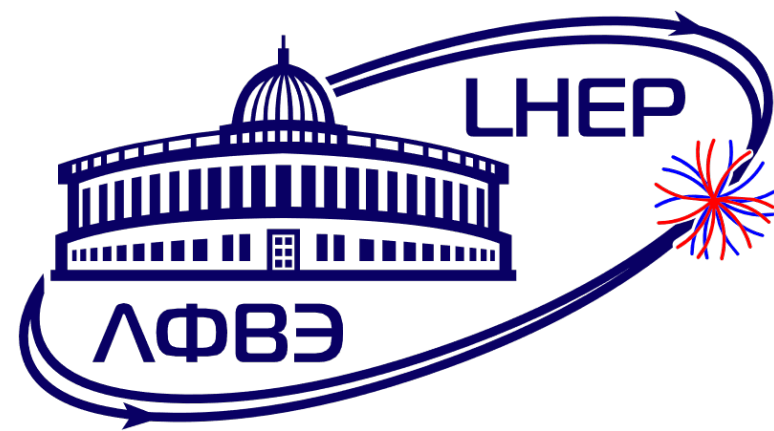




Литературный обзор



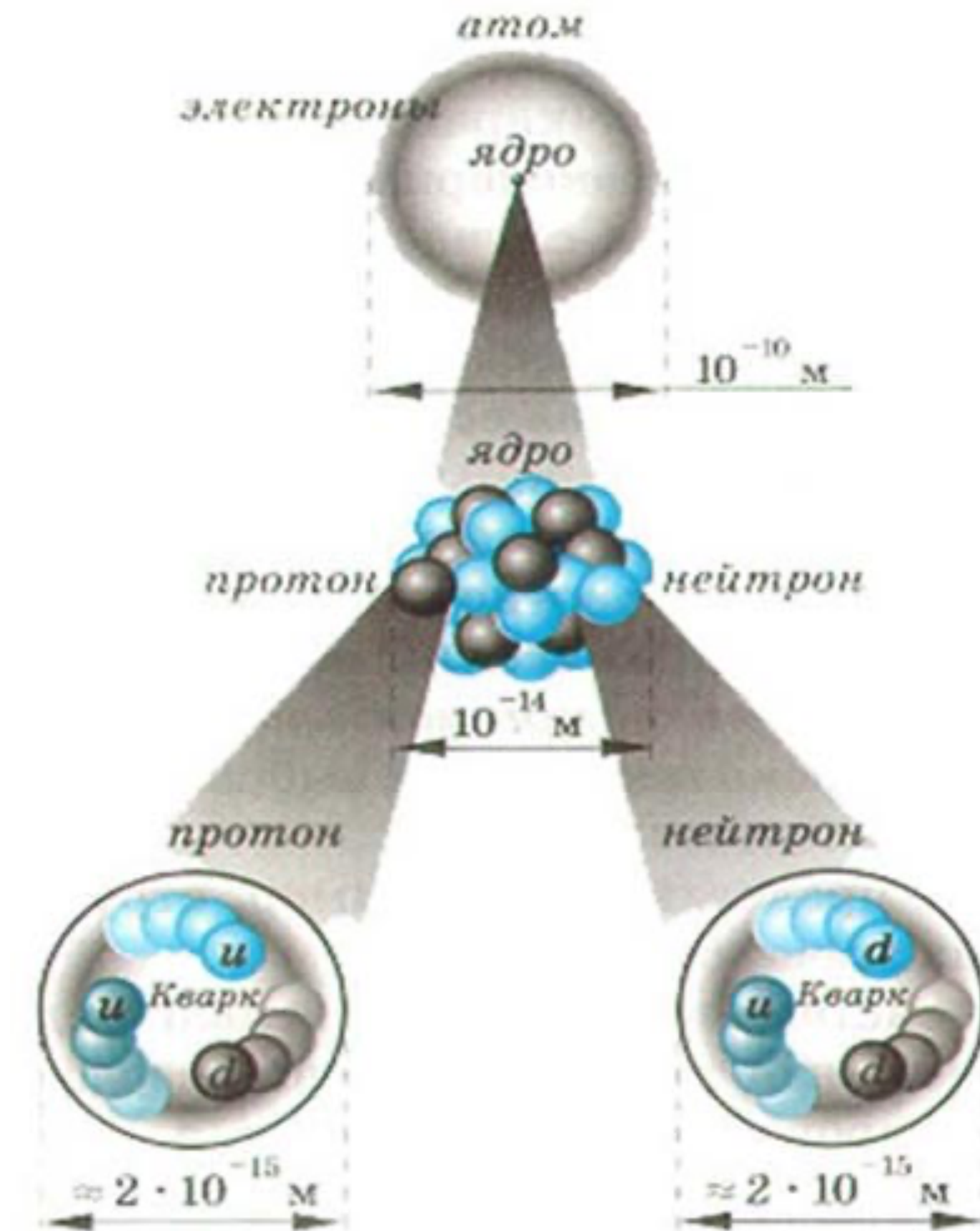
Литературный обзор по теме «Ион-ионные исследования в первой фазе эксперимента SPD»
(«Методика диагностики и калибровки сцинтилляционных детекторов с помощью рентгеновского сканирования»)

**Дуров Андрей
НИЯУ МИФИ**

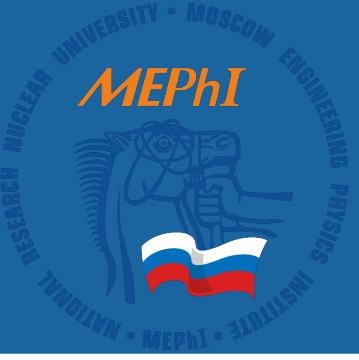
13th May 2026, Moscow

Сильное взаимодействие и структура ядерной материи

- 1911 — Э. Резерфорд: ядерная модель атома
Атом имеет компактное массивное ядро, окружённое электронной оболочкой.
- 1932 — Дж. Чедвик: открытие нейтрона
Ядро состоит из протонов и нейтронов, что объясняет массы и структуру атомных ядер.
- 1935 — Х. Юкава: мезонная теория ядерных сил
Ядерное притяжение между нуклонами возникает за счёт обмена массивными мезонами.
- 1964 — М. Гелл-Манн, Дж. Цвейг: кварковая модель адронов
Протоны, нейтроны и другие адроны имеют внутреннюю кварковую структуру.
- 1973 — Д. Гросс, Ф. Вильчек, Д. Политцер: асимптотическая свобода и КХД (Квантовая хромодинамика, QCD)
Сильное взаимодействие ослабевает на малых расстояниях и описывается квантовой хромодинамикой.



