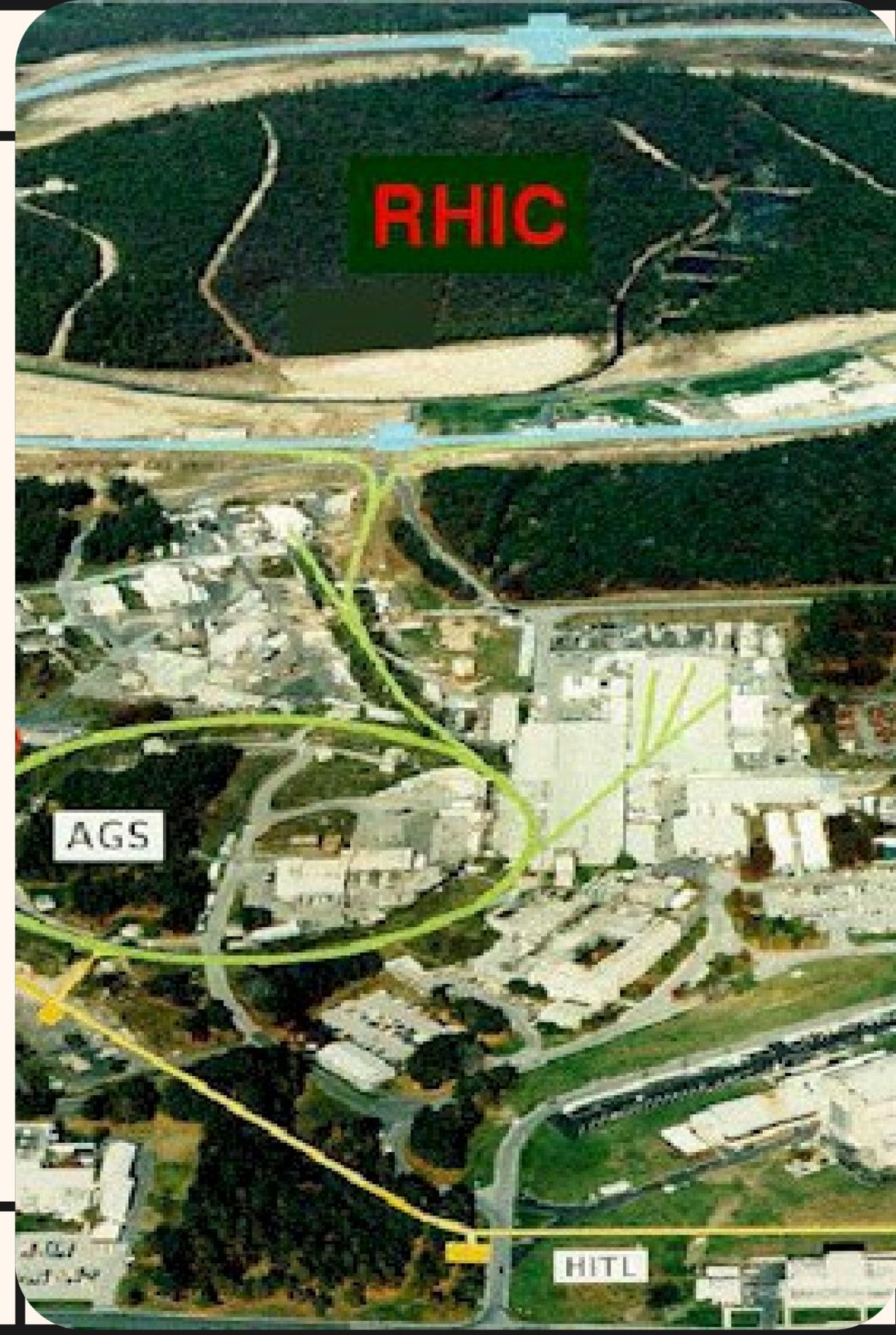


RHIC (PHENIX, STAR)

Радева Дарья, 213м

2021



Введение



Коллайдер RHIC находится в Брукхейвенской национальной лаборатории (США) представляет собой туннель длиной 3.8 км, в котором расположены два идентичных кольца сверхпроводящих магнитов с шестью точками пересечений. В четырех точках находятся экспериментальные установки STAR, PHENIX, BRAHMS и PHOBOS. На коллайдере ускоряются ядра (протоны) с максимальной энергией 100 (250) ГэВ на нуклон.

Введение



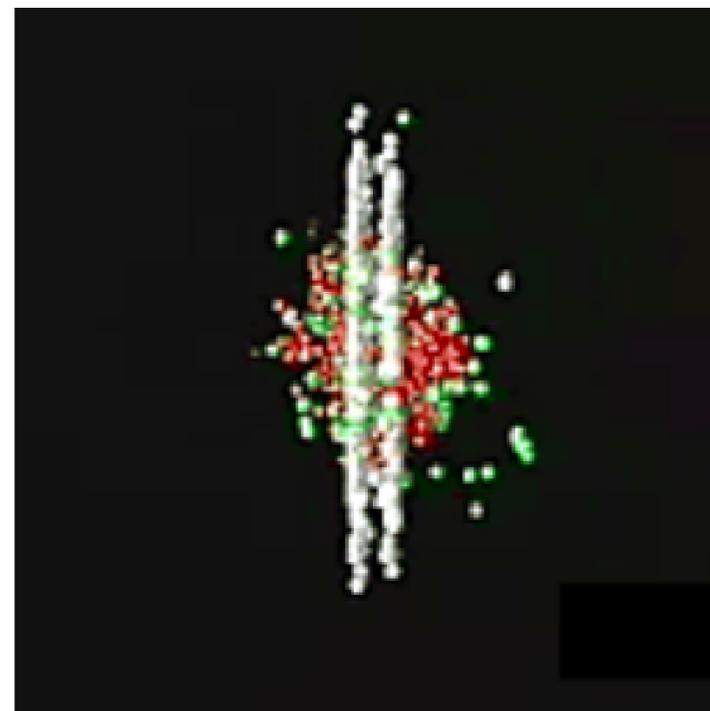
Физики долгое время считали, что спин протона - это просто сумма спинов трех составляющих его кварков. Но эксперименты показали, что на кварки приходится только около 20 процентов спина протона. Что составляет недостающие 80 процентов?

RHIC

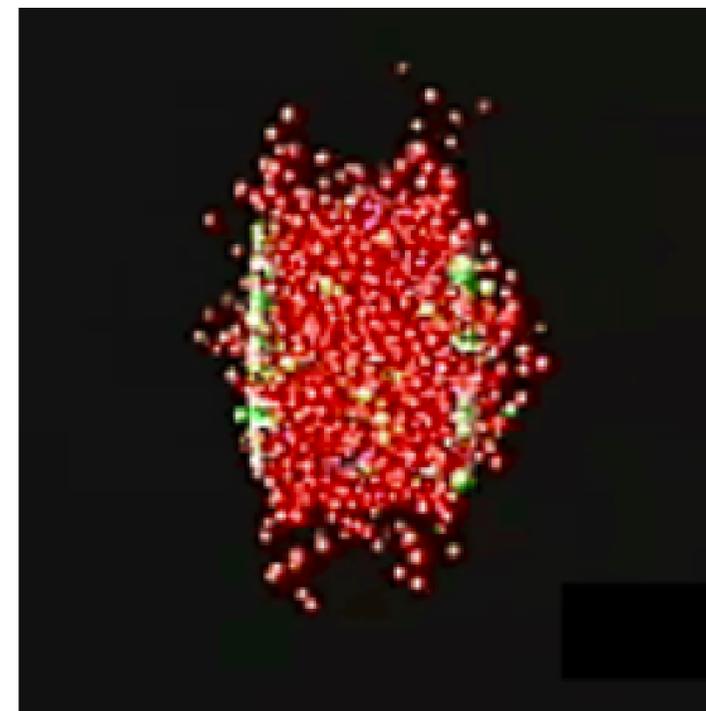
RHIC в первую очередь использует ионы золота, одного из самых тяжелых обычных элементов. RHIC - это первый созданный людьми инструмент, который может вернуть нас «назад во времени», чтобы увидеть, как вела себя материя в начале Вселенной. RHIC - единственная в мире машина, способная встречать пучки поляризованных протонов высокой энергии для исследования вопроса о спине протона.



