

Столкновения релятивистских тяжелых ядер

Илья Селюженков

МИФИ / GSI

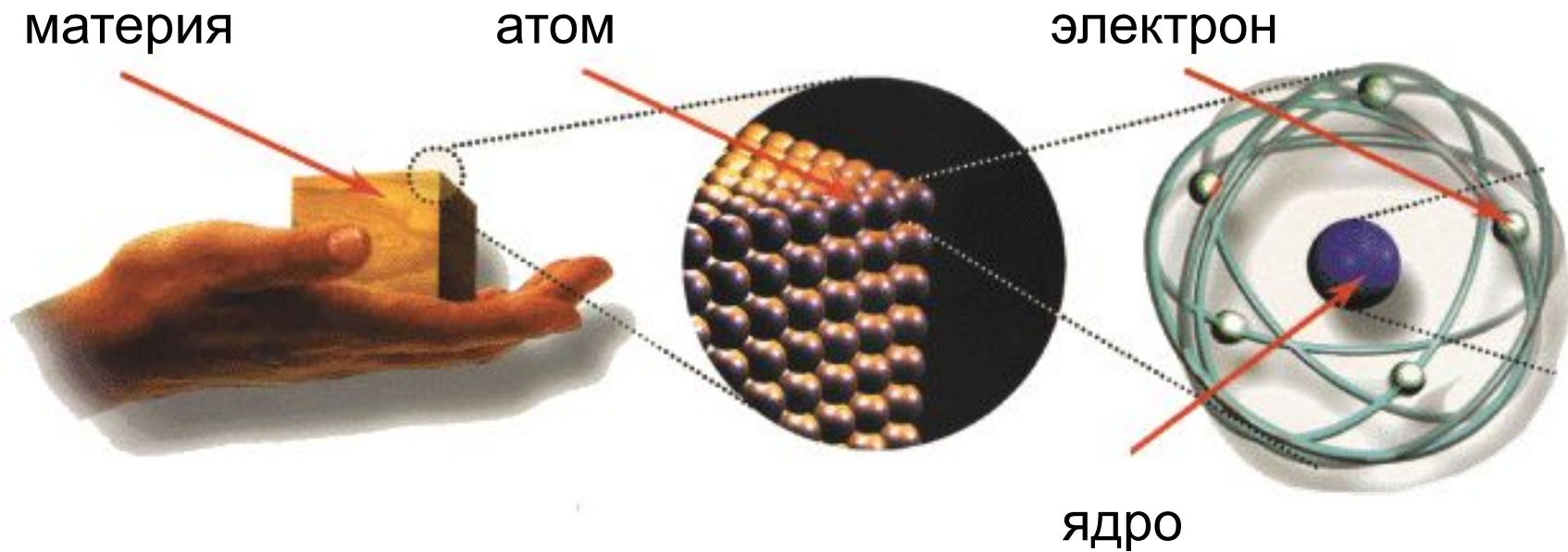


Конференция в честь 50-летия ИЯИ РАН

04 декабря 2020

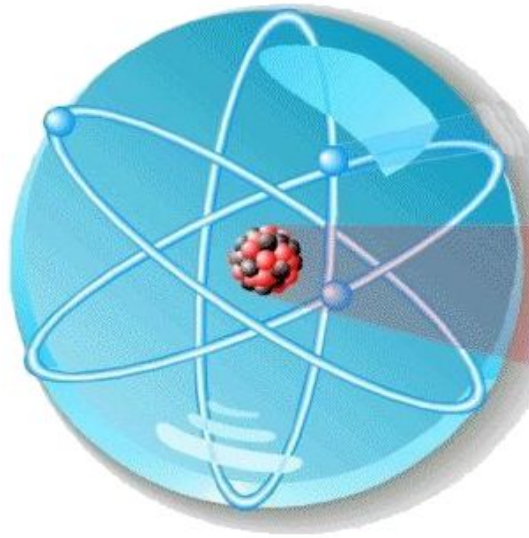
Введение

Структура материи: макро- и микро-мир



Структура материи на нано- и фемто-расстояниях

атом $\sim 10^{-8}$ см



ядро $\sim 10^{-12}$ см



нуклон $\sim 10^{-13}$ см

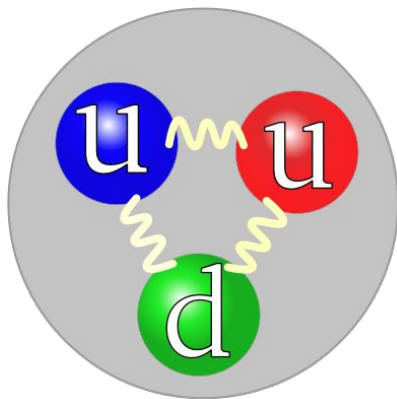


кварк $< 10^{-16}$ см

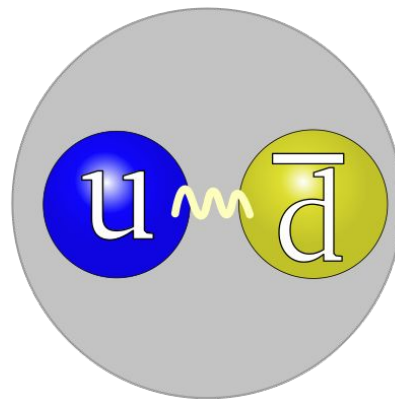


Квантовая хромодинамика (КХД): теория сильного взаимодействия

протон (барион)



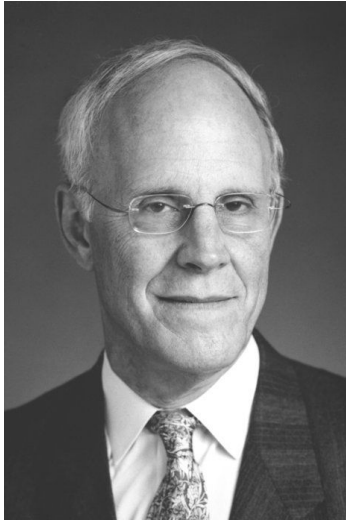
пион (мезон)



Нормальное состояние материи:
цветные кварки и глюоны связаны в бесцветные состояния (адроны)
→ конфайнмент (confinement)

Асимптотическая свобода в КХД

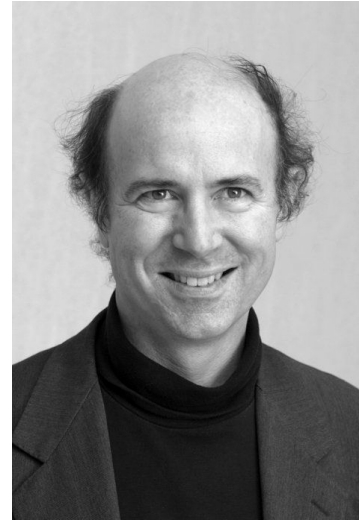
Нобелевская премия 2004 года



David J. Gross



H. David Politzer



Frank Wilczek

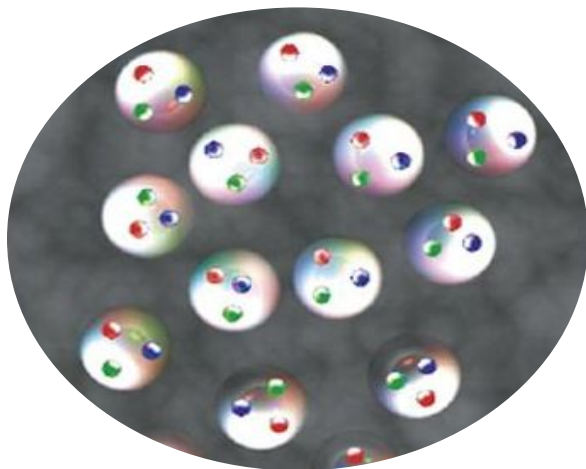
константа связи сильного взаимодействия уменьшается с увеличением энергии:
сильное взаимодействие становится слабым
при экстремально больших энергиях (температурах)
→ деконфайнмент (deconfinement)

Кварк-глюонная плазма (КГП)

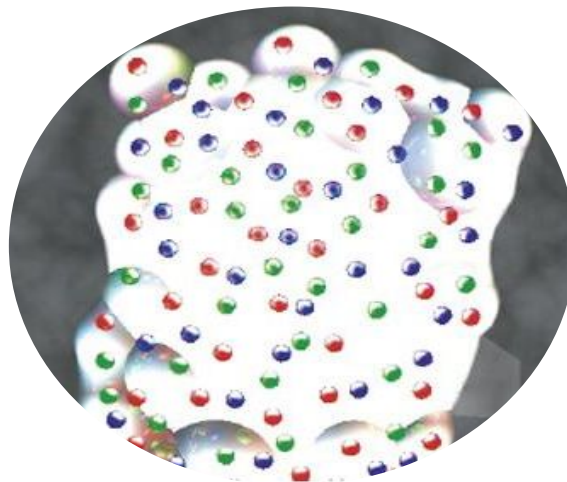
Идея:

нагревая материю до экстремальных температур ($T \sim 10^{12}\text{K}$)
можно получить состояние из свободных кварков и глюонов

адронный газ

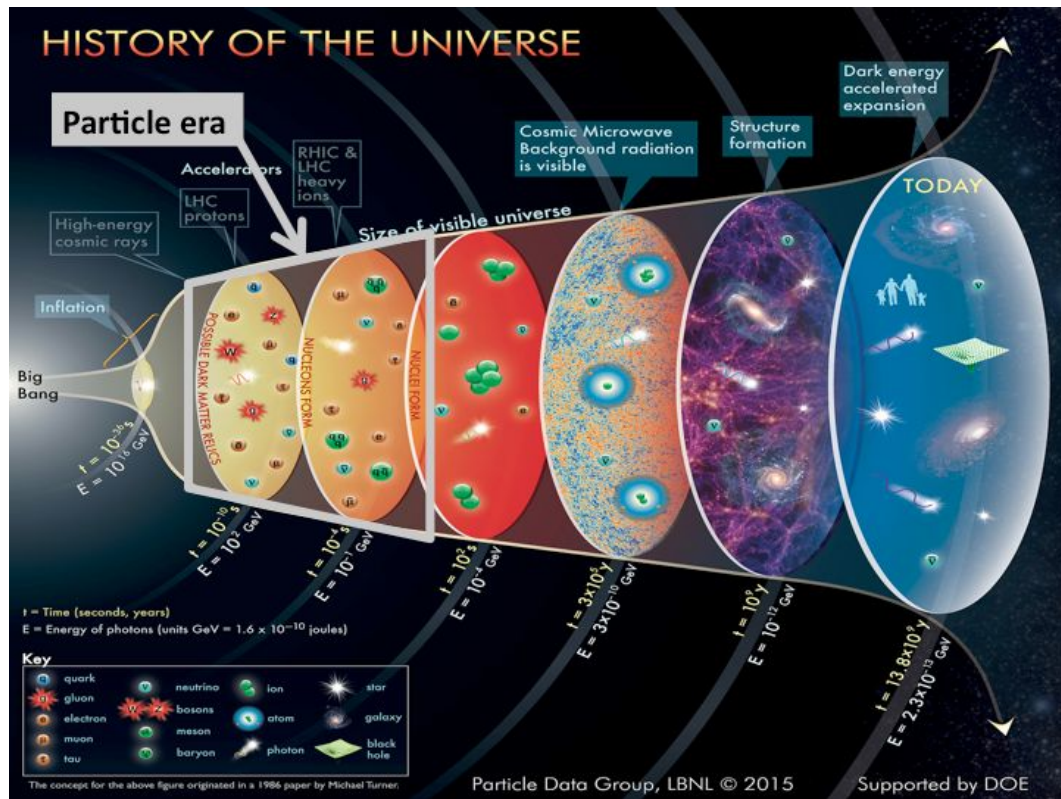


кварк-глюонная материя



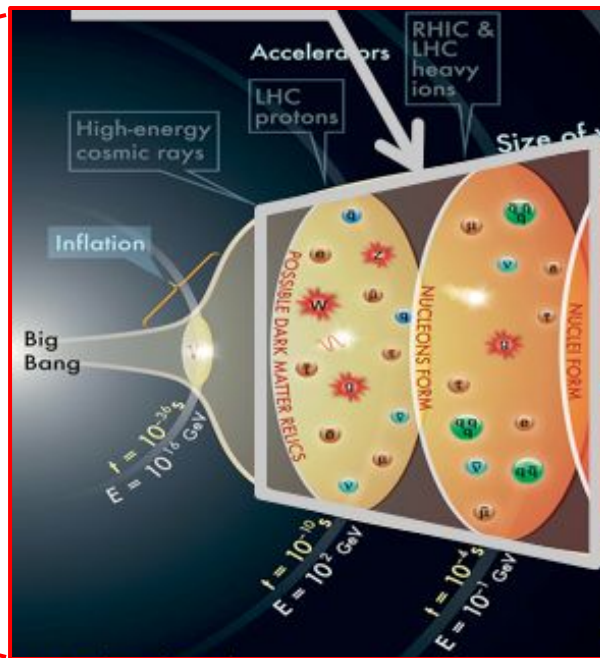
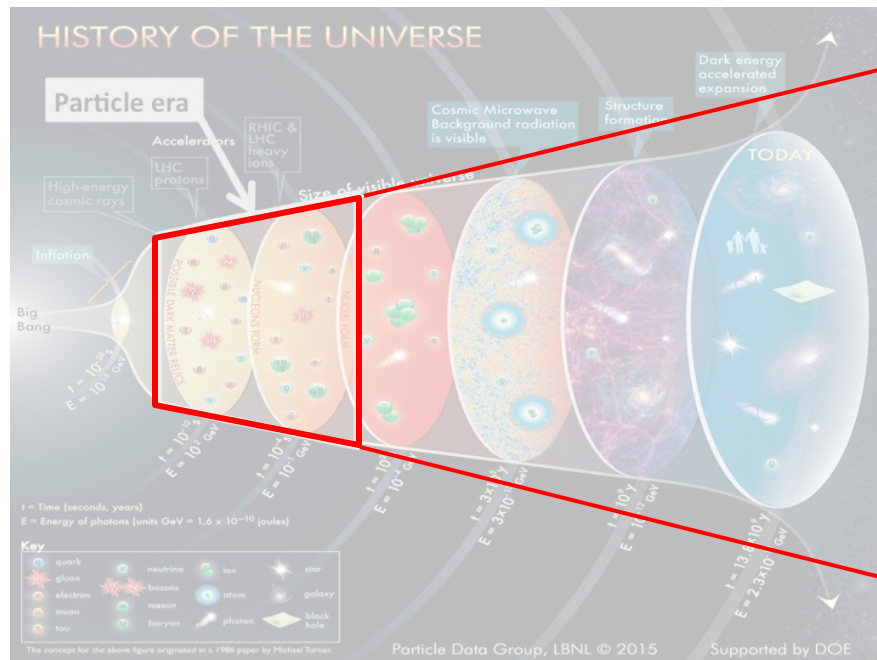
Фундаментальные вопросы физики столкновений релятивистских тяжелых ядер