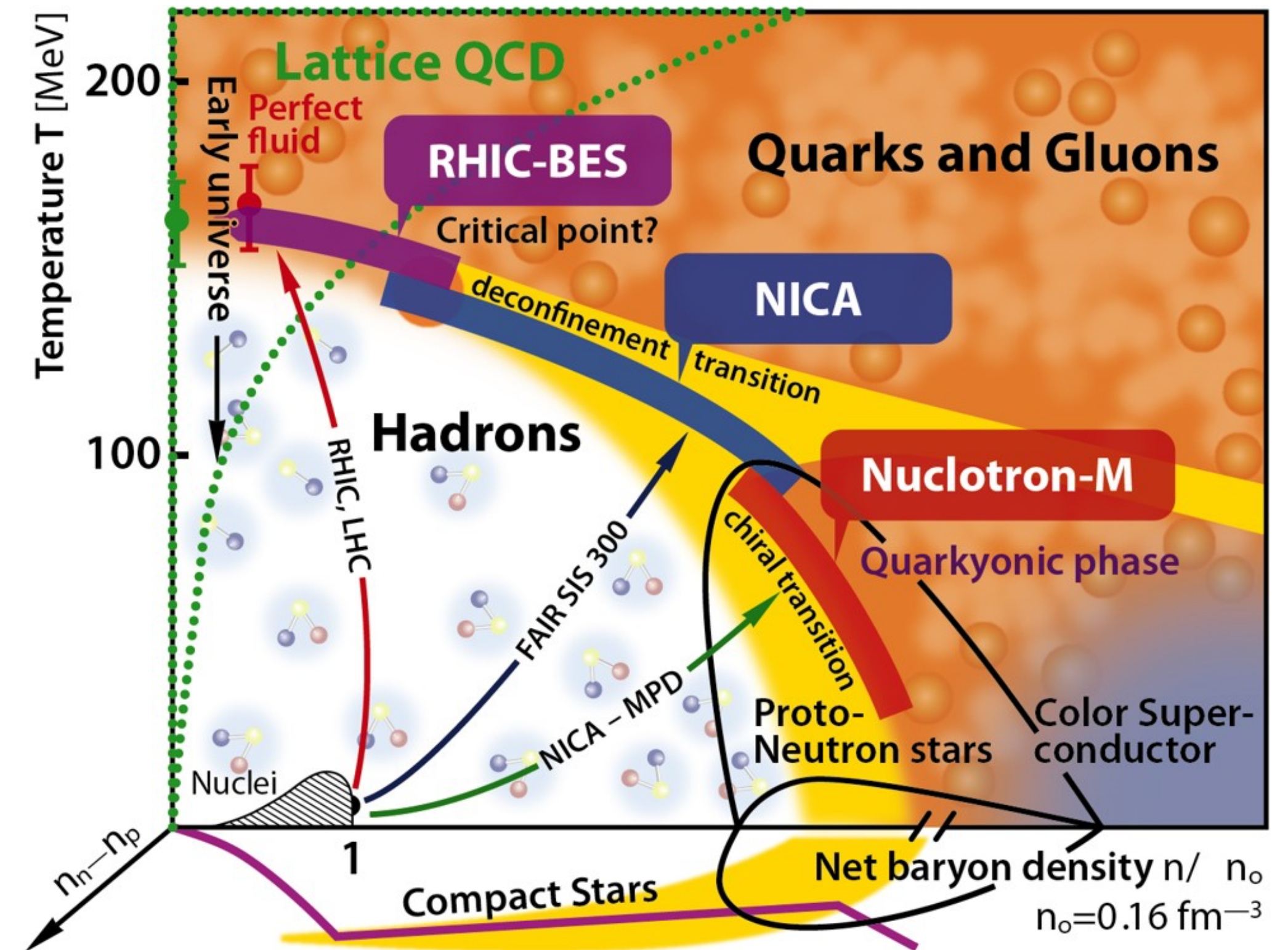
Сильное взаимодействие определяет как устойчивость ядер, так и внутреннюю структуру адронов.



Квантовая хромодинамика и фазовая диаграмма сильно взаимодействующей материи

- КХД описывает взаимодействие кварков и глюонов
- Конфайнмент: свободные кварки не наблюдаются
- Асимптотическая свобода: взаимодействие ослабевает при больших Q^2

