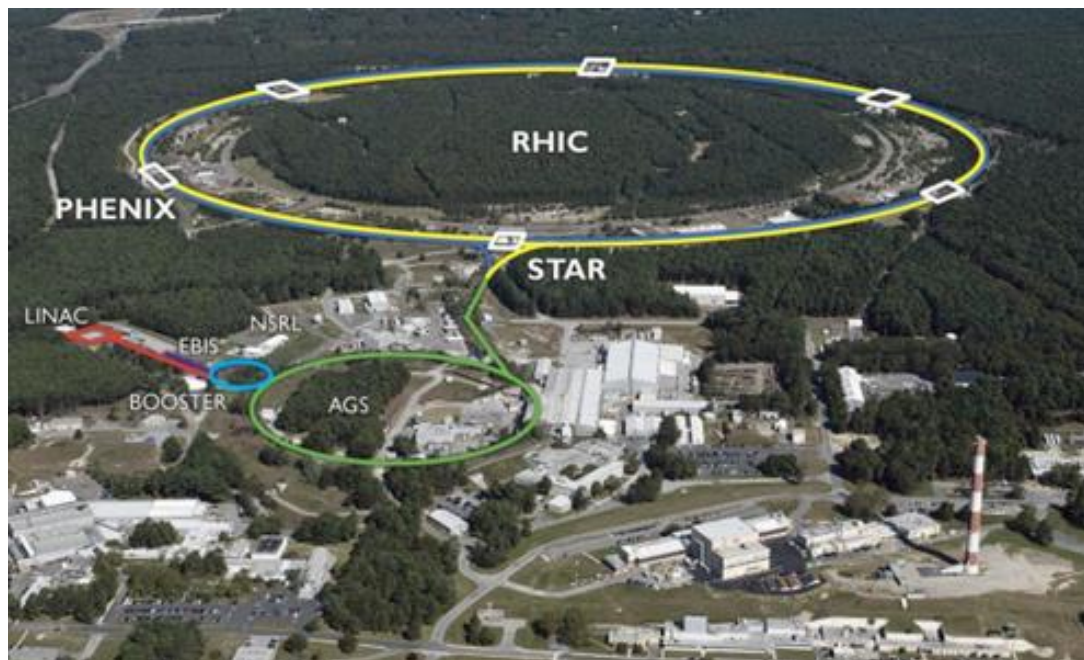


Измерение электронов и фотонов в Au+Au  
взаимодействиях при энергиях  $\sqrt{s_{NN}} = 39-200$  ГэВ  
в эксперименте ФЕНИКС

Котов Д.О. (ЛРЯФ ОФВЭ)



# Коллайдер RHIC



System	$\sqrt{s_{NN}}$ , GeV
p+p	22.4, 62.4, 200, 500, 510
p+Al	200
p+Au	200
d+Au	20, 39, 62, 200
He <sup>3</sup> +Au	200
Cu+Cu	22, 62, 200
Cu+Au	200
Au+Au	7, 15, 9, 19, 39, 62, 130, 200
U+U	193

❖ 2000–2017 год, обширная физическая программа:

- ✓ p+p, p+A, A+A при максимальной энергии  $\sqrt{s_{NN}}=200$  ГэВ (9 комбинаций);
- ✓ программа по сканированию энергии взаимодействия;
- ✓ единственный коллайдер пучков поляризованных протонов;

# Эксперимент PHENIX на коллайдере RHIC

## Основные подсистемы и их характеристики

### 1. Восстановление треков.

Дрейфовые камеры (DC):  $\delta p/p = 0.7\% + 1.1\% \cdot p$  (ГэВ/с)

Падовые камеры (PC):  $\sigma_z = 1.7$  мм,  $\sigma_\phi = 2.4$  мм

### 2. Измерение энергвыделения.

Калориметр (EMCal):  $\delta E/E \approx 4.5\% + 8.0\%/\sqrt{E}$  (ГэВ)

### 3. Идентификация заряженных адронов.

Времяпролётная система (TOF.east + TOF.west):

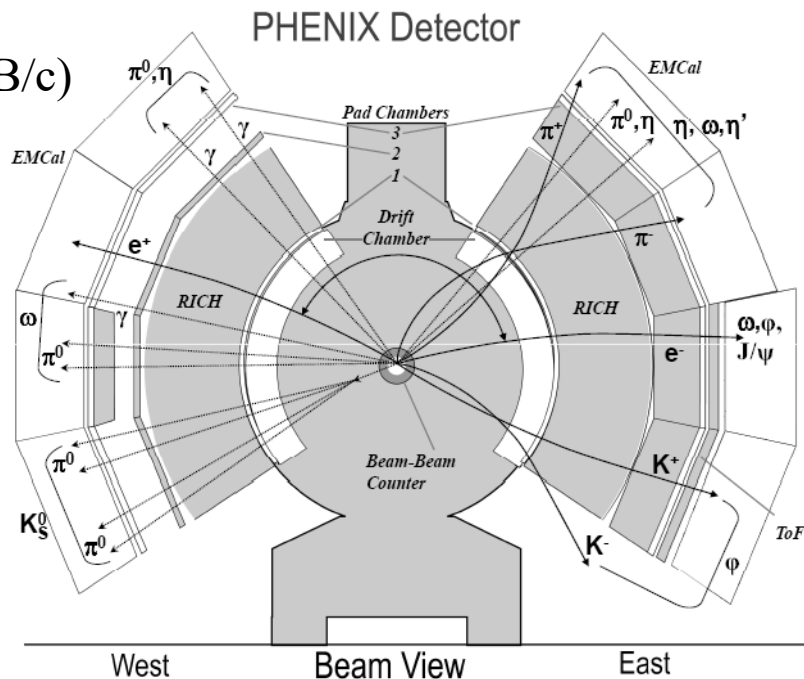
- $\sigma_\tau \sim 100$  псек, 1/3 одного плеча;
- разделение  $\pi/K$ :  $0.3 < p_T$  (ГэВ/с)  $< 2.2$ ;

Калориметр (EMCal):  $\sigma_\tau \sim 500$  псек

### 4. Идентификация электронов.

Черенковский детектор (RICH) и калориметр (EMCal)

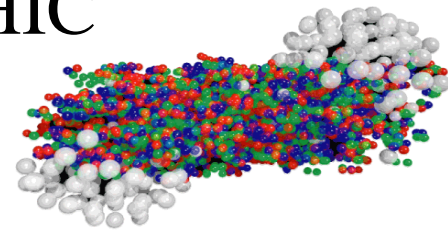
- |               |  |
|---------------|--|
| Система       | 1. Высокое быстродействие ( $> 5$ кГц)               |
| сбора данных: | 2. Триггеры LVL1 (ERT) и LVL2 (отбор редких событий) |



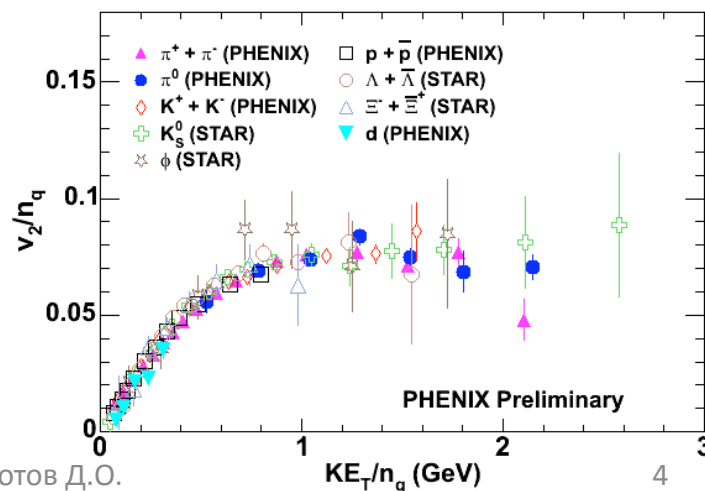
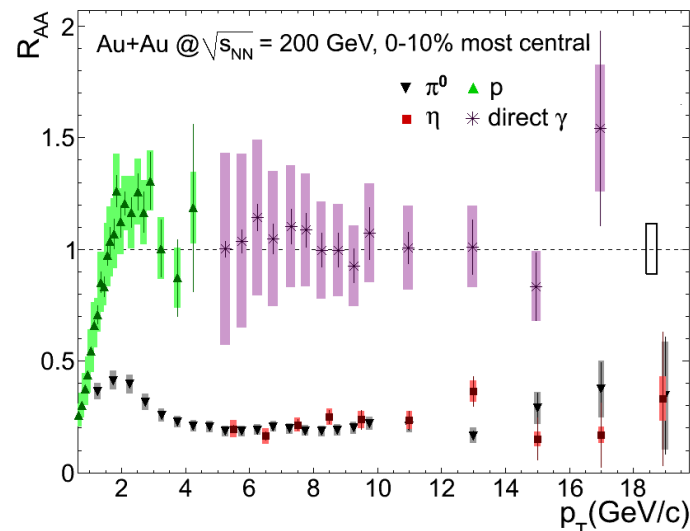
**Акseptанс:  $-0.35 < \eta < 0.35$ ,  $\Delta\phi - 2 \times 90^\circ$**

# Новое состояние вещества на RHIC

В 2005 году ряд наблюдений позволил всем коллаборациям на RHIC сделать заявление об обнаружении сильновзаимодействующей кварк-глюонной плазмы (КГП) – «идеальной жидкости» с партонными степенями свободы:



$$R_{AB}(p_T) = dN_{AB} / (\langle N_{coll} \rangle \times dN_{pp})$$



## 1. Эффект гашения струй:

- Выход  $\pi^0$ -мезонов подавлен пятикратно;
- Выход прямых фотонов не подавлен;

## 2. Эллиптические потоки:

- Универсальное скалирование коэффициента  $v_2$  на число кварков для идентифицированных адронов;

## 3. Измерения температуры среды:

- В центральных Au+Au столкновениях при  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ  $T > 150$  МэВ;

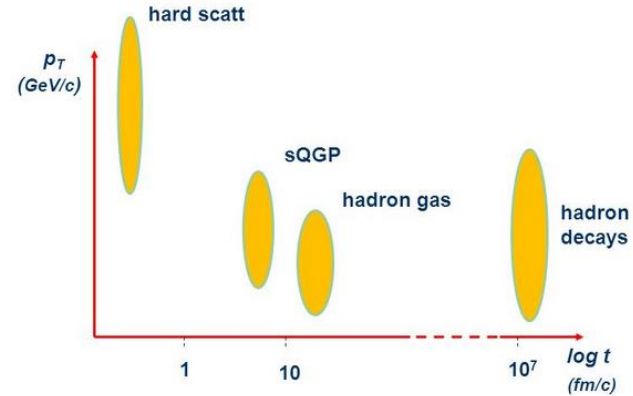
Измерения электронов и фотонов интересны т.к.:

- они рождаются на всех стадиях взаимодействия и несут информацию об эволюции образовавшейся среды.

# Прямые фотоны

# Прямые (direct) фотоны в d+Au и Au+Au

Прямыми фотонами называются фотоны, которые рождаются в результате любых процессов во время столкновения двух ядер, за исключением фотонов от распадов адронов.



