

Рост выхода странности и дальние корреляции в pp и p-Pb столкновениях при большой множественности

Е. Л. Крышень
Семинар ОФВЭ, 16 мая 2017

Публикация в Nature Physics

nature
physics

[Home](#) | [Current issue](#) | [Comment](#) | [Research](#) | [Archive](#) ▼ | [Authors & referees](#) ▼ | [About the journal](#) ▼

[home](#) ▶ [advance online publication](#) ▶ [full text](#)

NATURE PHYSICS | LETTER **OPEN**



Enhanced production of multi-strange hadrons in high-multiplicity proton–proton collisions

ALICE Collaboration

In high-multiplicity events strangeness production reaches values similar to those observed in Pb–Pb collisions, where a QGP is formed.

Пресс-релиз ЦЕРНа



About CERN

Students & Educators

Scientists

CERN community

Accelerators

Experiments

Physics

Computing

Engineering

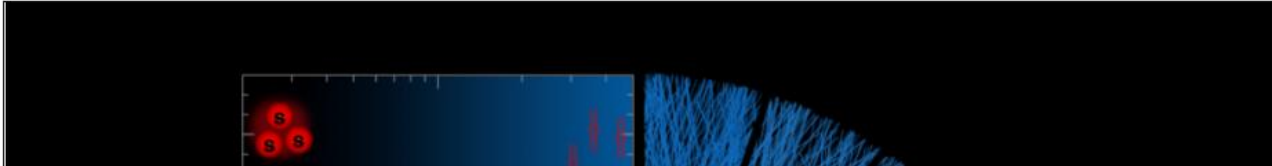
Updates

Opinion

New ALICE results show novel phenomena in proton collisions

Posted by [Harriet Kim Jarlett](#) on 24 Apr 2017. Last updated 24 Apr 2017, 17.21.

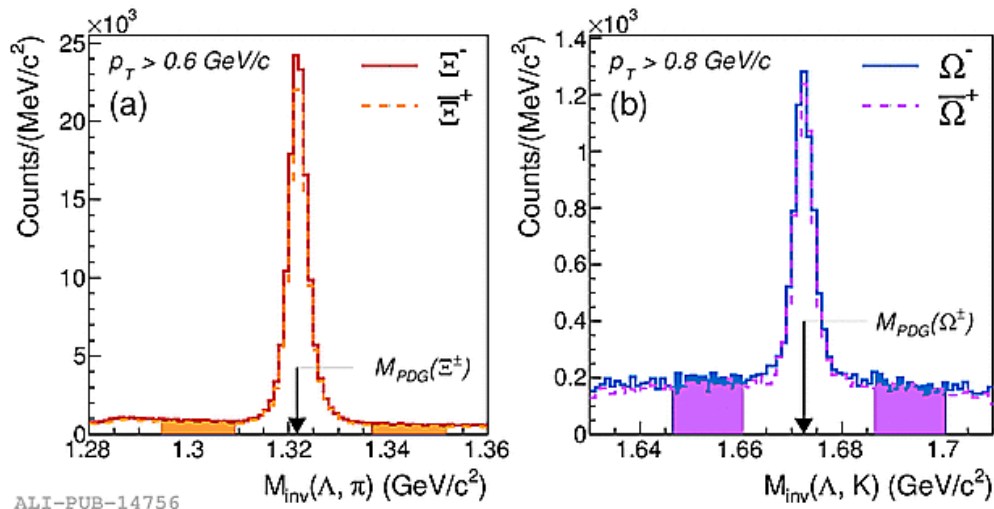
[Voir en français](#)

A visualization of the ALICE detector, showing a central region with red and blue particles and a blue, textured background.

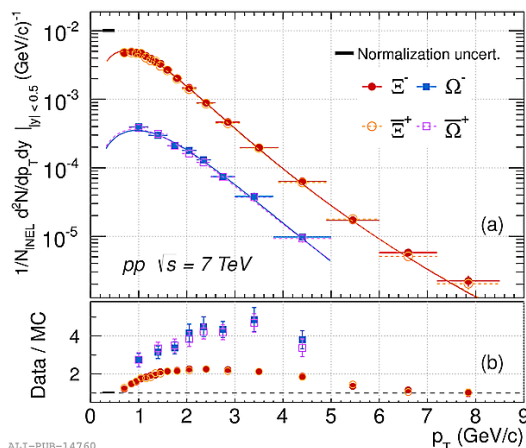
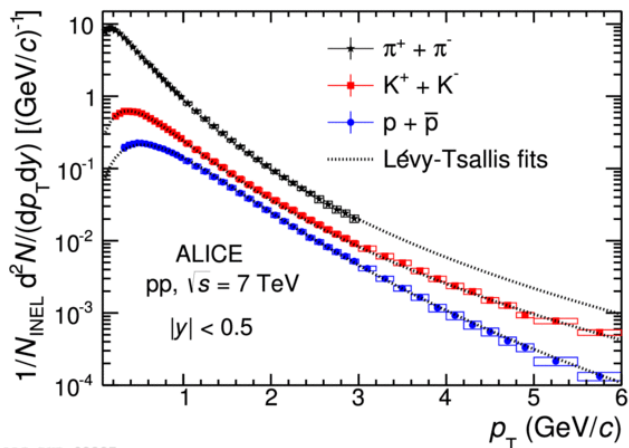
“We are very excited about this discovery,” said Federico Antinori, Spokesperson of the ALICE collaboration. “We are again learning a lot about this primordial state of matter. Being able to **isolate the quark-gluon-plasma-like phenomena** in a smaller and simpler system, such as the collision between two protons, opens up an entirely new dimension for the study of the properties of the fundamental state that our universe emerged from.”