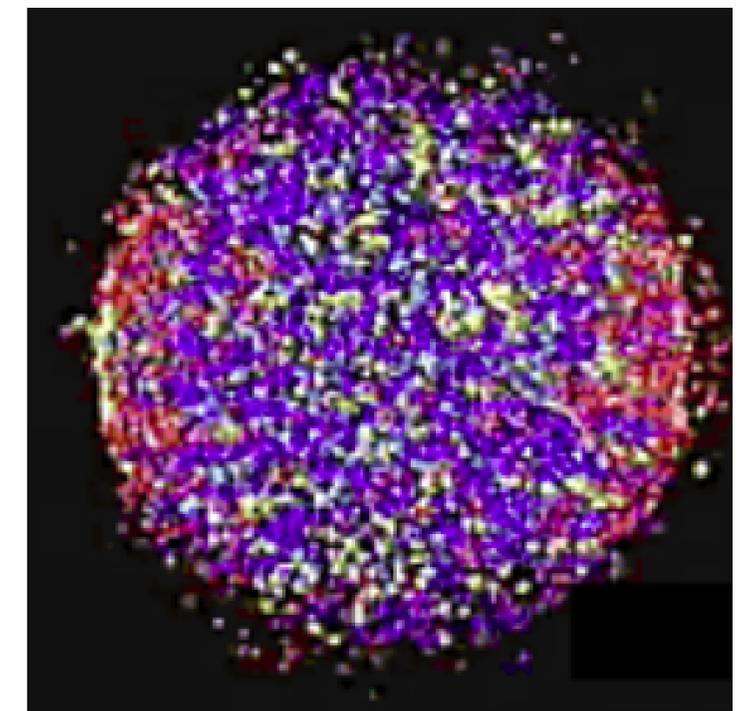
1. Ions about to collide*



2. Ion collision



3. Quarks, gluons freed



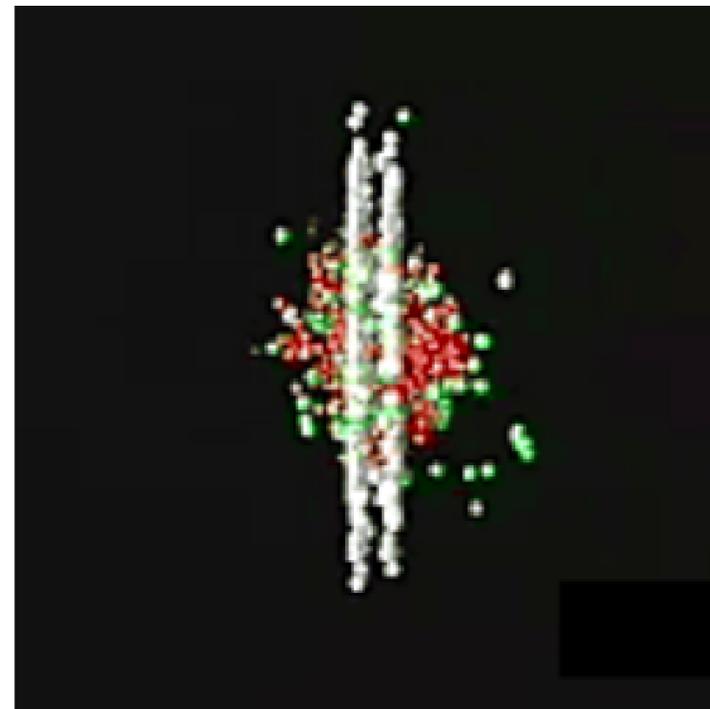
4. Plasma created

RHIC

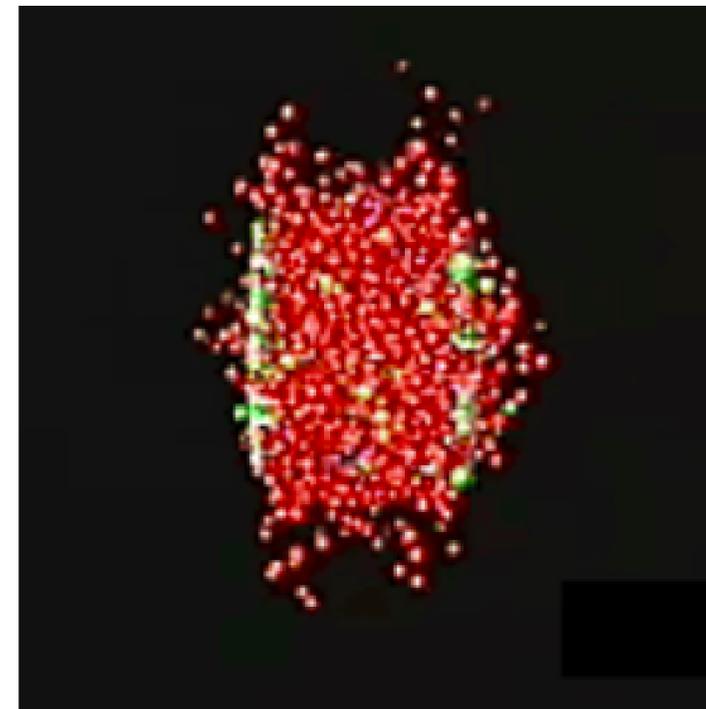
Помимо столкновения тяжелых ионов, RHIC может сталкиваться с отдельными протонами. Хотя эти столкновения не создают кварк-глюонную плазму, физикам они интересны по другим причинам. Ученые хотят больше узнать о свойстве частиц, которое называется «спин».