## Методика измерения

1. Калориметр:

✓ Хорошее разрешение на больших  $p_T$ , большой вклад адронных распадов на малых  $p_T$  ;

2. Конверсия:

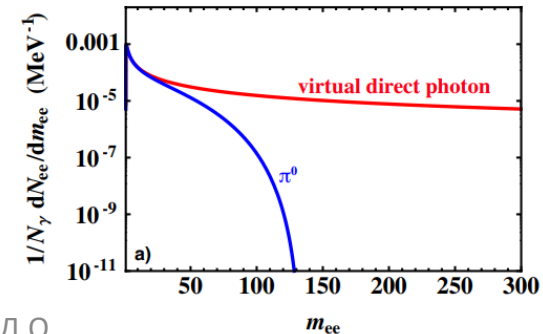
✓ Хорошее разрешение при малых  $p_T$ , малая статистика:

➡ Внешняя конверсия ( $\gamma \rightarrow e^+ + e^-$ );

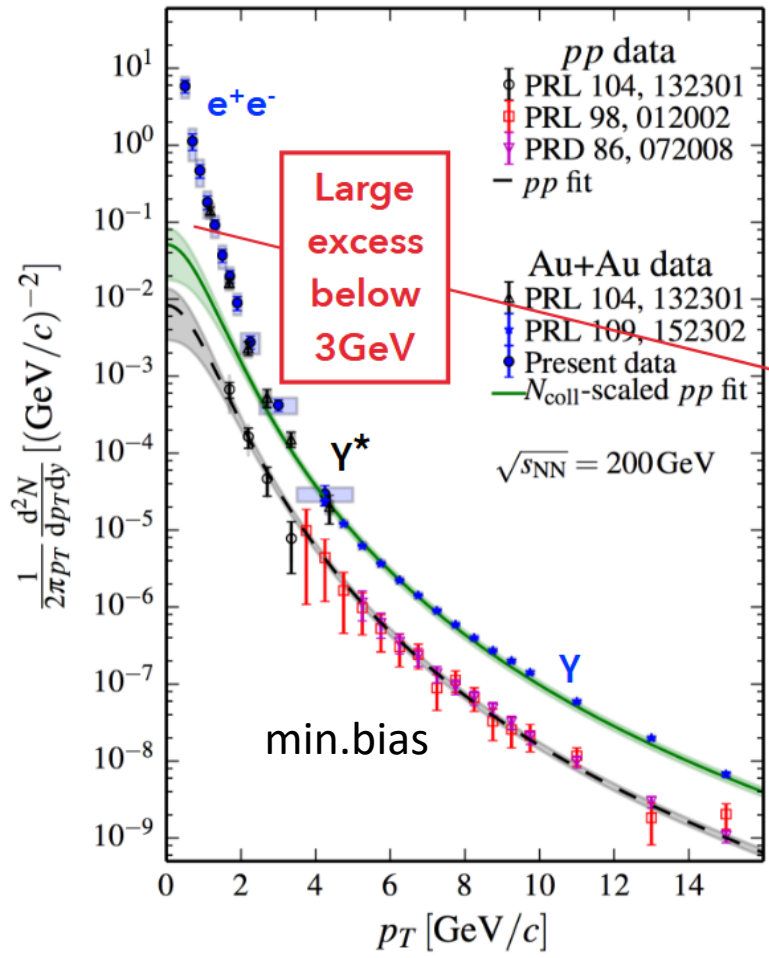
➡ Внутренняя конверсия ( $\gamma^* \rightarrow e^+ + e^-$ );

### Формула Kroll-Wada

$$\frac{1}{N_\gamma} \frac{dN_{ee}}{dm_{ee}} = \frac{2\alpha}{3\pi} \frac{1}{m_{ee}} \sqrt{1 - \frac{4m_e^2}{m_{ee}^2}} \left(1 + \frac{2m_e^2}{m_{ee}^2}\right) S$$



# Прямые фотоны в Au+Au при $\sqrt{s_{NN}} = 200\text{GeV}$



PRC 91, 064904 (2015)

p+r находится в согласии с pQCD



Au+Au в согласии с  $(p+r) * N_{\text{столкн}}$   
при  $p_T > 3-4 \text{ ГэВ/с}$



**Избыточный выход прямых фотонов**

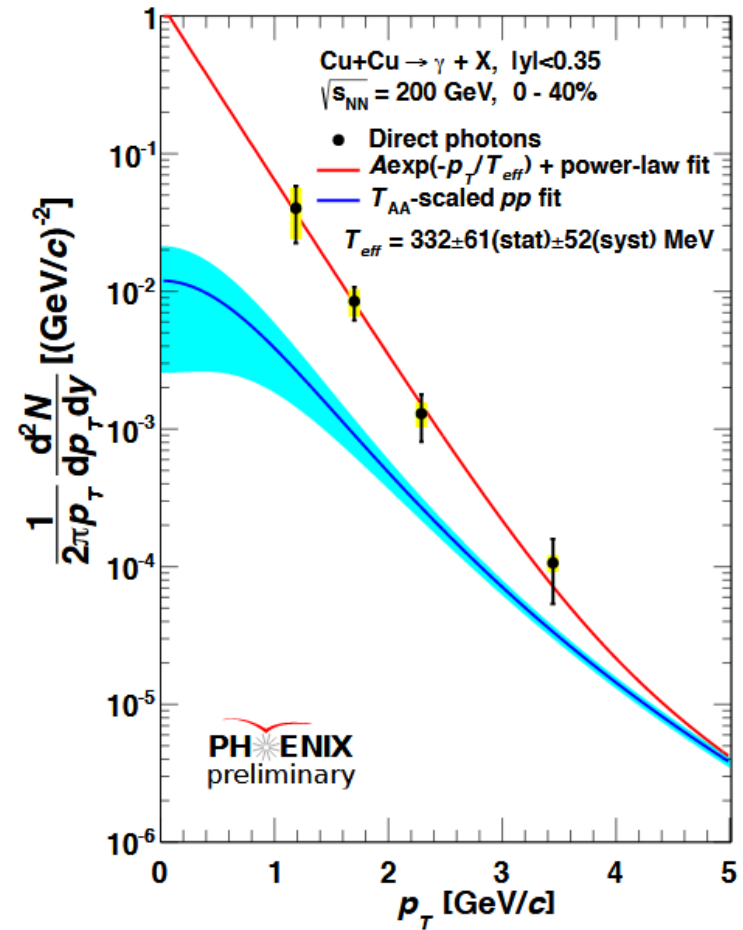
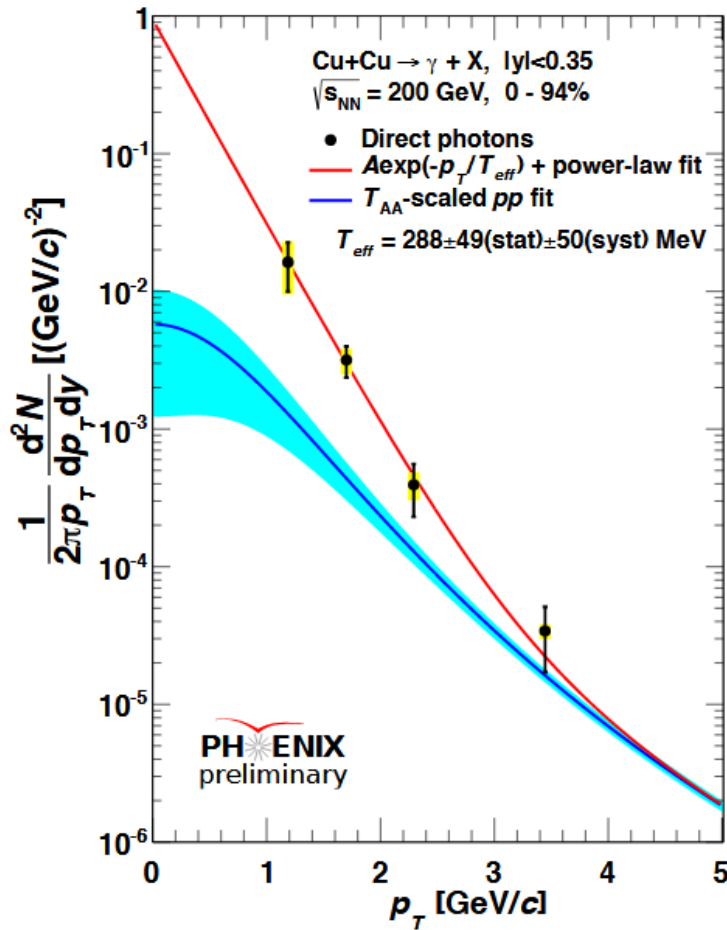


Аппроксимация  $Ae^{-p_T/T}$



Параметр T (inv.slope)  $\sim 240 \text{ МэВ} > T_c$

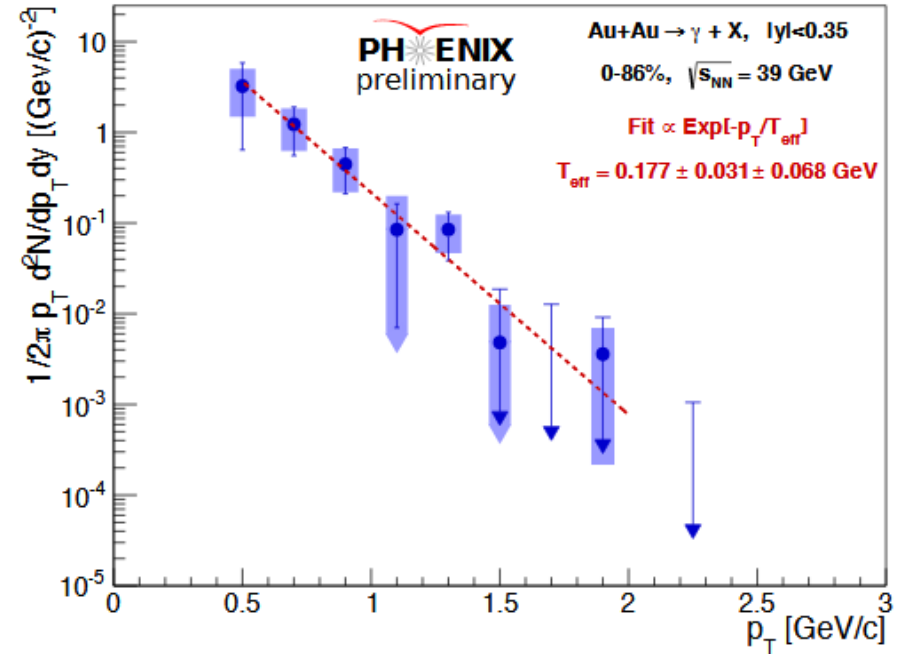
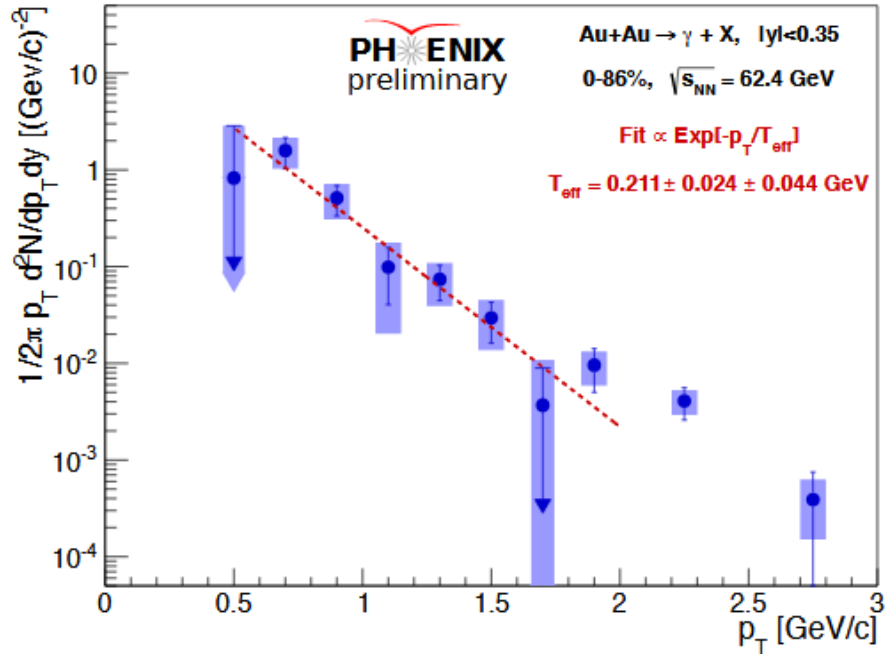
# Прямые фотоны в Cu+Cu при $\sqrt{s_{NN}} = 200\text{ GeV}$



- Избыток выхода прямых фотонов в области малых  $p_T$  наблюдается в Cu+Cu;
- Величина  $T_{эфф}$  в пределах неопределенностей измерений совпадает с Au+Au.