Эволюция Вселенной в теории Большого Взрыва



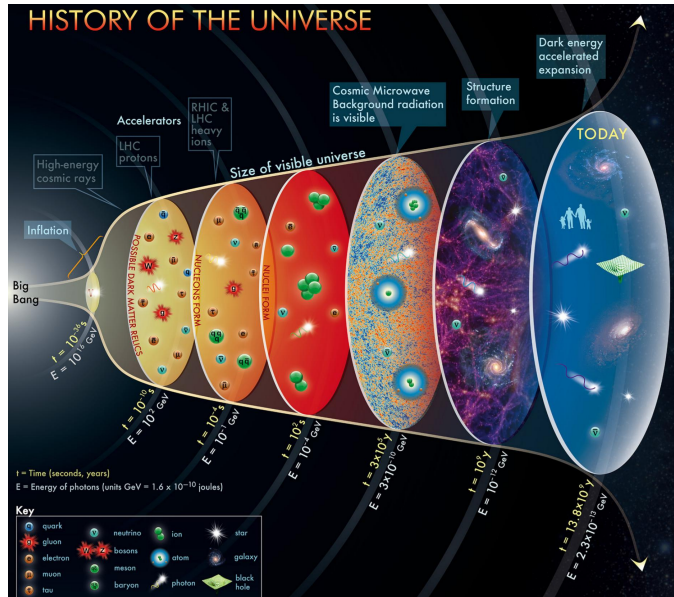
13.8 миллиардов лет расширения Вселенной

Эволюция Вселенной в теории Большого Взрыва



Через несколько микросекунд после Большого Взрыва (Big-Bang) горячая Вселенная была в состоянии деконфайнмента (КГП)

Фундаментальные вопросы физики столкновений релятивистских тяжелых ядер

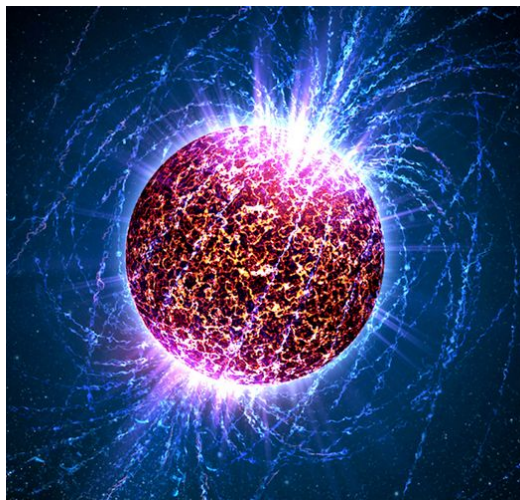


Как устроена сильно-взаимодействующая материя при экстремальных температурах и экстремальных барионных плотностях:

Построение фазовой диаграмма кварк-глюонной материи и определение ее свойств (вязкость, сжимаемость, и т.д.)

Плотная барионная материя

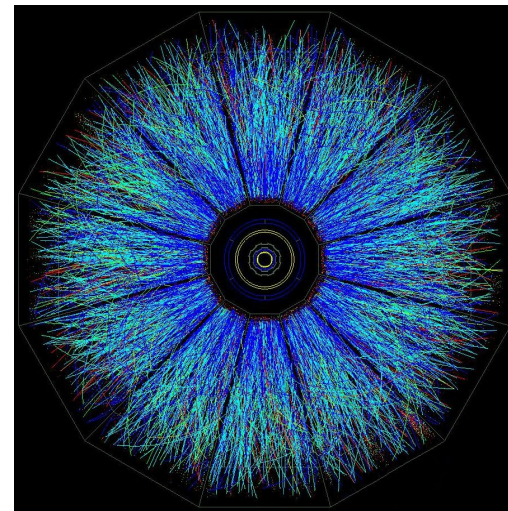
Нейтронные звезды



Слияние нейтронных звезд



Столкновения тяжелых ядер



Температура $T < 10 \text{ MeV}$

Плотность $\rho < 10 \rho_0$

Время жизни /
время реакции $\sim \text{infinity}$

$T \sim 10\text{-}100 \text{ MeV}$

$\rho < 2 - 6 \rho_0$

$T \sim 10 \text{ ms}$

$T < 120 \text{ MeV } (2 \times 10^{12} \text{ K})$

$\rho < 5 - 15 \rho_0$

$t \sim 10^{-23} \text{ s}$

Фундаментальные вопросы физики столкновений релятивистских тяжелых ядер

Слияние нейтронных звезд



Свойства сильно-взаимодействующей материи
в зависимости от барионного числа,
киральности и спиновой структуры

Большая относительная барионная плотность:

$$\rho \sim 2 - 6 \rho_0$$

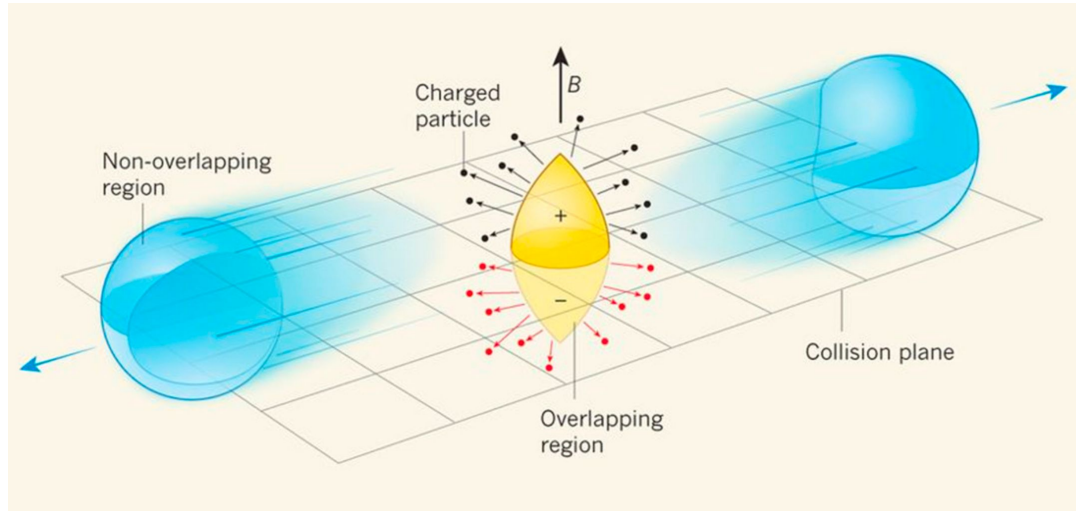
Восстановление киральной симметрии,
завихренность кварк-глюонной жидкости со спином



Фундаментальные вопросы физики столкновений релятивистских тяжелых ядер

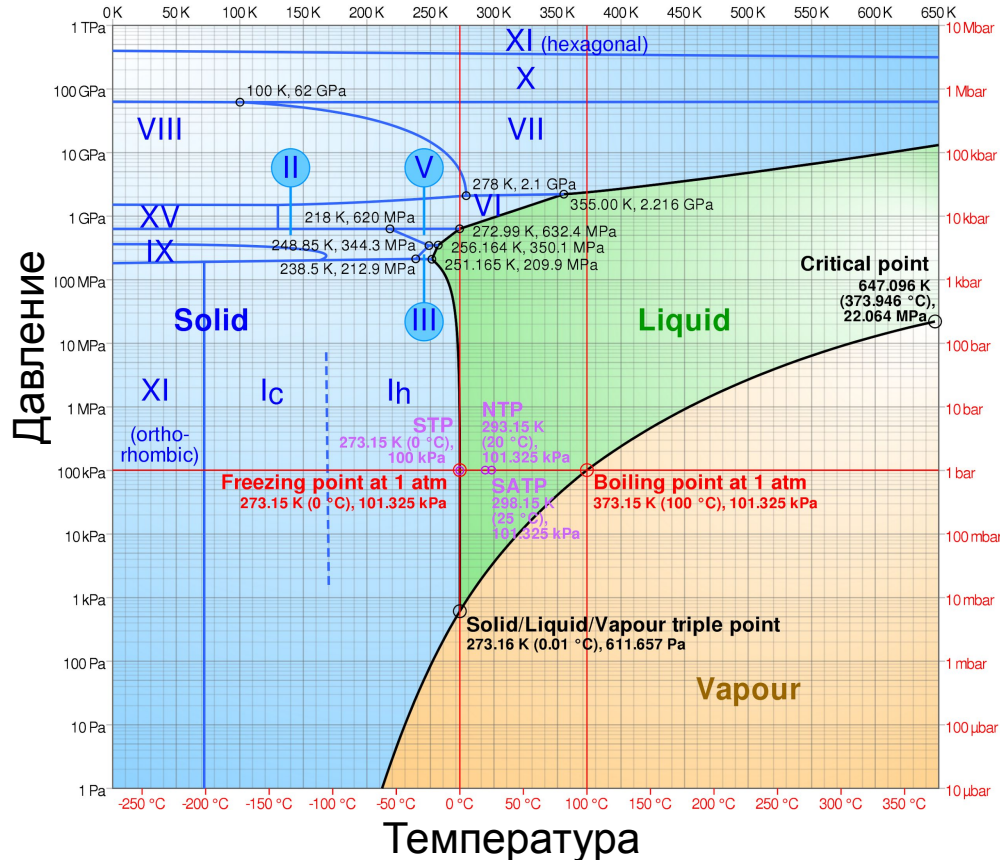
Происхождение асимметрии материи и антиматерии во вселенной

вопросы сохранения четности (P) и CP (зарядовой сопряженности) в КХД



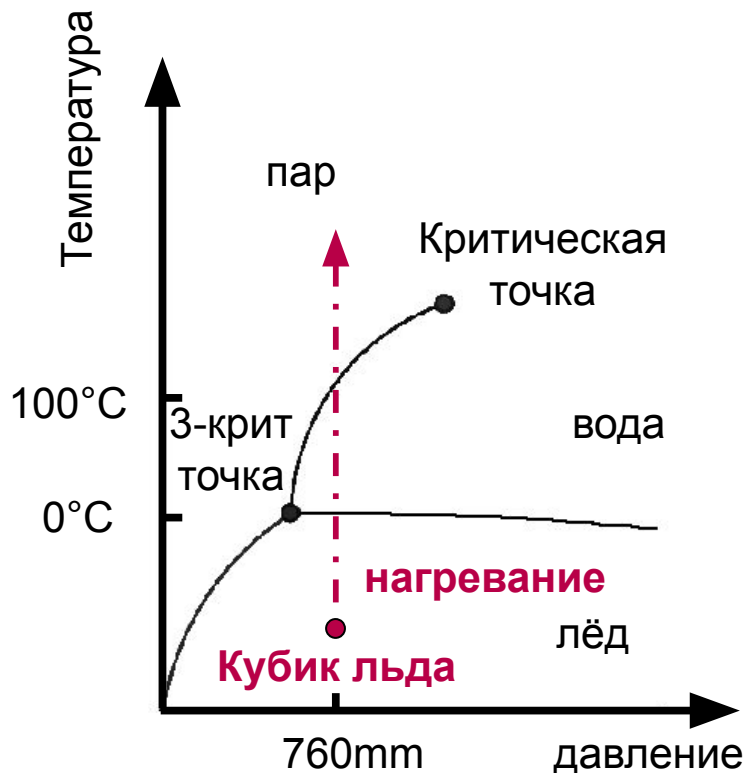
Фазовая диаграмма кварк-глюонной материи (КГМ)

