

# Лаборатория релятивистской ядерной физики в 2004 году ОФВЭ, ПИЯФ РАН

**В. Самсонов**

- Введение
- RHENIX-2004 (BNL, США)
- ALICE-2004 (CERN, Швейцария)
- CBM-2004 (GSI, Германия)
- Теоретические результаты-2004
- Планы на будущее
- Заключение

**27 декабря 2004**

## Лаборатория релятивистской ядерной физики

### Состав лаборатории в 2003 году

Вед.научн.сотрудник	2 (док. ф.-м. наук)
Старш.научн.сотрудник	4 (канд. ф.-м. наук)+1 б/ст.
Научн.сотрудник	1 (канд. ф.-м. наук)+3 б/ст.
Студент	1 (1/2 ставки)
Вед. инженер	7
Механик	4
Лаборанты, монтажницы	4
Всего:	27 человек

**27 декабря 2004**

## Лаборатория релятивистской ядерной физики

### Публикации 2004 года

- Phys.Rev.Lett. 8 Эксп.
- Phys.Rev. C 6 Эксп.
- Nucl.Phys 1 Эксп
- Phys.Rev. A 1 Эксп.
- e-aRxiv 2 Теор.

Всего: 16

### Доклады 2004 года

Много (Phenix,ALICE,GSI и т.д.)

27 декабря 2004

## Лаборатория релятивистской ядерной физики

### Финансовое обеспечение в 2004 году

Тема «БАК-АЛИСА» (Минобрнаука)	1500 тыс.руб.
Тема «ФЕНИКС» (Минобрнаука)	240 тыс.руб.
Тема «РАН»	400 тыс.руб.

Визиты:

ЦЕРН (АЛИСА)	35 кCHF (Минпромнаука)
	+16 кCHF (ЦЕРН)
БНЛ (ФЕНИКС)	44.4 к\$ (Минпромнаука)
	+ 36.6 к\$ (БНЛ)

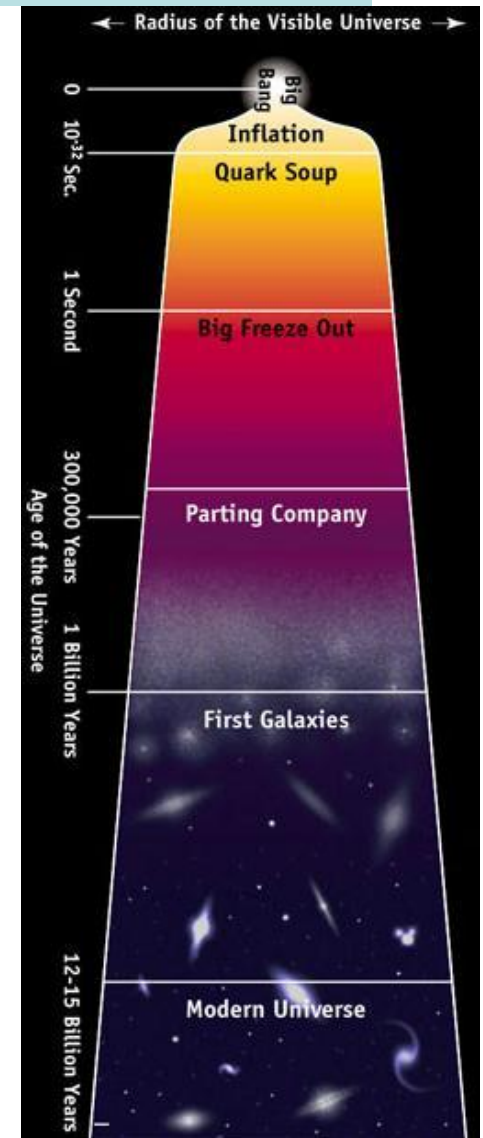
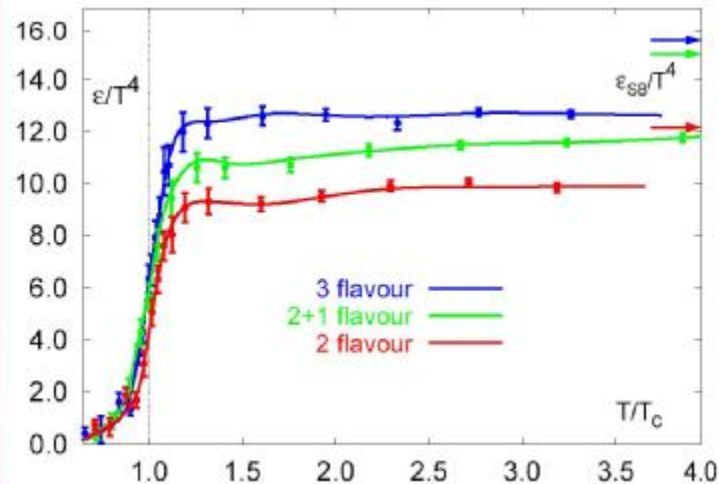
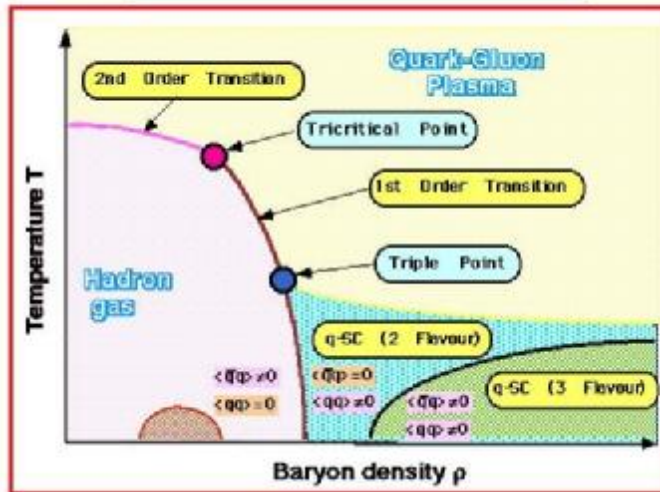
**27 декабря 2004**

# Что мы исследуем?

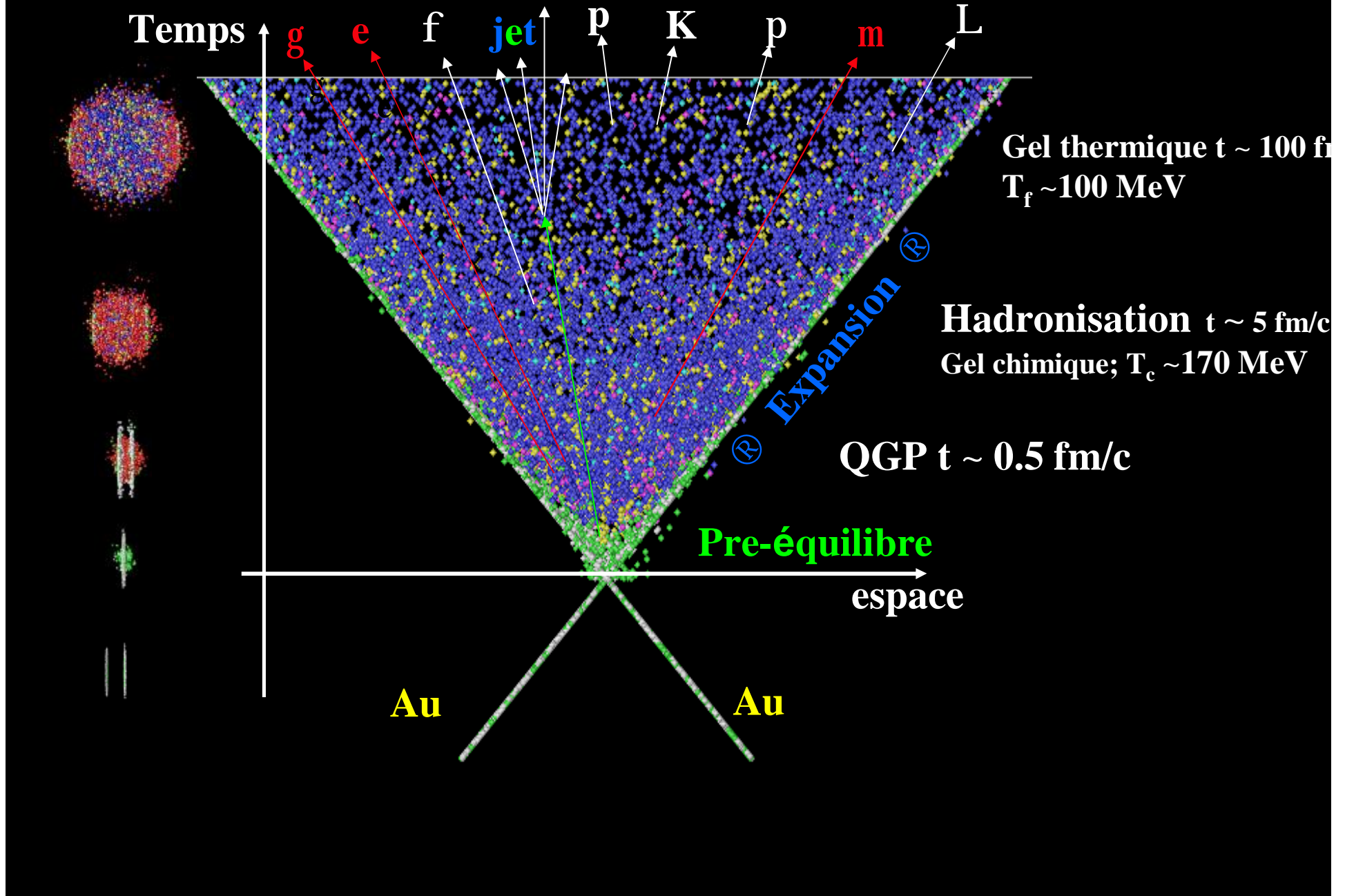
Исследуем состояния ядерной материи в экстремальных условиях по температуре и плотности:

- ∅ Современная теория QCD предсказывает много необычных свойств у такой материи (см. диаграмму)
- ∅ Важно для понимания эволюции Вселенной и состояния вещества в звездах

Phase Structure of QCD

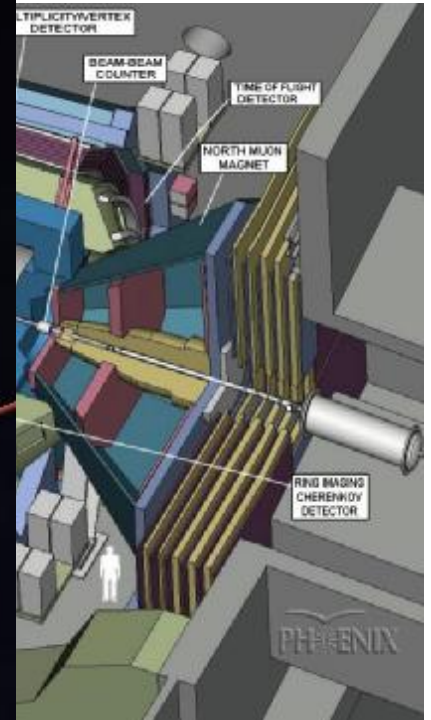


# Evolution spatio-temporelle de la collision





# Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) Pioneering High Energy Nuclear Interaction eXperiment (PHENIX)

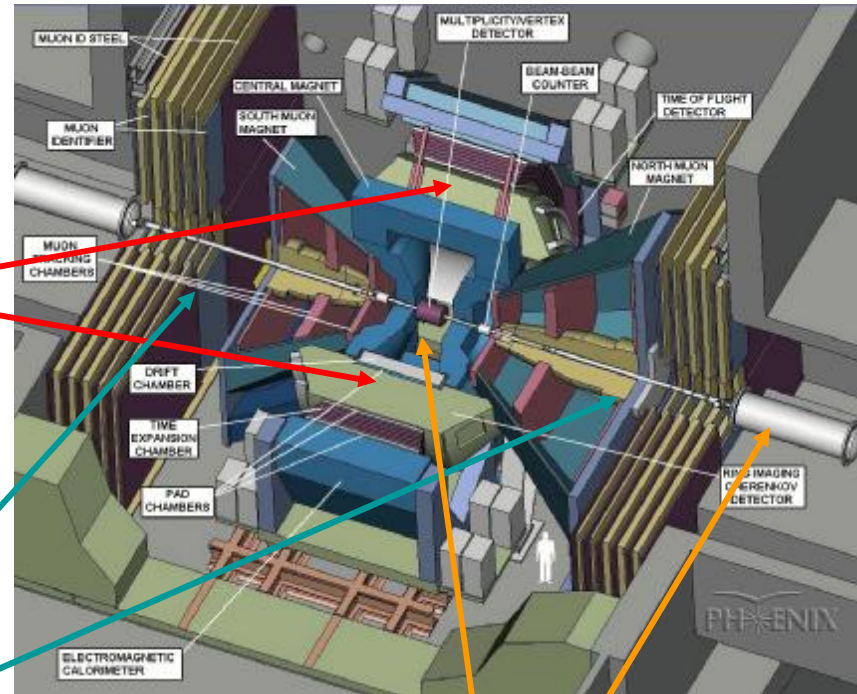


# Эксперимент ФЕНИКС

Предназначен для изучения редких процессов:

- (+) обеспечивает работу при высоких нагрузках
- (+) тонкая гранулярность
- (+) хорошее массовое разрешение
- (+) надежная идентификация частиц
- (-) ограниченный акцептанс