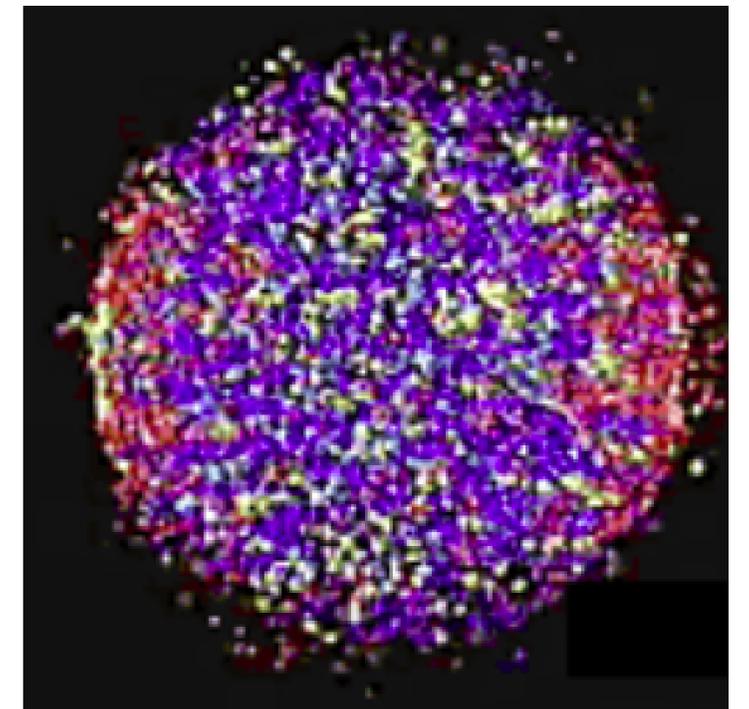
1. Ions about to collide*



2. Ion collision



3. Quarks, gluons freed

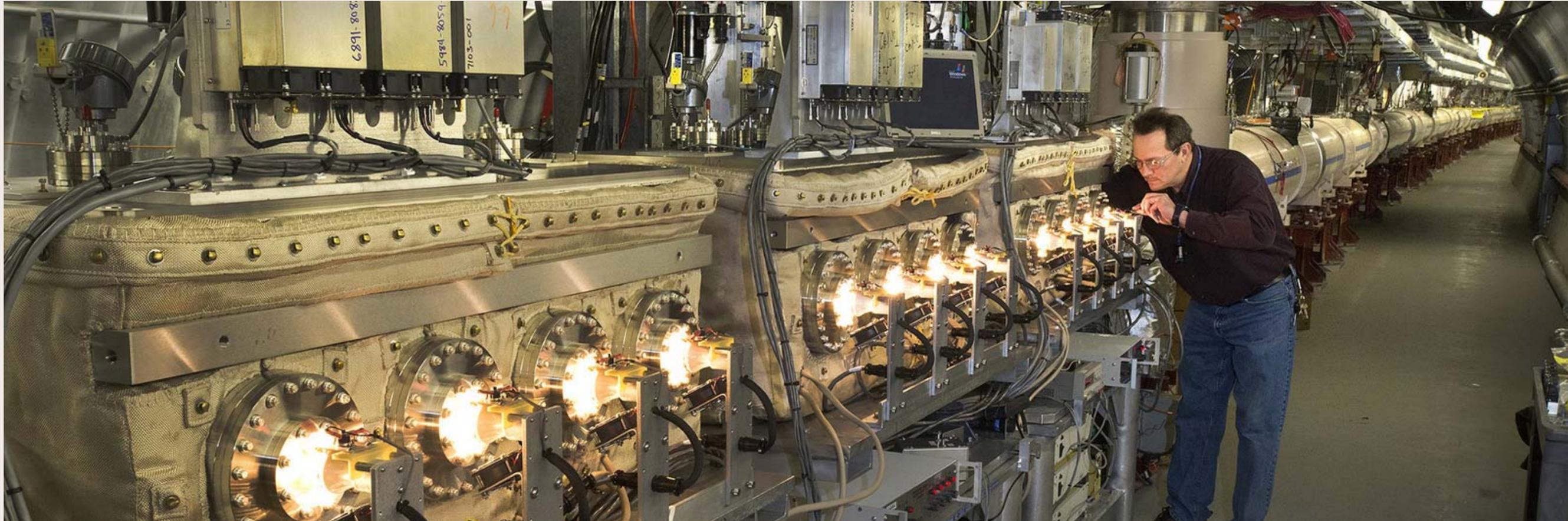


4. Plasma created

RHIC

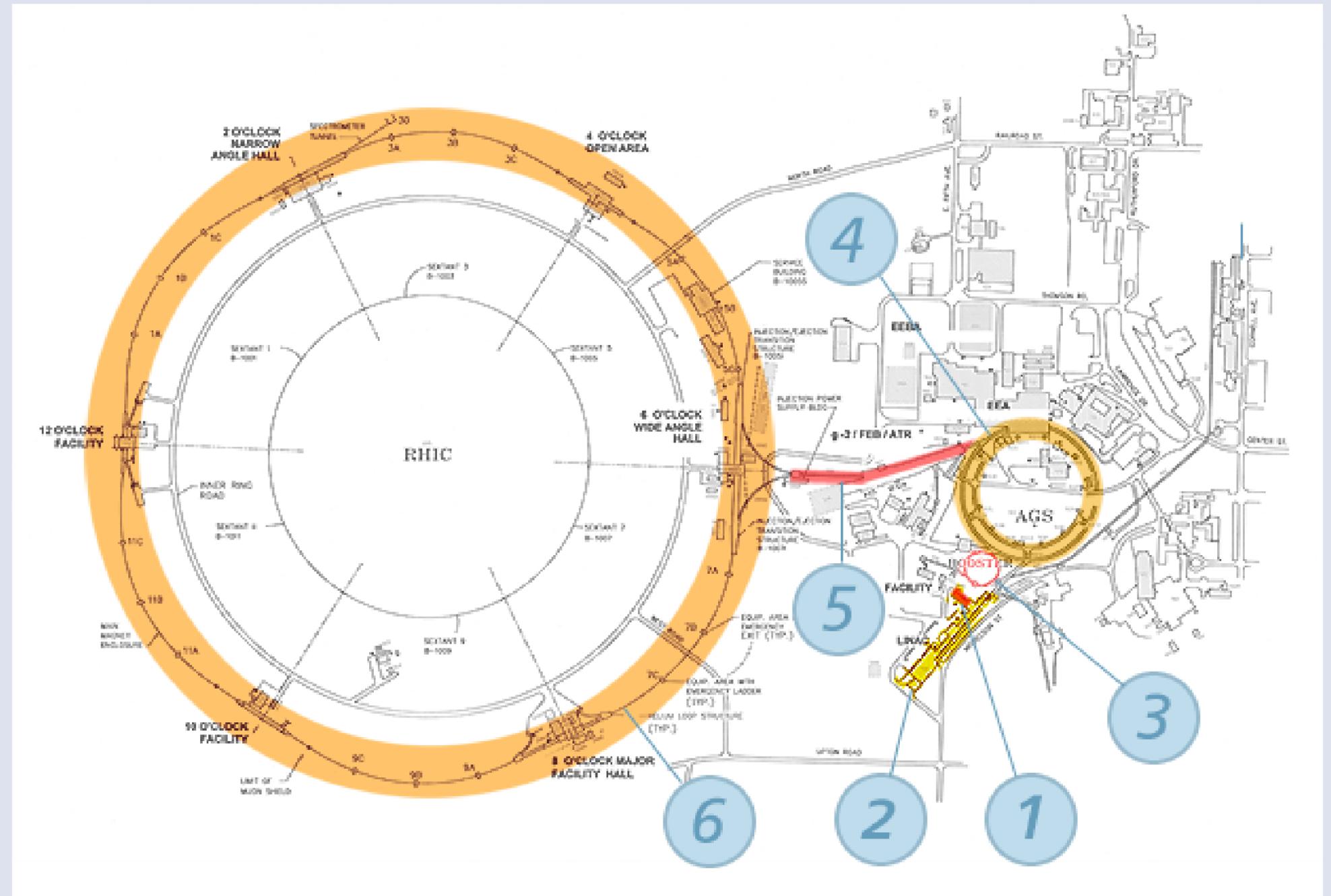
Пучки протонов в RHIC «поляризованы по спине», что означает, что все протоны в данном пучке вращаются в одном направлении. RHIC – первая в мире машина, способная сталкивать такие пучки лицом к лицу.

Спиновые эксперименты RHIC предоставляют первую информацию о том, какой вклад спин глюонов вносит в спин протона.



RHIC

Комплекс
релятивистского
коллайдера
тяжелых ионов
фактически состоит
из длинной
«цепочки»
ускорителей
частиц.



RHIC

Тяжелые ионы начинают свой путь в ускорителе «Электронно-пучковый ионный источник» (1). Затем ионы перемещаются к небольшому круглому бустеру (3), где с каждым проходом они ускоряются до более высокой энергии. Из бустера ионы перемещаются в синхротрон с переменным градиентом (4), который затем вводит пучки через канал (5) в два кольца RHIC (6). В RHIC пучки получают последний "подъём" ускорителя. После ускорения ионы могут часами «вращаться» внутри колец. RHIC также может проводить эксперименты на встречных пучках с поляризованными протонами. Сначала они ускоряются в Linac (2), а затем в Booster (3), AGS (4) и RHIC (6).

EBIS

Это компактный источник и ускоритель тяжелых ионов, который служит началом системы предварительного инжектора для RHIC и Лаборатории космической радиации НАСА (NSRL). EBIS может создавать пучки сильно заряженных ионов практически из любого элемента. Эти ионные пучки затем ускоряются двумя небольшими линейными ускорителями и переносятся в бустер. EBIS может подавать пучки разных ионов в RHIC и NSRL практически одновременно, а также быстро переключаться между разными ионами.



1. Electron Beam Ion Source (EBIS)

Linac

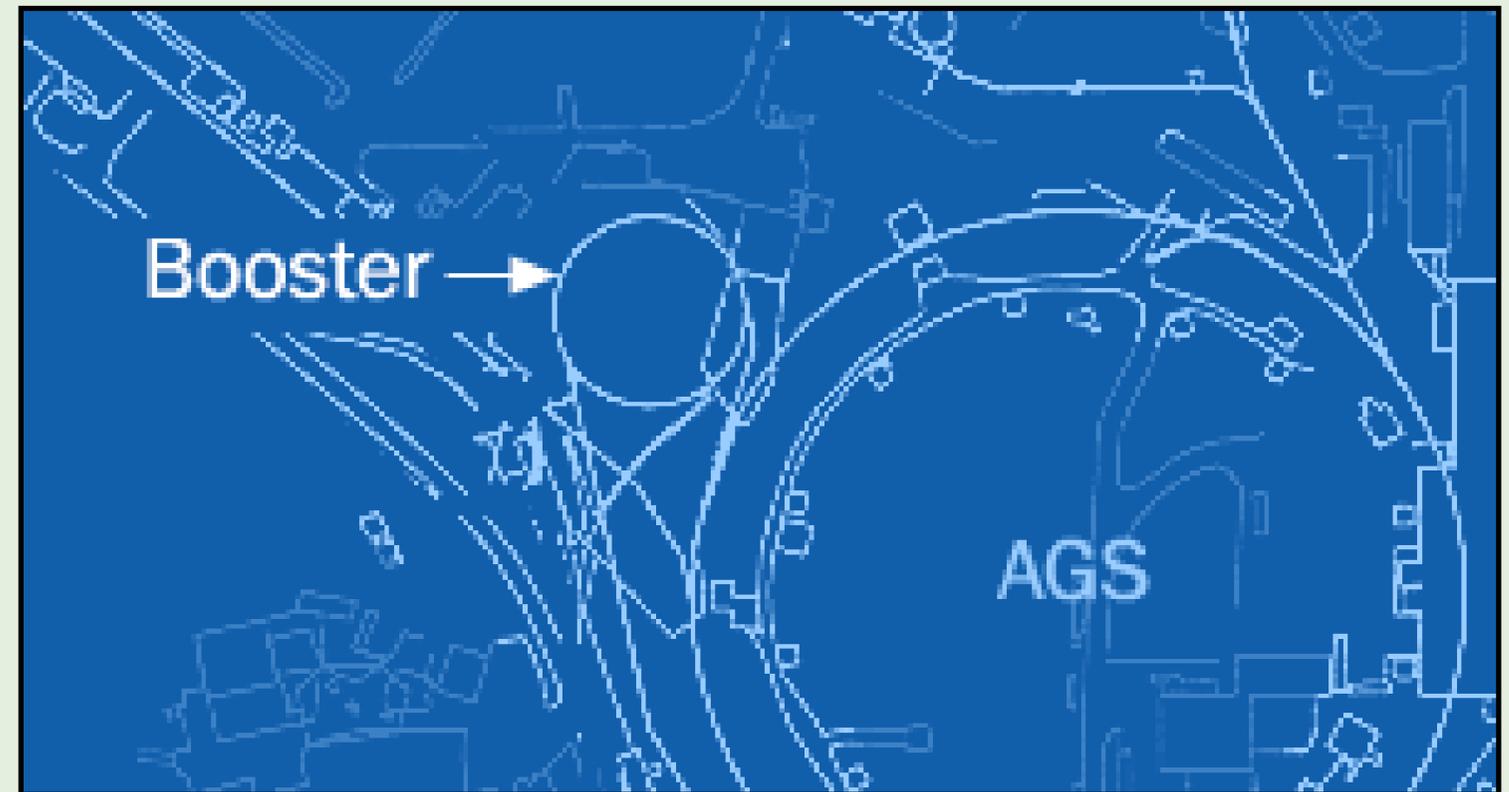
Помимо тяжелых ионов, в некоторых экспериментах на RHIC используются встречные пучки протонов. Для этих экспериментов энергичные протоны получают от линейного ускорителя. Протоны из линейного ускорителя передаются в ускоритель.