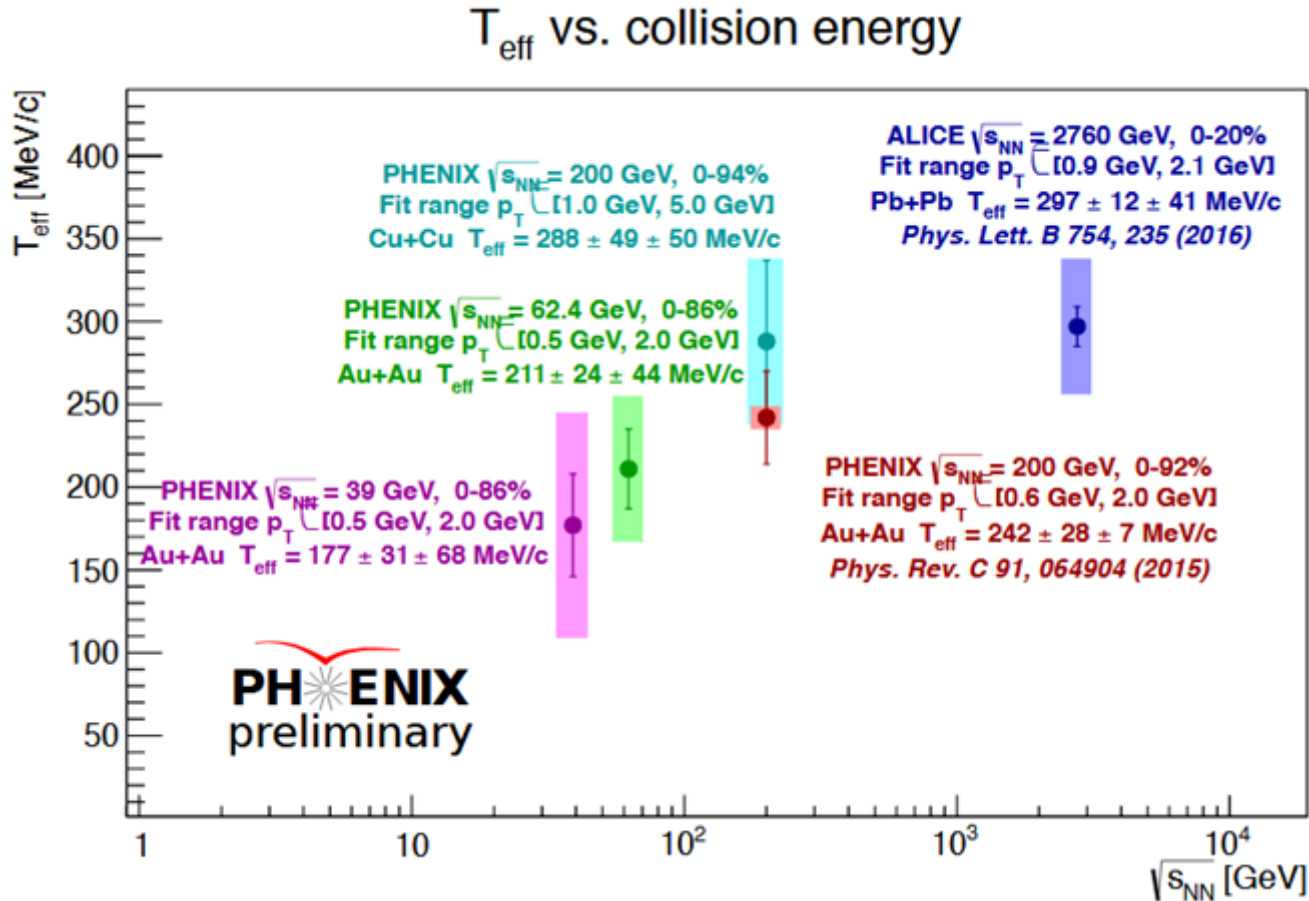
# Прямые фотоны в Au+Au при $\sqrt{s_{NN}} = 62.4$ и 39 GeV



- Избыток выхода мягких прямых фотонов наблюдается при  $\sqrt{s_{NN}} = 62.4$  и 39 ГэВ;
- Величина  $T_{\text{эфф}}$  составляет 211 МэВ для 62.4 ГэВ, 177 МэВ для 39 ГэВ.

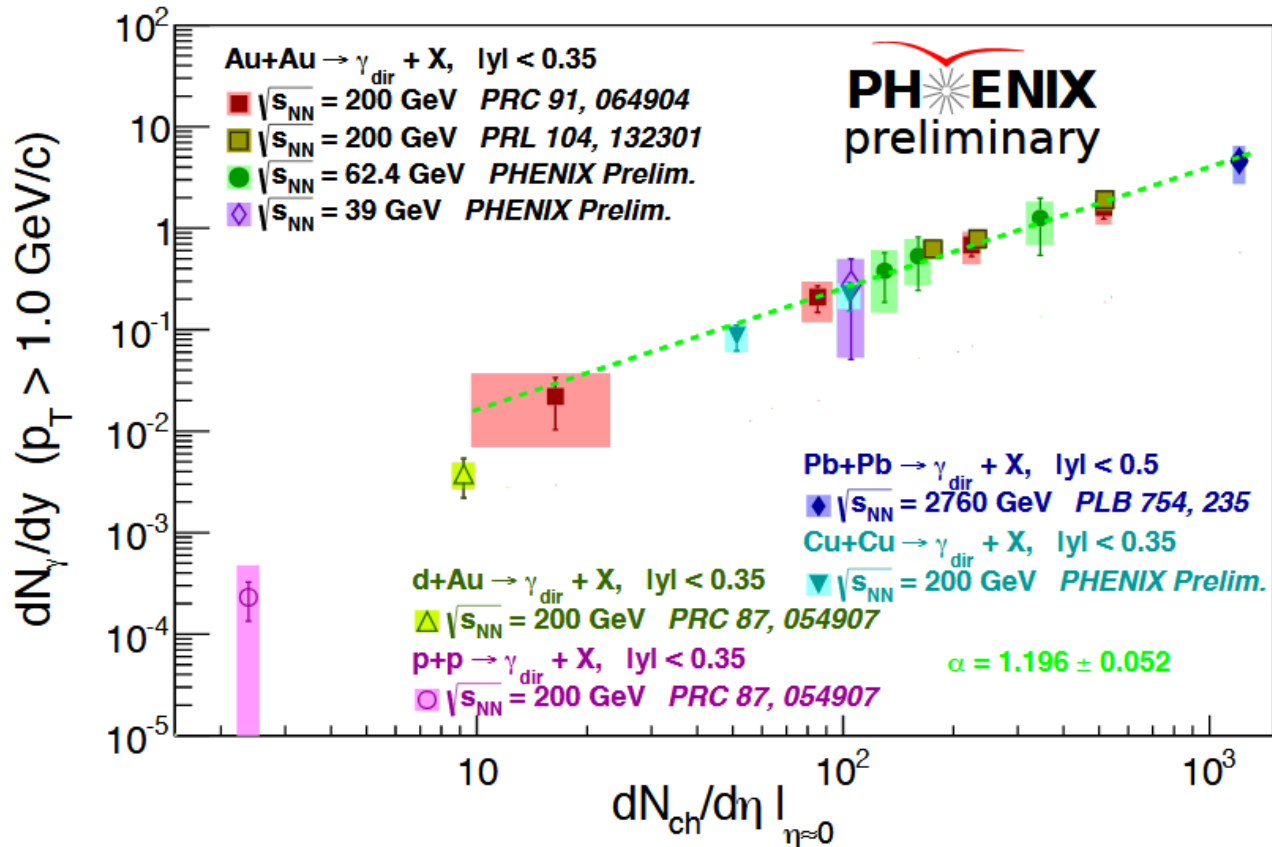
# Мягкие прямые фотоны, скан по энергии

- $T_{\text{эфф}}$  в диапазоне энергии 39-2760 ГэВ



- С ростом энергии взаимодействия ядер величина  $T_{\text{эфф}}$  возрастает от 177 до 297 МэВ.

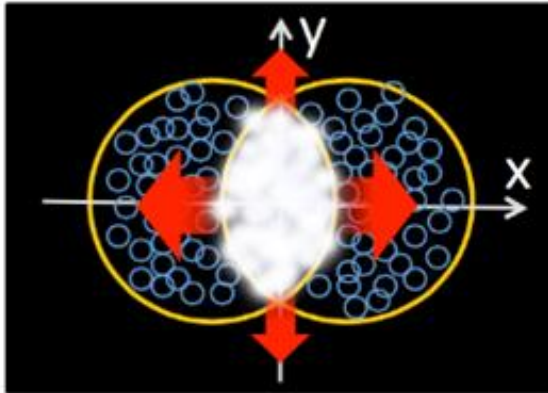
# Мягкие прямые фотоны, скан по энергии



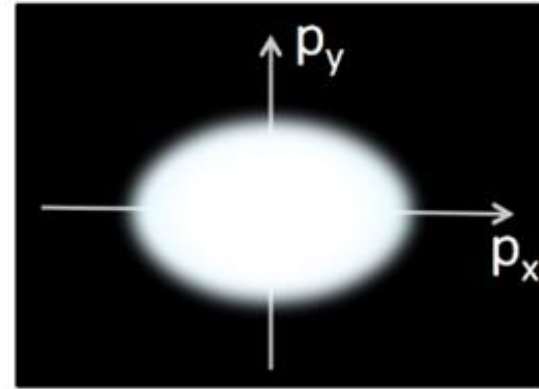
- Для всех представленных центральностей и энергий А+А взаимодействий выходы мягких прямых фотонов описываются функцией множественности  $(dN_{ch}/d\eta)^{1.2}$ ;
- Выход мягких прямых фотонов в р+р взаимодействиях меньше, чем в А+А:
  - ✓ Измерения продолжаются в диапазоне  $dN_{ch}/d\eta$  от 2 до 20 в р+Au и He<sup>3</sup>+Au.

