le 1$  и по азимутальному углу  $0 \le \phi \le 2\pi$ .

SVT состоит из 216 кремний-дрефовых детекторов, образующих три цилиндрических слоя с радиусами приблизительно 6.9см, 10.8см и 14.5см вокруг ионопровода в области столкновения.



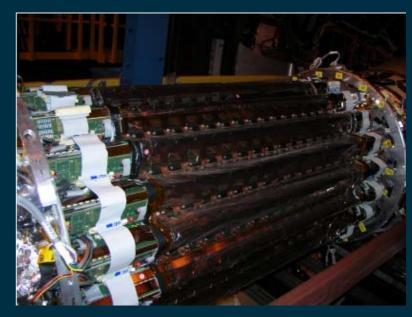
Кремний-дрейфовый детектор можно представить себе как твердотельный аналог время проекционной камеры.

SVT служит для прецизионного определения как первичной вершины взаимодействия, так и вторичной, при слабом распаде короткоживущих частиц. Пространственное разрешение детектора 20 мкм по каждой координате. Кроме того, SVT позволяет осуществлять трекинг частиц с небольшими импульсами, которые отклоняются магнитным полем и не попадают в ТРС. Высокое энергетическое разрешение SVT в измерении удельных потерь обеспечивает хорошую идентификацию частиц.

Совместное разрешение SVT и TPC для удельных потерь 7%. Для большинства треков разрешение по импульсам  $\delta$  p/p = 0.02.

#### SSD (Silicon Strip Detector)

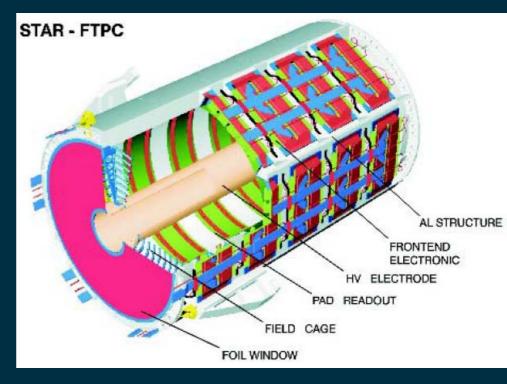
Кремниевый стриповый детектор (SSD) расположен на расстоянии 230 мм от оси пучка и образует четвертый слой внутренней трекинговой системы, покрывая диапазон псевдобыстрот |η| ≤ 1.2. Кремниевые пластинки с двусторонними стрипами (768 стрипов на каждой стороне) размещены на 20 держателях из углепластика, длиной 106 см. По 16 пластинок на каждом держателе.



SSD позволяет улучшить точность определения точки взаимодействия и энергетических потерь заряженных частиц. Кроме того позволяет согласовать параметры треков, полученные от вершинного трекера (SVT) и времяпроекционной камеры (TPC) и увеличить количество точек для восстановления трека. В частности это помогает увеличить эффективность детектирование долгоживущих метастабильных частиц. Пространственное разрешение SSD лучше чем  $\approx$  30 мкм по R и  $\phi$  и  $\approx$  860 мкм по Z.

#### FTPC (Forward Time Projection Chamber)

Трекинг при бо́льших псевдобыстротах  $(2.5 \le |\eta| \le 4.0)$  и  $\Delta \phi = 2\pi$  осуществляется с помощью двух передних время-проекционных камер (FTPC).