2. Linear Accelerator (Linac)

Booster Synchrotron

Синхротрон Booster - это мощный кольцевой ускоритель. Ионы продвигаются вперед со все большей и большей скоростью, приближаясь к скорости света. Затем бустер подает пучок в синхротрон с переменным градиентом.



3. Booster Synchrotron

AGS

Когда ионы попадают в синхротрон с переменным градиентом (AGS) из бустера, они движутся со скоростью примерно 37% от скорости света. По мере того как они вращаются вокруг AGS и ускоряются, как в ускорителе, ионы получают еще больше энергии - пока они не будут двигаться со скоростью 99,7% от скорости света.



4. Alternating Gradient Synchrotron

Линия AGS-TO-RHIC

Когда ионный пучок движется в AGS с максимальной скоростью, он направляется по другой линии, называемой линией передачи AGS-to-RHIC (AtR). В конце этой линии есть «развилка на дороге», где переключающий магнит отправляет сгустки ионов по одной из двух пучковых линий.

Пучки направляются либо влево к кольцу RHIC по часовой стрелке, либо вправо, чтобы перемещаться против часовой стрелки во втором кольце RHIC. С этого момента пучки встречного вращения ускоряются, как в Booster и AGS, а затем циркулируют в RHIC, где они сталкиваются друг с другом в шести точках взаимодействия.

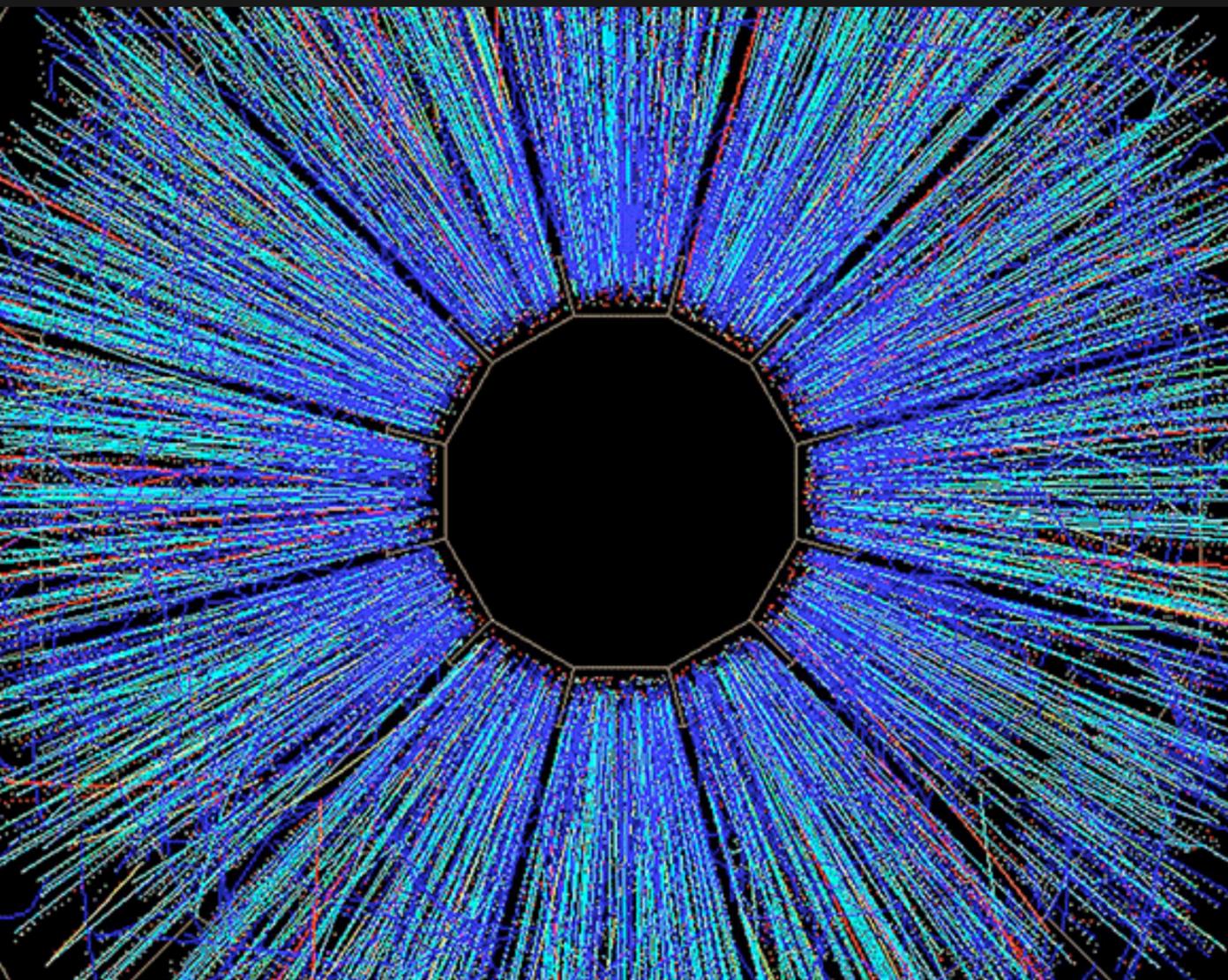
КОЛЬЦО RHIC

Кольцо RHIC, длиной 2,4 мили, имеет шесть точек пересечения, в которых пересекаются два кольца ускоряющих магнитов, позволяя пучкам частиц сталкиваться.



6. Relativistic Heavy Ion Collider

STAR



Вид сбоку на столкновение двух 30-миллиардных электрон-вольтных золотых пучков в детекторе STAR на коллайдере релятивистских тяжелых ионов.

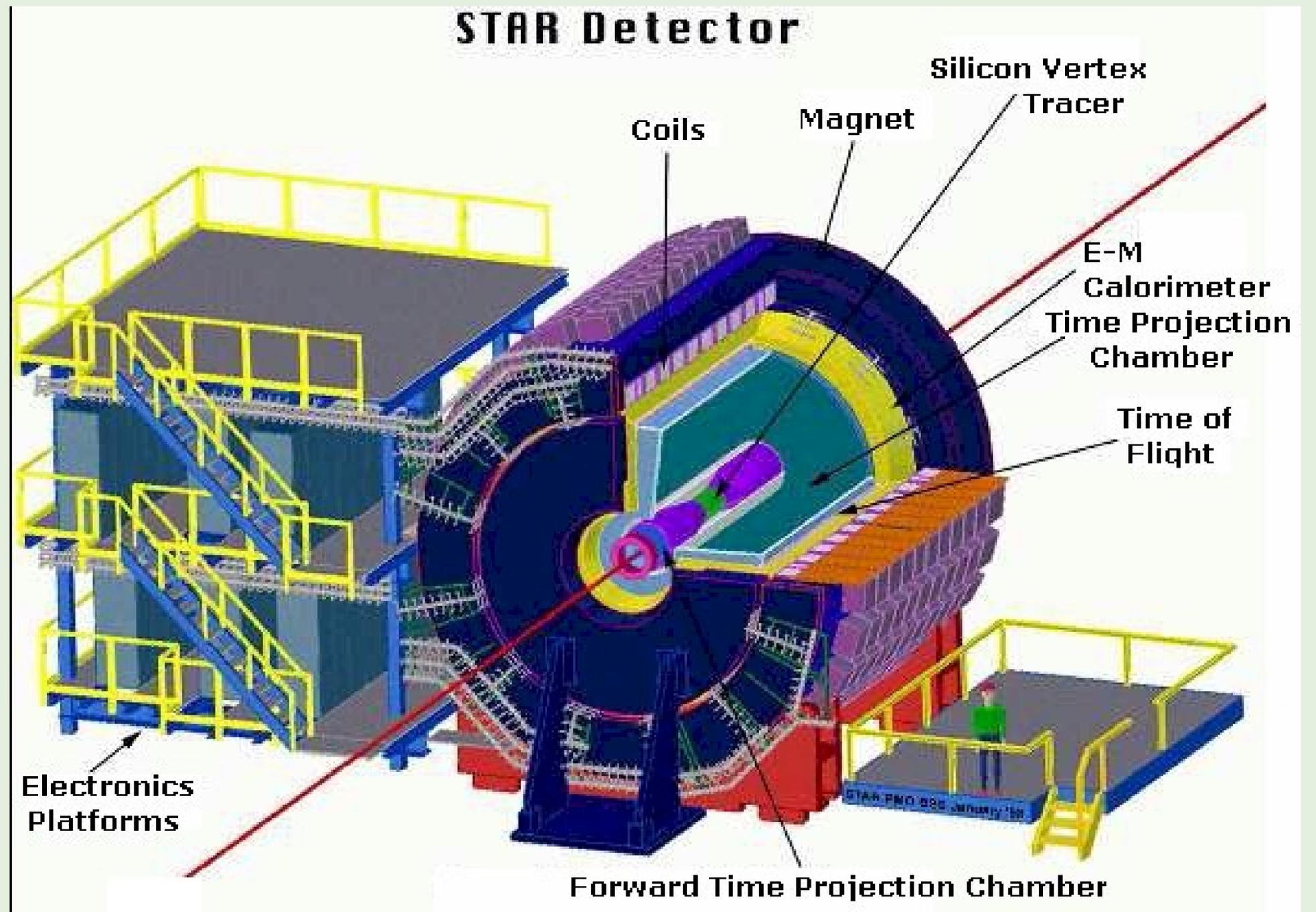
Электромагнитный трекер RHIC, известный как STAR, отслеживает тысячи частиц, образовавшихся в результате столкновений ионов на RHIC. STAR используется для поиска сигнатур формы материи, для создания которой был разработан RHIC: кварк-глюонной плазмы.