# Потоки ( $v_2$ и $v_3$ ) прямых фотонов

Геометрическая анизотропия в начальном состоянии создает градиент давления

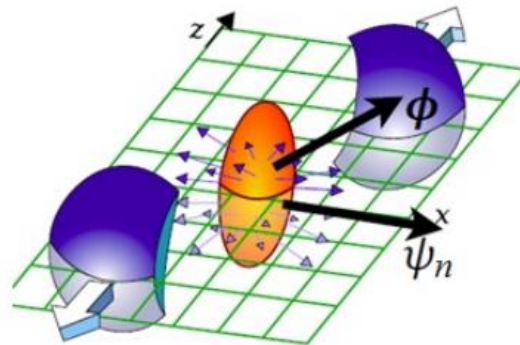


Импульсная анизотропия в конечном состоянии

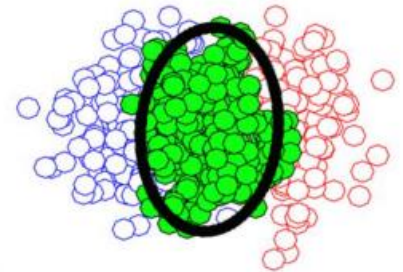


$$\frac{dN}{d\varphi} \propto \left( 1 + 2 \sum_{n=1}^{+\infty} v_n \cos[n(\phi - \psi_n)] \right)$$

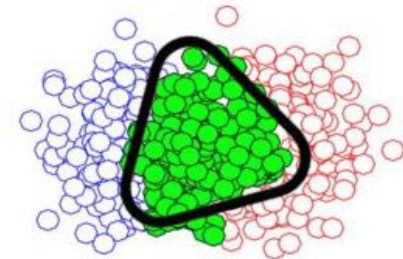
$$v_n = \langle \cos[n(\phi - \psi_n)] \rangle$$



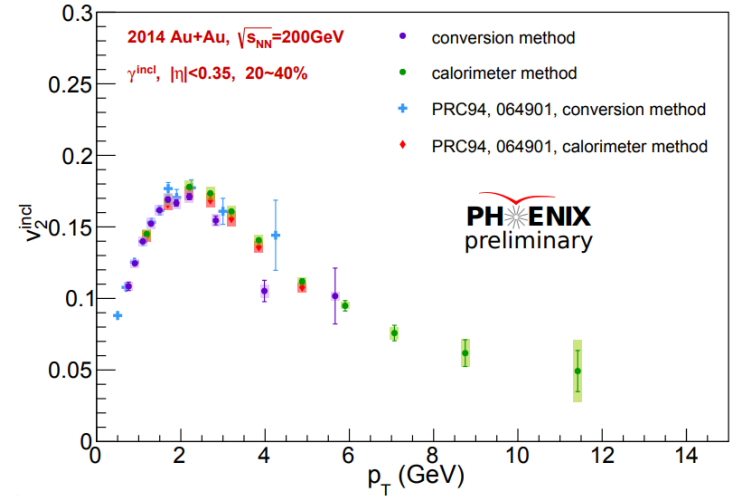
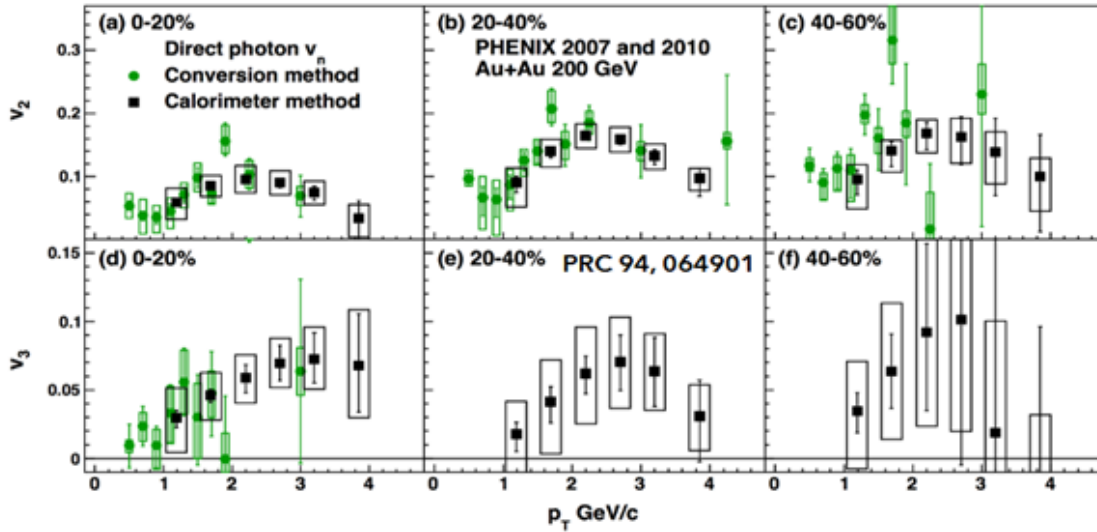
elliptical flow  $v_2$



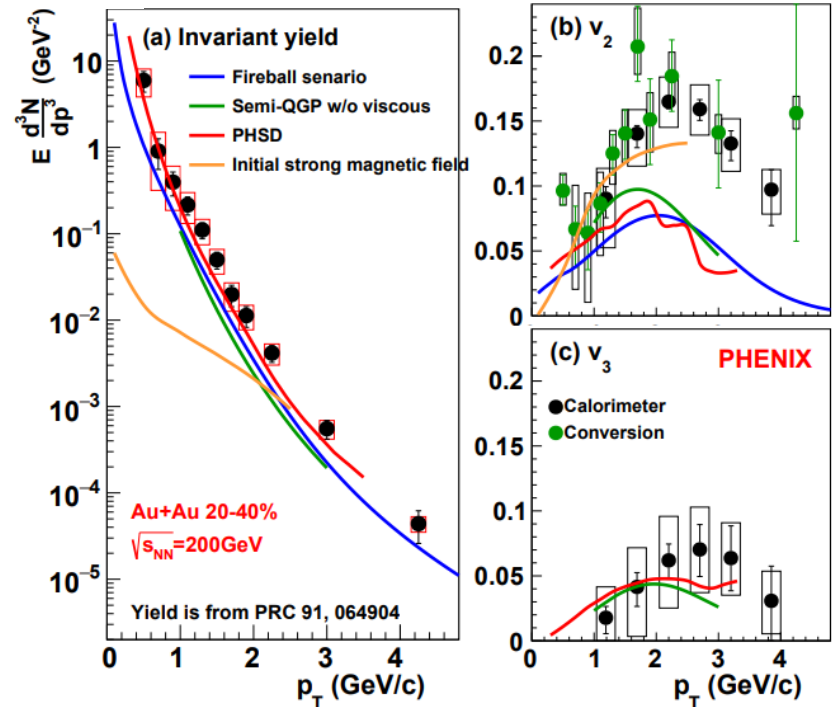
triangular flow  $v_3$



# Потоки ( $v_2$ и $v_3$ ) прямых фотонов



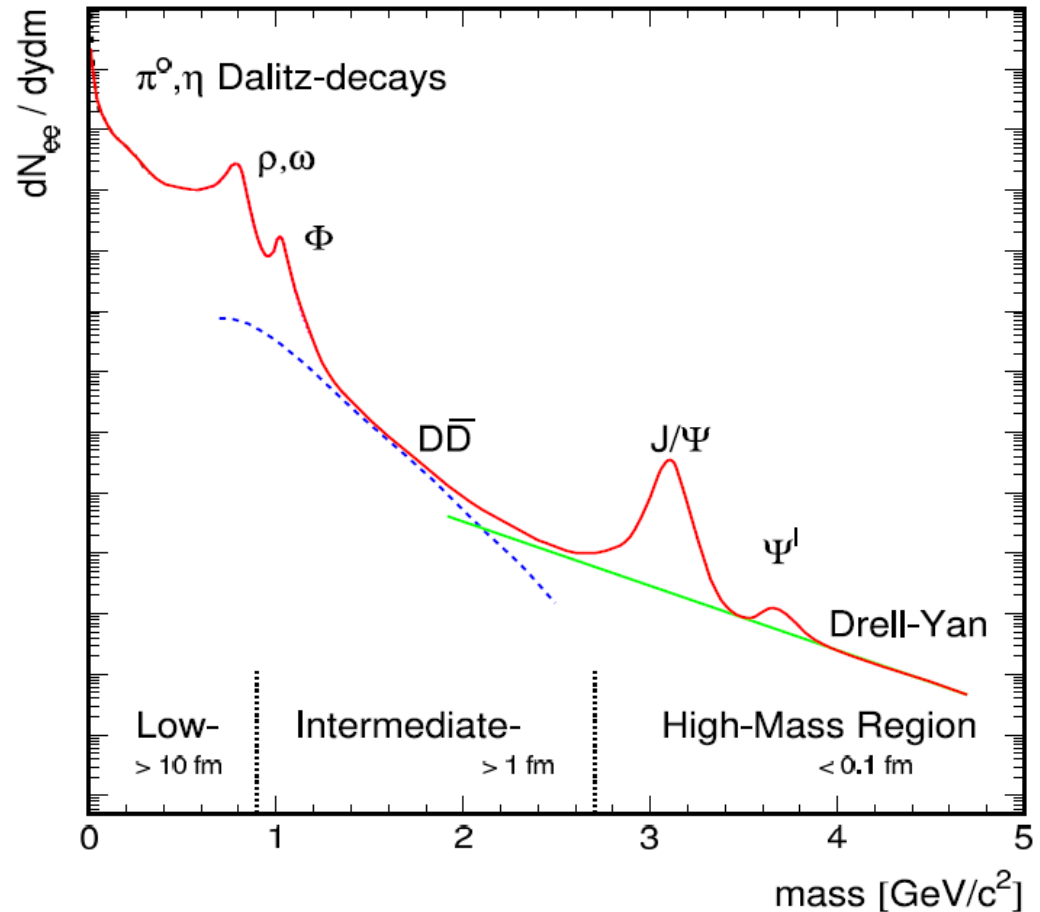
- Ненулевые величины  $v_2$  и  $v_3$  ( $\sim v_2/2$ ):
  - ✓  $v_2$  зависит от центральности,  $v_3$  нет;
- Модельные расчёты не позволяют одновременно описать большие величины выхода прямых фотонов и потоков  $v_2$ :
  - ✓ измерения и расчёты продолжаются.



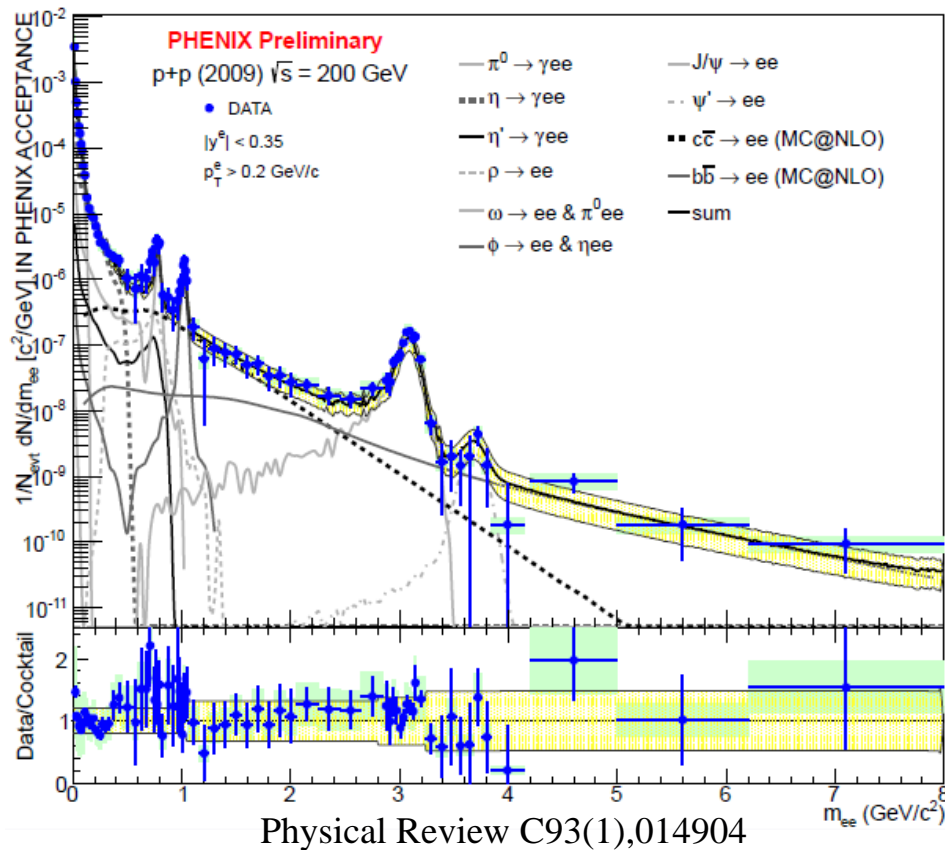
# Диэлектронные измерения

# Диэлектронный континуум

1. Область малых масс ( $m < m_\phi$ ):
  - Распады  $\pi^0$ ,  $\eta$ ,  $\rho$ ,  $\omega$ ;
2. Область промежуточных масс ( $m_\phi < m < m_{J/\psi}$ ):
  - $e^+$  и  $e^-$  от распадов  $D, \bar{D}$ ;
  - $e^+e^-$  из партонной фазы.
3. Область больших масс ( $m > m_{J/\psi}$ ):
  - Распады  $J/\psi$ ,  $\psi'$  и Дрелл-Ян.



