



Перспективы исследования тепловых фотонов в эксперименте MPD на ускорителе NICA

Дмитрий Александрович Иванищев
ЛРЯФ

Семинар ОФВЭ
14 января 2020 г.

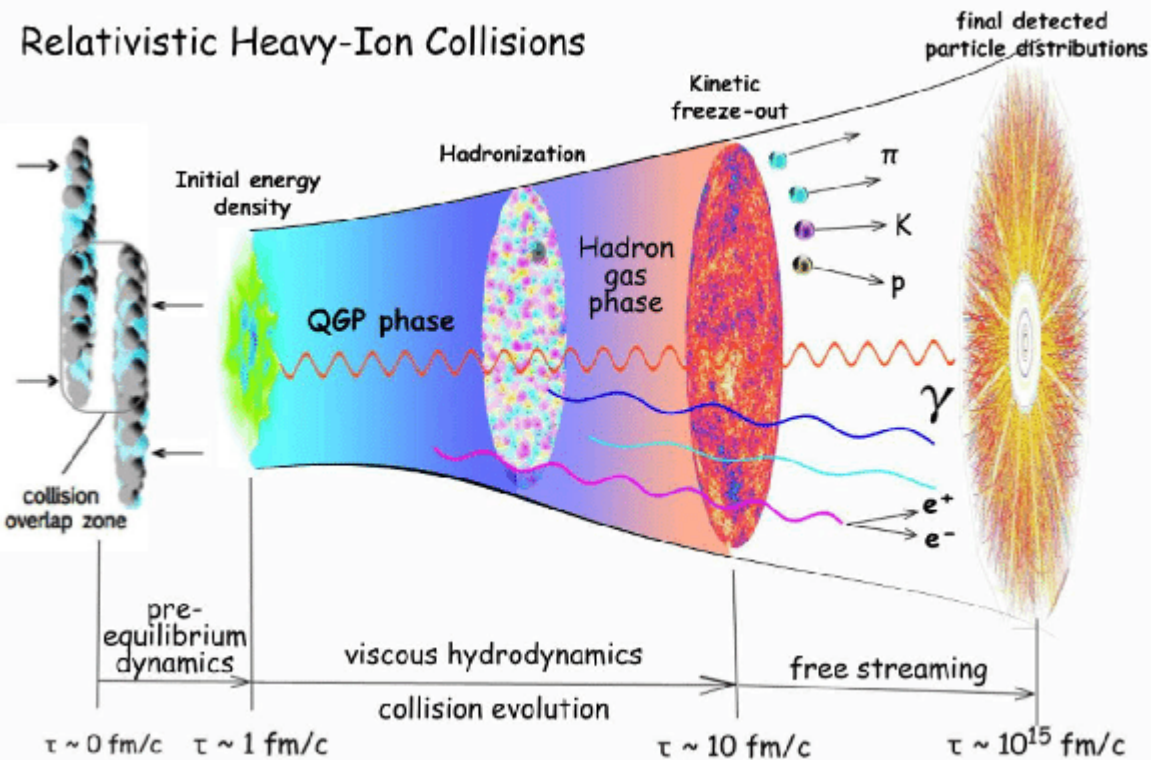
План семинара

- Тепловые фотоны в столкновениях тяжелых релятивистских ядер
- Экспериментальные данные по рождению тепловых фотонов в столкновениях тяжелых релятивистских ядер
- Возможность измерения тепловых фотонов в эксперименте MPD на ускорителе NICA
- Заключение

Тепловые фотоны в столкновениях тяжелых релятивистских ядер

Фотоны – пробники КГП

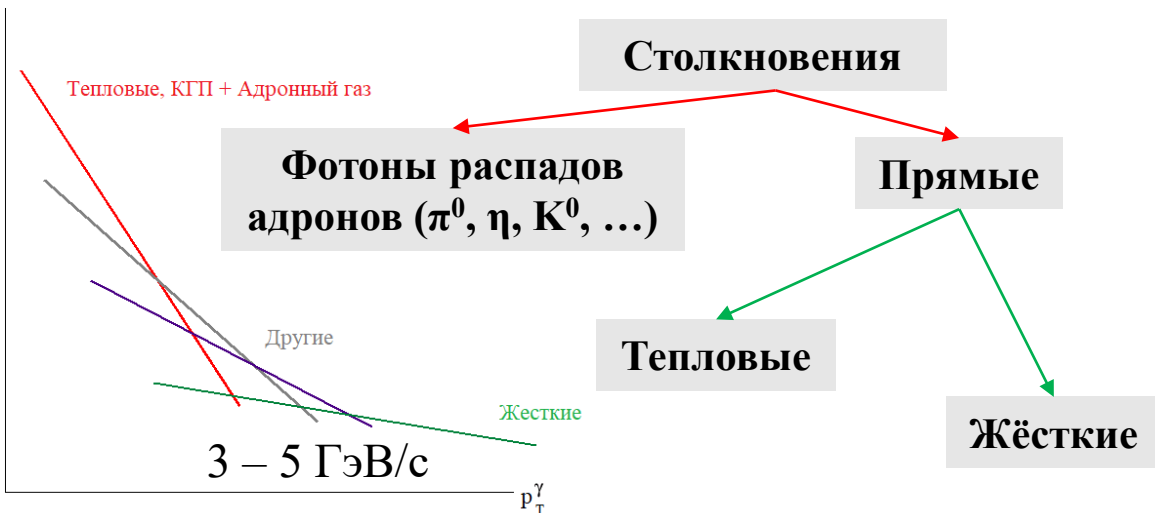
Relativistic Heavy-Ion Collisions



Предсказание решеточной КХД – фазовый переход при температуре $T_c \sim 170$ МэВ

Фотоны – одни из основных пробников.

- Взаимодействуют только электромагнитным образом.
- Средний свободный пробег велик по сравнению с размерами системы.
- Покидают среду практически не претерпевая воздействий.
- Испускаются в течение всей пространственно-временной эволюции процесса столкновения.
- Фотоны несут информацию о состоянии и свойствах среды во время своего рождения.



**Экспериментальные данные по рождению
тепловых фотонов в столкновениях
релятивистских тяжелых ядер**

Методы регистрации тепловых фотонов

- Тепловые фотоны, p_T до 2 – 3 ГэВ
- Жесткие фотоны, $p_T > 3 – 5$ ГэВ/с

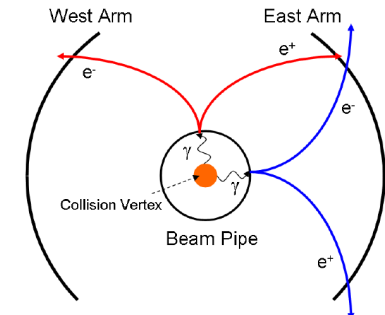
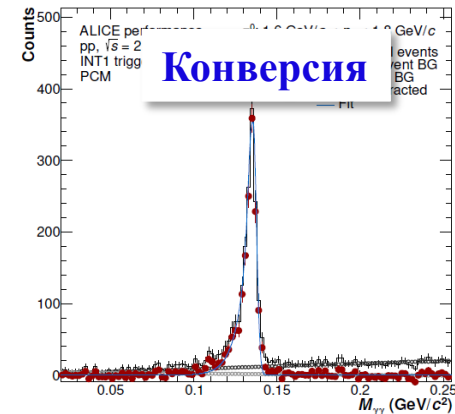
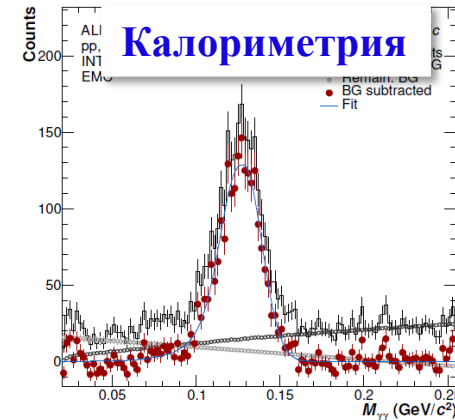
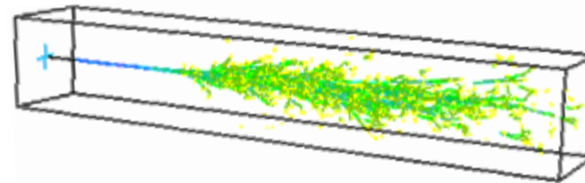
Два основных метода:

Электромагнитная калориметрия

- γ теряет почти всю энергию, часть которой регистрируется
- В области $p_T < 2$ ГэВ/с:
 - энергетическое и пространственное разрешение ухудшается с уменьшением E ;
 - ошибочная идентификация адронов как фотонов;
 - большой фон от адронов;
 - конверсионные электроны в следствии взаимодействия частиц с веществом впереди стоящих детекторов;

Конверсия фотонов

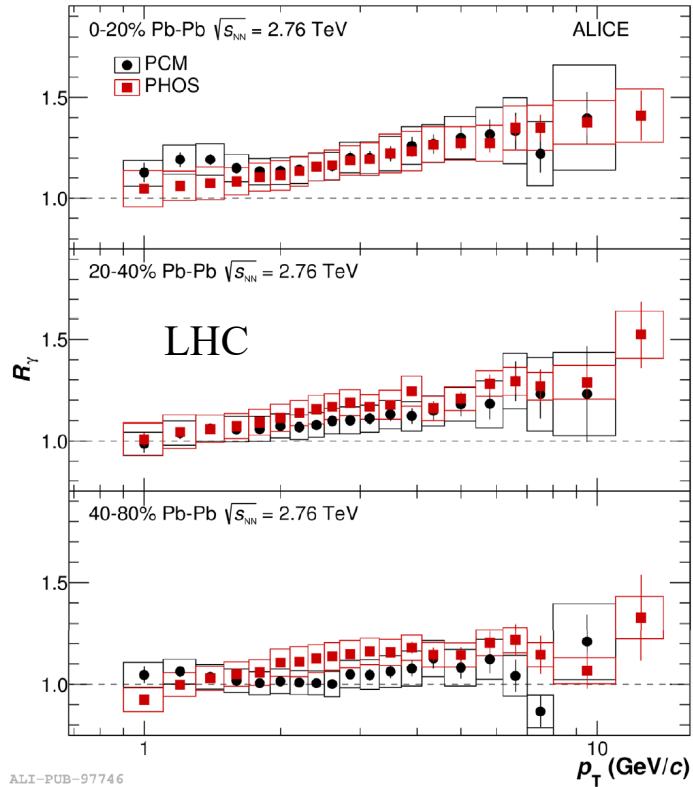
- γ восстанавливается посредством измерения e^+e^-
- $\gamma \rightarrow e^+e^-$ в веществе детектора, зависит от X_0
- Эффективна в области $0,4 < p_T < 4$ ГэВ/с
- Разрешение трековой системы гораздо лучше, но требуется больше статистики



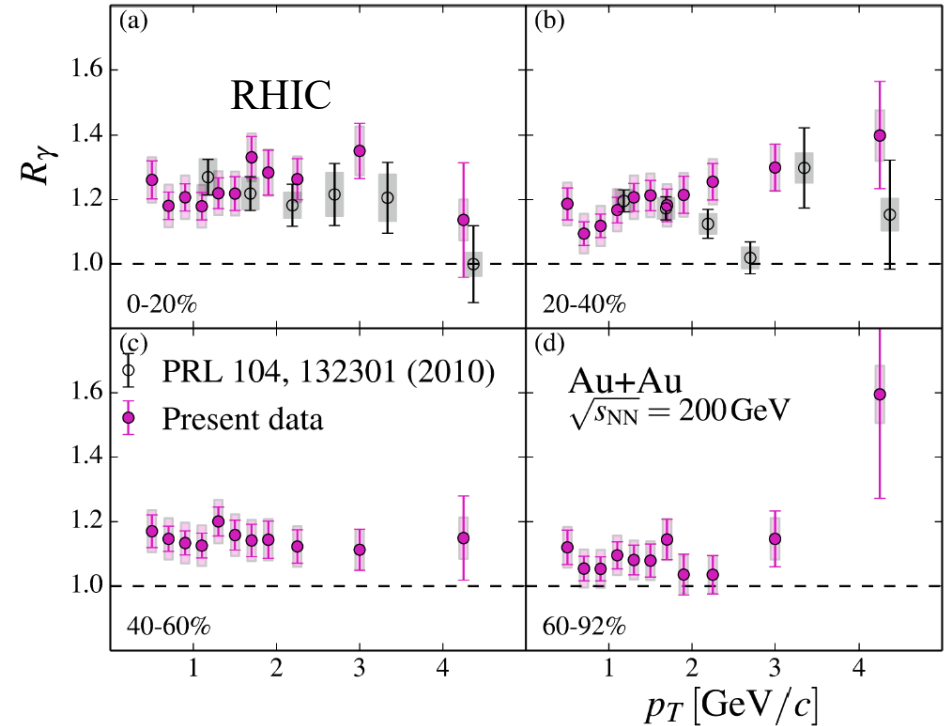
R_γ , RHIC и LHC

$$R_\gamma = \gamma^{\text{incl}} / \gamma^{\text{hadr}} \quad \gamma^{\text{direct}} = \left(1 - \frac{1}{R_\gamma}\right) \cdot \gamma^{\text{inc}}$$