- Два центральных спектрометра ( $BdI \sim 8 \text{ Тм}$ ;  $\hat{e}h \hat{e} < 0.35$ ;  $2 \times 90^\circ$  по  $j$ ): электроны, фотоны, адроны
  - $J/\psi, \psi' \rightarrow e^+e^-$
  - векторные мезоны  $\rho, \omega, \phi \rightarrow e^+e^-$
  - $pT \gg 1 \quad \pi^0 \pi^+ \pi^-$
  - прямые фотоны
  - открытый чарм
  - адронная физика
- Два мюонных спектрометра ( $1.15 < \hat{e}h \hat{e} < 2.35$ ,  $360^\circ$  по  $j$ ): мюоны
  - $J/\psi, \psi', \Upsilon \rightarrow \mu^+ \mu^-$
  - векторные мезоны  $\phi \rightarrow \mu^+ \mu^-$
  - открытый чарм

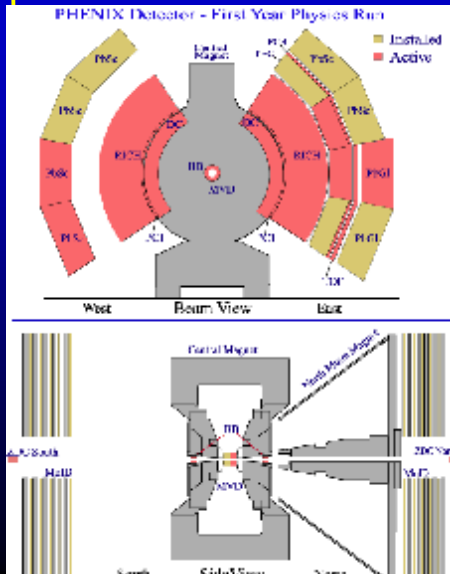


- Комбинация центральных и мюонных спектрометров: рождение очарованных частиц
  - $DD \rightarrow e\mu$
- Глобальные детекторы: множественность
  - общая характеристика взаимодействий

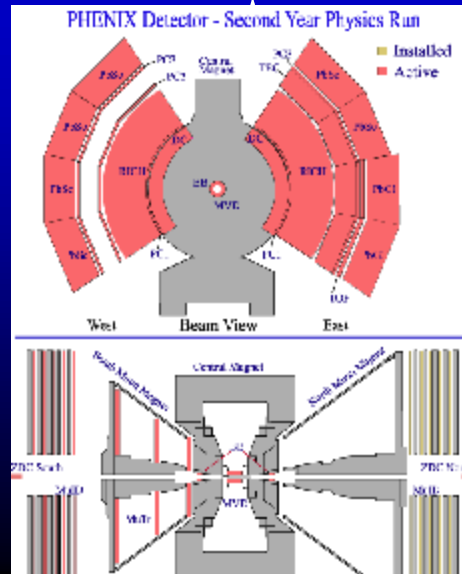


Run	Year	Species	$s^{1/2}$ [GeV]	$\int Ldt$	$N_{tot}$	p-p Equivalent	Data Size
01	2000	Au+Au	130	$1 \mu b^{-1}$	10M	$0.04 pb^{-1}$	3 TB
02	2001/2002	Au+Au	200	$24 \mu b^{-1}$	170M	$1.0 pb^{-1}$	10 TB
		p+p	200	$0.15 pb^{-1}$	3.7G	$0.15 pb^{-1}$	20 TB
03	2002/2003	d+Au	200	$2.74 nb^{-1}$	5.5G	$1.1 pb^{-1}$	46 TB
		p+p	200	$0.35 pb^{-1}$	6.6G	$0.35 pb^{-1}$	35 TB
04	2003/2004	Au+Au	200	$241 \mu b^{-1}$	1.5G	$10.0 pb^{-1}$	270 TB
		Au+Au	62	$9 \mu b^{-1}$	58M	$0.36 pb^{-1}$	10 TB

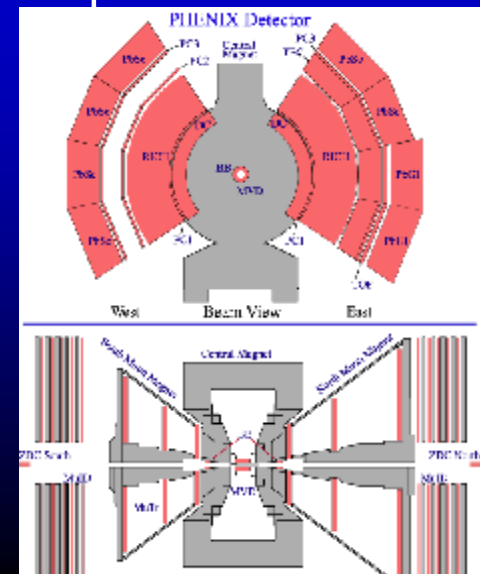
**Run-1**



**Run-2**



**Run-3**



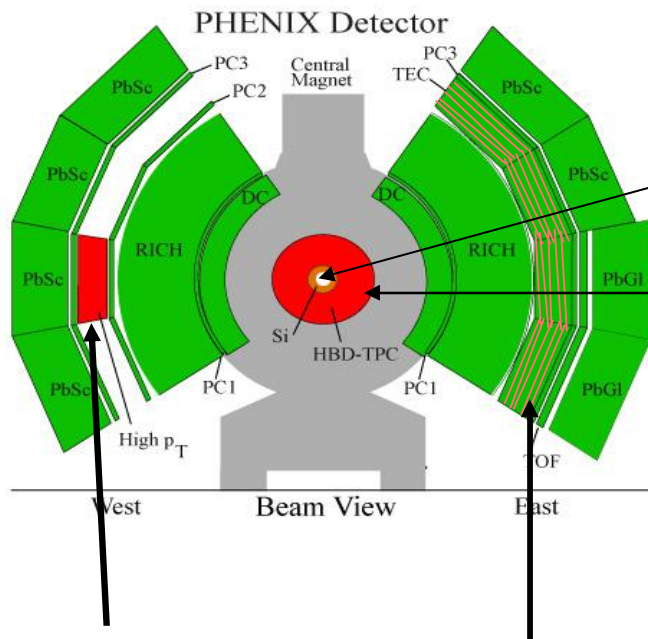


# Программа обновления экспериментальной установки ФЕНИКС

- **Цели обновления экспериментальной установки:**
  - Изучение КХД при высоких температурах в A+A, p+A и pp взаимодействиях  
Область больших поперечных импульсов (идентификация частиц,  $p_T > 20$  ГэВ/c)  
Континуум электронных пар ( $M_{ee} < 0.5$  ГэВ)  
Рождение тяжелых частиц (c- и b- физика)  
Спектроскопия ( $J/\psi$ ,  $\psi'$ ,  $\chi_c$  и  $Y(1s), Y(2s), Y(3s)$ )
  - Детальное изучение спиновой структуры нуклона и структуры нуклонов в ядрах
- **Обновление центральных спектрометров**
  - Идентификация частиц (первая части aerogel была установлена в RUN4)
  - Кремневый вершинный трекер (VTX)
  - HBD/TPC детектор
- **Обновление мюонных спектрометров**
  - Кремневый endcap трекер
  - Конусный калориметр
  - Мюонный триггер

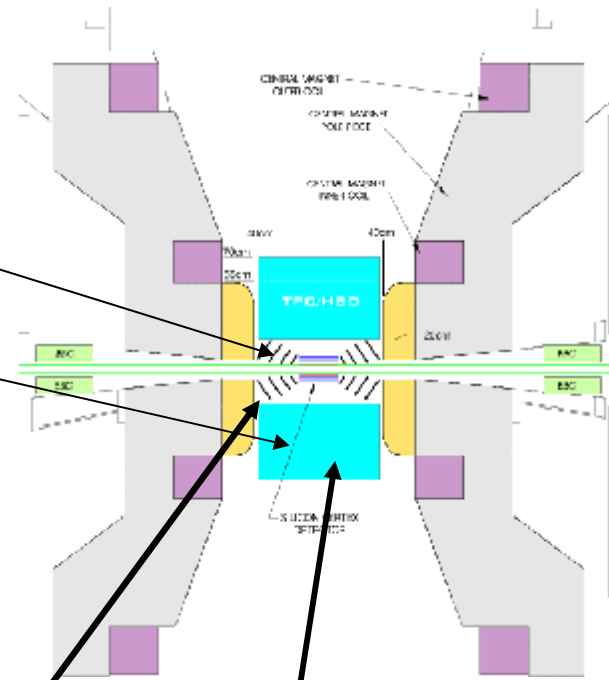
# Обновление центральных спектрометров

- **Расширение возможностей по идентификации частиц:**
  - TRD (east)
  - Aerogel/TOF (west)



- **Вершинный спектрометр**
  - VTX: кремневый вершинный трекер
  - HBD и/или TPC

VTX  
HBD/TPC



Частицы с  $p_T \gg 1$ :  
p, K,  $\rho$  разделение до 10 GeV/c

c- b- физика:  
TRD e/p  $p > 5$  ГэВ/c

e+e- континуум:  
Подавление Далицевских распадов

c- b- физика :  
восстановление вершины



# Обновление Мюонных спектрометров

Вершинный трекер ( $1.2 < |\eta| < 2.4$ ):

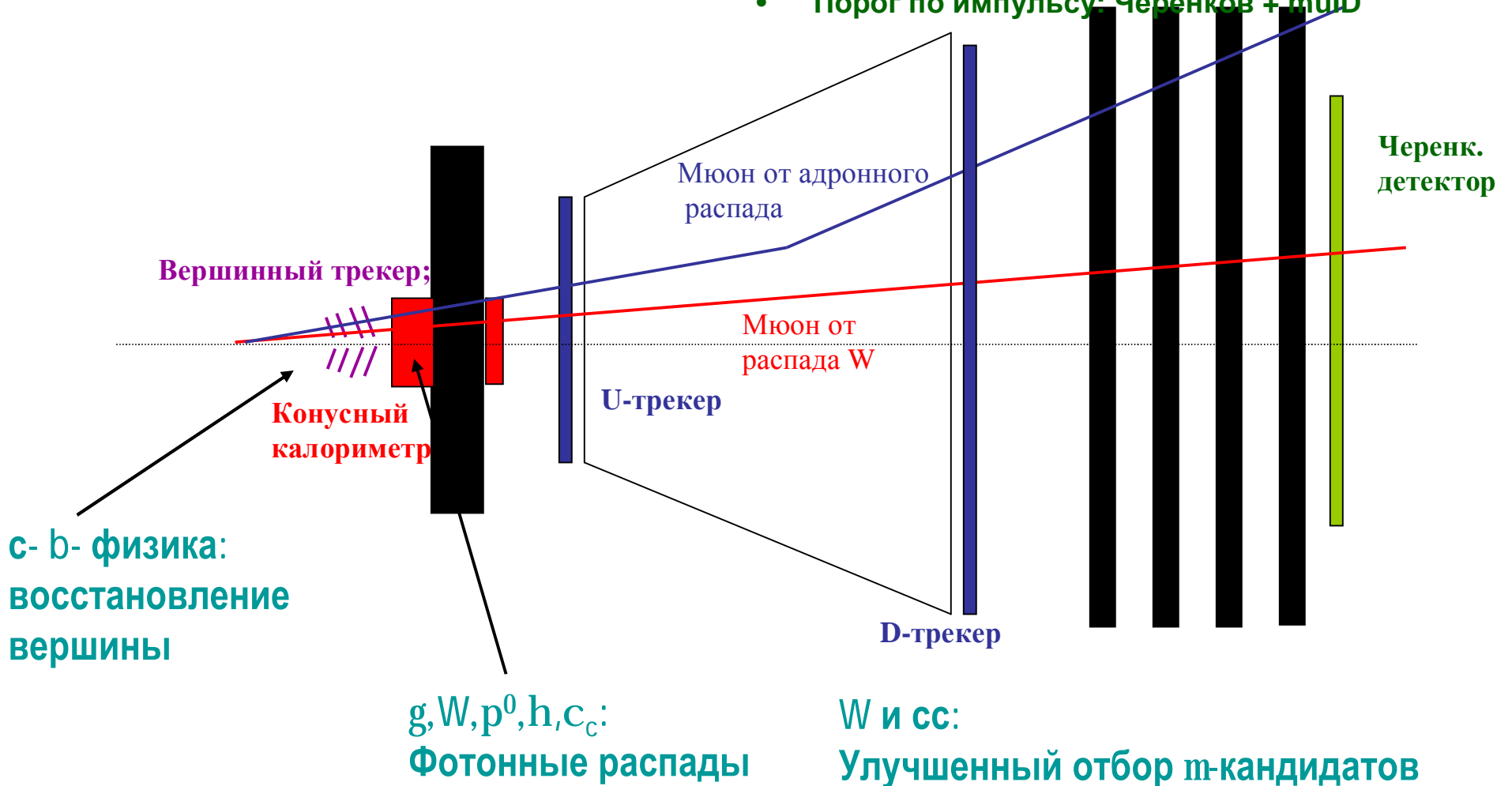
- кремневые пиксельные детекторы

Конусный э/м калориметр ( $1.0 < \eta < 2.6$ )

- W-Si read-out (20-50 X/X<sub>0</sub>)

Мюонный триггер

- **Топология:** EMC + muID
- **Отбор импульса:** U-трекер + muID
- **TOF:** D-трекер
- **Порог по импульсу:** Черенков + muID





# PHENIX Beam Use Proposal for Run-5

- **31 weeks**
  - **Cu+Cu 200 GeV**
    - 10 physics weeks, 2.9 nb<sup>-1</sup> recorded
    - 9000 J/y, pT (max) 20 GeV/c
  - **p+p 200 GeV**
    - 11 physics weeks, 5.5 pb<sup>-1</sup> recorded, 45% pol
    - 8800 J/y
    - $A_{LL}(p^0)$ , 7.1 GeV/c
- **27 weeks**
  - **Cu+Cu 200 GeV**
    - 8 physics weeks, 2.1 nb<sup>-1</sup> recorded
    - 6500 J/y, pT(max) 19 GeV/c
  - **p+p 200 GeV**
    - 9 physics weeks, 4.1 pb<sup>-1</sup> recorded, 45% pol
    - 6600 J/y
    - $A_{LL}(p^0)$ , 6.9 GeV/c

Table 2: The PHENIX Beam Use Proposal for 31 cryo weeks in Run-5, and 27 cryo weeks in latter years.

