

# Изучение сильновзаимодействующей материи в столкновениях ядер на ускорительном комплексе NICA



В.И. Колесников  
ЛФВЭ, ОИЯИ

**Школа ОИЯИ-МФТИ по физике кварк-глюонной материи  
Дубна, УНЦ ОИЯИ**

# План лекции

- Введение (предмет исследования, единицы измерения, и т.д.)
- Сильновзаимодействующая материя, методы ее получения и свойства, фазовая диаграмма КХД и деконфайнмент
- Современное состояние исследований КГП, программа физических исследований на NICA и детекторы для изучения столкновений ядер
- Заключение,

# Литература

Д. Перкинс “Введение в физику высоких энергий”

Ch.-Y. Wong “Introduction to high-energy heavy-ion collisions”

V. Friman et al. “The CBM physics book. Compressed baryonic matter  
in laboratory experiment”

ALICE/LHC Experiment - <https://alice-collaboration.web.cern.ch/>

STAR/RHIC Experiment - <https://www.star.bnl.gov/>

NA61-SHINE/SPS Experiment - <https://shine.web.cern.ch/>

MPD/NICA Experiment - <http://mpd.jinr.ru/>

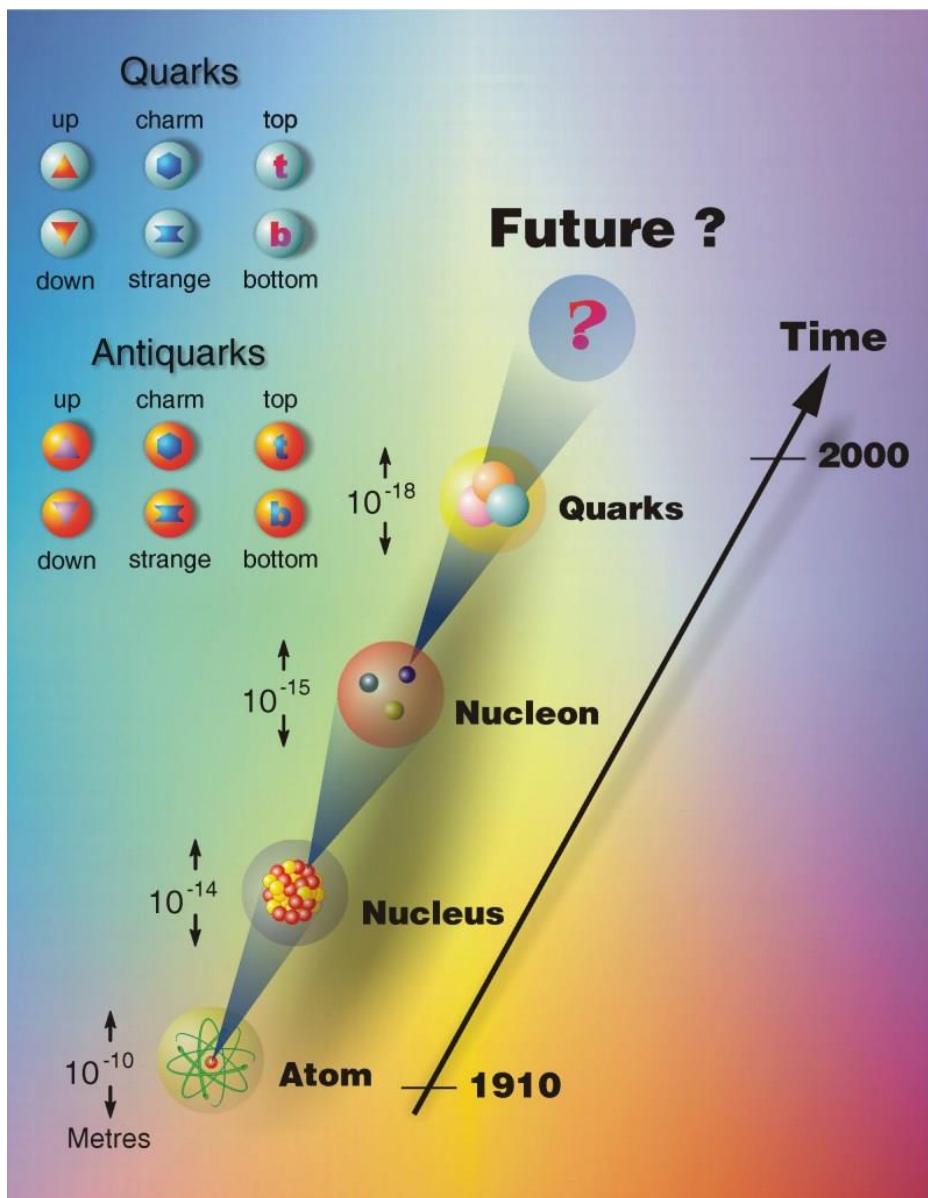
CBM/FAIR Experiment – <https://www.cbm.gsi.de/>

BM@N/NICA Experiment - <https://bmn.jinr.ru/>

# I. Введение

- Системы единиц и характерные величины исследуемых процессов
- Кварки и глюоны, сильные взаимодействия, Квантовая ХромоДинамика (КХД), конфайнмент

# Цель исследований – изучение структуры Материи на субатомном уровне и характера сил, действующих между частицами



## Единицы измерения:

$[L]$ : ферми  $1 \text{ ф} = 10^{-15} \text{ м}$  (размер протона)

$[E]$ : электрон-вольт  $1 \text{ eV}^* = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

$v(\beta)$  : скорость в единицах  $c$

$[t]$ :  $\text{fm}/c$ ,  $1 \text{ fm}/c = 3 \cdot 10^{-24} \text{ сек.}$

$[\rho]$  :  $M/V$  (в единицах ядерной плотности)

$[T]$  : температура (в энергетических един.)

## Порядок величин в исследуемых процессах

$L$  : 0.1-10 fm

$E$  : 1-3000 GeV

$\beta$  :  $\sim 1$

$t$  : 1-50 fm/c

$T$  : 100 MeV ( $\sim 10^{12} \text{ K}$ )

$\rho > \rho_0 = A/(4/3\pi R^3) = 2.3 \cdot 10^{17} \text{ kg}/\text{m}^3 \text{ for Au}$

\* 1 eV равен кинетической энергии приобретаемой электроном после прохождения разности потенциалов 1 Вольт ( $E = qV = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Q} \cdot 1 \text{ V}$ )

# Немного о системе используемых единиц

Естественные (natural) системы единиц определяют

$h = c = k_B = 1$  (и для величины константы и размерности)

$[v] = [L]/[t]$  – длина и время имеют одинаковую размерность

$E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4$  энергия, (импульс\* $c$ ) и (масса\* $c^2$ ) имеют одинаковую размерность

$h \sim E t$ , тогда энергия и время имеют обратные размерности

$E = kT$ , температура в единицах энергии

В качестве единственной размерной величины принята единица энергии **GeV**

К примеру,

масса протона  $m_p = 0.938 \text{ GeV}/c^2 = 1.67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

размер протона (зарядовый радиус)  $\sim 4 \text{ GeV}^{-1} = 0.8 \text{ fm} = 8 \cdot 10^{-16} \text{ m}$

Время жизни  $\rho$ -meson  $\tau \sim 7 \text{ GeV}^{-1} = 4.5 \cdot 10^{-24} \text{ s}$

Температура фазового перехода в состояние КГП  $T \sim 160 \text{ MeV} = 2 \cdot 10^{12} \text{ K}$

# Standard Model of Elementary Particles

three generations of matter  
(fermions)

interactions / force carriers  
(bosons)

	I	II	III		
mass	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$
charge	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
QUARKS	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>g</b> gluon	<b>H</b> higgs
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b><math>\gamma</math></b> photon	
	<b>e</b> electron	<b><math>\mu</math></b> muon	<b><math>\tau</math></b> tau	<b>Z</b> Z boson	
LEPTONS	<b><math>\nu_e</math></b> electron neutrino	<b><math>\nu_\mu</math></b> muon neutrino	<b><math>\nu_\tau</math></b> tau neutrino	<b>W</b> W boson	

- 6 типов кварков (flavors)
- 6 лептонов
- 12 переносчика взаим.
- + H-бозон

Бозон (Boson) : целый спин (0,1,2,..)

Фермион (Fermion) : полуцелый спин (1/2,3/2,.. в ед. константы Планка  $\hbar$ )



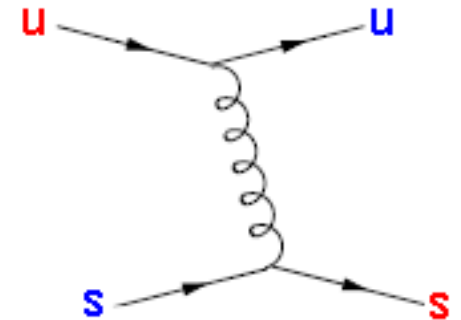
# Кварки и глюоны в КХД

- Каждый кварк обладает доп. зарядом (квантовым числом) – **цветом**.  
Имеется **3** цвета так что каждый кварк обладает **3**-мя дополнительными степенями свободы по цвету (**red, green, blue**)
- Изолированные цветные объекты не наблюдаемы а кварки существуют в Природе только в составе бесцветных объектов (синглетных по цвету с полным цветовым зарядом **0**) – адронов (**hadrons**)
- Кварки взаимодействуют через обмен глюонами (**gluon**).  
Имеется **8** типов глюонов, они сами имеют цветовой заряд (цвет+антицвет) и могут взаимодействовать друг с другом.

Теория сильного взаимодействия кварков и глюонов называется

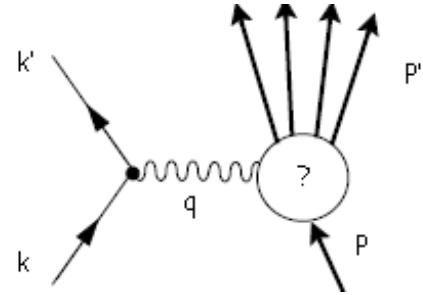
**КХД** – Квантовая Хромо-Динамика  
QCD (Quntum ChromoDynamics)

Две особенности КХД – **асимптотическая свобода**  
(asymptotic freedom)  
и **конфайнмент** (confinement)



# Strong interactions: running “constant”

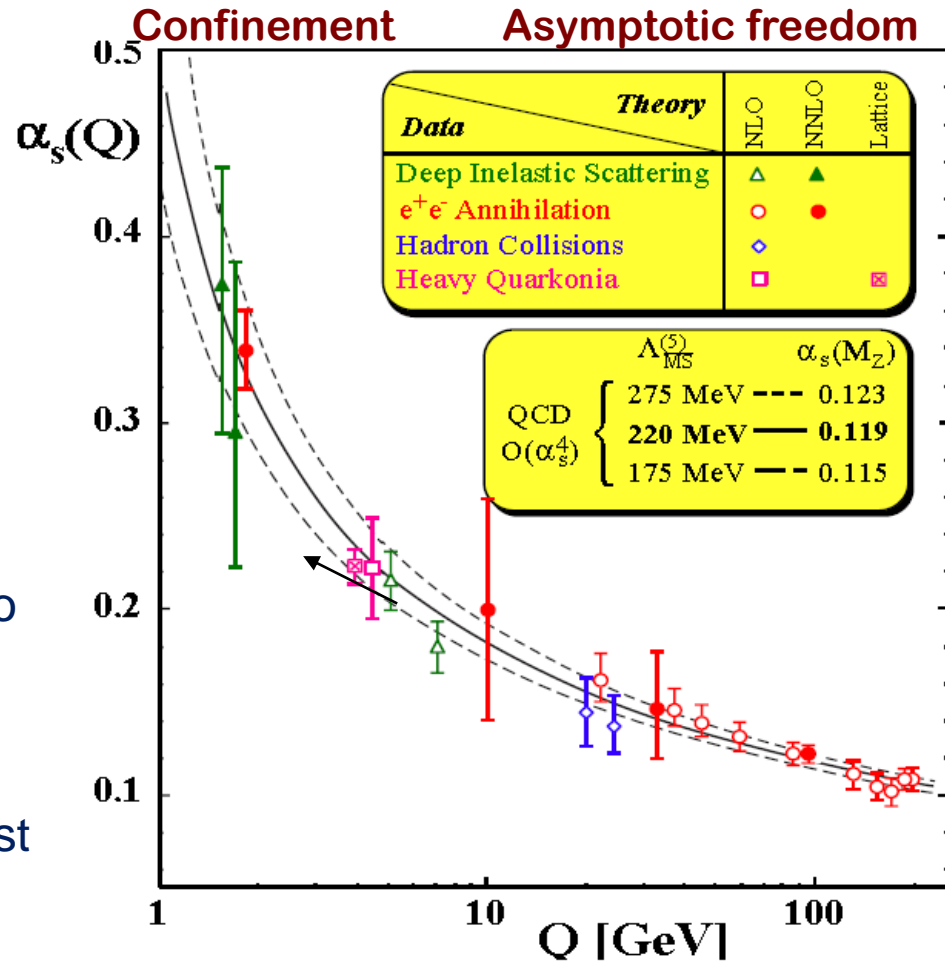
Strong interactions govern by  $\alpha_s$



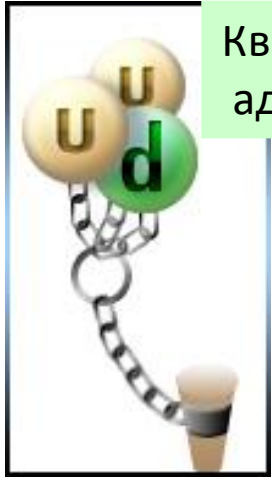
$$Q^2 = (-q)^2 = -(k-k')^2$$

$$\alpha_s = \frac{12\pi}{(33 - 2N_f) \ln(Q^2 / \Lambda^2)}$$

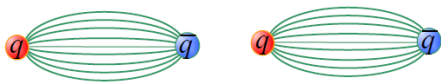
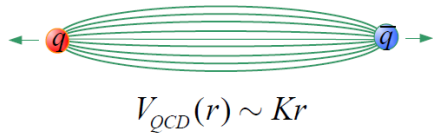
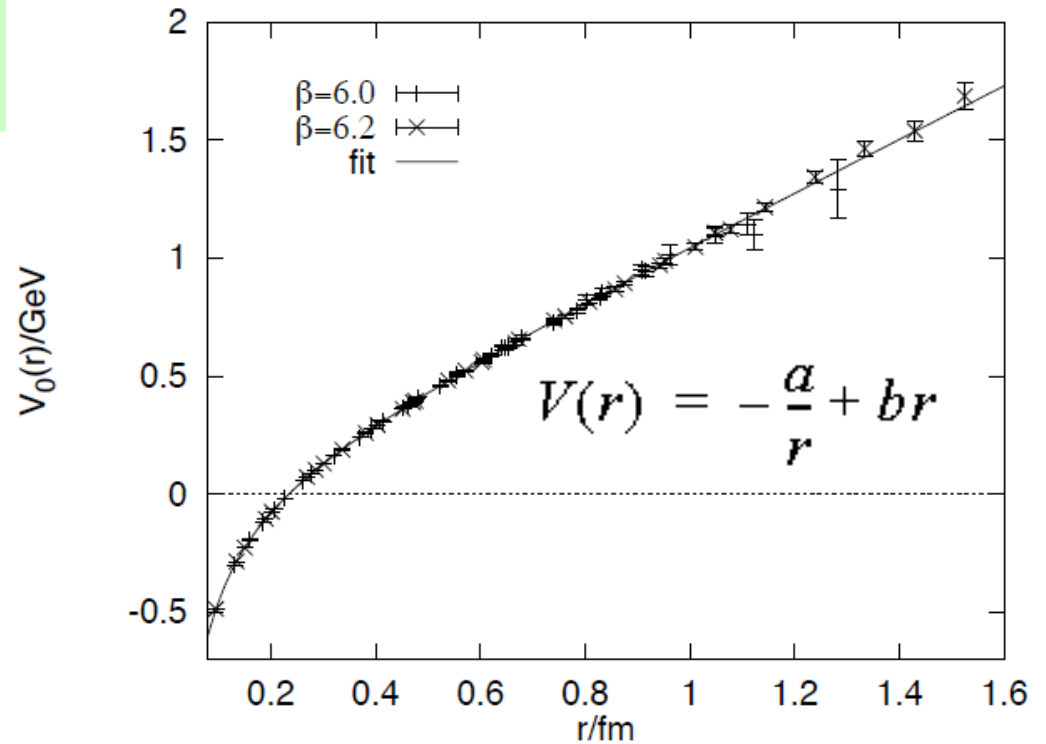
- Strength of the charge depends on the energy scale!
- At lower scales, the coupling constant is large; quark and gluons stay confined into hadrons
- At high energies/short distances/high temperatures quark and gluons are almost free → **asymptotic freedom**



# Конфайнмент (“запирание” цвета) в КХД



Кварки заперты внутри адрона (“конфайнмент”)



- Межкварковый потенциал линейно возрастает с расстоянием
- Силовые линии формируются в виде струны вследствие цветового заряда глюонов
- При попытке разделить пару кварков, возрастающая плотность энергии в струне приводит к образованию (из вакуума КХД) пары кварк-антикварк, которые рекомбинируя с исходной парой образуют новые адроны, при этом полная цветовая нейтральность сохраняется

## II. Кварк-Глюонная Плазма (КГП)

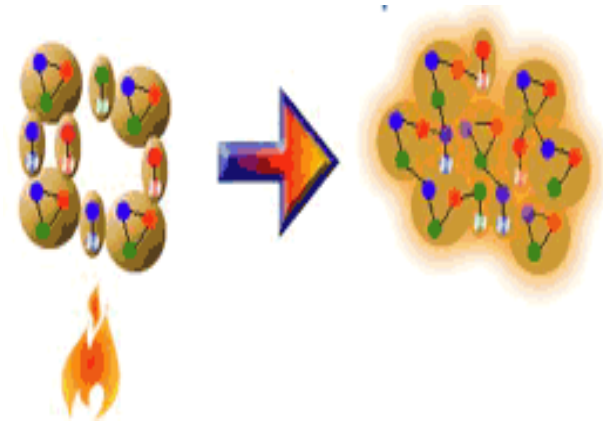
- Методы получения сильновзаимодействующей материи в лабораторных условиях, ранняя Вселенная и астрофизика
- КГП как ансамбль свободных кварков и глюонов, расчеты для фазовой диаграмма сильновзаимодействующей материи
- Фазовые переходы в столкновениях релятивистских ядер, файербол и его эволюция

# Возможен ли **деконфайнмент** в лабораторных условиях?

## Идея кварк-глюонной плазмы (КГП)

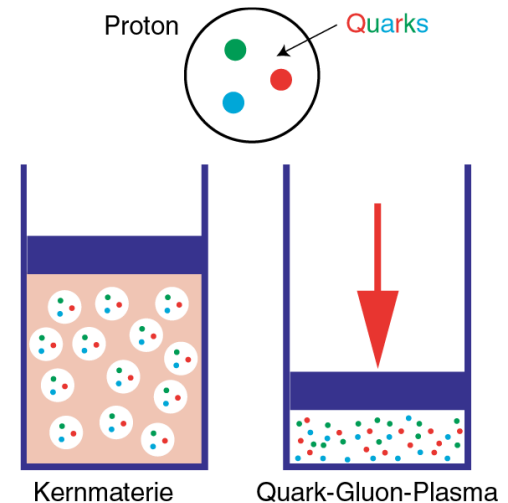
### Идея (метод) №1 : Экстремально горячая материя

- Типичная плотность энергии на адронном (ядерном)  $0.13 \text{ GeV}/\text{fm}^3$ .
- (Сверх)высокие температуры  $\rightarrow$  огромные плотности энергии  $\rightarrow$  высокие множественности частиц (согласно  $E = mc^2$ )



### Идея (метод) №2 : Экстремально **плотная** материя

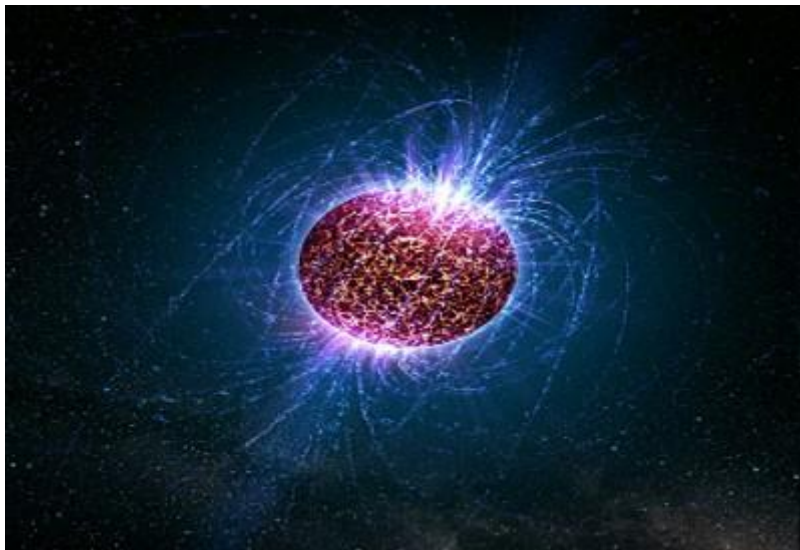
- Нуклоны в ядрах достаточно плотно упакованы
- При плотности вещества в несколько раз превышающих обычную ядерную плотность (малых расстояниях между конститuentами) материя состоит из свободных кварков (quark soup)



**Где и каким образом такие экстремальные условия  
могут быть достигнуты?**

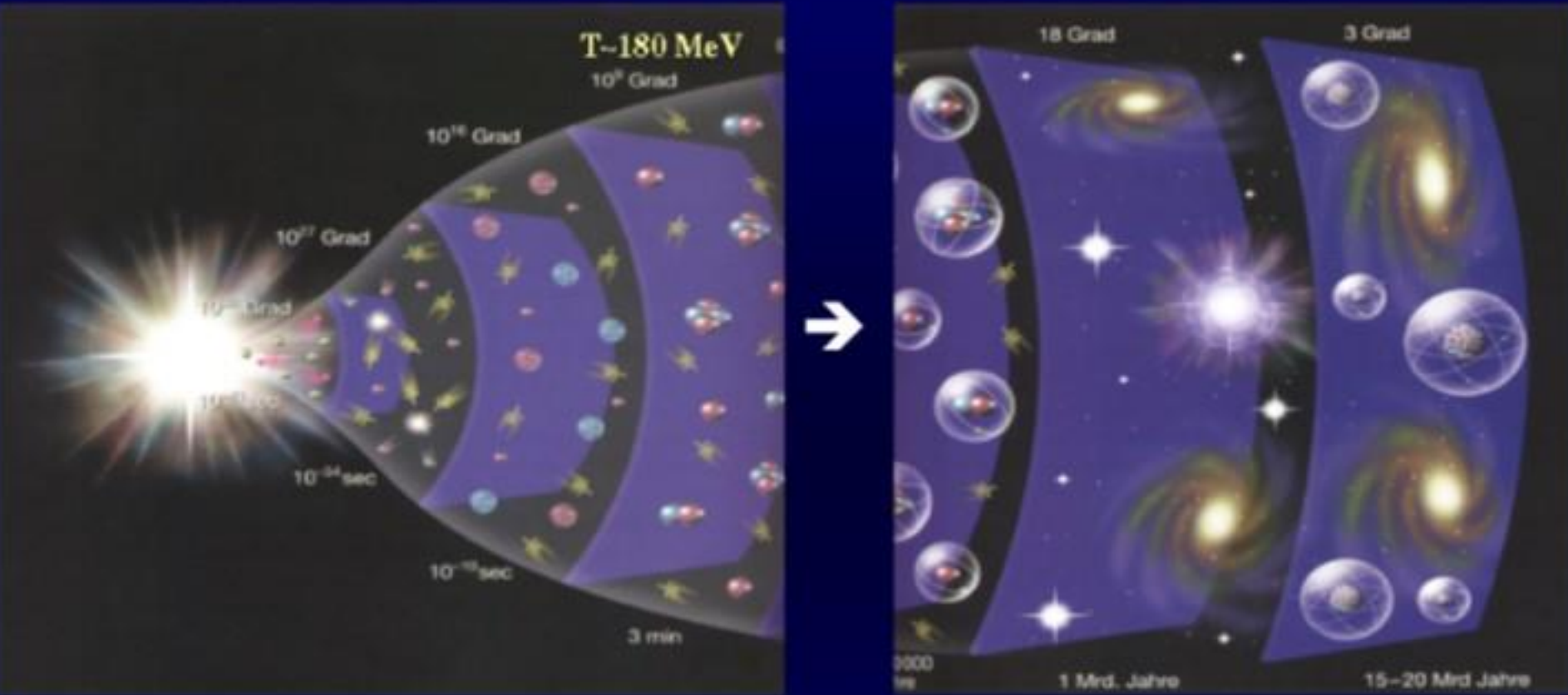


Горячая Ранняя Вселенная



(сверх)Плотные астрономические  
объекты – нейтронные звезды

# From Big Bang to Formation of the Universe



*time*

$10^{-3}$  sec  
quarks  
gluons

3 min  
nucleons  
deuterons  
 $\alpha$ -particles

300000 years  
atoms

15 Mrd years  
our Universe

~10  $\mu$ s after BB ( $T \sim 150$  MeV):  
QGP and transition to  
hadronic matter

← Can we go back in time ?