STAR

Обнаружение и понимание QGP позволяет нам лучше понять Вселенную в моменты после Большого взрыва, когда симметрии (и отсутствие симметрии) нашего окружения были приведены в движение. В отличие от других физических экспериментов, где теоретическая идея может быть проверена непосредственно с помощью одного измерения, STAR должен использовать множество одновременных исследований, чтобы сделать убедительные выводы о QGP. Это связано со сложностью системы, образующейся в результате столкновений ядер при высоких энергиях.

STAR

Детектор STAR специализируется на отслеживании тысяч частиц, образующихся при каждом столкновении ионов на RHIC. При весе 1200 тонн и размером с дом STAR является массивным детектором.

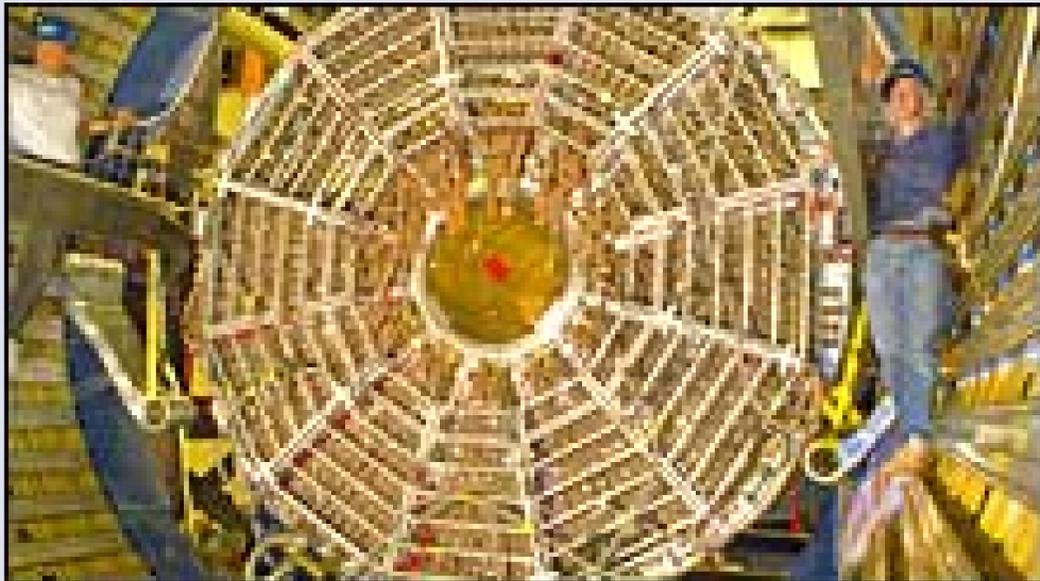


STAR НЕСКОЛЬКО ДЕТЕКТОРОВ



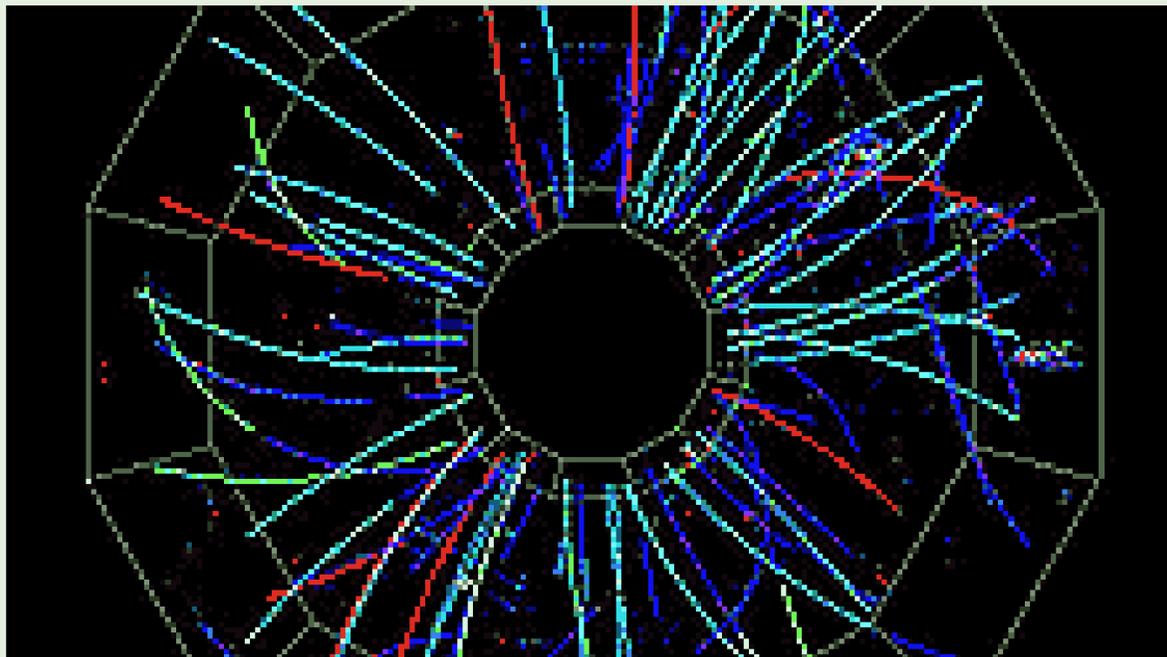
STAR состоит из нескольких типов детекторов, каждый из которых специализируется на обнаружении определенных типов частиц или характеристике их движения. Эти детекторы работают вместе, обеспечивая расширенный сбор данных и последующий физический анализ, который позволяет сделать окончательные выводы о столкновении.

«Сердце» STAR



Это камера временной проекции, которая отслеживает и идентифицирует частицы, возникающие в результате столкновений тяжелых ионов. Когда происходит каждое столкновение, STAR измеряет множество параметров одновременно, чтобы искать признаки QGP.

«Обратное» время



Используя мощные компьютеры для реконструкции субатомных взаимодействий, которые производят частицы, возникающие при каждом столкновении, детектор может в некотором смысле вращать время в обратном направлении.

STAR

1

Фотоны и электроны измеряются баррельными и торцевыми калориметрами (EMC) в области $-1 < \eta < 2$ и для всех азимутальных ϕ .