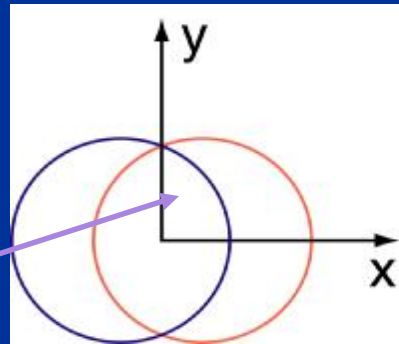
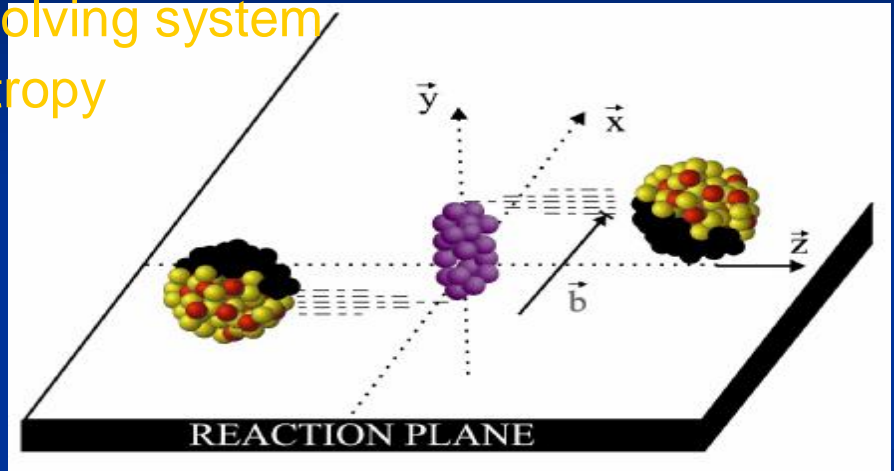
<b>RUN</b>	<b>SPECIES</b>	$\sqrt{s_{NN}}$ <b>(GeV)</b>	<b>PHYSICS WEEKS</b>	$\int \mathcal{L} dt$ <b>(delivered)</b>	<b>p+p Equivalent</b>
5	Cu+Cu	200	10	7.0 nb <sup>-1</sup>	27.6 pb <sup>-1</sup>
	p+p	200	11	13.1 pb <sup>-1</sup>	13.1 pb <sup>-1</sup>
6	Au+Au	62.4	9	111 $\mu$ b <sup>-1</sup>	4.3 pb <sup>-1</sup>
	p+p	200	8	15.0 pb <sup>-1</sup>	15.0 pb <sup>-1</sup>
7	p+p	200	20	122 pb <sup>-1</sup>	122 pb <sup>-1</sup>
8	Au+Au	200	20	4140 $\mu$ b <sup>-1</sup>	161 pb <sup>-1</sup>
9	p+p	500	20	359 pb <sup>-1</sup>	359 pb <sup>-1</sup>
10	d+Au	200	20	91.6 nb <sup>-1</sup>	36 pb <sup>-1</sup>

- | **First measurement** of the dependence of the charged particle pseudo-rapidity density and the transverse energy on the number of participants in Au+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 130$  GeV.
- | **Discovery** of high  $p_T$  suppression in  $p^0$  and charged particle production in Au+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 130$  GeV and a systematic study of the scaling properties of the suppression; extension of these results to much higher transverse momenta in Au+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV
- | (Co)-**Discovery** of absence of high  $p_T$  suppression in d+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200 \sim \text{GeV}$ .
- | **Discovery** of the anomalously large proton and anti-proton yields at high transverse momentum in Au+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 130$  GeV through the systematic study of  $p^\pm$ ,  $K^\pm$ ,  $p^\pm$  spectra; measurement of L and anti-L in Au+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 130$  GeV ; study of the scaling properties of the proton and anti-proton yields in Au+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV.
- | **Measurement of HBT correlations** in  $p^+ p^+$  and  $p^- p^-$  pairs in Au+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 130$  GeV , establishing the "HBT puzzle" of  $R_{OUT} \sim R_{SIDE}$  extends to high pair momentum; extension of these results to  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV
- | **First measurement** of single electron spectra in Au+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 130 \sim \text{GeV}$ , suggesting that charm production scales with the number of binary collisions.
- | Sensitive measures of charge fluctuations and fluctuations in mean  $p_T$  and transverse energy per particle in Au+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 130 \sim \text{GeV}$ .
- | Measurements of elliptic flow for charged particles from Au+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 130 \sim \text{GeV}$  and identified charged hadrons from Au+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200 \sim \text{GeV}$ .
- | Extensive study of hydrodynamic flow, particle yields, ratios and spectra from Au+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 130$  GeV and 200 GeV.
- | **First observation** of J/ψ production in Au+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200 \sim \text{GeV}$ .
- | Measurement of **crucial baseline data** on  $p^0$  spectra and J/ψ production in p+p collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200 \sim \text{GeV}$ .

# Pressure? “elliptic flow” barometer

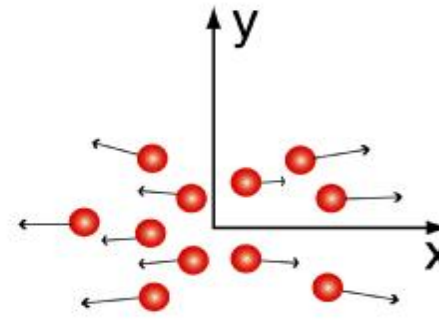
Origin: spatial anisotropy of the system when created, followed by multiple scattering of particles in the evolving system  
 spatial anisotropy → momentum anisotropy

$v_2$ : 2<sup>nd</sup> harmonic *Fourier coefficient* in azimuthal distribution of particles with respect to the reaction plane



Almond shape overlap region in coordinate space

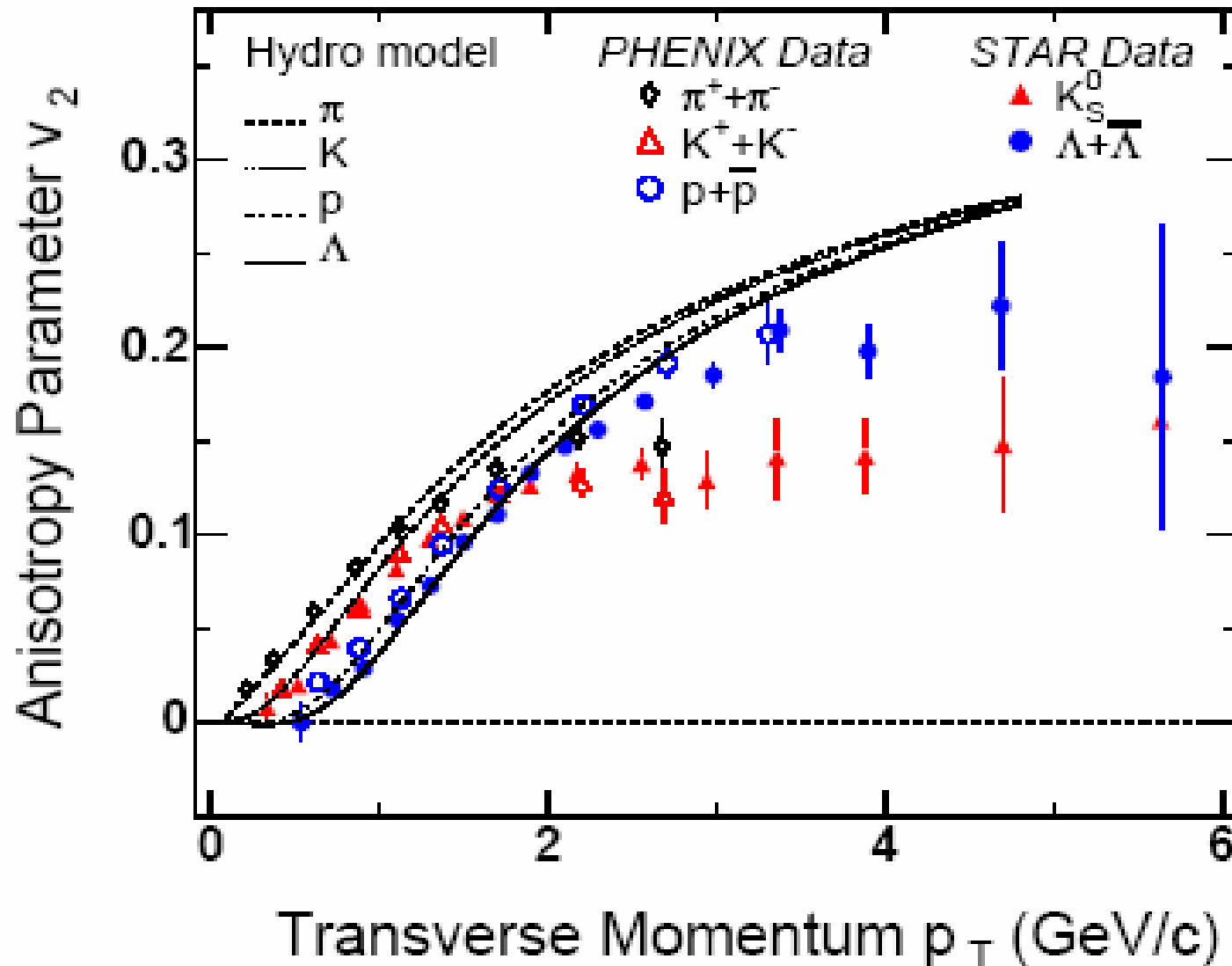
$$e = \frac{\langle y^2 - x^2 \rangle}{\langle y^2 + x^2 \rangle}$$



$$v_2 = \langle \cos 2f \rangle$$

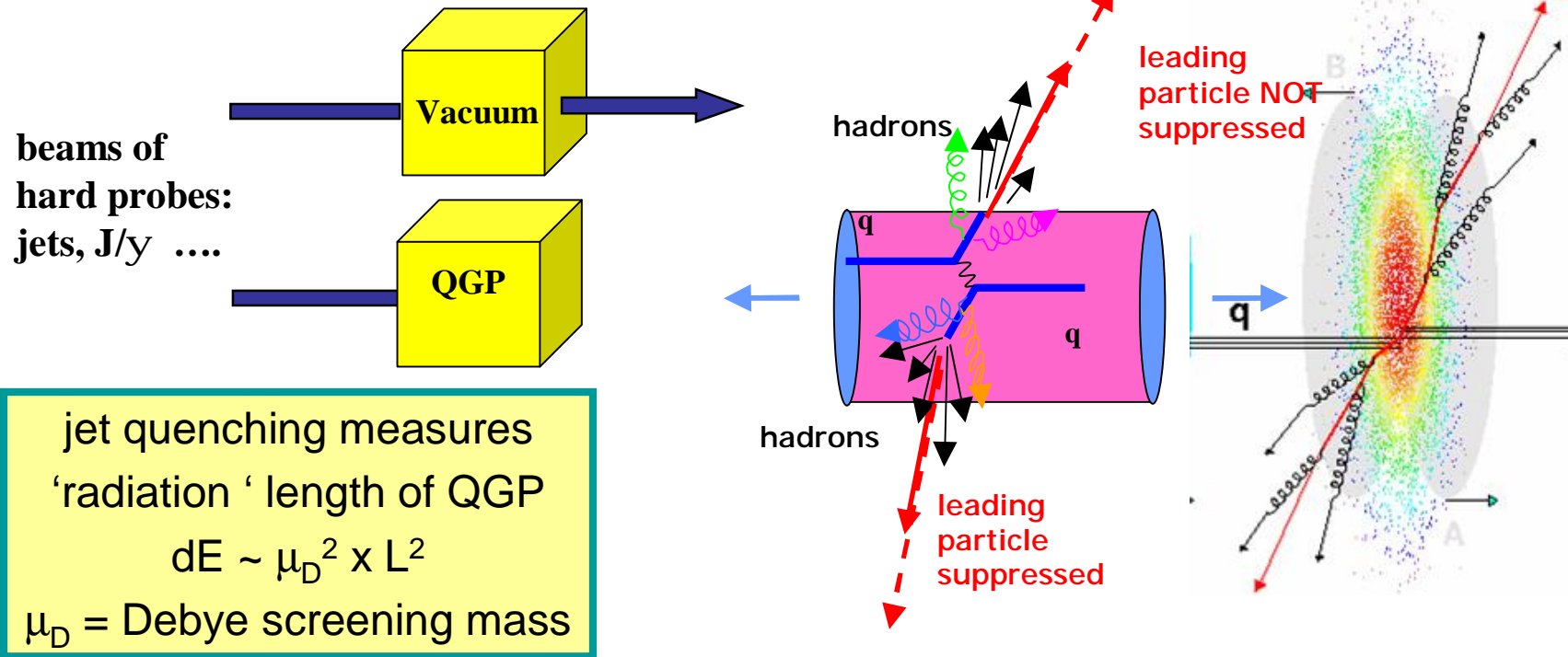
$$f = \text{atan} \frac{p_y}{p_x}$$

# Hydrodynamics of medium created at RHIC in early times after collision





# Jet Quenching



- high  $p_t$  partons:
  - Vacuum: fragment into hadrons => **JETS**
  - Matter: additional scattering => more gluon radiation
    - normal 'cold' matter: small effect
    - QGP: strong effect (up to several 10 GeV)
  - observables of 'jet quenching'
    - leading parton loses energy
    - energy shows up in soft partons around jet axis