Фазовая диаграмма воды

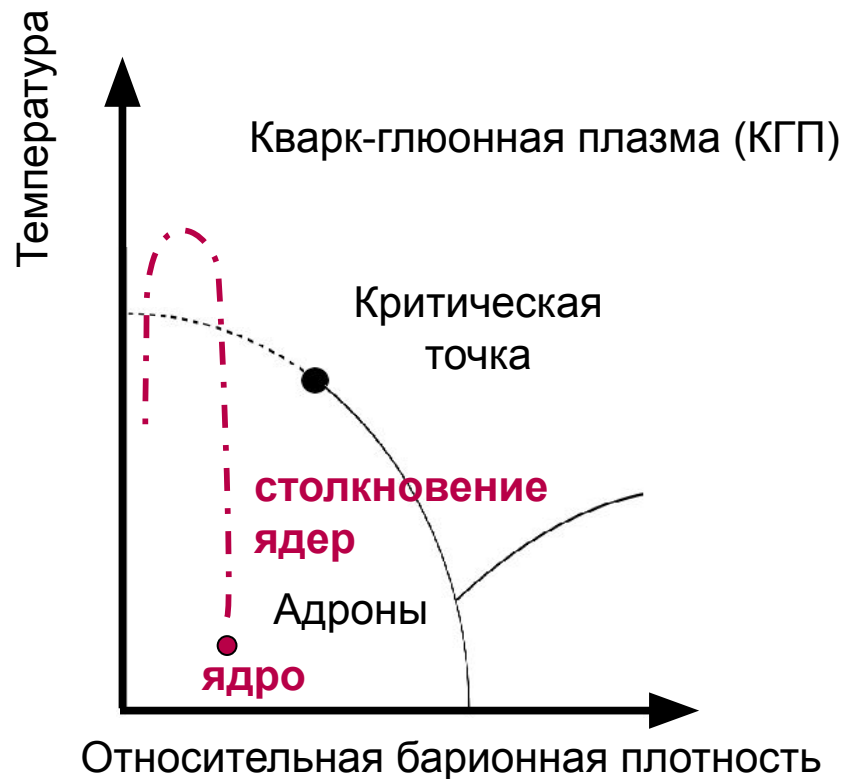


Сканирование фазовой диаграммы воды и КГМ

Вода (H_2O)

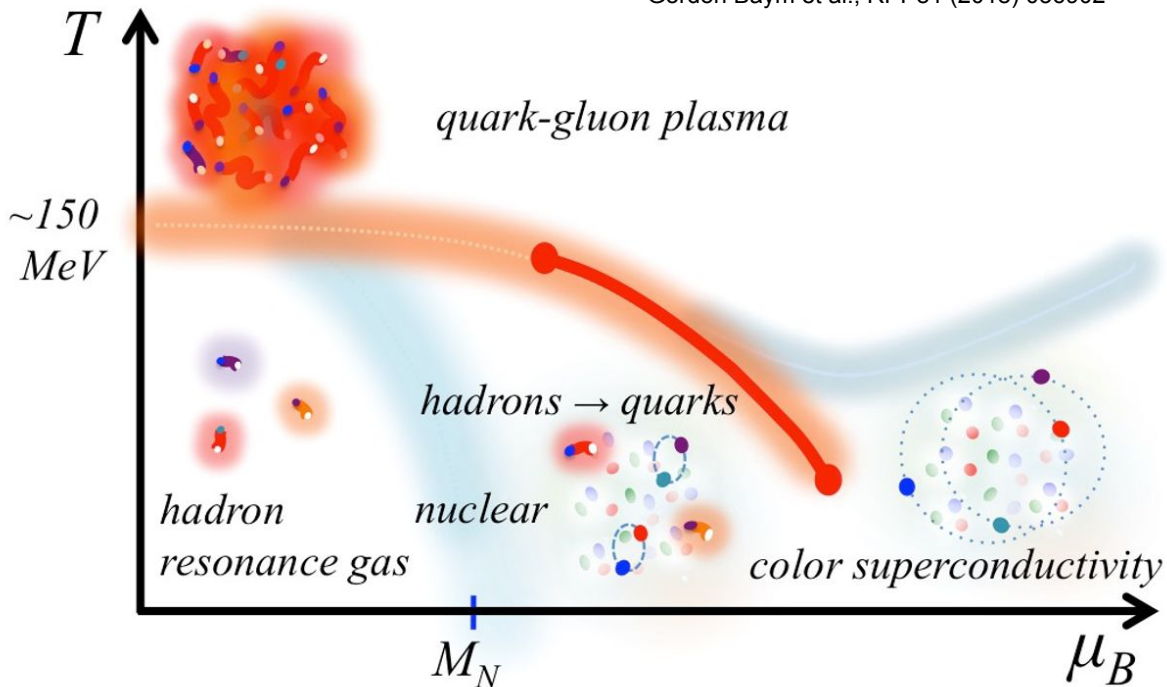


КГМ



Фазовая диаграмма кварк-глюонной материи (КГМ)

Gordon Baym et al., RPP81 (2018) 056902



Ранняя вселенная:

$$\rightarrow \mu_B \sim 0$$

экстремальные температуры

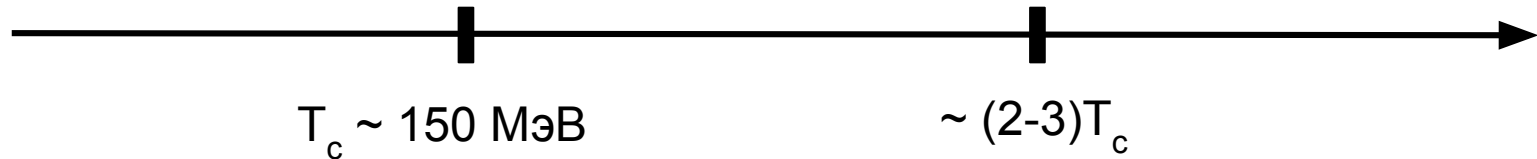
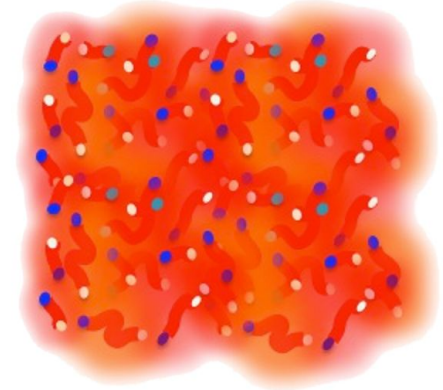
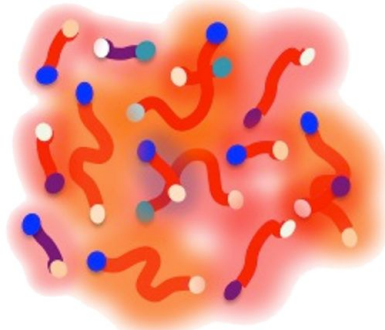
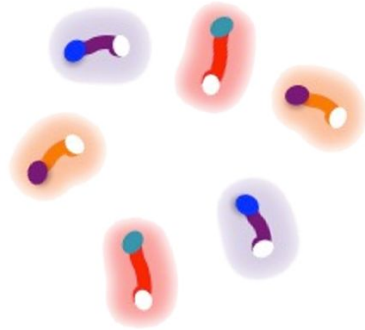
Температура (T) – барионный химический потенциал (μ_B)

Фазовый переход типа “кроссовер” при высоких T и малых μ_b

адронный газ

смешанное состояние

кварк-глюонная плазма

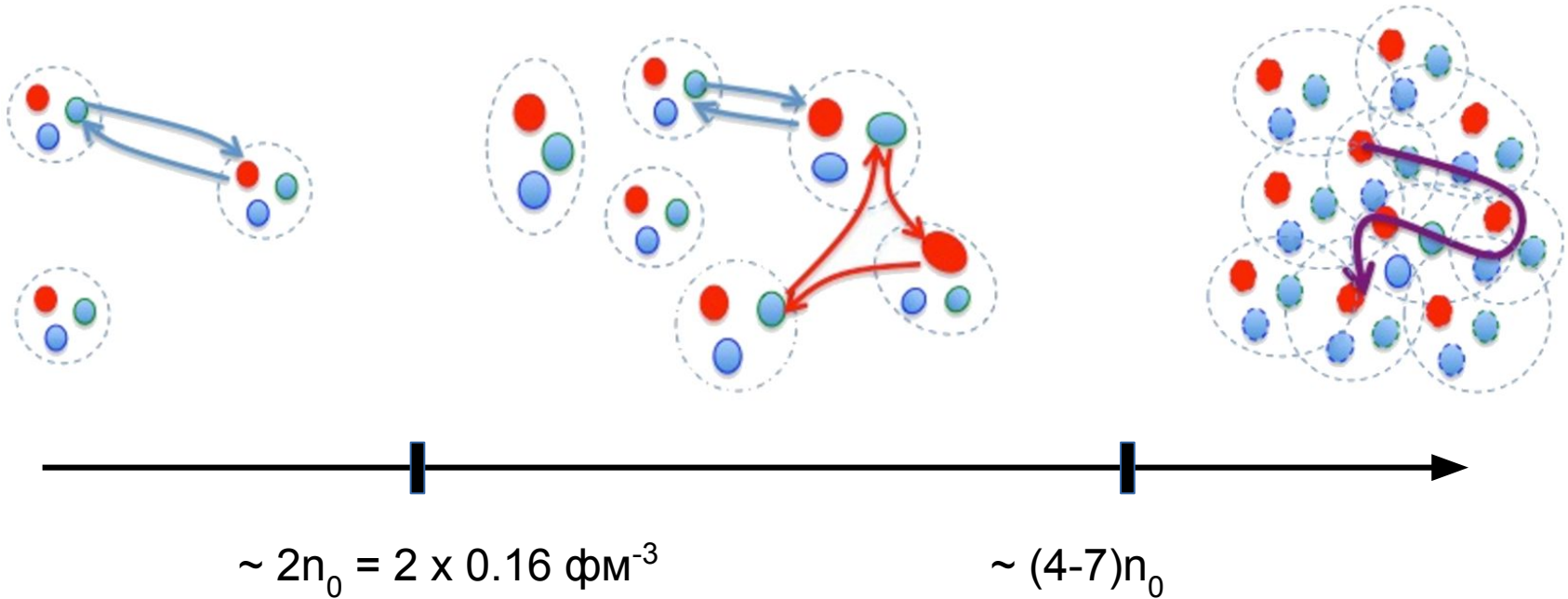


Фазовый переход при большом барионном химическом потенциале μ_b

ядерная материя

сжатие материи

“кваркионная” материя

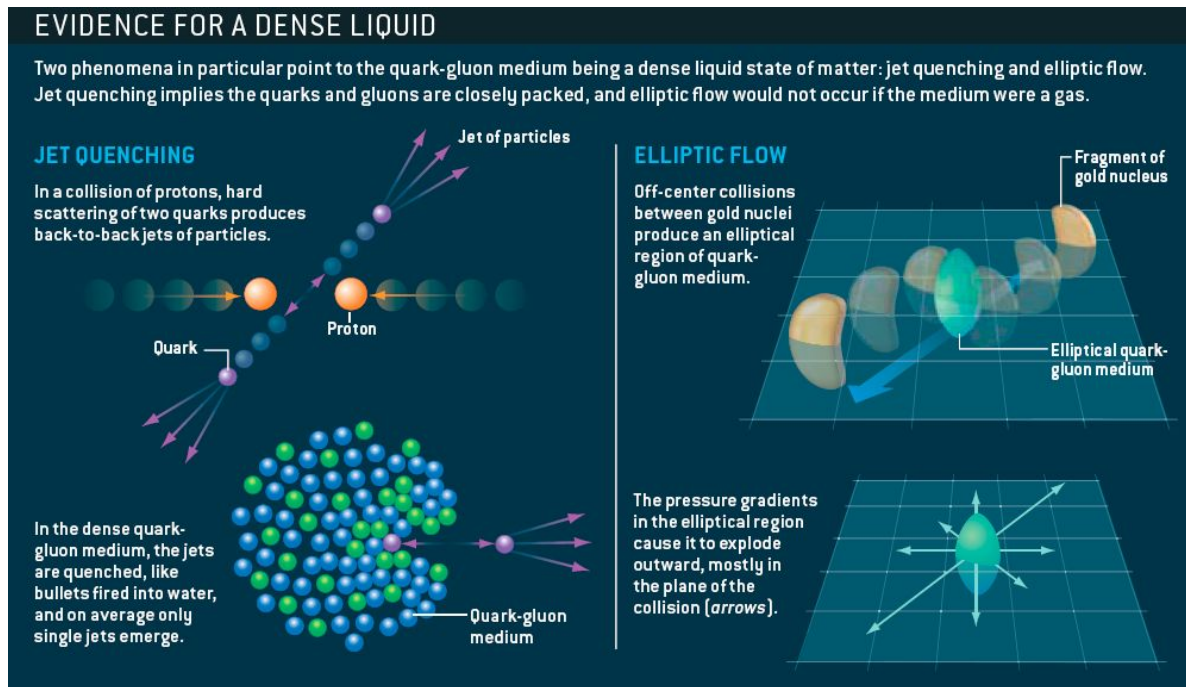


Указание на SPS@CERN и открытие на RHIC@BNL сильновзаимодействующей идеальной жидкости