2

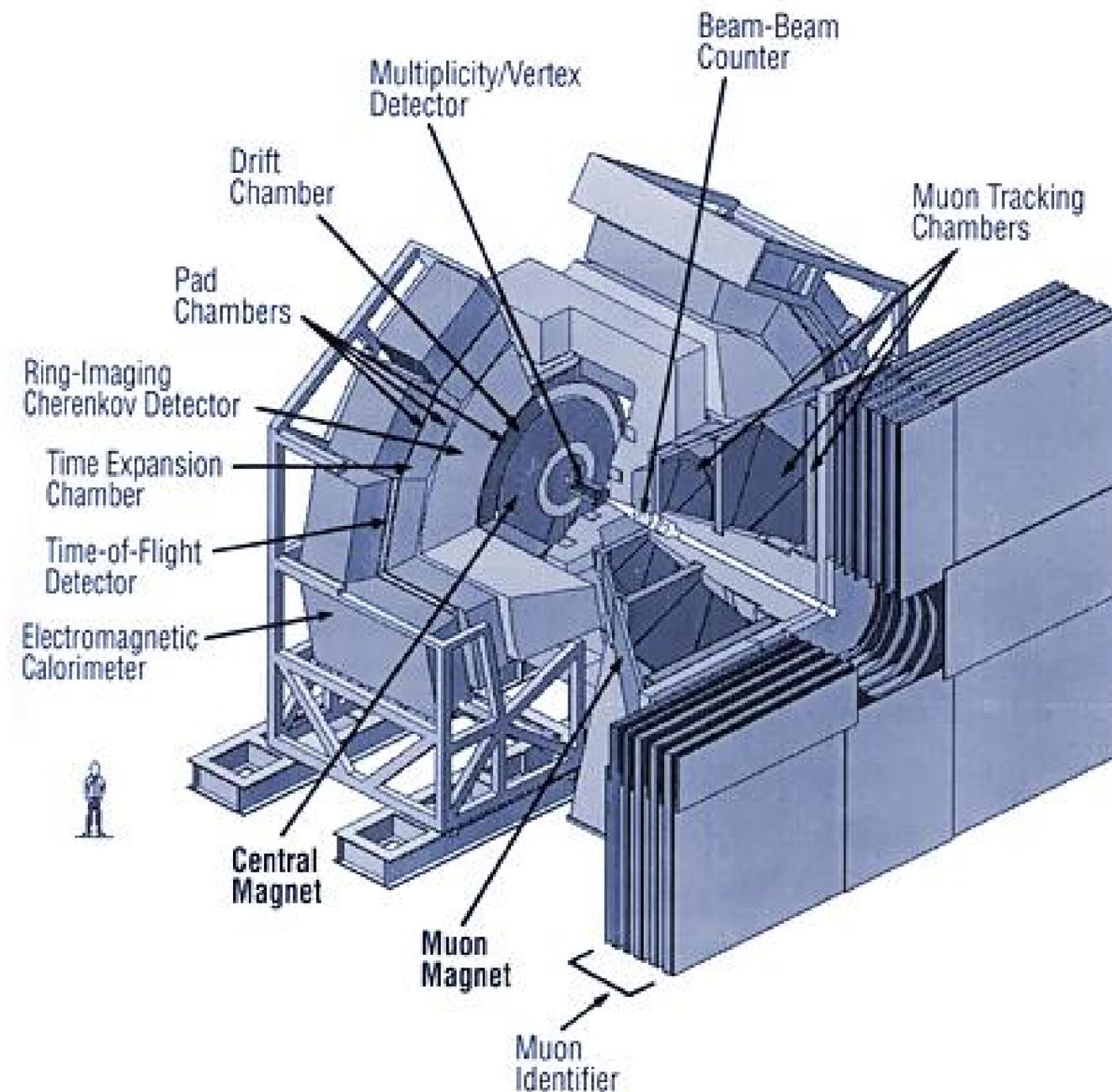
TPC позволяет идентифицировать частицы по потерям dE/dx и восстанавливать вторичные вершины для слабо распадающихся частиц.

3

Установка STAR позволяет изучать многочастичные корреляции, реконструировать струи в pp-столкновениях, а также измерять выход странных и очарованных частиц.

RHENIX

Новаторский эксперимент по ядерному взаимодействию при высоких энергиях, был детектором, разработанным для исследования столкновений тяжелых ионов и протонов при высоких энергиях. Основная цель RHENIX заключалась в открытии и изучении нового состояния материи, называемого кварк-глюонной плазмой.



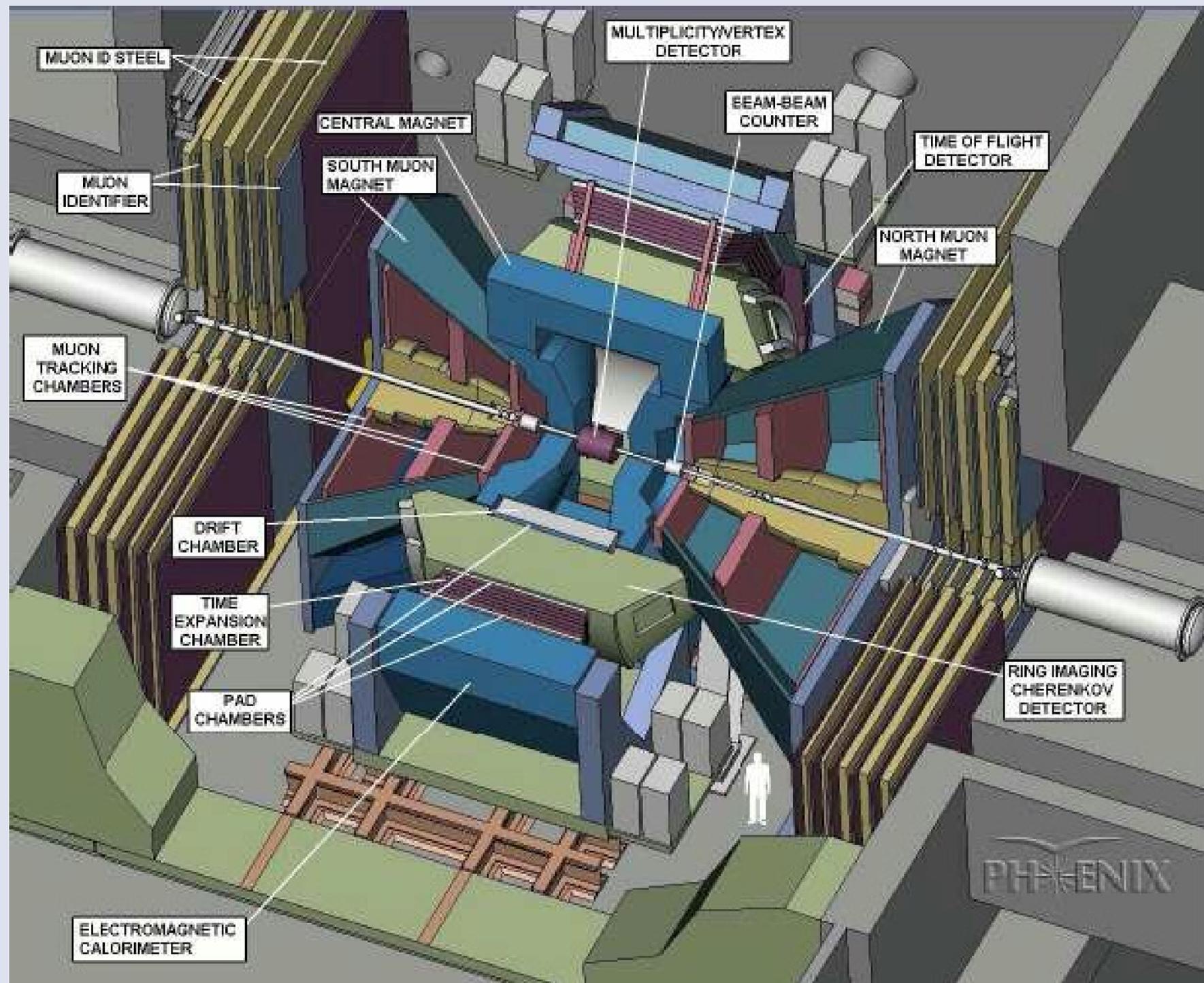
PHENIX

Детектор PHENIX, в настоящее время выведенный из эксплуатации, зарегистрировал множество различных частиц, возникающих в результате столкновений RHIC, включая фотоны, электроны, мюоны и кваркосодержащие частицы, называемые адронами.

Сбор данных был завершен в 2016 году, и в настоящее время PHENIX Collaboration анализирует ранее собранные большие выборки данных, отдавая приоритет тем, которые обладают уникальными физическими возможностями.

