

федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение

высшего профессионального образования  
Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

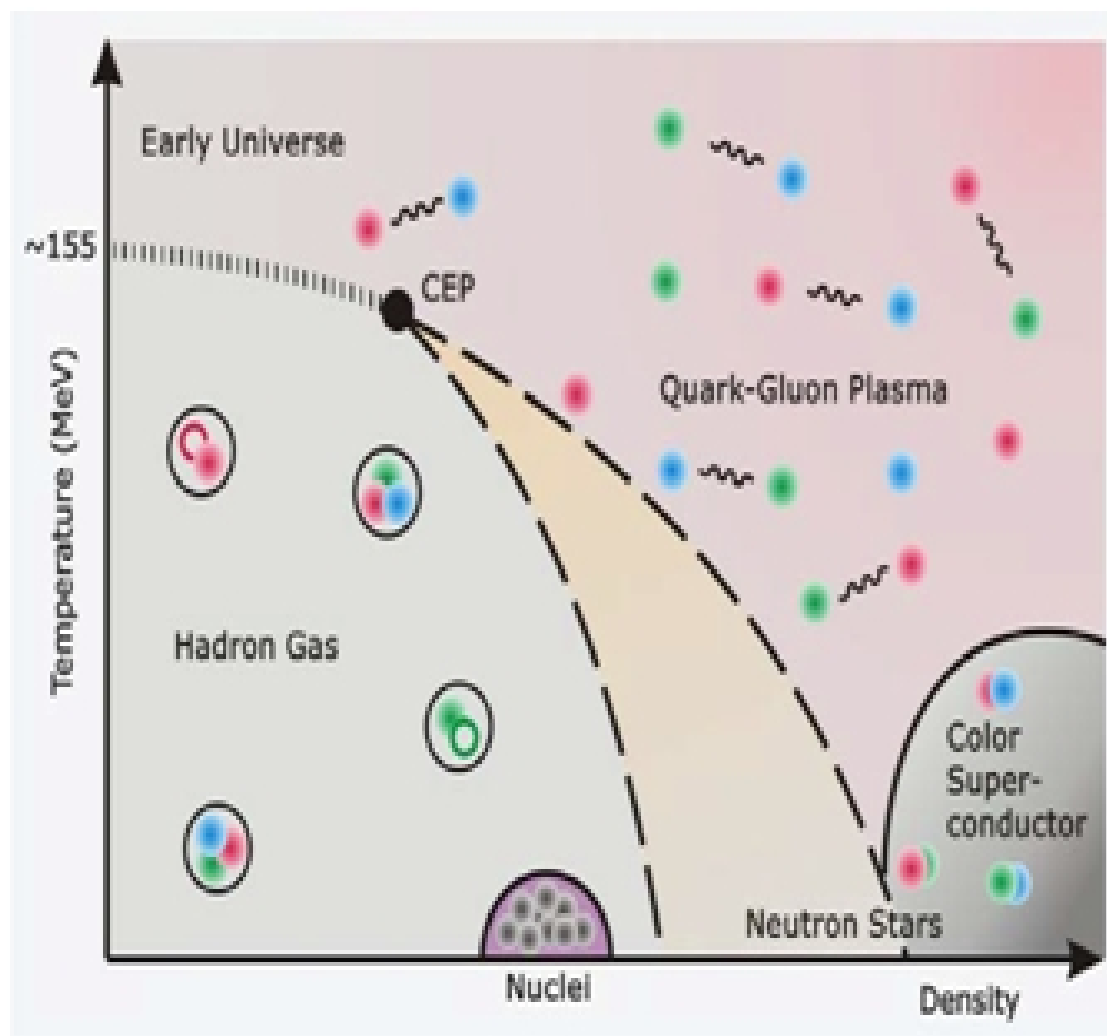
кафедра физики элементарных частиц

Изучение особенностей фазового перехода адронная  
материя - сильно взаимодействующая кварк-глюонная  
плазма.

Investigation of features of the quark gluon plasma to  
hadronic matter phase transition.