Phys. Rev. C91, 064904

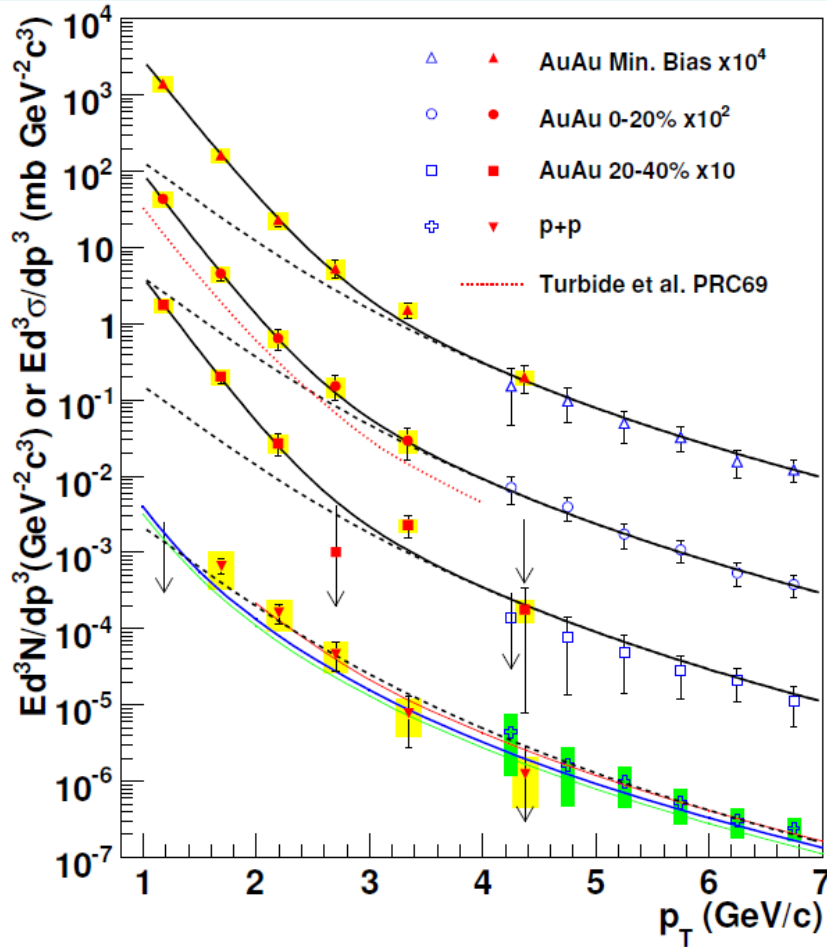


LHC, Phys. Lett. B754 235



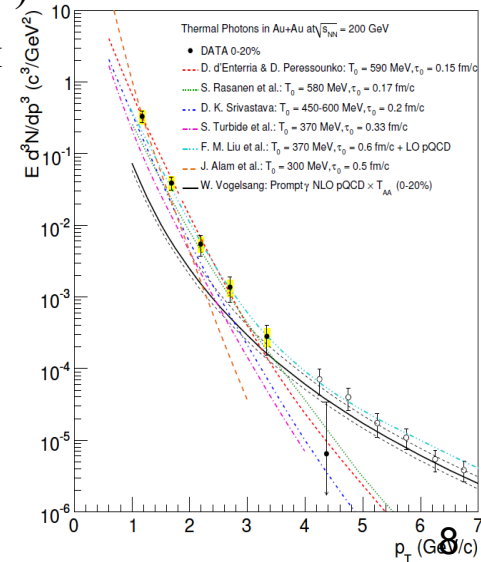
- Инклюзивный спектр фотонов в основном состоит из фотонов от распадов адронов
- Важно точно измерить спектры адронов
- $p_T > 3$ ГэВ/с жесткие фотоны
- $R_\gamma > 2\%$

PHENIX (RHIC), Au+Au 200 ГэВ

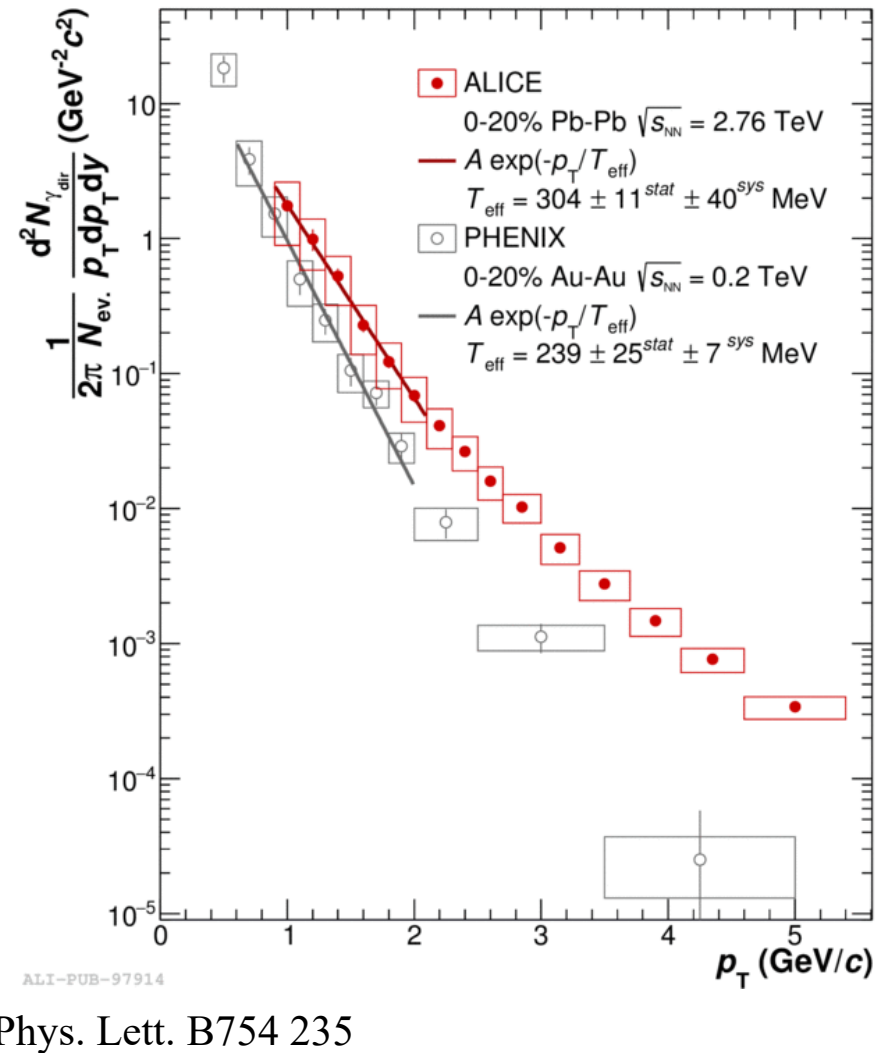
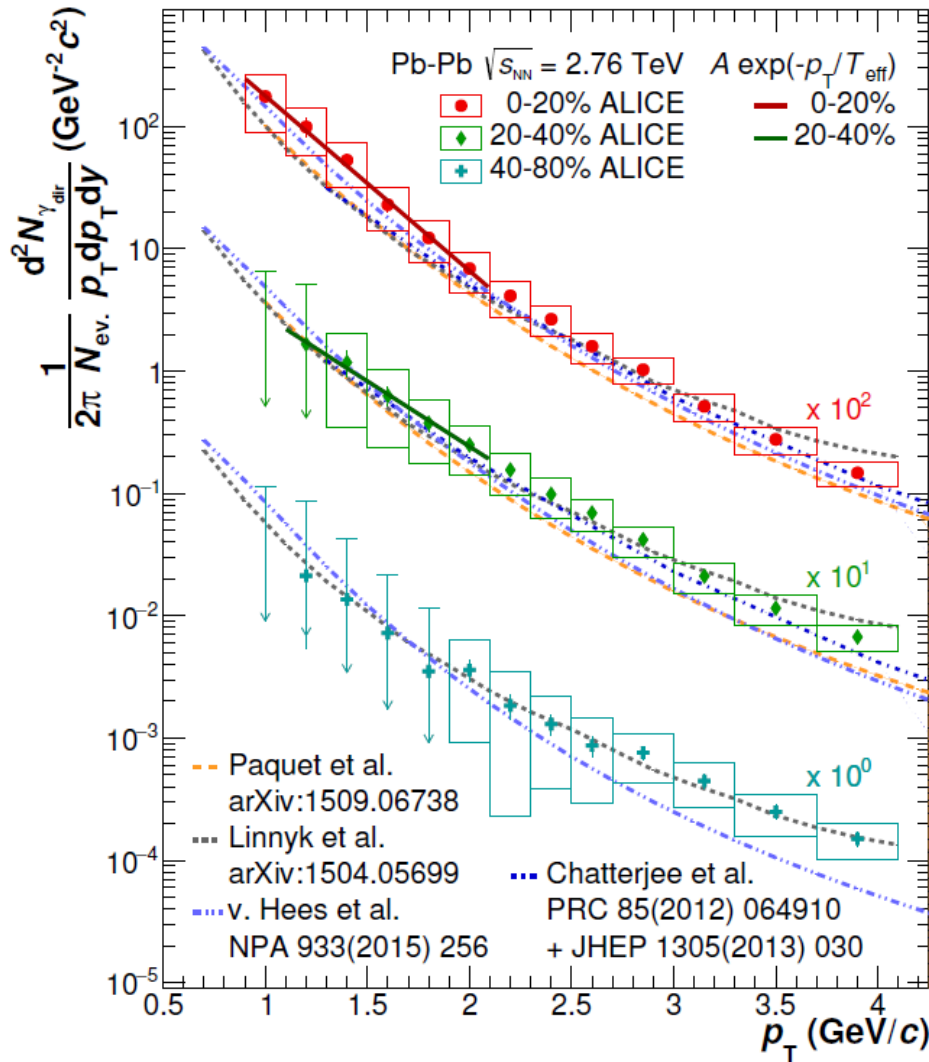


Phys. Rev. Lett. 104, 132301

- Сечение $p+p$ аппроксимировано функцией $A_{pp}(1 + p_T^2/b)^{-n}$
- Сплошные цветные линии – результат pQCD расчётов
- Сплошные черные – $Ae^{-p_T/T}$ (малые p_T) + $T_{AA} \times A_{pp}(1 + p_T^2/b)^{-n}$ (большие p_T)
- Избыточный выход при $p_T < 4$ ГэВ/с
- $T_{\text{eff}} = 221 \pm 19^{\text{стат}} \pm 19^{\text{сист}}$ МэВ
- параметр T_{eff} не является чётко определённой температурой среды
- описывается гидродинамическими моделями $T_0 = 300 - 600$ МэВ ($T_c \sim 170$ МэВ)
- Конверсия + калориметрия



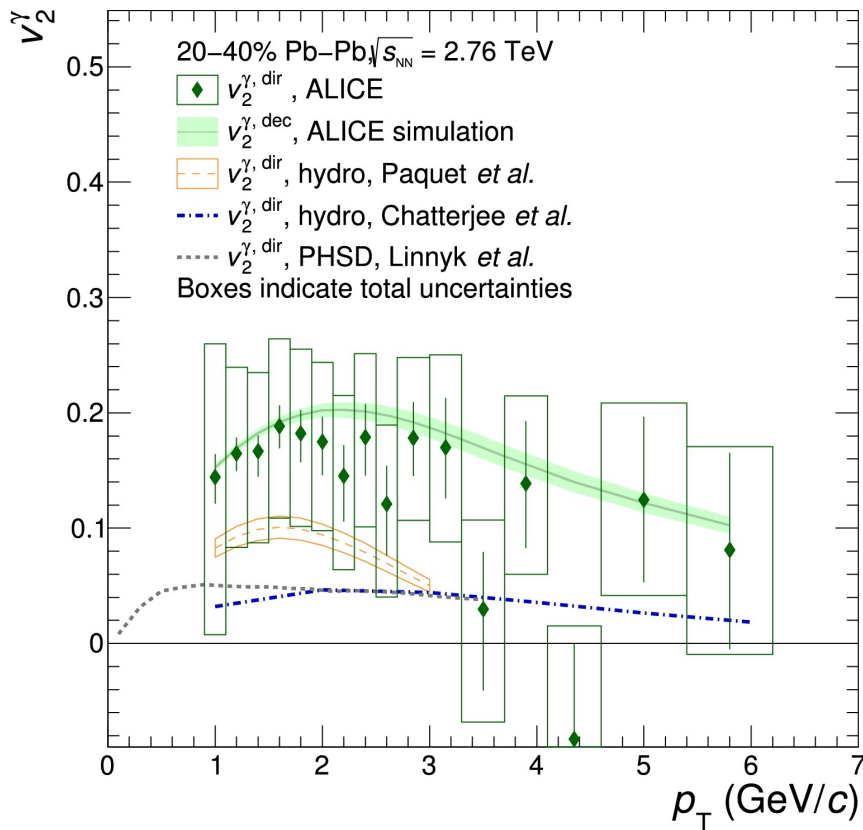
ALICE (LHC), Pb+Pb 2,76 TэВ



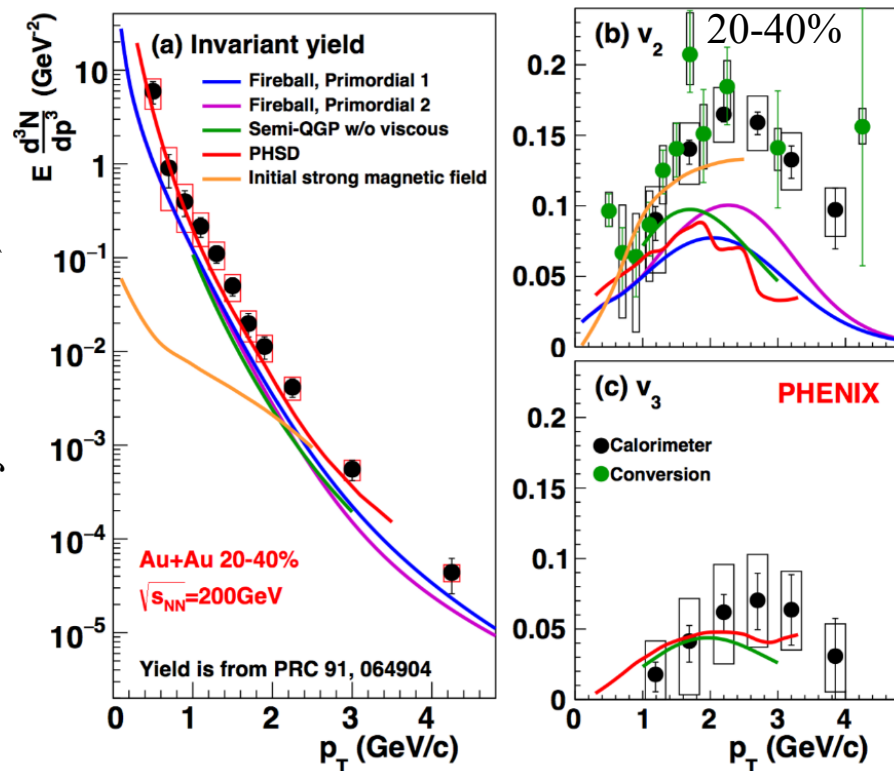
- Избыточный выход при $p_T < 3$ ГэВ/с
- $T_{eff} = 297 \pm 12^{стат} \pm 41^{сист}$ МэВ, занесено в Книгу рекордов Гиннеса
- Конверсия + калориметрия