# Jet quenching from PHENIX

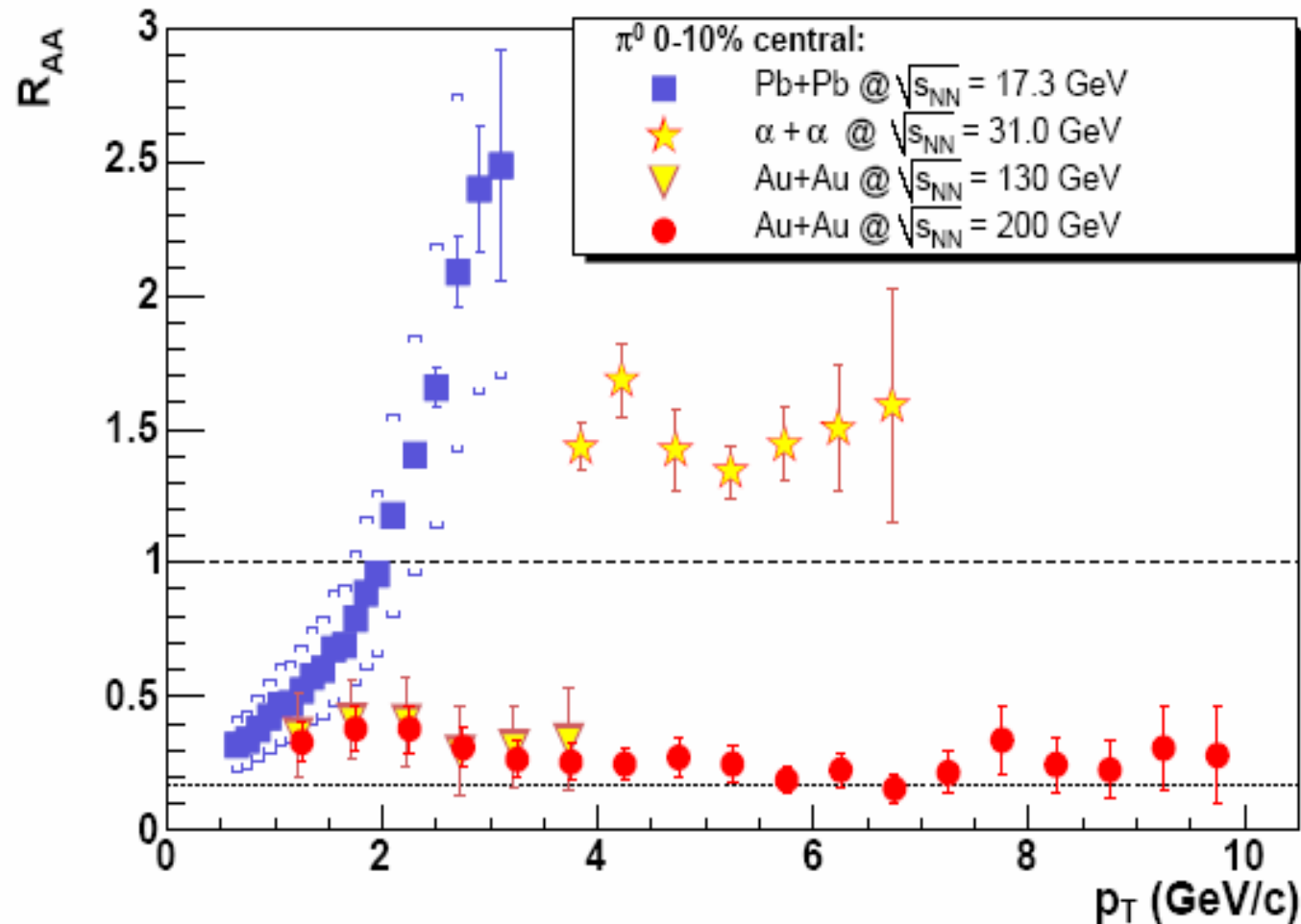


Figure 2. Nuclear modification factor,  $R_{AA}(p_T)$ , for  $\pi^0$  measured in central ion-ion reactions at CERN-SPS [15], CERN-ISR [14], and BNL-RHIC [17, 12] energies. The dashed (dotted) line is the expectation of “ $N_{coll}$  ( $N_{part}$ ) scaling” for “hard” (“soft”) particle production.

# dA control data choose FSI

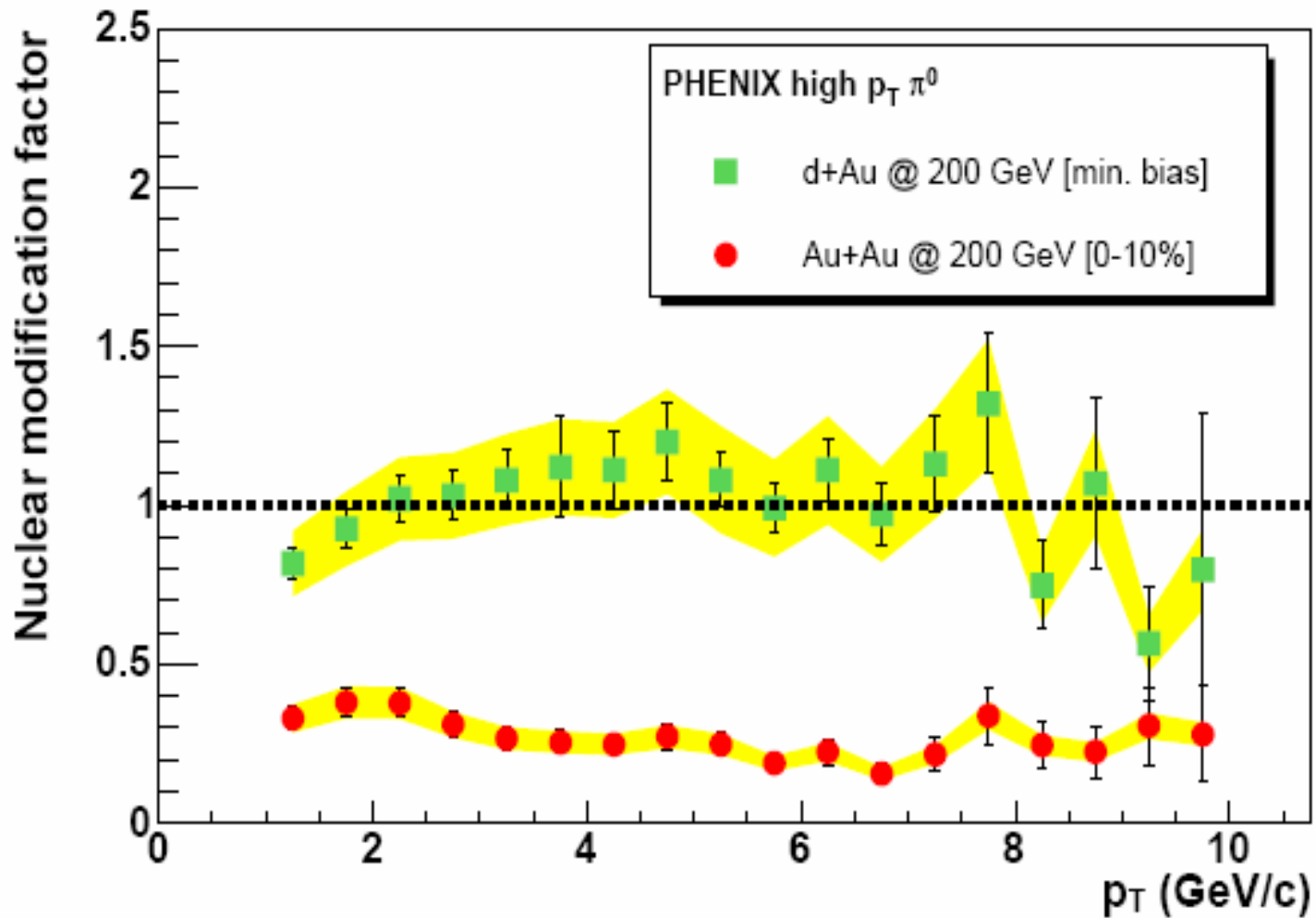


Figure 3. Nuclear modification factor,  $R_{AA}(p_T)$ , for  $\pi^0$  measured at  $y = 0$  in minimum bias d+Au (squares) [25] and central Au+Au (circles) [12] reactions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV.

# Conclusions from the comparison to the data

1. Large initial gluon density  $\frac{dN_g}{dy} \approx 1000$
2. Large parton energy losses – 12-15 GeV/fm\*\*3
3. High initial temperature - 400 MeV
4. Energy density decrease from 20 to 6 GeV/fm\*\*3  
during the time period from 0.2 to 1 fm/c

# J/ $\Psi$ in PHENIX

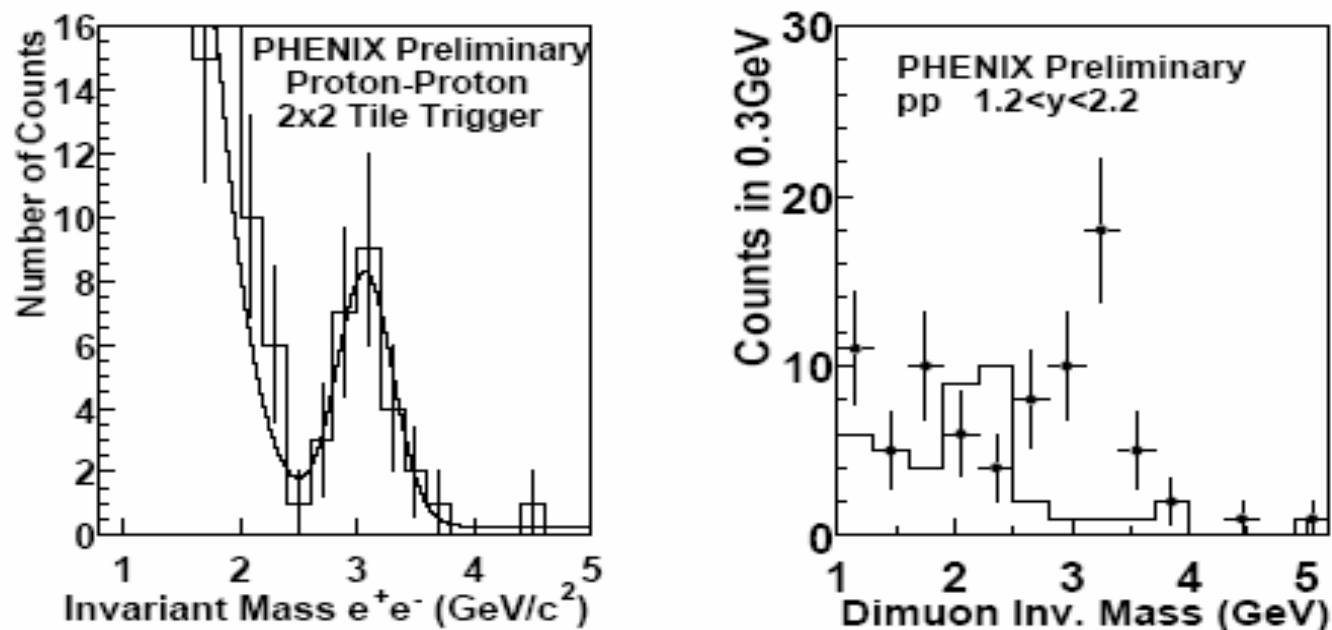


Figure 12. PHENIX:<sup>29</sup> (left)  $p+p \rightarrow e^+ + e^- + X$  invariant mass spectrum for  $|y| \leq 0.35$ ; (right)  $p + p \rightarrow \mu^+ + \mu^- + X$  invariant mass spectrum for  $1.2 < y < 2.2$ .