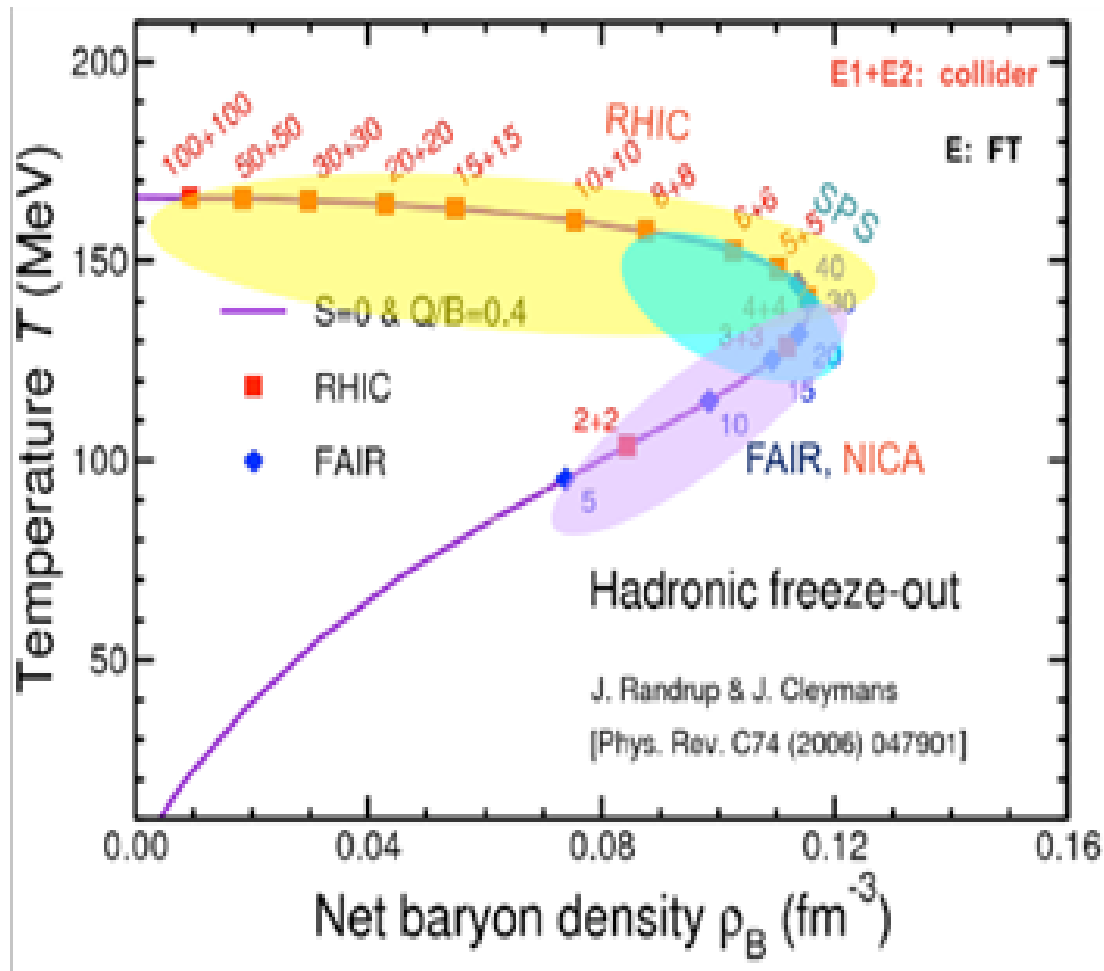
Первышина Елена Андреевна  
Научный руководитель к. ф.-м. н. А. А. Апарин