Спектры и интегральные выходы адронов

1. Измерение спектров по инвариантной массе в бинах по поперечному импульсу

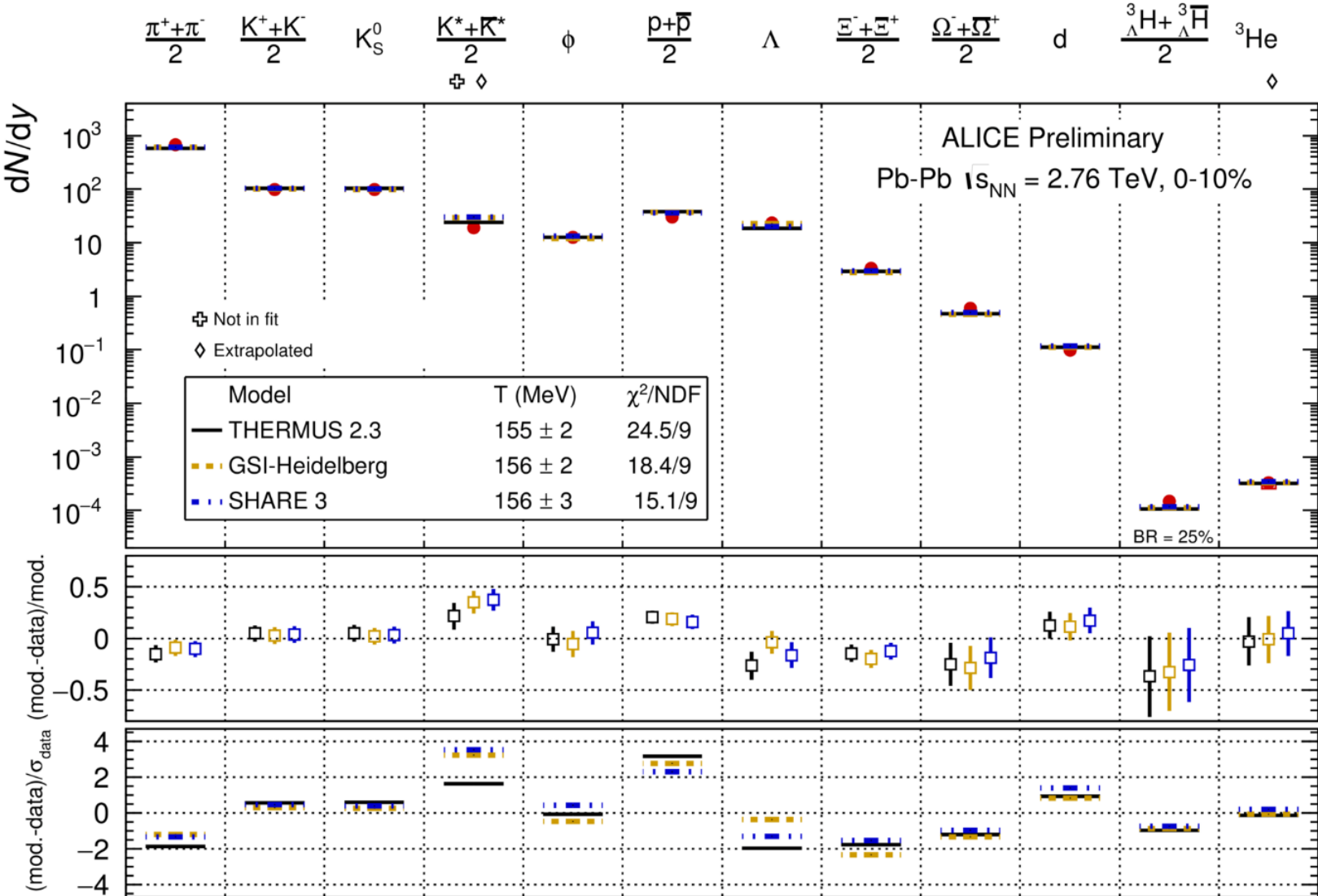


2. Измерение спектров по поперечному импульсу

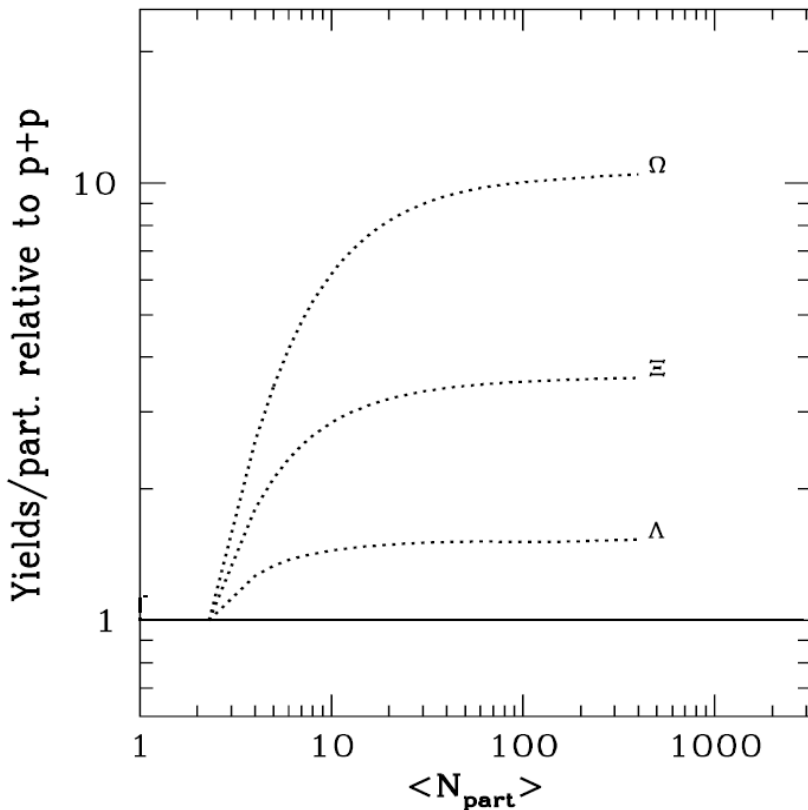


3. Определение интегральных выходов из фитов

Пример: выход адронов в центральных Pb-Pb



Увеличение выхода странности



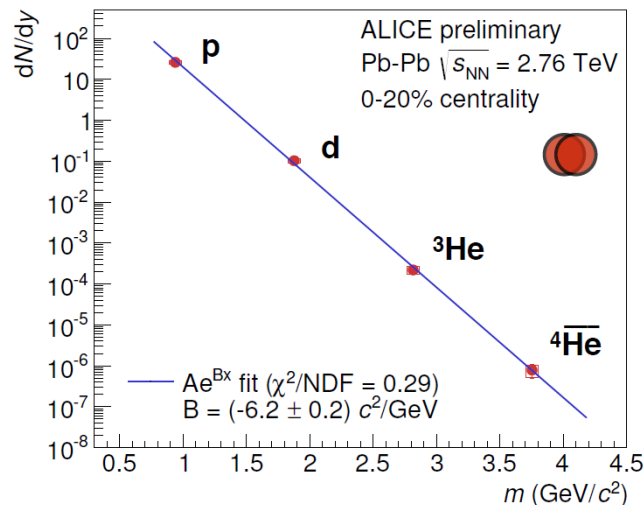
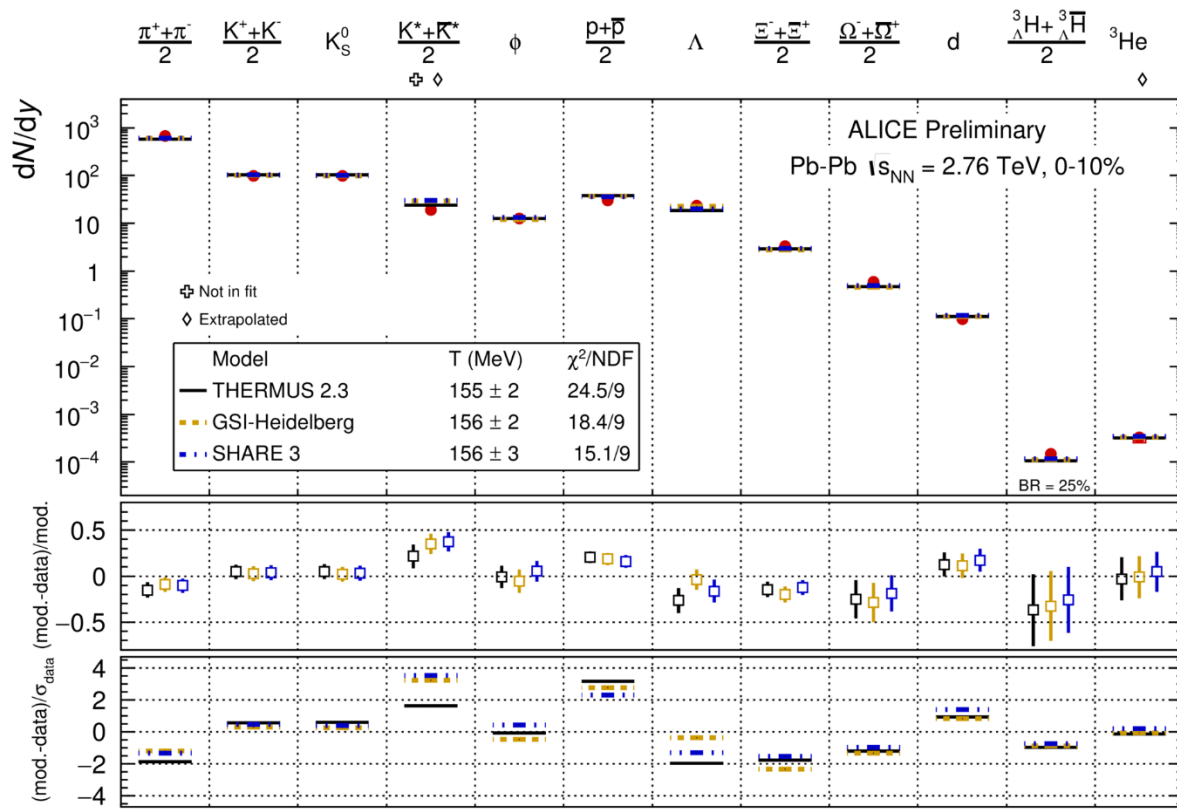
“strangeness enhancement and enhancement pattern are not a *unique* signal of deconfinement”