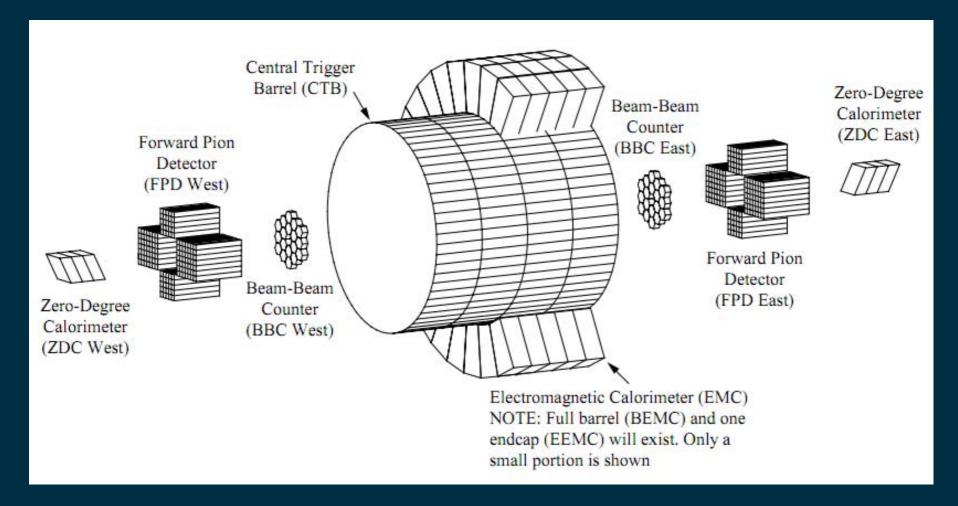
FTPC представляют собой цилиндрические структуры диаметром 75 см и длиной 120 см, расположенных по обеим сторонам от TPC. В FTPC используется смесь — 50% Ar, 50%  ${\rm CO_2}$ . Дрейф в FTPC происходит в радиальном направлении. В центре находится тонкая металлизированная пластиковая трубка, служащая катодом, внешний цилиндр находится по потенциалом земли. В FTPC используются изогнутые камеры считывания. FTPC обеспечивает пространственное разрешение 100 мкм, разделение двух треков 1-2 мм, разрешение по импульсам 12-15%. до десятикратного измерения координат вдоль трека частицы.

#### **TOF**

Цилиндрический сегментированный детектор TOF окружает TPC. В системе TOF детекторного комплекса STAR используется многозазорные камеры с резистивными пластинами (Multigap Resistive Plate Chamber).

Возможности по идентификации частиц в детекторном комплексе STAR были увеличены за счет установки сегментированной системы времени пролета (TOF). Идентификация происходит с помощью информации о времени пролета, т.е. времени между возникновением события и попаданием частицы в определенный сегмент системы TOF. Трековая информация от TPC позволяет определить импульс частицы и длину траектории от точки взамодействия до точки регистрации. Таким образом, для каждого трека по длине траектории и времени ее пролета определяется скорость β, а, зная импульс, определяется масса. Это позволяет проводить идентификацию в заметно большем диапазоне импульсов, чем только с одной время-проекционной камерой.

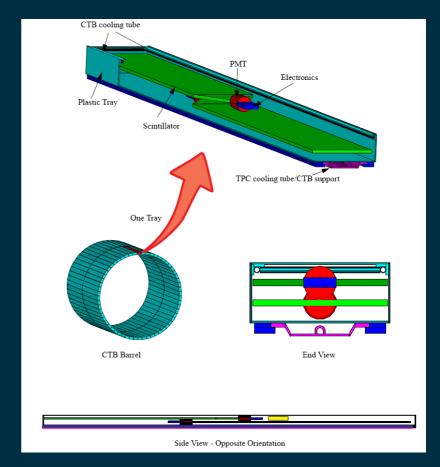
# Триггерная система STAR



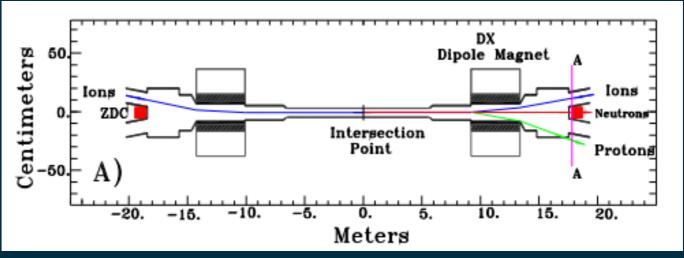
#### CTB (Central Trigger Barrel)

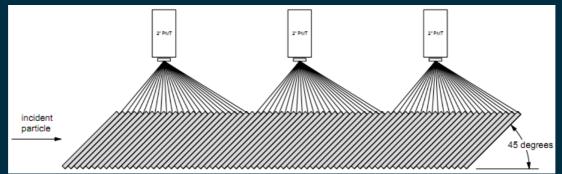
Вокруг ТРС находится триггер СТВ.