## Фазовый переход в ядерной материи



- Физика тяжелых ионов занимается исследованием ядерных реакций, переходом одних ядер в другие, синтезом новых ядер; позволяет изучать коллективные ядерные процессы, характеризующиеся предельно большими изменениями ядерной формы, сильным перераспределением энергии между различными степенями свободы систем.
- В качестве основы теории сильного взаимодействия используется квантовая хромодинамика (КХД).
- КХД представляет собой теорию сильного взаимодействия, явления удержания кварков были следствием непertурбативной структуры вакуума и эта вакуумная структура модифицирована при высоких значениях температуры и плотности таким образом, что кварки и глюоны находятся в квази-свободном состоянии (явление деконфайнмента).
- Для описания КХД в состоянии равновесия вводятся два важных внешних параметра: температура  $T$  и барионная плотность.
- Прямые вычисления свойств системы на основе лагранжиана КХД на решетках указывают на то, что плотность энергии и температура, достигнутая в центральных столкновениях ядер золота на Релятивистском коллайдере тяжелых ионов (RHIC) достаточна, чтобы наблюдать сигнатуры возможного фазового перехода от адронных к кварк-глюонным степеням свободы. Основная задача экспериментальных ядерных программ заключается в установлении фазовой диаграммы состояния ядерной материи, включающей определение фазовых границ, поиске критических точек.

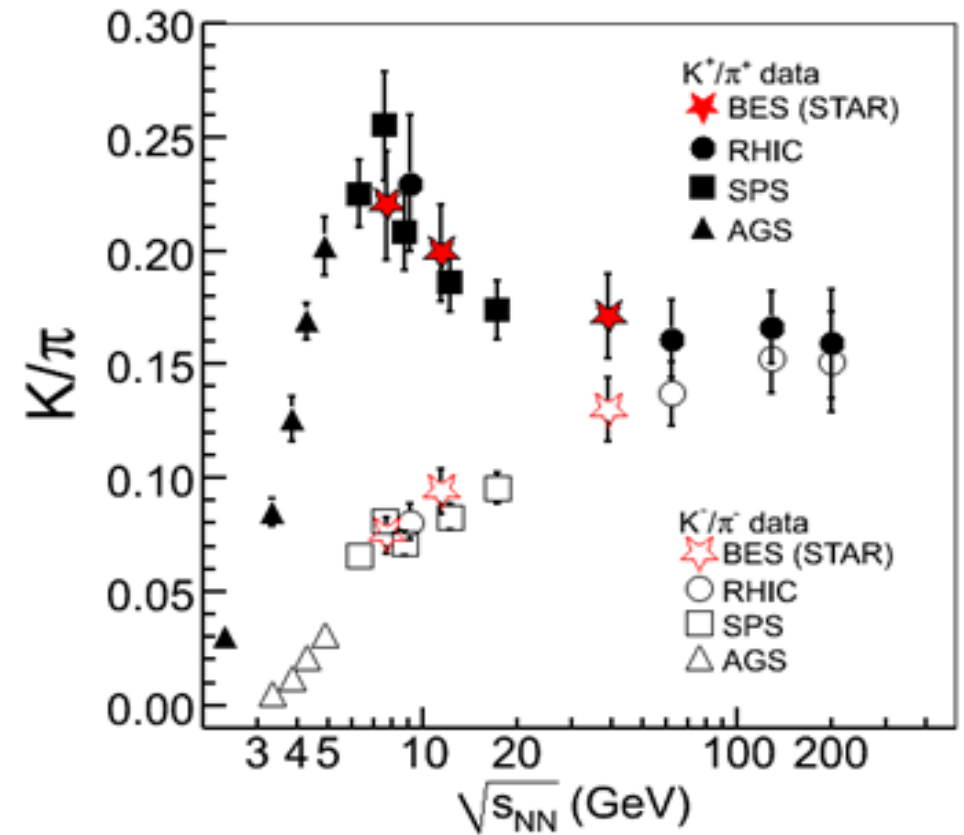
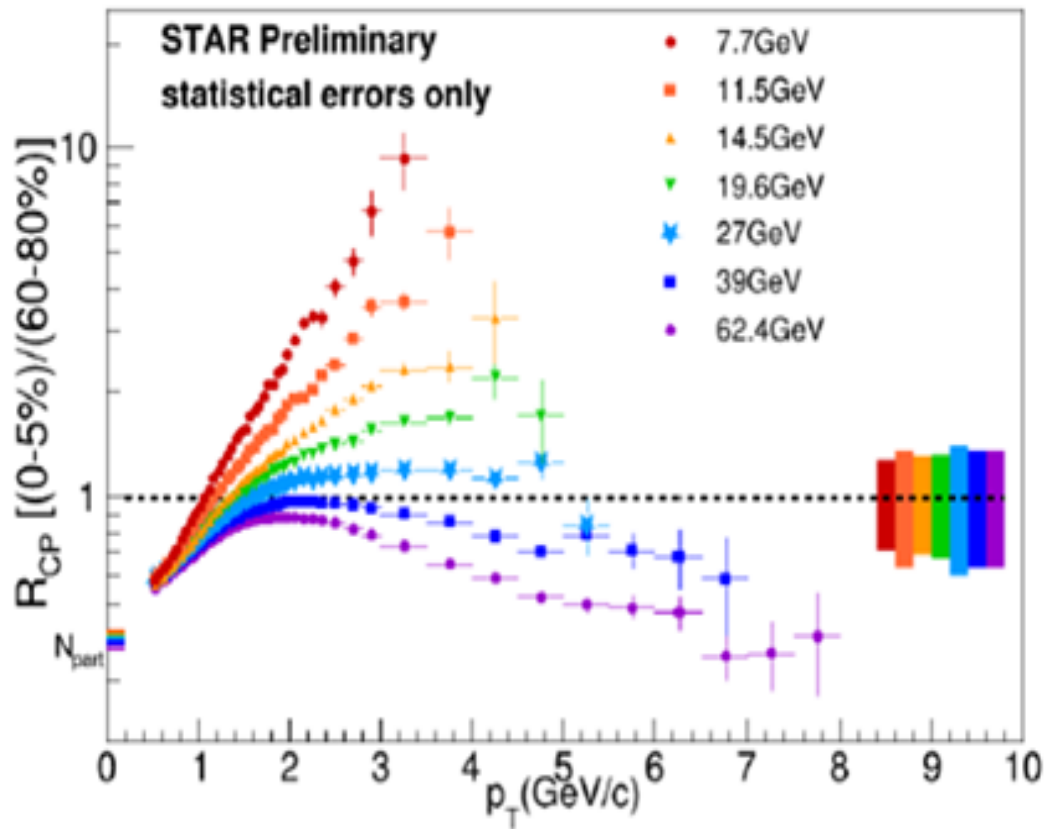
# Фазовый переход в ядерной материи