# Астрофизика и сверхплотная КХД материя

Взрыв сверхновой звезды  
SN 1604 (телескоп Кеплер)



Строение нейтронной  
звезды (весьма  
приблизительное)

Сверхплотные объекты образуются при  
взрыве сверхновых

Времена жизни объектов –  $10^7$  лет

Расстояния до объектов –  $10^n$  парсек

Частота появления - случайная

Размеры - 1-2 масс Солнца

Уравнения определяющие структуру объектов и характер эволюции слабо изучены (в основном, теоретически)



Возможно ли в лабораторных условиях воспроизвести условия, приводящие к возникновению сверхплотной материи для исследования ее свойств?

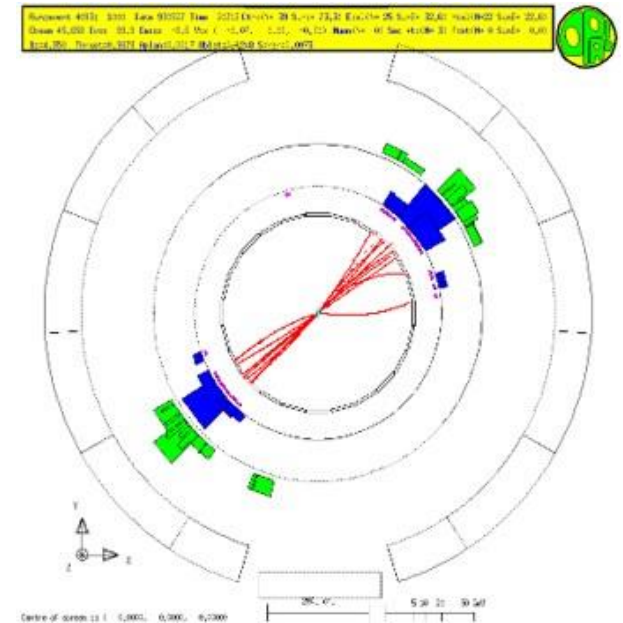


Итак, мы исследуем не индивидуальные степени свободы (отдельные кварки и глюоны), как на примере справа внизу, а именно среду (вещество, материю, ансамбль частиц) где индивидуальные степени свободы проявляют себя но не имеют принципиального значения

Т.е. используем термодинамические (гидродинамические) и статистические подходы, а именно, состояние, функции и переменные состояния (температура, хим. потенциалы, энтропия,... ), уравнения состояния, фазовая диаграмма и фазовые переходы и т.д.

Принципиальным является установление термодинамического равновесия → системы с большим количеством взаимодействующих частиц и временем жизни достаточным для установления равновесия (~ 5 столкновений)

Пример наблюдения 2-х струй частиц при столкновении кварков



# Фазовая диаграмма (на примере воды)

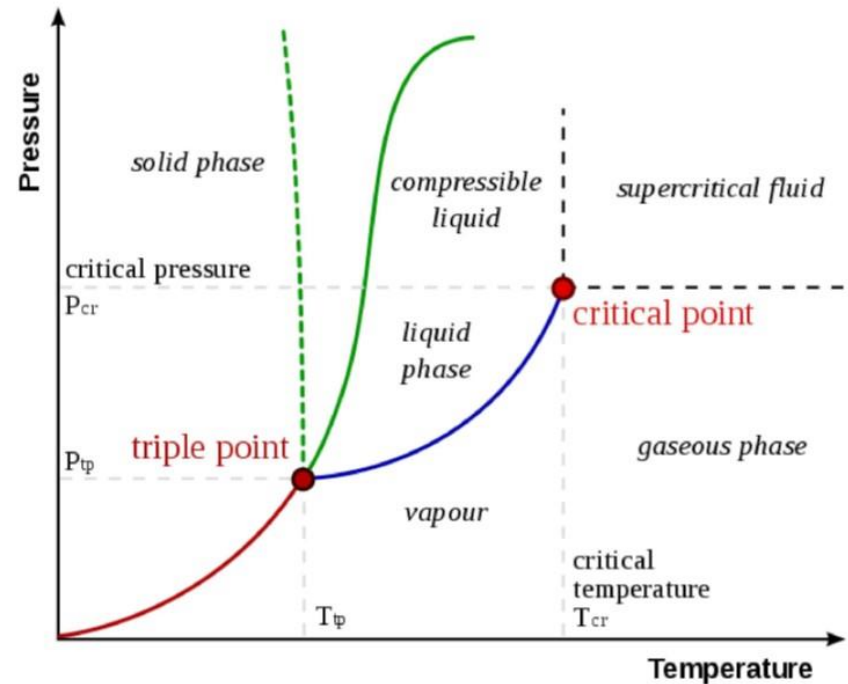
**Фаза** – однородная (по своим физическим свойствам) часть системы, отделенная от других частей границей раздела (фазовая граница).

**Смешанная фаза** – система состоящая из двух однородных частей в различных фазах.

**Фазовый переход** – изменение характерного (термодинамического) параметра системы (плотность, намагниченность, симметрия кристалла, сверхпроводимость....) спонтанно или под воздействием внешних условий. Характеризуется порядком перехода (1-рода, 2-го рода) и параметром порядка ( $L$ )

**Критическая точка** – точка изменения рода фазового перехода, резкое изменение параметра порядка приводит к значительными флуктуациями (critical opalescence)

Фазовая Диаграмма  $H_2O$



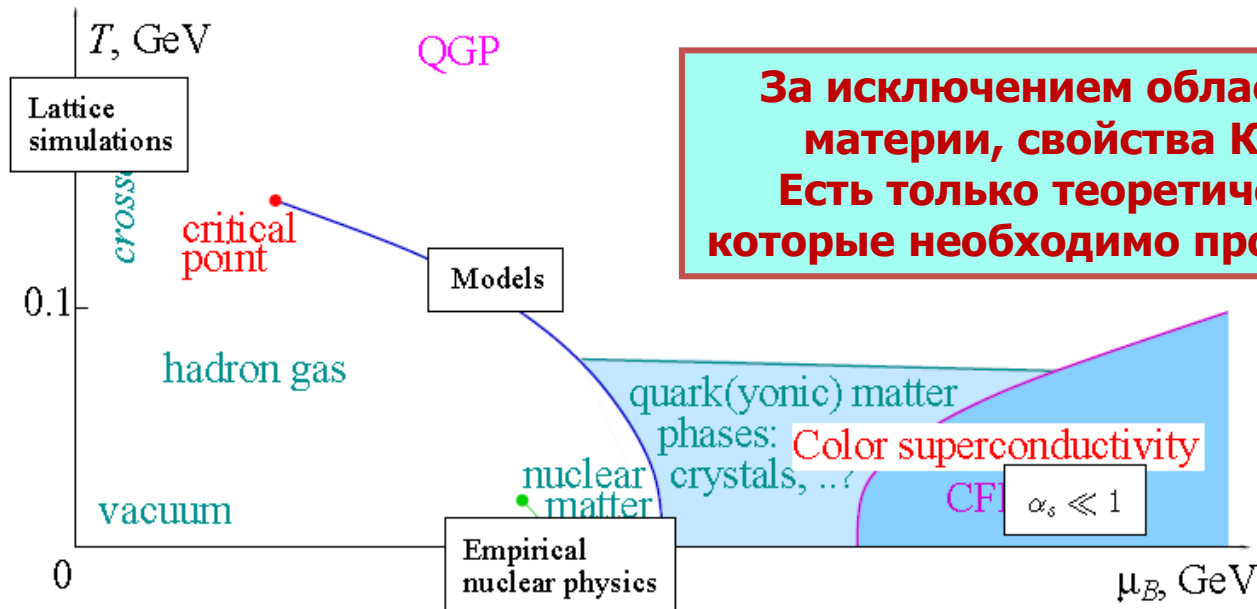
**Основные свойства ФЗ хорошо изучены**

**Положение кривых равновесия фаз и специальных точек известны**

$H_2O$  – слабо взаимодействующая материя. Каковы термодинамические законы и свойства для сильно взаимодействующей материи?

# ФД сильно взаимодействующей (КХД) материи

- ❑ Уравнение состояния КХД материи (адроны, кварки, глюоны)
- ❑ Каковы фазы КХД материи и характер фазовых переходов
- ❑ Наличие специальных точек на ФД



**За исключением области обычной ядерной материи, свойства КХД ФД неизвестны. Есть только теоретические предсказания, которые необходимо проверить в эксперименте**

$$dU = T dS - p dV + \sum \mu_i dn_i$$

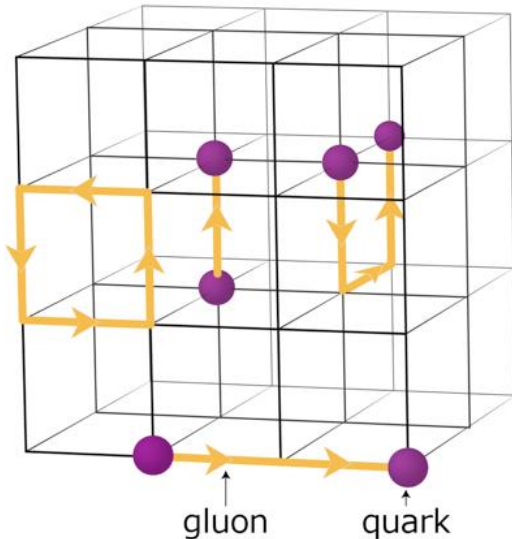
$$\Rightarrow \mu_i := \left( \frac{\partial U(S, V, n_j)}{\partial n_i} \right)_{S, V, n_{j \neq i}}$$

**Как проводятся расчеты и делаются предсказания для ФД КХД?**

- Расчеты на решетке (Lattice QCD)
- Эффективные модели
- Генераторы событий

# Calculations/predictions for strongly interacting QCD matter : Lattice QCD (LQCD)

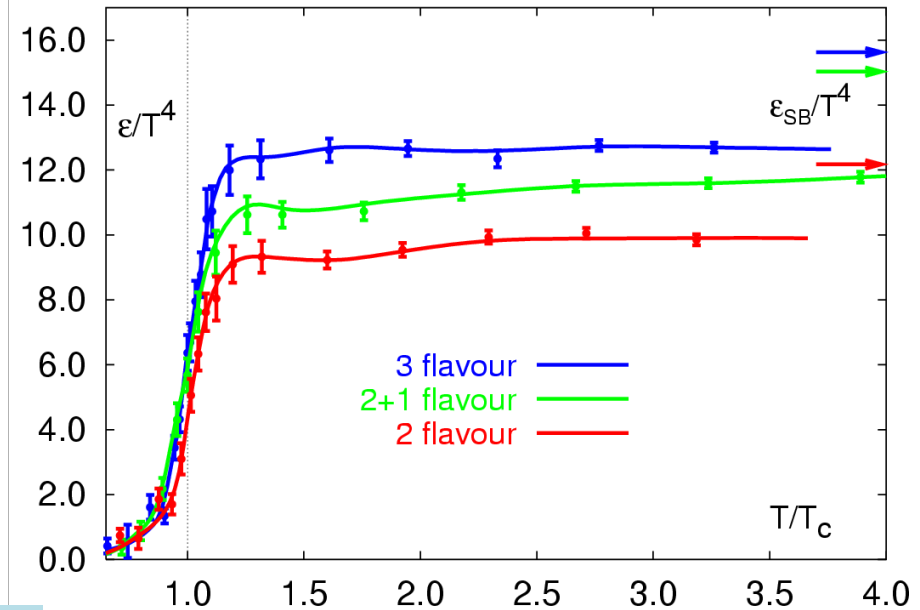
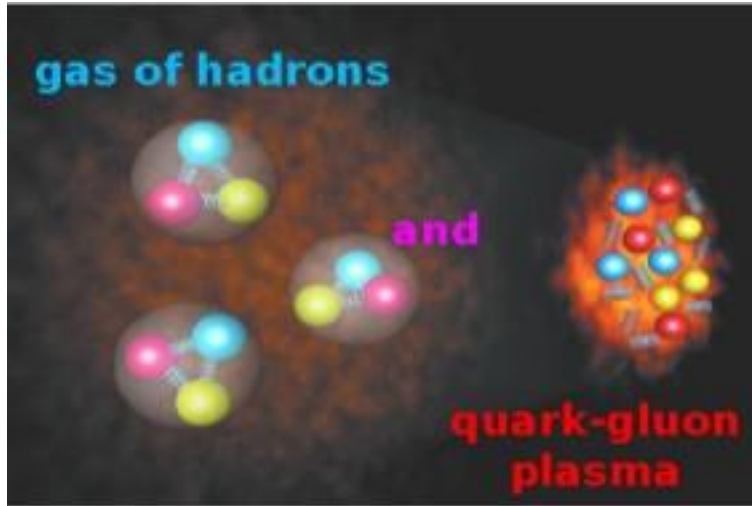
## LQCD:



- Non-perturbative method of solving QCD
- Computer simulations in discretized space
- Provides a non-perturbative tool for addressing fundamental QCD properties (hadronic spectrum, confinement and chiral symmetry, equilibrium properties of QCD at finite T)
- Difficulties: discretization, finite volume, only at vanishing  $\mu$

# Сильновзаимодействующая материя при экстремальных условиях

- КХД расчеты на решетке предсказывают резкое увеличение плотности энтропии за счет цветных степеней свободы при значении  $T \sim 170$  МэВ
- Точное значение критической температуры фазового перехода и его тип зависит от количества используемых в расчетах ароматов кварков (и их масс)
- Остаточное кварк-глюонное взаимодействие в плазме объясняет отклонение от предсказания для идеального газа



**QGP**: “A *deconfined* system of strongly interaction matter (quarks and gluons) in *thermal equilibrium* at high temperatures and/or densities. Only at asymptotic high temperatures (as QCD coupling constant  $g_s \rightarrow 0$ ) quarks behave like free particles”

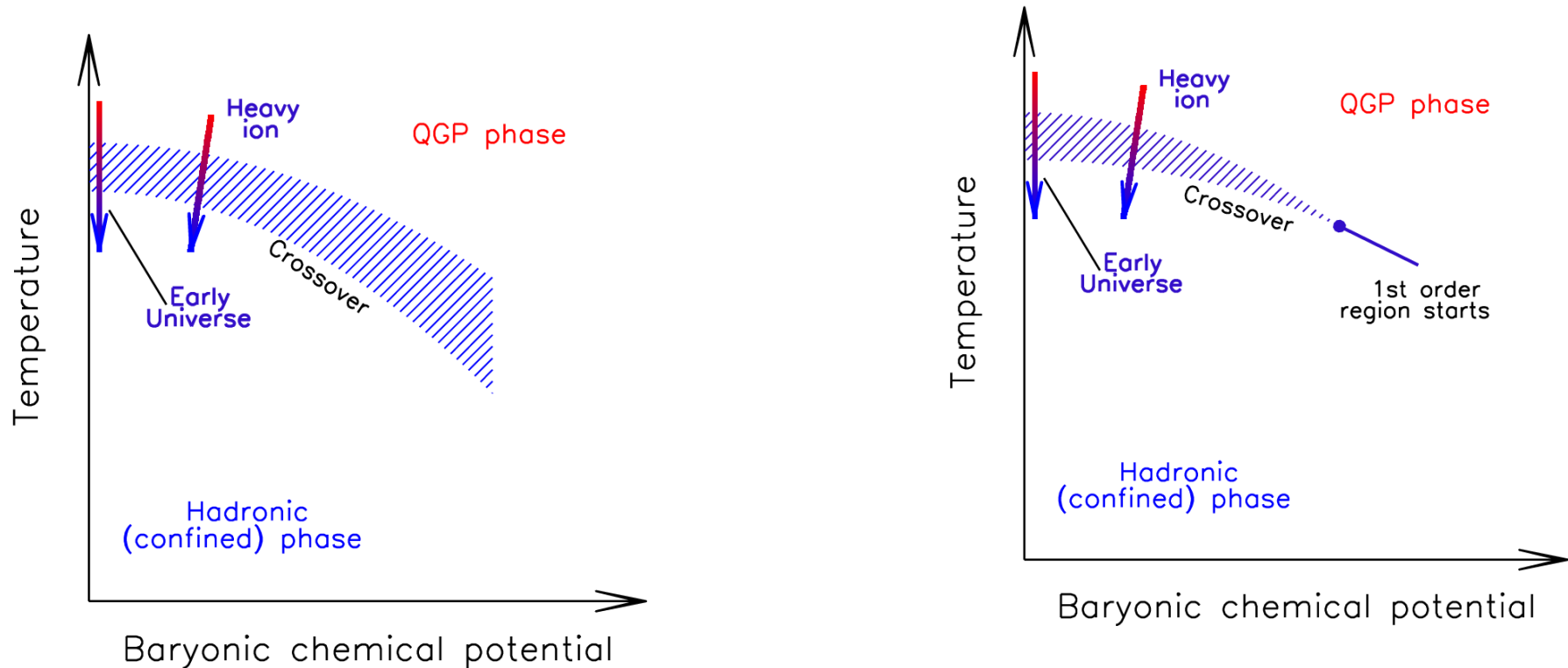
$$T_c \approx 170 \pm 8 \text{ MeV},$$

$$\varepsilon_c \approx 0.70 \pm 0.27 \text{ GeV/fm}^3$$

$$\varepsilon_{cold} \approx m_p / \frac{4}{3}\pi r_0^3 \approx 0.13 \text{ GeV/fm}^3$$

# Сильновзаимодействующая материя при экстремальных условиях (2)

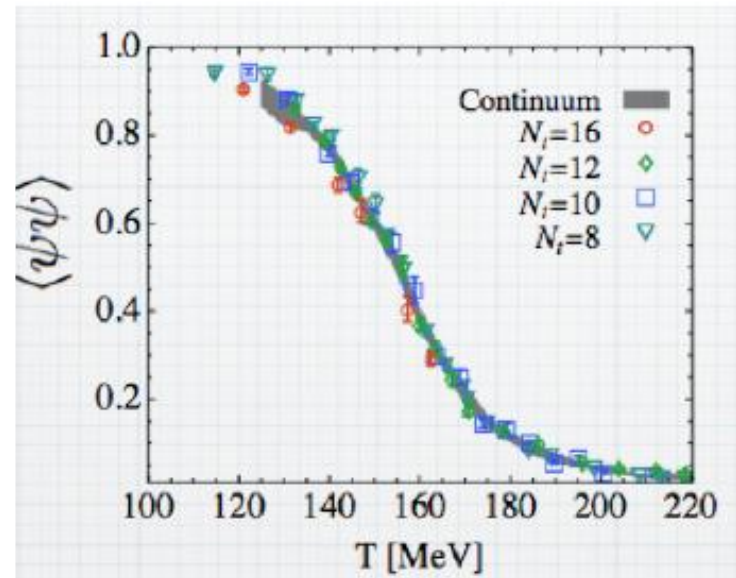
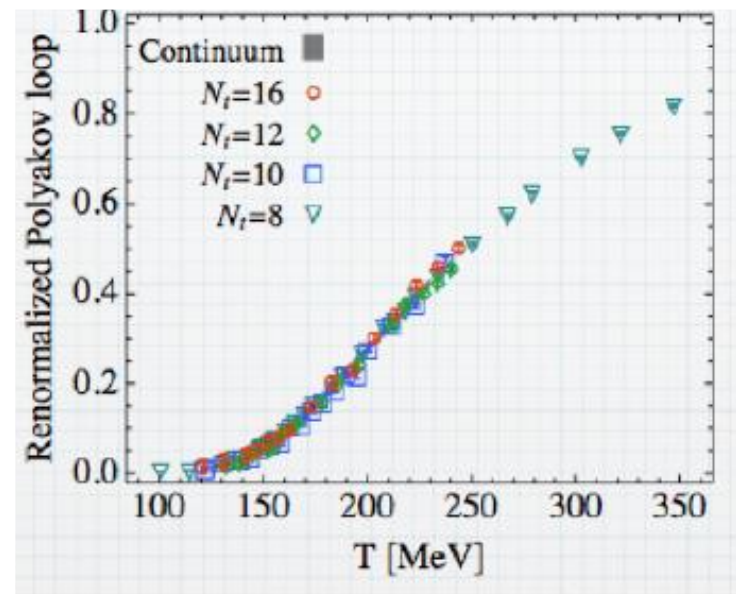
## Расчеты КХД на решетках для рода фазового перехода



- В решеточных расчетах КХД при больших  $T$  и малых  $\mu_B$  - переход 2-рода типа *crossover*, фазовый переход 1-го рода при больших  $\mu_B$
- Существование критической точки – важнейший тест для теории

## Расчеты решеточной КХД:

- Петля Полякова  $L$  (параметр порядка для фазового перехода в КГП для нулевых масс кварков)
- Усредненные значения кваркового и глюонного конденсатов  $\langle \psi^*(0)\psi(0) \rangle$  - параметр порядка для фазового перехода из киральной-симметричной фазы кварковой материи с нулевыми массами кварков в состояние с нарушенной симметрией и физическими массами кварков
- Критическая температура перехода 2-го рода это точка перегиба (inflation point). Оба перехода при одинаковой температуре  $\sim 160$  MeV



Киральная симметрия, нарушенная в низкотемпературном пределе КХД, может быть частично восстановлена при деконфайменте!  
Экспериментальное обнаружение имеет фундаментальное значение!

Как получить КГП в лабораторных условиях  
и исследовать ее свойства если:

- метод божественного сотворения мира нам недоступен
- а астрофизические объекты весьма редки и удаленны?