M. Roirdan & W. Zajc, Scientific American (2006)

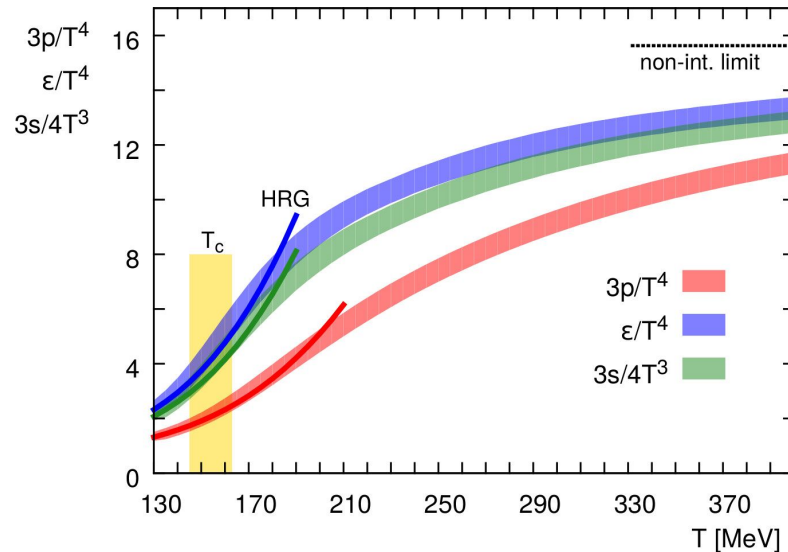
Указание на SPS@CERN и открытие на RHIC@BNL сильновзаимодействующей идеальной жидкости



Гашение струй и эллиптические потоки

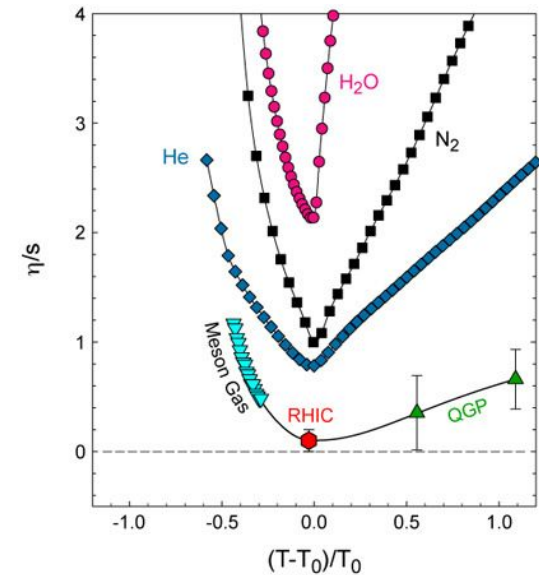
Описание свойств КГМ при $\mu_B=0$ в терминах релятивистской вязкой жидкости

Термодинамическое уравнение состояния $p(T)$



Фазовый переход типа “Кроссовер”: $T_c \approx 156$ МэВ
степени свободы: кварки и глюоны

Сдвиговая вязкость $\eta(T)$



почти идеальная жидкость
 $\eta/s \approx 0$

Экспериментальные установки

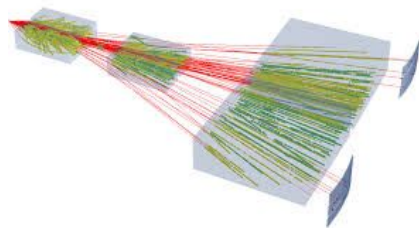
Действующие и будущие мегасайенс установки



Действующие эксперименты в России, Европе и США

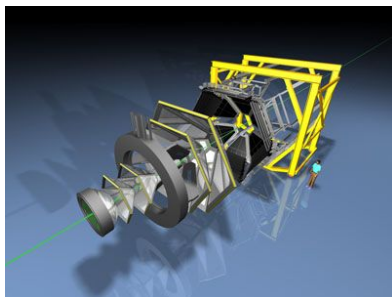
NA61/SHINE

SPS Heavy Ion and Neutrino Experiment



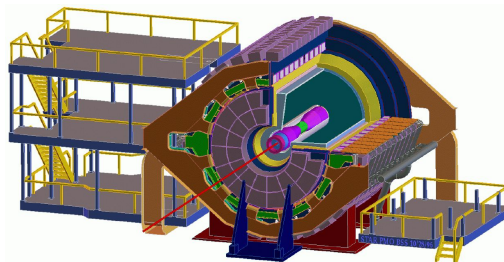
HADES

High Acceptance DiElectron Spectrometer



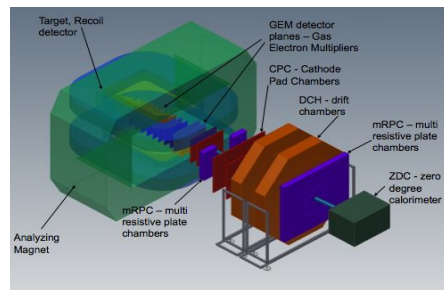
STAR

Solenoidal Tracker At RHIC



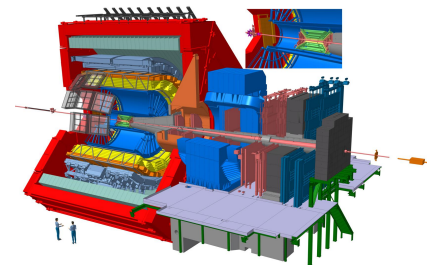
BM@N

Baryonic Matter at Nuclotron



ALICE

A Large Ion Collider Experiment



@LHC: ATLAS, CMS, LHCb

Основные возможности для измерений

Регистрация и идентификация продуктов столкновения ядер:

заряженные и нейтральные адроны, фотоны, дилептоны, струи, спектаторы

Близкий к 4π аксептанс:

полный азимут, широкий диапазон по скорости и поперечному импульсу

p_T : ~0 МэВ/с до ~100 ГэВ/с

Вклад ИЯИ в действующие эксперименты



HADES



TOFino

Идентификация заряженных адронов
передний времяпролетный
сцинтилляционный годоскоп
Временное разрешение ~ 400 псек
(использовался в 2002-2008г.)

FW

Определение центральности
столкновения и плоскости реакции
передний сцинтилляционный годоскоп

ECAL

измерение нейтральных пионов,
фотонов и электронов
электромагнитный калориметр
из свинцового стекла

NA61/SHINE & BM@N



PSD

Определение центральности столкновения
и ориентации плоскости реакции

Передний калориметр для детектирования
осколков налетающего ядра

Особенности дизайна:

Поперечный: модульная конструкция
Продольная: сегментированная структура
из слоев свинца и сцинтиллятора.
Сбор света с помощью
спектросмещающего оптоволокну (WLS)
Считывание сигнала кремниевыми
фотоэлектронными умножителями (SiPM)

ALICE



T0

Триггер столкновений, мониторинг
светимости, время столкновения
(для идентификации частиц),
определение центральности
столкновения и плоскости реакции

Пара черенковских счетчиков
размещенных на противоположных
сторонах точки взаимодействия ядер

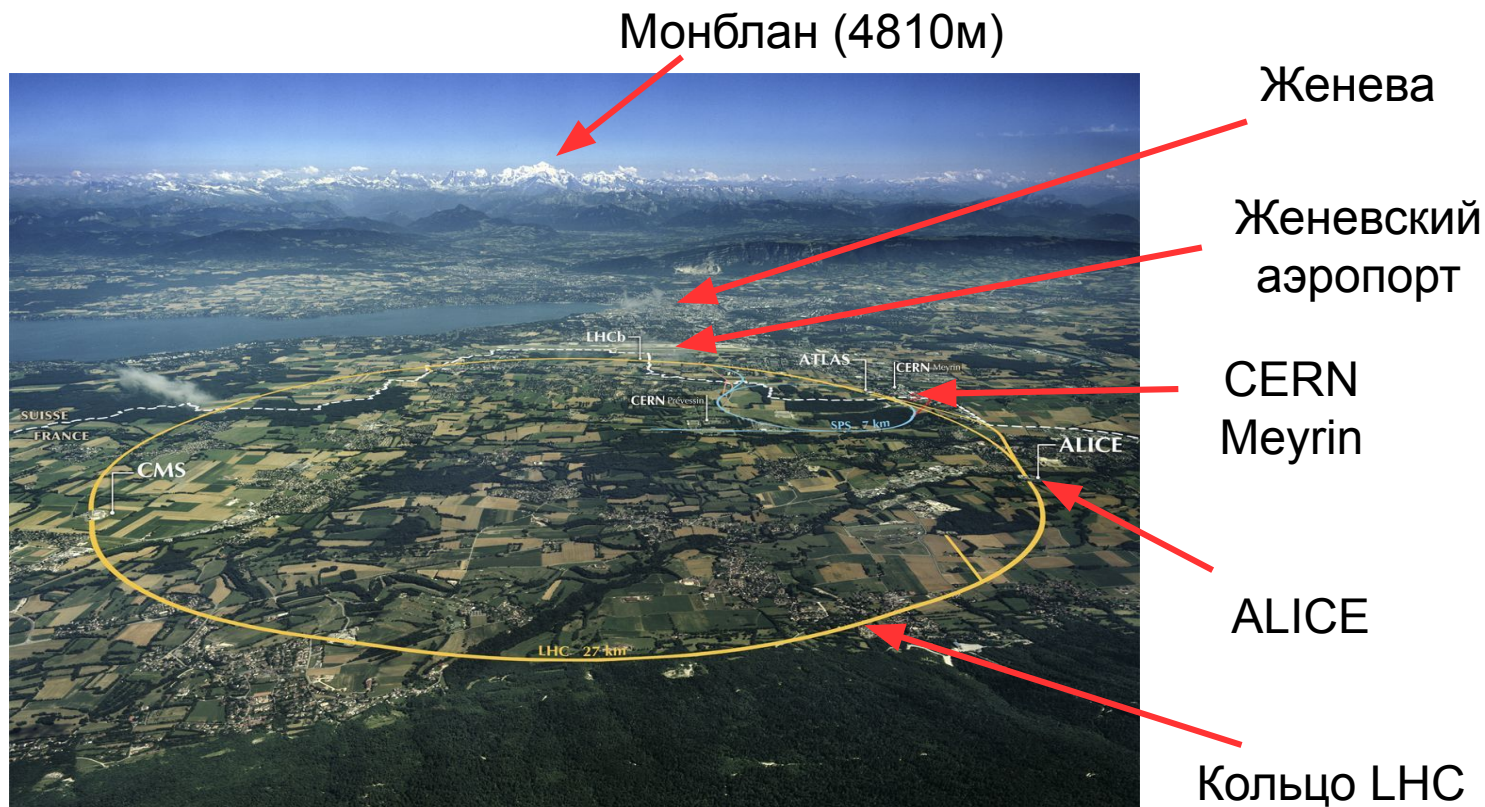
Кварцевые радиаторы, подключены к ФЭУ

Временное разрешение
 ~ 25 (40) псек для Pb-Pb (протонов)

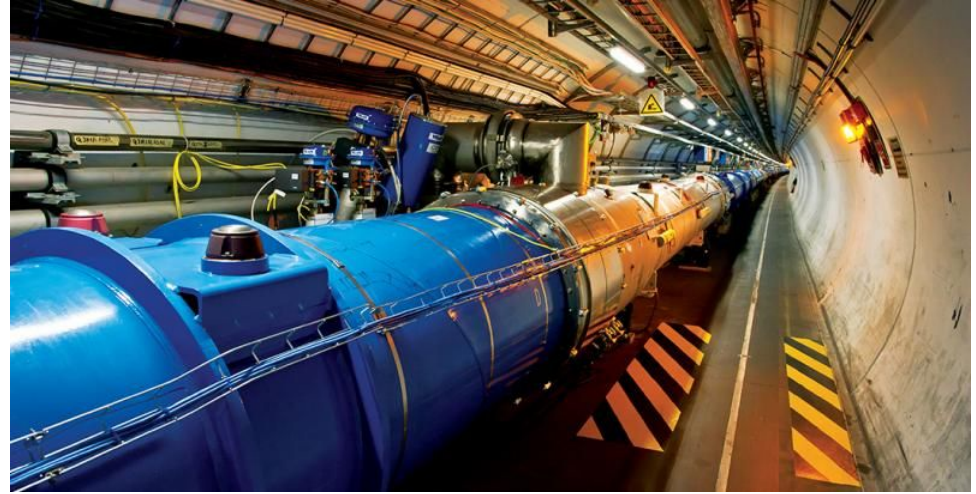
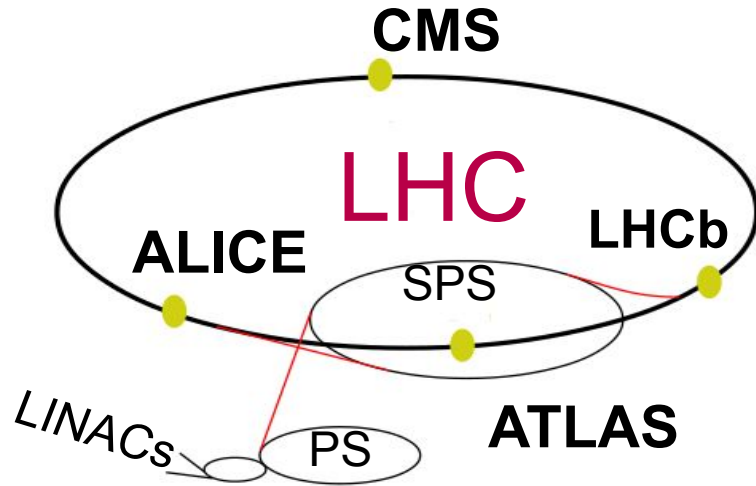
Установка ALICE на LHC

определение свойств кварк-глюонной плазмы

Большой Адронный Коллайдер (LHC)