## New state of matter:

- Highest baryon density
- Soft equation of state?
- Hydrodynamic properties?

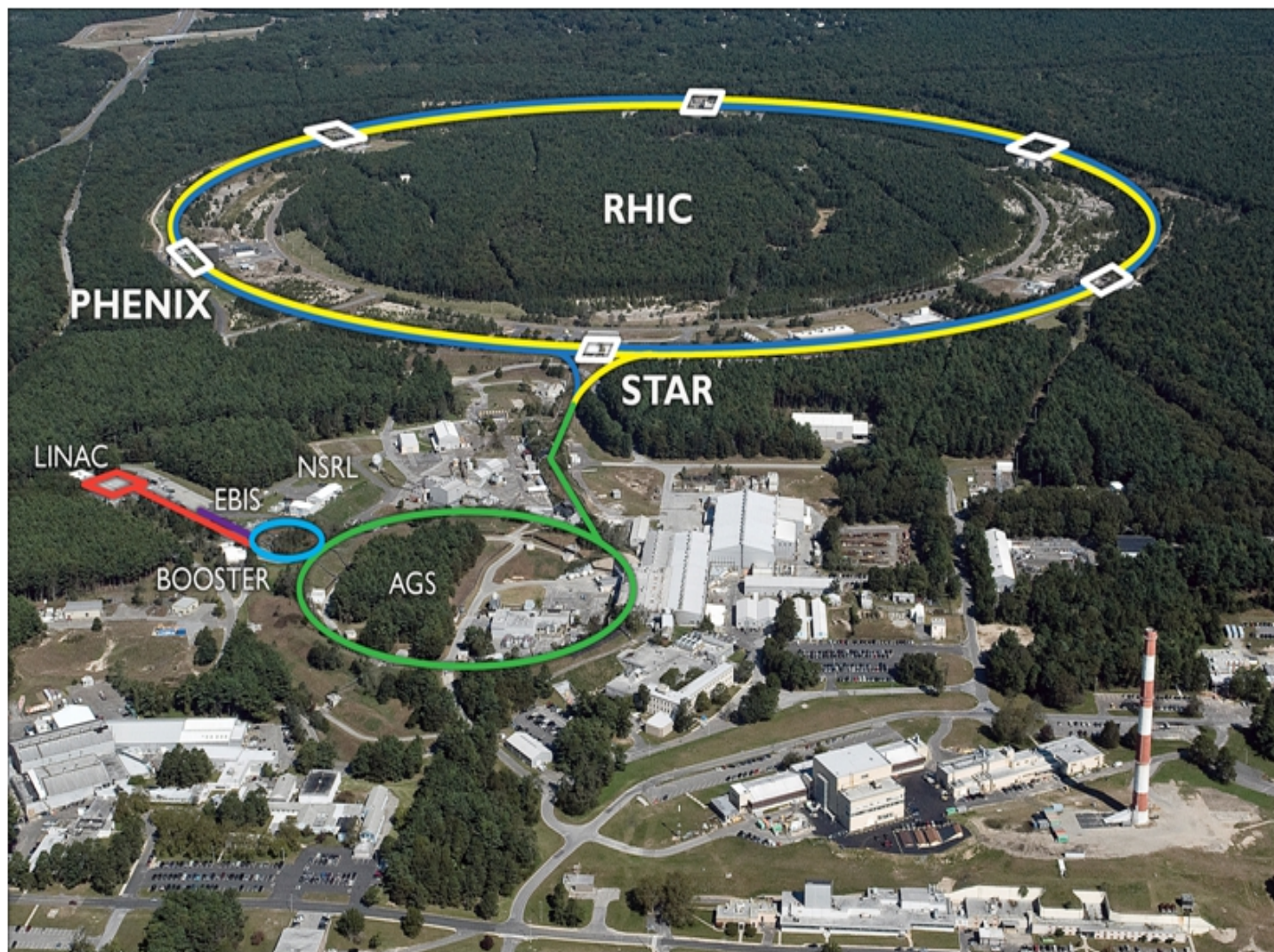
# Сигнатуры фазового перехода



- В области низких температур и низких барионных плотностей материя находится в привычном нам виде связанных адронов, в которых кварки находятся в состоянии конфайнмента. Для оценки эффектов, происходящих в сильно взаимодействующей материи, используется эффективная теория, либо проводятся численные расчеты. Подобные расчеты показывают, что при уменьшении барионной плотности  $\mu_B \rightarrow 0$ , фазовый переход является плавным. Масса кварков играет важную роль для понимания КХД диаграммы, поскольку разрушается киральная симметрия. В соответствии с концепцией киральности предполагается, что переход между связанными кварками и состоянием деконфайнмента соответствует переходу первого рода с большим химическим потенциалом, а переход второго рода имеет соответственно малое значение химического потенциала. При малых значениях  $\mu_B$  переход от низких температур к большим, как показывают расчеты КХД, не требует пересечения сингулярности, где масса кварков переходит в ноль. Адронная материя-это состояние, в котором фундаментальные составляющие, кварки и глюоны, заключены в составные частицы, а именно барионы и мезоны. При высоких плотностях энергии КХД предсказывает фазовый переход от адронного газа к состоянию деконфинированной, партонической материи, называемой кварк-глюонной плазмой.