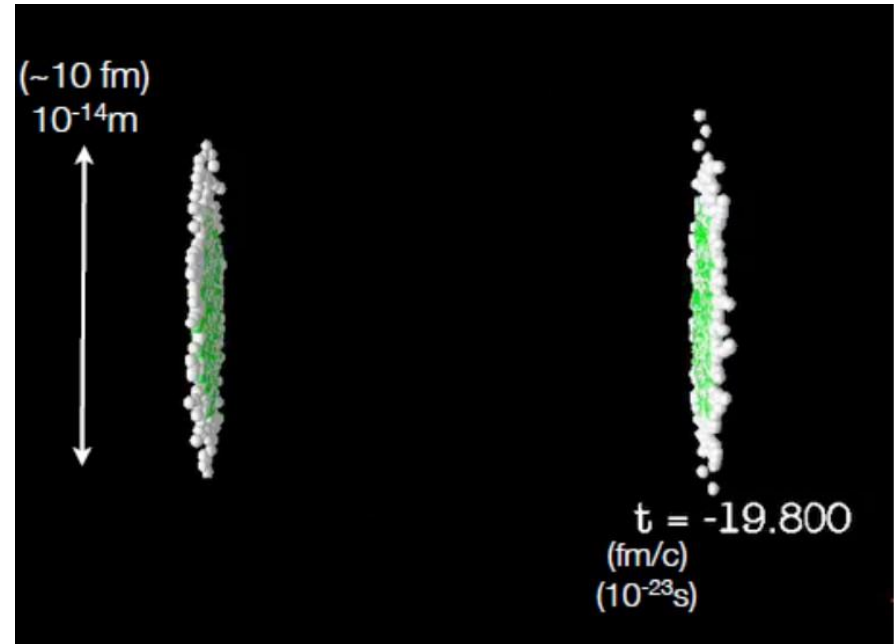
# Heavy-ion collisions - mini-Big Bang in the Lab

*Huge amount of energy in very small volumes!*

## Au+Au central collisions:

$$\begin{aligned}\sqrt{s} &= 5 \text{ GeV}, \varepsilon = 1.4 \text{ GeV/fm}^3 \\ &17 \text{ GeV (SPS)}, \varepsilon = 3.0 \text{ GeV/fm}^3 \\ &200 \text{ GeV (RHIC)}, \varepsilon = 5.0 \text{ GeV/fm}^3 \\ &2 \text{ TeV (LHC)}, \varepsilon = 14 \text{ GeV/fm}^3\end{aligned}$$

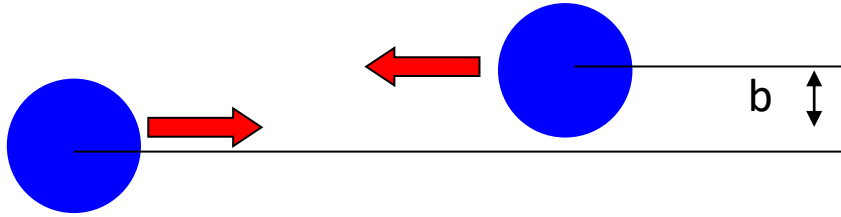
**Fireball** – a region of hot ( $\sim 100$  MeV) and dense (up to several  $n_0$ ) matter in the form of hadron gas, droplets of QGP, or the mixture of both. Its size  $\sim 10$ - $20$  fm and lifetime  $\sim 50$  fm/c



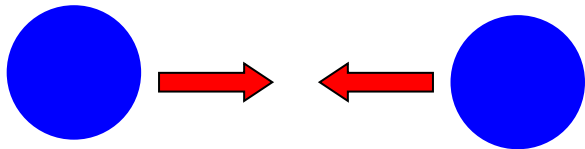
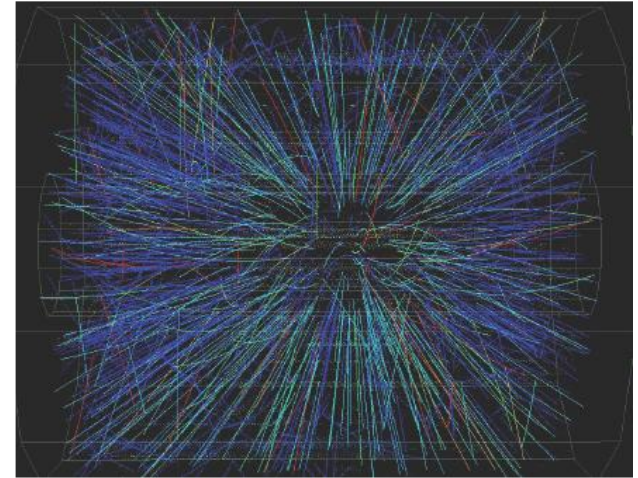
The size of the interaction zone and radial distribution of energy density is controlled by the impact parameter

# Геометрия столкновения (“центральность”)

Nuclei are extended objects → collision geometry defined by impact parameter  $b$

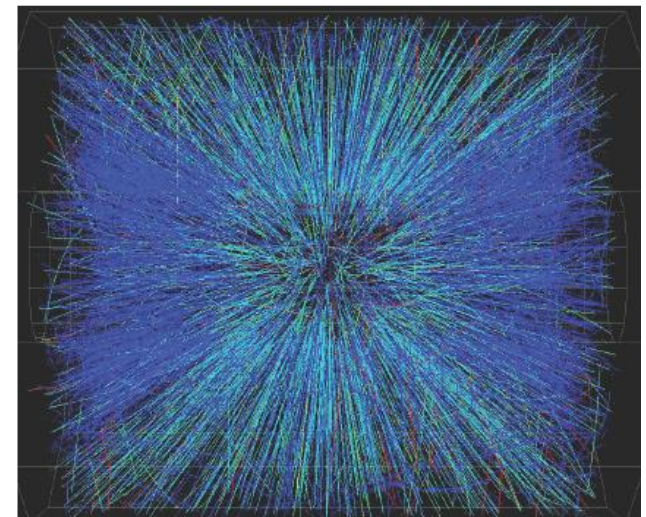


Периферийное (не-центральное) столкновение,  
 $b$  – параметр удара (impact parameter)

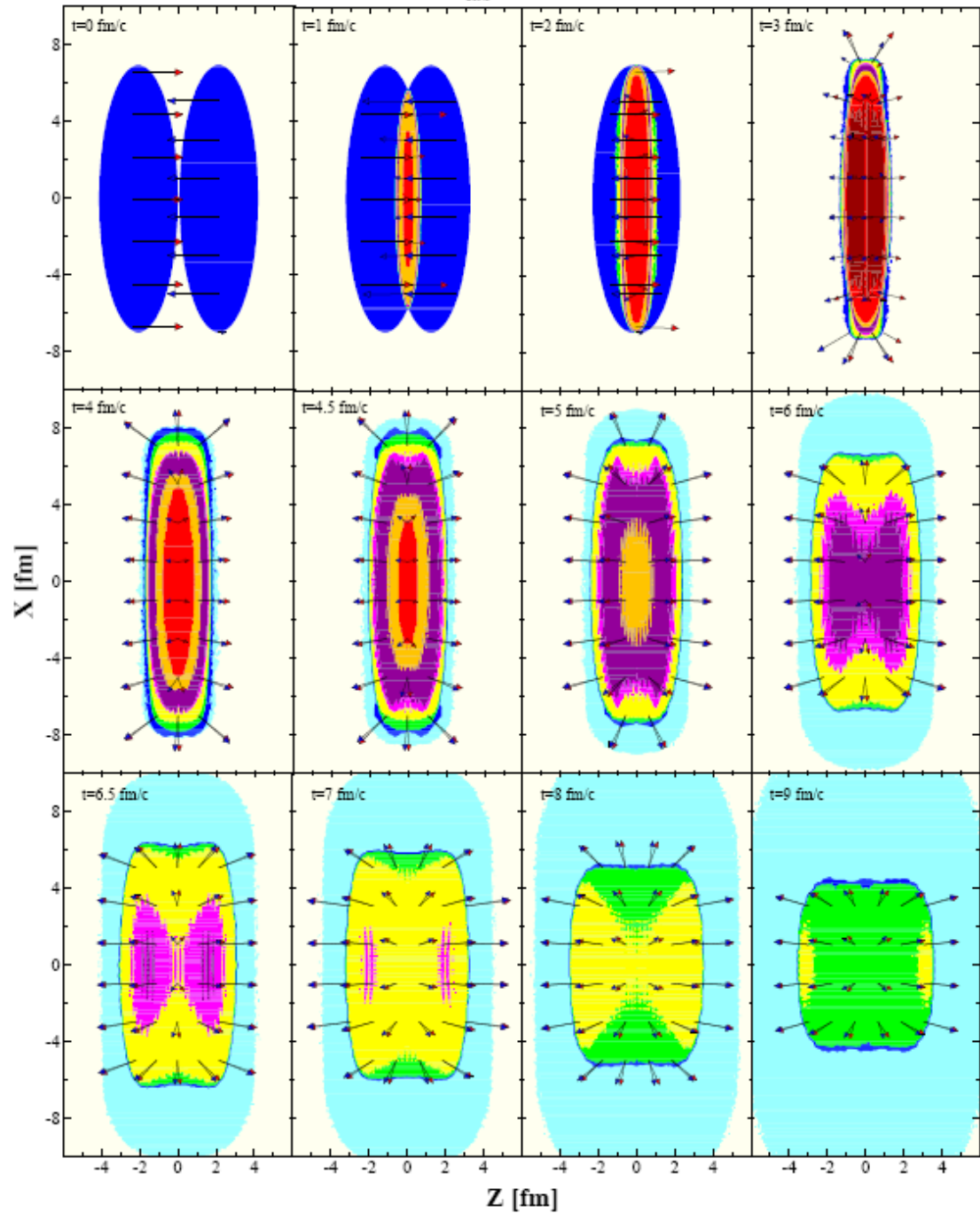


Центральное столкновение,  $b=0$

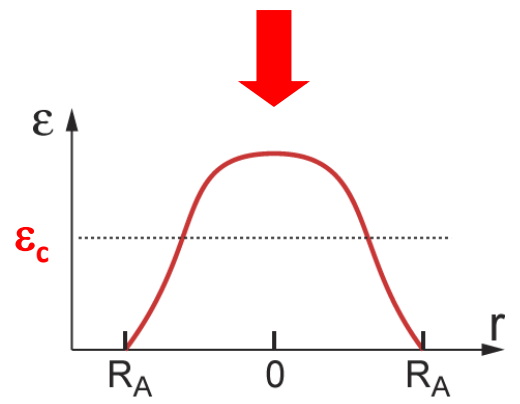
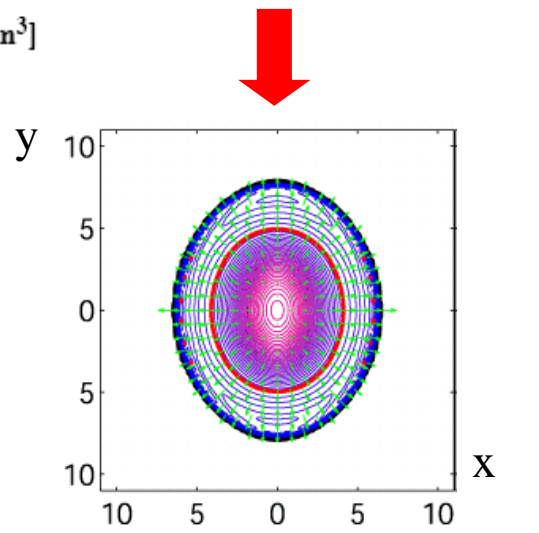
**Множественность частиц возрастает  
при уменьшении  $b$ !**



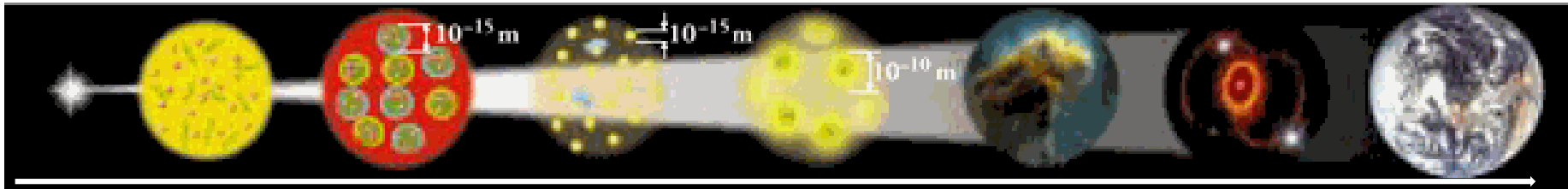
Pb+Pb,  $E_{lab}=20.4$  GeV,  $b=0$



Высокая плотность энергии в центре фибрбола

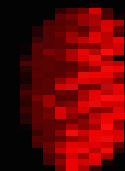
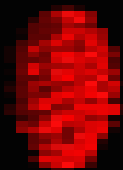


# mini "Big Bang" in the laboratory



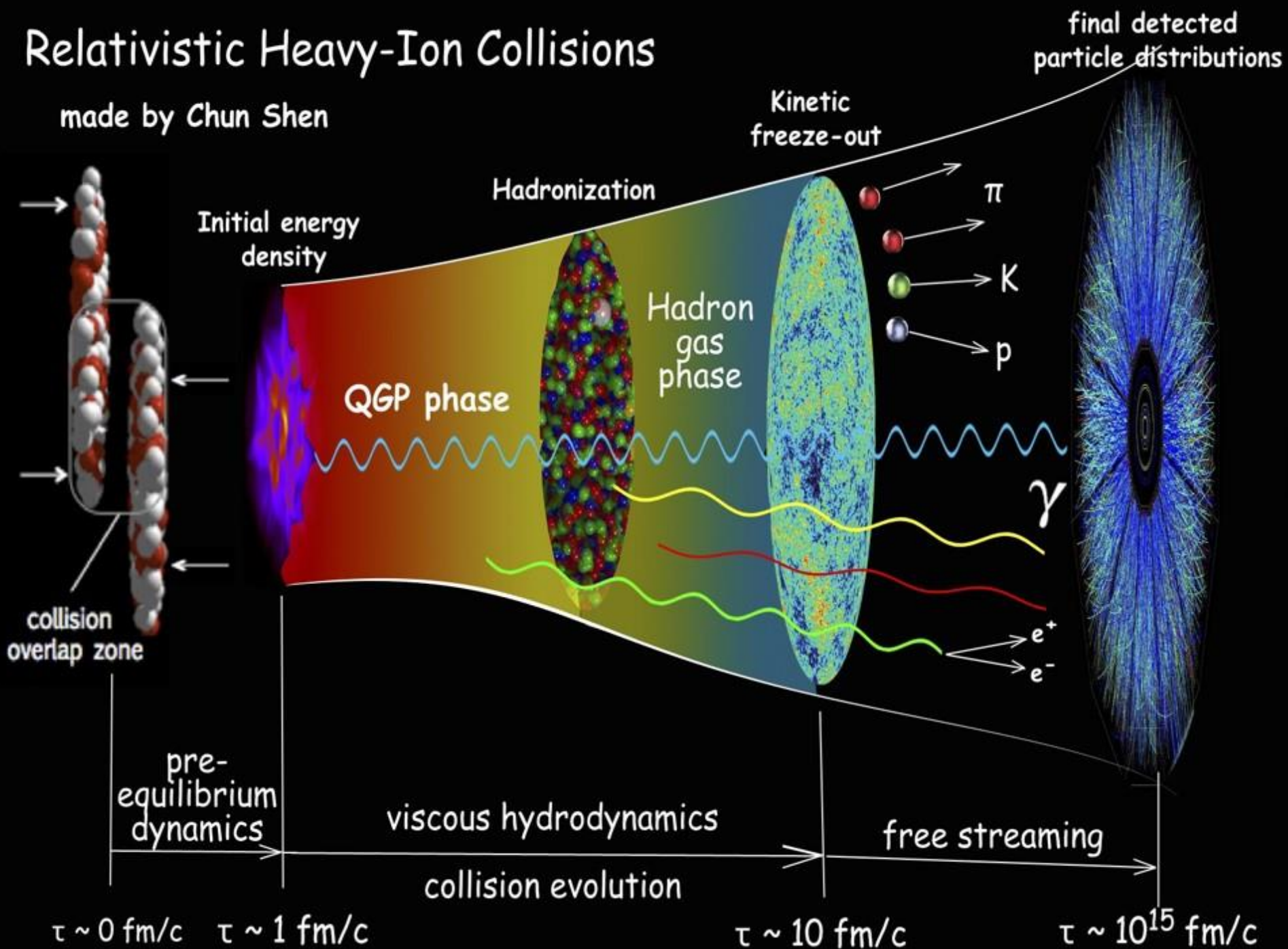
<b>Big Bang</b>	Q-G plasma	p & n formation	low mass nuclei formation	neutral atom formation	star formation	dispersion of massive elements	Today
T	$>10^{12}$ K	$10^{12}$ K	$10^9$ K	4000 K	20 - 3 K	$< 20$ K	3 K
time	$10^{-6}$ s	$10^{-4}$ s	3 min	400 k yr	$10^9$ yr	$> 10^9$ yr	$15 \cdot 10^9$ yr

**Au + Au**



# Relativistic Heavy-Ion Collisions

made by Chun Shen

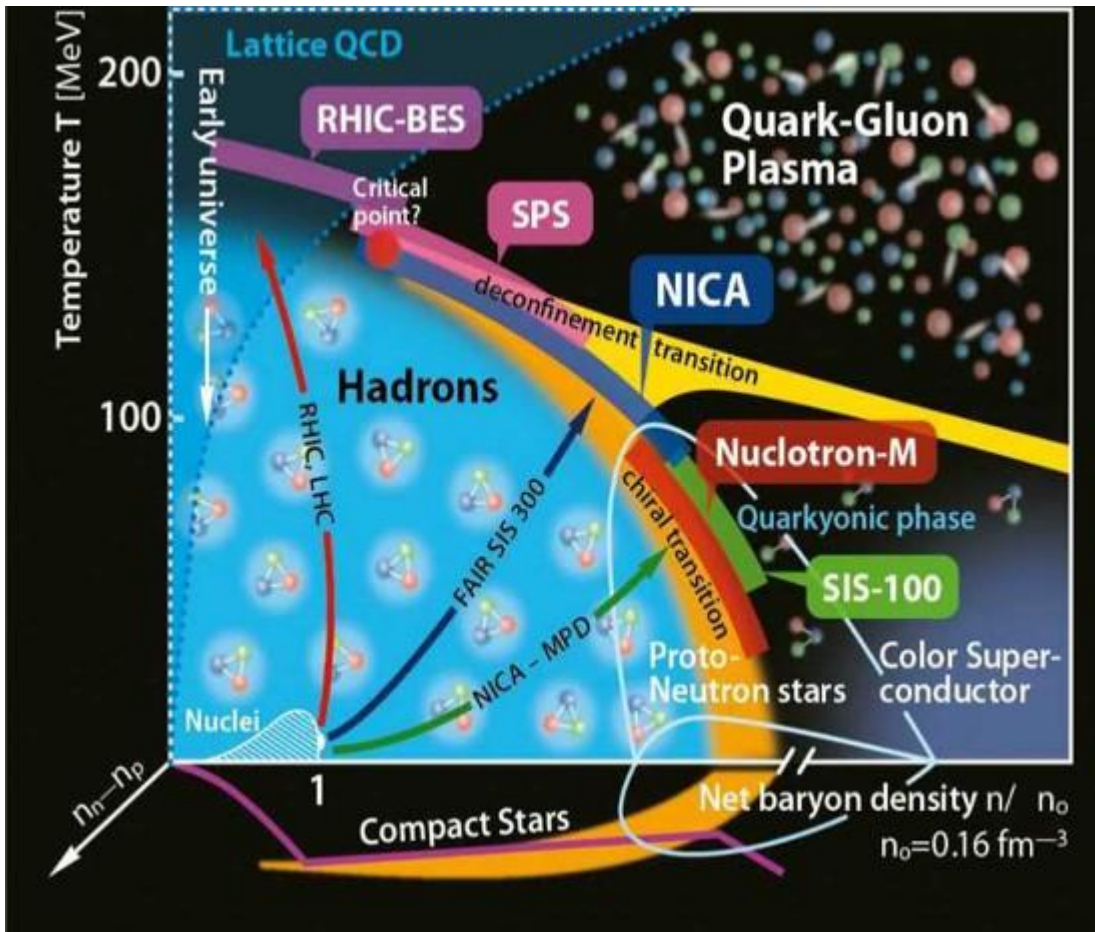


### **III. Экспериментальное исследование КГП и физ. программа на NICA**

- Ускорительные центры по физике столкновений тяжелых ионов для сканирования фазовой диаграммы КХД
- (Краткая) история исследований и современное состояние
- Физическая программа по тяжелым ионам на NICA, достоинства и недостатки

# Сканирование фазовой диаграммы КХД (QCD phase diagram mapping)

- Каждый ускоритель имеет свой диапазон энергий столкновений, т.е. свою область на фазовой диаграмме
- Задача-максимум для всех программ → перекрыть всю ФД КХД (частичные перекрытия областей исследований допускаются и даже приветствуются!)



**Mapping** – разметка, определение линий фазовых переходов и координат реперных точек.

Координатами на ФД являются хим. потенциал  $\mu$  и температура  $T$

**А как они определяются?**

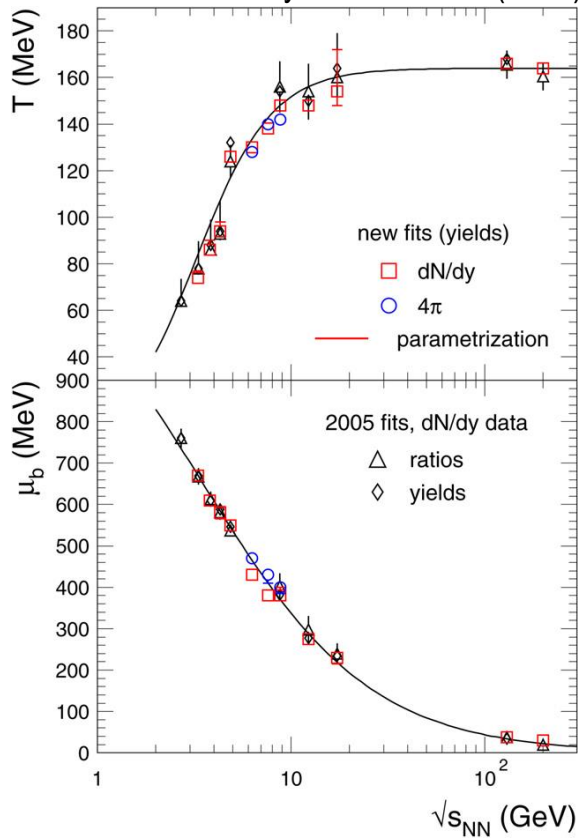
# Изучение характеристик файрбола для цели *diagram mapping* (*chemical freezeout*)

В рамках статистической термальной модели множественность  $N_C$  частиц с массой  $m$ , зарядом  $q$ , барионным числом  $B$  и спиновым фактором  $g=2s+1$  равна

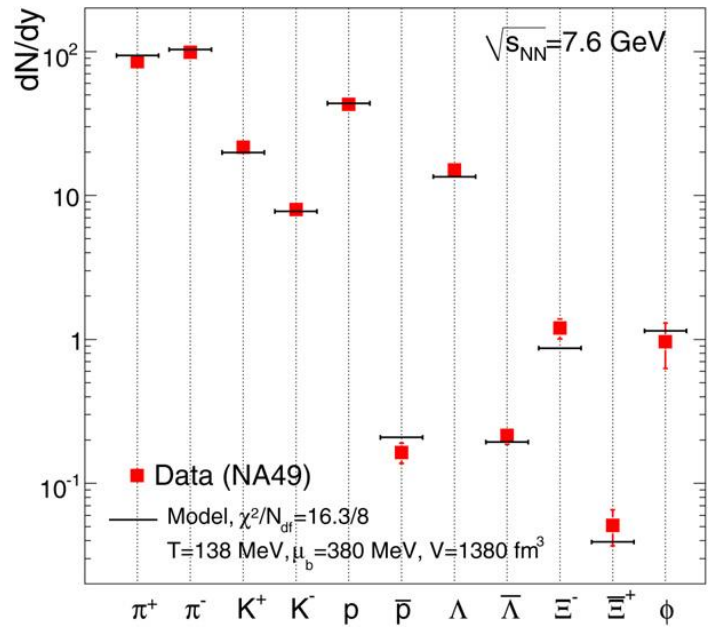
$$N_C = \frac{gV}{\pi^2} m^2 T K_2 \left( \frac{m}{T} \right) \exp\left( \frac{B\mu_B + q\mu_q}{T} \right) \quad \text{где} \quad \mu_q/T = \frac{1}{2} \ln \frac{\pi^+}{\pi^-}$$

Обратная задача – по измеренным выходам частиц определить параметры источника ( $T, \mu_B, V$ )  
Затем получить энергетическую зависимость для параметров – и можно делать предсказания

A. Andronic et al. Phys. Lett. B 673 (2009) 142–145 143



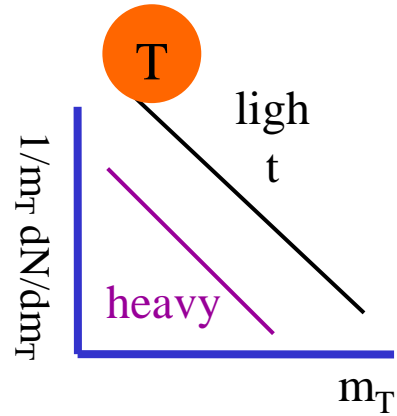
Данные по выходам адронов хорошо описываются в статистических моделях.