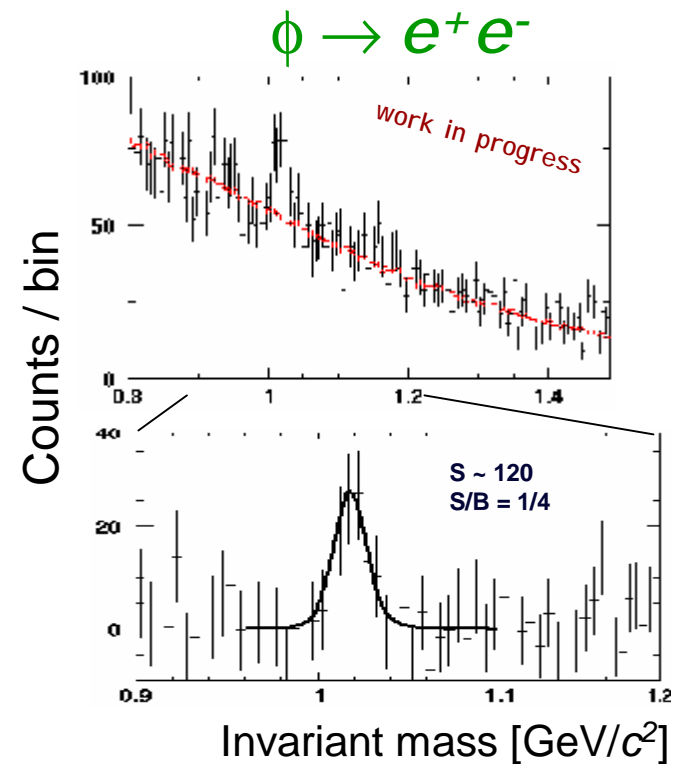
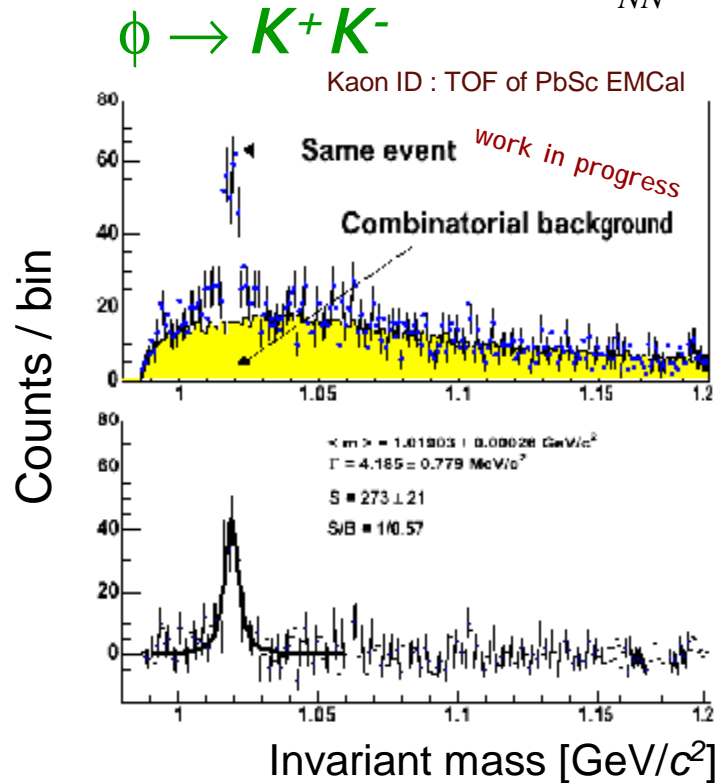


# $\Phi$ measurement at PHENIX

- Both  $K^+K^-$  and  $e^+e^-$  channel are available
  - $K^\pm$  : mass square from Time-of-Flight from TOF detector and EMCal
  - $e^\pm$  : RICH and EMCal

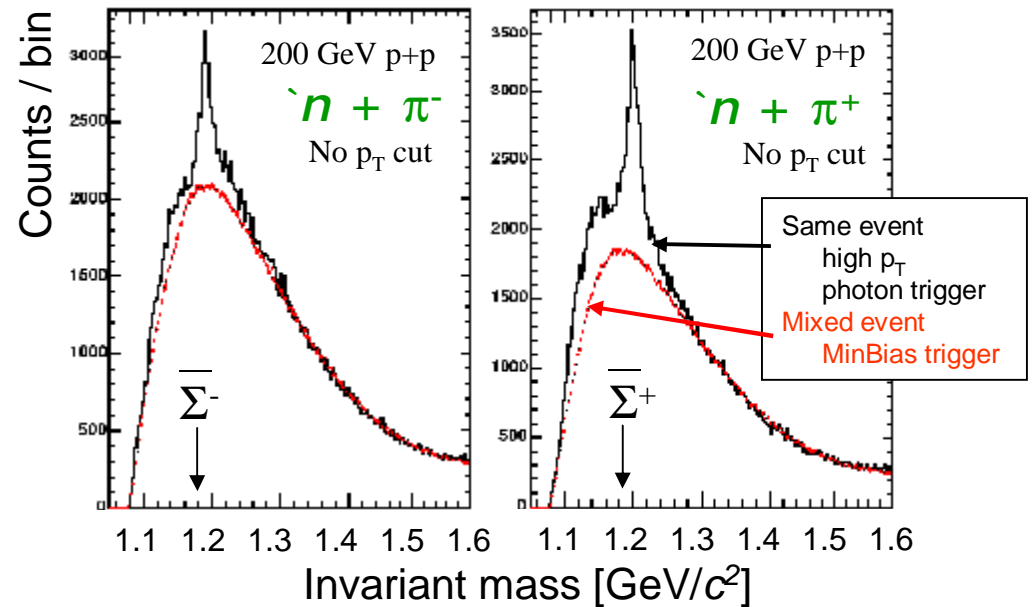
No in-medium modification found so far

Run3  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV d+Au



# Reliability of Anti- $n$ Candidate

- Anti- $n$  momentum resolution checked
  - Applying the reconstruction method to anti-proton
  - Comparison of momentum from TOF and tracking
    - Resolution < 4%, 10%, 15% in  $p_T < 1.0, 1.5, 2.0$  GeV/c, respectively
    - Momentum shift < ~5%

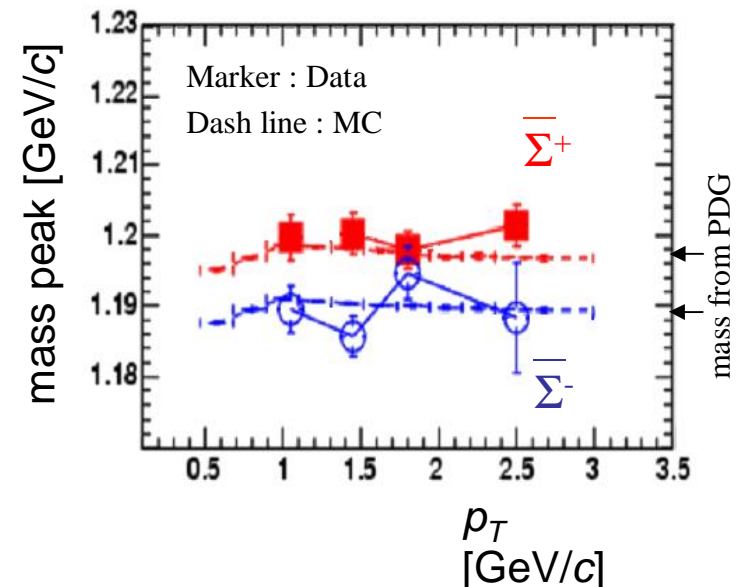


## – Invariant mass peak of $\bar{\Sigma}^\pm$

$\bar{\Sigma}^-(1189.4) \rightarrow \bar{n} + \pi^-$  : R.R. 99.85%,  $c\tau_{\bar{\Sigma}^-} = 2.396\text{cm}$

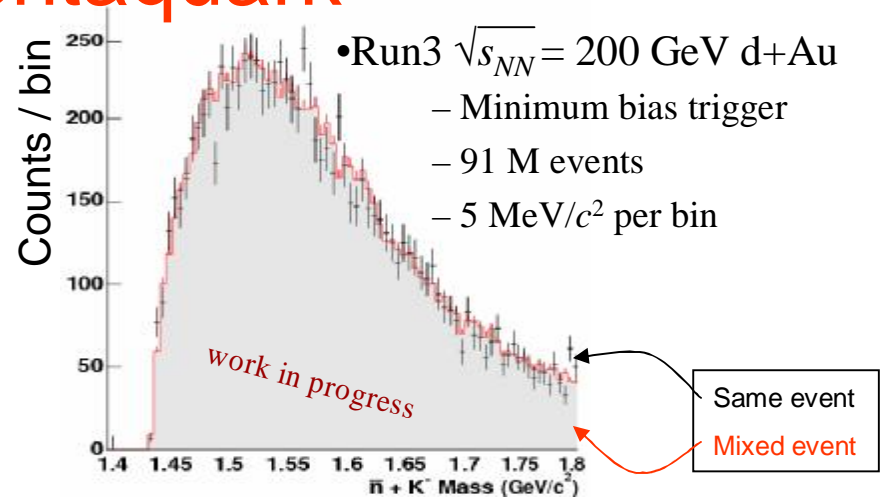
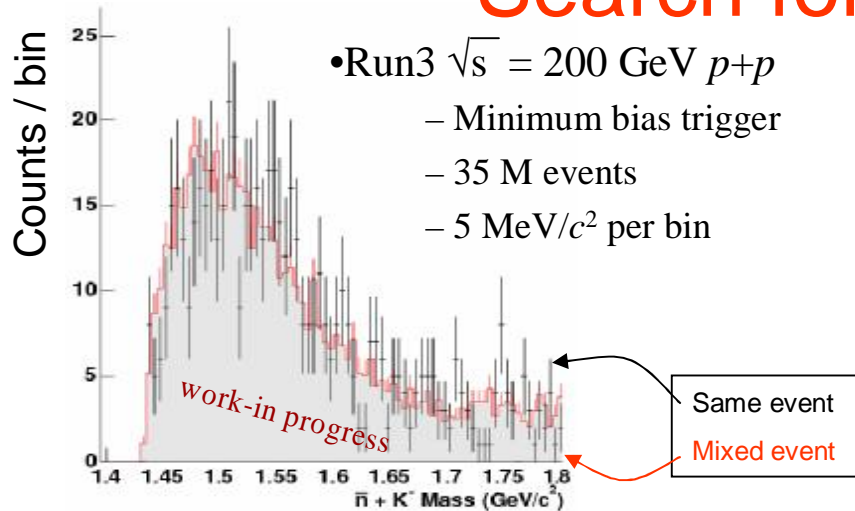
$\bar{\Sigma}^+(1197.4) \rightarrow \bar{n} + \pi^+$  : B.R. 48.31%,  $c\tau_{\bar{\Sigma}^+} = 4.434\text{cm}$

- Mass shift due to no TOF calibration for  $\bar{n}$  in EMCal is < ~5%
- Quick check by Monte-Carlo shows agreement with data



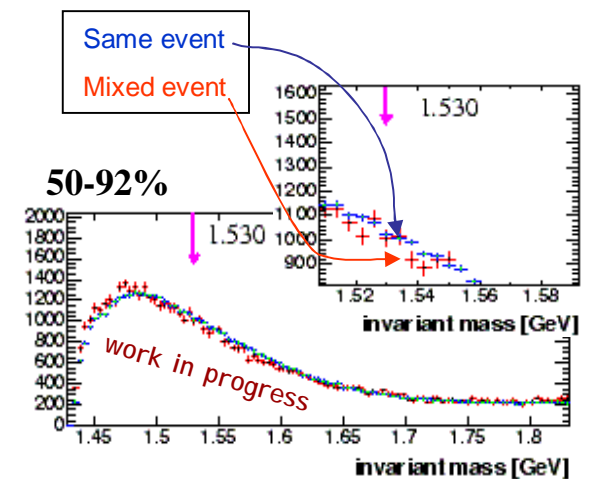
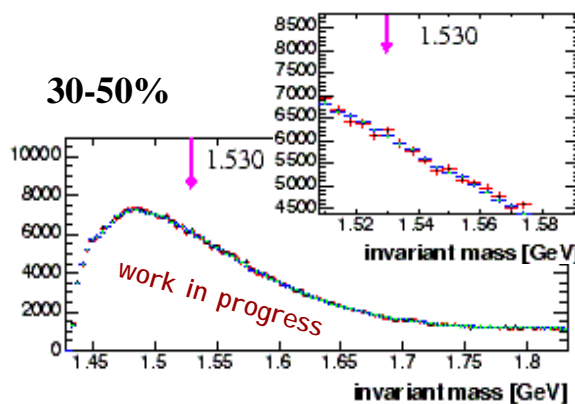
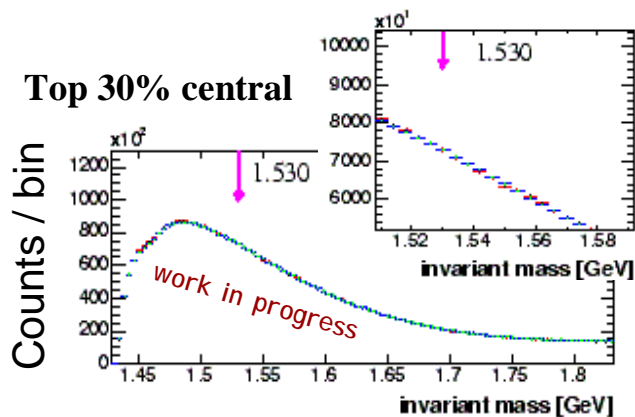
# $K^+ + \bar{n}$ in $p+p$ , $d+Au$ , $Au+Au$

## Search for pentaquark



**No significant signal seen**

- Run2  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV  $Au+Au$
- Minimum bias trigger
  - 36M events
  - 4 MeV/ $c^2$  per bin