# p+p взаимодействия при $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ

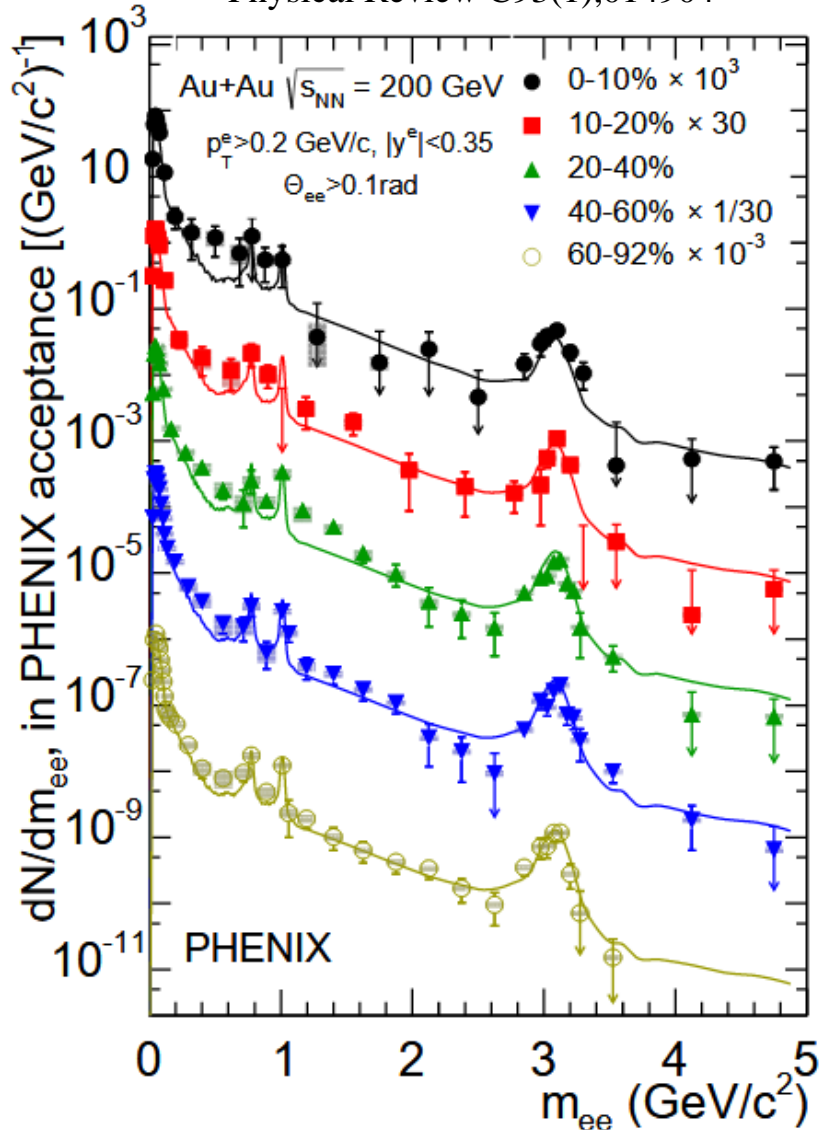


- Экспериментальные результаты согласуются с “коктейлем” от адронных распадов;
- Результат, полученный с использованием нового детектора HBD, полностью согласуется с ранее опубликованным (PRC81, 034911);
- Базис для сравнения с Au+Au результатами, отработка методик анализа данных HBD;

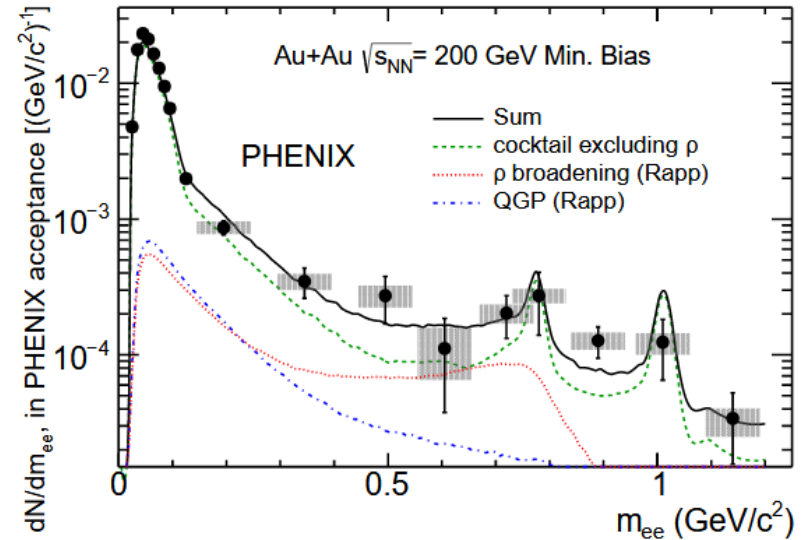


# Au+Au взаимодействия при $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ

Physical Review C93(1),014904



Adv. High Energy Phys. 2013, 148253



Область малых масс:

- ✓ избыточный выход согласуется с результатами STAR;
- ✓ от SPS к RHIC описывается в рамках одной модели – увеличение ширины резонанса  $\rho$ -мезона ( $\pi^+\pi^- \rightarrow \rho \rightarrow e^+e^-$  в HG).

Область промежуточных масс:

- ✓ ненулевой избыток выхода  $\rightarrow$  возможный тепловой вклад от КГП;
- ✓ измерения продолжаются с VTX (2014).

# Электроны тяжёлых ароматов

# Au+Au взаимодействия при $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ

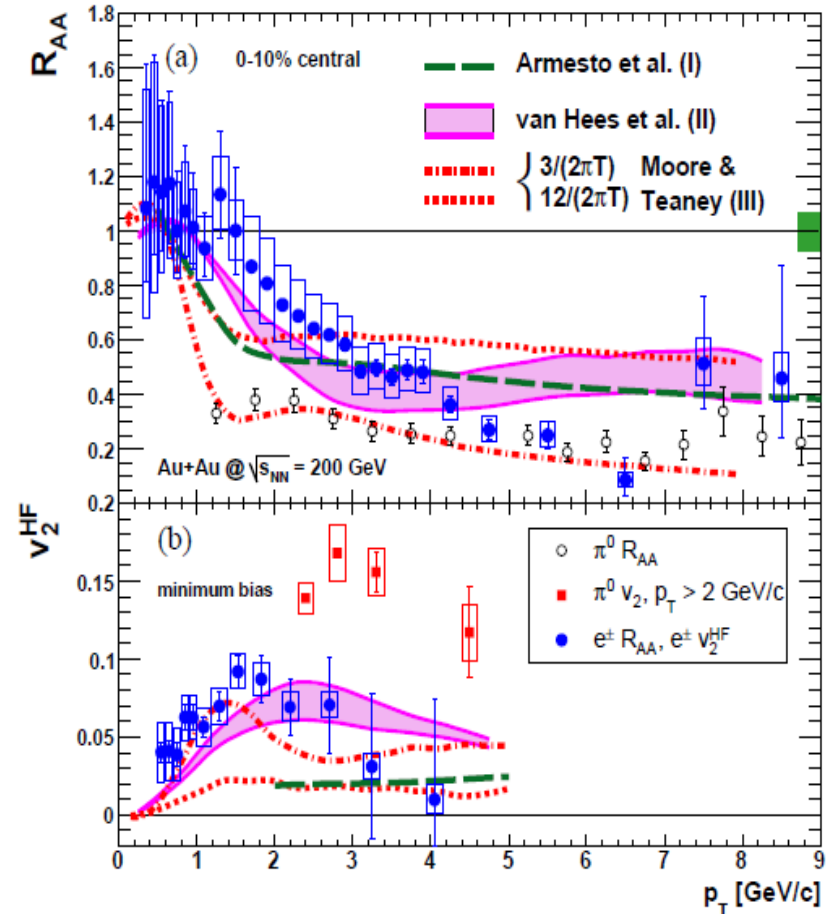
- Тяжёлые кварки рождаются на самых ранних стадиях взаимодействия ядер;
- Энергетические потери на излучение глюонов ожидаются меньше, чем у лёгких кварков:

✓ Измерения:  $R_{AA} < 1$  и  $v_2 > 0$ !

- Множество попыток получить теоретическое описание обнаруженных зависимостей:

✓ Потери на излучение (I);

✓ Транспортные модели (II & III).



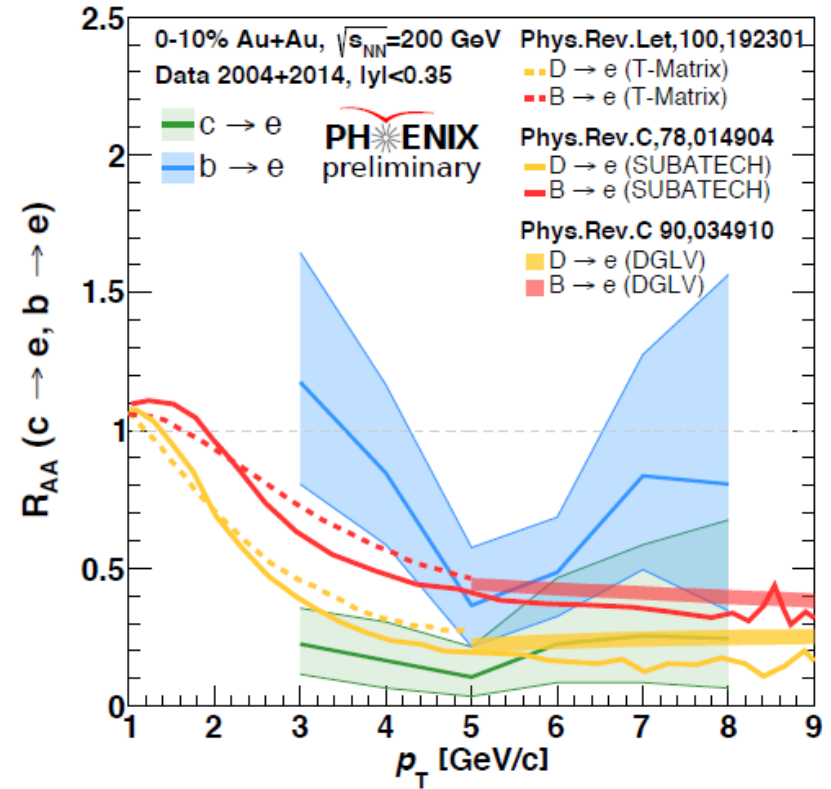
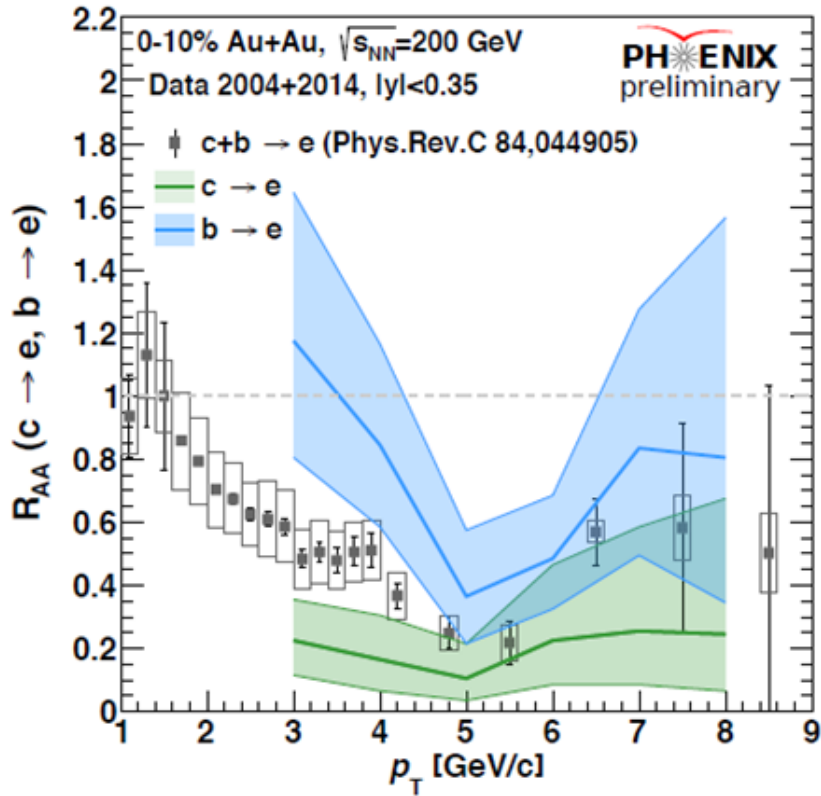
Phys. Rev. C 84, 044905