# Изучение характеристик файербола (*kinetic freezeout*)

purely thermal source



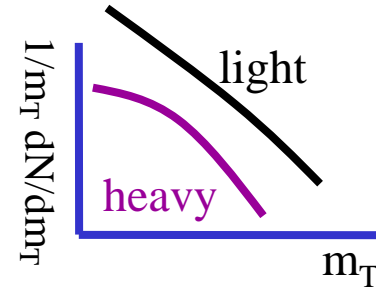
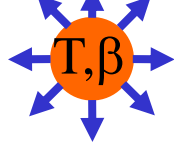
## Blast-wave analysis

In the source with strong collective behavior the spectral shape is determined by more than a simple  $T$  but also by a radial velocity  $\beta_T$

$$\frac{dN}{m_t dm_t} = A \int_0^1 m_t f(\xi) K_1 \left( \frac{m_t \cosh(\rho)}{T} \right) I_0 \left( \frac{p_t \sinh(\rho)}{T} \right) \xi d\xi$$

$$m_t = \sqrt{p_t^2 + m^2}, \quad \rho = \text{atan}(\beta_t(\xi)), \quad \xi = \frac{r}{R}$$

explosive source

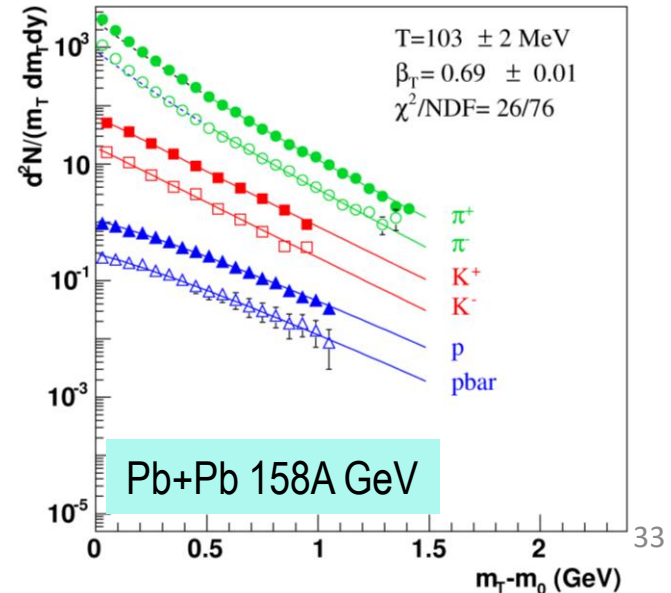


Simultaneous fit to all particle species. Fit parameters:

$T$  – thermal freeze-out temperature

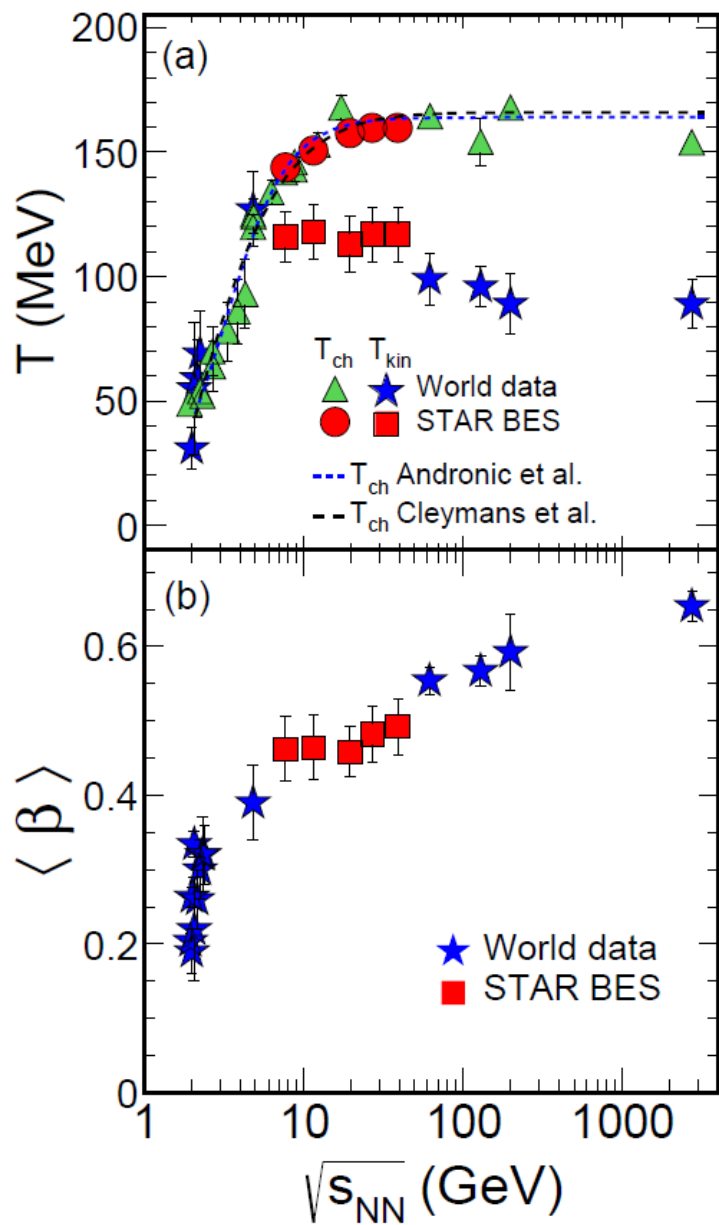
$\beta_t$  – maximum transverse flow velocity

**Импульсные распределения всех типов частиц описываются одним универсальным значением температуры!**



# STAR: Hydrodynamic analysis (blast-wave fit) of $m_t$ -spectra

*Phys. Rev. C 96, 044904 (2017)*



- $T_{ch}$  increases from 7.7 to 19.6 GeV; after that it remains almost constant and similar for all centralities.
- $T_{kin}$  increases from central to peripheral collisions suggesting longer lived fireball in central collisions
- $\langle \beta \rangle$  decreases from central to peripheral collisions suggesting stronger expansion in central collisions.
- The separation between  $T_{ch}$  and  $T_{kin}$  increases with increasing energy suggesting the effect of increasing hadronic interactions between chemical and kinetic freeze-out at higher energies.

# Ускорительные комплексы для исследования КГП

## Large Hadron Collider (LHC)



CERN in Geneve  
Pb+Pb @ 1-8 TeV  
( $\mu \sim 0$  ранняя Вселенная)

## Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC)



Brookhaven in New York  
Au+Au @ 8-200 GeV  
( $\mu = [10-500]$ )

# Ускорительный комплекс NICA (Nuclotron-based Ion Collider fAcility)

Booster  
Nuclotron

Detector  
BM@N

Detector  
SPD

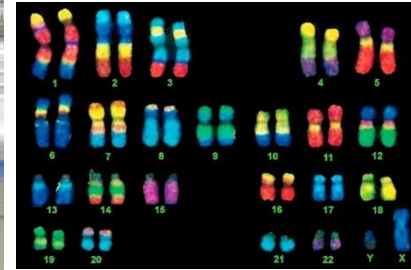
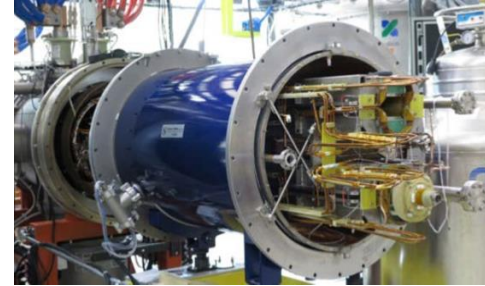
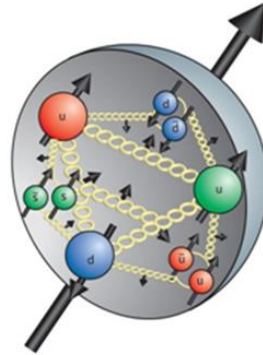
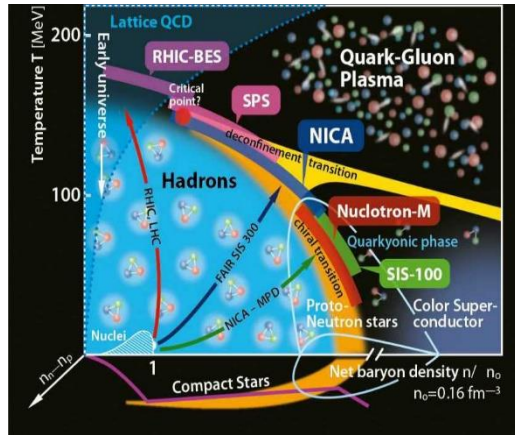
Detector  
MPD

Collider

Энергии 3-11 GeV,  $\mu = [300-750]$



# Scientific pillars of the NICA program



## Heavy-ion program

Probing of fundamental laws of physics with heavy-ion collisions:

- Formation of new state of matter (QGP)
- Properties of physical vacuum
- Properties of massive stellar objects (neutron stars)

## Spin physics program

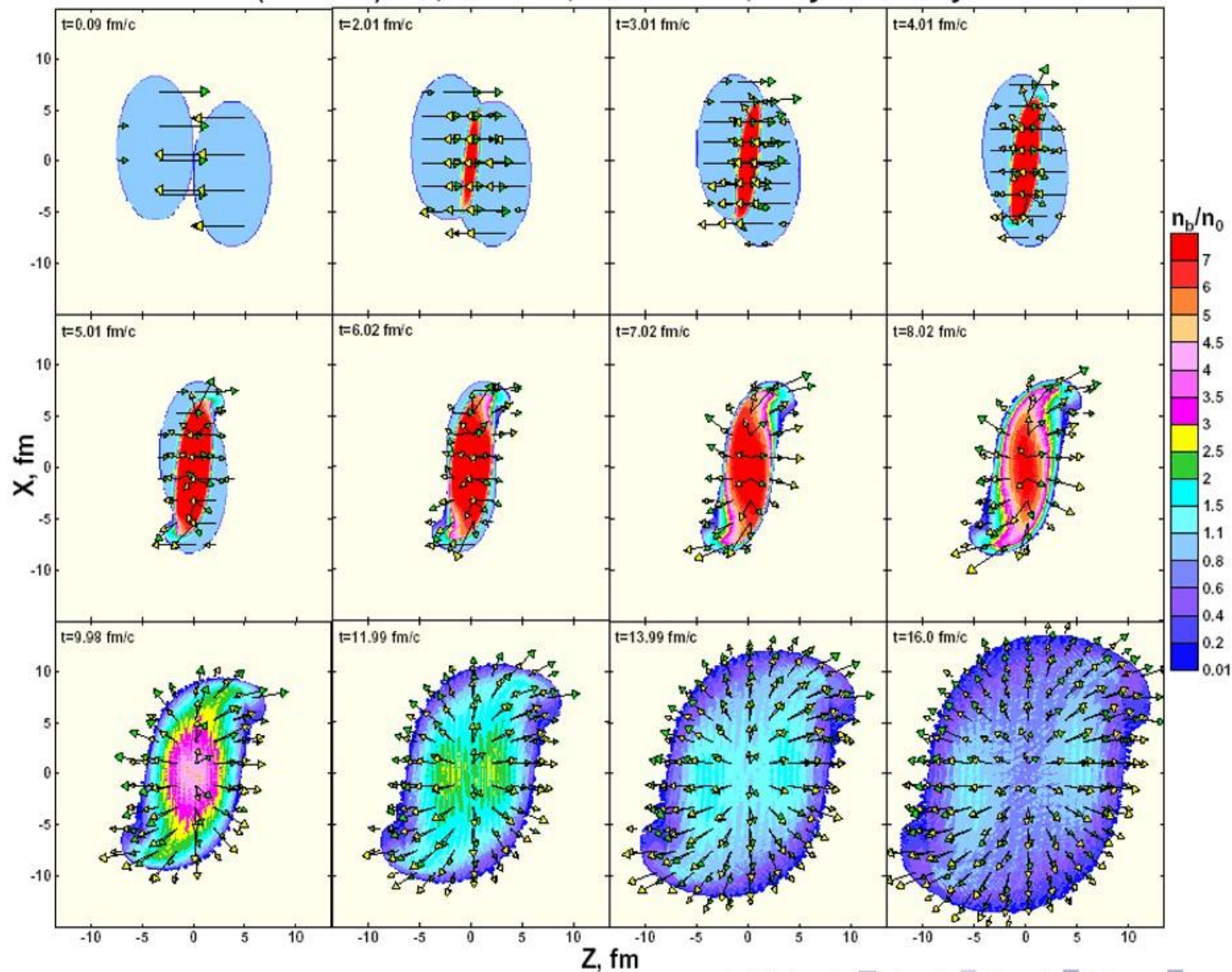
New comprehensive studies with polarized beams to:

- Resolve nucleon spin crisis
- New precise measurements of nucleon PDFs

## Program of applied research

- Development of universal charged particle accelerators
- Universality of operating modes & increasing limiting parameters of superconducting magnets
- Radiation hardness and modification of materials
- Radiobiology research with heavy-ion beams

# Au+Au столкновения на NICA. Плотность барионной материи



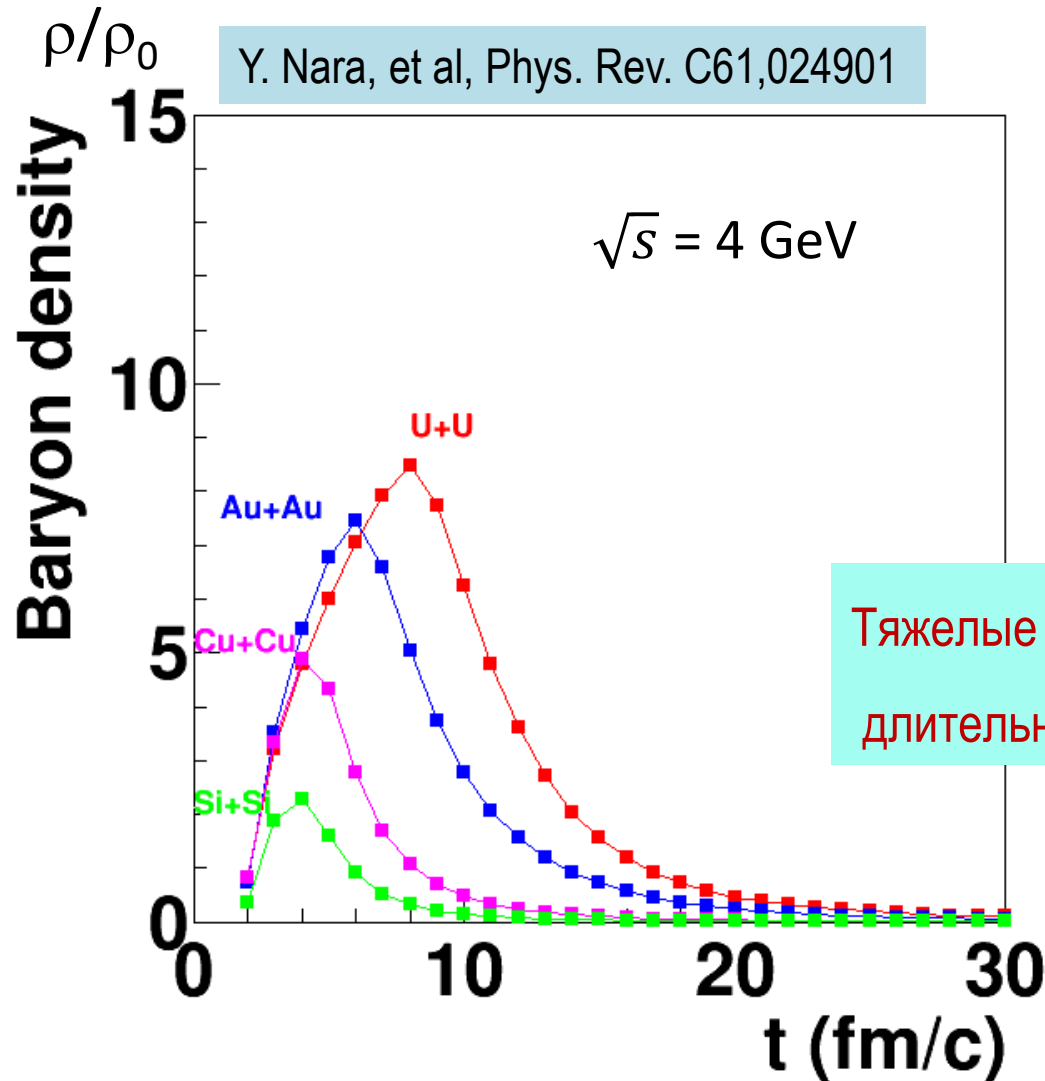
Сверхплотные  
объекты в Au+Au  
реакциях  
 $L \sim 10^{-14}$  м  
 $t \sim 10^{-23}$  с  
Rate  $\sim 10^7$ /сек

Dense baryonic matter at NICA energies ( $\rho/\rho_0$  up to 7)

# Барионная плотность в А+А реакциях на NICA

$$\rho_0 \sim A/(4/3\pi R^3) = 0.16 \text{ fm}^{-3}$$

Y. Nara, et al, Phys. Rev. C61,024901



- Плотность : до  $(7-8)\rho_0$
- Длительность ( $\rho > 5\rho_0$ ):  $(4 - 8) \text{ fm/c}$

Тяжелые ионы  $\rightarrow$  выше плотности и большие длительности в экстремальных состояниях

# Поиск и изучение КГП: предыстория и современность

- Эксперименты по поиску сигналов о КГП были начаты в 80-х годах SPS (ЦЕРН), AGS (БНЛ) и Синхрофазотрон (ОИЯИ)
- К середине 90-х большое количество данных по столкновениям легких (d,C) и средних ядер (Si,O,S) при энергиях до 10А ГэВ (ГИБС, ОИЯИ), до 15А ГэВ (E814, АГС) и 200А ГэВ (NA35, ЦЕРН). В течении **1994-1999** данные по Pb+Pb столкновениям при max. энергии 158А ГэВ на SPS (NA44, NA49, NA45, NA57, NA50/NA60, WA98)
- **2000-2004:** Расширение программы на SPS в область низких энергий, несколько значений (20А, 30А, 40А, 80А GeV) для поиска сигналов о начале деконфайнмента (onset of deconfinement) – первая в истории официальная программа энергетического сканирования (**SPS Energy Scan**)
- **2008-2022:** Второй (и третий) в истории скан по энергии (BES + BESII) на ускорителе RHIC
- **2010** → LHC Исследование барион-антибарион симметричной КГП

## Основными целями SPS/RHIC Energy Scans являлись:

- Определение набора наблюдаемых и нахождение диапазона энергий для начала фазового перехода в ядерной материи (onset of deconfinement), а также изучение характеристик этого фазового перехода
- Изучение свойств ядерной материи в форме КГП

**Оптимальным пробником считается сигнал, характеризующийся аномалией в энергетической зависимости либо в зависимости от центральности столкновения.**



# Странные частицы и сигнал о деконфайнменте - немонотонность энергетической зависимости

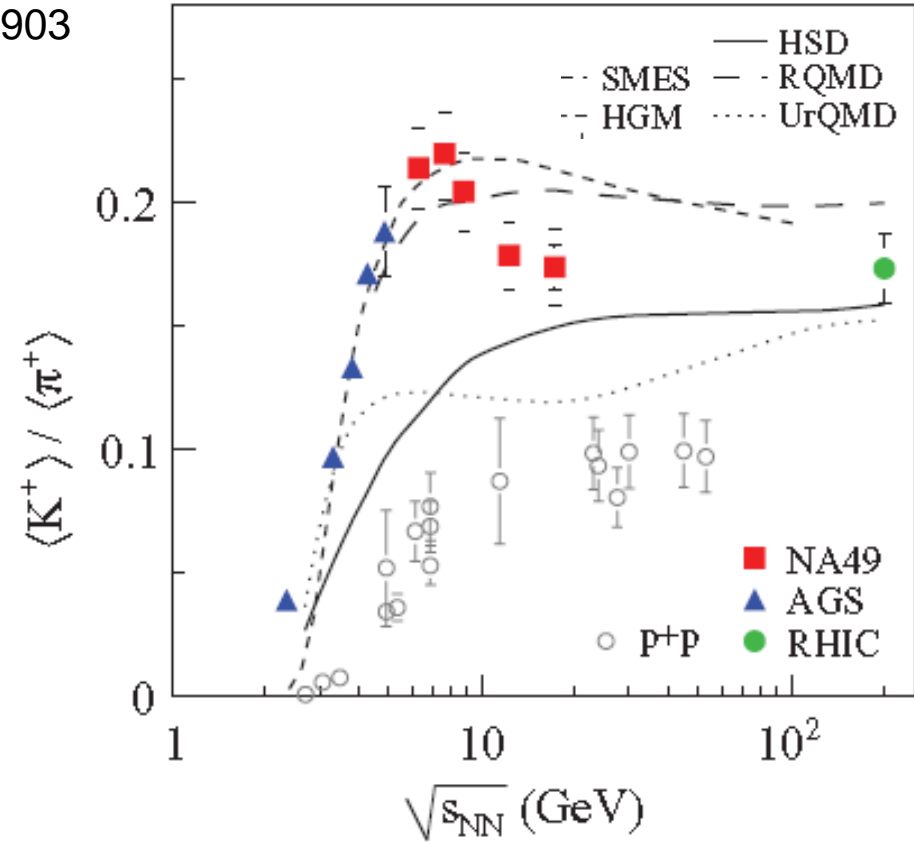
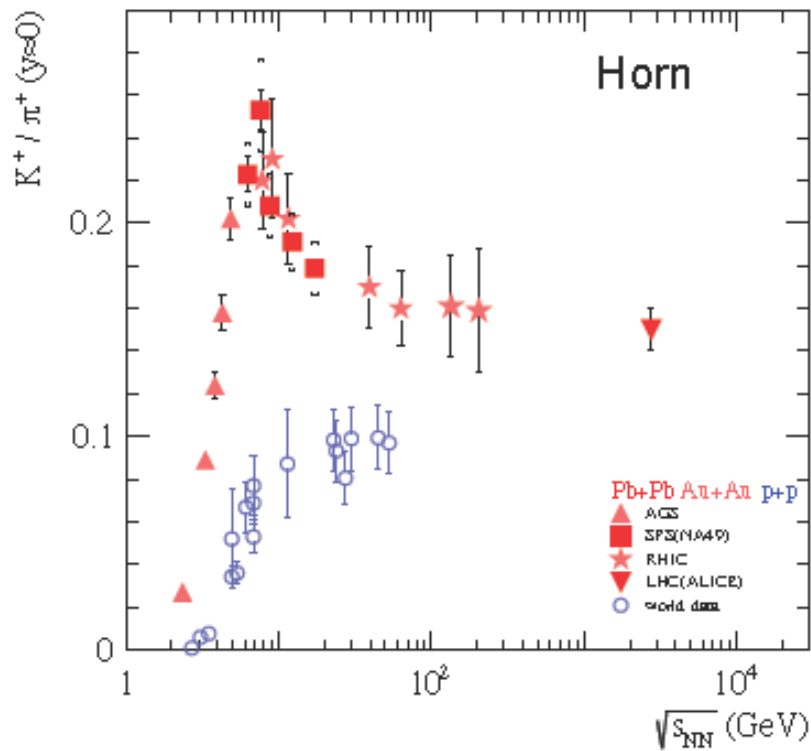
**Идея** - аномалия в энергетической зависимости отношения странности к энтропии может быть связанной с изменением массы частицы-переносчика странности при температурах выше критического значения для деконфайнмента  $T_c$  ( $\sim 160$  МэВ)



- Рост отношения каонов к пионам в фазе адронного газа,  $T < T_c < M_K$ , - фазовый объем
- В фазе КГП основной степенью свободы для странности становится s-кварк с массой  $m < T_c$ . В таком случае множественность странных кварков примерно пропорциональна энтропии (оцениваемое по числу  $u$  и  $d$  кварков), а отношение странности к энтропии (примерно соответствующее отношению  $K^+/\pi^+$ ) резко падает с максимального значения для адронного газа, оставаясь постоянным при дальнейшем увеличении энергии столкновения.