- 1982 - Первые предсказания (Rafelski et al)
 - Рост выхода странности за счет рождения ss -пар в КГП
 - более эффективно по сравнению с многократным перерассеянием адронов
- 2000 – CERN SPS:
 - Относительный выход странных адронов увеличивается с ростом центральности
 - До $\times 15$ раз для Ω
- 2002 – предложено объяснение в рамках статистической модели (K. Redlich)
 - Мы наблюдаем не рост выхода странности с ростом центральности, а **подавление выхода странности в малых системах**, связанное с законами сохранения (странности)

Выходы частиц в тепловой модели

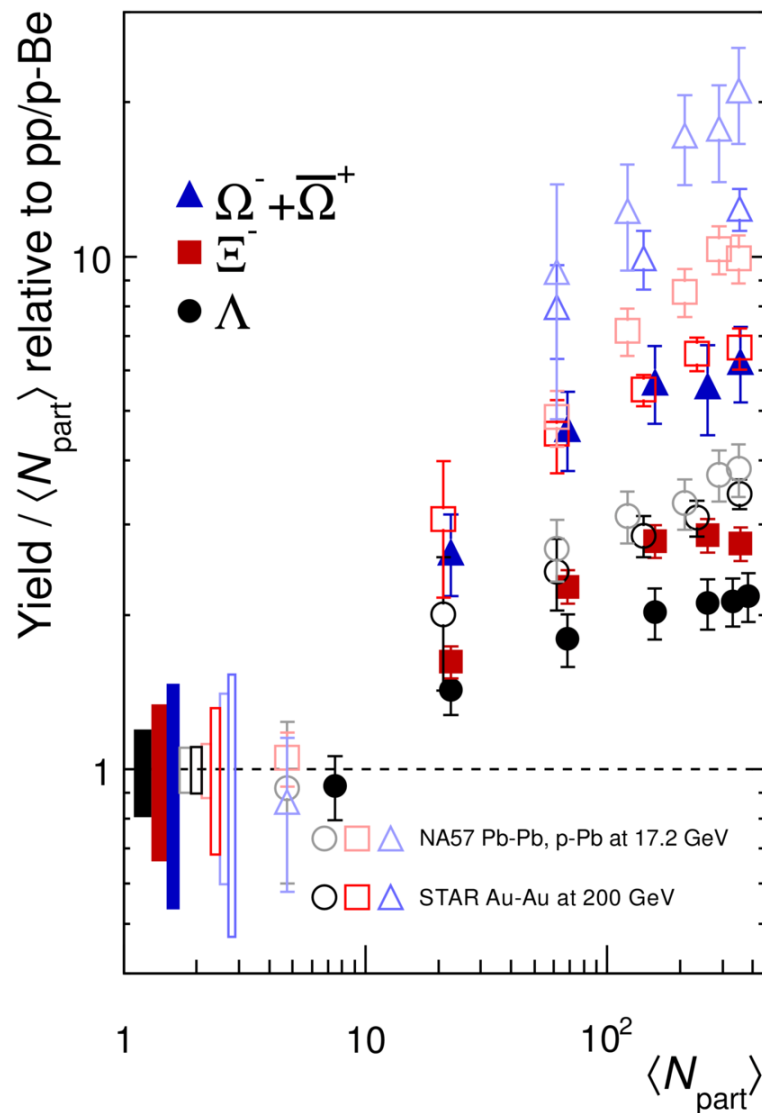
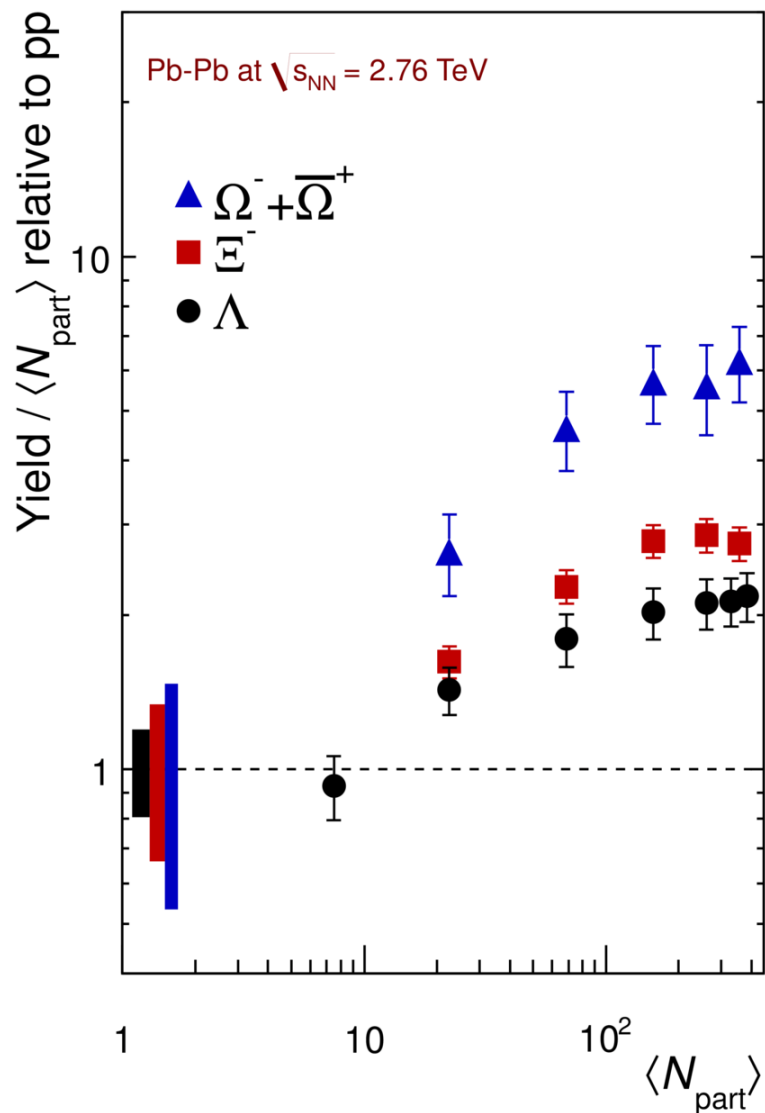
Тепловая модель: химическое равновесие => выходы адронов описываются химическим потенциалом μ_B (~ 0 при энергиях LHC) и общей температурой T