Потоки v_2 и v_3 , RHENIX и ALICE

Phys. Lett. B789, 308



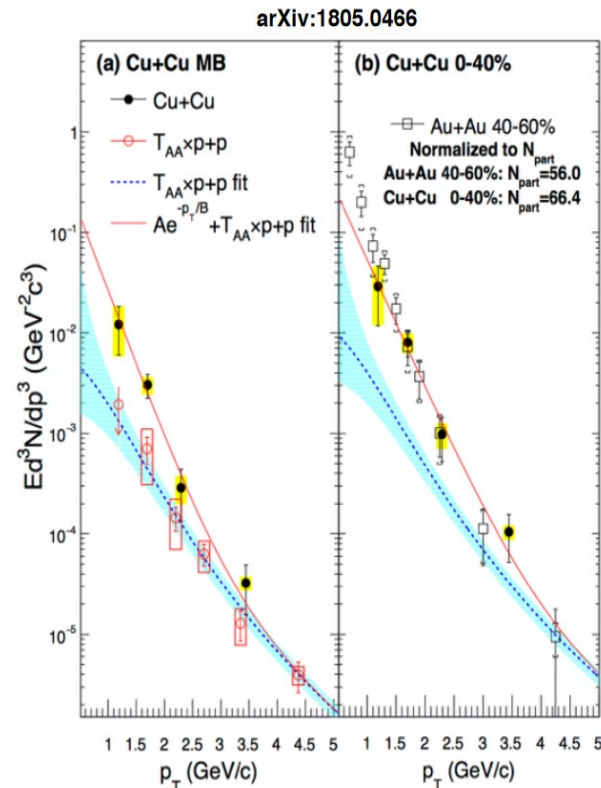
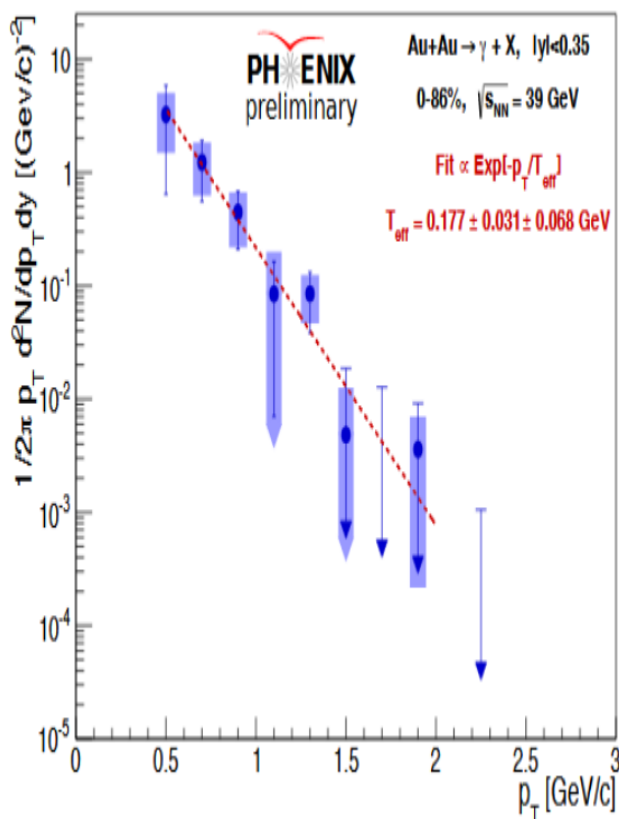
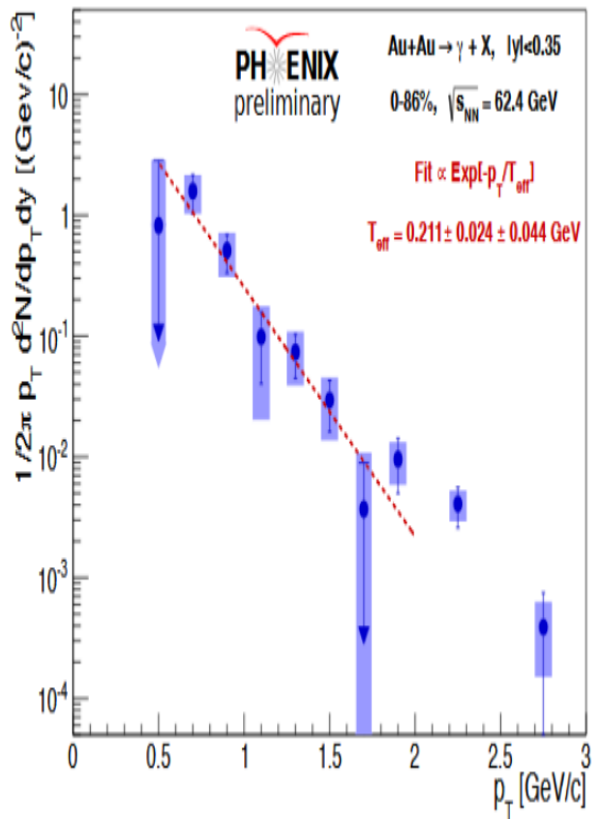
Phys. Rev. C94, 064901



$$v_n^{dir} = \frac{R_\gamma v_n^{inc} - v_n^{dec}}{R_\gamma - 1}$$

- Эллиптический поток как у адронов в области $p_T < 4-6$ ГэВ/с и ~ 0 в области $p_T > 4-6$ ГэВ/с
- Эллиптический поток в ALICE такой же как и в RHENIX
- Загадка прямых фотонов:
 - Большой выход – излучение на ранних стадиях, где температура максимальна
 - Большой поток – излучение на поздних стадиях, где температура минимальна

PHENIX (RHIC), BES

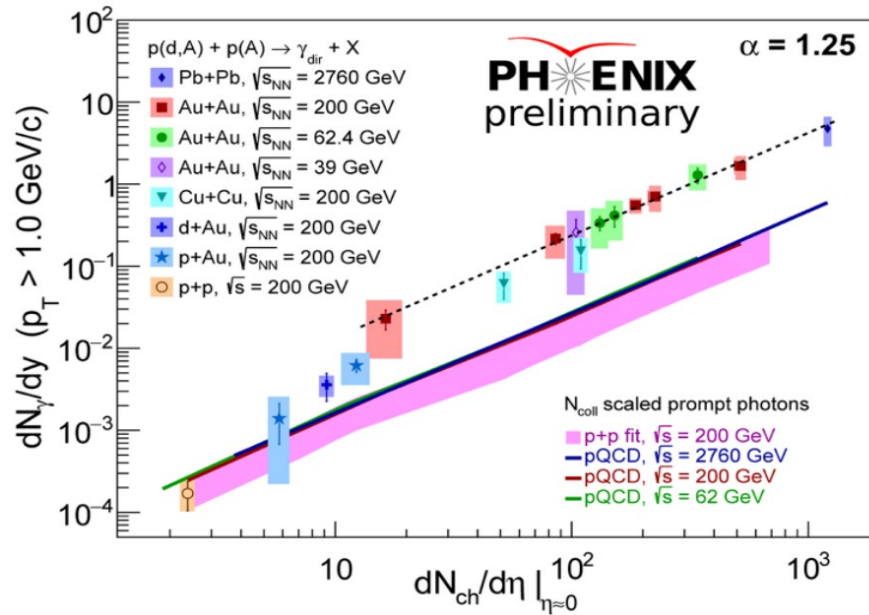


10.3390/proceedings2019010032

Phys. Rev. C 98, 054902

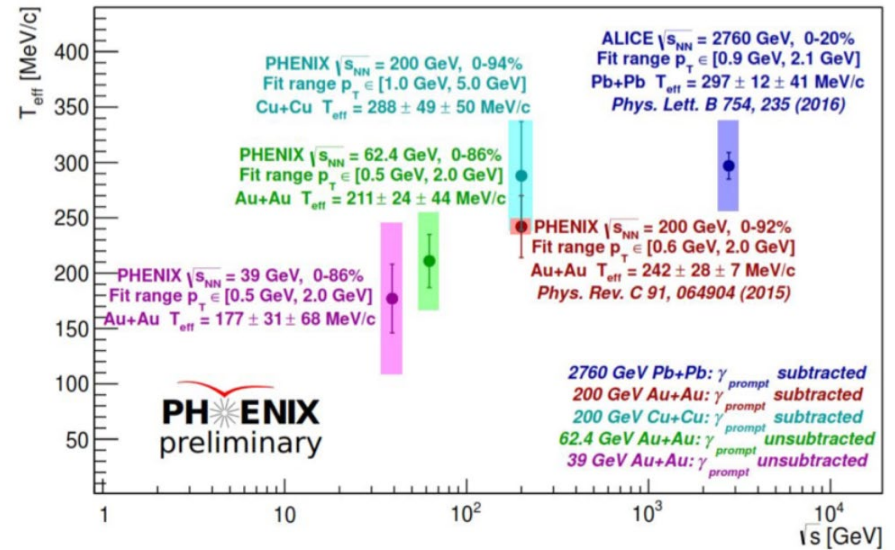
- $T_{\text{eff}} = 333 \pm 72^{\text{стат}} \pm 45^{\text{сист}}$ МэВ, Cu+Cu 200 ГэВ
- $T_{\text{eff}} = 211 \pm 24^{\text{стат}} \pm 44^{\text{сист}}$ МэВ, Au+Au 62,4 ГэВ
- $T_{\text{eff}} = 177 \pm 31^{\text{стат}} \pm 68^{\text{сист}}$ МэВ, Au+Au 39 ГэВ

Сканирование по энергии



Phys. Rev. Lett. 123, 022301

- Интегральные выходы прямых фотонов описываются функцией $(dN_{ch}/d\eta)^{1,25}$



J. Phys.: Conf. Ser. 1070 012012

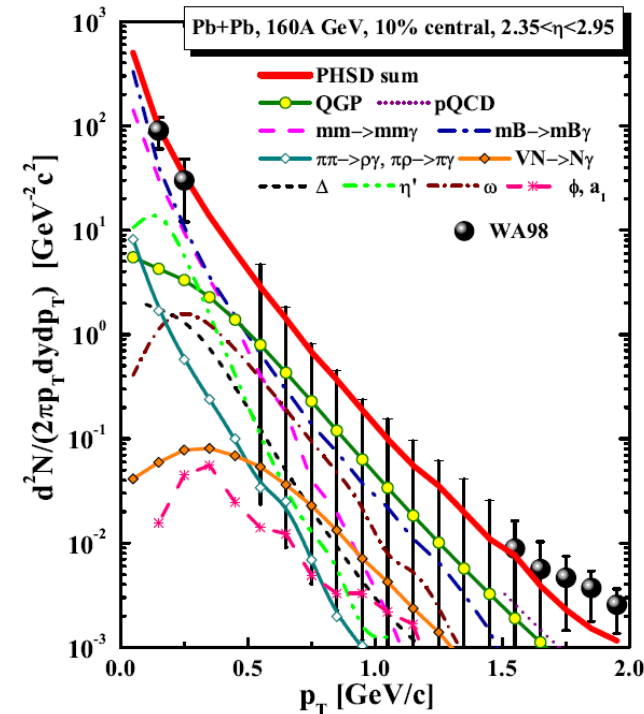
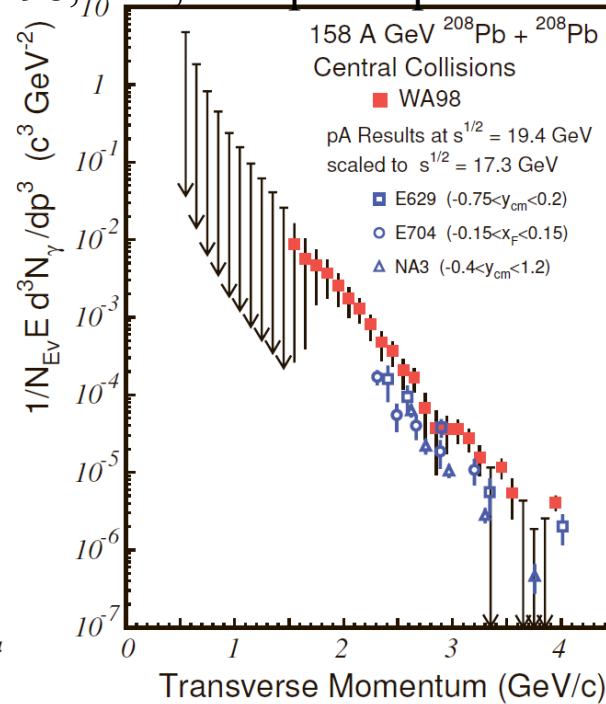
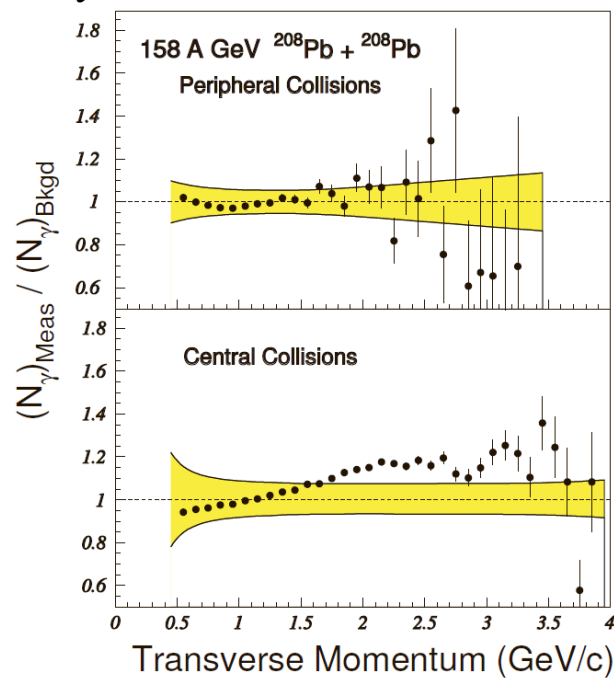
- T_{eff} возрастает с энергией
- Нужны измерения в области меньших энергий