# Энергетическая зависимость отношения $K/\pi$

(NA49 Collaboration) *Phys.Rev.C* 77 (2008) 024903

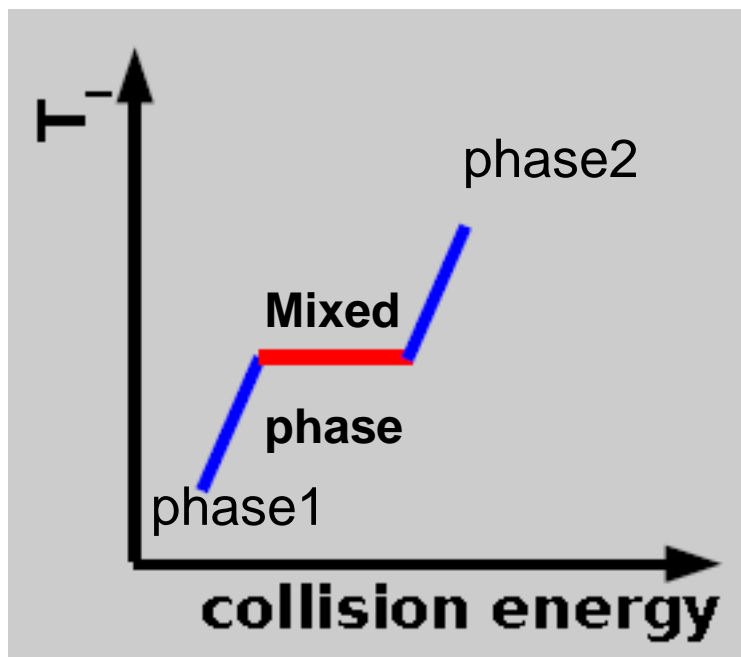


- Данные NA49 подтверждаются результатами STAR BES программы
- Разница в поведении для A+A и p+p реакций
- Форма не описывается микроскопическими моделями

**SPS findings: Onset of deconfinement above 7 GeV!**

# Эффективная температура источника как сигнал о деконфайнменте

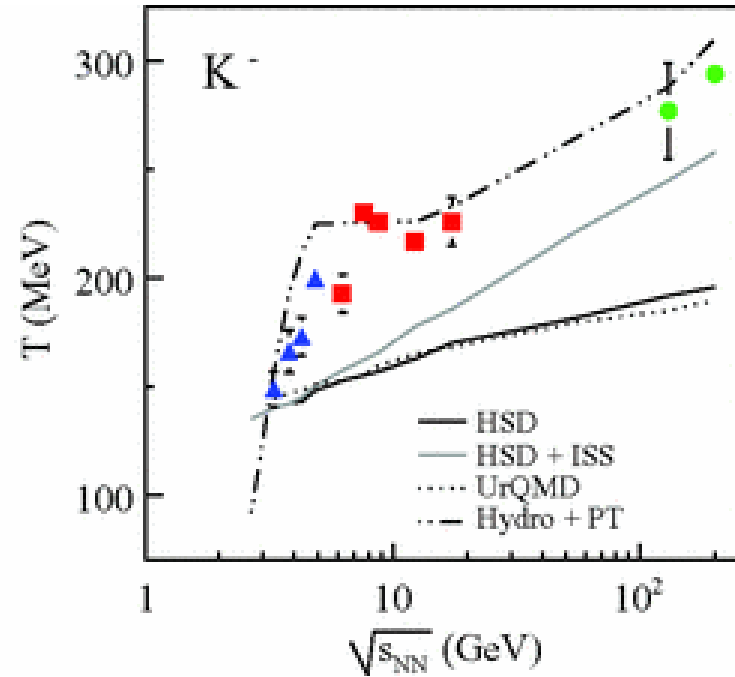
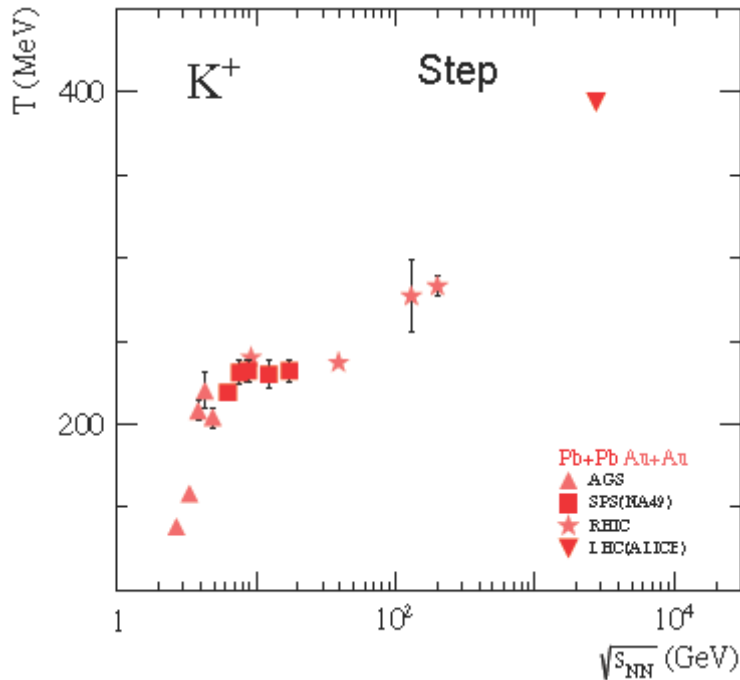
- В смешанной фазе (КГП и адронный газ) давление и температура (определяющие значение параметра наклона спектров  $T$ ) не зависят от плотности энергии (определяемой энергией столкновения).
- Характерное постоянство параметра  $T$  (“плато”) может служить указанием на образование такой смешанной фазы в центральных столкновениях ядер при энергиях SPS.



- Калориметрическая кривая характерных наклонов спектров (температур) – фазовый переход первого рода

# Энергетическая зависимость для T (“Step”)

(NA49 Collaboration) *Phys.Rev.C* 77 (2008) 024903

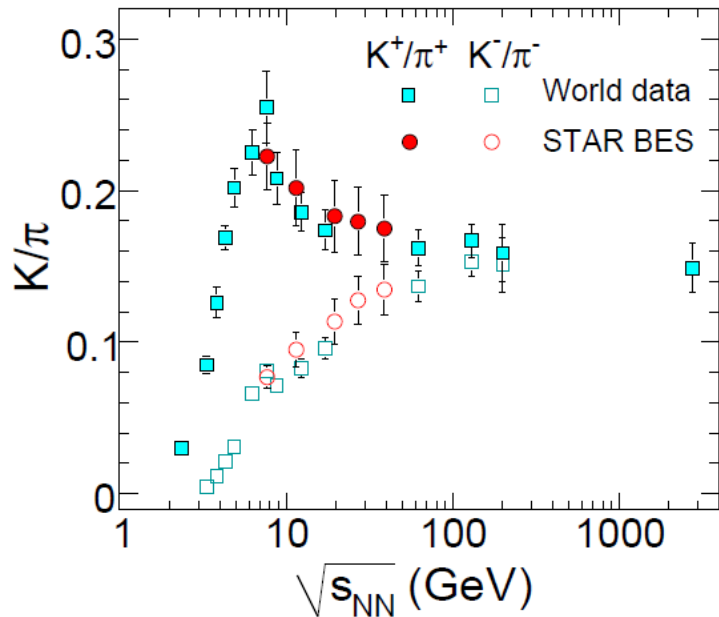


Расчеты по гидродинамическим моделям с использованием уравнений состояния для КГП и адронной фаз хорошо описывают поведение параметра  $T$  (см. штрих-пунктирную линию правая панель), тогда как модели без фазового перехода предсказывают монотонный рост с энергией (см. линии для UrQMD и HSD генераторов на рисунке)

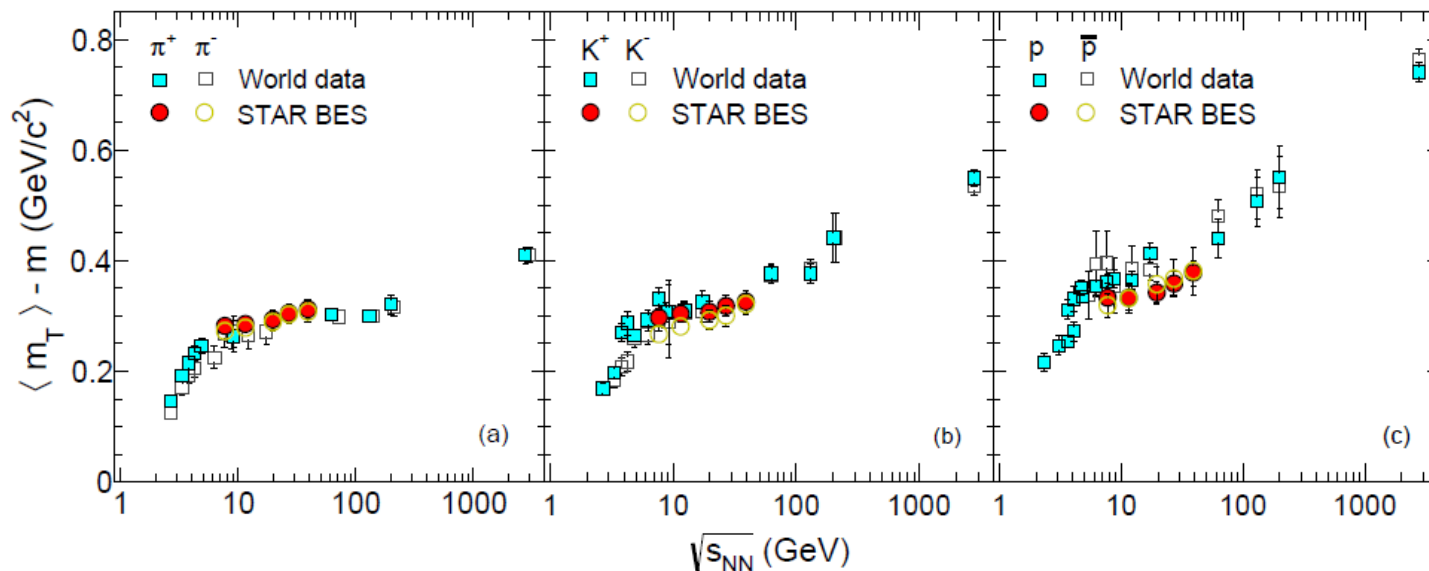
**SPS findings: Mixed phase (QGP + hadron gas) from 6 to 20 GeV!**

# STAR: Particle production

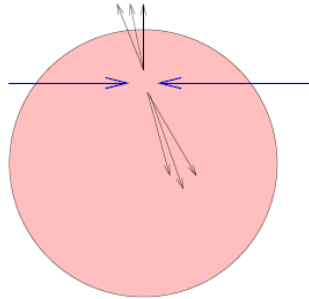
L. Adamczyk et al (Star Collab.) Phys. Rev. C 96, 044904 (2017)



- The  $K^+/\pi^+$  ratio - a maximum at 7.7 GeV  $\rightarrow$  associated production dominance at lower energies due to a large baryon stopping power. This **maximum corresponds to the maximum baryon density** predicted to be achieved in heavy-ion collisions.
- For a thermodynamic system the energy dependence of  $\langle m_T \rangle - m$  could reflect the characteristic signature of a first order phase transition. The constant value of  $\langle m_T \rangle - m$  around BES energies could be interpreted as reflecting **the formation of a mixed phase of a QGP and hadrons** during the evolution of the heavy-ion system.

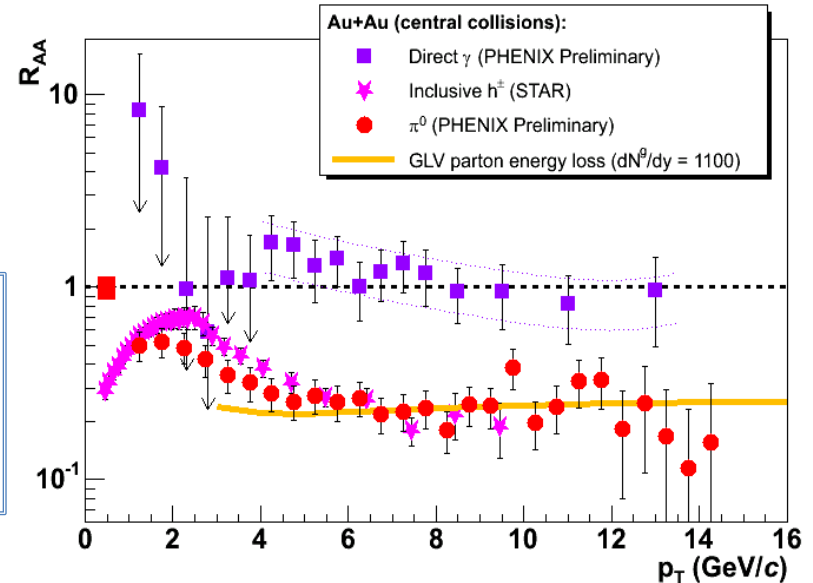


# RHIC findings: sQGP – идеальная жидкость?



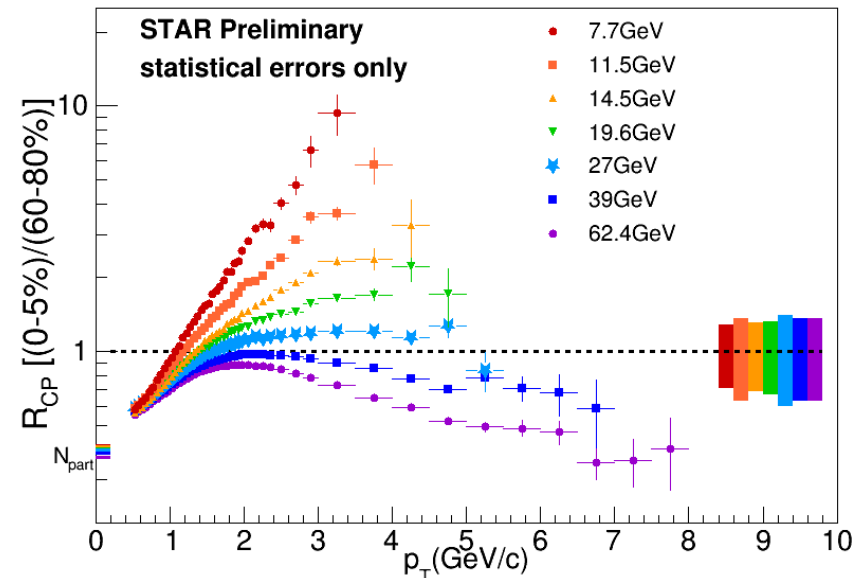
$$R_{AB}(p_T) = \frac{d^2 N / dp_T d\eta}{T_{AB} d^2 \sigma^{pp} / dp_T d\eta},$$

Материя в файерболе является непрозрачной (highly opaque) для носителей цветных зарядов (адронов из струй), но не фотонов!  
КГП не газ а жидкость!

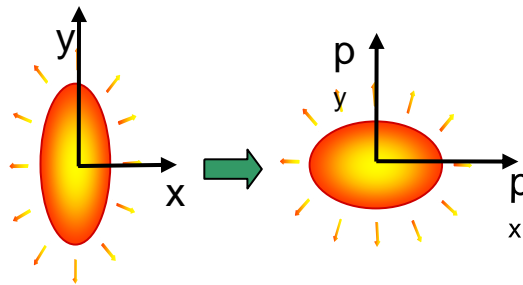
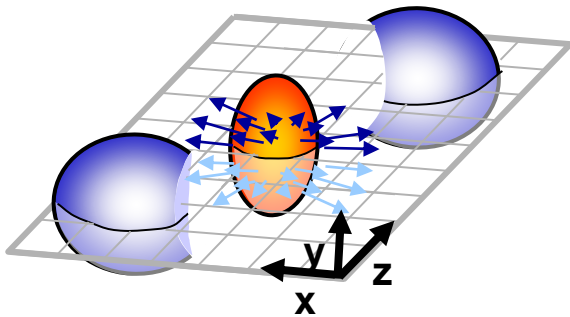


## Энергетическая зависимость:

- Jet quenching no longer evident below 20 GeV
- RHIC finding:** No deconfinement below 20 GeV?!

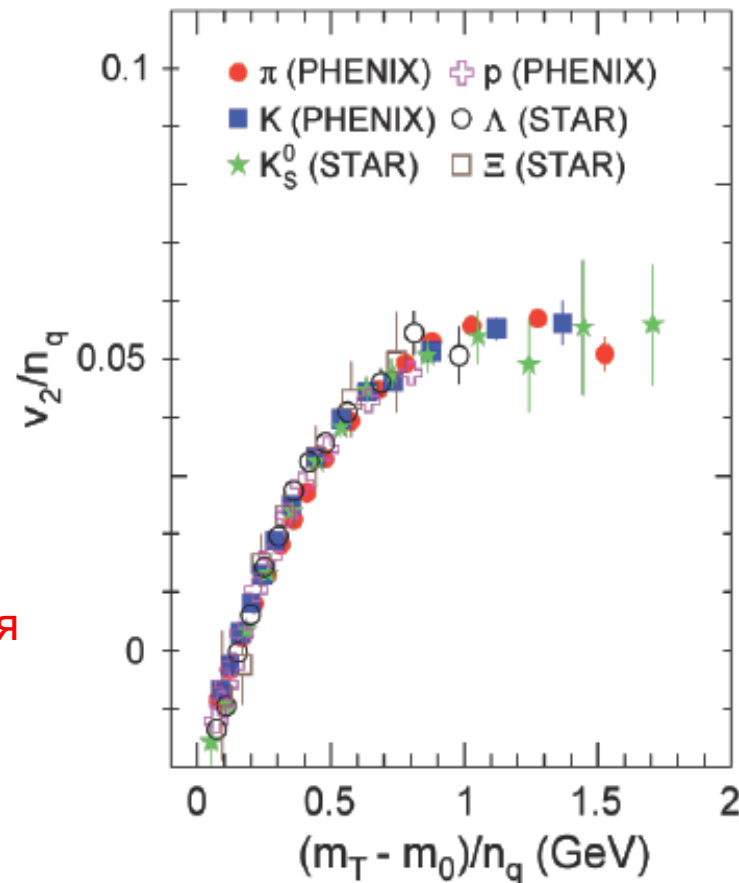
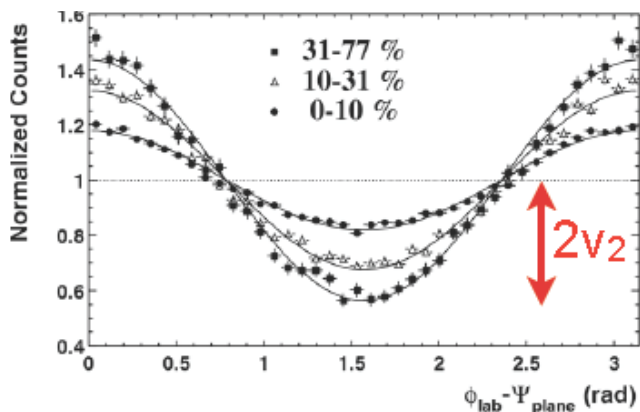


# RHIC findings (2): sQGP – идеальная жидкость?



Initial spatial anisotropy of the overlap zone leads to the final state momentum azimuthal asymmetry

$$dN/d\psi \propto 1 + 2v_1 \cos(\psi) + 2v_2 \cos(2\psi)$$



- Скейлинг по числу конституентных кварков указывает партонный характер формирования коллективных эффектов в релятивистской квантовой жидкости
- Гидродинамические расчеты для описания данного поведения требуют значения

$$\frac{\eta}{s} = 0.1 \pm 0.1(\text{th}) \pm 0.08(\text{exp}) - \text{близкого к значению для идеальной квантовой жидкости} = \hbar/(4\pi)$$

# Исследования ФД КХД и КГП : текущая ситуация

На настоящий момент ситуация с интерпретацией данных по столкновениям релятивистских ядер является достаточно противоречивой:

- Набрано большое количество экспериментальных данных, но не все доступные области фазовой диаграммы КХД исследованы
- Нет сомнений, что сильновзаимодействующая материя в форме КГП действительно образуется в столкновениях ядер, однако нет полного понимания по оптимальным пробникам и интервала для смешанной фазы
- Несмотря на активные поиски критическая точка на КХД ФД не обнаружена
- В данных есть намеки (hints), но нет однозначного указания на частичное восстановление киральной симметрии в плотной барионной материи
- Значительное количество нерешенных проблем и загадок (puzzles): гиперядра, потоки прямых фотонов и т.д.

Новая программа исследований нацелена на исследования в области максимальной барионной плотности на ускорителе с широким набором пучковых опций и высокой скоростью набора данных → **NICA**



# Ускорительный комплекс NICA.



Linac HILac

KRION

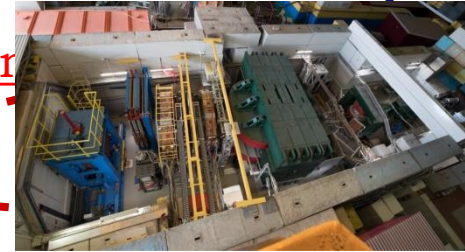
Linac AY-20

Ion sources

Booster (25 Tm)

1(2-3) single-turn injection,  
storage of  $2 (4-6) \times 10^9$   
acceleration up to 100 MeV/u,  
electron cooling, acceleration  
up to 600 MeV/u

Fixed Target



Stripping (80%)  $^{197}\text{Au}^{32+} \Rightarrow ^{197}\text{Au}^{79+}$

Nuclotron (45 Tm)

injection of one bunch  
of  $1.1 \times 10^9$  ions,  
acceleration up to  
1 - 4.5 GeV/u max.

IP-2

Two SC  
collider  
rings

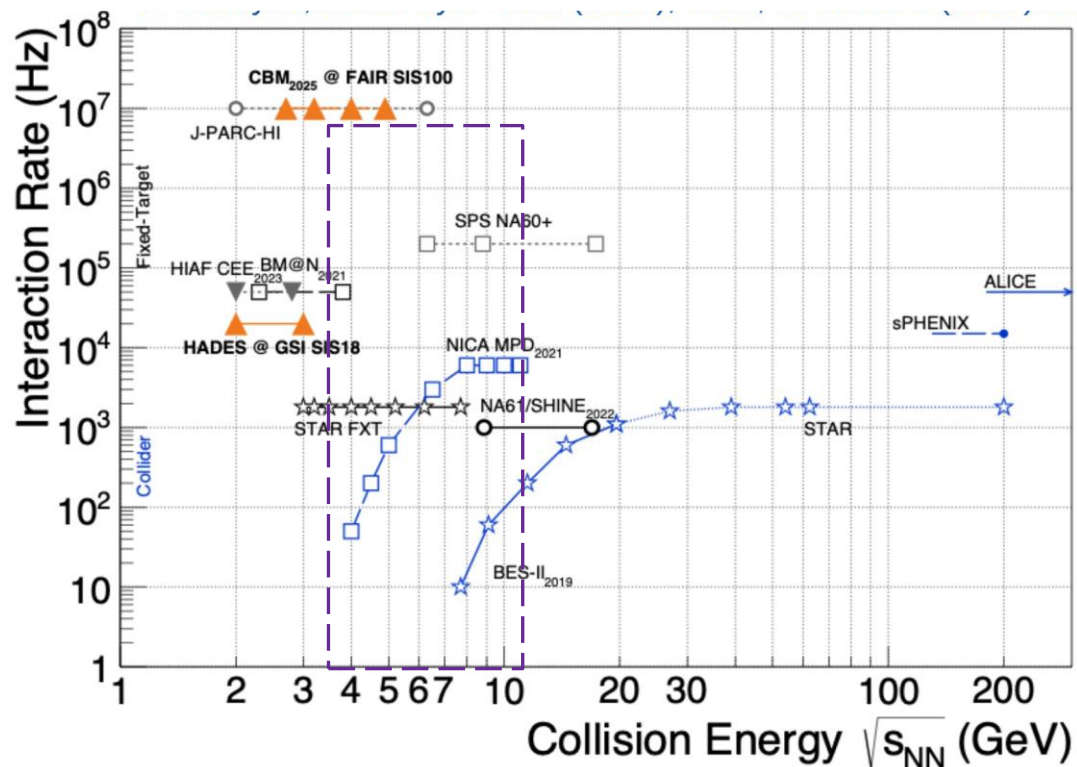
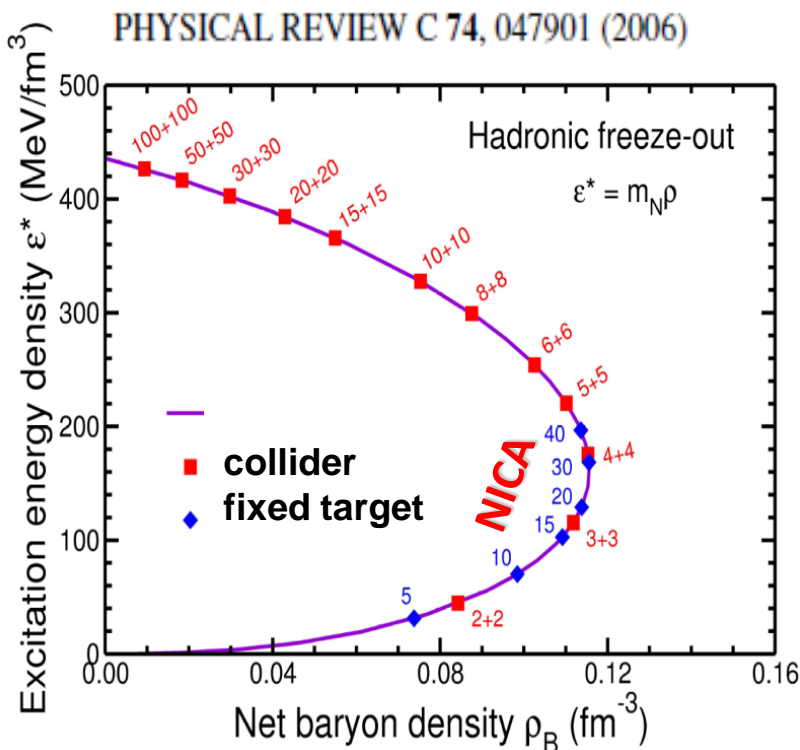
IP-1