СТВ состоит из 240 сцинтилляционных реек, расположенных вокруг ТРС. Каждая рейка просматривается одним ФЭУ. СТВ покрывет диапазон  $|\eta| < 1.0$ ,  $\Delta \phi = 2\pi$ ).



#### **ZDC** (Zero Degree Calorimeter)



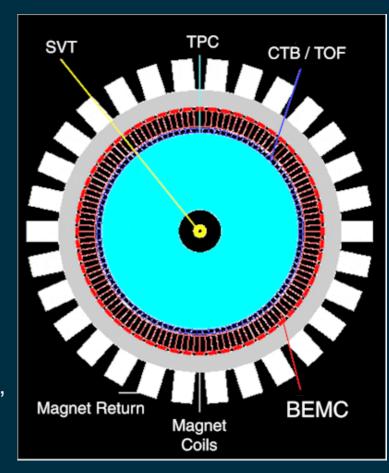


ZDC – небольшие адронные калориметры, расположенные по обеим сторонам от дипольных магнитов. Они измеряют энергию нейтральных частиц в конусе 2 мрад относительно направления пучка. Заряженные частицы в них не попадают, так как отклоняются магнитами. Они расположены на расстоянии ~18 м от точки взаимодействия. ZDC служит для подсчета свободных "спектаторных" нейтронов. Это используется, обычно в сочетании с ВВС, для характеристики событий. Кроме того, сигнал совпадения от двух ZDC, распложенных по обеим сторонам от точки взаимодействия служит для мониторирования светимости.

#### **BEMC** (Barrel Electromagnetic Calorimeter)

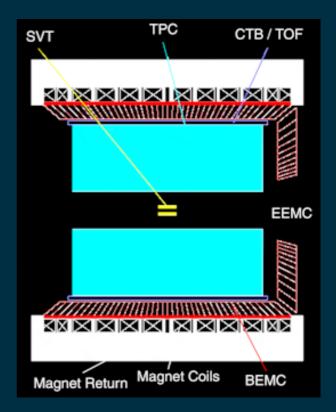
BEMC – электромагнитный калориметр. Он служит для определения энергии фотонов, электронов и адронов, распадающихся по электромагнитному взаимодействию.

СТВ сегментирова на 4800 столбиков (свинецпластиковый сцинтиллятор). Каждый столбик имеет размеры ( $\Delta \eta, \Delta \phi$ ) = (0.05, 0.05). Для триггерных систем столбики сгруппированы по 16, соответственно каждая группа покрывает ( $\Delta \eta, \Delta \phi$ ) = (0.2, 0.2).



#### **EEMC** (Endcap Electromagnetic Calorimeter)

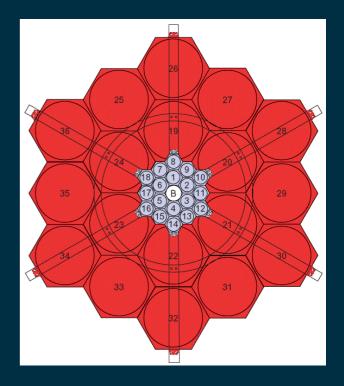
Как и BEMC, EEMC – электромагнитный калориметр. Он покрывает торец TPC.  $1 < \eta < 2$  и  $0 < \phi < 2\pi$ . EEMC составлен из 720 столбиков (свинецпластиковый сцинтиллятор)  $(\Delta \eta, \Delta \phi) = (0.05, 0.1)$  или  $(\Delta \eta, \Delta \phi) = (0.1, 0.1)$ . Так же как в BEMC, столбики сгрупированы по 8 с покрытием  $(\Delta \eta, \Delta \phi) = (0.3, 0.2)$ .