Эксперименты с неподвижной мишенью

Эксперимент	Пучок	Мишень	Метод
NA34	p, ^{16}O и ^{32}S (200 АГэВ)	W и Pt	Конверсия
WA80	p, ^{16}O и ^{32}S (60 и 200 АГэВ)	C и Au	Калориметрия
NA45	^{32}S (200 АГэВ)	Au	Конверсия
E855	p (18 ГэВ/с)	Be и W	Калориметрия

- SPS, AGS, FNAL
 - Не удалось извлечь спектр тепловых фотонов, большой фон
- Phys. Rev. C92, 054914

Phys. Rev. Lett. 85, 3595 WA98, SPS, калориметр

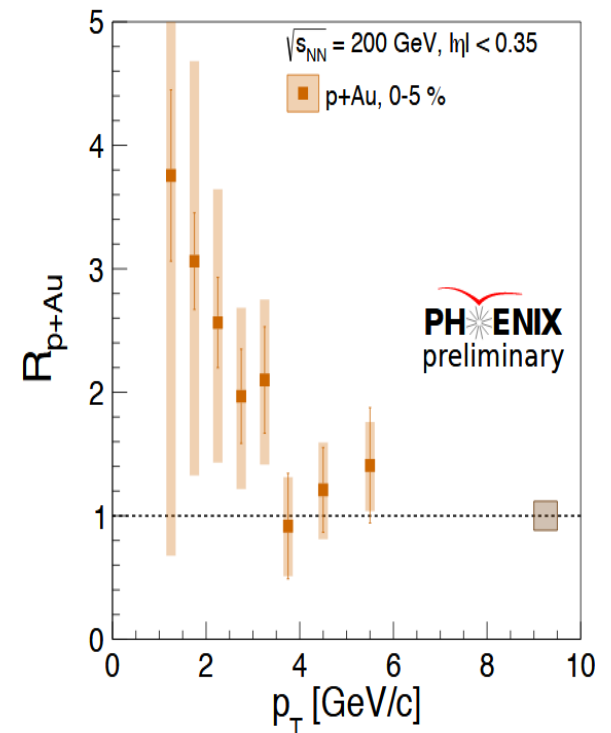


• $R_\gamma > 1$ в области 2 – 3,5 ГэВ/с, большие систематические ошибки

• Верхняя граница в области $p_T < 2$ ГэВ/с, избыточный выход, возможен вклад от адронного газа

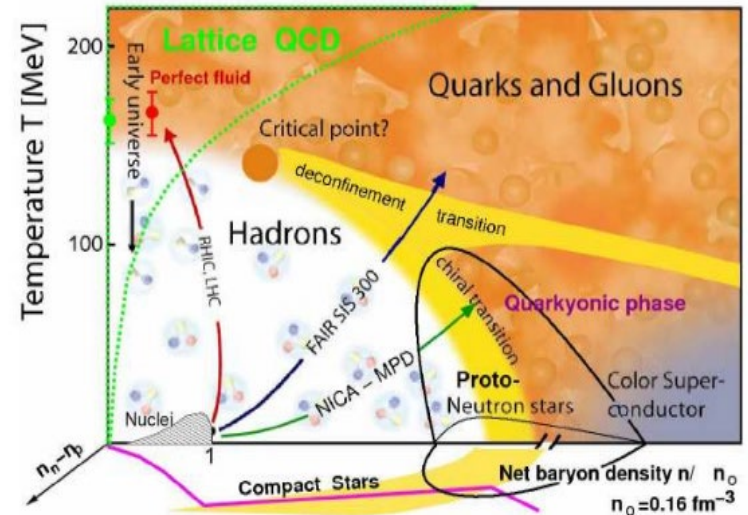
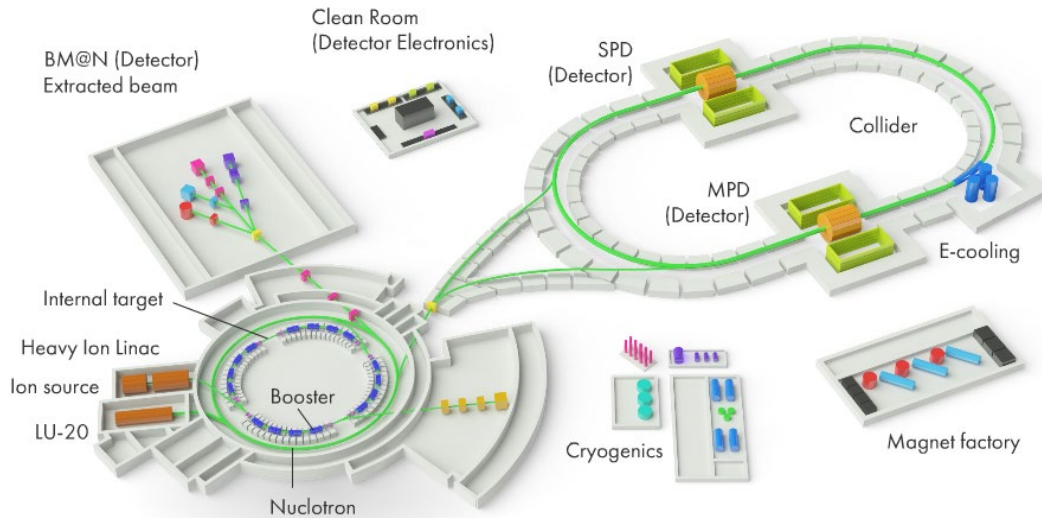
Важность изучения тепловых фотонов

- Измерить рождение тепловых фотонов удалось в широкой области энергий для различных сталкивающихся систем
- Необходимо измерение рождения тепловых фотонов при меньших энергиях и больших светимостях на ускорителях NICA и FAIR
- По опыту предыдущих экспериментов измерение тепловых фотонов возможно при $R_\gamma \sim 2\%$, что достижимо на ускорителе NICA в эксперименте MPD



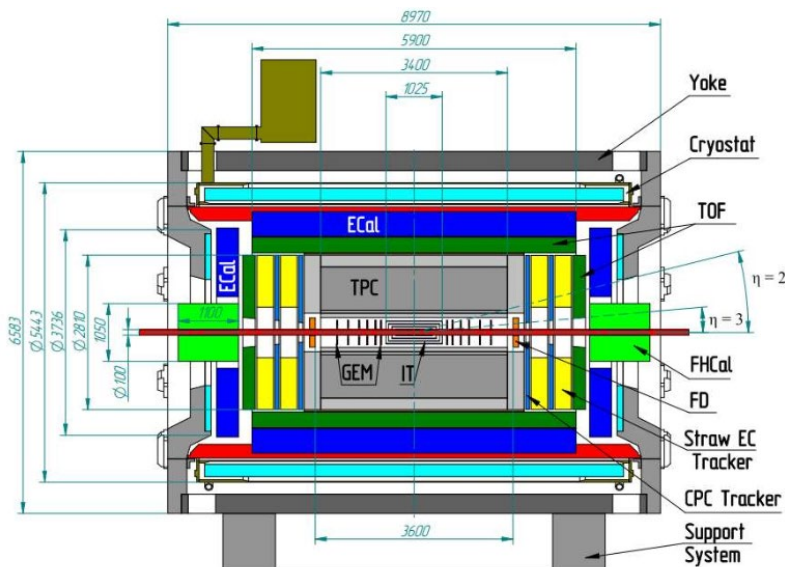
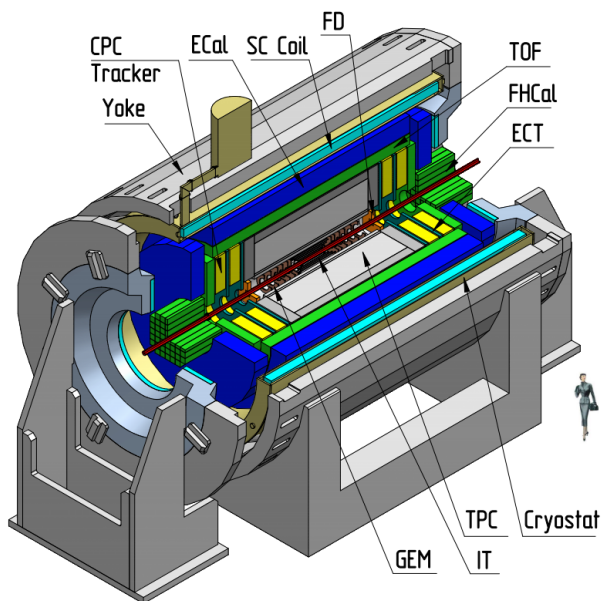
Возможность измерения тепловых фотонов в эксперименте MPD на ускорителе NICA

Ускорительный комплекс NICA

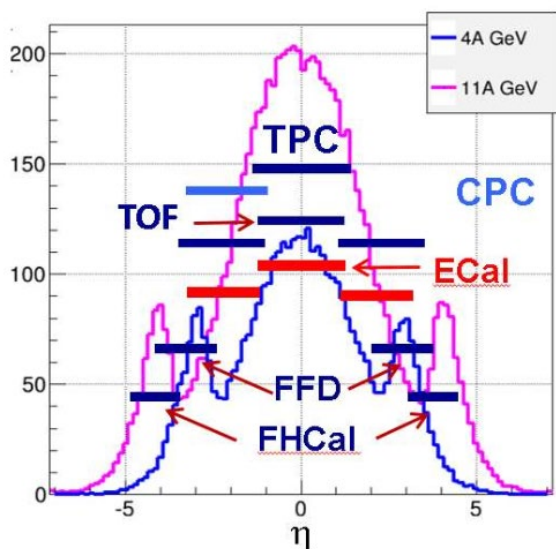


- Мегасайенс-проект «Комплекс NICA», г. Дубна, ОИЯИ
- Строится на базе синхротрона «Нуклотрон»
- Параметры:
 - ✓ релятивистские ионы вплоть до ядер Au с энергией $\sqrt{s_{NN}} = 4-11$ ГэВ
 - ✓ поляризованные p и d с энергией $\sqrt{s_{NN}} = 27$ ГэВ (для p)
 - ✓ Светимость $10^{27} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$
- Работающий эксперимент: BM@N
- Строящиеся эксперименты: MPD и SPD
- Запуск: 2022 г.
- Изучение фазовой диаграммы в области высоких барионных плотностей и умеренных температур
- Расширение программ по исследованию столкновений тяжёлых релятивистских ядер на LHC и RHIC в область малых энергий