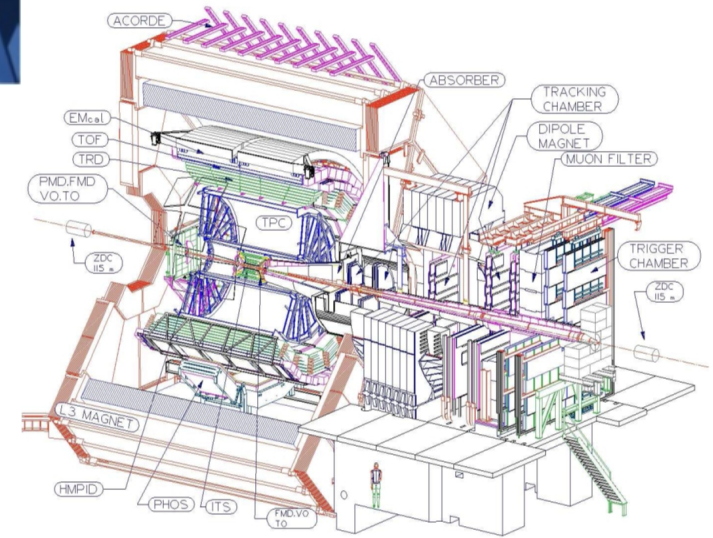
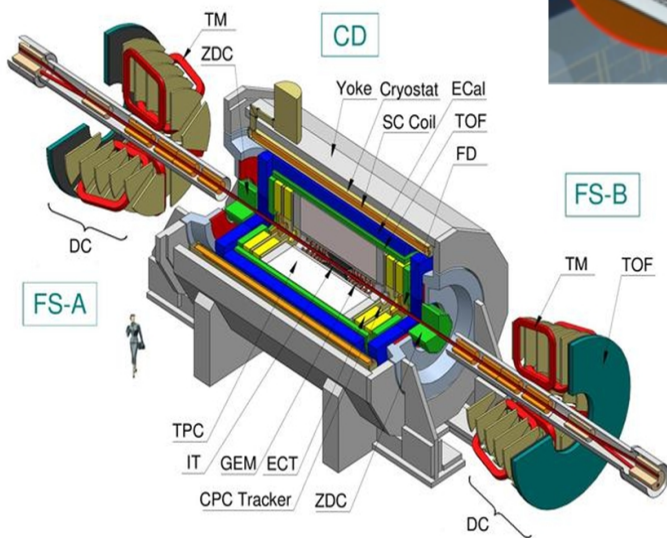
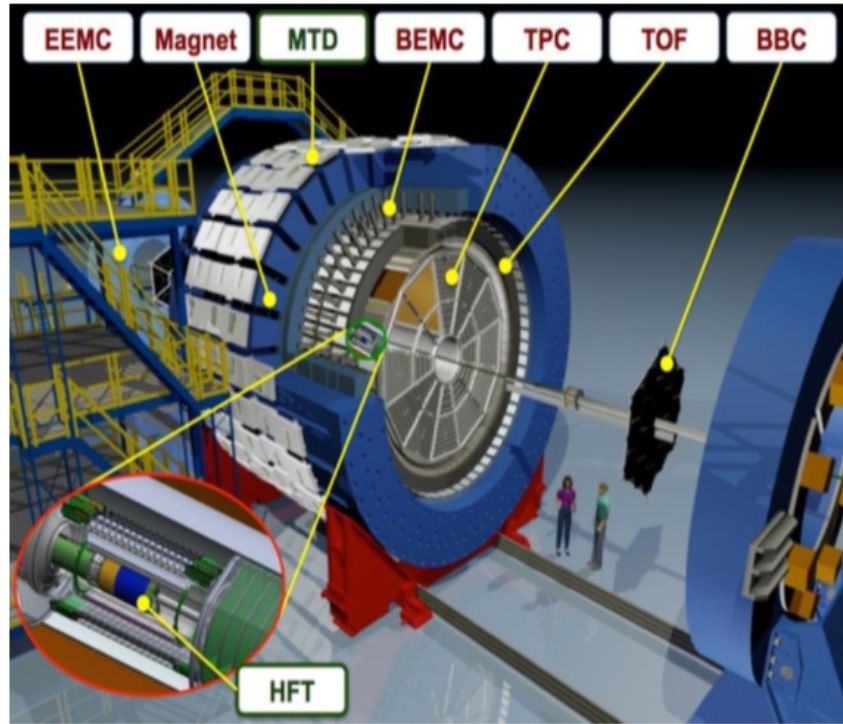
Эксперименты на Релятивистском коллайдере тяжелых ионов (RHIC) и большом Адронном коллайдере (LHC) предоставили убедительные доказательства формирования деконфинированного состояния кварков и глюонов (QGP) для вещества, близкого к  $\mu_B = 0$ .