# NICA niche in the QCD phase diagram

**NICA energy range – dense matter at non-zero  $\mu_B$  and moderate T**

- ➡ baryon density  $\rho$  up to  $10\rho_0$ , freeze-out net-baryon density – highest
- ➡  $\mu_B = (300 - 750)$  MeV,  $T_{ch} \sim (120-150)$  MeV

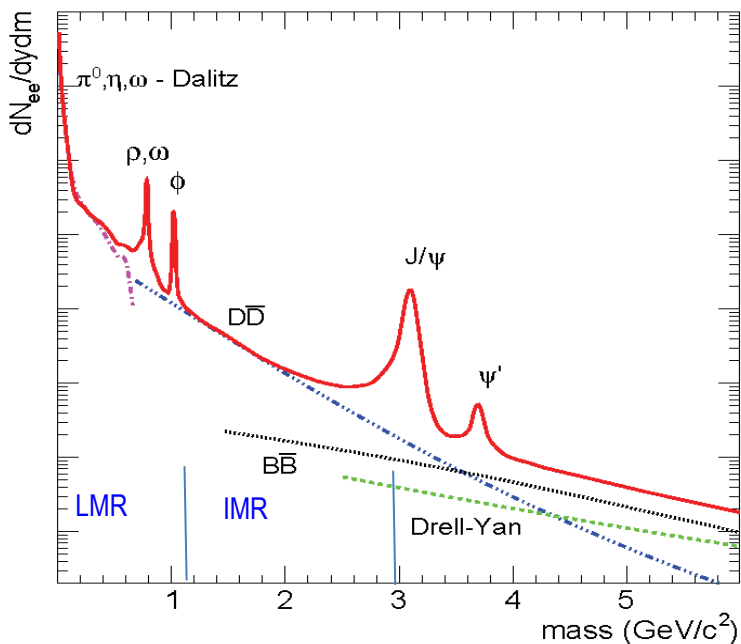
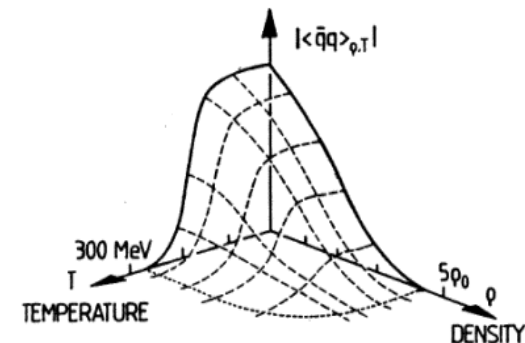


The region of the highest net-baryon density, which is ideal for phase transition and chiral symmetry restoration search is fully covered by MPD and BM@N experiments at NICA

# Physics at NICA: dileptons

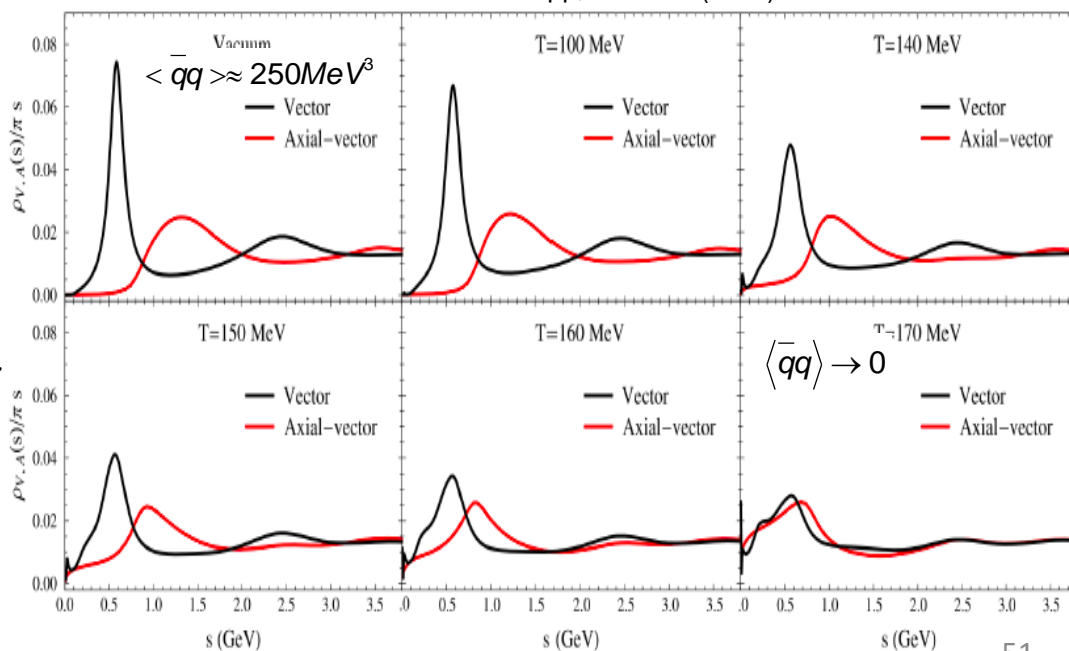
Correlated electron-positron pairs (**dileptons**) are sensitive to the interior of dense QCD matter and to CSR effects

- ✓ provide time-integrated picture of the collision dynamics
- ✓ penetrating probes – no strong interactions in the medium



- Degeneracy of the chiral partners ( $\rho$  and  $a_1$ ) at high T

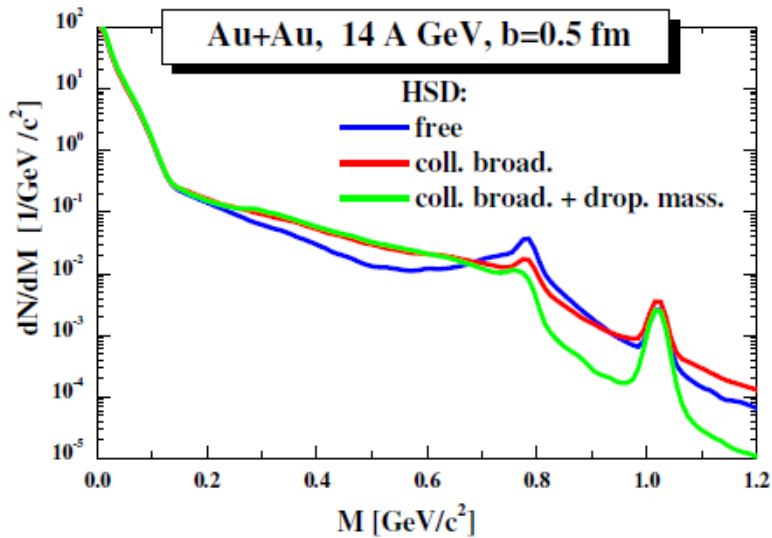
Hohler and Rapp, PLB 731 (2014) 103



- **LMR:** Low-mass region ( $0.2 < M_{ee} < 1.1$  GeV) – vector meson in-medium modification (resonance melting as approaching chiral symmetry restoration) + thermal radiation from HG
- **IMR:** Intermediate region ( $1.1 < M_{ee} < 3$  GeV) – QGP thermal radiation + heavy-flavor contribution

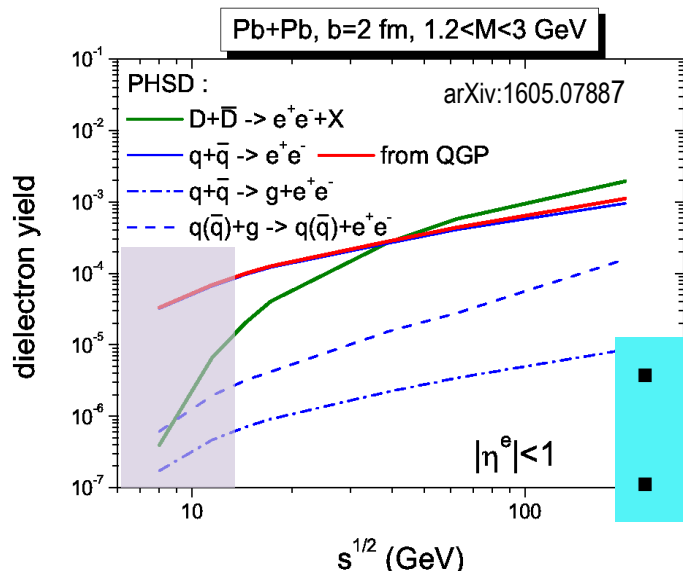
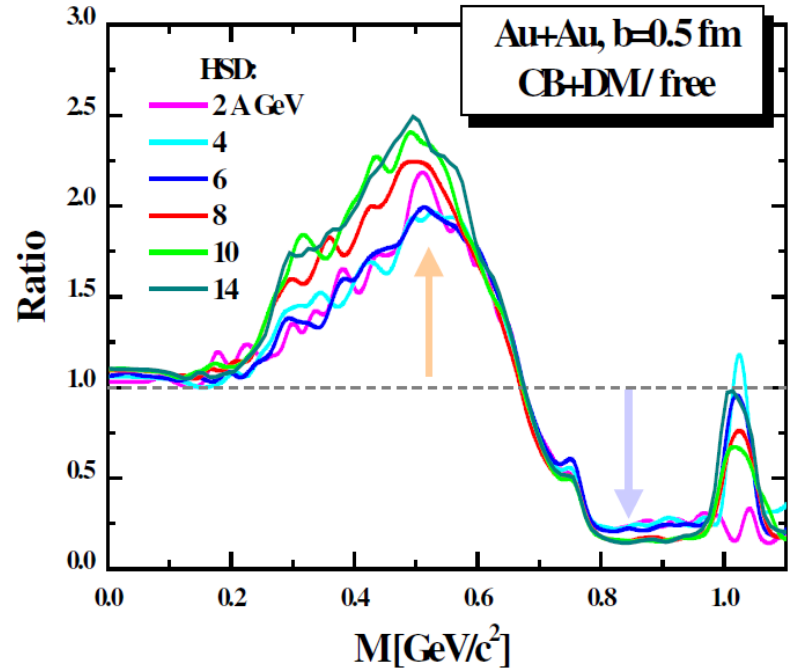
# Physics at NICA: prospects for dileptons

- Modifications of vector meson properties due to CSR are simulated within the PHSD model for Au+Au collisions at NICA energies



Ratio =  $dN/dM(\text{in-medium}) / dN/dM(\text{free})$

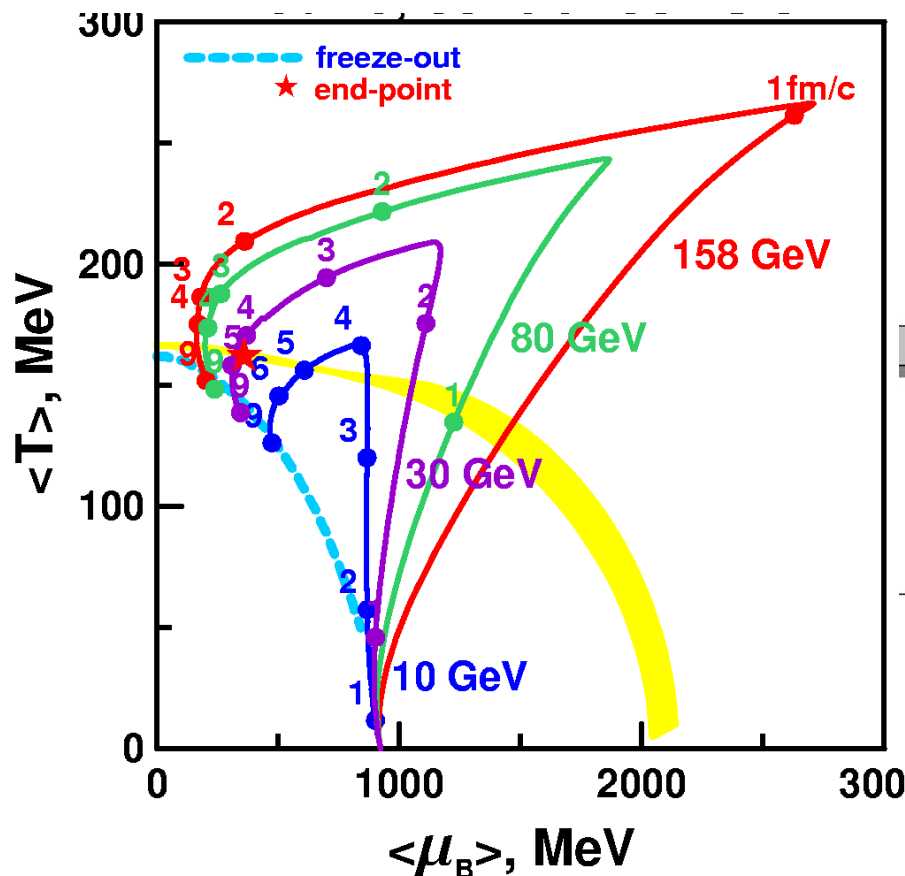
collisional broadening + dropping mass



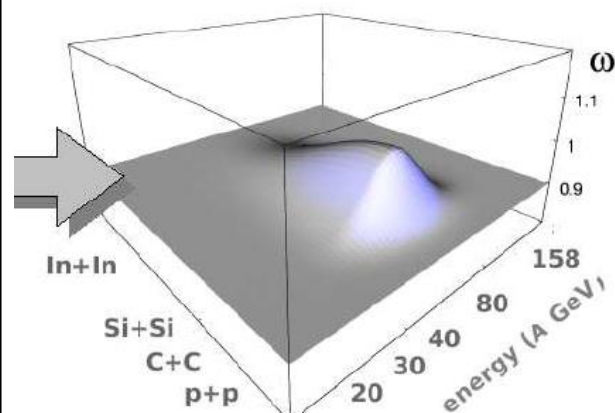
- Enhancement of dilepton yield for  $0.2 < M < 0.7$  GeV and reduction at the phi-meson peak at NICA energies
- Small contribution from correlated charm in dilepton spectra at NICA

# Critical End Point (CEP) at the QCD phase diagram

Trajectories calculated by a 3-fluid hydrodynamics model Toneev & Ivanov



If the trajectory is in the vicinity of the critical endpoint – abnormal fluctuations can be observed



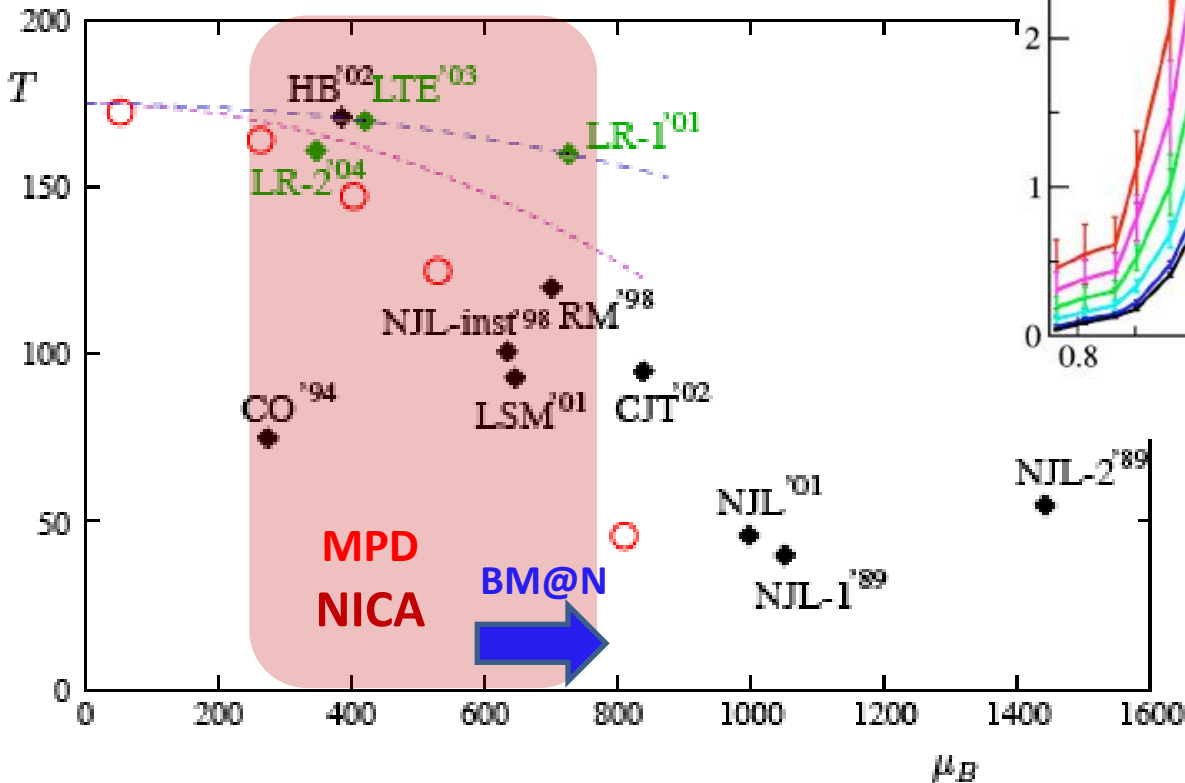
Observables - event-by-event fluctuations:

- multiplicity, charge number
- particle ratios
- mean  $p_T$ , azimuthal angle
- baryon number

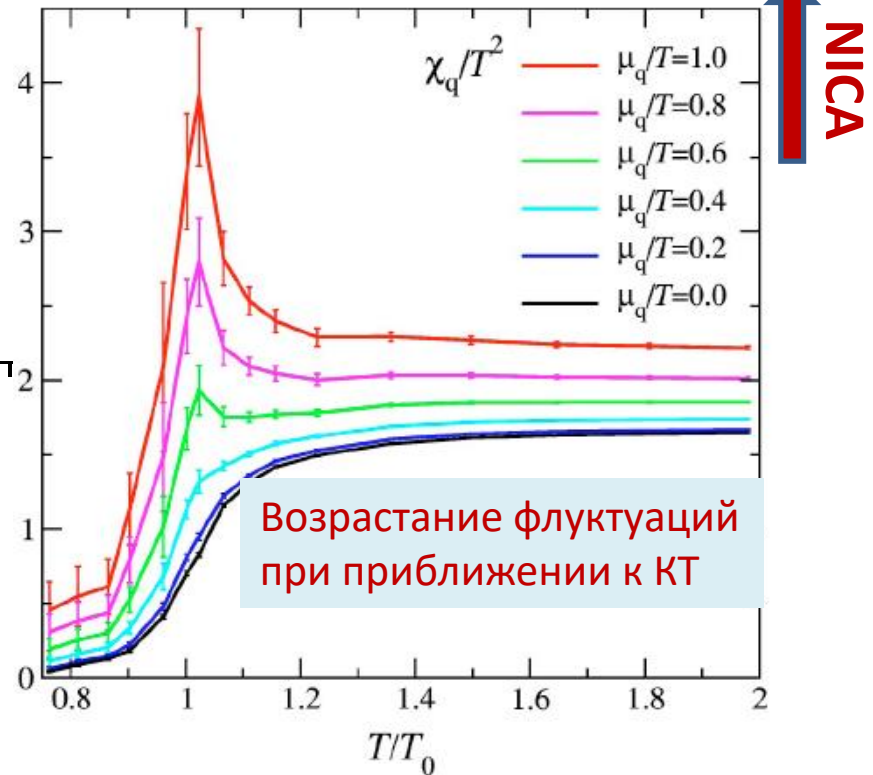
**Experimental challenge:** fluctuation signal may be suppressed due to final state interactions that washed out the signal. True CEP signal should show consistency in several observables!

# Проблема поиска критической точки на NICA

- Theory predictions for CEP are rather uncertain, still..
- QCD predictions within the region probed by NICA – chance to discover CEP experimentally



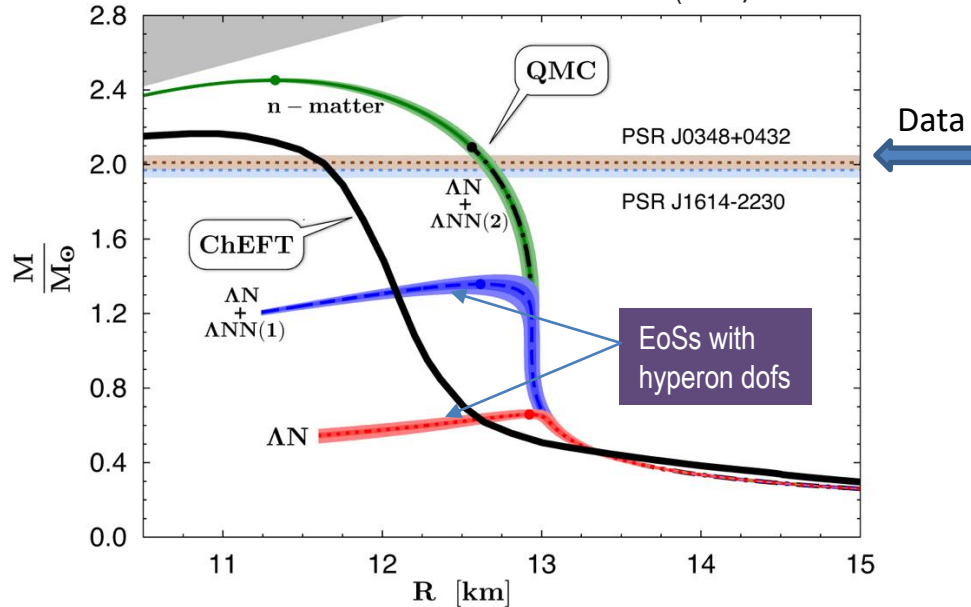
PHYSICAL REVIEW D 68, 014507 (2003)



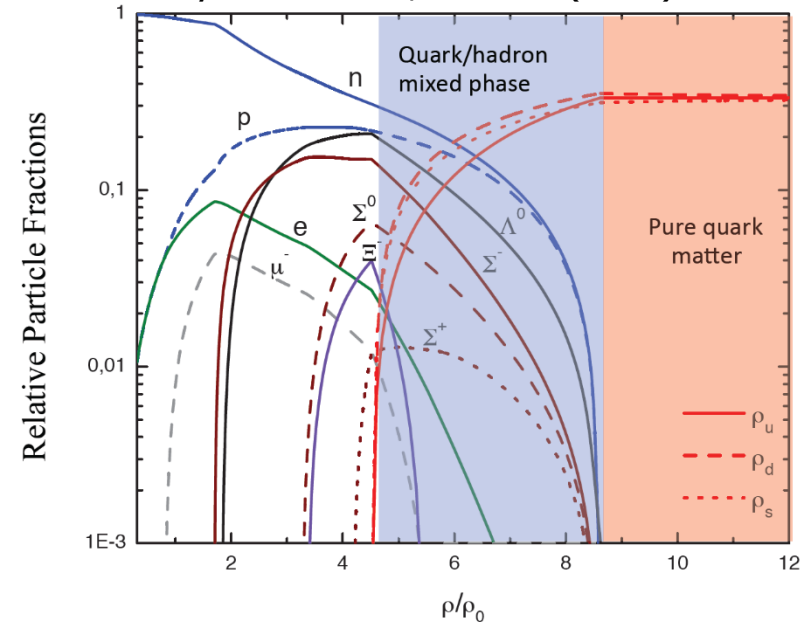
# Астрофизическая загадка (puzzle) странных частиц в плотной барионной материи

- Hyperons appear in the core of neutron stars (NS) at  $\sim$ twice the normal nuclear density
- In a new chemical composition, due to attractive YN potentials, the EOS becomes softer
- A new balance among the (inward) gravitational force and (outward) thermal + Fermi degenerate pressure impacts the mass-radius (M-R) relation for NSs
- But.** the latter is in contradiction with observations (**NS hyperon puzzle**)

REVIEWS OF MODERN PHYSICS 88 (2016)



Phys. Rev. C 89, 015806 (2014)

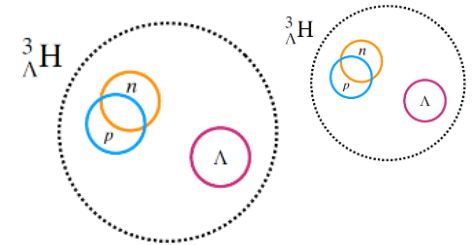


The main obstacle – lack of knowledge about YN (YY, YNN) potentials in dense matter. Thus, new data on  $B_L$ , lifetimes, branching ratios of **hypernuclei** are needed to provide tighter constrains