# ПИЯФ в эксперименте ФЕНИКС

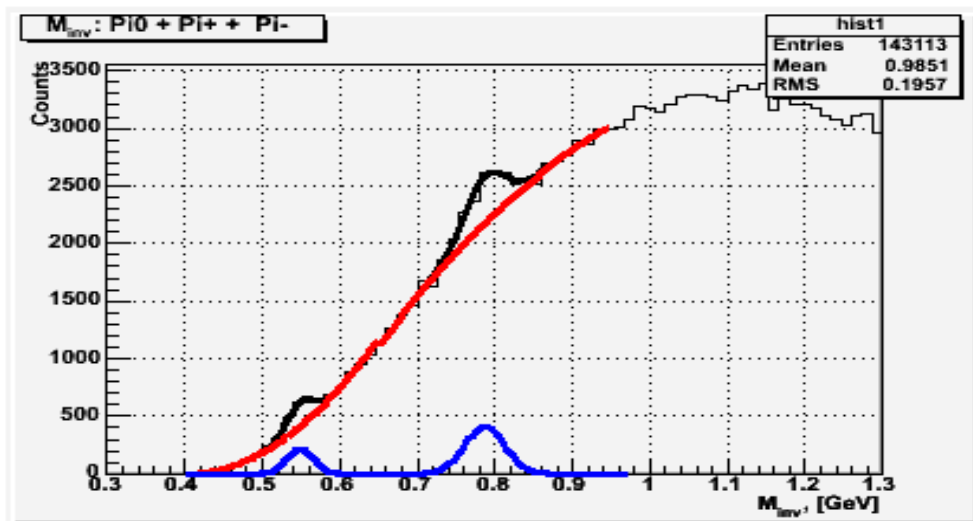
- Модернизация управления и контроля работы дрейфовой камеры:
  - ∅ Создание и сопровождение системы автоматического управления высоким напряжением (2 x 368 каналов): подъем/спуск напряжений < 2 минут, автоматическое восстановление трипов
  - ∅ Разработка, создание, запуск и сопровождение вспомогательной камеры малого размера для мониторинга свойств газовой среды детектора
  - ∅ Разработка и использование алгоритмов калибровки детектора, обеспечение максимально достижимого импульсного разрешения (**результаты будут видны при обработке J/Ψ**)
  - ∅ Разработка и сопровождение автоматической системы контроля качества данных поступающих с детектора
- Участие в эксперименте:
  - ∅ Смены
  - ∅ Плановые ремонты и обслуживание
- Участие в обработке экспериментальных данных:
  - ∅ Отбор данных “высокого” качества. Q/A физических данных (положение пиков p/K/π на шкале масс, alignment и т.д.)
  - ∅ Изучение распадов легких мезонов в адронные каналы ( $\pi^+ \pi^- \pi^0$ ,  $\pi^0 \gamma$  and  $\pi^0 \pi^0$ )

# Анализ экспериментальных данных

## Изучение распадов легких мезонов в адронные каналы

- $\eta$  - мезон:  $m = 547.3$  МэВ  
 $\eta \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$  BR = 23.1 %
- $\omega$  - мезон:  $m = 781.9$  МэВ  
 $\omega \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$  BR = 88.8 %  
 $\omega \rightarrow \pi^0 \gamma$  BR = 8.5 %
- $K_s^0$  - мезон:  $m = 497.7$  МэВ  
 $K_s^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0$  BR = 31.4 %
- $\phi$  - мезон:  $m = 1019.4$  МэВ  
 $\phi \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0 + \rho \pi$  BR = 15.5 %  
 $\phi \rightarrow \pi^0 \gamma$  BR = 0.13 %

# Спектр инвариантной массы $p^0 p^+ p^-$ в $pp$ взаимодействиях



$P_t > 4 \text{ ГэВ/с}$

$\eta$  - мезон:

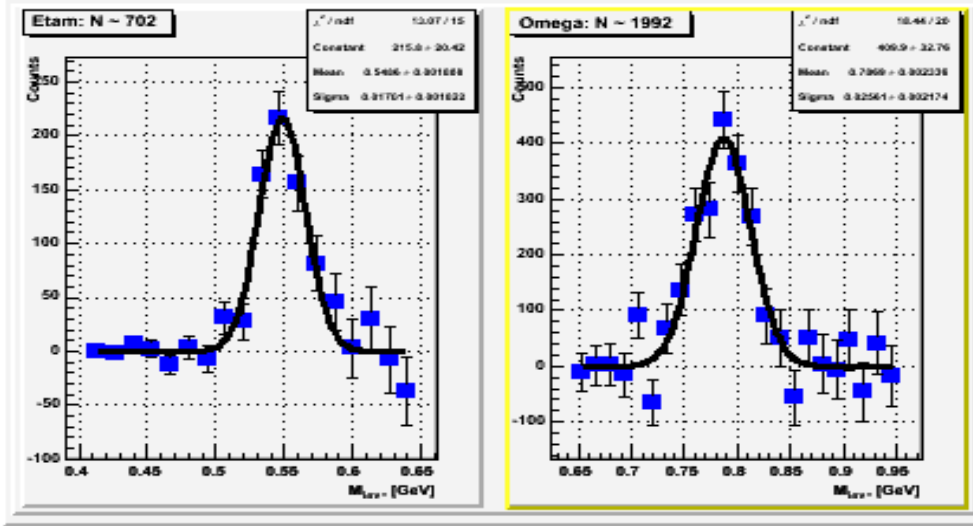
$$m = 0.5486 \pm 0.0018 \text{ ГэВ}$$

$$\sigma = 0.0170 \pm 0.0018 \text{ ГэВ}$$

$\omega$  - мезон:

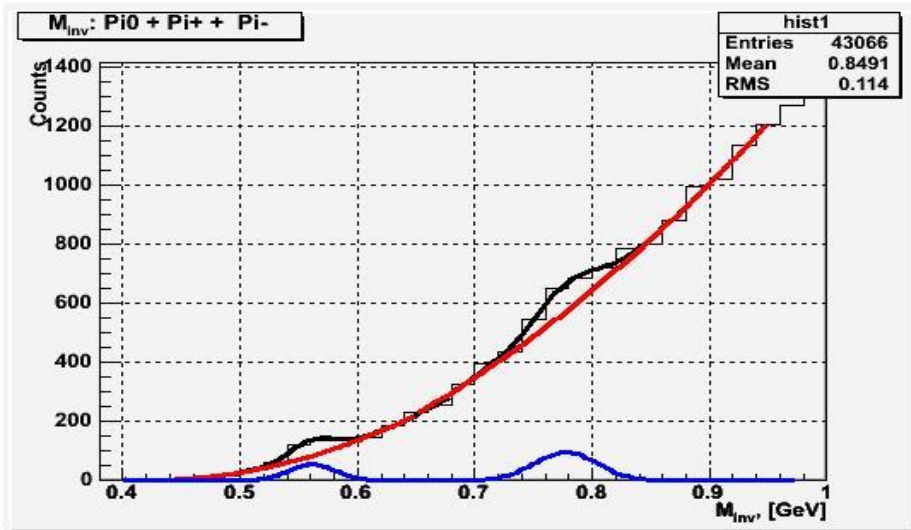
$$m = 0.7869 \pm 0.0023 \text{ ГэВ}$$

$$\sigma = 0.0256 \pm 0.0022 \text{ ГэВ}$$





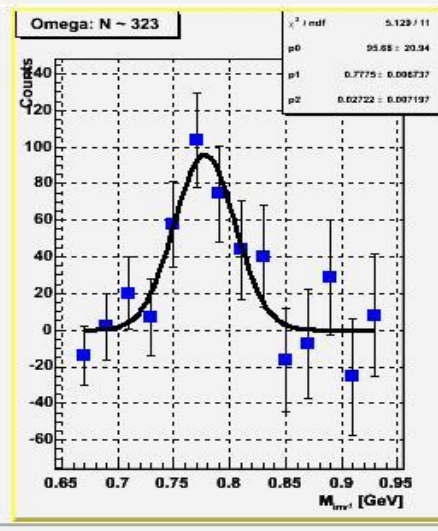
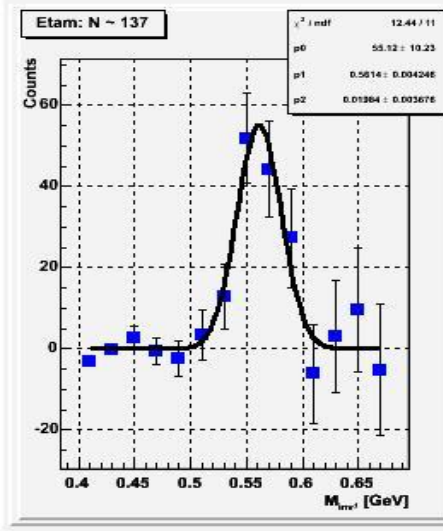
# Спектр инвариантной массы $p^0 p^+ p^-$ в $dAu$ взаимодействиях



$P_t > 6$  ГэВ/с,

$P_t(\pi^0) > 1$  ГэВ/с

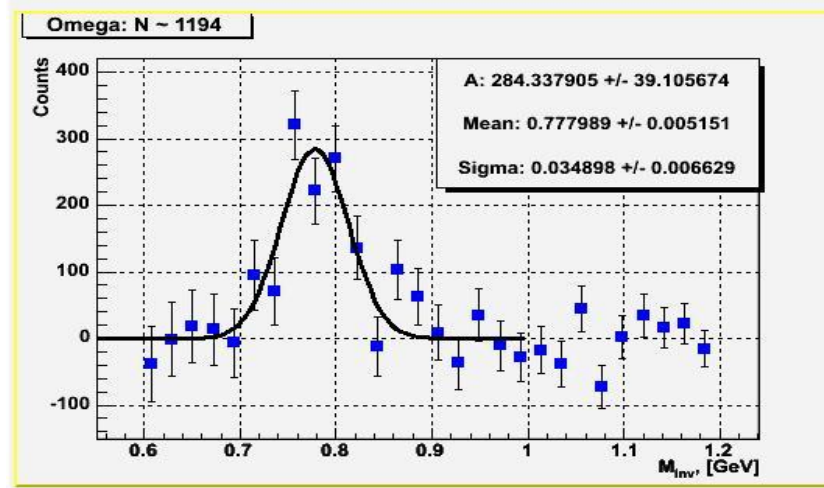
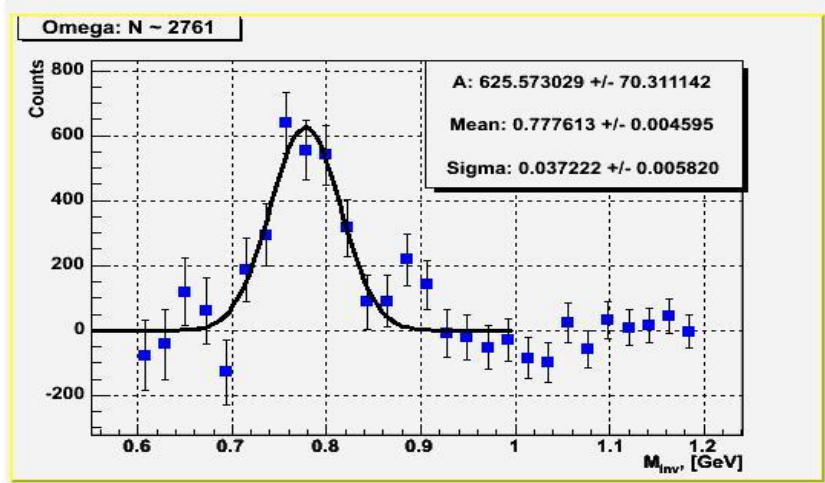
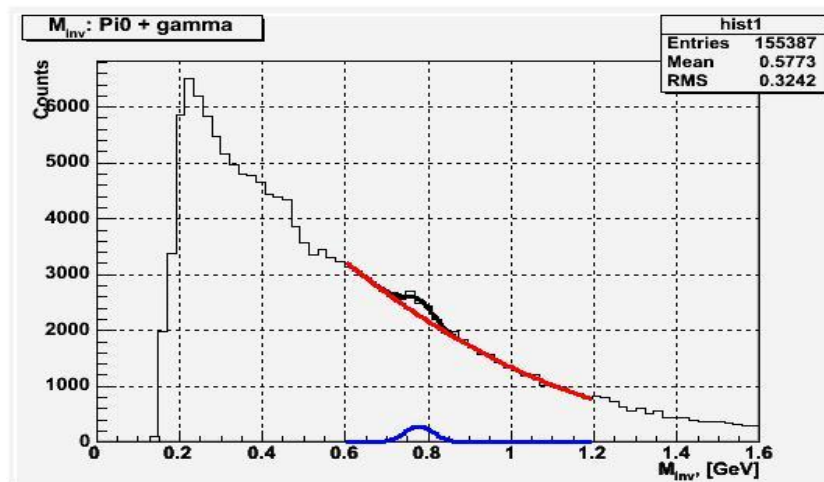
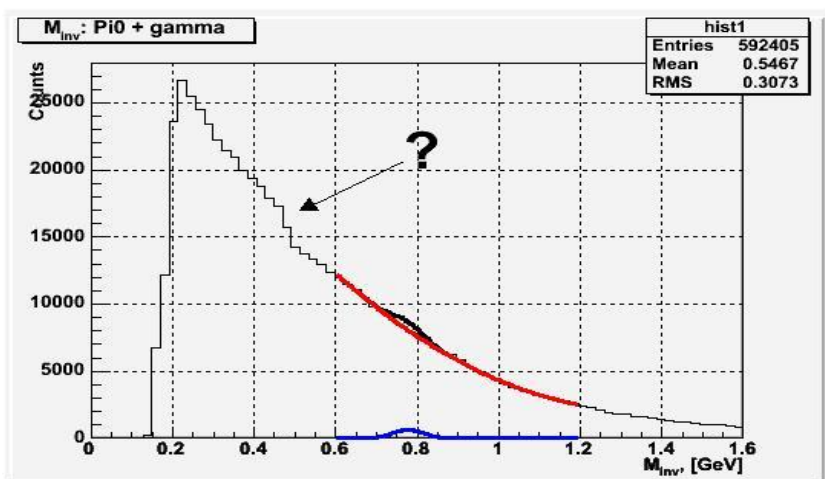
- $\eta$  - мезон:  
 $m = 0.5614 \pm 0.0042$  ГэВ  
 $\sigma = 0.0198 \pm 0.0038$  ГэВ
- $\omega$  - мезон:  
 $m = 0.7776 \pm 0.0067$  ГэВ  
 $\sigma = 0.0272 \pm 0.0072$  ГэВ