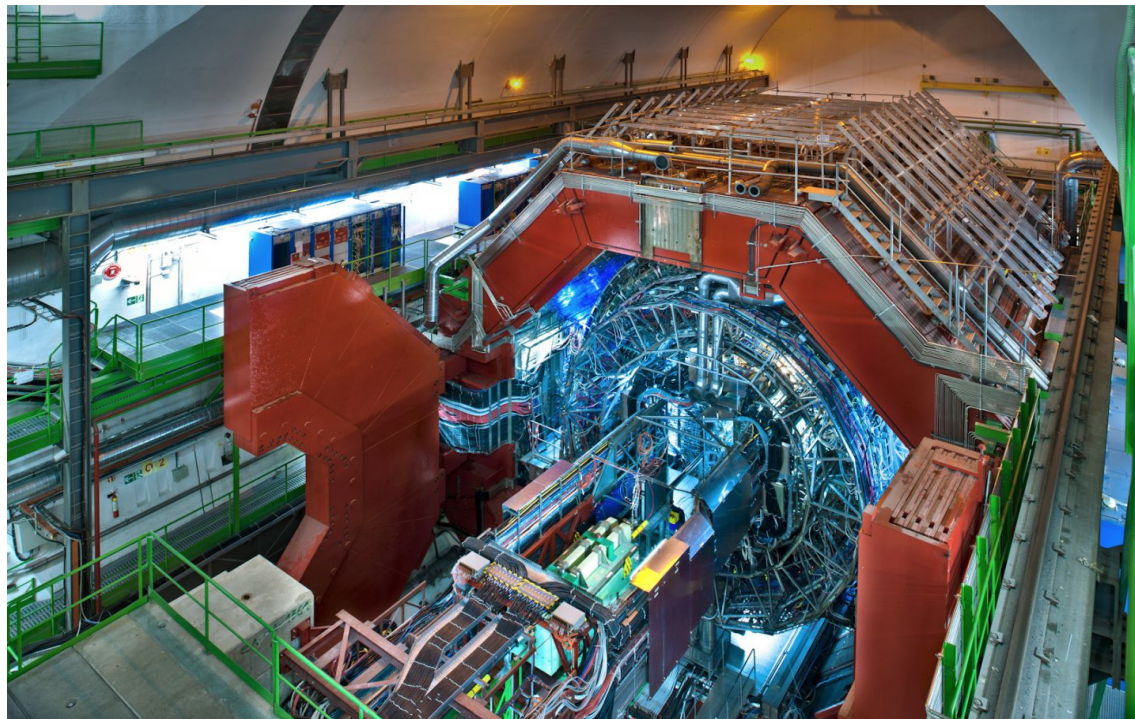
Параметры LHC



Расположение	CERN (Европа)	
Длина окружности	27 км	
Пучки частиц	p, Xe, Pb	
Энергия пучка на нуклон в системе центра масс, (Тераэлектронвольты)	pp:	0.9, 2.76, 5, 7, 13
	pPb:	5.02, 8.16
	Xe-Xe:	5.44
	Pb-Pb:	2.76, 5.02

АЛИСА: Большой Ионный Эксперимент на LHC

https://en.wikipedia.org/wiki/ALICE: A_Large_Ion_Collider_Experiment



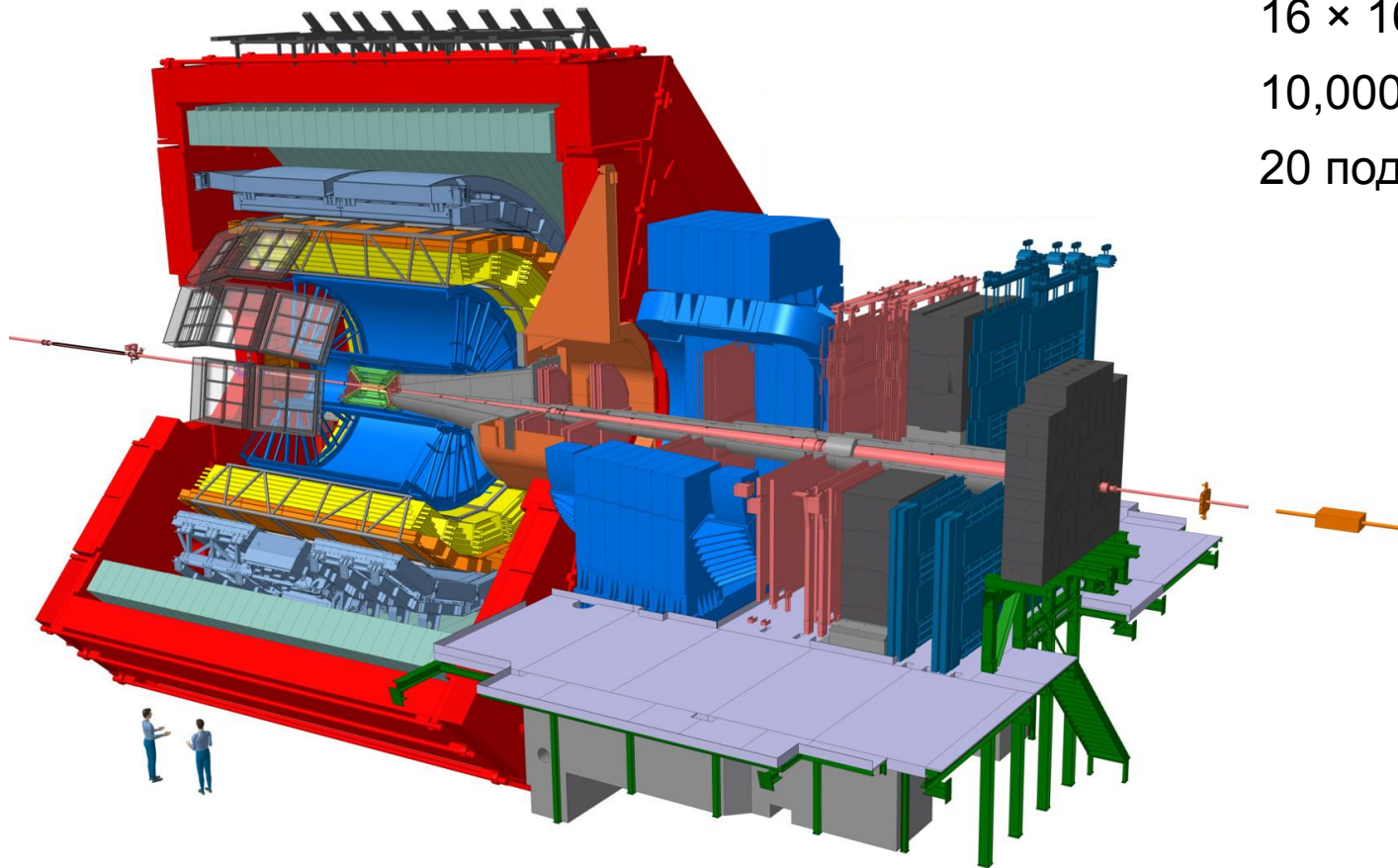
Сложная экспериментальная установка со множеством подсистем

Подсистемы установки АЛИСА

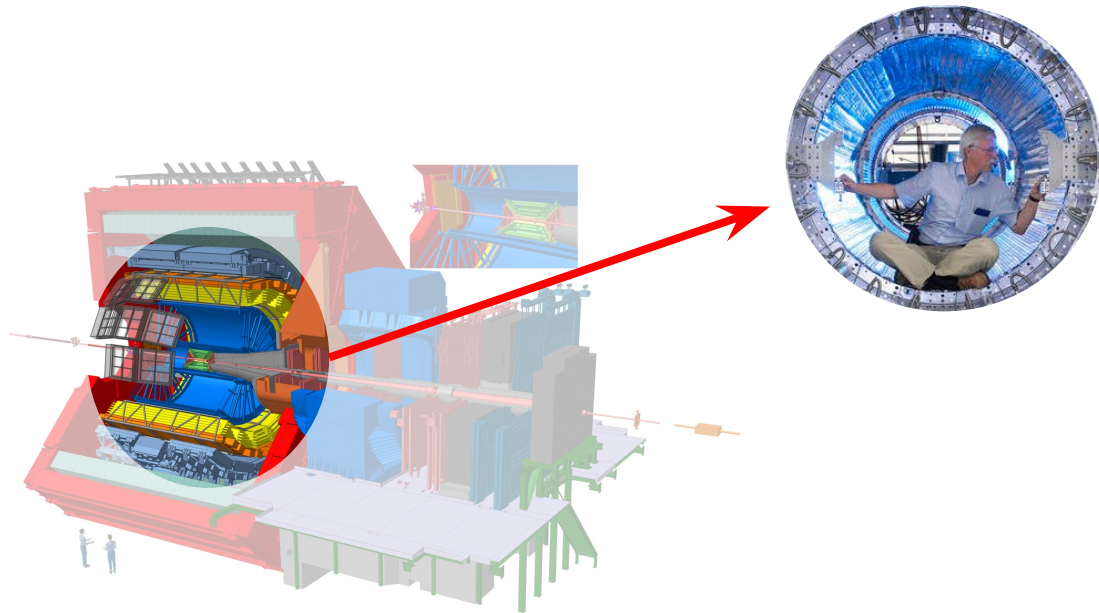
$16 \times 16 \times 26 \text{ м}^3$

10,000 тонн

20 подсистем



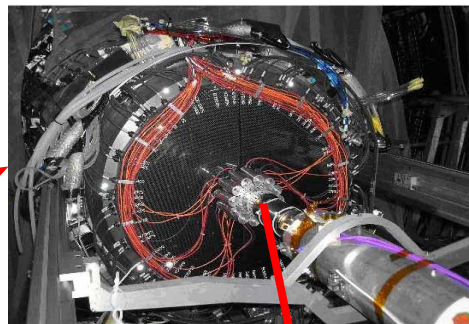
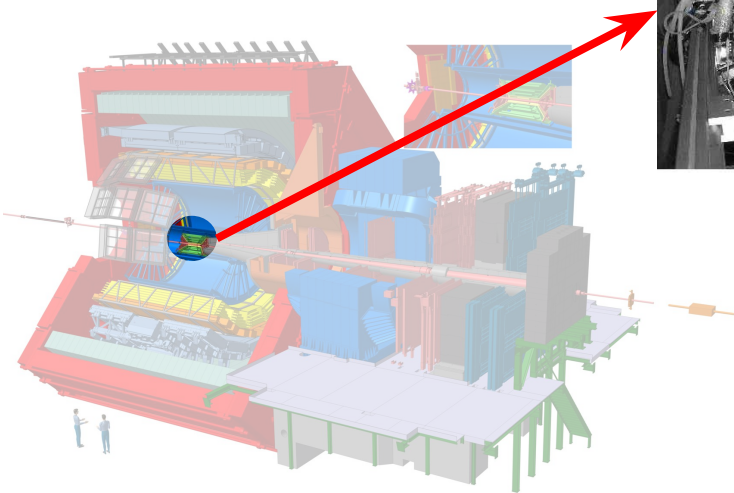
Время-проекционная камера (ТРС)



Время-проекционная камера (ТРС)



Вклад ИЯИ в установку ALICE



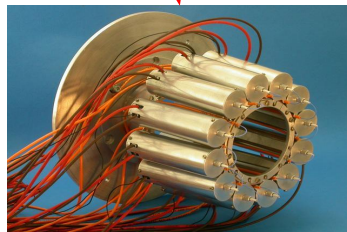
Детектор T0

Триггер столкновений, мониторинг светимости, время столкновения (для идентификации частиц), определение центральности столкновения и плоскости реакции

Пара черенковских счетчиков размещенных на противоположных сторонах точки взаимодействия ядер

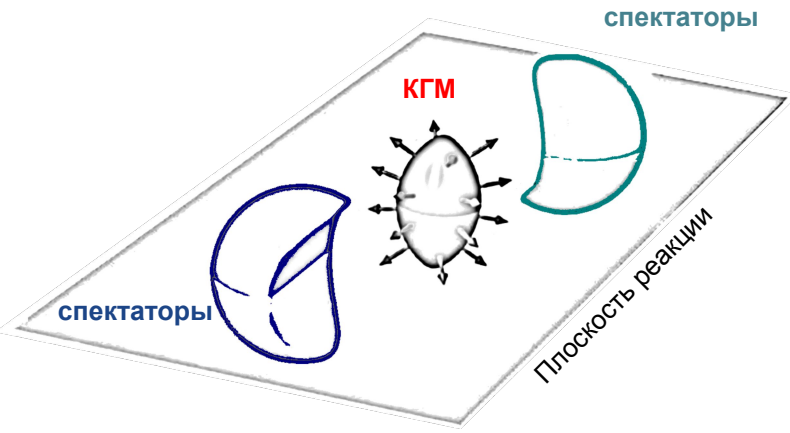
Кварцевые радиаторы, подключены к ФЭУ

Временное разрешение
~ 25 (40) псек для Pb-Pb (протонов)



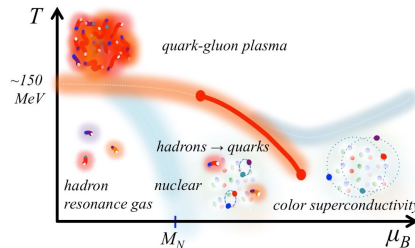
Условия образования КГМ на LHC

Столкновения при ультра-релятивистских (ТэВ) энергиях



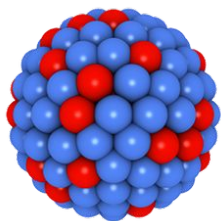
Множественное рождение мягких частиц
→ симметрия материи и антиматерии
→ $\mu_B \sim 0$ (условия ранней Вселенной)

Многократное пере-рассеяние и
коллективное расширение
→ макроскопическое описание КГМ
как релятивистской жидкости