$$\alpha_s(Q^2) \sim \frac{1}{\ln(Q^2/\Lambda_{QCD}^2)}$$

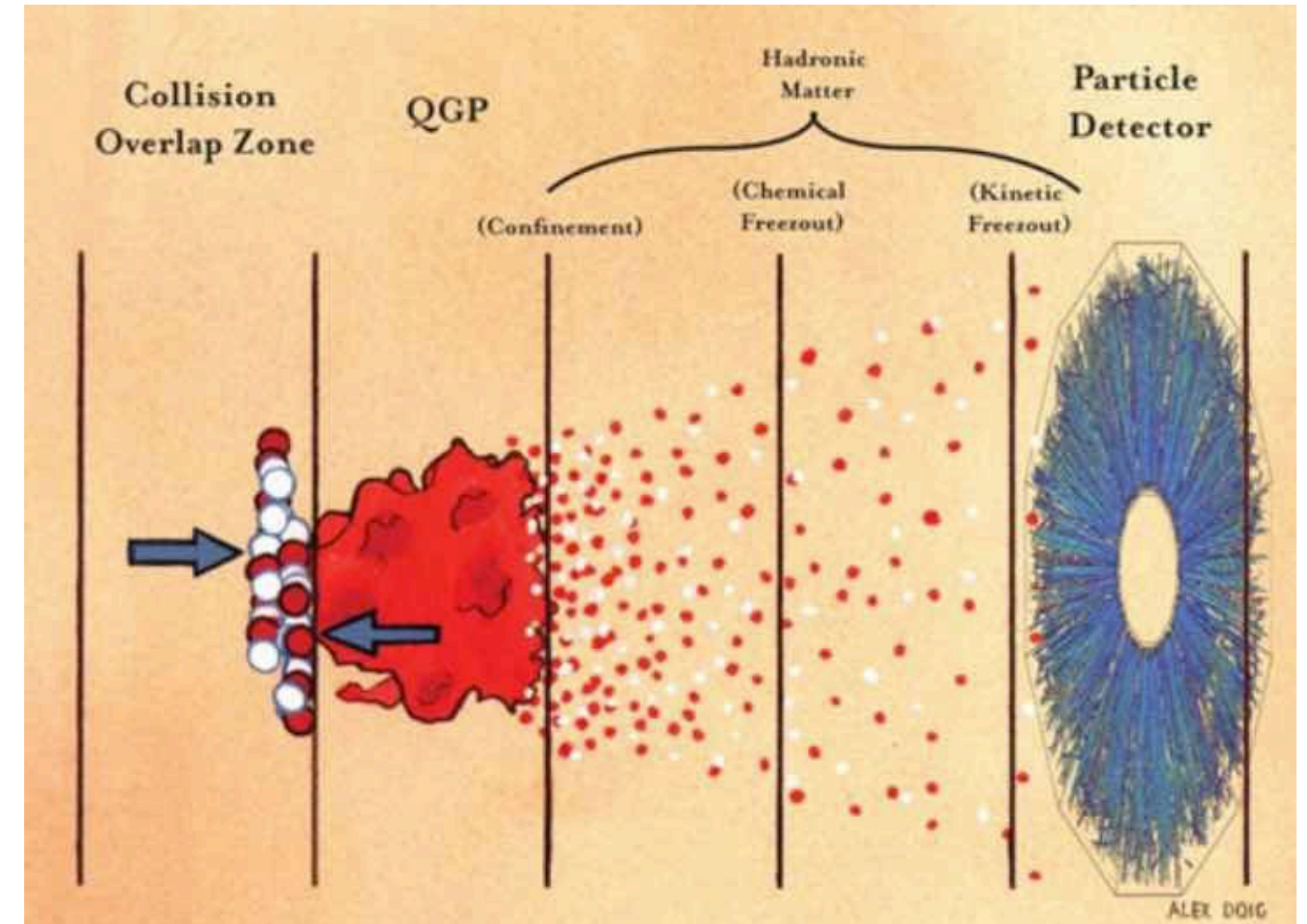


Чтобы экспериментально изучать эту фазовую диаграмму, необходимо создавать горячую и плотную ядерную материю в экспериментальных условиях. Основным инструментом для этого являются релятивистские столкновения тяжёлых ионов.

Схема столкновения:

два ядра \rightarrow область перекрытия \rightarrow горячая среда \rightarrow разлёт частиц

- Центральность определяется геометрией столкновения
- Большая множественность частиц характеризуется $dN_{ch}/d\eta$
- При изменении энергии столкновения меняются T и μ_B
- Центральные события создают максимальную нагрузку детекторов



Тяжёлые ионы являются инструментом для изучения фазовой диаграммы КХД и одновременно наиболее сложным режимом для детекторных систем.



Экспериментальные исследования кварк-глюонной материи

После появления идеи кварк-глюонной плазмы возникла экспериментальная задача: **найти признаки состояния, в котором кварки и глюоны уже не заперты внутри отдельных адронов.** Однако напрямую увидеть КГП невозможно. Она живёт время, порядка 10^{-23} с, а в детектор долетают уже конечные частицы - адроны, фотоны, лептоны и продукты распадов.

В связи с чем, эксперименты нацелены на поиск не самой КГП, а на исследование совокупности сигналов:

- аномальное подавление кваркониев
- усиление странности
- коллективное течение
- подавление высокоэнергетических частиц и струй
- изменение спектров и корреляций

Исторически ключевыми экспериментальными этапами стали SPS, RHIC и LHC

Эксперименты на SPS

- 1980–1990-е годы — программа тяжёлых ионов на SPS в CERN

- С 1994 года — столкновения Pb–Pb при энергиях SPS

- Основные экспериментальные признаки:

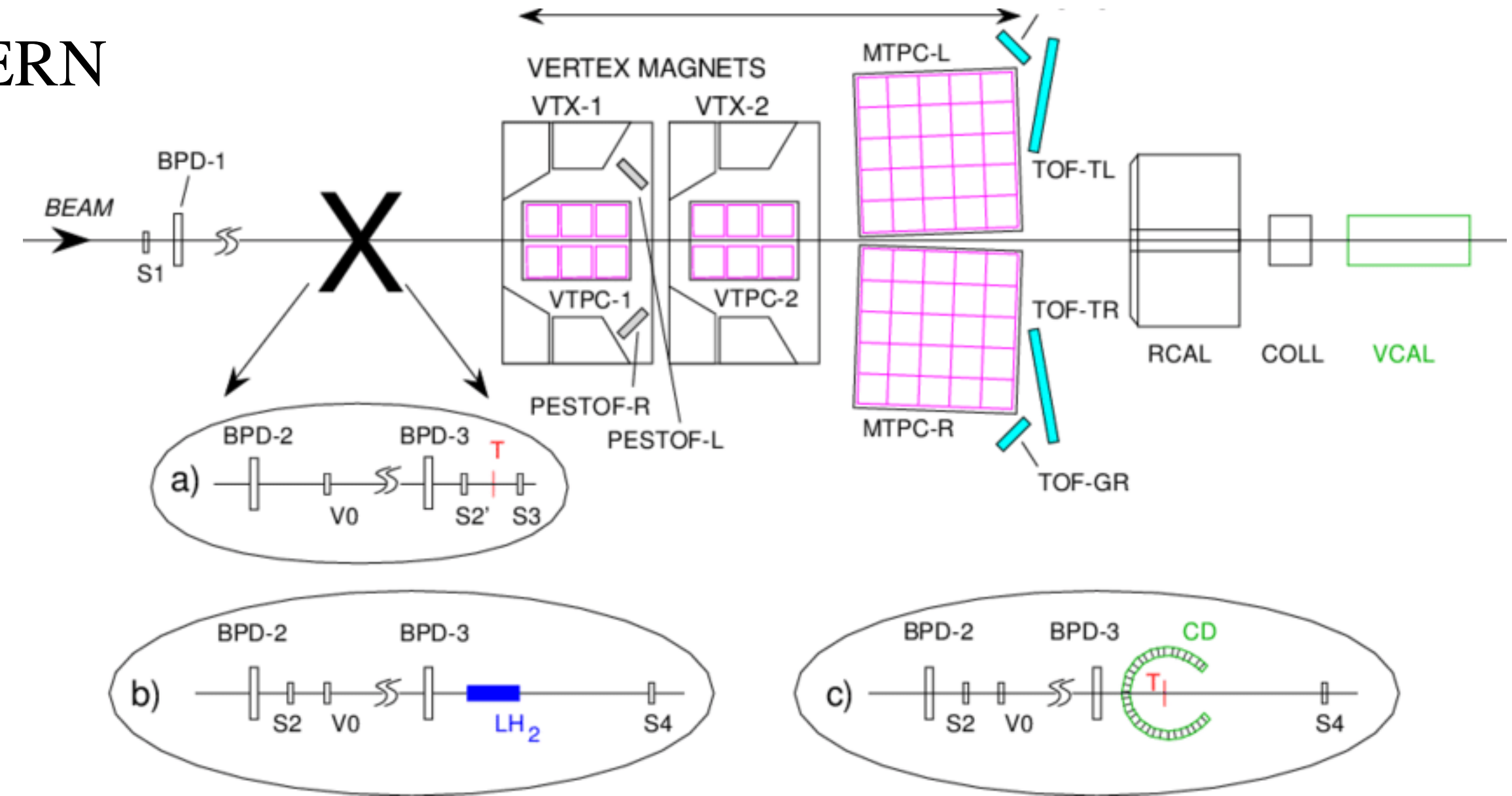
- подавление J/Ψ

- усиление рождения странных частиц

- электромагнитные пробники: фотоны и дилептоны

- признаки коллективного расширения системы

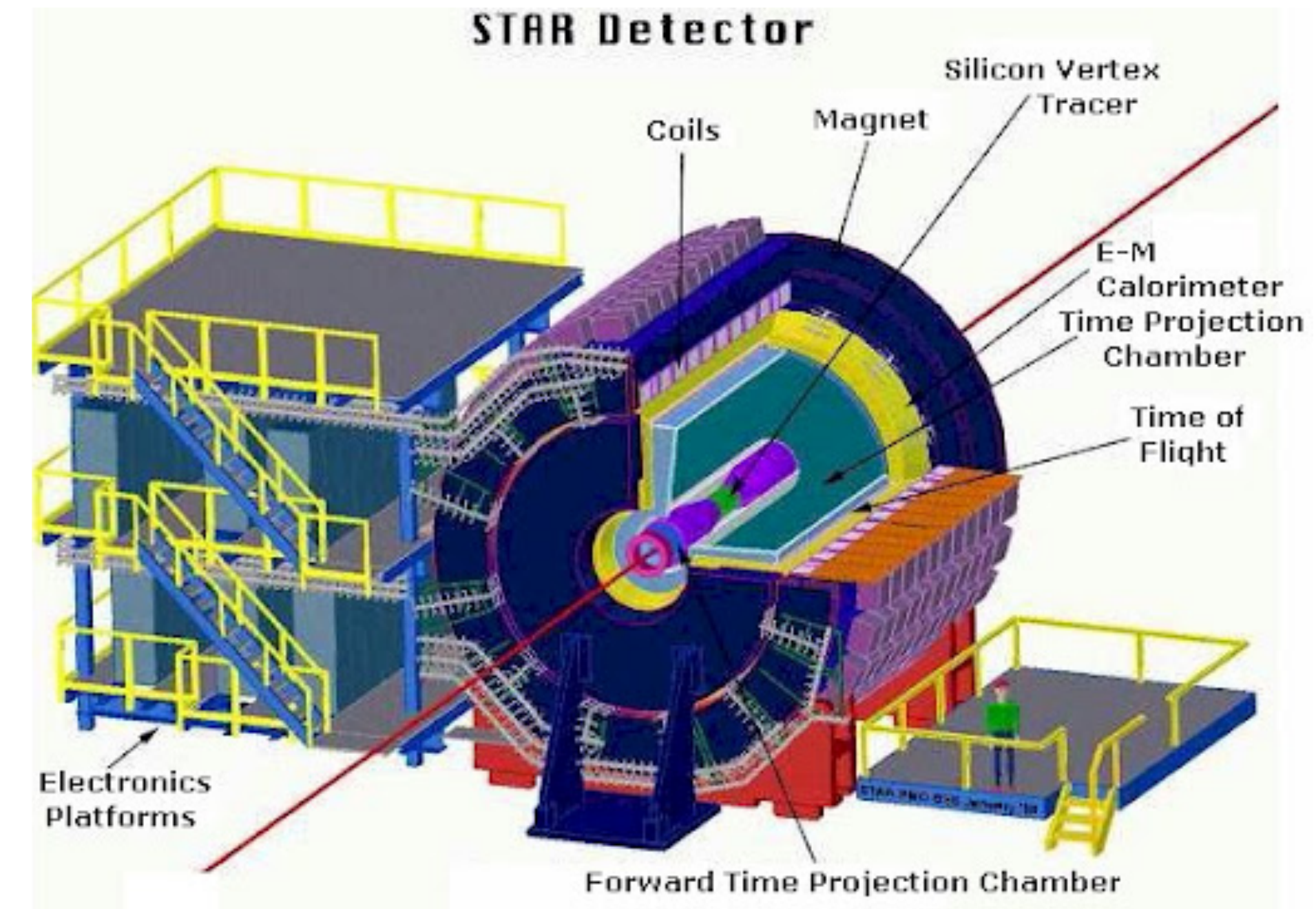
- В 2000 году CERN заявил о получении убедительных свидетельств образования нового состояния материи



Итог SPS:

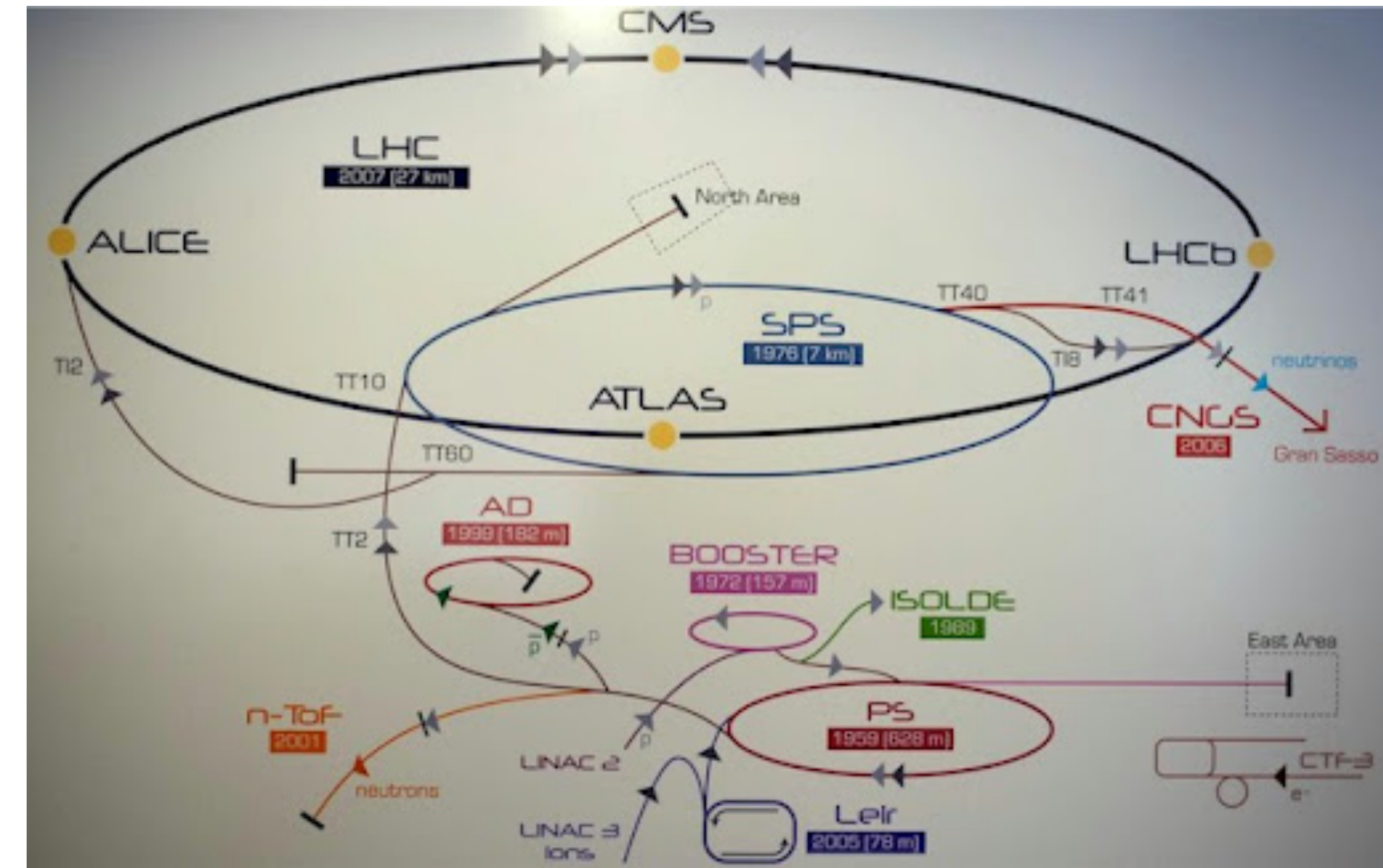
Сформирована экспериментальная база для утверждения, что в А–А столкновениях может возникать деконфайнментная среда