В первом приближении: $dN/dy \sim \exp(-m/T)$



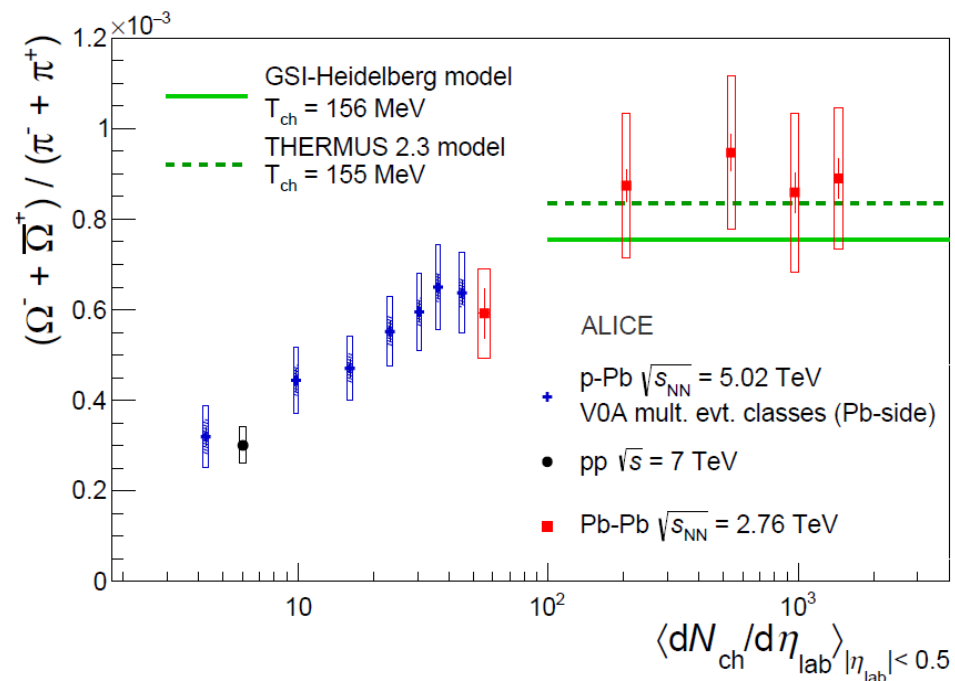
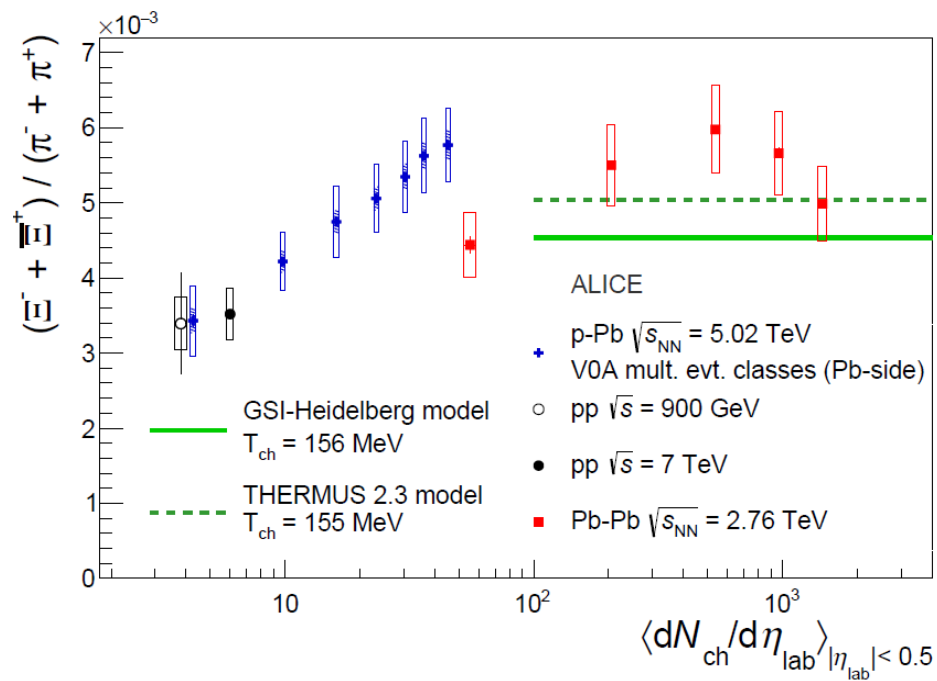
Интегральные выходы частиц в центральных Pb-Pb столкновениях хорошо описываются общей температурой $T_{ch} \sim 156$ МэВ

Рост выхода странности в Pb-Pb на LHC

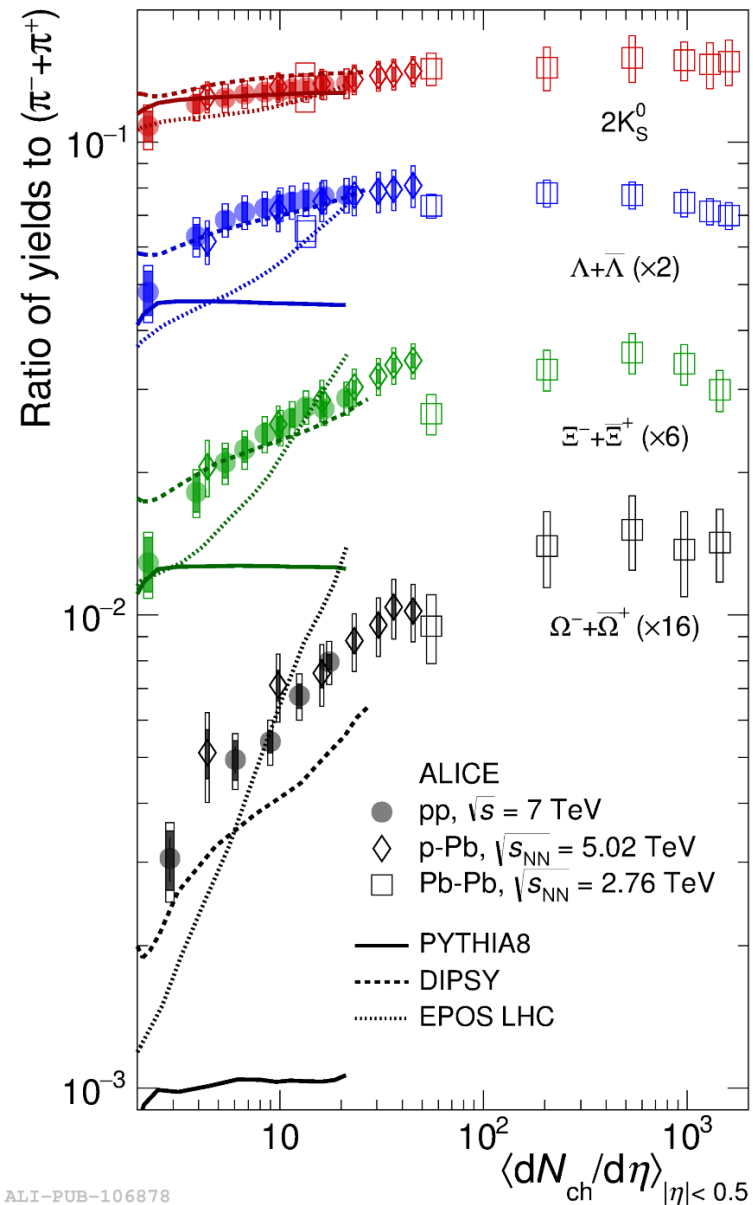


Рост странности в p-Pb

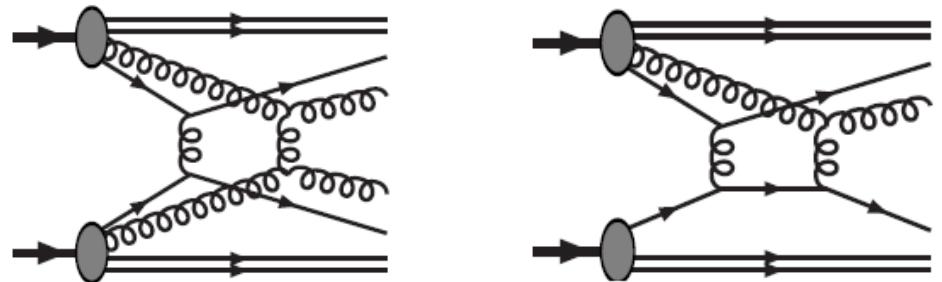
- Рост Ξ/π , Ω/π в p-Pb с увеличением множественности
- Ξ/π в p-Pb дорастает до Pb-Pb значений (которые хорошо описываются тепловой моделью)