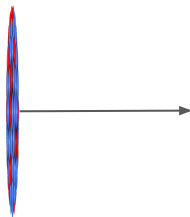


Температуры $T > 150$ МэВ ($\sim 10^{12}$ К)
→ создание кварк-глюонной плазмы

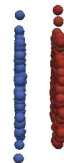
Условия образования КГМ на LHC



$$\gamma = 1$$



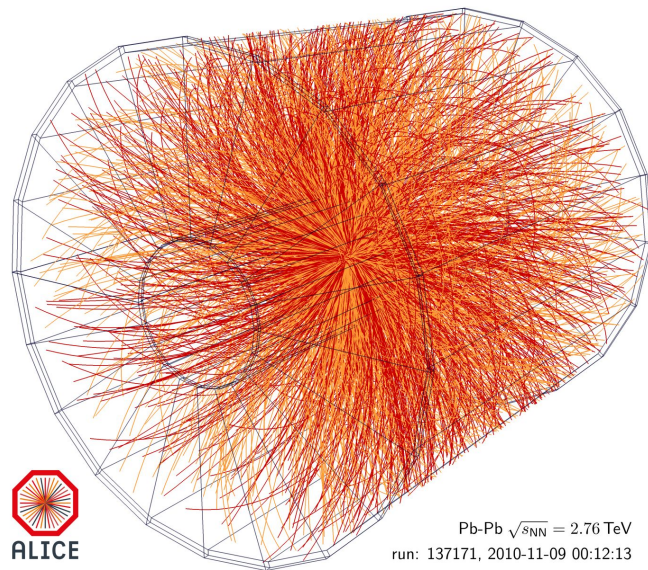
$$\gamma = 3000$$



$$V = (0.999999943) \times c$$

характеристика			RHIC	LHC
Энергия столкновения на нуклон	$\sqrt{s}_{NN}$	ТэВ	0.2	2.76 / 5.04
Лоренц фактор	γ	—	100	3000
Скорость ядер	v	в ед. c	0.999957412	0.999999943
Эффект. температура	T_{eff}	МэВ	$221 \pm 19^{stat} \pm 19^{syst}$	$297 \pm 12^{stat} \pm 41^{syst}$
Время распада	τ_f	фм/с	6.77 ± 0.68	10.42 ± 0.53
Плотность энергии	ϵ	ГэВ/фм ³	9.1	21 ± 2
Объем при распаде	V	фм ³	2177 ± 378	4792 ± 582
Материя к антиматерии	bar-p/p	—	0.8	0.991 ± 0.015

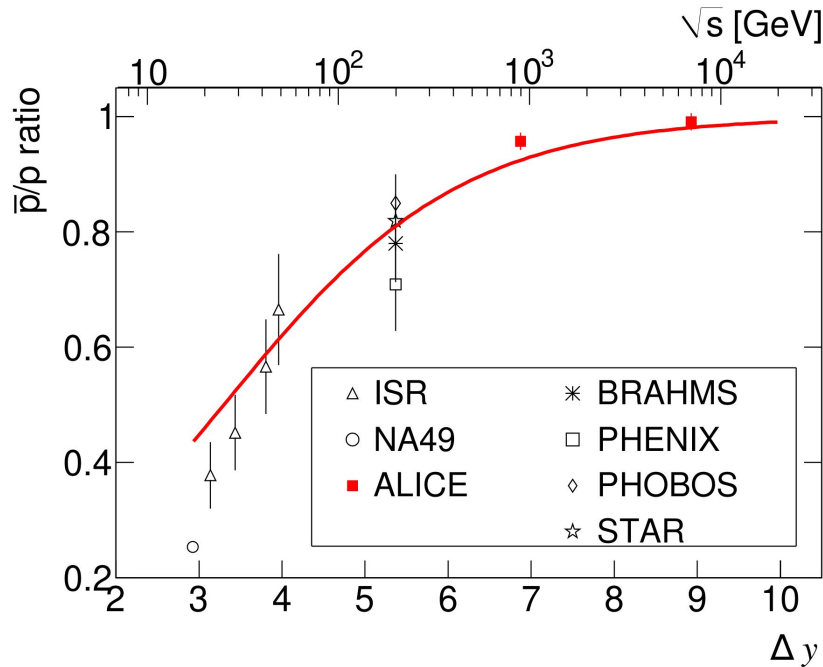
Столкновение двух ядер свинца: рождаются десятки тысяч новых частиц



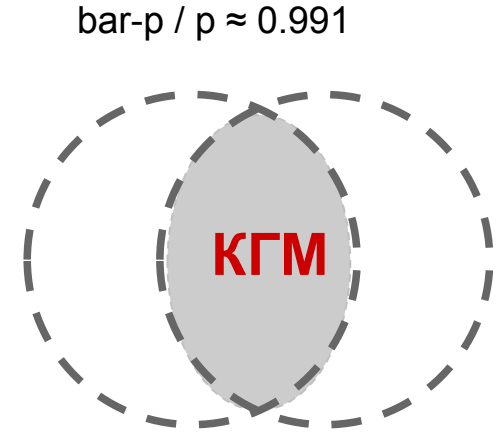
$$\left. \frac{dN}{d\eta} \right|_{\eta=0} = 1600$$

Столкновения повторяются сотни миллионов раз
при разных энергиях и для разных типов ядер

Условия образования КГМ: отношение материи к антиматерии



ALICE PRL105 (2010) 072002

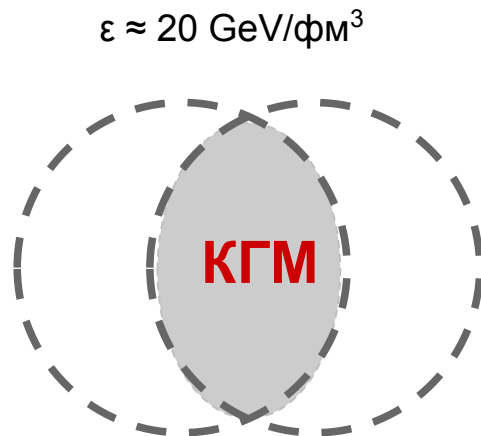
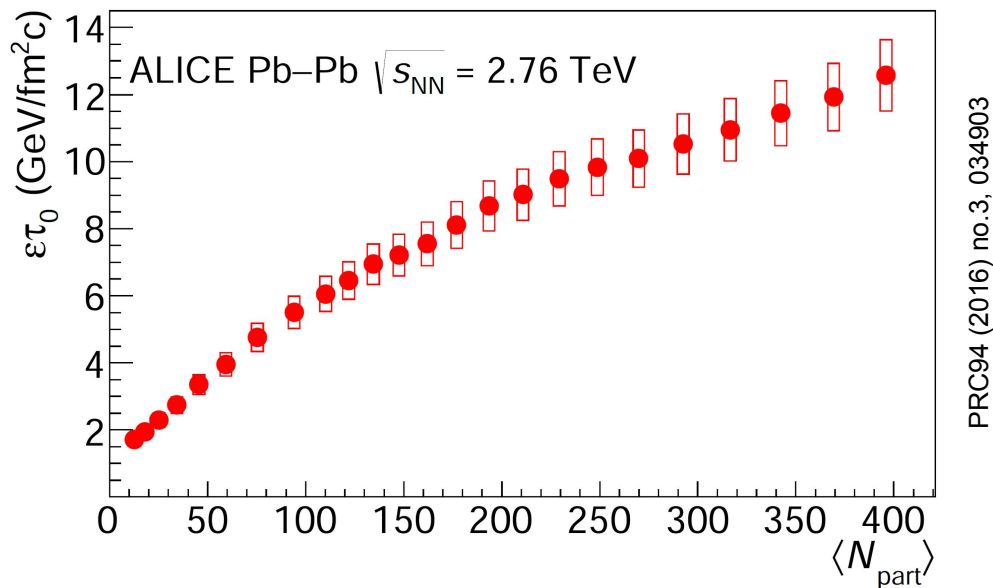


Почти полная симметрия рождения материи и антиматерии
→ условия, близкие к ранней Вселенной ($t \sim 10^{-4}$ с)

Необходимые условия для формирования КГП

- Плотность энергии примерно в 10 раз больше, чем в ядре
 $> 1 \text{ ГэВ/фм}^3$
- Температура в 10^5 горячее чем на солнце
 $\sim 200 \text{ МэВ} (2 \times 10^{12} \text{ К})$
- Достаточно большой размер для установления деконфайнмента
 $\sim$ больше чем несколько ферми (10^{-15})
- Достаточно времени для установления равновесия
 $> 1 \text{ фм/с} (10^{-24} \text{ сек})$

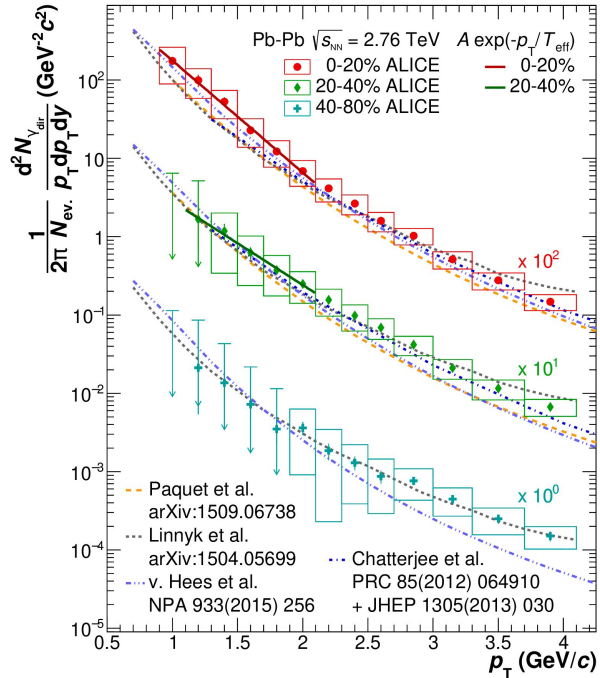
Условия образования КГМ: плотность энергии в области перекрытия



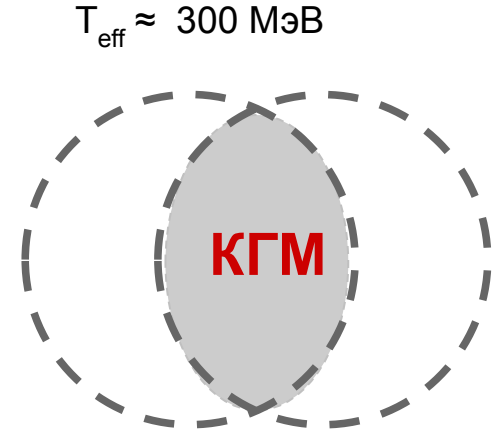
Намного выше, чем плотность "холодной" КХД материи

- множественное рождение кварков и глюонов
- необходимое условие применимости макроскопического описания КГМ

Условия образования КГМ: излучение прямых фотонов

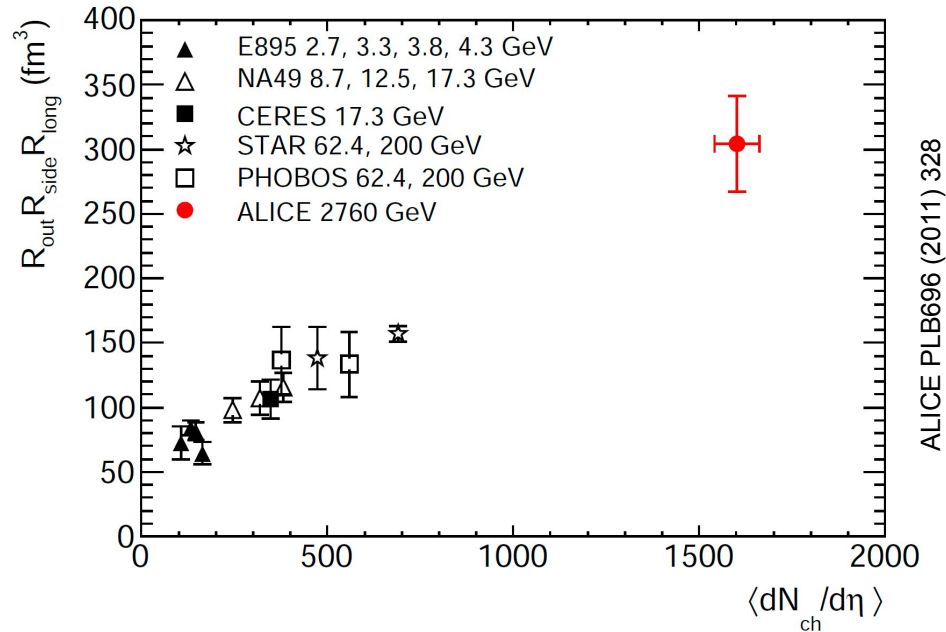


ALICE PLB754 (2016) 235

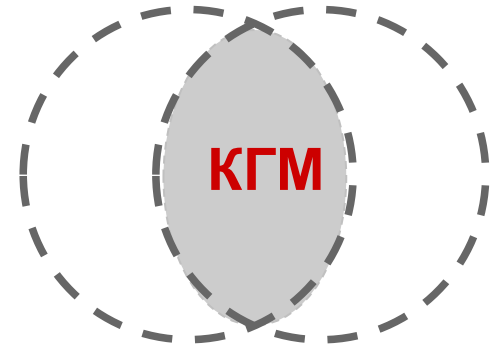


Достигаемая температуры намного выше чем для фазового перехода КХД:
 $T_c \sim 156$ МэВ