- 2000 — начало работы RHIC в Brookhaven National Laboratory
- Основная система: Au–Au столкновения при релятивистских энергиях
- Ключевые результаты:
 - сильное коллективное течение
 - большие значения эллиптического потока v_2
 - подавление частиц с большими поперечными импульсами
 - потери энергии партонов в плотной среде
- Данные RHIC показали:
КГП ведёт себя не как слабосвязанный газ, а как сильно взаимодействующая почти идеальная жидкость
- RHIC Beam Energy Scan:
переход к изучению фазовой диаграммы КХД при различных μ_B

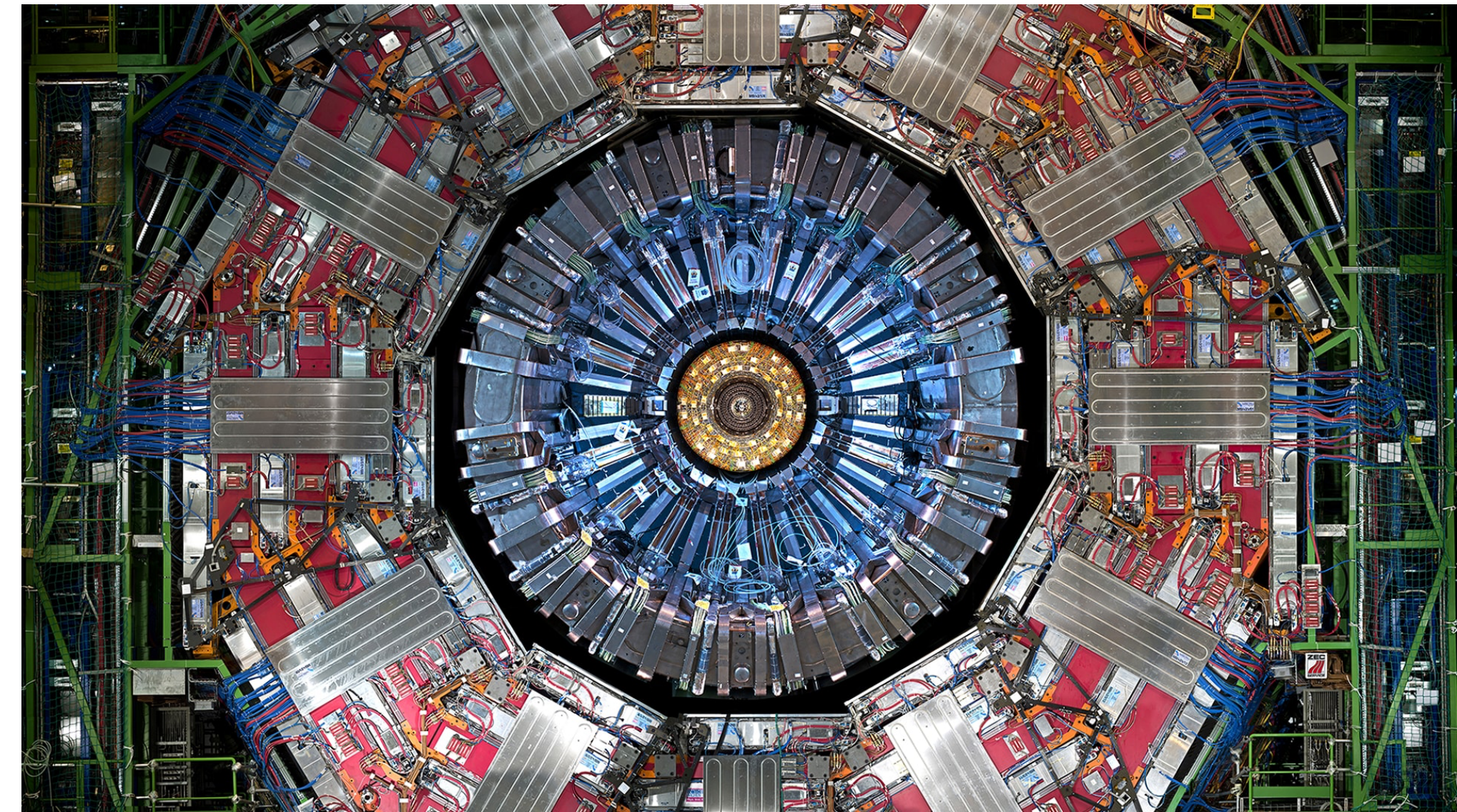


Эксперименты на ЛНС

- С 2010 года — тяжёлоионная программа ЛНС в CERN
- Основная система: Pb–Pb столкновения при сверхвысоких энергиях
- Ключевой эксперимент: ALICE
также важные результаты получают ATLAS, CMS и LHCb
- Основные направления:
 - коллективное течение и свойства среды
 - подавление и модификация струй
 - heavy flavour: charm и beauty
 - кварконии
 - малые системы: p–Pb и высокомножественные p–p
- ЛНС изучает КГП при максимальных температурах и малом μB
- Область больших барионных плотностей требует экспериментов при промежуточных энергиях