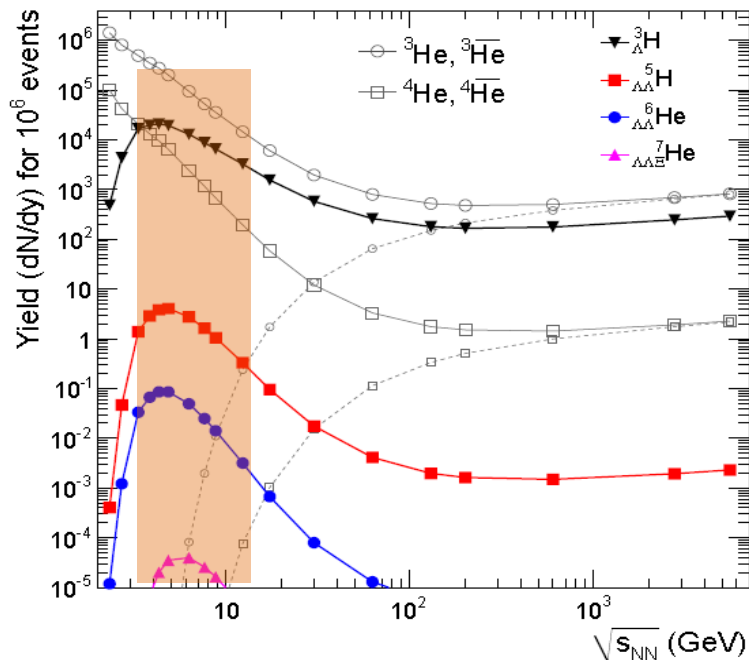
# Hypernuclei in HIC : expectations & data

**Hypernuclei are nuclei containing at least one hyperon**

Thermal model predicts an enhanced production of (hyper)nuclei within the NICA energy range

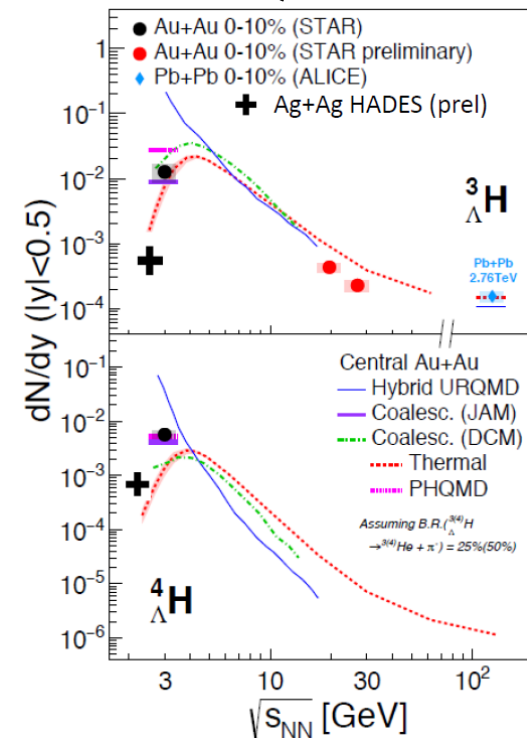


A. Andronic et al, PLB 697 (2011) 203



- Few data on the production of hypernuclei in HIC
- Available data leave space for various model predictions (thermal, coalesce, hybrid)
- Further and deeper investigations of the hypernucleus formation mechanisms require additional data at different energies and collision systems (**NICA**)

QM'2022



- Precise measurements of binding energies, lifetimes and branching ratios can give tighter constrains → **NICA!**



# NICA physics cases & observables

## ➤ Bulk properties, EOS and phase transition from hadronic matter to QGP

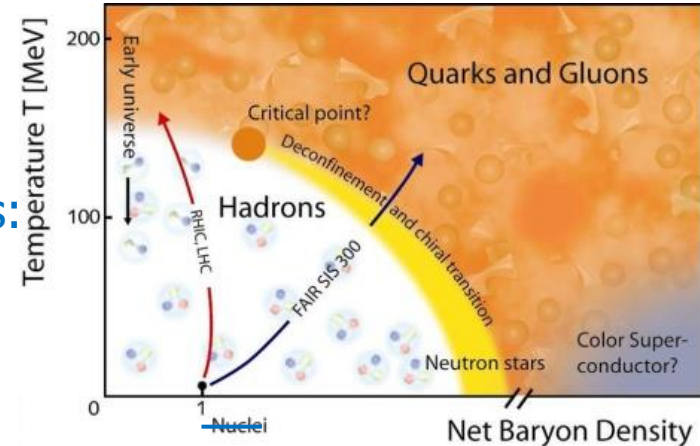
- excitation function of strangeness
- yields and spectra of hadrons and light nuclei

## ➤ Phase coexistence

- excitation function (invariant mass) of lepton pairs: thermal radiation from QGP, caloric curve
- anisotropic azimuthal angle distributions

## ➤ Critical End Point

- event-by-event fluctuations of conserved quantities (B,S,Q)



## ➤ Onset of chiral symmetry restoration

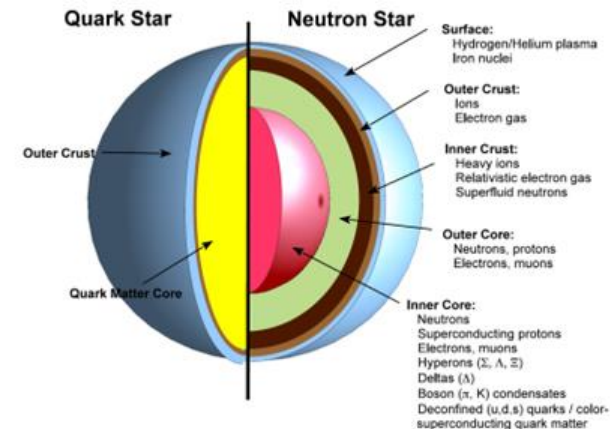
- in-medium modifications of hadrons:  $\rho, \omega, \phi \rightarrow e^+e^-$
- dileptons at intermediate invariant masses

## ➤ QCD EOS at neutron star densities

- Collective flow of identified particles
- Excitation function of multi-strange hyperons

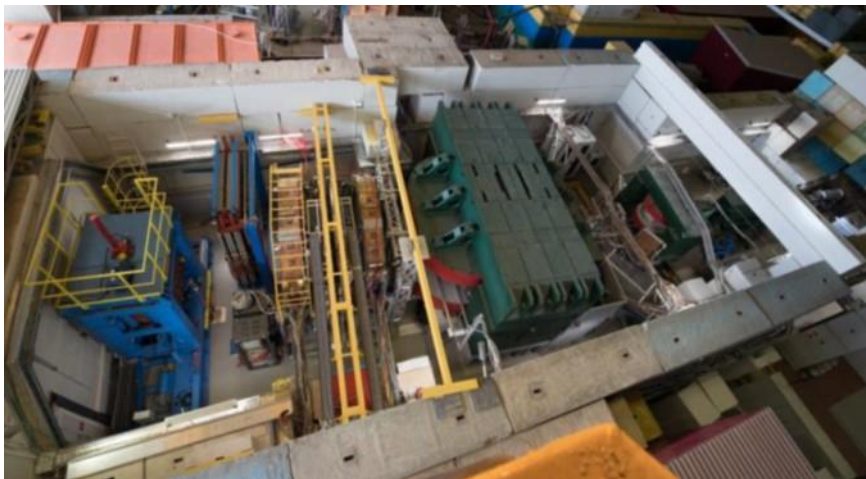
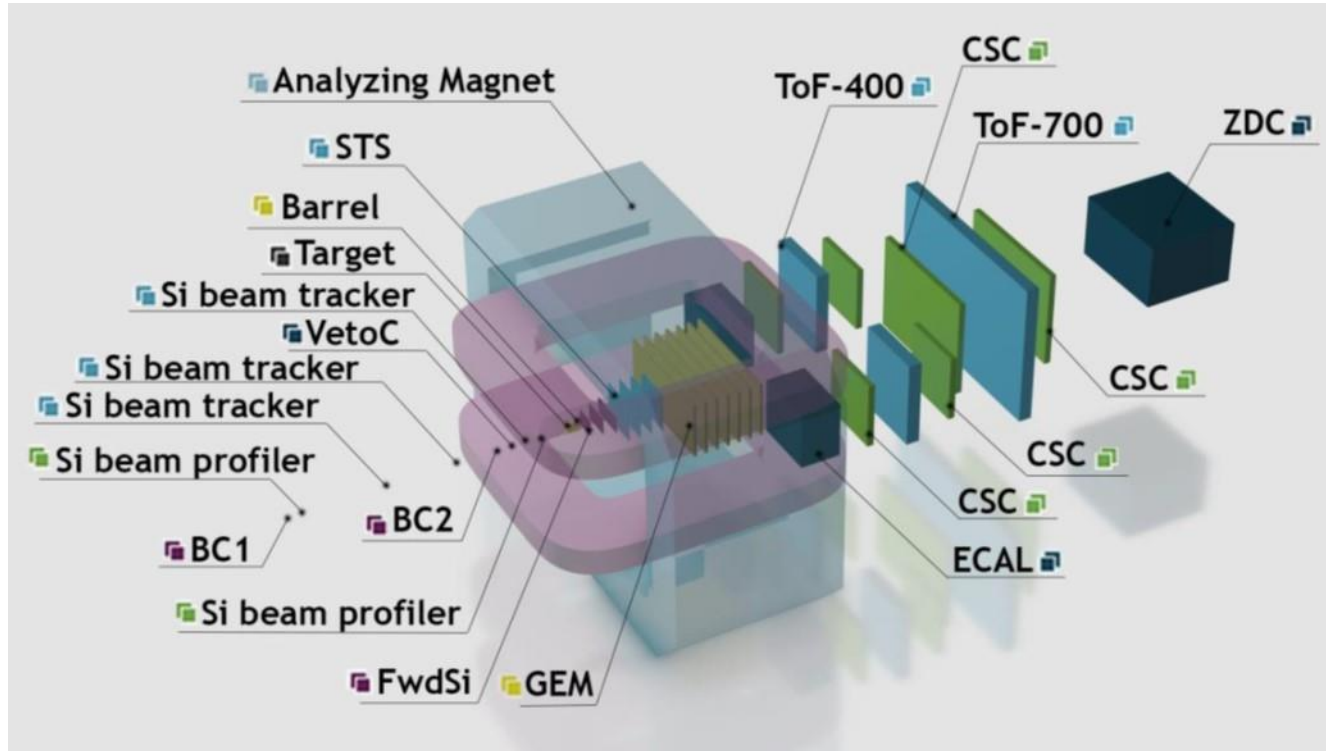
## ➤ In-medium $\Lambda$ -N and $\Sigma$ -N interactions

- Yields and lifetime of single and double  $\Lambda$ -hypernuclei



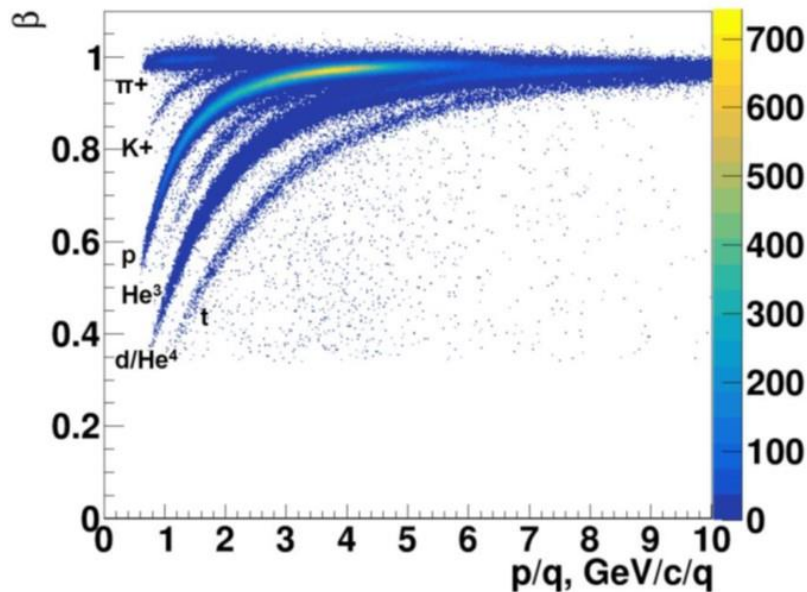
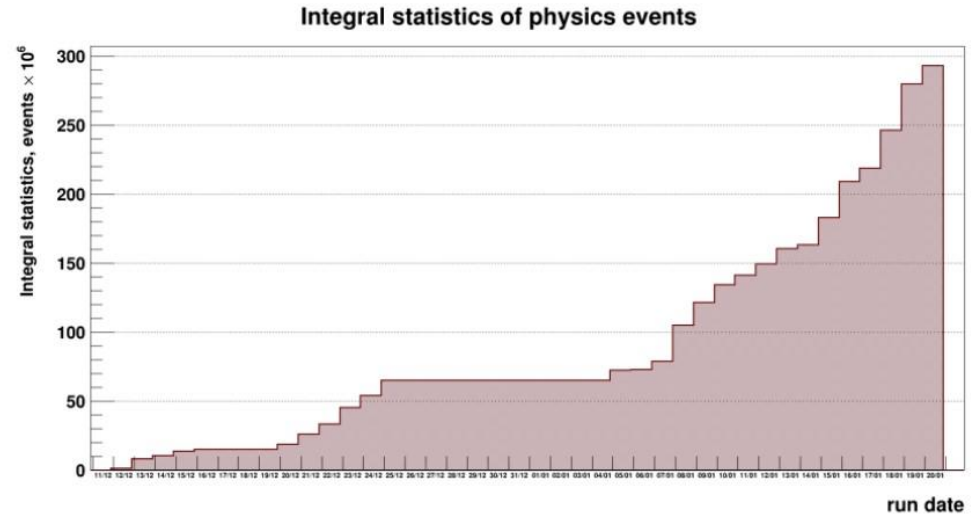
Детекторы для регистрации  
столкновений тяжелых ионов  
на ускорительном комплексе комплексе NICA

# Baryonic Matter @ Nuclotron (BM@N) Experiment

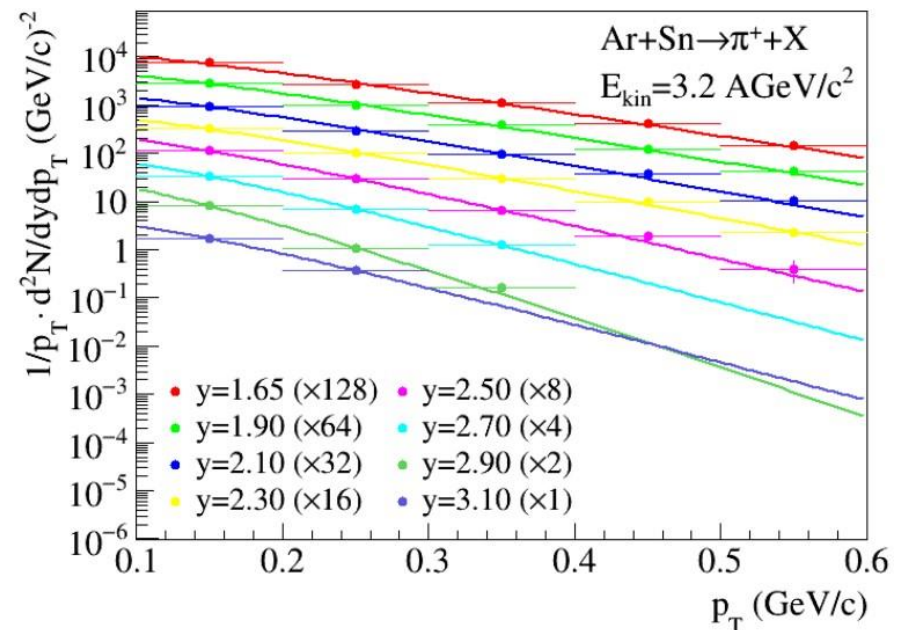


# BM@N Experiment : status prior to 2023

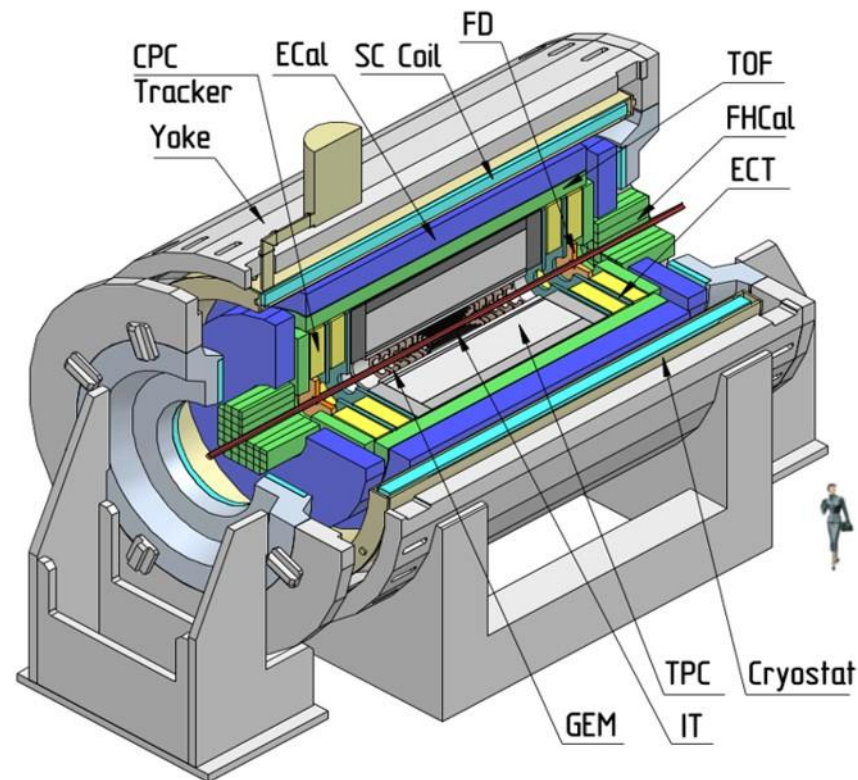
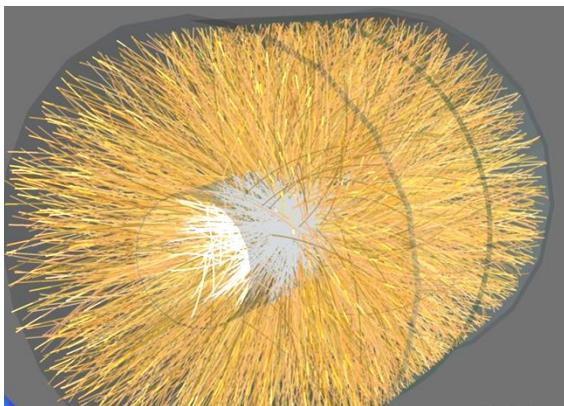
- Детектор собран в полной конфигурации
- Набрано более 600 млн. событий на пучках ядер Ar и Xe
- Начат анализ данных и подготовка публикаций



[arXiv:2303.16243](https://arxiv.org/abs/2303.16243) [hep-ex]



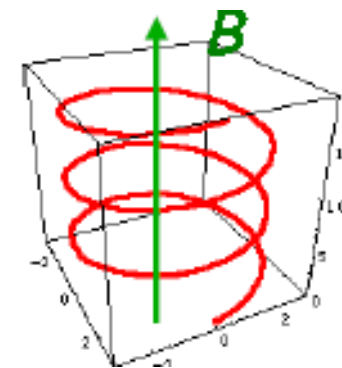
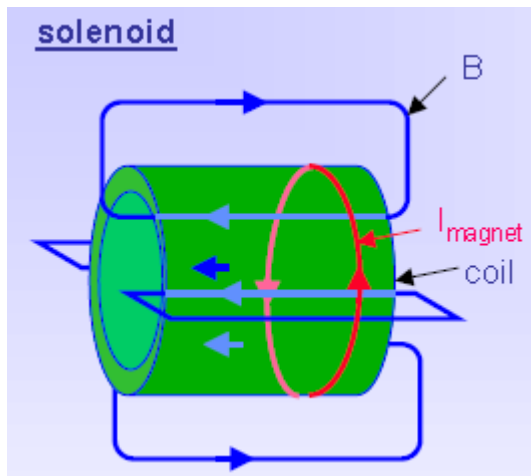
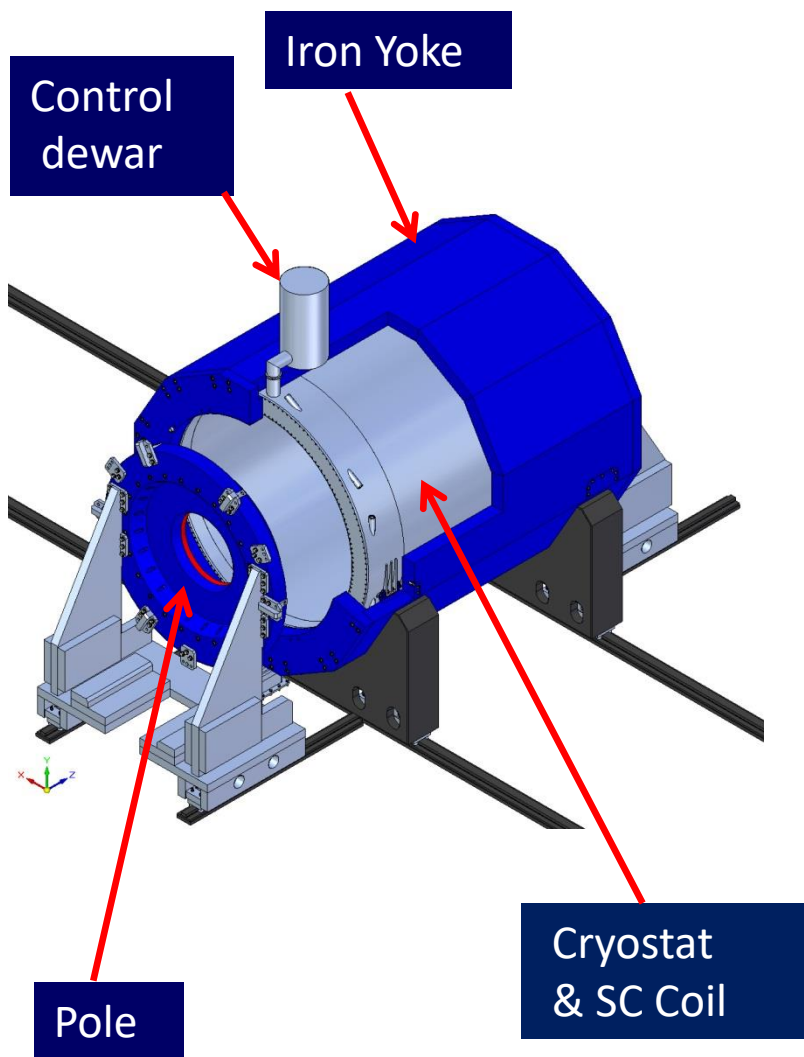
# Детектор MPD для регистрации A+A столкновений