#### BBC (Beam-Beam Counter)

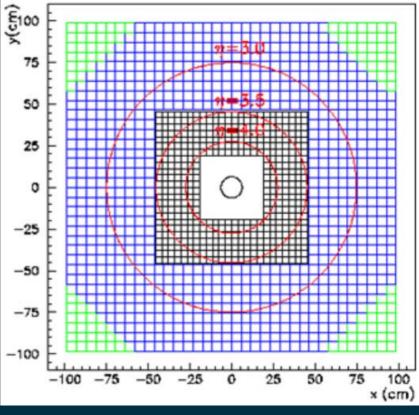
Два ВВС расположены по обеим сторонам от ТРС. Каждый счетчик представляет из себя кольцевые слои сцинтилляционных трубок (черенковских счетчиков), окружающих ионопровод. Сигналы от двух счетчиков позволяет определить точку и время взаимодействия.

$$t = (t_{bbc1} + t_{bbc2})/2$$
  
 $z = c(t_{bbc1} - t_{bbc2})/2$ 



#### FPD (Forward Meson Detector)

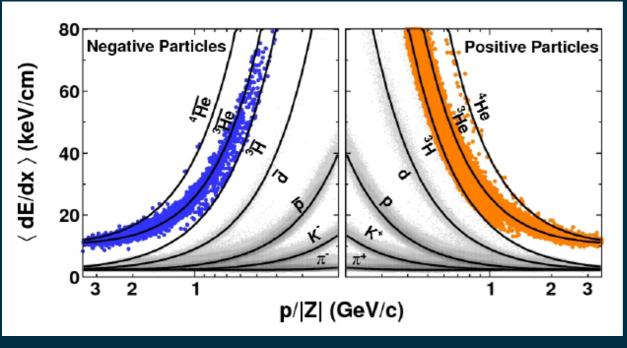
FMD представляет собой сильно секционированный спектрометр нейтральных мезонов, покрывающий большой диапазон псевдобыстрот 2.5 < η < 4.0 и полный азимутальный угол.

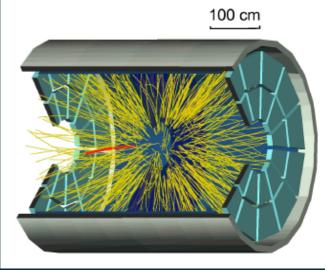


FMD состоит из двух концентрических областей. Внуренняя, состоящая и малых ячеек, покрывает диапазон псевдобыстрот  $3 < \eta < 4.0$ , внешняя, состоящая из бо́льших ячеек, покрывает диапазон псевдобыстрот  $2.5 < \eta < 3.4$ . Вместе они составляют квадратную матрицу  $2 \times 2$  м² с обрезанными углами. Во внутренней области 476 детекторов из свинцового стекла, во внешней 788 детекторов бо́льшего размера. Детекторы регистрируют черенковское излучение электромагнитных ливней, возникающих при взаимодействии частиц со свинцом детекторов.

## Регистрация ядер антигелия в детекторе STAR

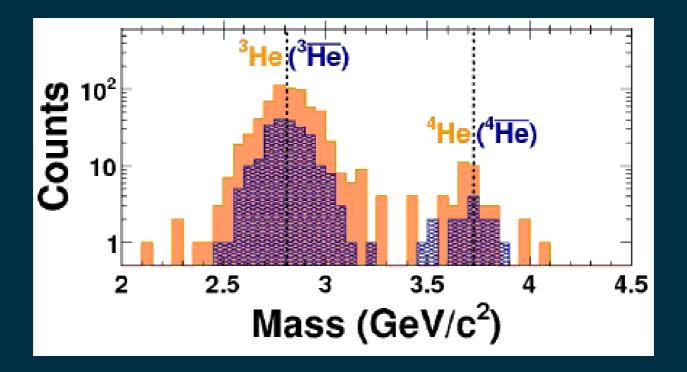
Идентификация частиц проводилась по кривизне их траекторий в магнитном поле, по удельным потерям (dE/dx) во время-проекционной камере (TPC) и по времени пролета (TOF) с помощью многозазорной камеры с резистивными пластинами