- Измерения эксперимента PHENIX – смесь электронов от распадов D и B мезонов:

✓ Разделить вклады от c и b кварков можно, используя разные времена жизни D и B мезонов и измеряя вторичную вершину → PHENIX VTX.

# $R_{AA}$ для $c$ и $b$ , Au+Au при $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ

0-10% Central



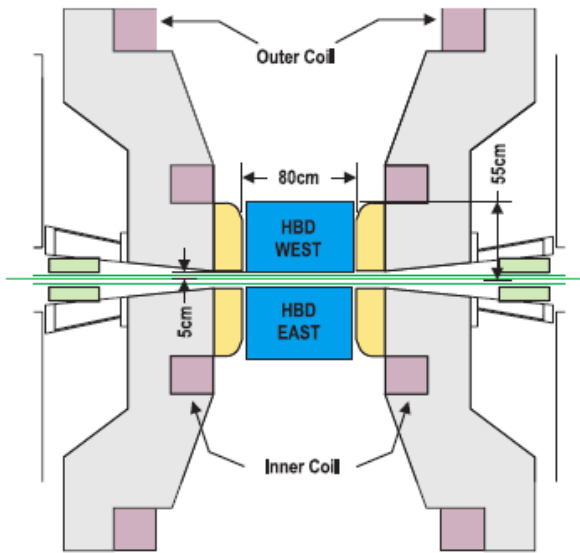
- В центральных Au+Au столкновениях:
  - ✓  $c \rightarrow e$  подавлены не зависимо от  $p_T$ ,  $b \rightarrow e$  при  $p_T < 5$  ГэВ/с подавлены меньше;
  - ✓  $R_{AA}$  в согласии с транспортными (T-Matrix, SUBATECH) моделями и с потерями на излучение (DGLV);
- В области  $p_T > 5$  ГэВ/с при данной точности уверенно разделить  $c \rightarrow e$  и  $b \rightarrow e$  нельзя:
  - ✓ измерения продолжаются с VTX (2016).

# Заключение

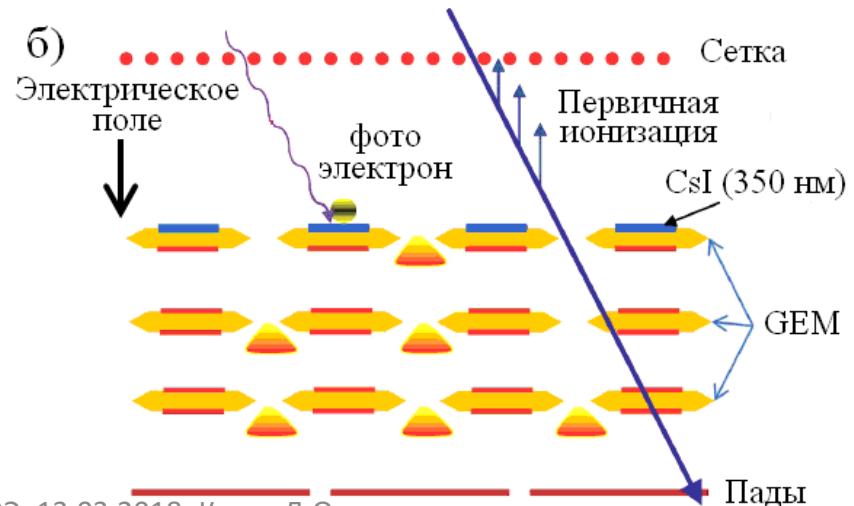
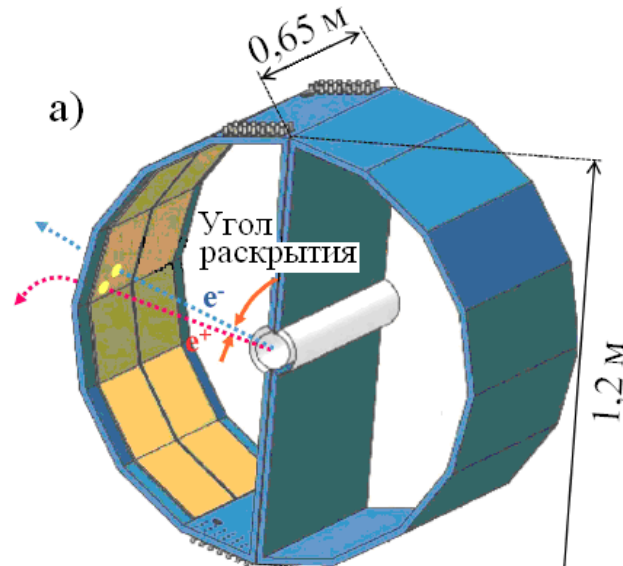
1. Выходы мягких прямых фотонов в диапазоне энергий сталкивающихся ядер 39–2760 ГэВ описываются функцией множественности  $(dN_{ch}/d\eta)^{1,2}$  :
  - ✓ измерения продолжаются в диапазоне  $dN_{ch}/d\eta$  от 2 до 20 в p+Au и He<sup>3</sup>+Au.
2. Диэлектронный континуум в Au+Au взаимодействиях при  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ:
  - ✓ в области малых масс обнаружен избыточный выход диэлектронных пар, который описывается через увеличение ширины резонанса  $\rho$ -мезона;
  - ✓ в области промежуточных масс присутствует ненулевой избыток выхода диэлектронных пар – возможный тепловой вклад от КГП;
  - ✓ измерения в области промежуточных масс продолжаются с VTX (2014).
3. При помощи вершинного детектора PHENIX VTX:
  - ✓  $R_{AA}$  для c и b, описываются излучением и транспортными моделями;
  - ✓ измерения продолжаются с VTX (2016).

# Backups

# Детектор HBD в эксперименте RHENIX



- Расположен вне области магнитного поля;
- Детектор черенковского света:  $\text{CF}_4$  в качестве радиатора и рабочего газа;
- Фотокатод – трехслойный GEM с покрытием CsI;
- Адроны с  $p_T < 10$  ГэВ/с, не излучают черенковского света в детекторе;
- Электроны от адронов, дрейфуют в сторону противоположную катоду из-за специально созданного распределения электрического поля;



# Экспериментальные трудности

- Величина отношения (сигнал/фон) в области малых масс составляет  $\sim 1/200$ ;
- Основным источником фонового вклада являются комбинаторные  $e^+e^-$  пары от распадов  $\pi^0$ -мезонов:

- ✓  $\pi^0 \rightarrow \gamma e^+e^-$
- ✓  $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma \rightarrow e^+e^-e^+e^-$

- Под действием магнитного поля пары электронов разлетаются на большие углы и затем восстанавливаются по отдельности:

- ✓ Необходимо тагировать данные распады перед тем, как магнитное поле разделит их;

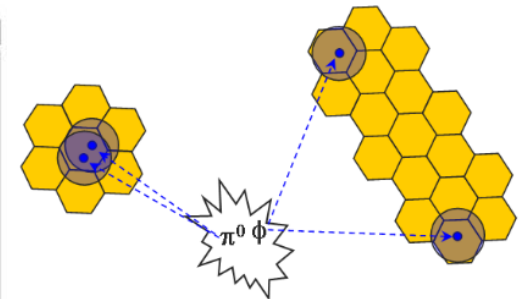
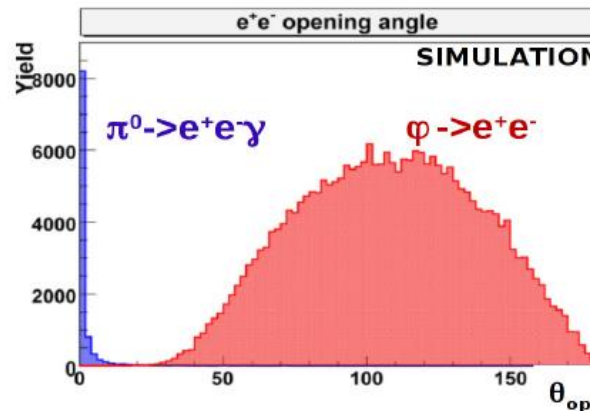
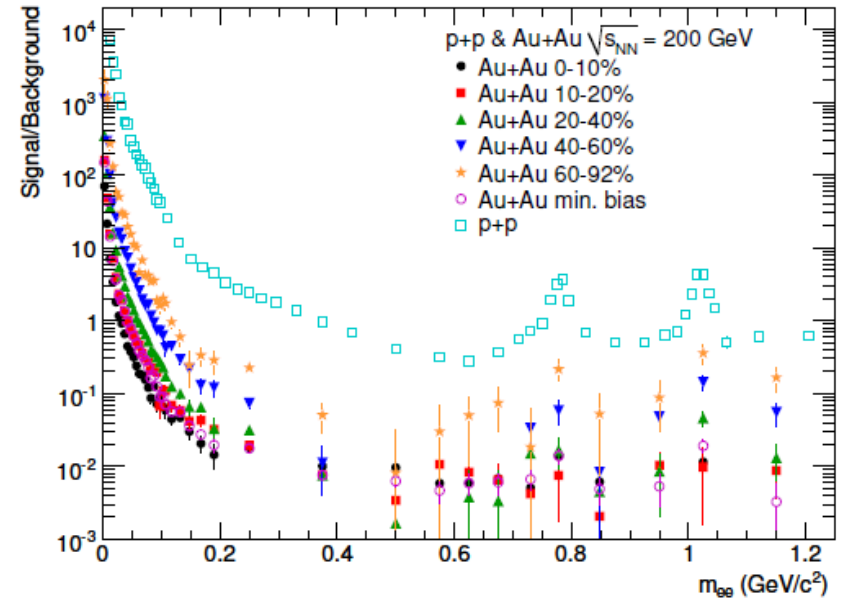
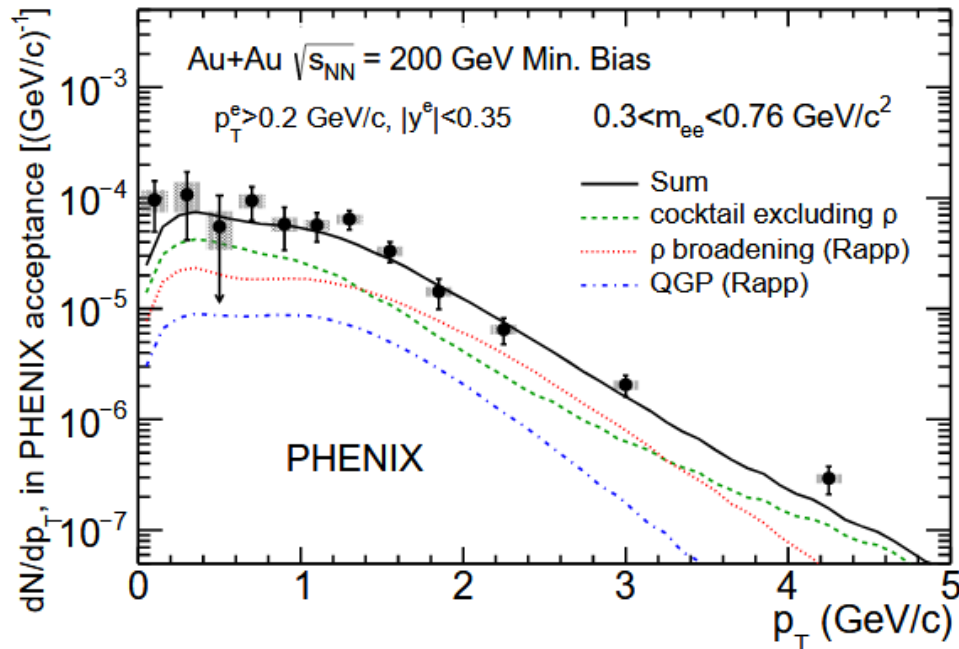