Условия образования КГМ: размер области образования

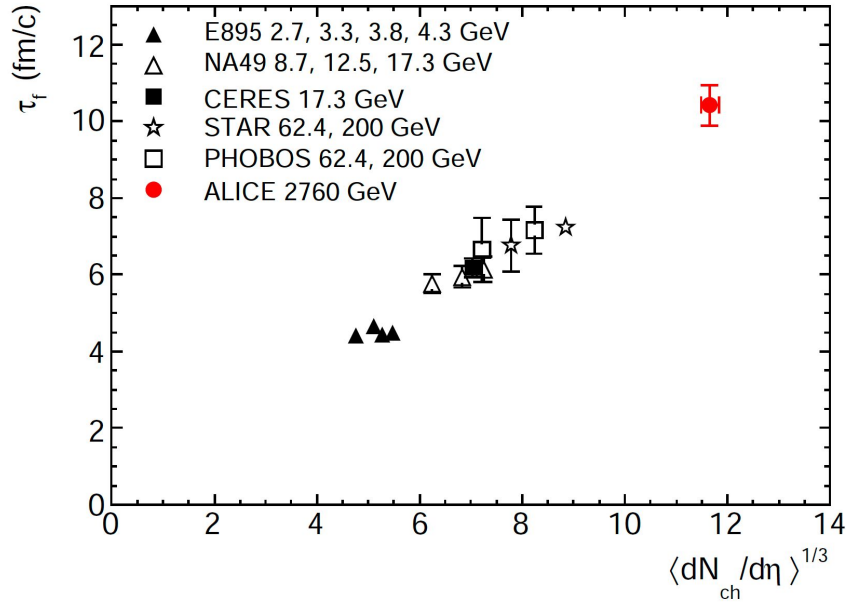


$$V \approx (2\pi)^{3/2} R_{out} R_{side} R_{long} \approx 5000 \text{ fm}^3$$

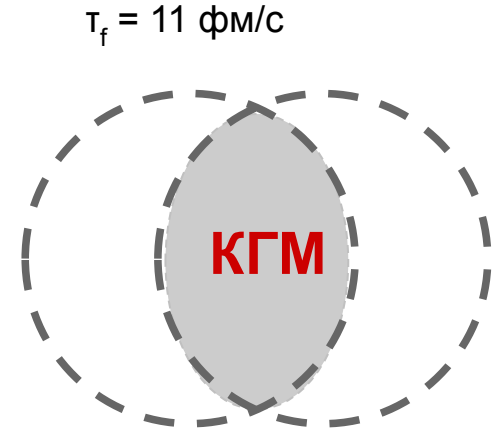


Размер системы гораздо больше радиуса протона (0.85 фм)
 → необходимое условие для деконфайнмента
 (свободные кварки и глюоны в конечном объеме)

Условия образования КГМ: время жизни системы



ALICE PLB696 (2011) 328



Намного дольше времени термализации (0.1 фм/с).
Необходимое условие для достижения термодинамического равновесия

Условия образования КГМ на LHC

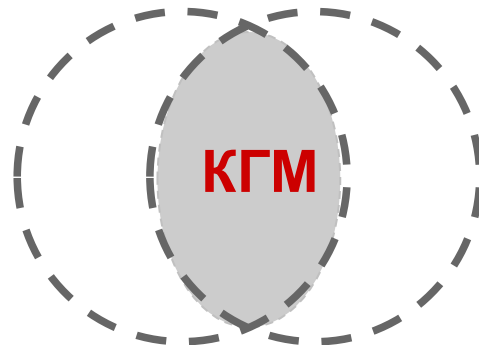
$$\varepsilon \approx 20 \text{ ГэВ/фм}$$

$$V \approx 5000 \text{ фм}^3$$

$$\tau_f = 11 \text{ фм/с}$$

$$\bar{p} / p \approx 0.991$$

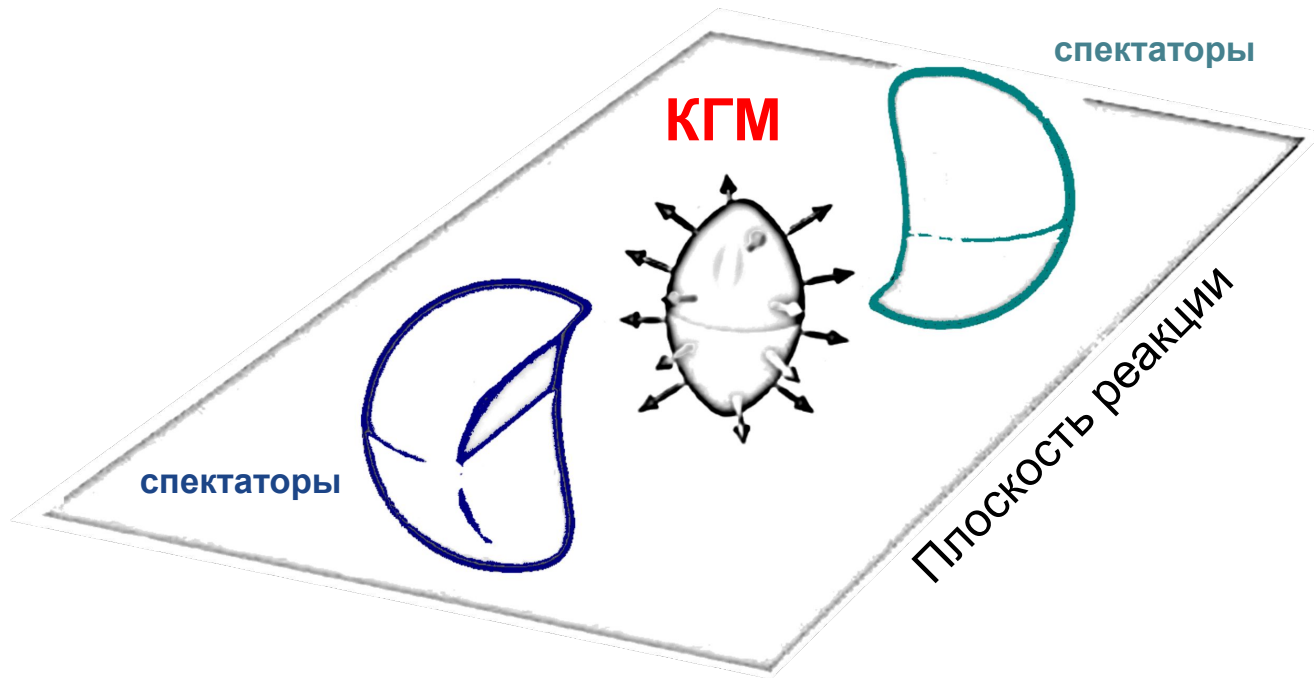
$$T_{\text{eff}} \approx 300 \text{ ГэВ}$$



Предпочтительные условия для образования горячей, плотной и долгоживущей КГМ в условиях, близких к ранней Вселенной

Определение свойств КГП & Анизотропные коллективные потоки

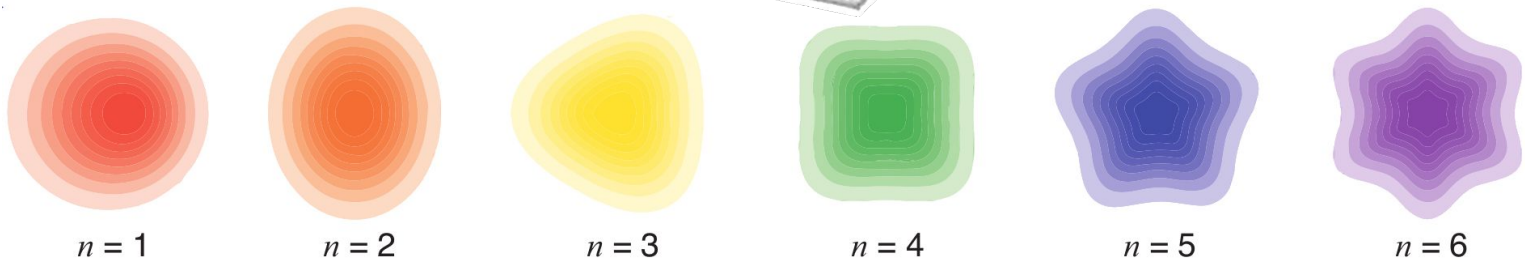
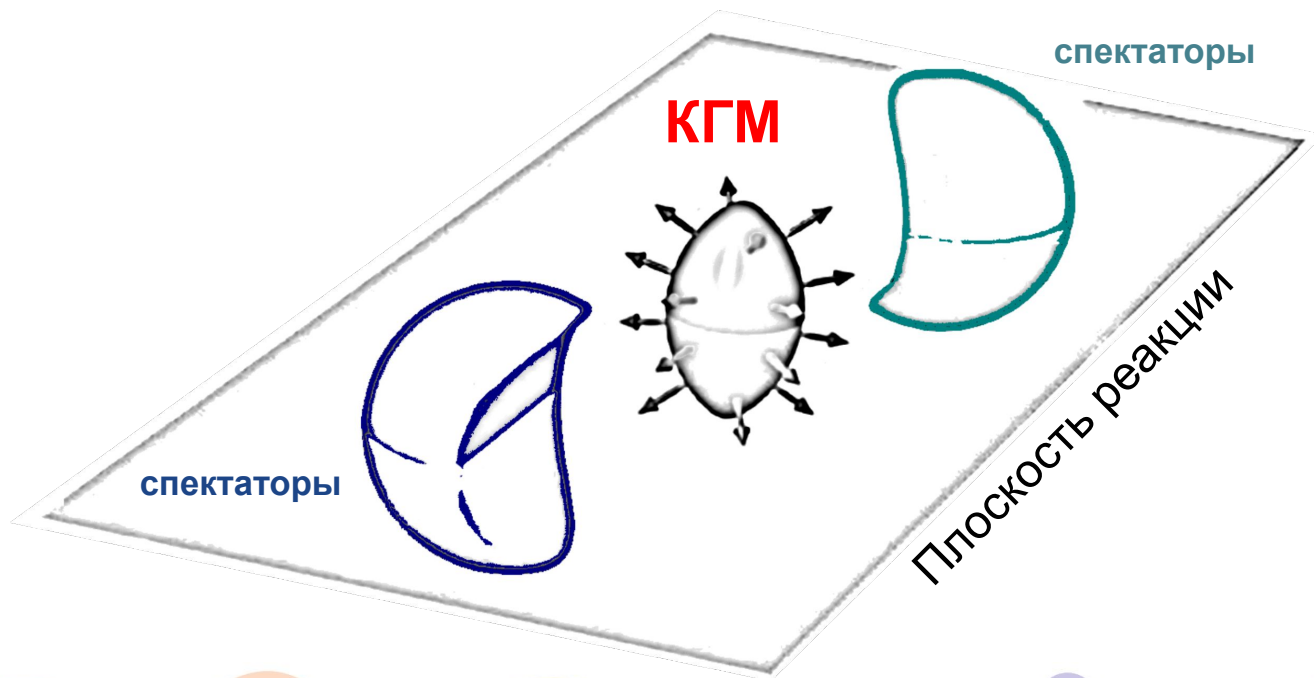
Анизотропные коллективные потоки



Плоскость реакции:
направление движения ядер и прицельного параметра

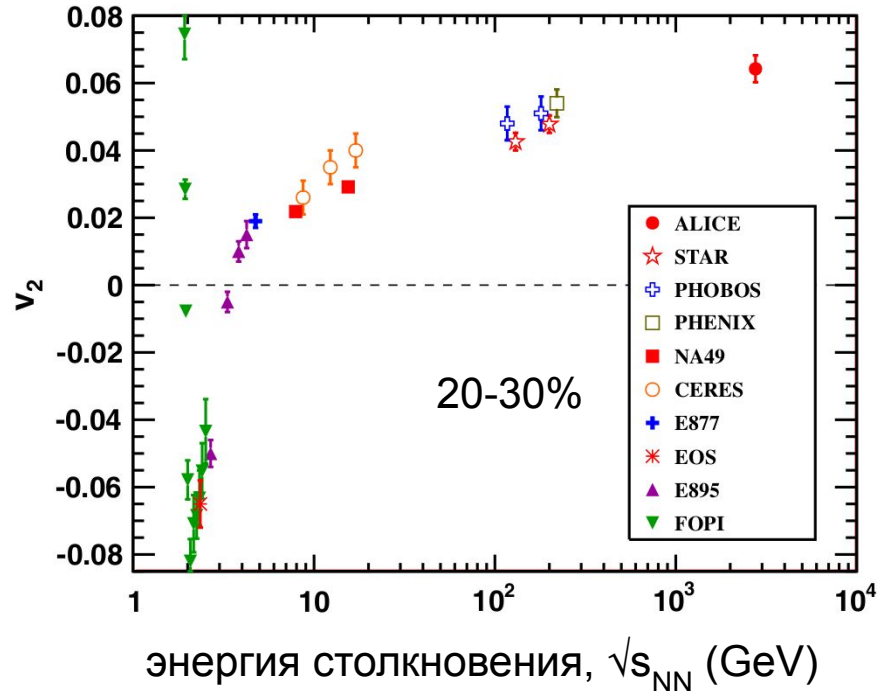
Область перекрытия имеет форму эллипса

Анизотропные коллективные потоки



Эллиптический поток (v_2) как функция энергии столкновения

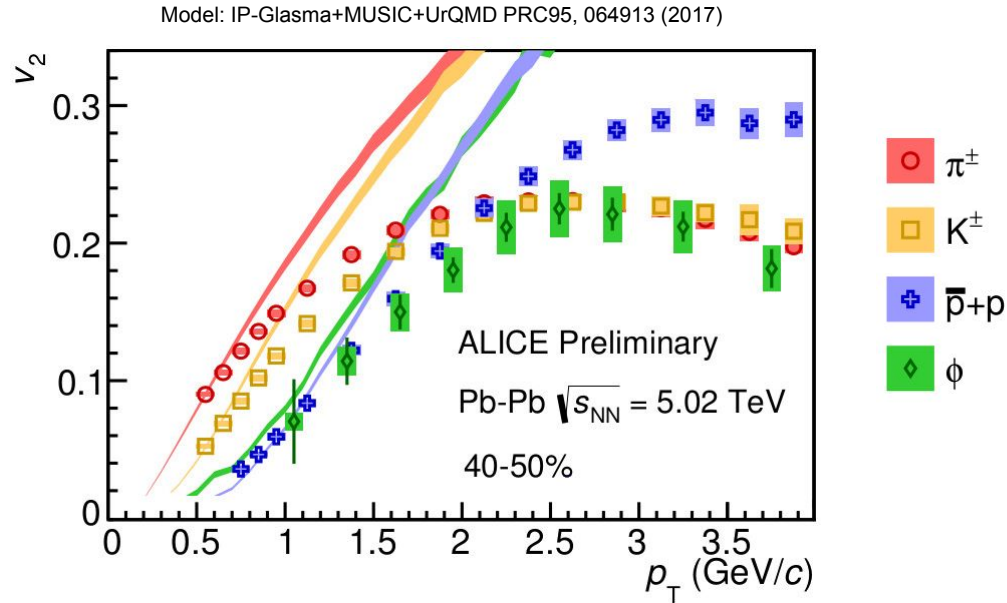
ALICE PRL105, 252302 (2010)