# Ускорение ядер до высоких энергий



- RHIC был создан для получения и исследования сильно взаимодействующей ядерной материи при плотности энергии, беспрецедентной по сравнению с экспериментами по столкновению протонов. Образующаяся в нем среда является такой горячей, что нейтроны, протоны и другие адроны, «плавятся», образуя смесь из кварков и глюонов, несвязанные сильным взаимодействием в адроны.
- Результаты четырех экспериментов на RHIC продемонстрировали, что образующаяся при столкновениях среда достигает условий как на ранних этапах Большого Взрыва и может улучшить наше представление о происхождении вселенной.
- Похожие программы исследований существуют также на других экспериментах, таких как действующие NA 62 и ALICE в ЦЕРН, и планирующиеся на ускорителях NICA, ОИЯИ и FAIR, GSI.
- Экспериментально, чтобы убедиться в создании принципиально нового состояния материи на RHIC, проводятся перекрестные проверки. Основной задачей КГП является формирование, предсказанное КХД на решетке: быстрый переход вокруг критической температуры, ведущий к восстановлению симметрии.
- Эксперимент STAR является одним из действующих экспериментов на RHIC. Его главной целью является исследование сильно взаимодействующей ядерной материи при высоких плотностях энергии и поиск ярких сигнатур нового состояния вещества - кварк глюонной плазмы.

# Детекторы столкновений тяжелых ионов



## Выводы:

- В краткосрочной перспективе, на RHIC измерения должны сосредоточиться на проверке и расширять его новыми наблюдениями гашения струй; на тестировании количественных предсказаний теоретических расчетов, включающих QGP переход для более низких энергий и для различных размеров системы, для поиска других доказательств вылетания; и на тестирование более подробного прогноза глюонного насыщения моделей для прямых адронов.
- Долгосрочные перспективы: создание наглядной модели подавления кваркония; наблюдение четности или нарушения CP или восстановление киральной симметрии в коллизионном веществе; извлечение сигнала перехода в зависимости от измеренной ранней температуры. Наиболее вероятный путь будет включать несколько дополнительных успехов в теоретических сравнениях, что приведет к преобладанию доказательств того, что столкновения RHIC произвели термализованное, деконфинированное кварк-глюонное вещество.
- RHIC был и будет огромным успехом в своей роли в качестве инструмента для обнаружения новых особенностей вещества КХД в экстремальных условиях. Свойства открытые на STAR, указывают на плотное, непрозрачное, вязкое, преадронное жидкое состояние, которое не ожидалось до RHIC. Определение того, достигают ли кварки и глюоны в этом веществе теплового равновесия друг с другом до того, как они сольются в адроны, и восстанавливается ли киральная симметрия, - это два из многих глубоких вопросов, которые можно задать.

## Литература:

- Experimental and theoretical challenges in the search for the quark-gluon plasma: The STAR Collaboration's critical assessment of the evidence from RHIC collisions.
- An Experimental Exploration of the QCD Phase Diagram: The Search for the Critical Point and the Onset of De-confinement.
- Recent results from the search for the critical point of strongly interacting matter at the CERN SPS.
- NA49/NA61: results and plans on beam energy and system size scan at the CERN SPS
- An Experimental Exploration of the QCD Phase Diagram: The Search for the Critical Point and the Onset of De-confinement