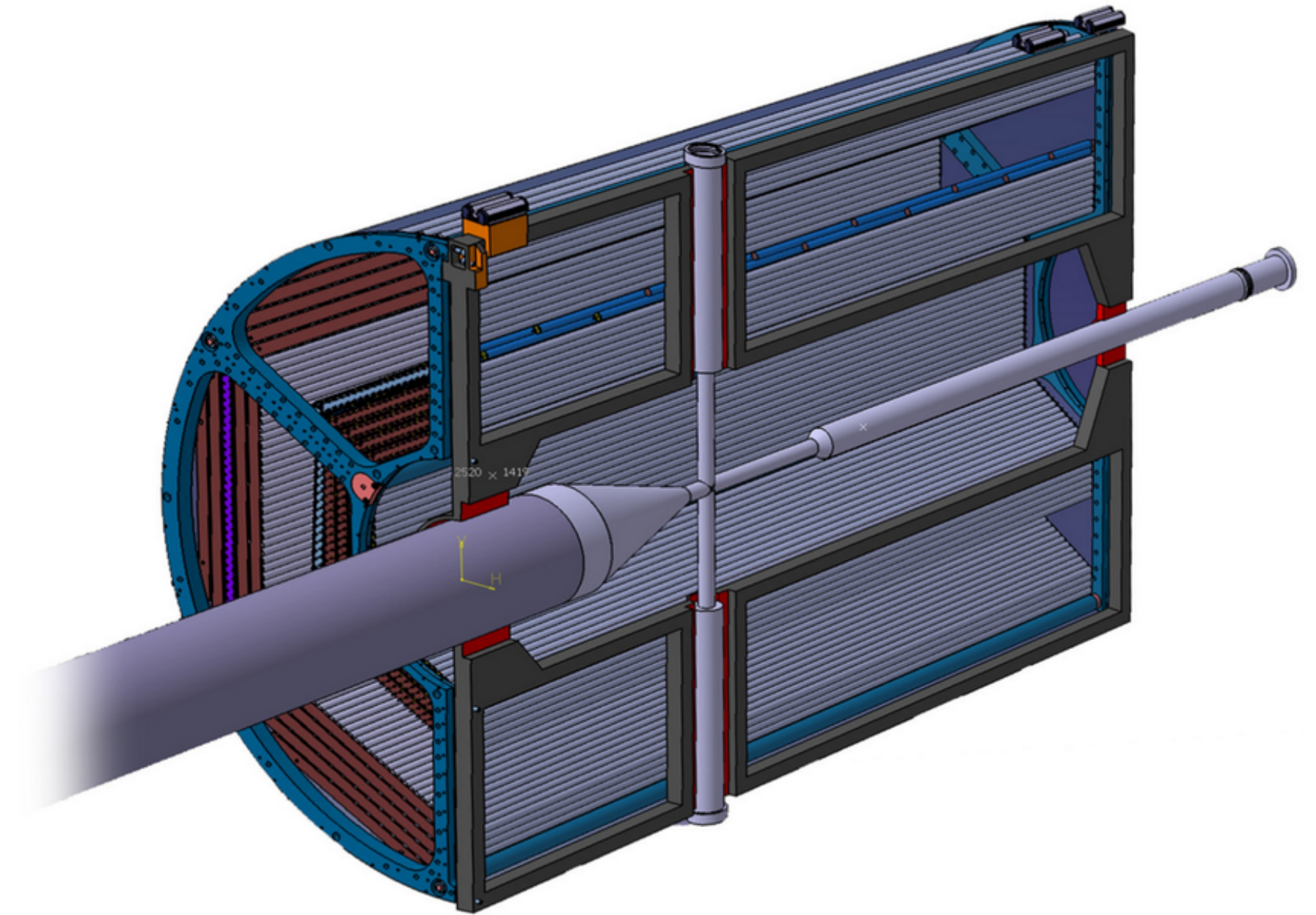


- Трековые детекторы регистрируют траектории заряженных частиц по набору хитов
- В магнитном поле кривизна трека позволяет определить импульс и знак заряда частицы
- Основные задачи:
 - реконструкция треков
 - измерение импульса
 - восстановление первичных и вторичных вершин
 - помощь в идентификации частиц
- Основные технологии:
газовые камеры, ТРС, straw tubes, кремниевые стриповые и пиксельные детекторы
- В тяжёлоионных столкновениях высокая множественность частиц увеличивает hit rates и усложняет реконструкцию
- Ключевые характеристики:
пространственное разрешение, эффективность, $\Delta p/p$, материальный бюджет, hit rate



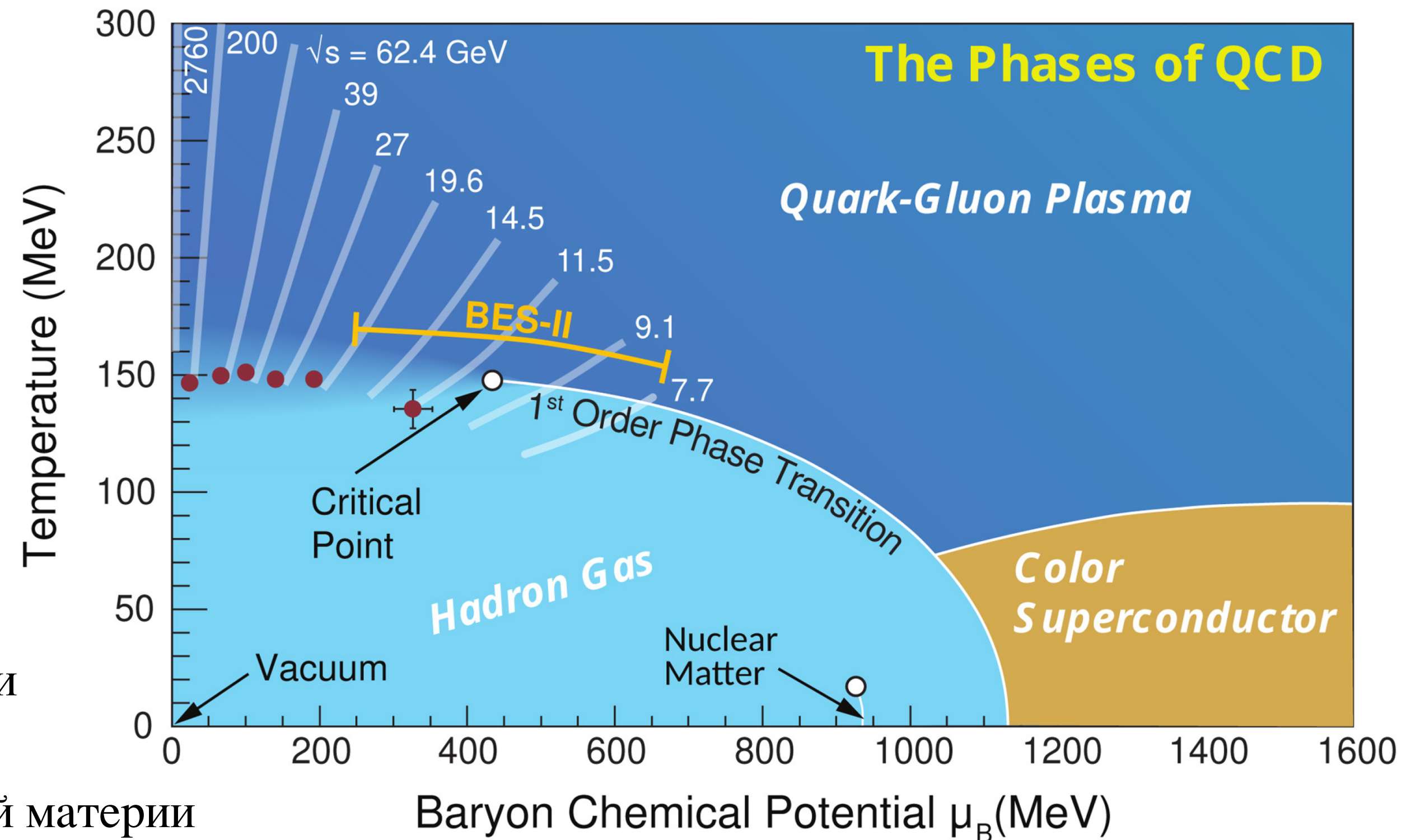
Straw-трекеры: принципы работы и ограничения