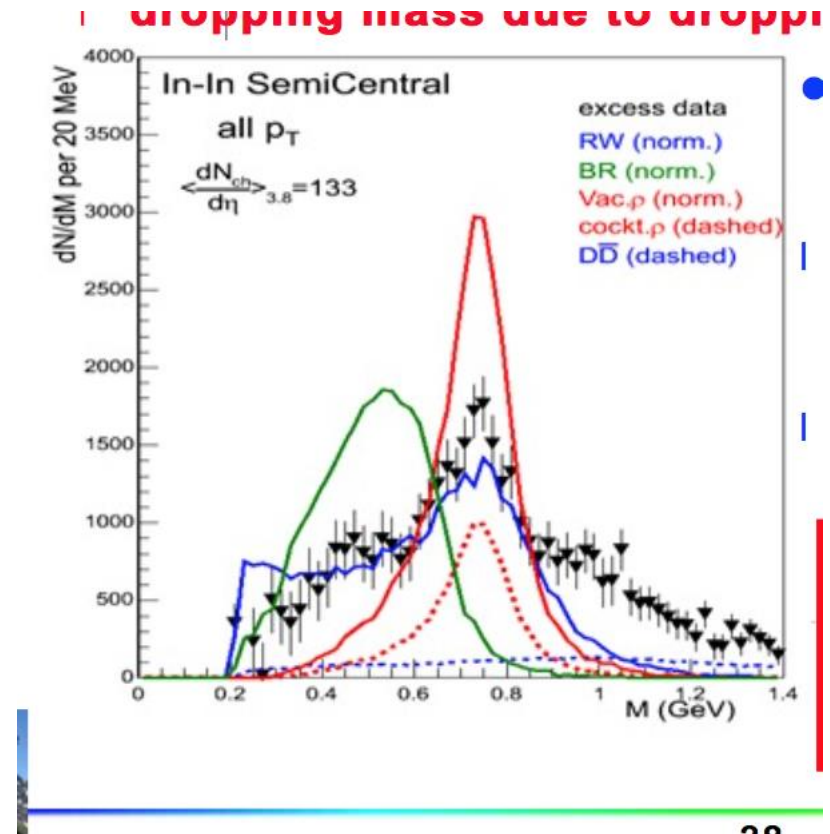
FIG. 2. (Color online) Sketch illustrating the HBD response to an  $e^+e^-$  pair from  $\pi^0$  Dalitz decay and from a  $\phi$  meson decay. The circles represent the Čerenkov blobs whereas the hexagons are the hexagonal pads of the HBD readout plane.



# Доп. инфо по континууму

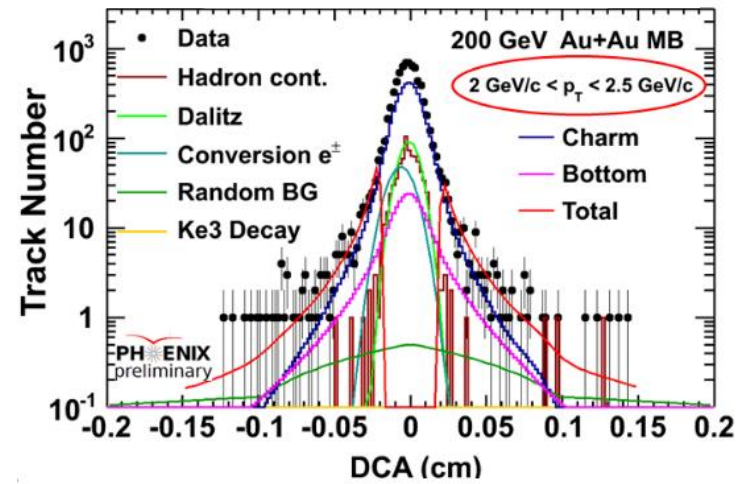
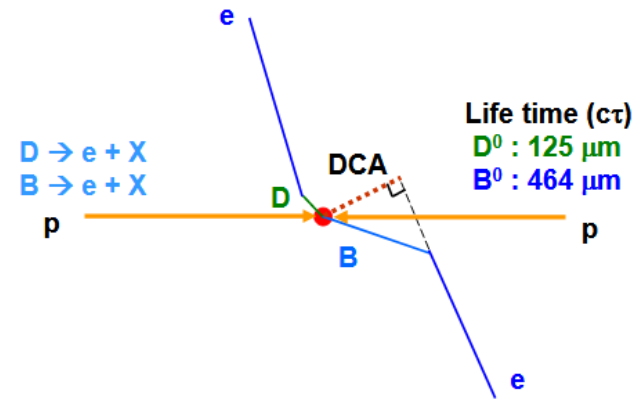
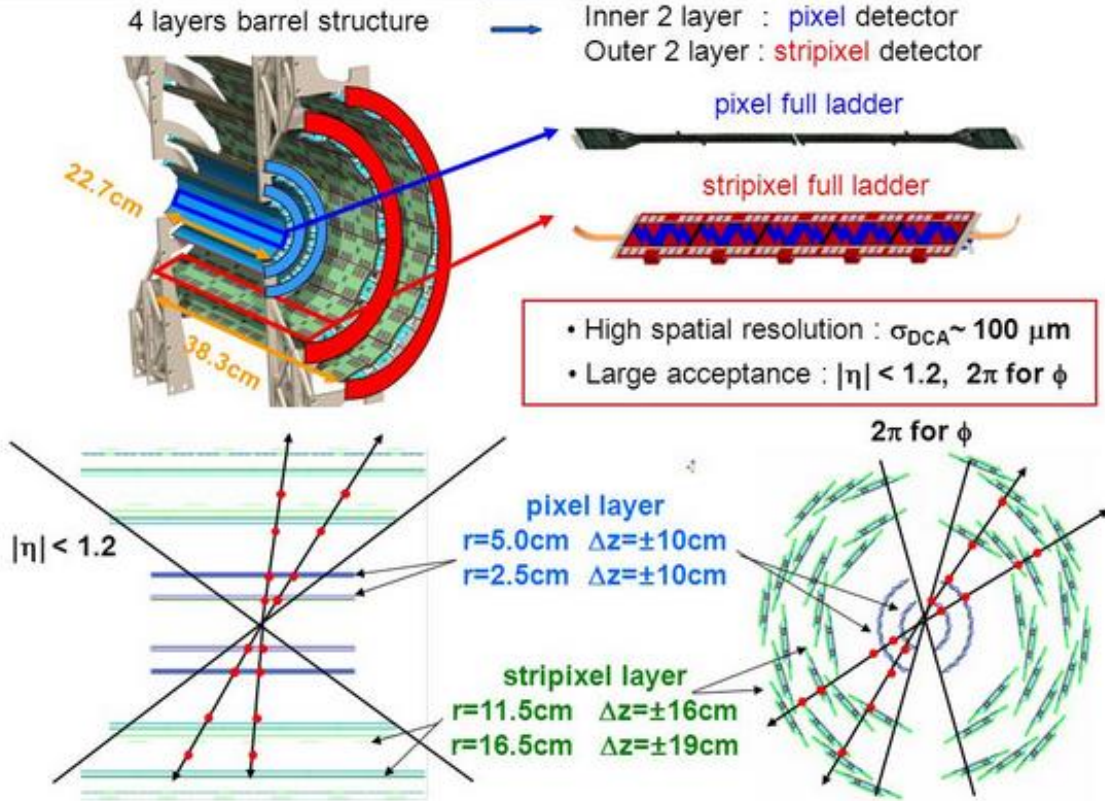


- Избыток в области малых масс исчезает с ростом поперечного импульса
- В этой области масс низкая температура и вклад прямых фотонов мал



Модель Rapp & Wambach описывает избыточный выход через увеличение ширины резонанса  $\rho$ -мезона для SPS данных, больше 1 ГэВ/с  $\omega$  &  $\phi$

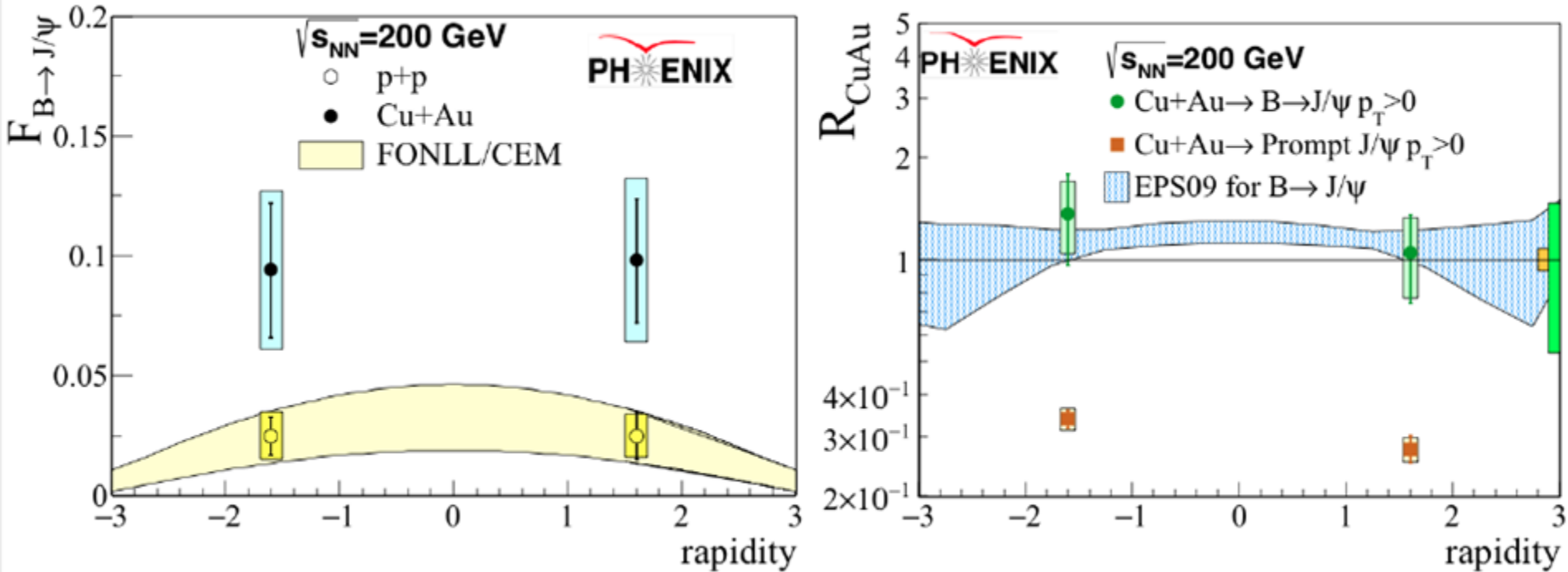
# Silicon Vertex Tracker (VTX)