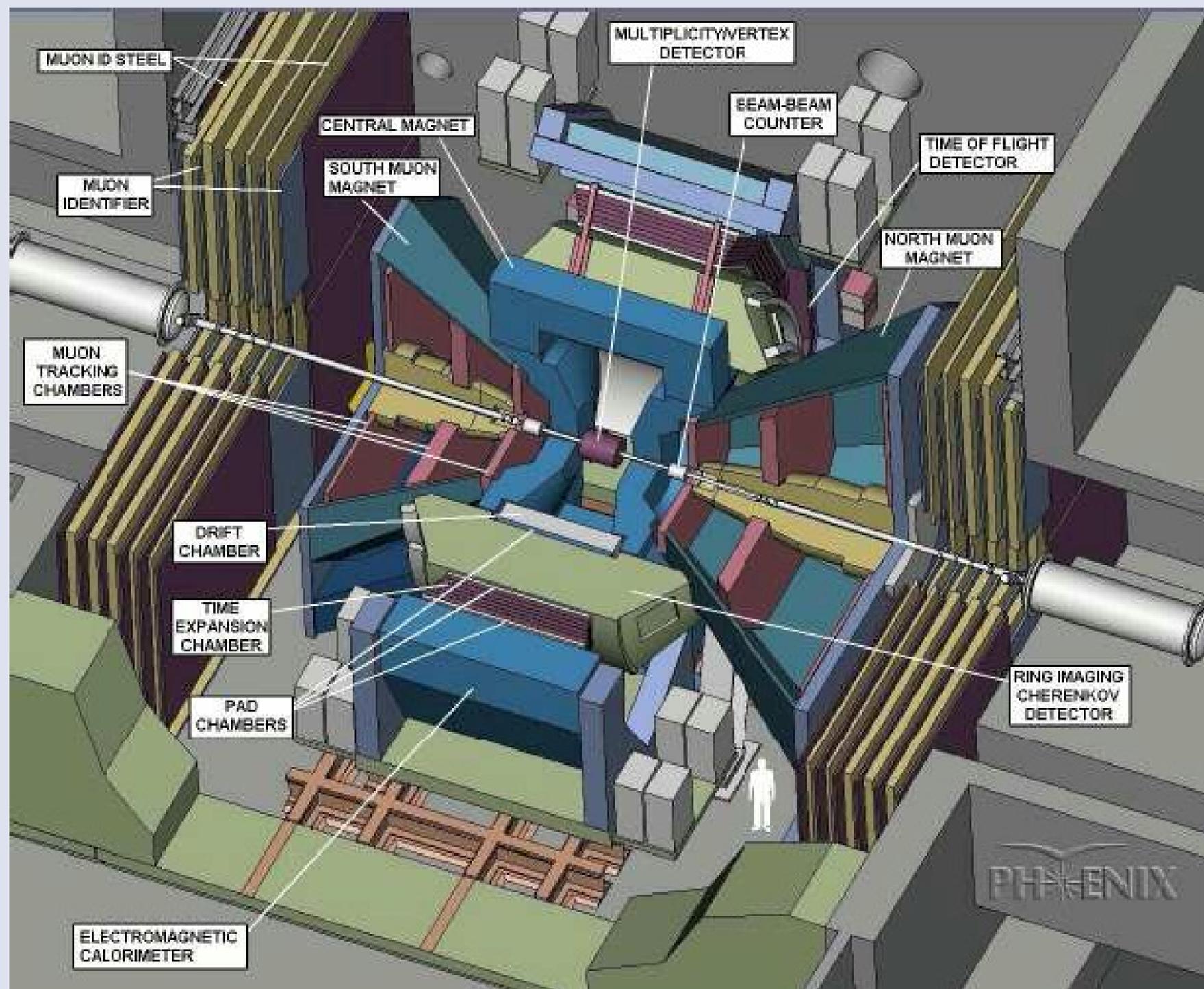
RHENIX

RHENIX весил 4000 тонн и имел десяток детекторных подсистем. Три больших стальных магнита создавали сильные магнитные поля, изгибающие заряженные частицы по искривленным траекториям. Камеры слежения записывали удары по траектории полета, чтобы измерить кривизну и таким образом определить импульс каждой частицы.



RHENIX

Другие детекторы идентифицировали тип частицы и / или измеряли энергию частицы. Третьи записали, где произошло столкновение, и определили, было ли каждое столкновение «лобовым» (центральным), «близким к промаху» (периферийным) или чем-то средним.



PHENIX

1

4 глобальных внутренних детектора используются для триггирования и отбора событий по центральности столкновения.

2

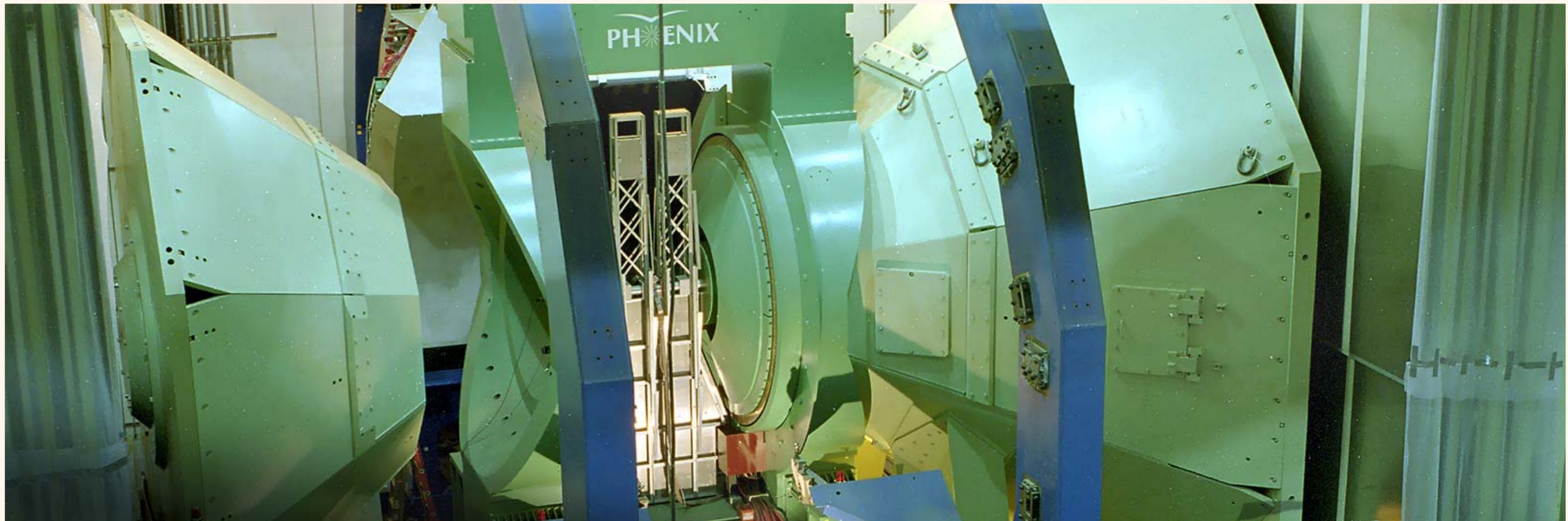
Два типа ЕМС измеряют фотоны и электроны (позитроны). Заряженные адроны измеряются в центральном аксиальном магнитном поле в дрейфовых камерах.

3

PHENIX предназначен для измерения "жестких проб" КХД, таких как "прямые" фотоны (не от распада адронов), лептонные пары и адроны с большими значениями ароматов.

SPHENIX Новые исследования

Понимание того, как именно идеальная текучесть и другие коллективные свойства QGP возникают из ее точечных составляющих частиц, остается загадкой. Чтобы разгадать эту загадку, группа физиков-ядерщиков сформировала новое научное сотрудничество, которое расширит открытия, сделанные RHIC. Основное обновление детектора PHENIX под названием sPHENIX будет собирать необходимые данные. Еще не запущено (на момент октябрь 2021 год).



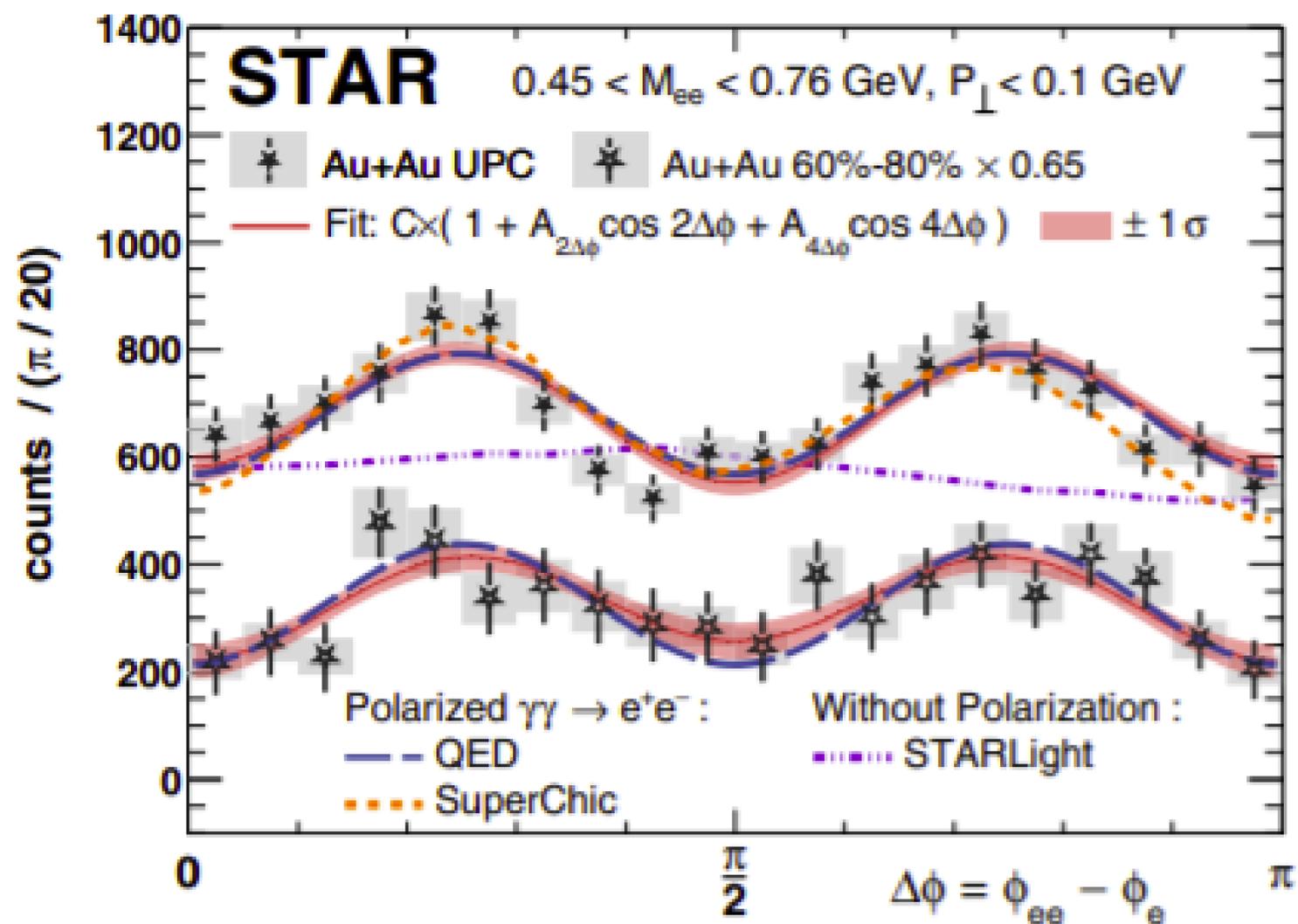


FIG. 4. The $\Delta\phi = \phi_{ee} - \phi_e$ distribution from UPCs and 60%–80% central collisions for $M_{ee} > 0.45$ GeV with calculations from QED [47], STARLight [43], and from the publicly available SUPERCHIC3 code [8].