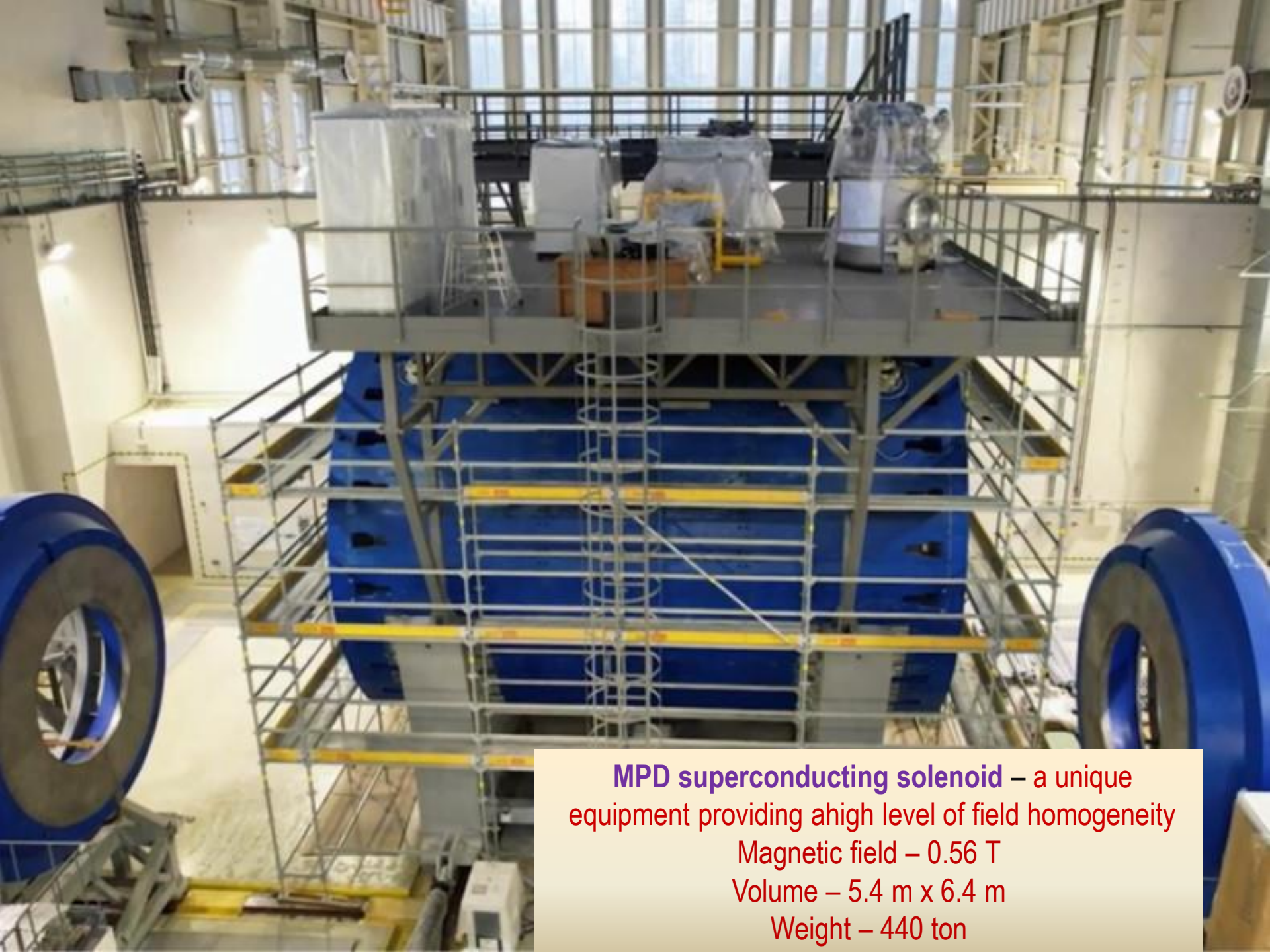
## В каждом столкновении необходимо:

- ▶ Регистрировать все рожденные частицы (заряженные и нейтральные. Так частицы вылетают под любыми углами необходимо полное перекрытие ( *$4\pi$  coverage*))
- ▶ Реконструкция геометрии события :
  - точки столкновения (*"main vertex"*)
  - нахождение всех вторичных вершин (*"decays"*)
  - определение центральности столкновения (*"impact parameter"*)
- ▶ Идентификация продуктов реакции: массы, заряда и т.д.
- ▶ Измерить кинематические характеристики : ( $p_x, p_y, p_z$ )

# Сверхпроводящий магнит MPD (соленоид)



Заряженная частица  
в магнитном поле  
движется по спиральной  
тректории



**MPD superconducting solenoid** – a unique equipment providing a high level of field homogeneity

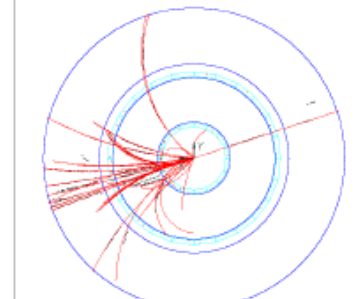
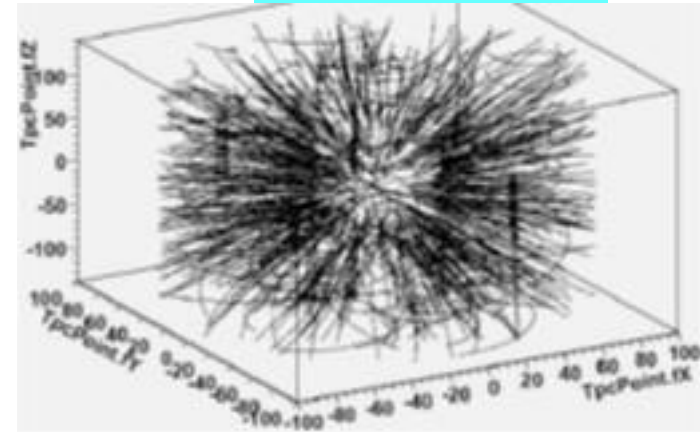
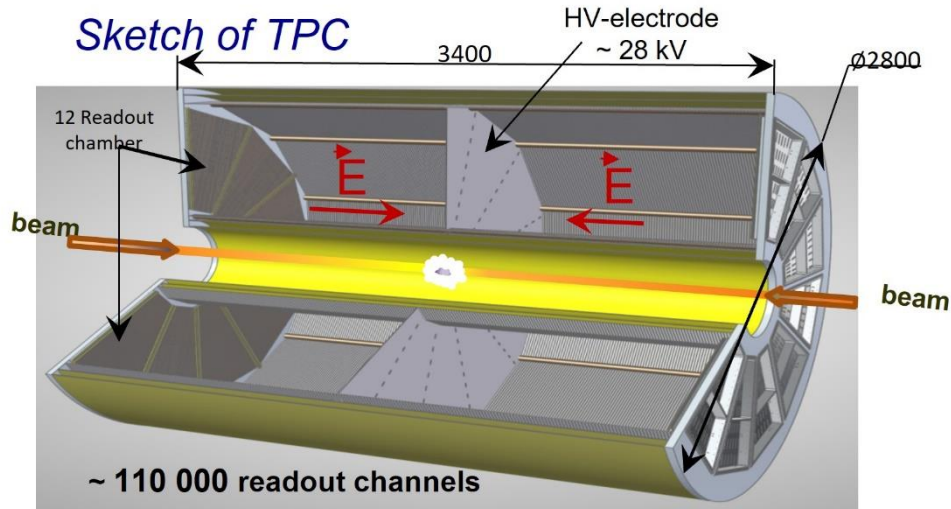
Magnetic field – 0.56 T

Volume – 5.4 m x 6.4 m

Weight – 440 ton

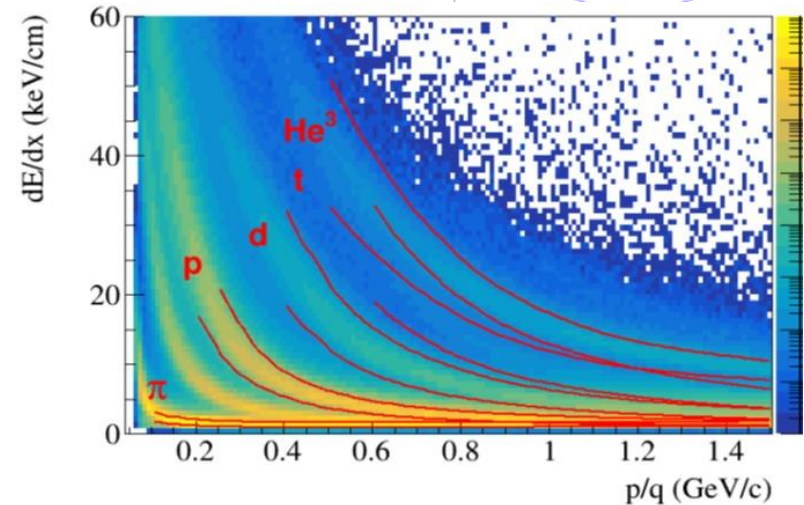
# MPD TPC – 3D трекер

Au+Au @ 9 GeV



## Роль Time-Projection Chamber (TPC):

- Восстановление траекторий заряженных частиц
- Определение импульса и знака заряда по кривизне траектории
- Измерение ионизационных потерь и разделение частиц по сортам

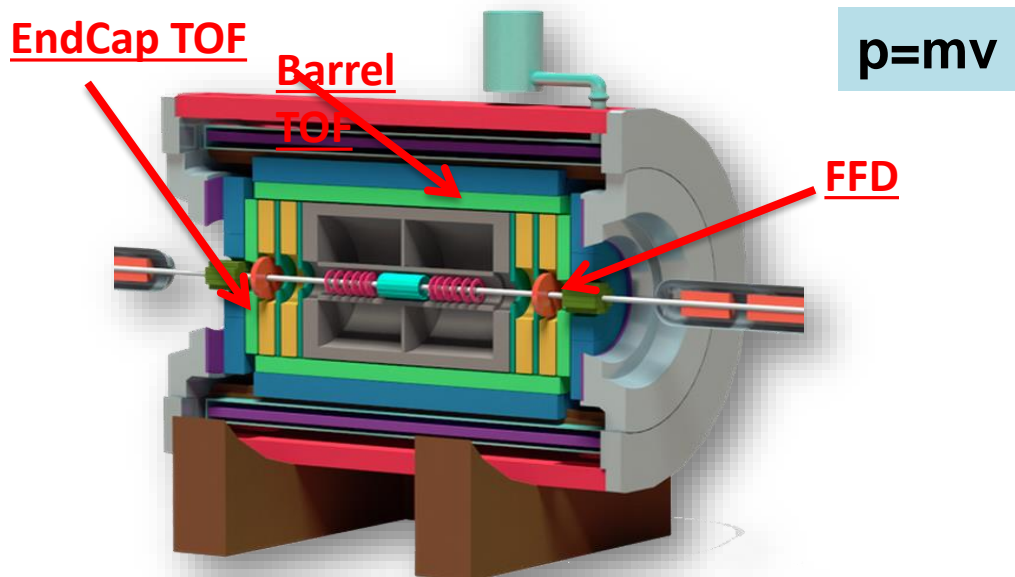




# Элементы ТРС в сборочном цеху



# MPD Time-of-Flight (TOF) system



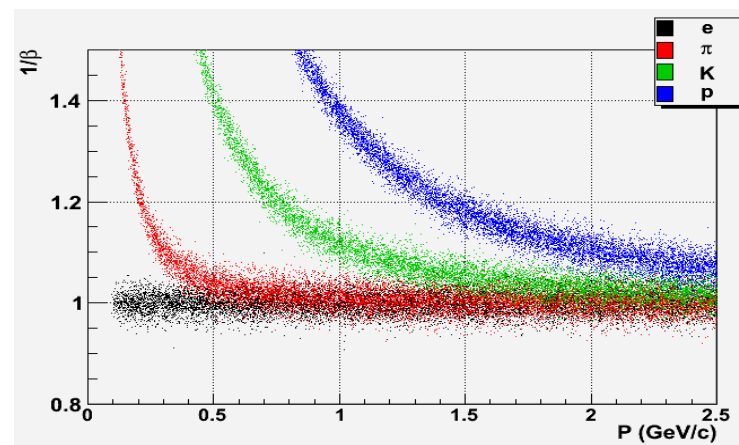
Time of flight

$$v = s / (t_1 - t_0)$$

$1/\beta = ct/L$ , where  
 $L$  – track length,  
 $t$  – time of flight,  
 $c$  – speed of light

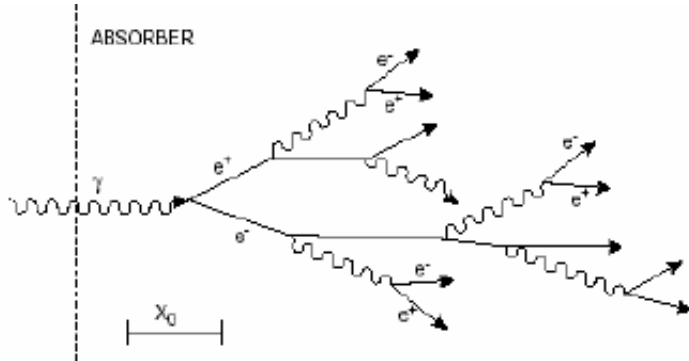


**Time resolution is a crucial parameter!**



# Measure of total energy in MPD (Calorimetry)

Particles (neutral or charged) incident on a block of material deposit their energy through ionization or excitation of the atoms of matter. **Massive blocks** → full attenuation



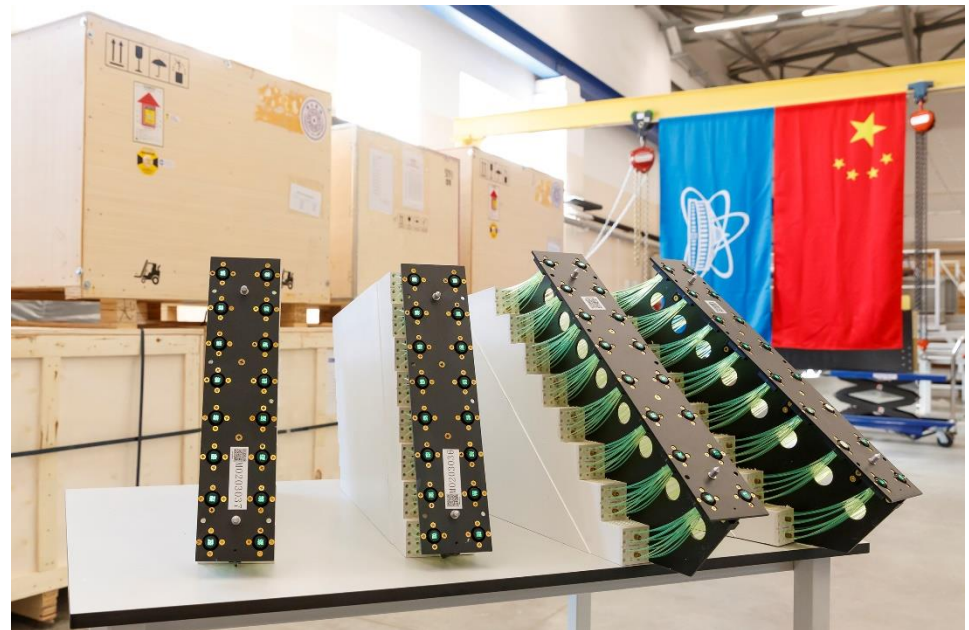
$$X_0 = \frac{716 \text{ g cm}^{-2} A}{Z(Z+1) \ln(287/\sqrt{Z})}$$

- A high energy electron or photon initiates a cascade electromagnetic (EM) shower of  $e^{\pm}$ ,  $\gamma$  via bremsstrahlung and pair production

Characteristic length defined by the properties of the material: heavy elements have shorter length

**A depth  $> 25 X_0$  is needed to contain EM showers**

Тесты модулей калориметра ECAL перед сборкой



# MPD simulation, reconstruction & analysis framework

<http://mpdroot.jinr.u>

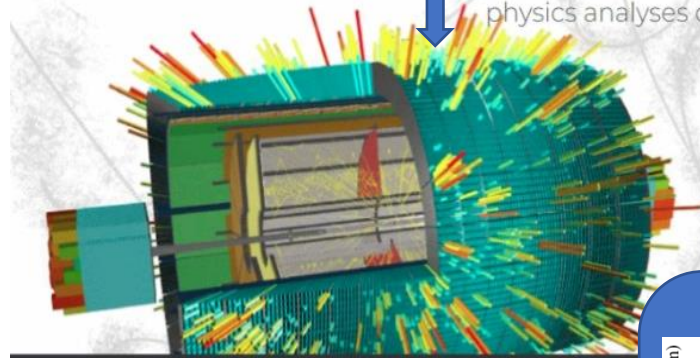
- Branches for all the MPD subdetectors
- A variety of event generator options
- Detector response simulation + reconstruction tasks

## THE MPDROOT

mpdroot is the off-line software framework for simulation, reconstruction and physics analyses of the simulated or experimental data for MPD experiment

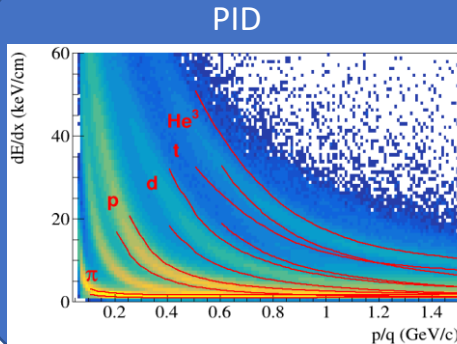
Event generator  
(PHQMD model)

Transport  
GEANT3,4

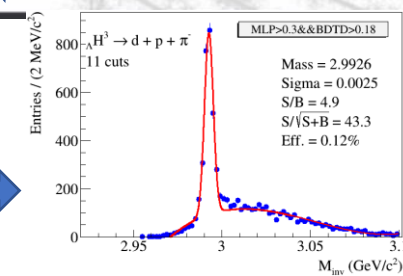
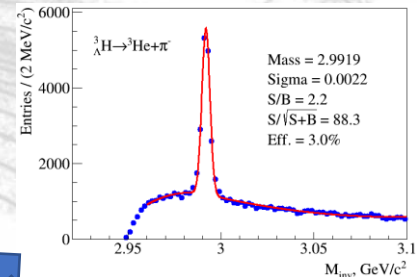


Detector response  
(TPC, TOF)

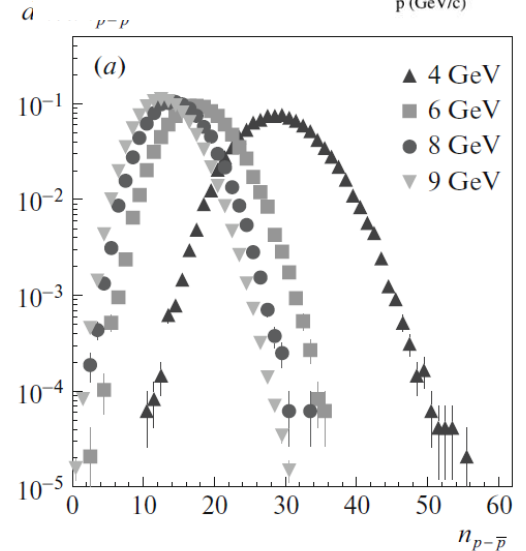
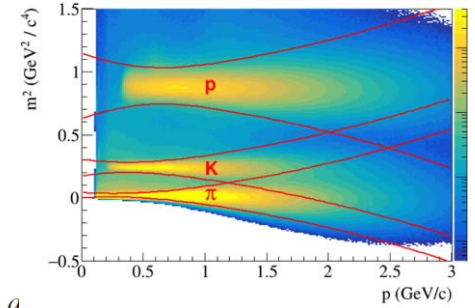
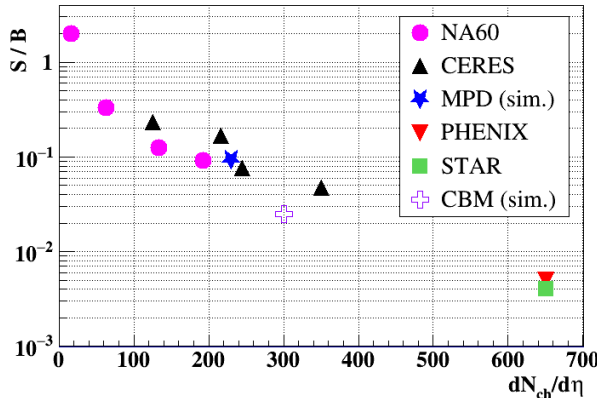
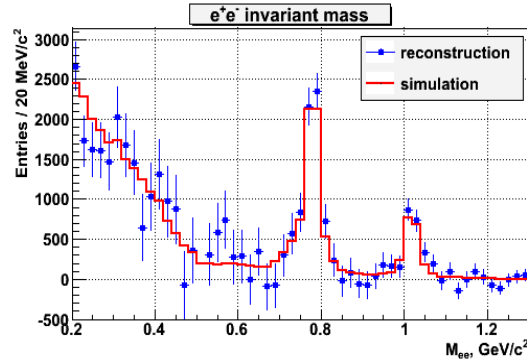
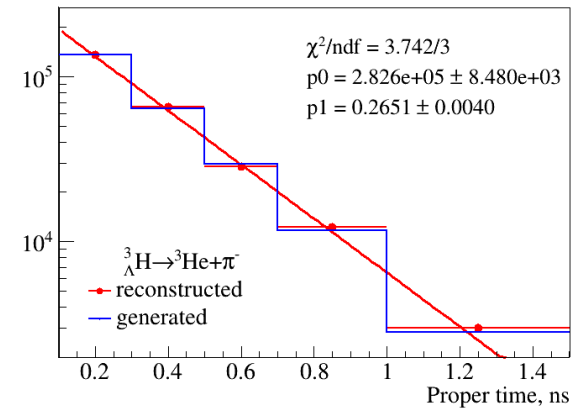
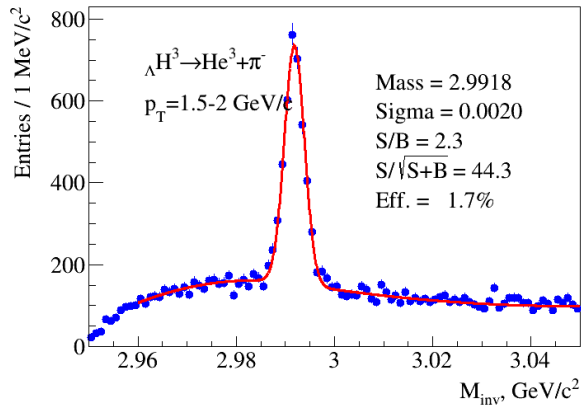
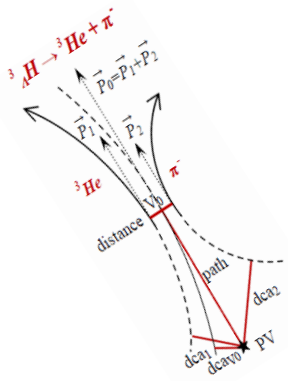
Event reconstruction  
(tracking, vertexing, PID)



Secondary vertex technique:  
topology selection  
or  
ML-based TMVA



# Моделирование детектора MPD для различных наблюдаемых



- Подробное моделирование для проверки характеристик детектора по исследованию рождения адронов и ди-лептонов, поиска критической точки, образования гиперонов и гиперядер и т.д. т.п.
- Детектор готов к набору данных после завершения сборки в 2024 г.

## Заключение

- В столкновениях релятивистских ядер образуется сильновзаимодействующая материя при экстремальных значениях плотности и температуры
- В течение ближайших лет на ускорительном комплексе NICA будет реализована программа энергетического сканирования фазовой диаграммы КХД в области максимальных значений барионной плотности
- Подробное изучение большого кол-ва пробников (адроны, лептоны, гиперядра и т.д.) позволит значительно расширить наши знания об уравнении состояния КХД материи, о структуре фазовой диаграммы КХД, о фазовых переходах и критических явлениях

*Спасибо за внимание!*

# Kinematics in HIC

transverse momentum

$$p_T = \sqrt{p_x^2 + p_y^2}$$

transverse mass

$$m_T = \sqrt{p_T^2 + m^2}$$

rapidity

$$y = \frac{1}{2} \ln \frac{E + p_z}{E - p_z} = \tanh^{-1} \frac{p_z}{E}$$

pseudorapidity

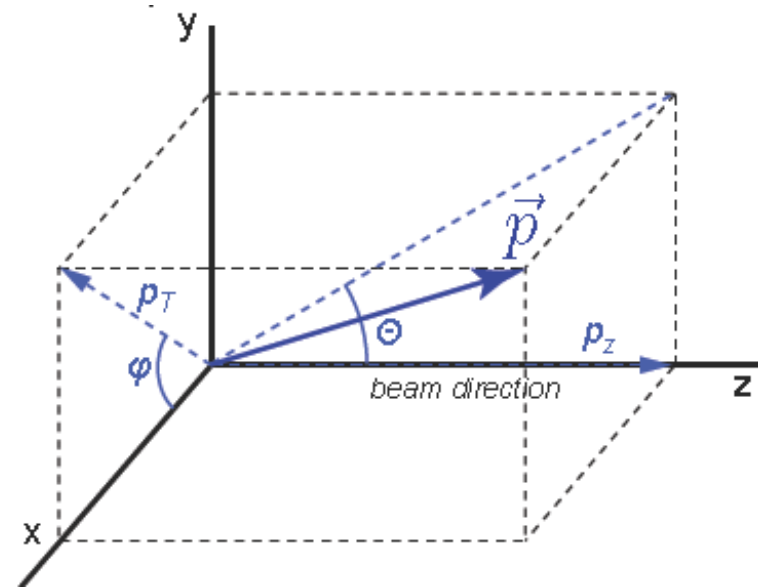
$$\eta = -\ln \tan \frac{\theta}{2}$$

$$y \approx \eta \text{ for } p \gg m$$

Invariant cross-section:

$$E \frac{d^3\sigma}{dp^3} = \frac{1}{2\pi} \frac{d^2\sigma}{p_T dp_T dy} = \mathbf{f(y)g(p_t)h(\phi)}$$

can be factorized as a product of **longitudinal**, **transverse** and **azimuthal** parts



$$E = m_T \cosh y$$

$$p_z = m_T \sinh y$$