Рост странности в pp

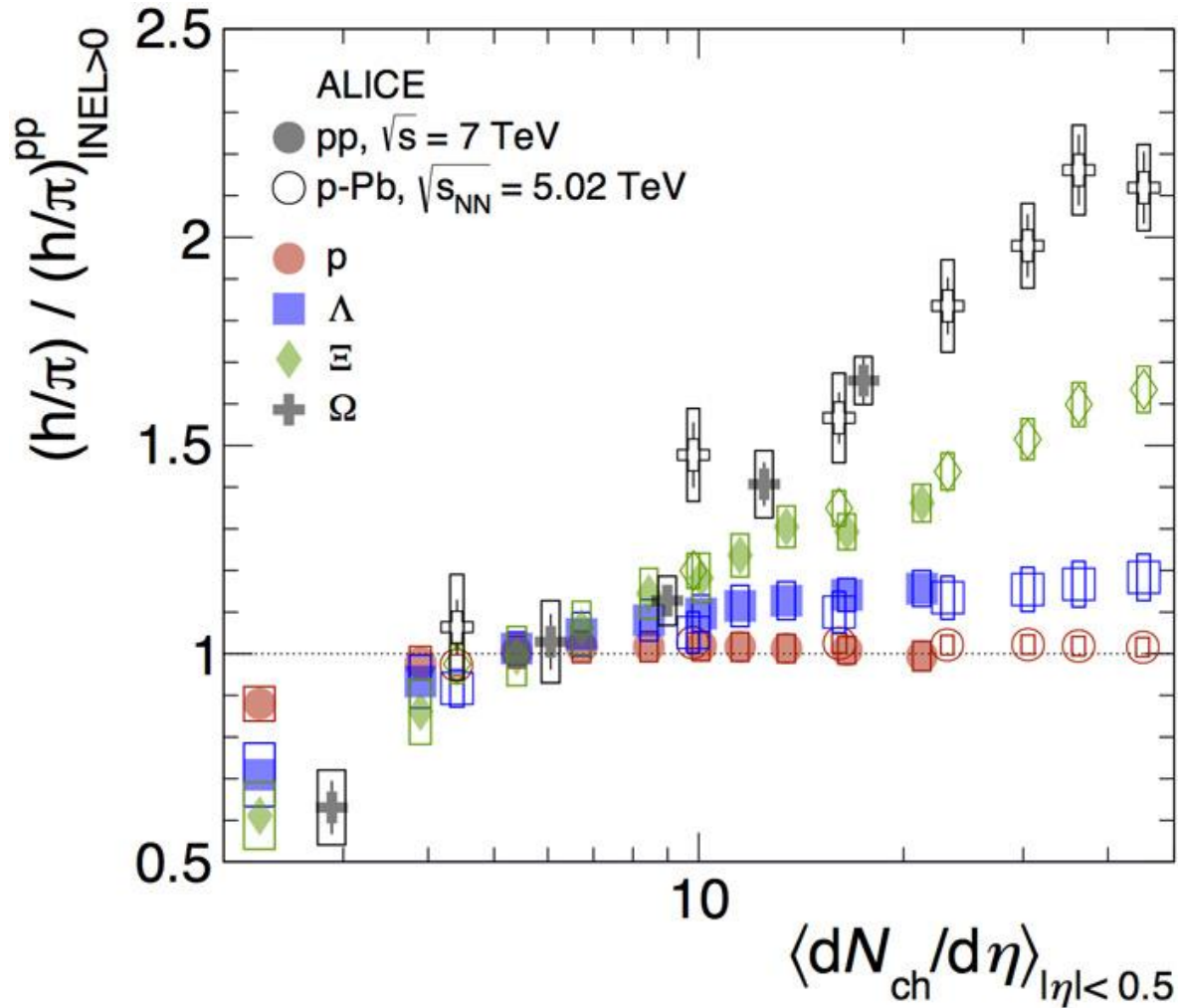


- PYTHIA8 не воспроизводит рост странности в pp. Есть MPI (multiple parton interaction, многопартонные взаимодействия), но эти партонные взаимодействия в первом приближении независимы => нет роста странности/π. Эффекты перерассеяния и color-reconnection дают малый вклад



- DIPSY: рост странности за счет механизма слияния струн в «веревки» - рост вероятности фрагментации струн на странные кварки

Рост странности в pp



$$\frac{(h/\pi)}{(h/\pi)_{INEL>0}^{pp}} = 1 + a S^b \log \left[\frac{\langle dN_{ch}/d\eta \rangle}{\langle dN_{ch}/d\eta \rangle_{INEL>0}^{pp}} \right]$$

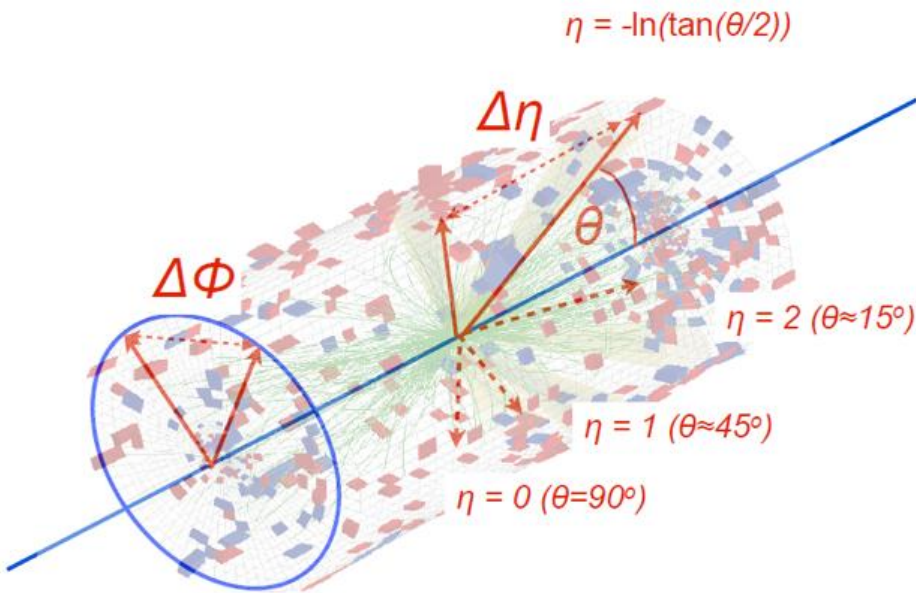
Вместо заключения

- Рост выхода странности \neq кварк-глюонная плазма
- Качественно: подавление выхода странности при малой множественности – следствие законов сохранения
- Микроскопический механизм роста выхода странности с ростом множественности по-прежнему неизвестен
- pp столкновения – проще по сравнению с Pb-Pb. Есть надежда, что полученные экспериментальные результаты дадут новый импульс для изучения микроскопического механизма роста/подавления выхода странности