# Спектр инвариантной массы $\gamma\pi^0$ в $pp$ взаимодействиях

$P_t > 3$  ГэВ/с,  $E_\gamma > 0.5$  ГэВ/с

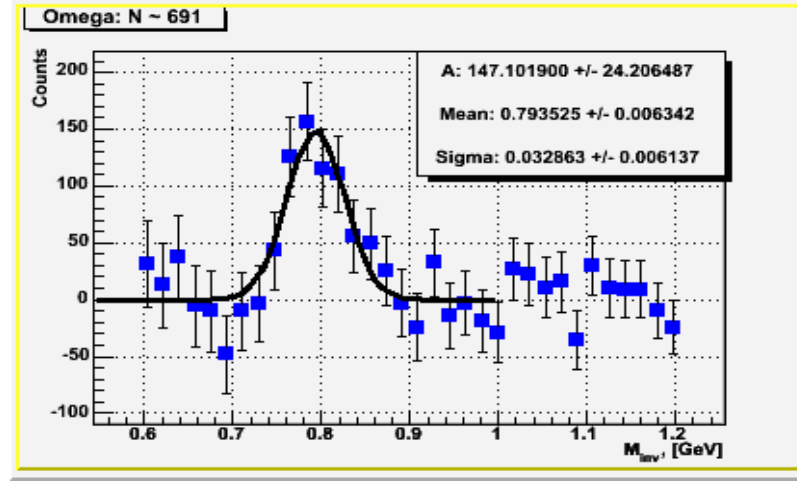
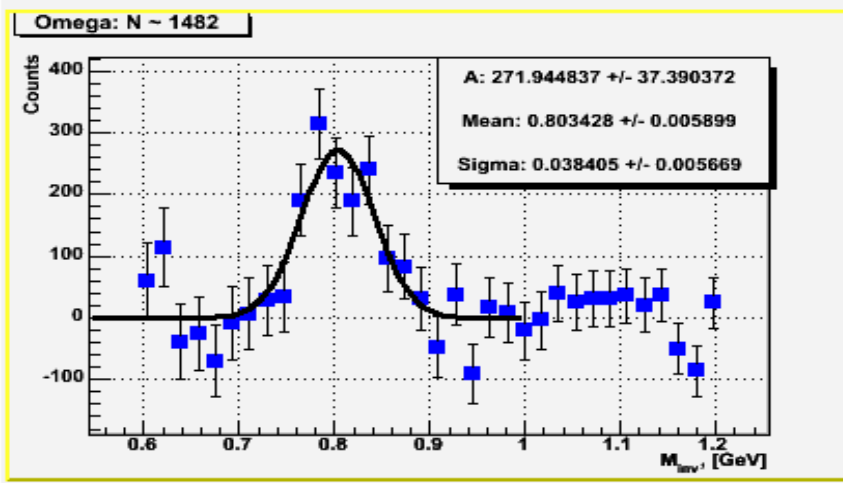
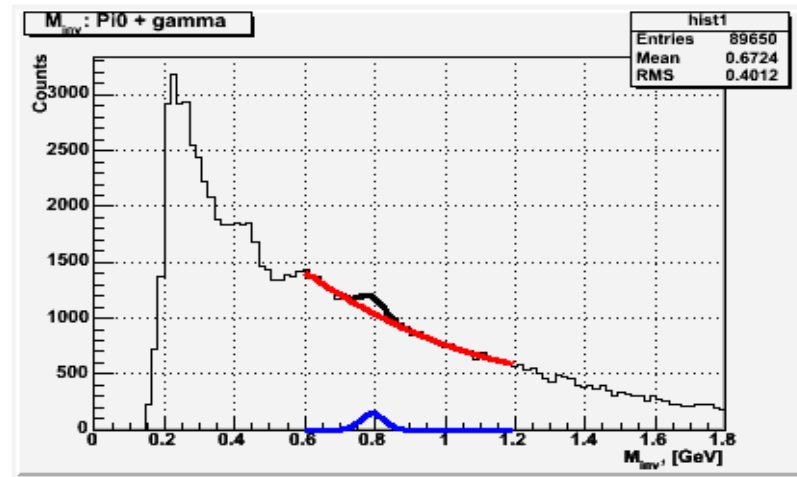
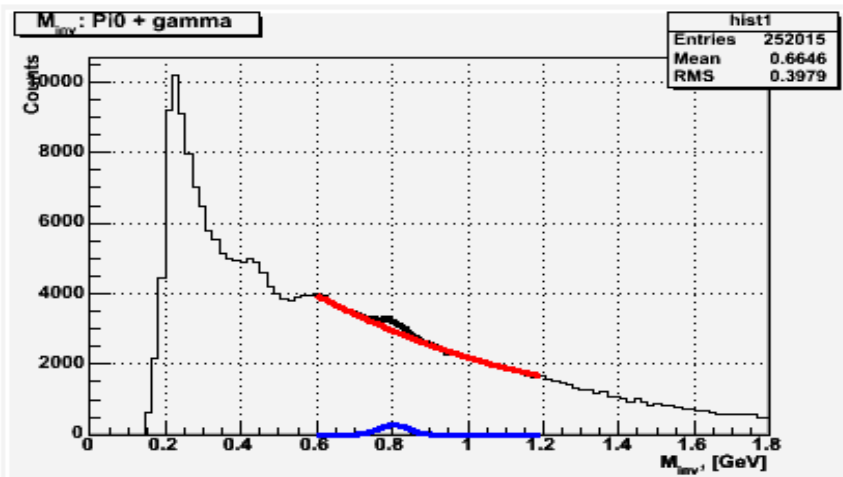
$P_t > 4$  ГэВ/с,  $E_\gamma > 0.5$  ГэВ/с



# Спектр инвариантной массы $\gamma\pi^0$ в dAu взаимодействиях

$P_t > 4$  ГэВ/с,  $E_\gamma > 0.8$  ГэВ/с

$P_t > 5$  ГэВ/с,  $E_\gamma > 0.8$  ГэВ/с



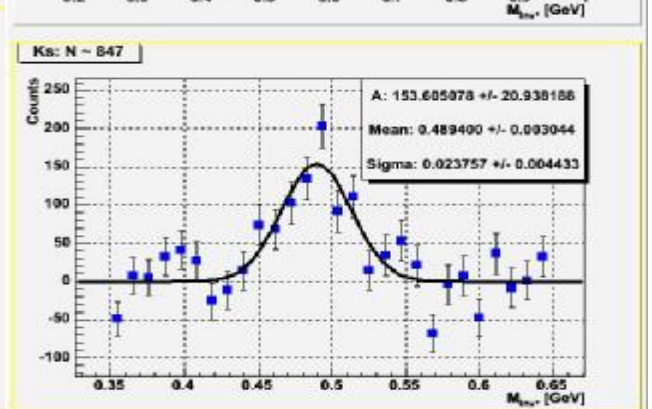
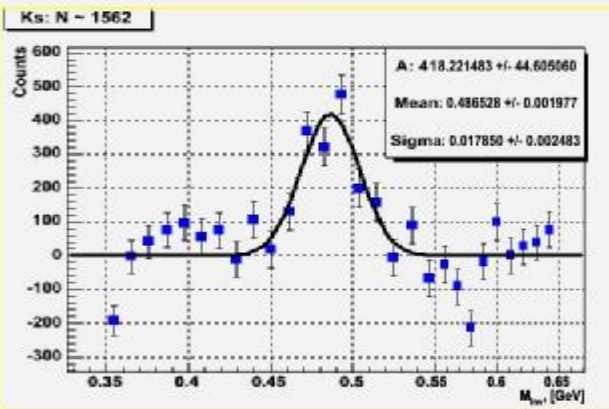
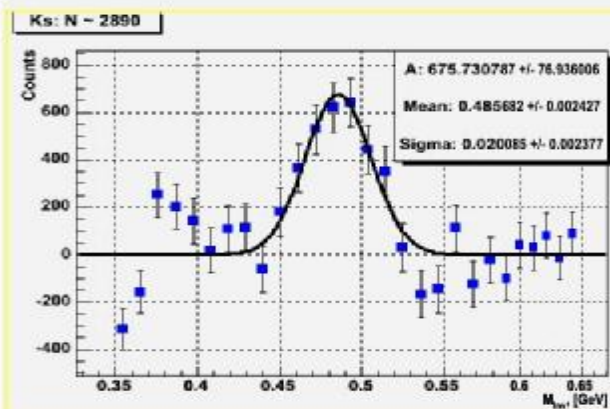
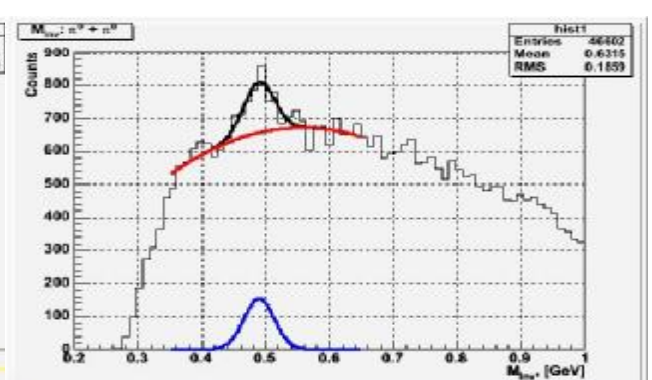
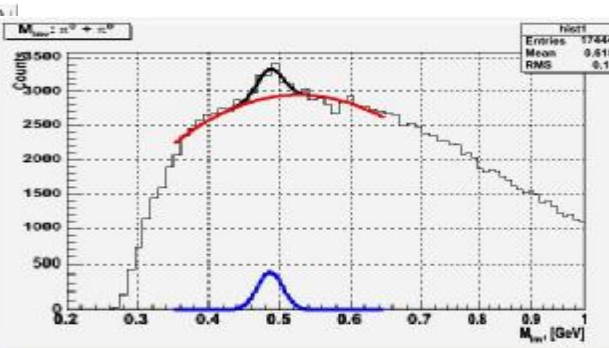
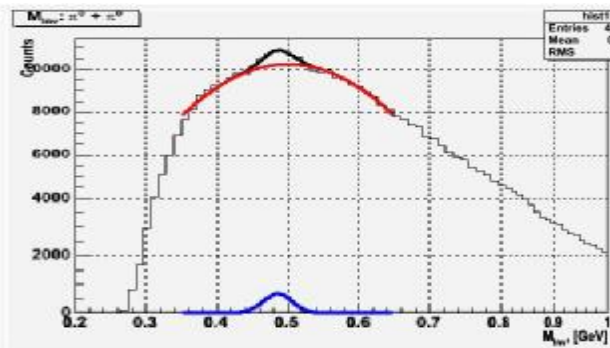
# Спектр инвариантной массы $\pi^0\pi^0$ в $pp$ взаимодействиях

$E_\gamma > 0.1$  ГэВ;  $\text{fabs}(m_{\pi^0} - 0.135) < 0.025$  ГэВ

$2 \text{ ГэВ}/c < Pt < 3 \text{ ГэВ}/c$

$3 \text{ ГэВ}/c < Pt < 4 \text{ ГэВ}/c$

$4 \text{ ГэВ}/c < Pt < 5 \text{ ГэВ}/c$





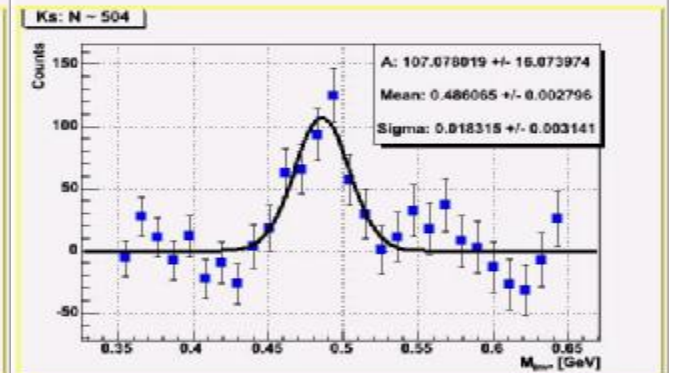
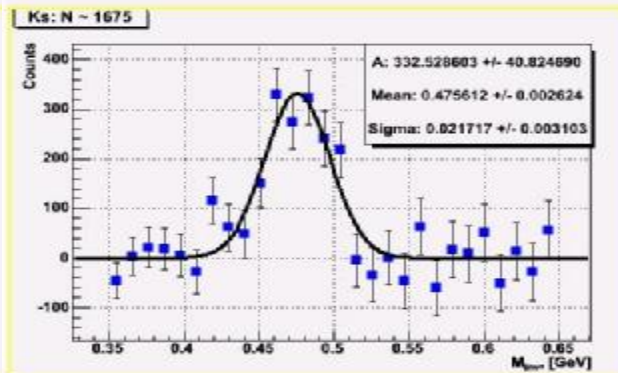
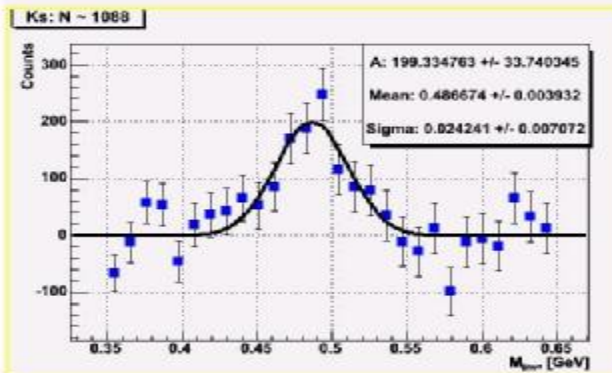
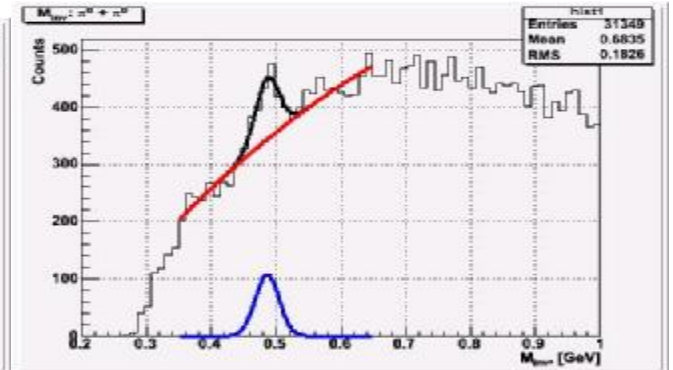
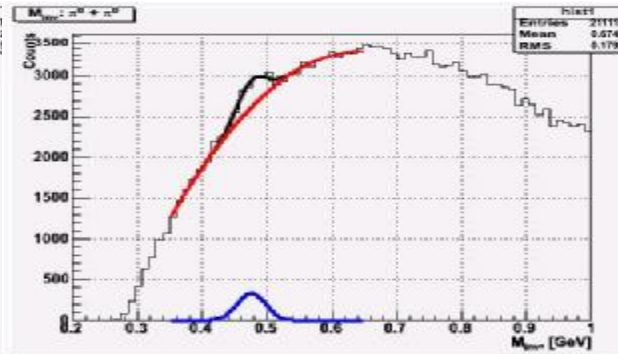
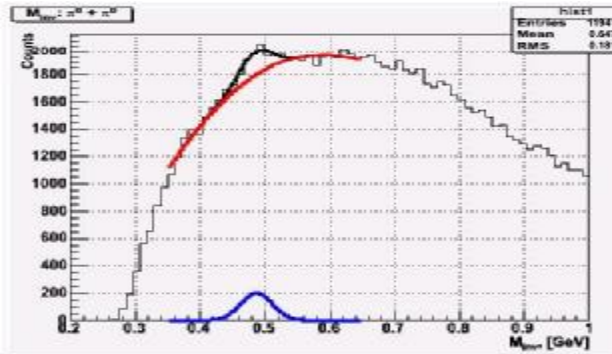
# Спектр инвариантной массы $\pi^0\pi^0$ в dAu взаимодействиях