- Straw tube — тонкая газовая дрейфовая трубка с анодной проволокой внутри
- Заряженная частица ионизует газ; электроны дрейфуют к аноду и создают лавинный сигнал
- Время дрейфа позволяет восстановить расстояние от трека до проволоки:
 $r = r(t_d)$
- Система многих трубок используется для восстановления траекторий заряженных частиц
- Преимущества:
малая материальная толщина, модульность, большой объём, хорошее координатное разрешение
- Ограничения:
hit rates, occupancy, dead time, наложение сигналов
- В центральных ионных столкновениях высокая множественность частиц может существенно увеличить загрузку straw-трекера



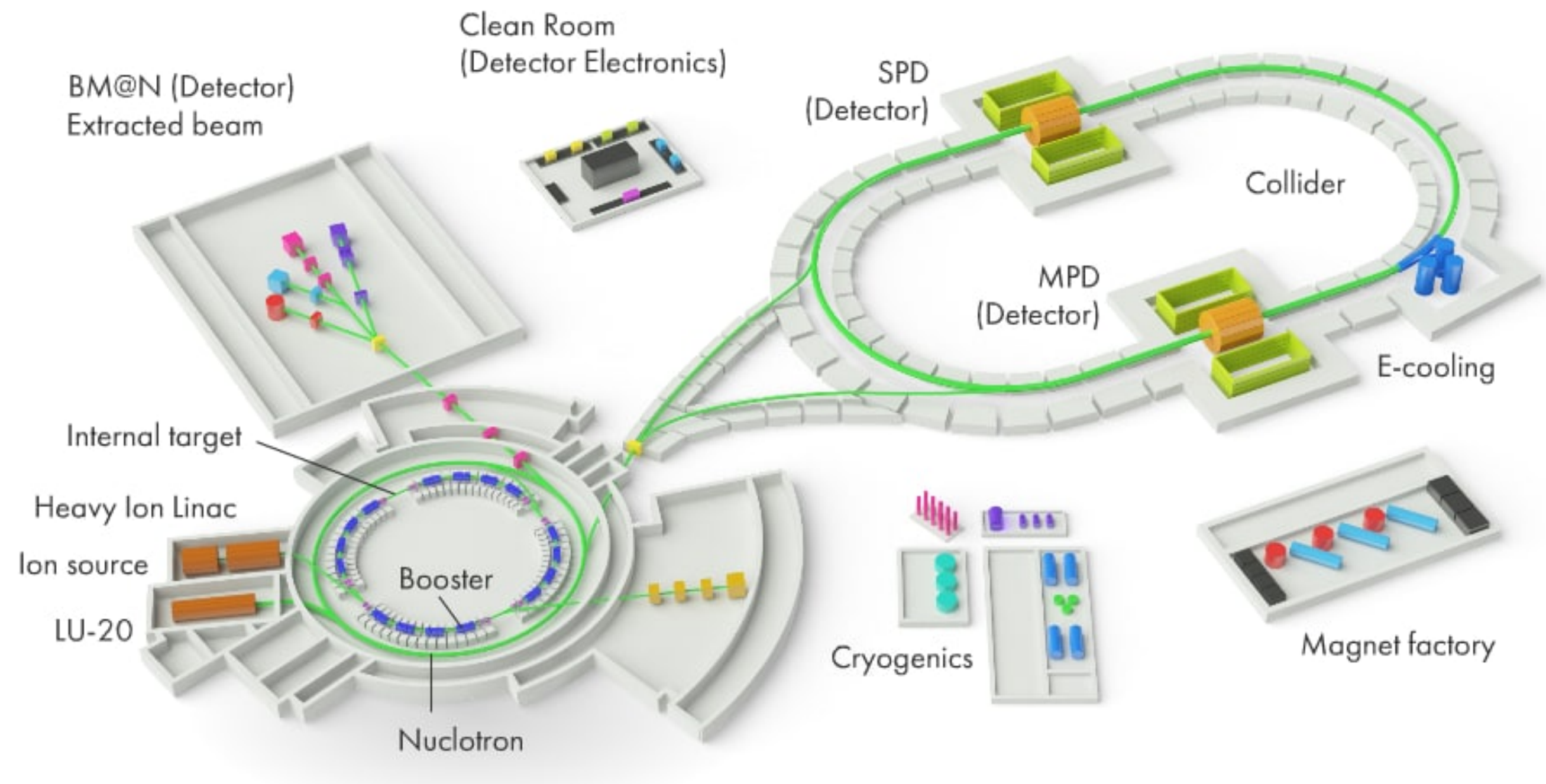
Современные программы при промежуточных энергиях

- Промежуточные энергии позволяют исследовать область больших барионных плотностей на фазовой диаграмме КХД
- При таких энергиях возрастает роль барионного торможения, и в области столкновения формируется плотная барионная материя
- Основные физические цели:
 - поиск фазового перехода первого рода
 - поиск критической точки КХД
 - изучение флуктуаций и корреляций
 - исследование странности, дилептонов и гиперядер
- Современные программы:
 - RHIC BES — сканирование энергии столкновения
 - FAIR/CBM — high-rate физика плотной барионной материи
 - NICA — область максимальной барионной плотности
 - J-PARC-NI — будущая программа сверхплотной барионной материи
- Эти программы дополняют ЛНС, исследуя область больших μ_B