Детектор MPD



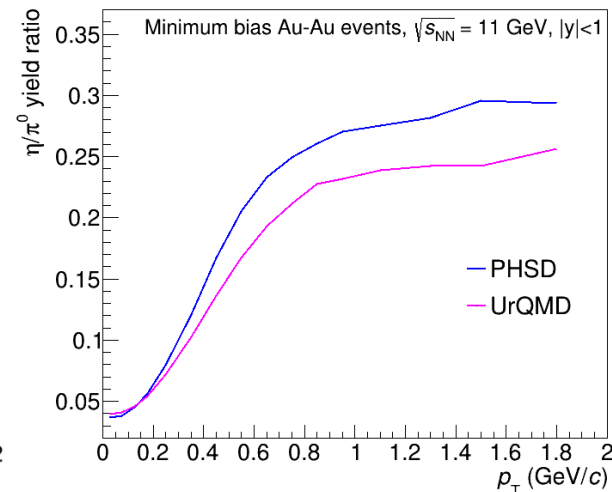
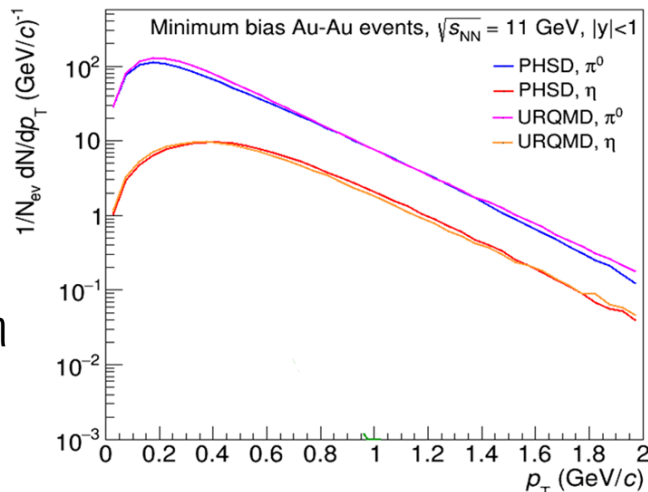
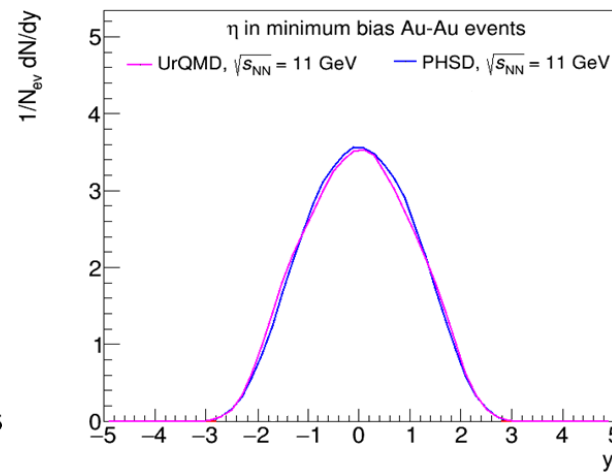
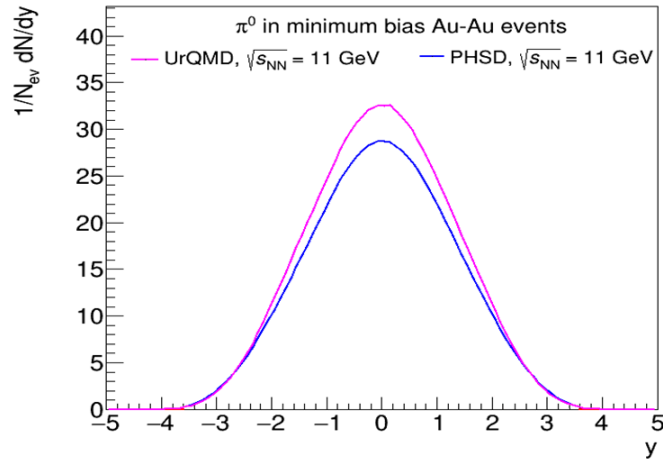
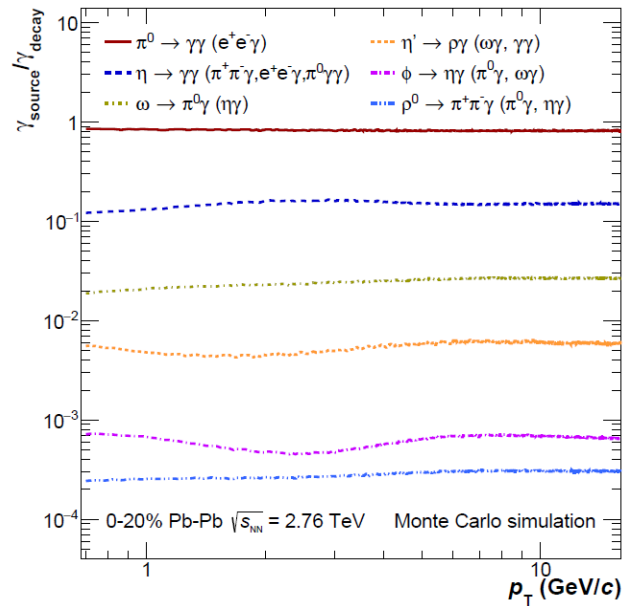
- 4 π спектрометр (заряженные адроны, электроны и фотоны)
- Частота событий 6 кГц
- Максимальная множественность заряженных частиц ~ 1000
- Минимум материала
- Трекинг: TPC (фаза 1) + внутренний трекер IT (фаза 2)
- Сверхпроводящий магнит, однородное магнитное поле 0,5 Тл
- Идентификация: TPC + TOF + ECAL (аналогично ALICE)
- Центральность, плоскость события, триггер: FHCal и FFD



Предсказания теоретических моделей π^0 и η

- $\pi^0, \eta \rightarrow \gamma\gamma$, основные источники фона, апробация методики
- Два популярных генератора событий UrQMD и PHSD, используются в CERN и GSI
- Au + Au столкновения при $\sqrt{s_{NN}} = 11$ ГэВ

Относительный вклад адронов в спектр фотонов распада



- 90% - распады π^0 , 10 % распады η
- Важно точно измерить рождение (спектры, эллиптические потоки и т.д.) π^0 и η

Восстановление π^0 и η

- $\pi^0, \eta \rightarrow \gamma\gamma$
- Метод конверсии $\gamma \rightarrow (e^+e^-)$ в области малых p_T , калориметрия в области больших p_T
- Два метода – проверка достоверности
- UrQMD 3.4 (по умолчанию) Au + Au столкновения при $\sqrt{s_{NN}} = 11$ ГэВ
- Восстановление треков и отклик подсистем в MPDROOT (основан на Geant)
- Конфигурация MPD без IT

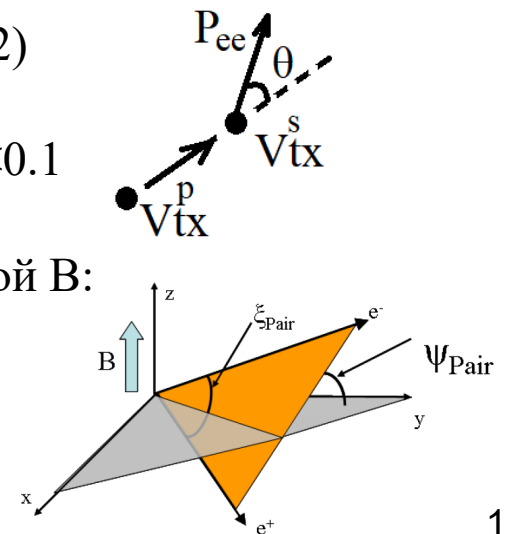
Кандидаты в электроны/позитроны:

- $p_T > 75$ МэВ/с
- Как минимум 10 хитов в TPC
- Идентификация как электрон/позитрон в TPC и TOF

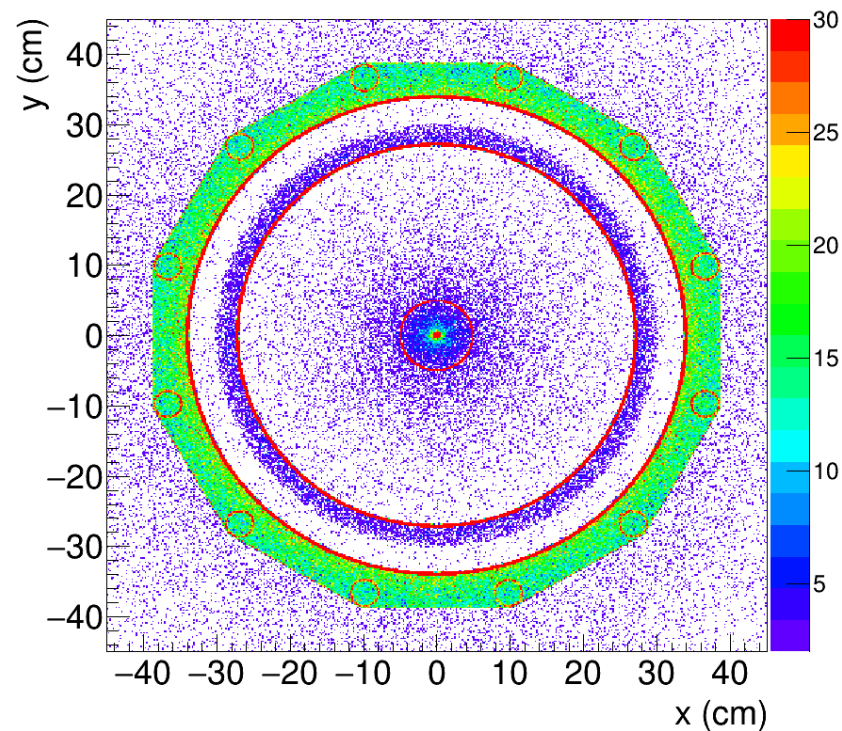
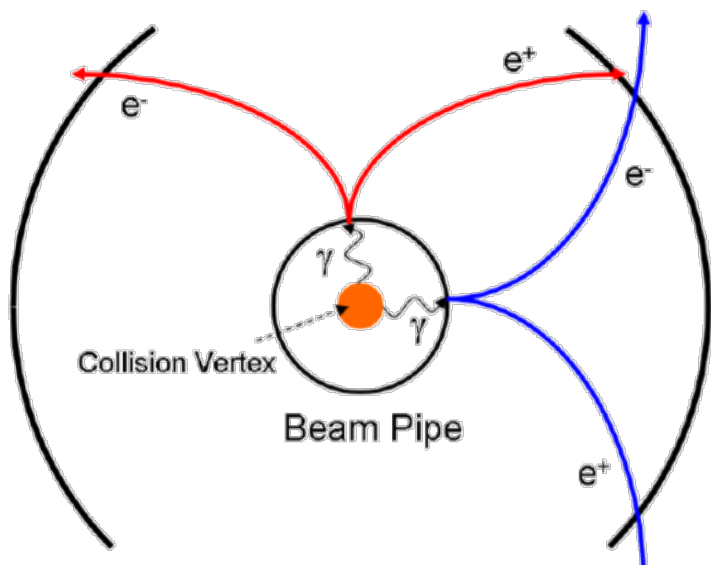
Кандидаты в фотоны $\gamma \rightarrow (e^+e^-)$, критерии отбора e^+e^- пар:

- Наибольшее сближение со вторичной вершиной DCA ($\chi^2 < 2$)
- Расстояние до вторичной вершины $R > 1$ см
- Направление импульса реконструированного фотона $\sin(\theta) < 0.1$
- $m_{ee} < 100$ МэВ/с²
- Угол между e^+e^- плоскостью и плоскостью перпендикулярной В:
 $\Psi_{Pair} < 0,2$ рад

Кандидаты в $\pi^0, \eta \rightarrow (\gamma\gamma)$



Центры конверсии фотонов



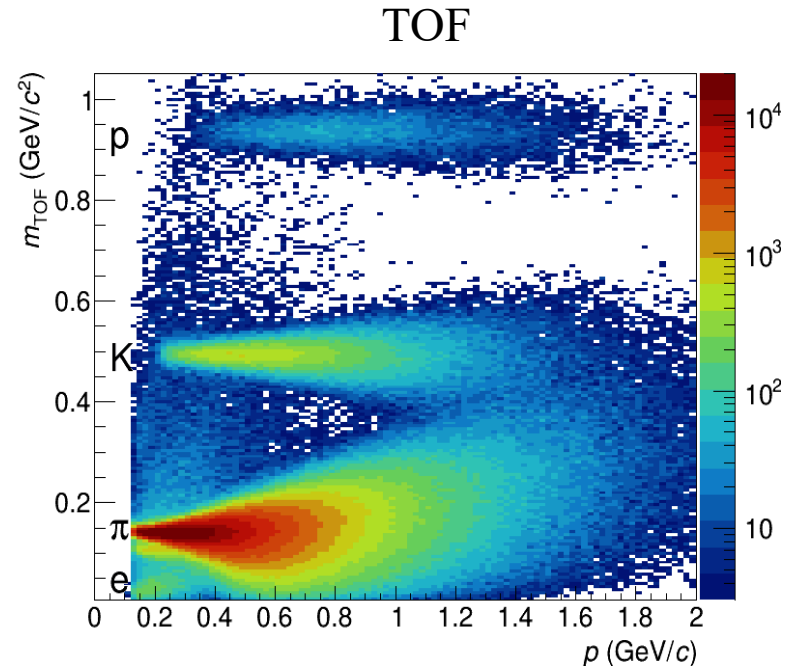
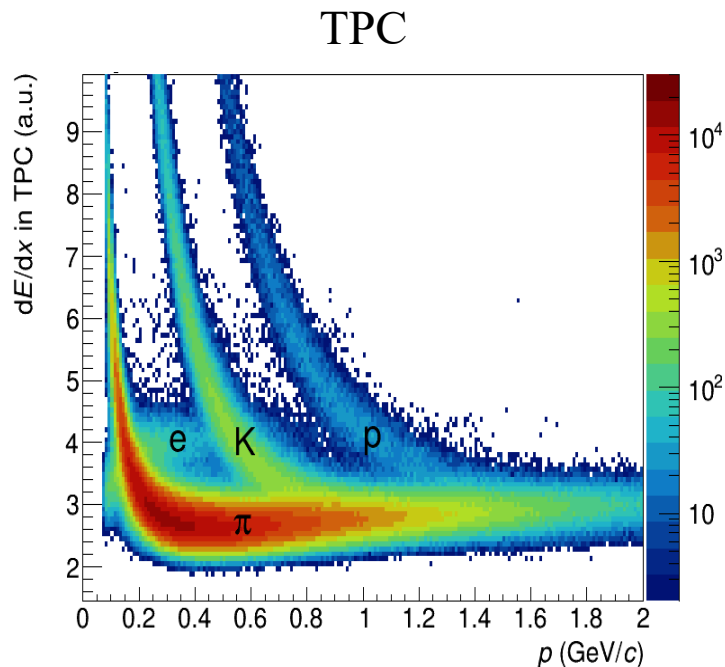
Конверсия фотонов будет происходить в:

- Внутренних структурах ТРС
- Пучковой трубе (гораздо меньше)

В будущем добавятся:

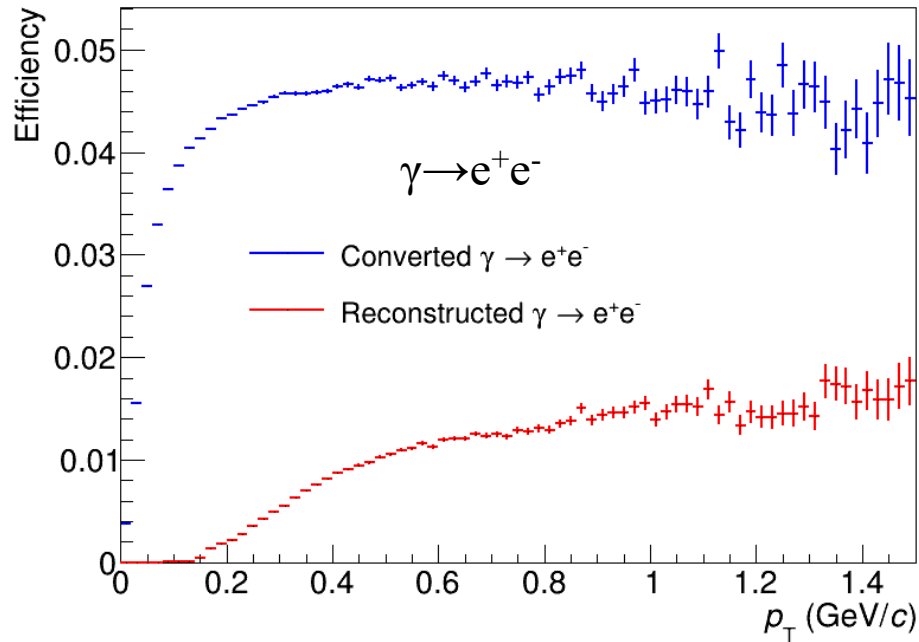
- Внутренний трековый детектор
- Исследуется возможность установки дополнительного конвертера (цилиндрическая металлическая труба)

Идентификация электронов

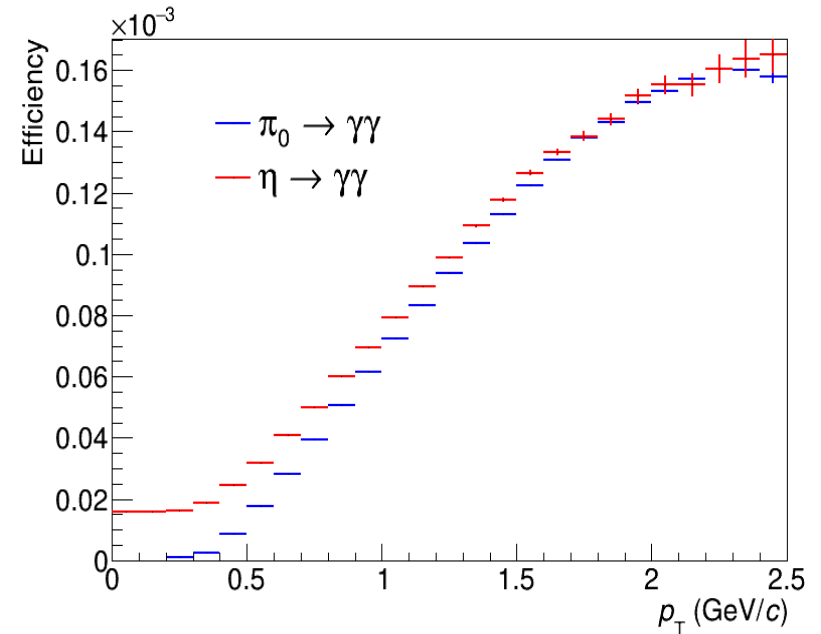


- TPC: dE/dx : 0,2 – 0,5 GeV/c , разрешение 6-8%
 $\delta p/p \sim 2\%$
- TOF: $p_T < 0,3 \text{ GeV}/c$, разрешение 60 – 100 пс
- Изучается возможность использовать ECA1

Эффективности восстановления



- Вероятность конверсии $\sim 5\%$
- Эффективность восстановления $\gamma \sim 1\%$



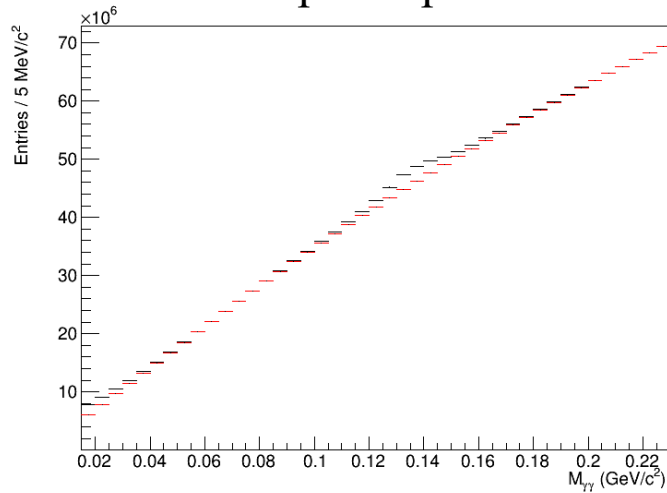
- $\pi, \eta \rightarrow \gamma\gamma \rightarrow (e^+e^-)(e^+e^-)$
- $\text{Eff}_{\pi,\eta} \sim \text{Eff}_{\gamma}^2$
- Эффективность восстановления $\pi, \eta \sim 10^{-4}$

Изучается возможность увеличить эффективности восстановления – алгоритмы, вершина и т.д.

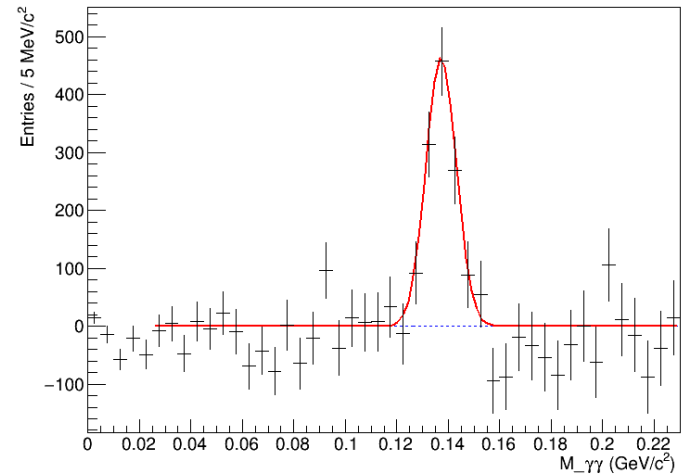
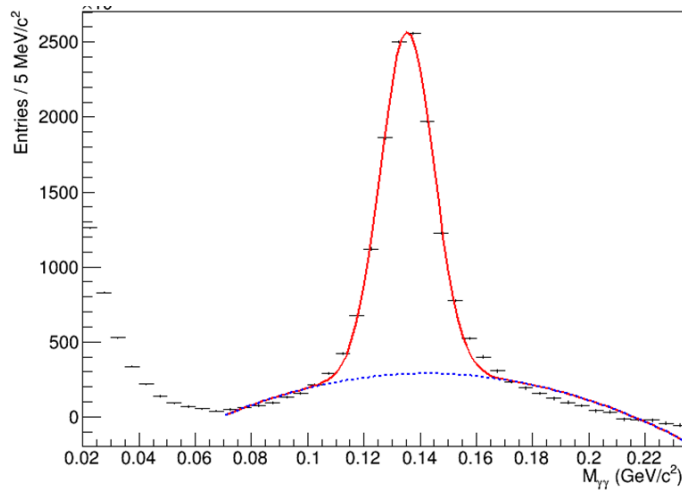
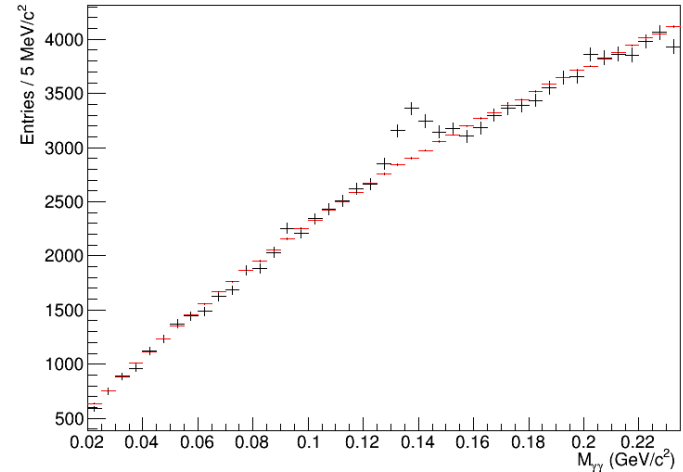
Калориметрия vs Конверсия, пик

$p_T \sim 0,75$ ГэВ/с

Калориметрия

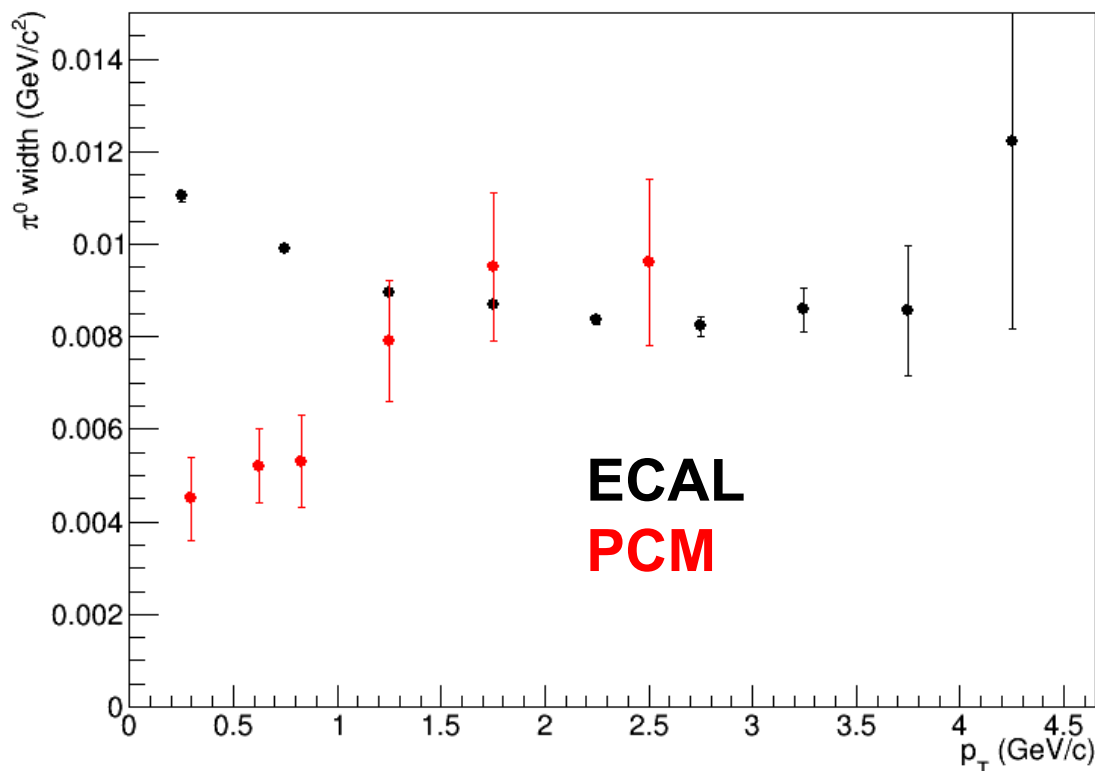


Конверсия



- Калориметрия – большая эффективность, не требователен к размеру выборки
- Конверсия – лучшее отношение сигнал/фон и лучше разрешение

Калориметрия vs Конверсия, разрешение



- Конверсия (PCM) – почти в три раза лучше разрешение в области малых p_T
- Разрешение одинаково в области $p_T \sim 2$ ГэВ/с
- Калориметрия (ECAL) – разрешение лучше при $p_T > 3$ ГэВ/с

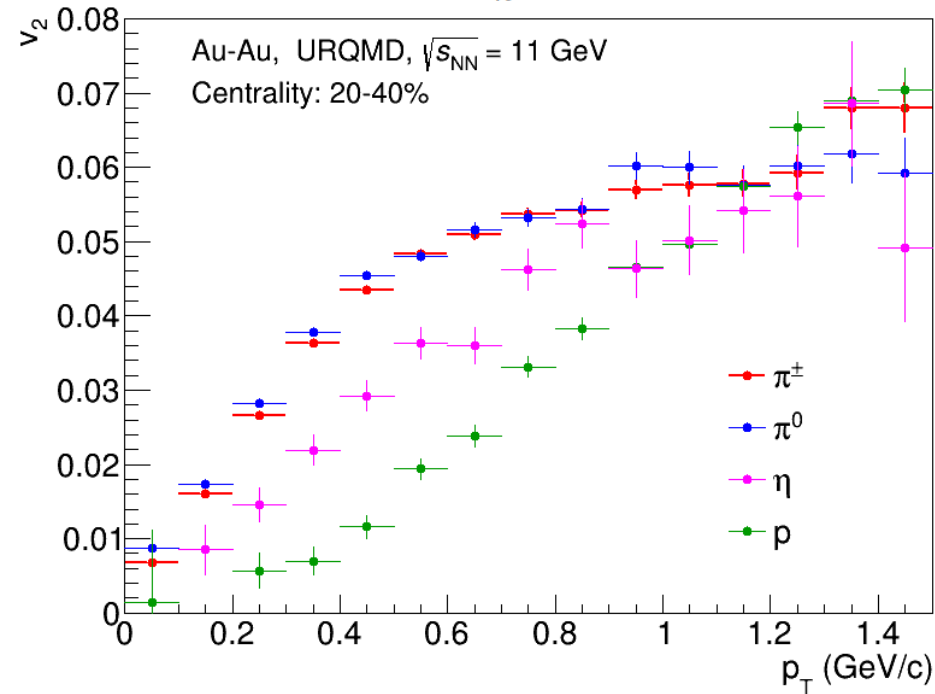
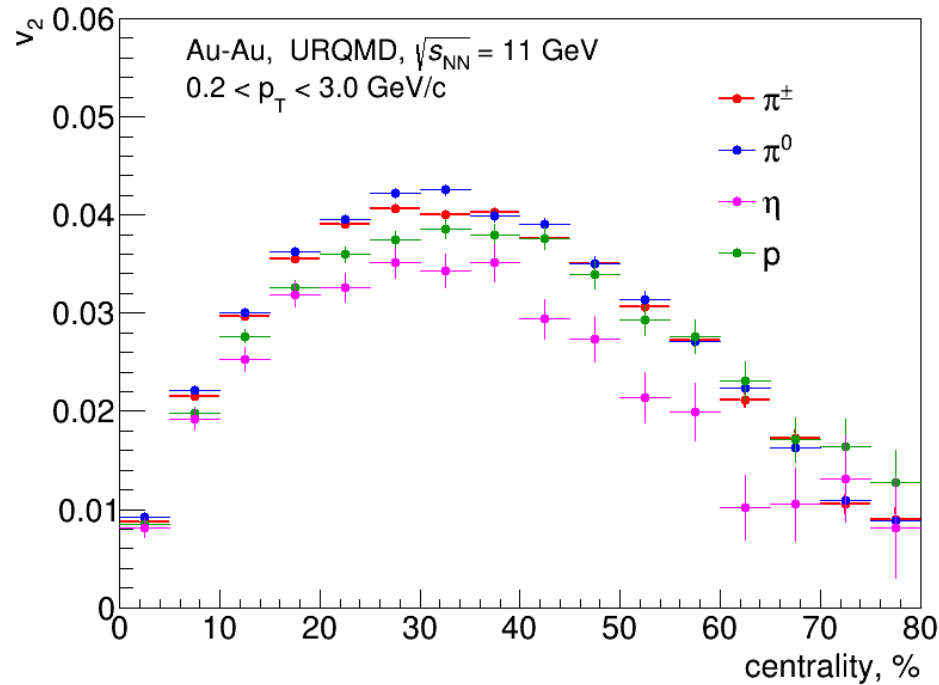
Выходы π^0 и η , конверсия, первый год