Дальние корреляции в малых системах

Двухчастичные корреляции

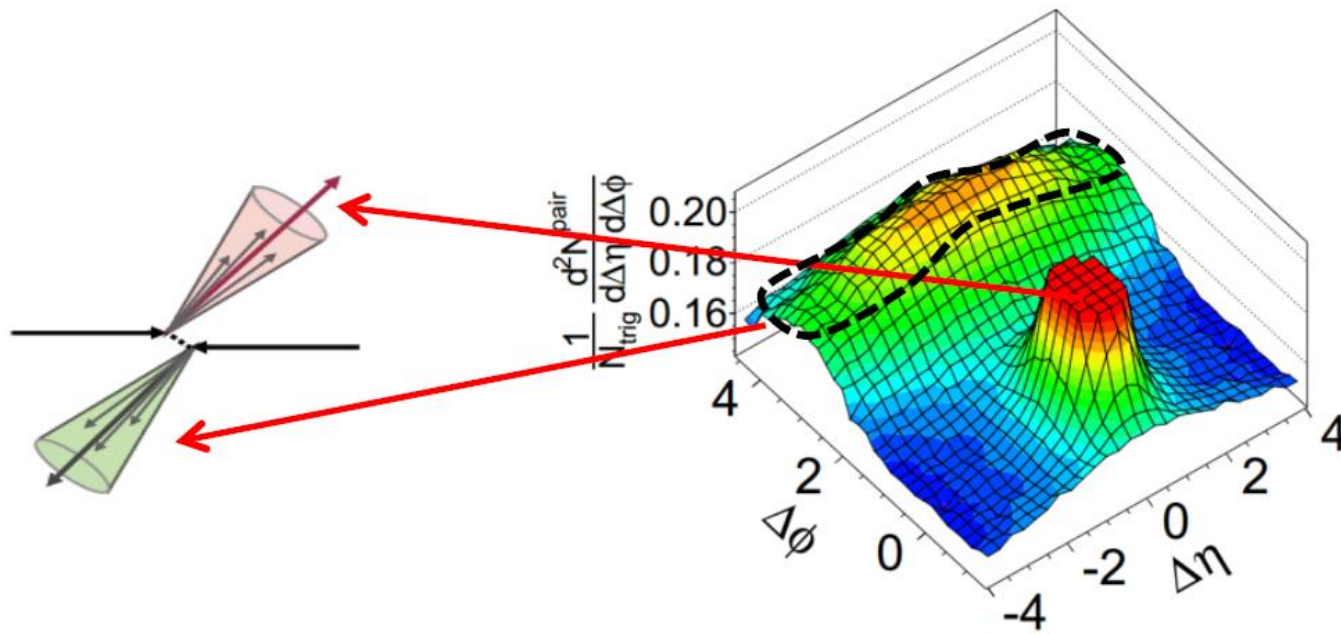


В каждом событии выбираем всевозможные пары частиц и заполняем распределения по относительному углу, т.е. разнице:

- полярного угла θ или псевдобыстроты η
- азимутального угла ϕ

В результате усреднения по всем событиям в данном классе центральности (множественности) получаем корреляционные функции

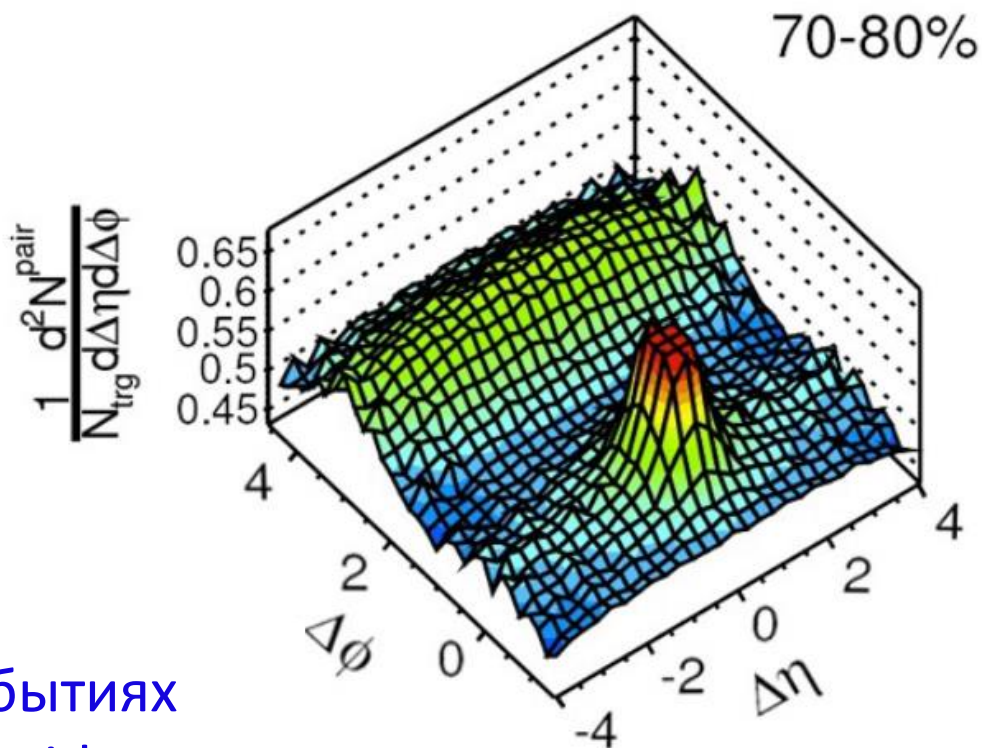
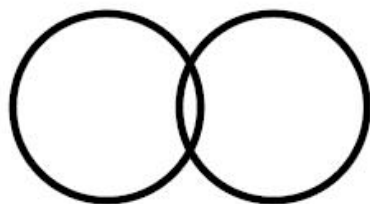
Корреляции в протон-протонных столкновениях



Нетривиальные корреляции, связанные с элементарным партонным рассеянием:

- Near-side ($\Delta\phi \sim 0$, $\Delta\eta \sim 0$) – корреляции частиц из одной струи
- Away-side ($\Delta\phi \sim \pi$) – корреляции частиц из противоположных струй.
Две струи могут иметь разные псевдобыстроты $\Delta\eta \neq 0$

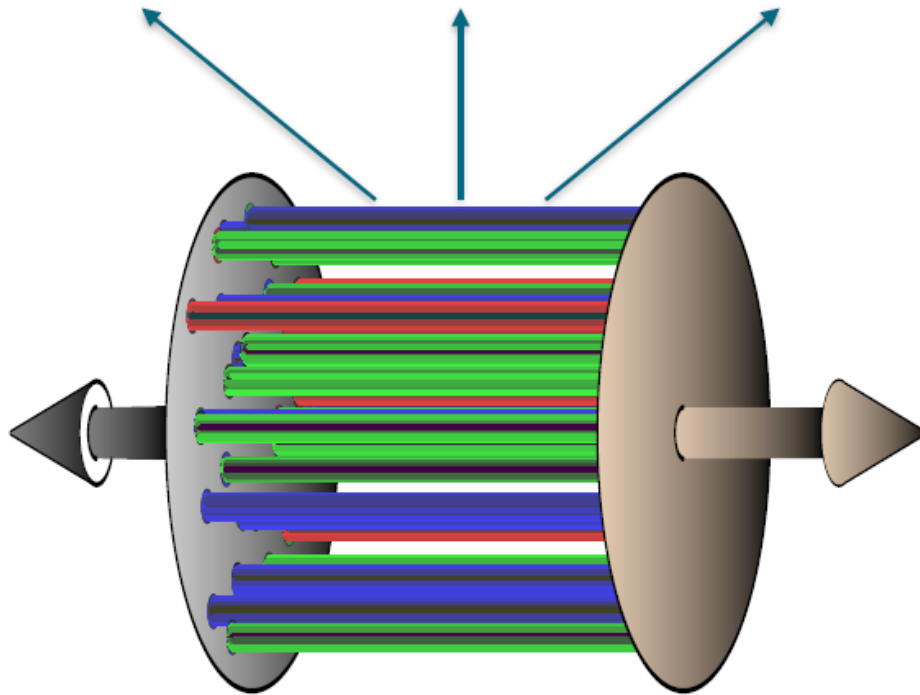
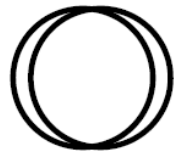
Корреляции в ядро-ядерных столкновениях