Комплекс NICA и эксперименты MPD/SPD

- NICA — ускорительный комплекс ОИЯИ для исследования сильно взаимодействующей материи при промежуточных энергиях
- Основная физическая область:
плотная барионная материя и большие значения μ_B на фазовой диаграмме КХД
- MPD — многоцелевой детектор для тяжёлоионных столкновений:
поиск новых явлений в барионно-богатой области фазовой диаграммы КХД
- SPD — универсальный детектор NICA с основной программой в области спиновой физики
- Исследование свойств кварк-глюонной материи в малых системах, влияние начального состояния на динамику системы, динамика и эффекты конечного состояния, транспортные коэффициенты, рождение тяжёлых кварков, диссоциация и рекомбинация оступ к J/ψ и другим чармониям через каналы распада на диэлектронные и димюонные пары



Почему SPD:

- Высокая частота срабатываний триггера и высокая пространственная точность
- Широкая область по псевдобыстроте
- Дополняет установку MPD, но обладает уникальными физическими возможностями



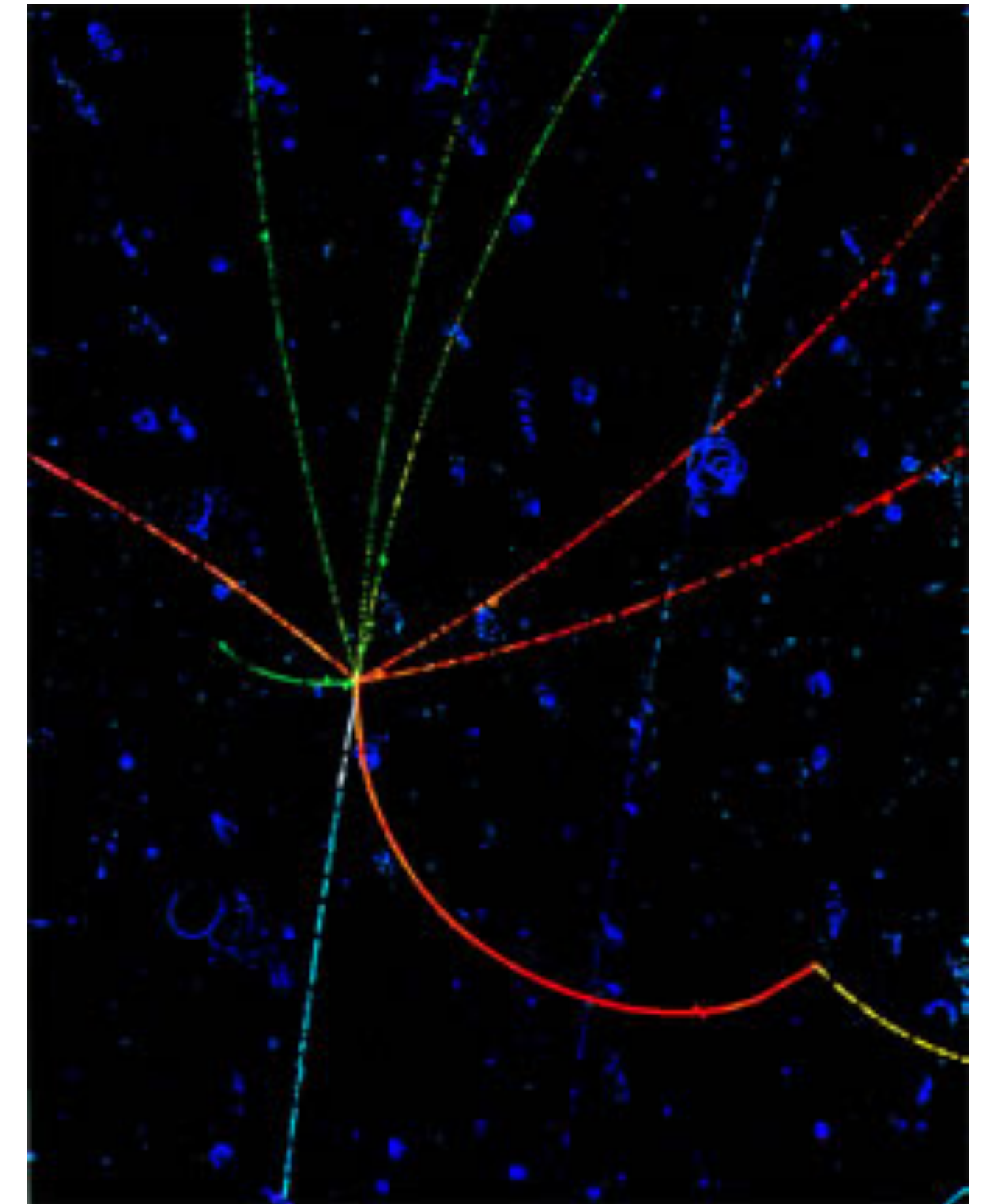
Заключение

- Кварк-глюонная материя была экспериментально исследована на SPS, RHIC и LHC
- Основной открытый вопрос — поведение сильно взаимодействующей материи при больших барионных плотностях
- Промежуточные энергии позволяют изучать область больших μ_B на фазовой диаграмме КХД
- NICA является одной из ключевых установок для исследования плотной барионной материи
- Ионные столкновения в SPD создают высокую множественность частиц и повышенные hit rates
- Оценка загрузки Straw Tracker и BBC необходима для определения возможностей SPD в ионных режимах

Thank you for your attention!

BACK-UP SLIDES

- Ранние эксперименты:
камеры Вильсона, пузырьковые камеры, ядерные эмульсии - визуальный анализ треков по фотографиям
- Электронные детекторы:
дрейфовые камеры, многопроволочные камеры, ТРС, straw tubes -трек задаётся набором координатных измерений — хитов
- Ранние алгоритмы:
поиск прямых и окружностей, шаблонные методы, преобразование Хафа
- Рост энергии и множественности событий:
больше хитов → больше случайных комбинаций → сложнее поиск треков
- Современная реконструкция:
seeding → track following → track fitting → quality selection
- Ключевой метод современной реконструкции:
фильтр Калмана для последовательного уточнения параметров трека



- Вход алгоритма:
набор хитов в слоях трекового детектора
- Основные этапы:
seeding — поиск начальных кандидатов треков
track following — продолжение кандидата через слои детектора
track fitting — уточнение параметров трека
quality selection — отбор треков по качеству
- Фильтр Калмана:
последовательное обновление параметров трека при добавлении новых измерений
- Основные проблемы:
комбинаторика, fake tracks, clone tracks, пропущенные хиты, шум
- В тяжёлоионных столкновениях:
высокая множественность → больше хитов → сложнее реконструкция
- Для straw-трекеров дополнительно важны:
left-right ambiguity, hit rates, occupancy, наложение сигналов