- Светимость $L \sim 5 \times 10^{25} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$
- Продолжительность 10 недель
- Эффективность работы ускорителя 50%
- \Rightarrow Будет набрано 10^9 событий без отбора по центральности
- π^0 в интервале $0,4 < p_T < 2,5 \text{ ГэВ}/c$
- η при проектной светимости $L \sim 5 \times 10^{27} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ в 2024 г.
- Увеличение выхода с установкой IT

Эллиптические потоки π^0 и η

- Исследования на уровне генератора событий (UrQMD)
- Истинная плоскость реакции

$$\frac{dN}{d\varphi} \sim 1 + 2 \sum_n v_n \cos n(\varphi - \Psi_{RP})$$



- Эллиптические потоки наблюдается для всех типов частиц
- Эллиптические потоки π^\pm и π^0 почти одинаковы
- Массовая зависимость v_2 :
 $v_2 \eta$ ($m_\pi < m_\eta < m_p$) между v_2 протонов и пионов
- Необходимо около 10^9 полу-центральных (20-40%) событий для измерения $v_2^{\pi^0}$ с точностью $\sim 10\%$ в $0,8 < p_T < 2$ ГэВ/с

Заключение

- Фотоны и нейтральные мезоны – уникальные пробники КХД материи, образующейся в столкновениях тяжёлых релятивистских ядер
- Метод конверсии фотонов является эффективным методом для измерения свойств фотонов и нейтральных мезонов в эксперименте MPD в области малых p_T
- Начальная конфигурация детектора MPD позволяет измерять рождение π^0 мезонов методом конверсии уже с первого года набора данных
- Следующие этапы:
 - Улучшение эффективности восстановления нейтральных мезонов
 - Изучение возможности восстановления тепловых фотонов
 - Восстановление эллиптических потоков фотонов
 - Изучение возможности установки дополнительного конвертера
- Необходимы теоретические оценки выхода тепловых фотонов при энергиях ускорителя NICA

Запасные слайды

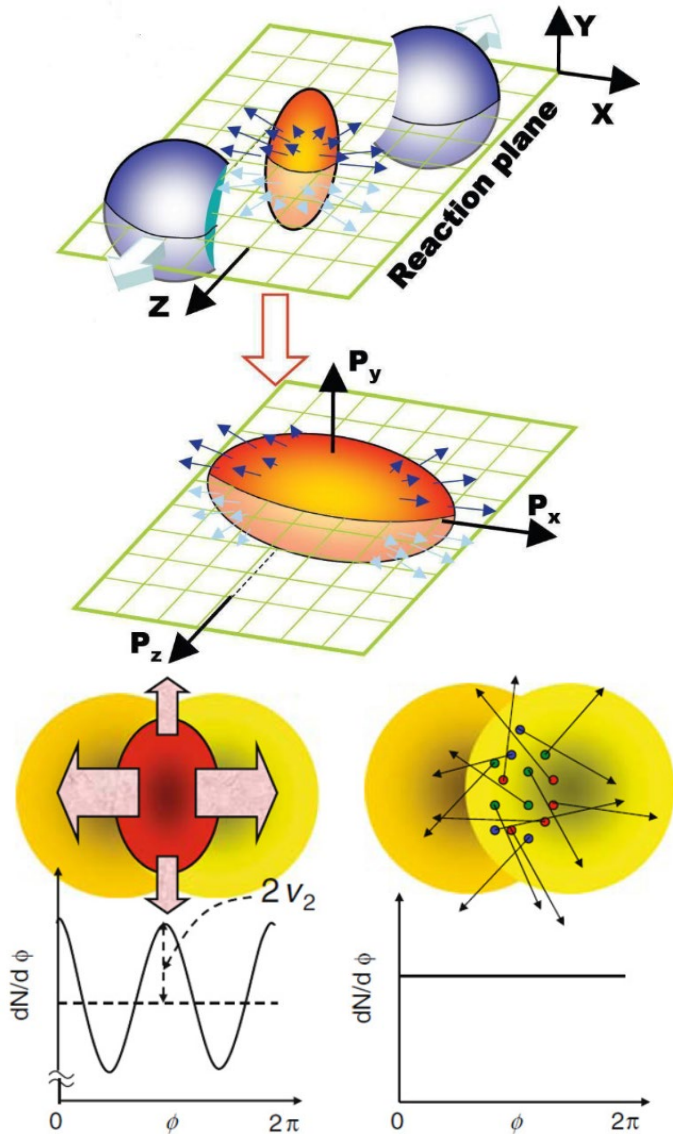
Эллиптический поток

- Плоскость реакции задаётся вектором направления оси пучка и вектором прицельного параметра \mathbf{b}
- Пространственная асимметрия приводит к анизотропии в импульсном распределении частиц
- Азимутальное импульсное распределение частиц становится анизотропным
- Распределения частиц по азимутальному углу относительно плоскости реакции раскладывается в ряд Фурье

$$E \frac{d^3N}{d^3p} = \frac{1}{2\pi p_T dp_T dy} \left(1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} v_n \cos[n(\varphi - \Psi_{RP})] \right)$$

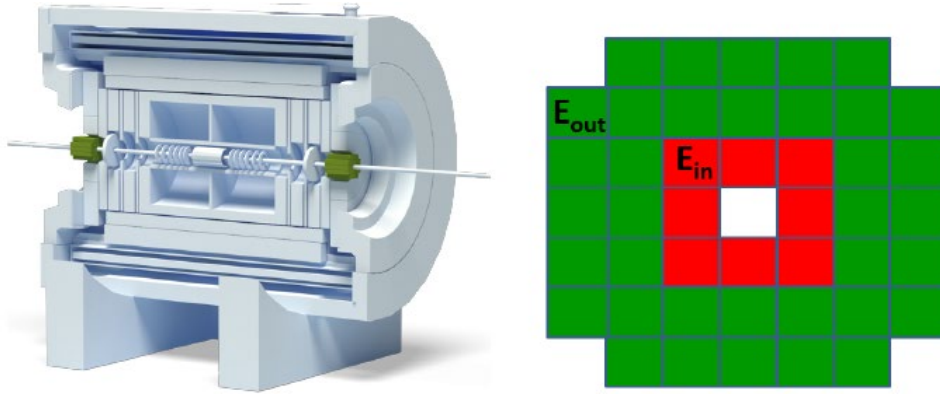
$$v_n = \langle \cos(n(\varphi - \Psi_{RP})) \rangle$$

- Эллиптический поток v_2
- Треугольный поток v_3



Измерение плоскости события

Передний адронный калориметр FHCAL



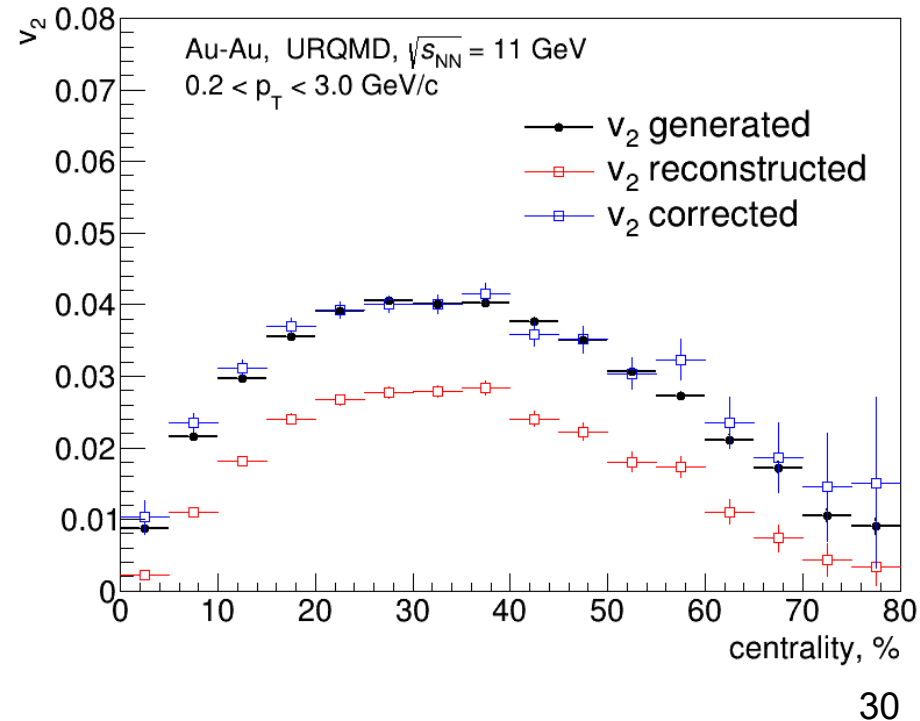
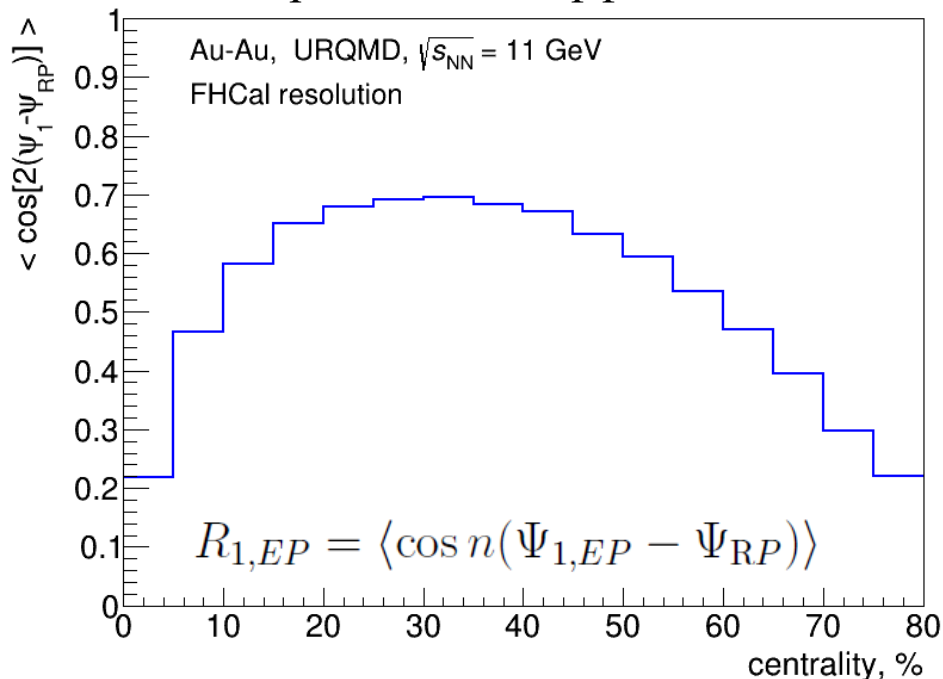
- Плоскость события

$$\Psi_{1,EP}^{L(R)} = \arctan \left(\frac{\sum E_i \sin \varphi_i}{\sum E_i \cos \varphi_i} \right)$$

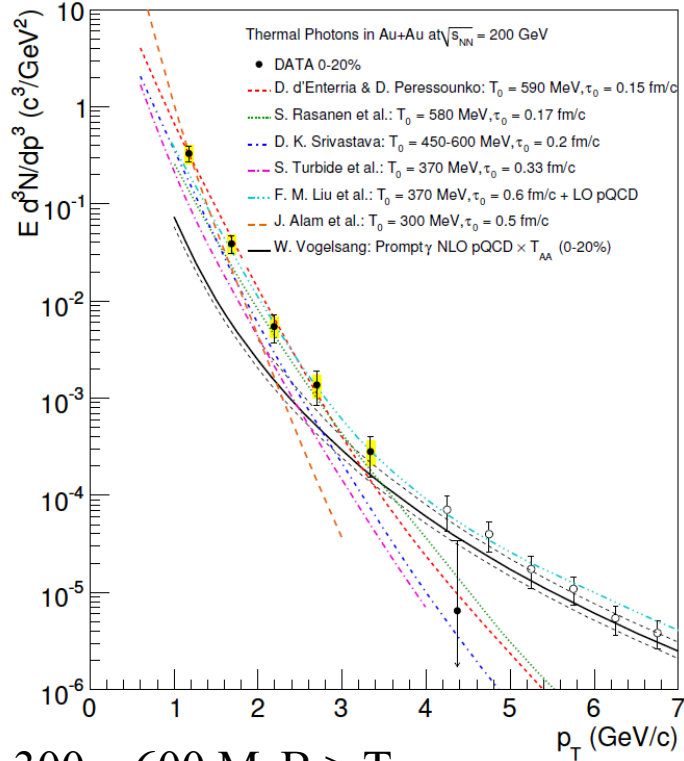
- Коррекция v_n с учётом разрешения

$$v_n \{ \Psi_{1,EP} \} = \frac{\langle \cos n(\varphi - \Psi_{1,EP}) \rangle}{R_{1,EP}}$$