В периферических событиях
вырастает большой near-side пик,
как и в pp столкновениях

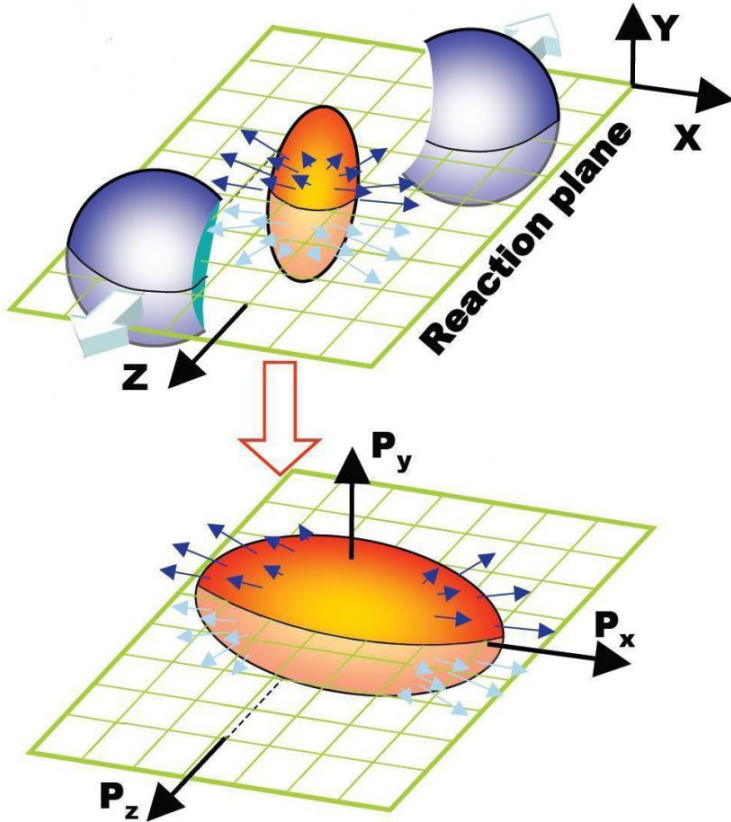
CMS 1201.3158

Почему ридж в Pb-Pb не зависит от $\Delta\eta$



- Распределение начальной плотности примерно однородно в продольном направлении
- Вероятность испускания частиц в первом приближении не зависит от η

Два альтернативных подхода



- Анализ угловых **распределений частиц** по отношению к **плоскости реакции**:

$$\frac{dN}{d\phi} \propto 1 + \sum_{n=1}^{\infty} 2v_n(p_T) \cos(n(\phi - \Psi_n))$$

- Анализ **относительных угловых распределений пар частиц**:

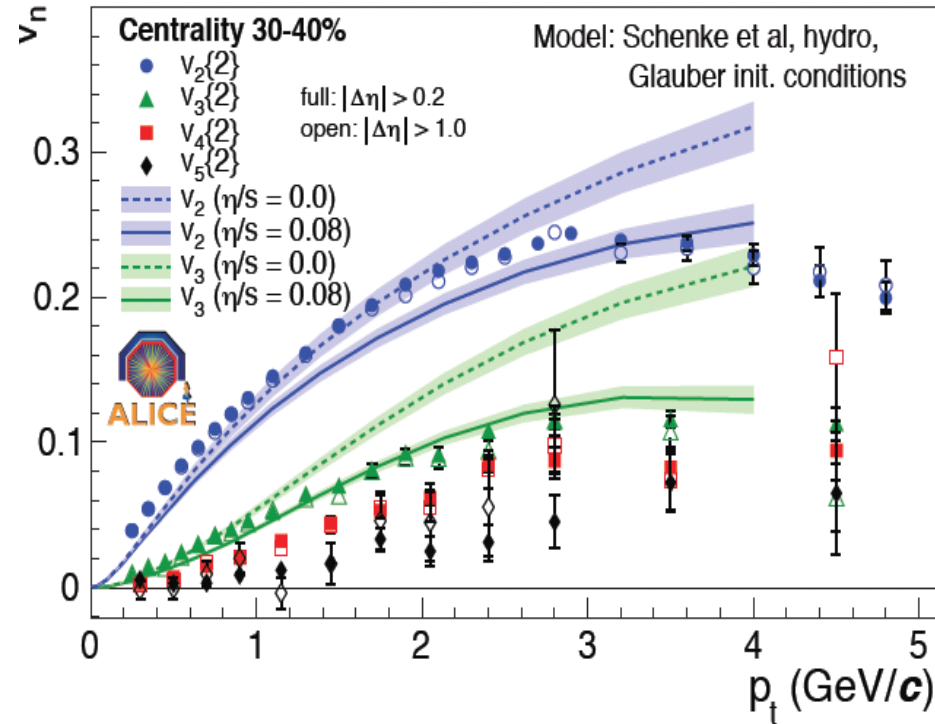
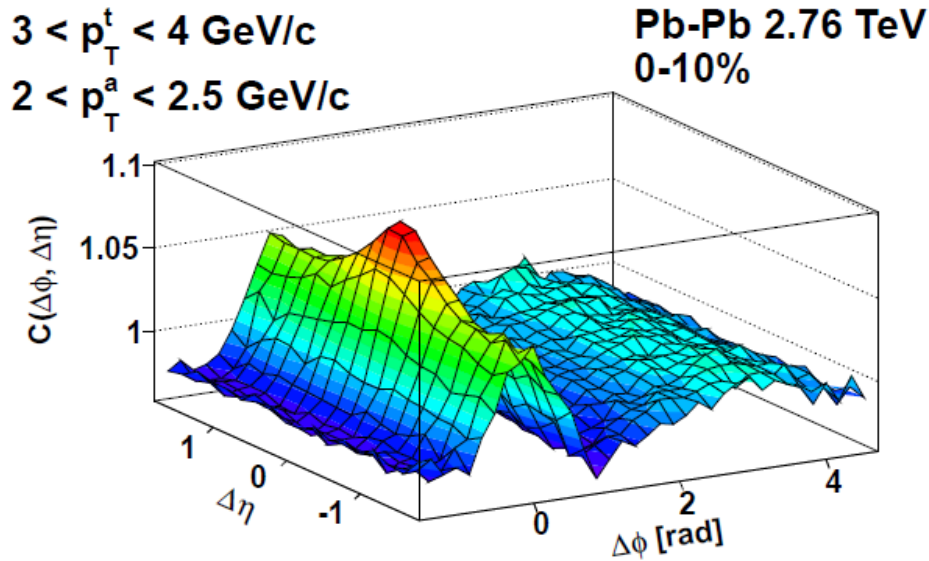
$$\frac{dN^{\text{pairs}}}{d\Delta\phi} \propto 1 + \sum_{n=1}^{\infty} 2v_n(p_T^t)v_n(p_T^a) \cos(n\Delta\phi)$$

$$\frac{dN^{\text{pairs}}}{d\Delta\phi} \propto 1 + \sum_{n=1}^{\infty} 2V_{n\Delta}(p_T^t, p_T^a) \cos(n\Delta\phi)$$

Первый подход хорошо работает в ядро-ядерных столкновениях. Но:

- 1) Не работает, если плоскость реакции плохо определена
- 2) Не учитывает возможный вклад non-flow (не-поток = корреляции, не связанные с коллективным поведением, например в струях, распадах резонансов...)