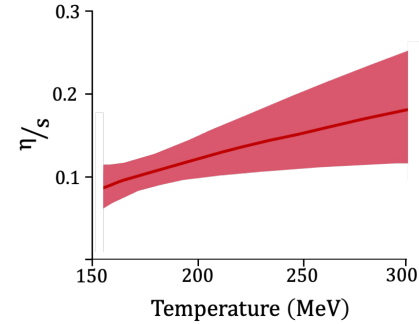
Экспериментальные данные
покрывают четыре порядка по
величине энергии столкновения

Данные из экспериментов в
GSI, AGS, SPS, RHIC, и LHC

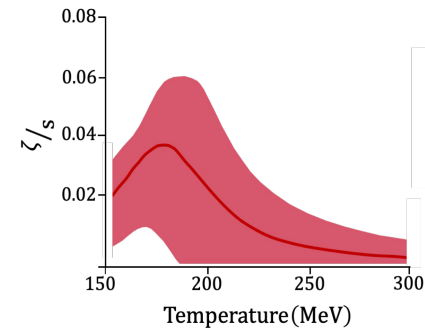
Гидродинамическое описание v_2



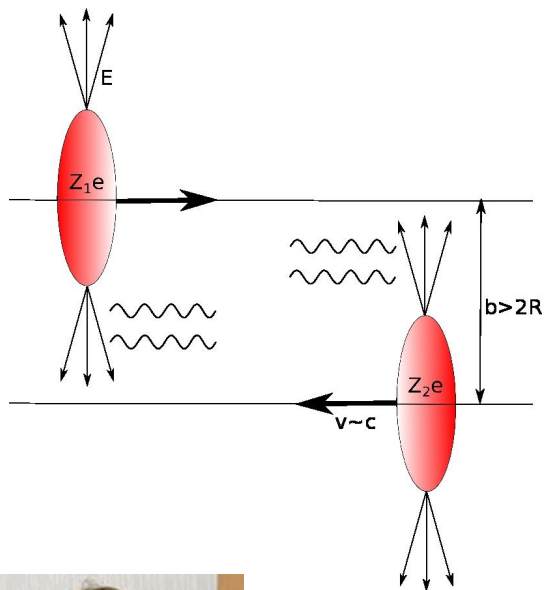
сдвиговая вязкость КГМ



объемная вязкость КГМ



Ультрапериферийные столкновения (UPC) ядер



И.А. Пшеничнов

При ультрапериферийных столкновениях ультрарелятивистские ядра могут распадаться за счет своих лоренц-сжатых кулоновских полей

Модель RELDIS:

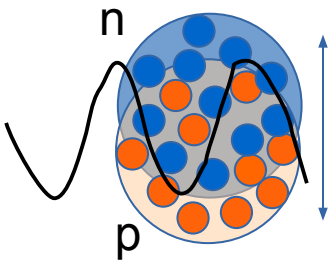
Создана совместно ИЯИ и Институтом Нильса Бора

Монте-Карло модель релятивистской электромагнитной диссоциации является уникальной реализацией метода Вайцзеккера-Вильямса для описания испускания и поглощения эквивалентных фотонов.

RELDIS, в свою очередь, основан на модели фотоядерной реакции, также созданной в ИЯИ

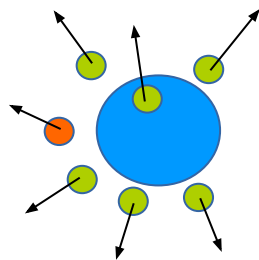
RELDIS: Модель релятивистской электромагнитной диссоциации, созданная в ИЯИ

Возбуждение ГДР

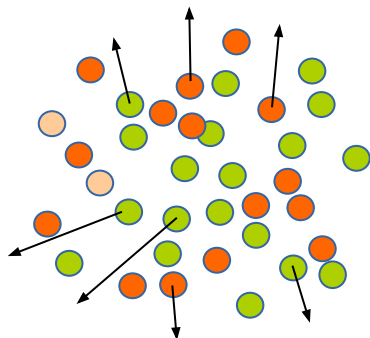
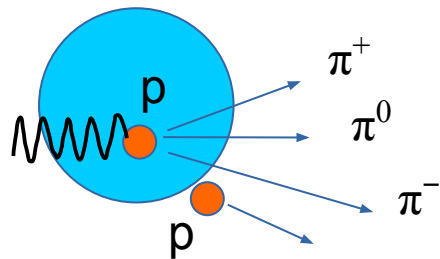


● n

● p



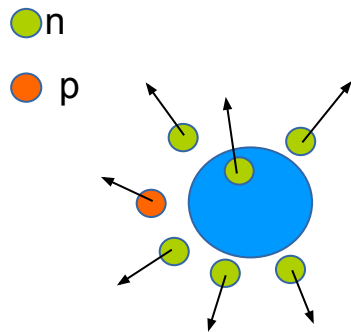
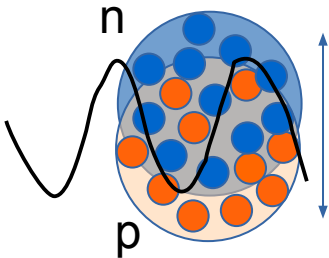
При малых возбуждениях
в основном испаряются нейтроны



Распад на большое число фрагментов
случается редко из-за низкой средней
энергии возбуждения

Предсказание для сечений вылета тяжелых ядер в столкновениях ядер свинца на LHC

Возбуждение ГДР



заряд	нуклид	Сечение (b)
82	$^{188-208}\text{Pb}$	144.7
81	$^{185-207}\text{Tl}$	29.9
80	$^{181-206}\text{Hg}$	13
79	$^{178-205}\text{Au}$	6.2

В процессе электромагнитной диссоциации ядра золота образуются из свинца почти так же часто, как адроны в столкновениях ядер свинца

Мечта средневековых алхимиков - реальность на LHC...

Примечательно:

В 2015 году, при плановом техническом обслуживании обнаружено около 4 тонн золота внутри Большого адронного коллайдера

<https://bullion.directory/cern-scientists-create-230m-dollars-gold-in-lab>



Модернизация существующих
И
подготовка новых
экспериментальных установок

Вклад ИЯИ в модернизация существующих установок

NA61/SHINE на SPS



Модернизация переднего
адронного калориметра

Разработка новых
кремниевых детекторов пучка

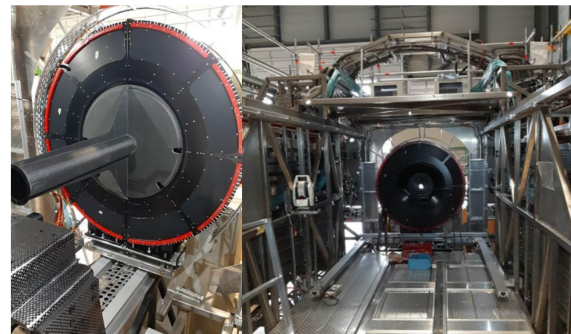
Разработка методов определения
центральности по спектарам

BM@N на Нуклотроне



Создан новый
адронный калориметр
для будущих запусков
эксперимента BM@N
на нуклотроне

ALICE на LHC



FIT (Fast interaction Trigger)

окончательный интеграционный тест
FV0 и FT0-A в октябре 2020 года

FT0-C готов к установке на ALICE
в декабре 2020 года

Будущие ускорители и коллайдеры

НИКА

Сверхпроводящий коллайдер
протонов и тяжёлых ионов
(ОИЯИ, Дубна)



FAIR

Центр по исследованию
ионов и антипротонов
(Дармштадт, Германии)



Стройплощадки НИКА и FAIR (2020)

НИКА

ВВОД В ЭКСПЛУАТАЦИЮ: 2022



Аэро-видеосъемка

<https://youtu.be/cK4eUWbzn5w?t=142>

FAIR

ВВОД В ЭКСПЛУАТАЦИЮ: 2025



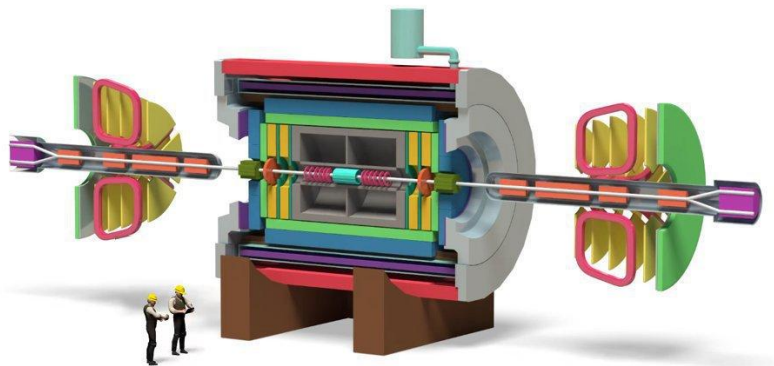
Аэро-видеосъемка

<https://www.youtube.com/watch?v=O4J3nx2pnls>

Будущие установки в России и Германии

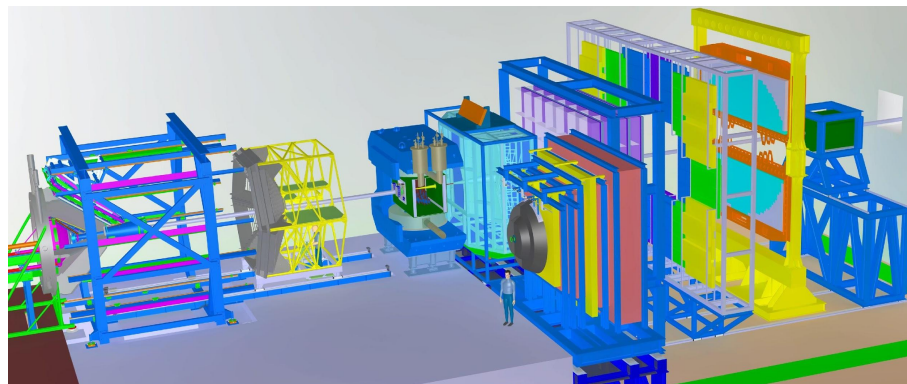
MPD

Многоцелевой детектор на НИКА



CBM

Сжатая барионная материя на ФАИР



Вклад ИЯИ в будущие установки в России и Европы



А. Ивашкин

Ф. Губер

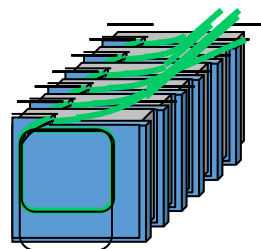
Л.В. Кравчук

Разработка и создание передних адронных калориметров, а также методов их калибровки

Технология основана на модулях адронного калориметра, собранных из слоев свинца и сцинтиллятора.

Сбор света с помощью спектросмещающего оптоволоконна (WLS)

Считывание сигнала кремниевыми фотозлектронными умножителями (SiPM)



Коллеги ИЯИ РАН



Молодые исследователи и студенты ИЯИ РАН

Молодые ученые



Alexander Izvestnii



Dmitry Finogeev



Oleg Petukhov



Dmitry Borisenko

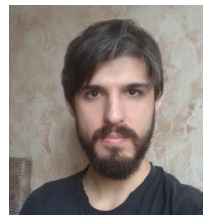
Аспиранты



Nikolay Karpushkin
МФИ



Elizaveta Zherebzova
МИФИ

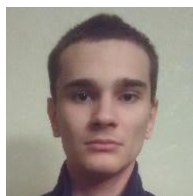


Vadim Volkov
МФИ



Alexander Strizhak
МФИ

Студенты (МИФИ, МФТИ)



Alexander Baranov
МИФИ



Irina Yumatova
МИФИ



Alexander Makhnev
МФТИ



Султан Мусин
МФТИ



Dmitry Gerasimov
МФТИ

Рабочие группы ИЯИ РАН



Faces behind FIT

Поздравляю ИЯИ РАН
с 50-ти летием!