Последние результаты коллаборации STAR

Measurement of $e + e^-$ Momentum and Angular Distributions from Linearly Polarized Photon Collisions 2021

Процесс Брейта-Уиллера, который производит материю и антивещество в результате столкновений фотонов, экспериментально исследуется путем наблюдения 6085 эксклюзивных электрон-позитронных пар в ультрапериферических столкновениях Au-Au $S_{nn} = (200)^{(1/2)}$ ГэВ.

Результаты

Процесс Брейта-Уиллера, простейший механизм преобразования «квантов света» в материю и антивещество, ускользал от наблюдений на протяжении десятилетий, несмотря на то, что он активно преследовался. Идея о том, что вы можете создать материю из столкновения света, является яркой демонстрацией увековеченной физики.

Недавно коллаборация STAR опубликовала в журнале *Physical Review Letters* «Измерение импульса и углового распределения электрон-позитрон- пар от линейно поляризованных фотонов», в котором впервые представлены наблюдения процесса Брейта-Уиллера в столкновениях тяжелых ионов. Это открытие стало возможным благодаря уникальному анализу, который измерил квантовые корреляции спинового импульса образовавшейся пары электрон-позитрон, выявив поразительную угловую модуляцию 4-го порядка (график слайд 28).

Результаты

Виртуальные фотоны живут недолго, поскольку они передают электромагнитную силу и несут виртуальную массу. В то время как виртуальные фотоны могут находиться в состоянии спиральности 0, из-за их виртуальной массы, реальные фотоны не могут, и вместо этого должны иметь +/- 1 единицу спиральности. Это различие оказывает глубокое влияние на создаваемую пару электрон-позитрон, поскольку квантованный спин сталкивающихся фотонов кодируется в конечном импульсе образовавшихся электрона и позитрона, что приводит к наблюдаемому модулированному углу излучения ($\Delta\phi$).

Как показано на графике на слайде 28, данные STAR согласуются с расчетами процесса Брейта-Уиллера (QED), который предсказывает сильную модуляцию $\cos^4\Delta\phi$ от столкновения линейно поляризованных фотонов.

Результаты

Полученные особенности согласуются с расчетами QED для столкновения линейно поляризованных фотонов, квантованных из чрезвычайно сильных электромагнитных полей, генерируемых сильно заряженными ядрами Au с ультрарелятивистской скоростью. Экспериментальные результаты имеют значение для вакуумного двойного лучепреломления и для отображения магнитного поля, что важно для возникающих явлений КХД.

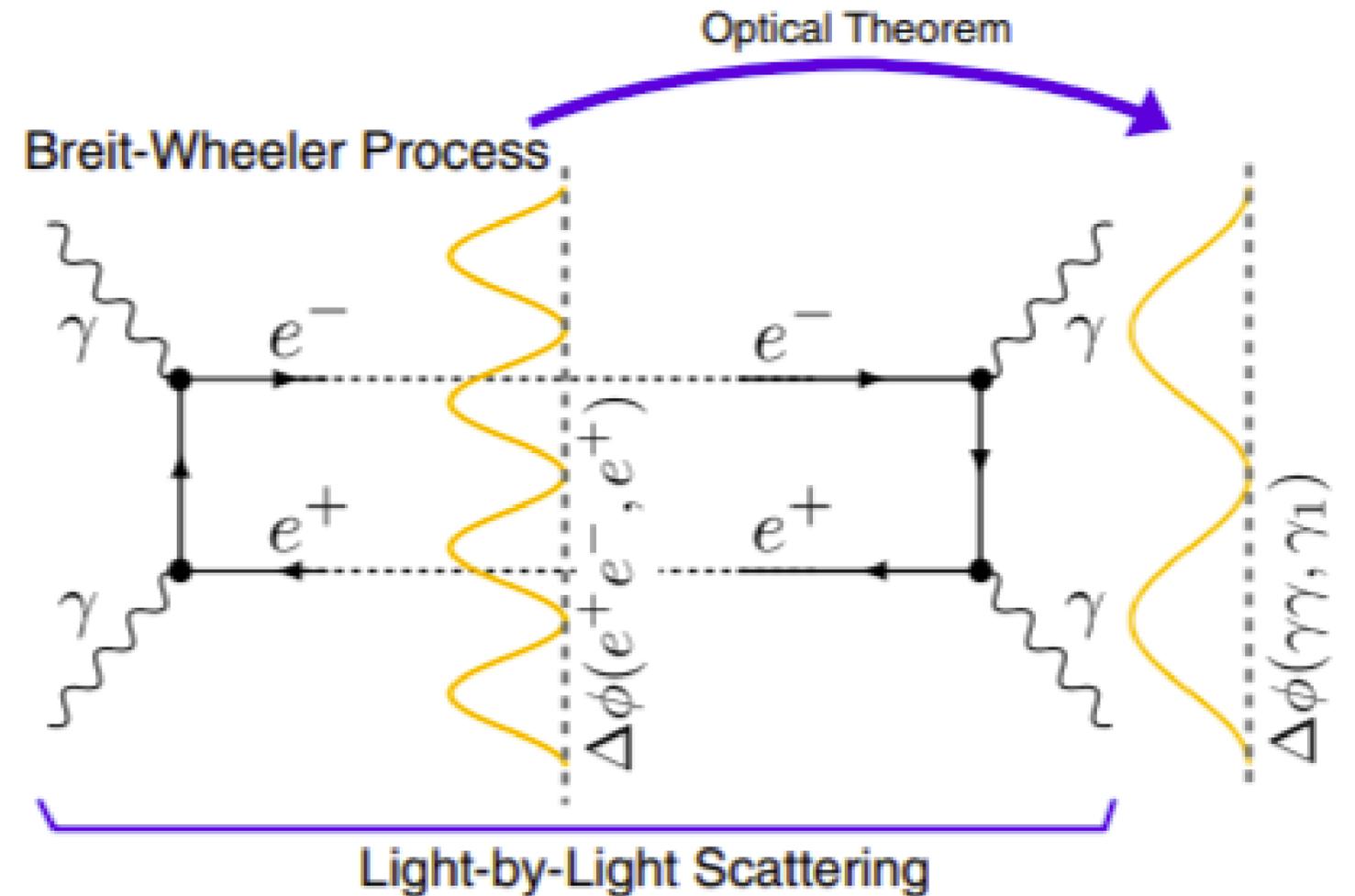


FIG. 1. A Feynman diagram for the exclusive Breit-Wheeler process and the related light-by-light scattering process illustrating the unique angular distribution predicted for each process due to the initial photon polarization.

Результаты

Измеренная $\cos^4\Delta\phi$ модуляция подтверждает еще одно заманчивое предсказание, сделанное несколько десятилетий назад. Долгое время ожидалось, что столкновения тяжелых ионов вызовут самые сильные магнитные поля во Вселенной, порядка 10^{15} Тесла. В 1930-х годах предсказали, что фотоны, стреляющие через такие сильные магнитные поля, могут «искривляться», несмотря на то, что сам фотон не заряжен и, следовательно, не взаимодействует напрямую с электромагнитным полем. Однако в квантовой механике реальный фотон может ненадолго флуктуировать в пару электрон-позитрон, которая может взаимодействовать с сильными электромагнитными полями. Ключевое предсказание этого эффекта, называемого двойным лучепреломлением вакуума, состоит в том, что путь фотона разделяется в зависимости от угла между поляризацией фотона и направлением магнитного поля.

Результаты

В недавнем измерении STAR сталкивающиеся фотоны являются результатом сильно усиленных электромагнитных полей тяжелых ионов, поэтому направление поляризации фотона напрямую связано с классическим направлением электрического и магнитного полей. Следовательно, наблюдаемую $\cos^4\Delta\phi$ модуляцию можно понять с точки зрения поглощения света, когда поляризация фотона (от одного иона) параллельна, а не перпендикулярна направлению магнитного поля (создаваемого другим ионом).

Этот эффект поглощения напрямую связан с двойным лучепреломлением вакуума и обеспечивает *первое экспериментальное подтверждение того, что столкновения тяжелых ионов действительно создают сверхсильные магнитные поля* (примерно 10^{15} Тл).

Программа экспериментов

Experimental Programs

- [BRAHMS](#)
- [PHENIX](#)
- [PHOBOS](#)
- [STAR](#)
- [pp2pp](#)
- [Zero Degree Calorimeter](#)
- [Electron-Ion Collider Collaboration](#)
- [RHIC II](#)

**Спасибо
за внимание**