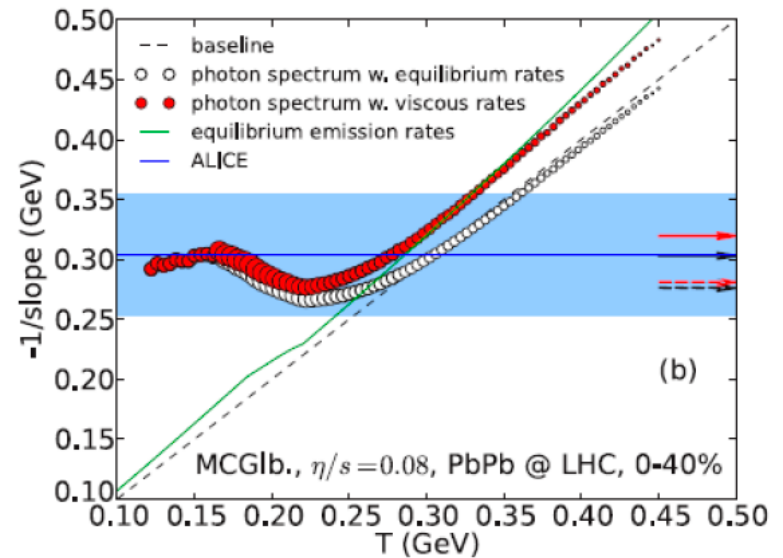
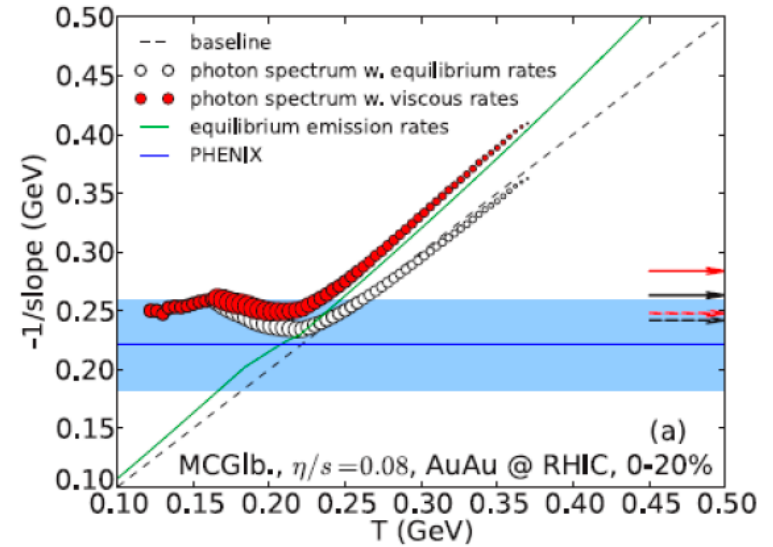
Поправочные коэффициенты



Температура среды

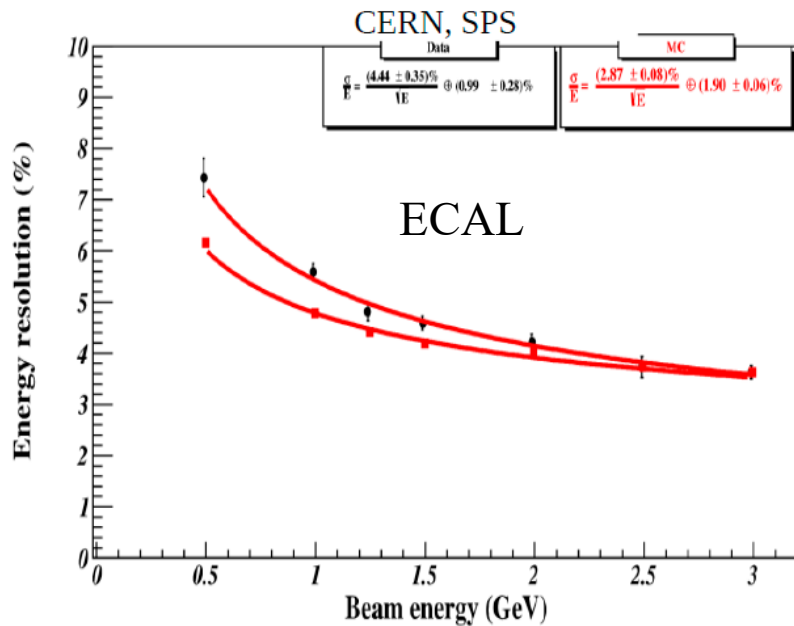
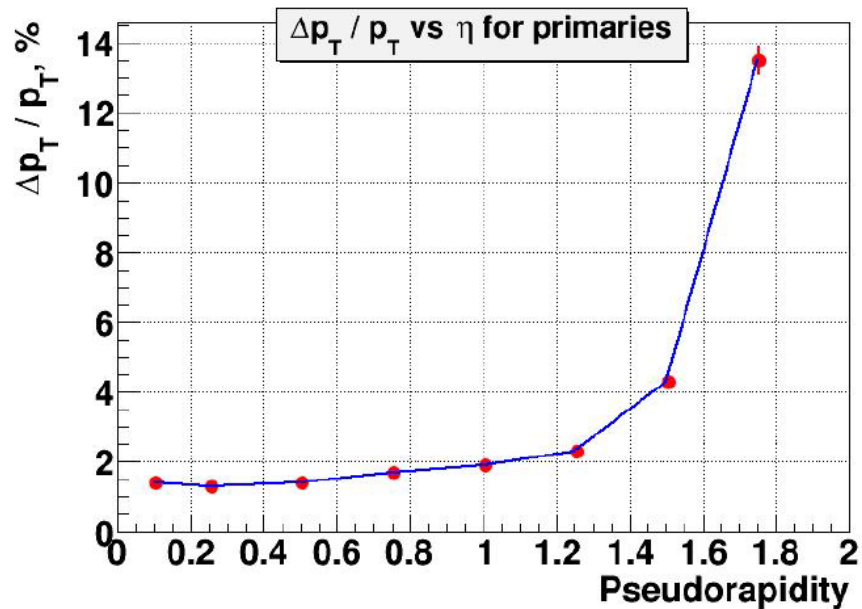
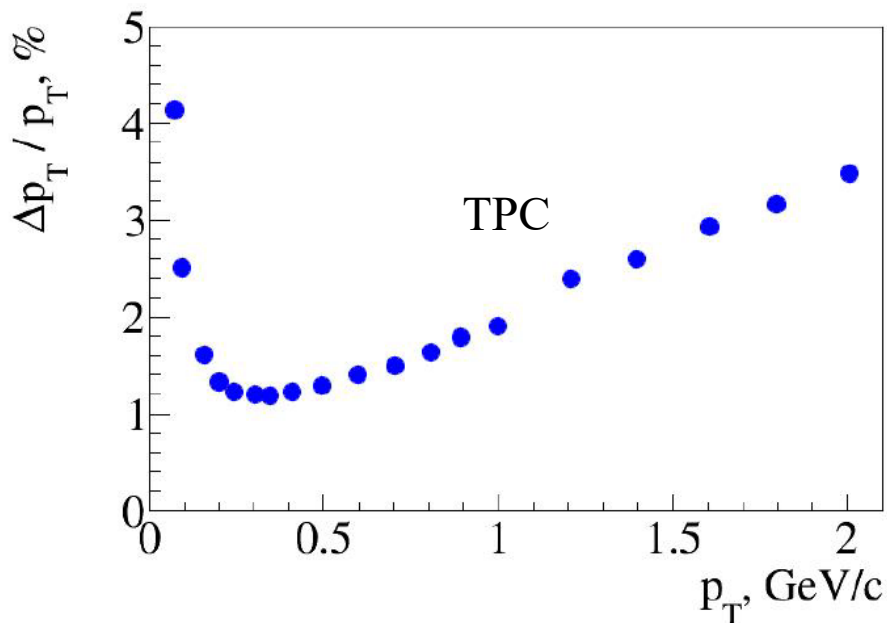


$$T_0 = 300 - 600 \text{ MeV} > T_c$$



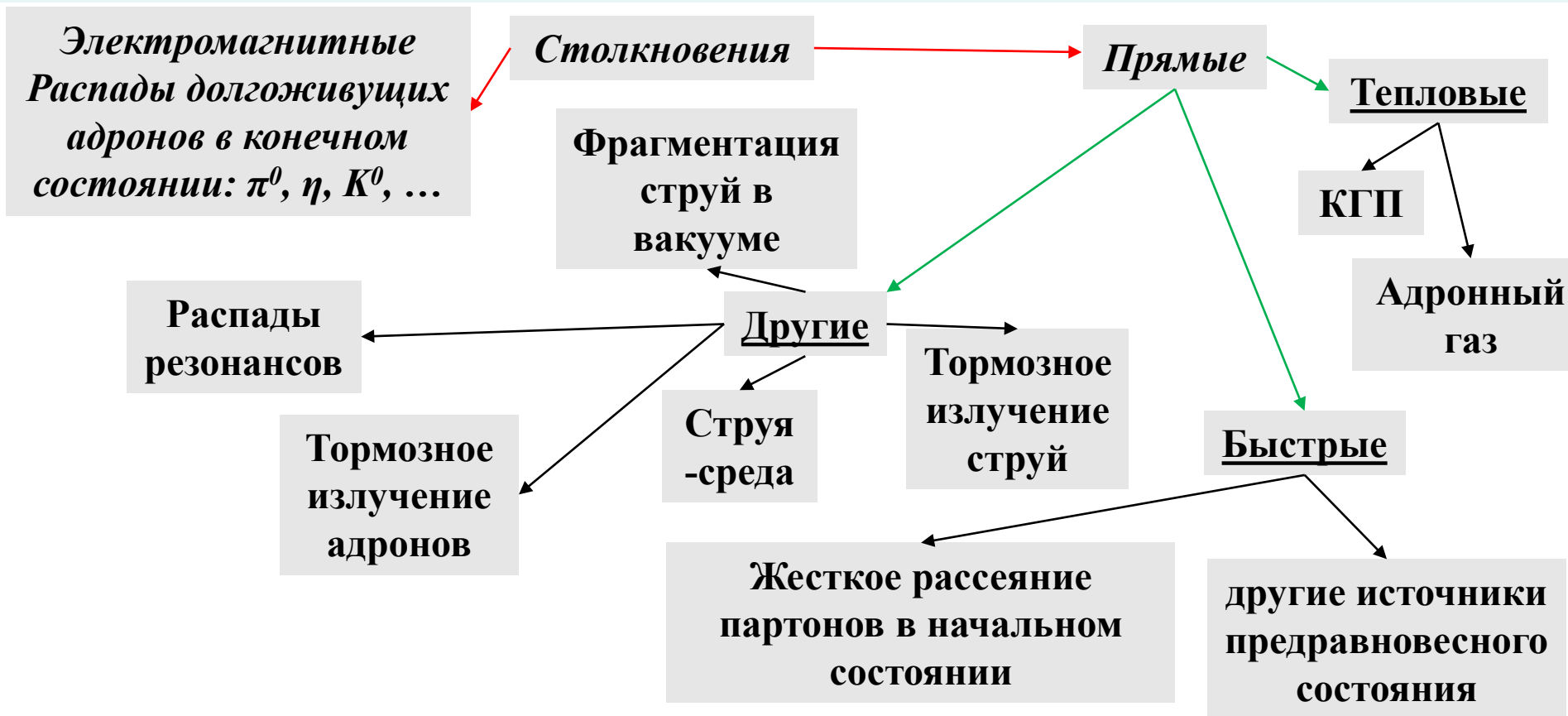
$$T_{\text{eff}} = -1/\text{slope}$$

Разрешение

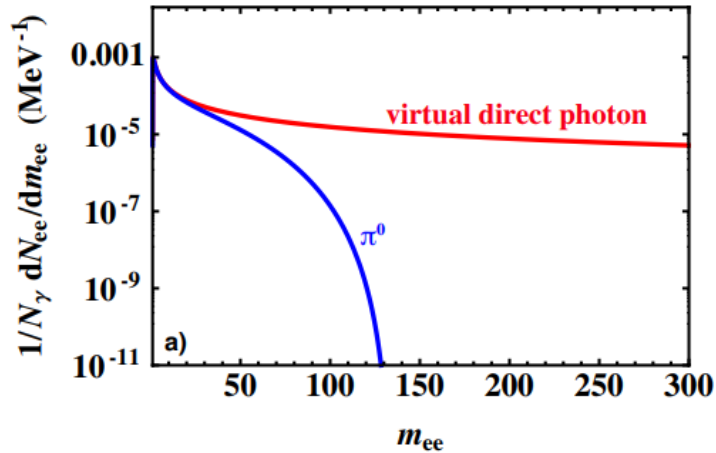


1-4 mm

Источники фотонов



Внутренняя конверсия



arXiv:0908.2382

Внутренняя $\gamma^* \rightarrow e^+e^-$, источник реальных фотонов рождает виртуальные

Формула Кролла-Вада

Phys. Rev. D51, 6017

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

расчёт числа e^+e^- в зависимости от m_{ee} для виртуальных прямых γ и виртуальных γ от распада π^0

Можно разделить фоновые вклады от π^0 и прямых γ в области $m_{ee} > m_\pi$