Всего за измерения 0.5×10<sup>12</sup> треков

 $p/|Z| < 1.4 \ \Gamma \ni B/c - 4 \ coбытия$  $p/|Z| < 1.75 \ \Gamma \ni B/c - локусы сливаются$ 



Массы <sup>3</sup>He (<sup>3</sup> He) 2.81 Гэв/с<sup>2</sup> и <sup>4</sup>He (<sup>4</sup> He) 3.73 Гэв/с<sup>2</sup> показаны вертикальными линиями.

Всего на детекторе STAR было зарегистрировано 18 ядер антигелия, из них 16 в 2010 г. и 2 ядра в 2007 г. На рисунке показаны только события 2010 г., т.к. в 2007 г. системы TOF не было.

# Коллаборация STAR

Argonne National Laboratory, Argonne, Illinois 60439, USA Brookhaven National Laboratory, Upton, New York 11973, USA University of California, Berkeley, California 94720, USA University of California, Davis, California 95616, USA University of California, Los Angeles, California 90095, USA Universidade Estadual de Campinas, Sao Paulo, Brazil University of Illinois at Chicago, Chicago, Illinois 60607, USA Creighton University, Omaha, Nebraska 68178, USA Czech Technical University in Prague, FNSPE, Prague, 115 19, Czech Republic ONuclear Physics Institute AS CR, 250 68 R\* ez\*/Prague, Czech Republic University of Frankfurt, Frankfurt, Germany Institute of Physics, Bhubaneswar 751005, India Indian Institute of Technology, Mumbai, India Indiana University, Bloomington, Indiana 47408, USA Alikhanov Institute for Theoretical and Experimental Physics, Moscow, Russia University of Jammu, Jammu 180001, India Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, 141 980, Russia Kent State University, Kent, Ohio 44242, USA University of Kentucky, Lexington, Kentucky, 40506-0055, USA Institute of Modern Physics, Lanzhou, China Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, California 94720, USA Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA 02139-4307, USA

Max-Planck-Institut f'ur Physik, Munich, Germany Michigan State University, East Lansing, Michigan 48824, USA Moscow Engineering Physics Institute, Moscow Russia NIKHEF and Utrecht University, Amsterdam, The Netherlands Ohio State University, Columbus, Ohio 43210, USA Old Dominion University, Norfolk, VA, 23529, USA Panjab University, Chandigarh 160014, India Pennsylvania State University, University Park, Pennsylvania 16802, USA Institute of High Energy Physics, Protvino, Russia Purdue University, West Lafayette, Indiana 47907, USA Pusan National University, Pusan, Republic of Korea University of Rajasthan, Jaipur 302004, India Rice University, Houston, Texas 77251, USA Universidade de Sao Paulo, Sao Paulo, Brazil University of Science & Technology of China, Hefei 230026, China Shandong University, Jinan, Shandong 250100, China Shanghai Institute of Applied Physics, Shanghai 201800, China SUBATECH, Nantes, France Texas A&M University, College Station, Texas 77843, USA University of Texas, Austin, Texas 78712, USA University of Houston, Houston, TX, 77204, USA Tsinghua University, Beijing 100084, China United States Naval Academy, Annapolis, MD 21402, USA

Valparaiso University, Valparaiso, Indiana 46383, USA Variable Energy Cyclotron Centre, Kolkata 700064, India Warsaw University of Technology, Warsaw, Poland University of Washington, Seattle, Washington 98195, USA Wayne State University, Detroit, Michigan 48201, USA Institute of Particle Physics, CCNU (HZNU), Wuhan 430079, China Yale University, New Haven, Connecticut 06520, USA University of Zagreb, Zagreb, HR-10002, Croatia

# Спасибо за внимание!