$E_\gamma > 0.1$  ГэВ;  $\text{fabs}(m_{\pi^0} - 0.135) < 0.025$  ГэВ

$2 \text{ ГэВ}/c < Pt < 3 \text{ ГэВ}/c$

$3 \text{ ГэВ}/c < Pt < 4 \text{ ГэВ}/c$

$4 \text{ ГэВ}/c < Pt < 5 \text{ ГэВ}/c$



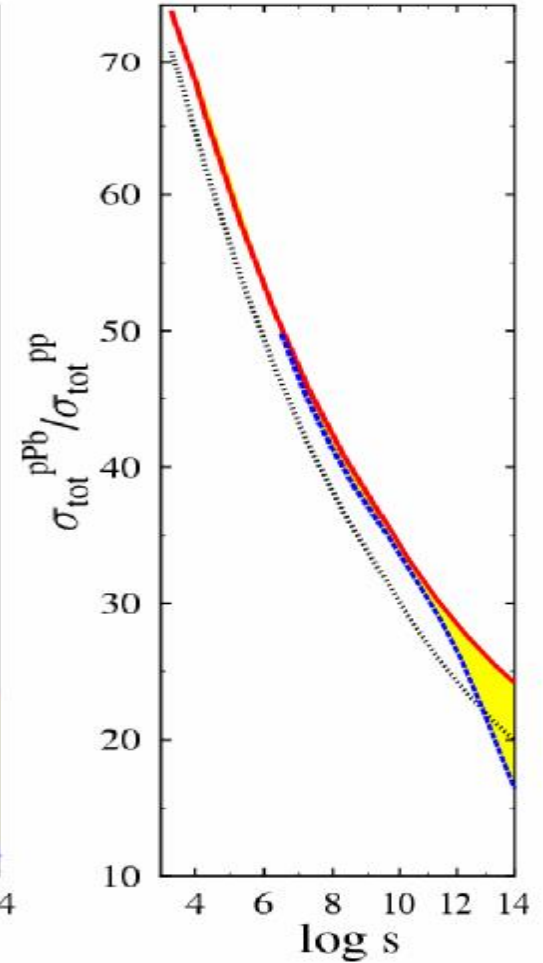
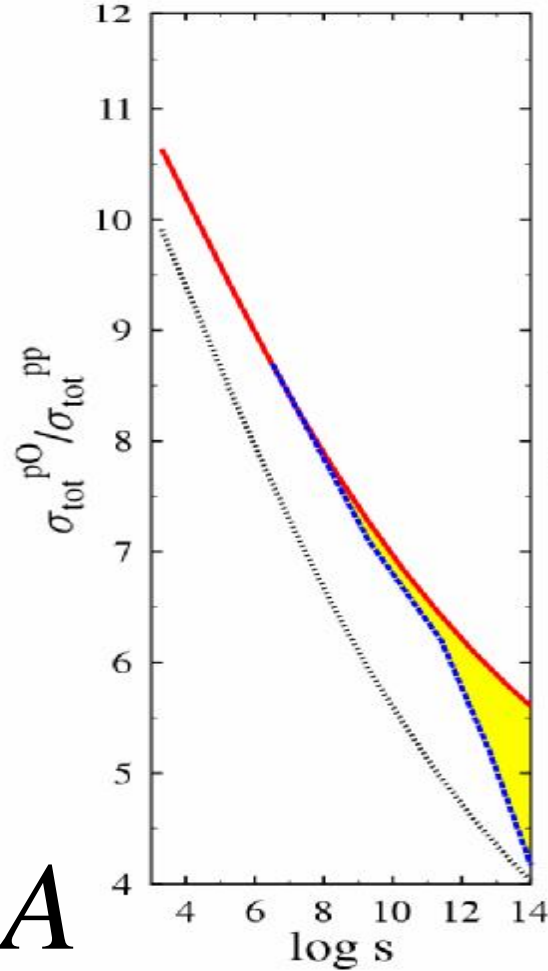
Universality of cross sections due to rising strength and radius of hard interactions – black limit(theoretical results)

$$\frac{S_{pp}^{tot}(s \rightarrow \infty)}{4pB_{pp}(s \rightarrow \infty)} \Rightarrow 2$$

$$\frac{S_{hA}^{tot}(s \rightarrow \infty)}{S_{hp}^{tot}(s \rightarrow \infty)} \Rightarrow 1$$

Number of wounded nucleons

$$\bar{u} = \frac{A S_{pp}^{in}}{S_{pA}^{in}} \Rightarrow A$$





Декабрь 2004, сессия ОФВЭ

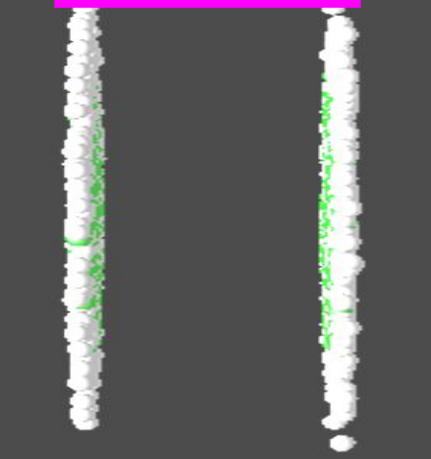
**ЛРЯФ**

**Спасибо за внимание**

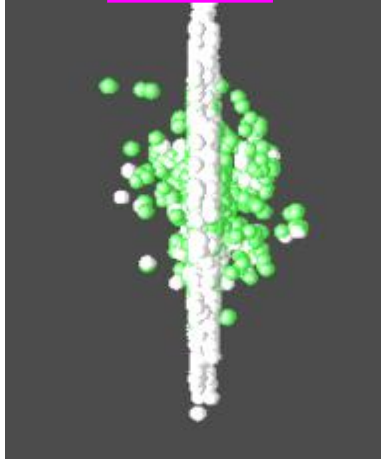
# Лучший результат 2004 года RHENIX

**В совместном эксперименте RHENIX на коллайдере релятивистских ядер RHIC (США) в 2004 году обнаружены значительные эллиптические потоки вещества, возникающие в первые мгновения столкновения двух тяжелых ядер, а также сильное подавление выхода адронных струй с большими поперечными импульсами в центральных ядро-ядерных столкновениях. Экспериментальные результаты свидетельствуют о том, что в таких столкновениях формируется новый тип ядерной среды, термализирующейся за очень малое время (меньше 1 фм/с) и обладающей признаками характерными для кварк-глюонной материи. Из этих данных удастся получить оценки на характеристики этой среды - температуру ( $T \approx 400$  МэВ), плотности энергии в области столкновения (15- 20 ГэВ/фм<sup>2</sup>), а также величину энергетических потерь ( $\sim 15$  ГэВ/фм<sup>3</sup>) в такой среде для цветных партон. (ПИЯФ РАН, ИФВЭ, РИЦ КИ)**

$t = -3 \text{ fm/c}$

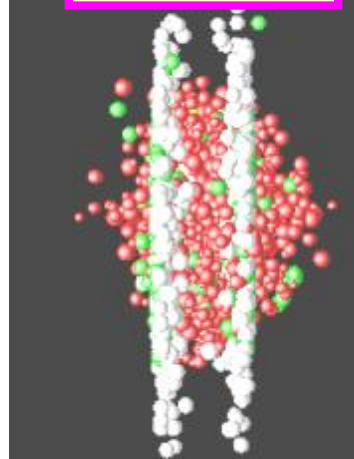


$t = 0$



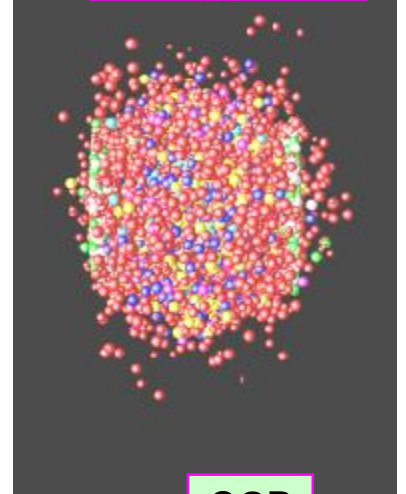
hard collisions

$t = 1 \text{ fm/c}$



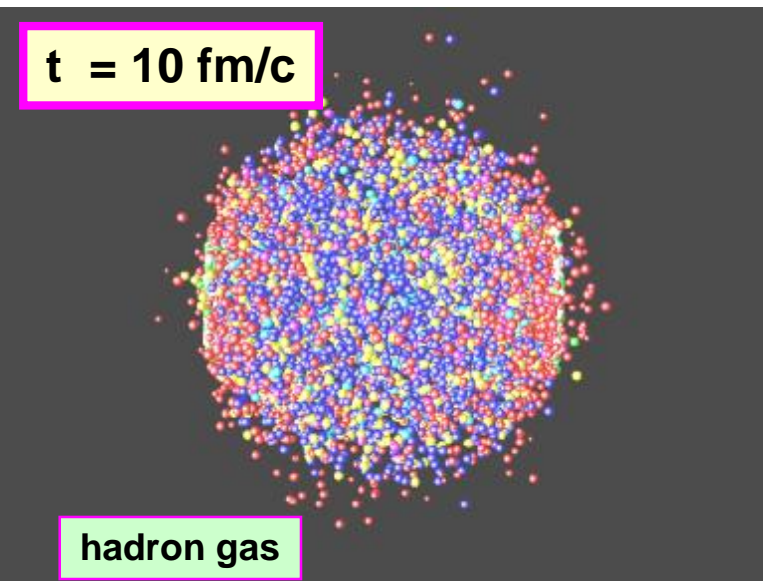
pre-equilibrium

$t = 5 \text{ fm/c}$



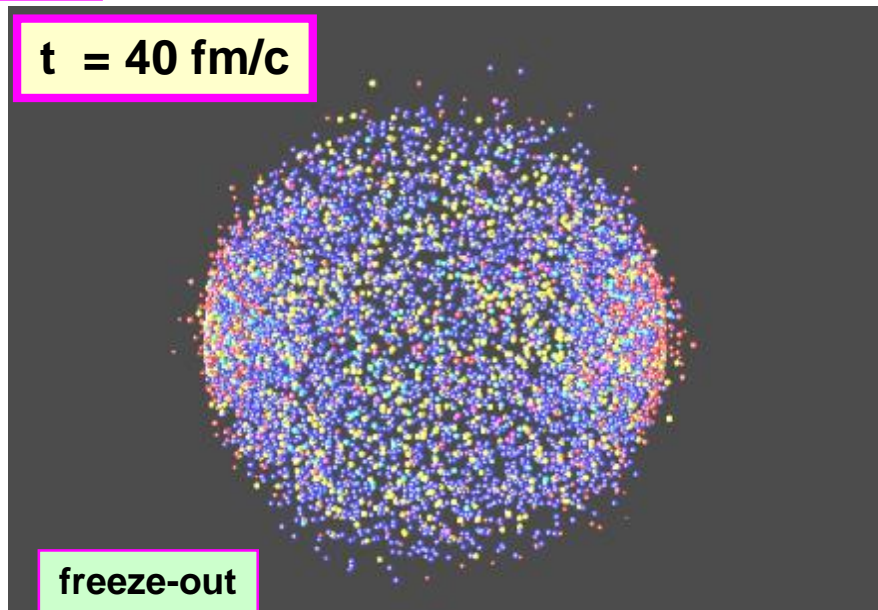
QGP

$t = 10 \text{ fm/c}$



hadron gas

$t = 40 \text{ fm/c}$



freeze-out