- Распределение DCA для электронов измеряется с помощью VTX;
- Относительные вклады от с и b определяются из аппроксимации измеренного распределения DCA вкладками от различных источников;
- Вклады в DCA от различных источников оцениваются с использованием Pythia, свернутой с откликом экспериментальной установки, включая разрешение по DCA

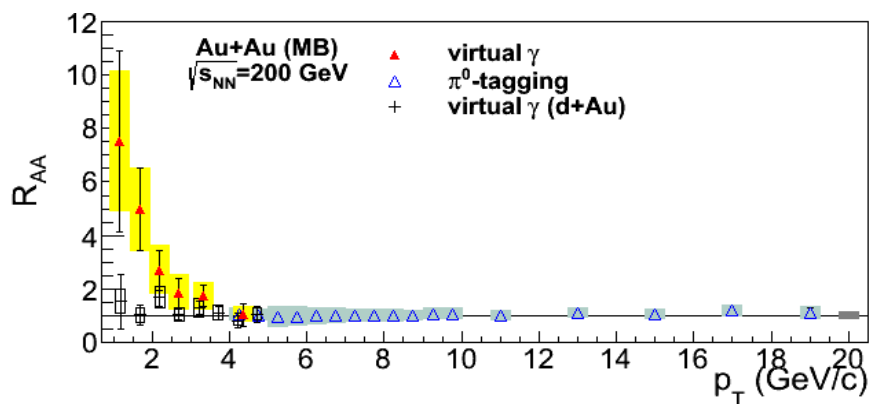
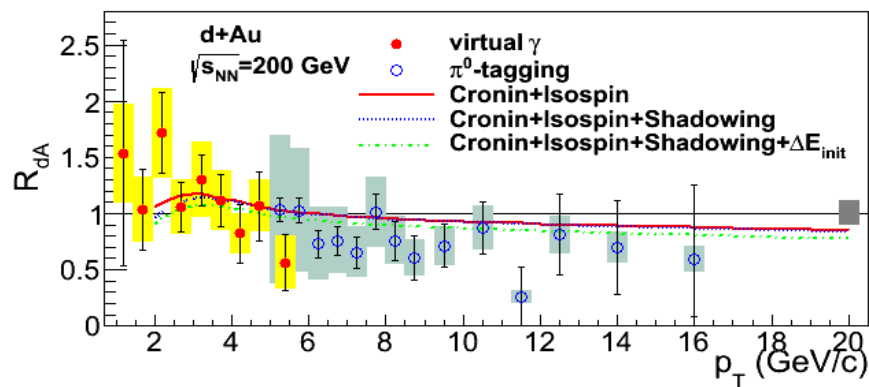
# В-мезоны в области больших быстрот

Physical Review C96, 064901 (2017)



- Выход J/ψ от В-мезонов больше в столкновениях тяжёлых ядер (Cu+Au) чем в p+p:
  - ✓ feed-down 10% в CuAu, 2% в p+p;
- В-мезоны меньше подавлены, по сравнению с прямыми (prompt) J/ψ
  - ✓ величины факторов ядерной модификации В-мезонов находятся вблизи 1 в соответствии с параметризацией EPS09;

# $R_{AA}$ прямых (direct) фотонов в d+Au и Au+Au



Phys. Rev. C 87, 054907

## В d+Au взаимодействиях:

- ✓ не наблюдается модификаций в выходе прямых фотонов;
- ✓ расчёты согласуются с экспериментальными результатами;

## В Au+Au взаимодействиях:

- ✓ Избыточный выход прямых фотонов в области малых  $p_T$  не является эффектом начального состояния;
- ✓ интерпретируется как тепловое излучение плотной материи (КГП, адронный газ);

# Методика измерения

## 1. Калориметр:

- ✓ Хорошее разрешение на больших  $p_T$ ;
- ✓ Значительный фоновый вклад на малых  $p_T$  от адронных распадов;

## 2. Конверсия:

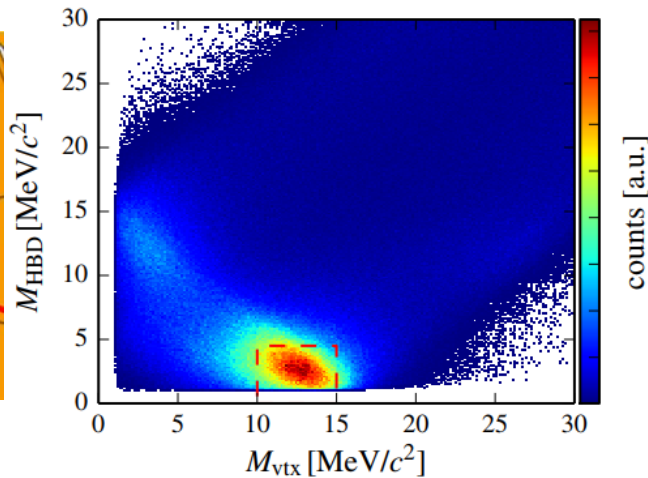
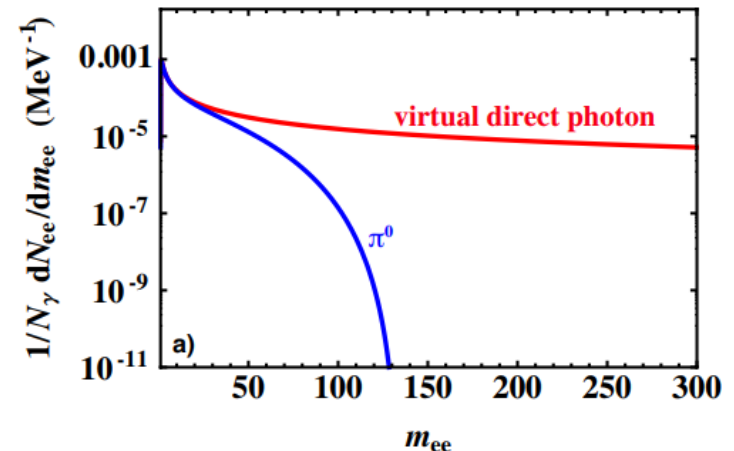
- ✓ Хорошее разрешение при малых  $p_T$ ;
- ✓ Существенное уменьшение статистики по сравнению с первым методом.

Внешняя конверсия ( $\gamma \rightarrow e^+ + e^-$ );

Внутренняя конверсия ( $\gamma^* \rightarrow e^+ + e^-$ );

Формула Kroll-Wada

$$\frac{1}{N_\gamma} \frac{dN_{ee}}{dm_{ee}} = \frac{2\alpha}{3\pi} \frac{1}{m_{ee}} \sqrt{1 - \frac{4m_e^2}{m_{ee}^2}} \left(1 + \frac{2m_e^2}{m_{ee}^2}\right) S$$



Phys.Rev. C91, 064904

arXiv:0908.2382



# Загадка прямых фотонов

## - Thermal photons (HG+QGP), pQCD with fireball scenario

- H.van Hees, C. Gale, R. Rapp PRC 84 054906 (2011)
- Include finite initial flow at thermalization
- Include resonance decays and hadron-hadron scattering
- Blue shift of HG spectrum included

## - Microscopic transport (PHSD)

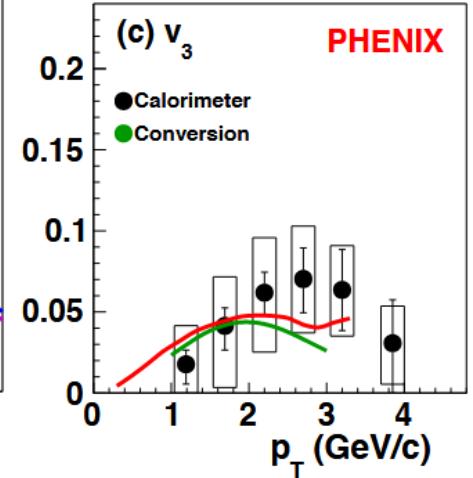
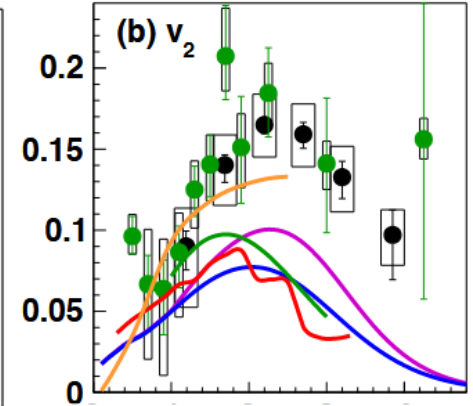
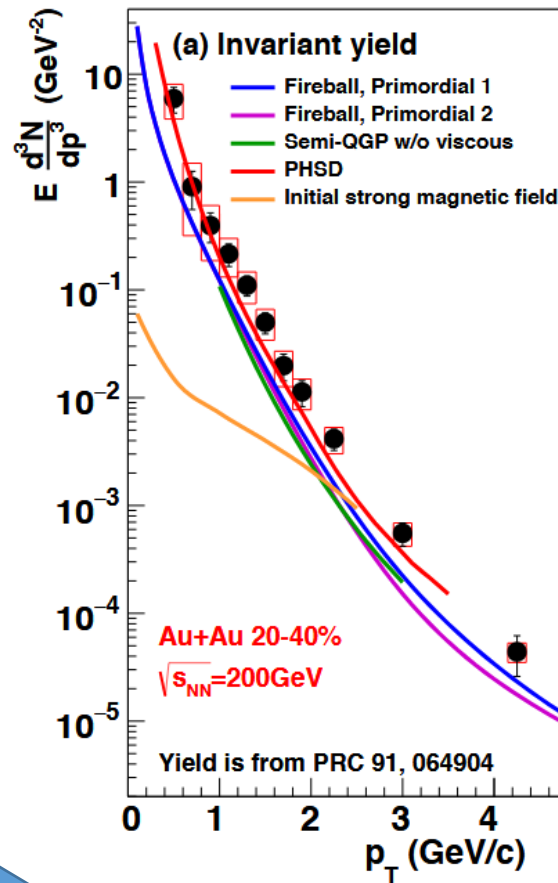
- O. Linnyk, W. Cassing, E.L. Bratkovskaya, PRC 89, 034908 (2014)
- Parton-Hadron-String dynamics
- Include large contribution from hadron-hadron interaction in HG using Boltzmann transport
- Include thermal photons from QGP

## - Enhanced emission from non-equilibrium effects (glasma, etc.)

- C. Gale et al., PRL114, 072301 + priv.comm. with Y Hidaka and J-F. Paquet
- Semi-QGP is the QGP near  $T_c$
- Annihilation and Compton processes around hadronization time are naturally included

## - Enhanced early emission from magnetic field

- G. Basar, D. E. Kharzeev, V. Skokov, PRL 109 202303 (2012)
- Initial strong magnetic field produces anisotropy of photon emission
- magnetic field + thermal photons (lattice QCD)



Не удастся одновременно описать большие величины выхода прямых фотонов и потоков!