«Идеальная жидкость» в Pb-Pb

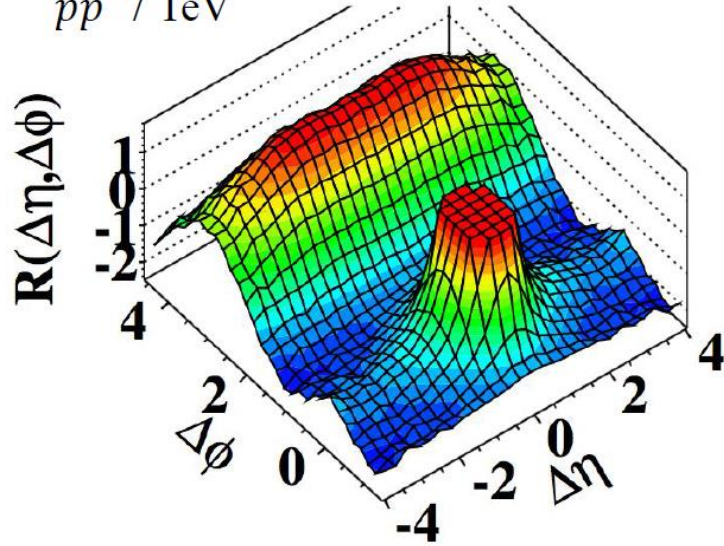


- Эллиптический поток (v_2) хорошо описывается в рамках гидродинамики сильно связанной системы с малой вязкостью
- Значение η/s близко к квантовому пределу $1/4\pi$, полученному в AdS/CFT

Ридж в pp и pA при большой множественности

CMS $N \geq 110$, $1.0 \text{ GeV}/c < p_T < 3.0 \text{ GeV}/c$

pp 7 TeV

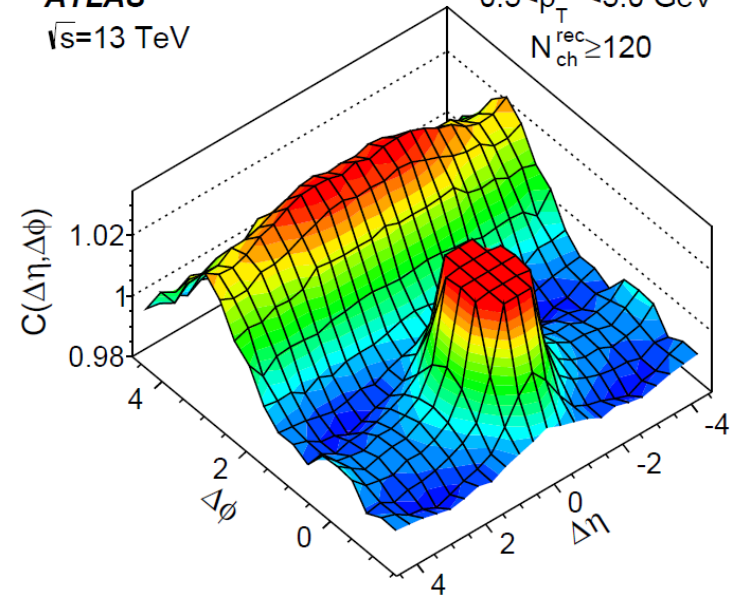


ATLAS

$\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$

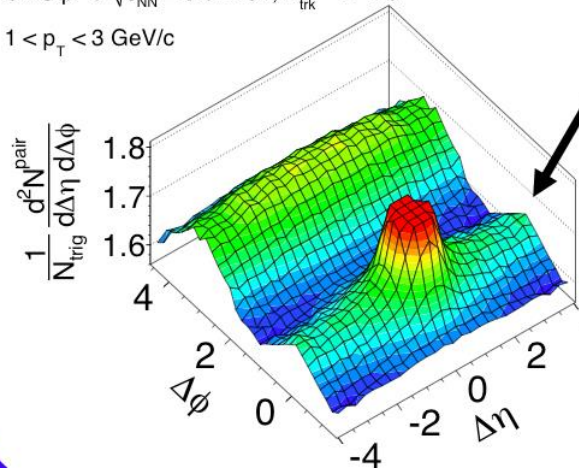
$0.5 < p_T^{a,b} < 5.0 \text{ GeV}$

$N_{ch}^{rec} \geq 120$



CMS pPb $\sqrt{s_{NN}} = 5.02 \text{ TeV}$, $N_{trk}^{offline} \geq 110$

$1 < p_T < 3 \text{ GeV}/c$



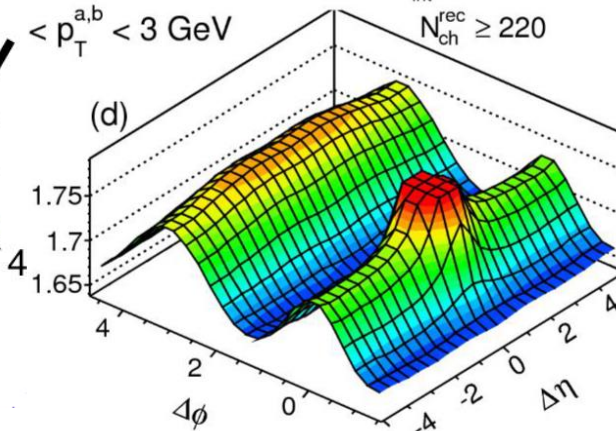
ATLAS p+Pb

$\sqrt{s_{NN}} = 5.02 \text{ TeV}$, $L_{int} \approx 28 \text{ nb}^{-1}$

$< p_T^{a,b} < 3 \text{ GeV}$

$N_{ch}^{rec} \geq 220$

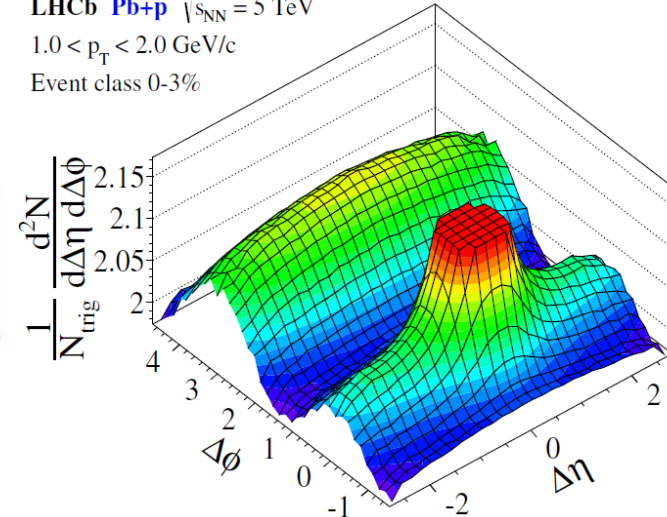
(d)



LHCb Pb+p $\sqrt{s_{NN}} = 5 \text{ TeV}$

$1.0 < p_T < 2.0 \text{ GeV}/c$

Event class 0-3%



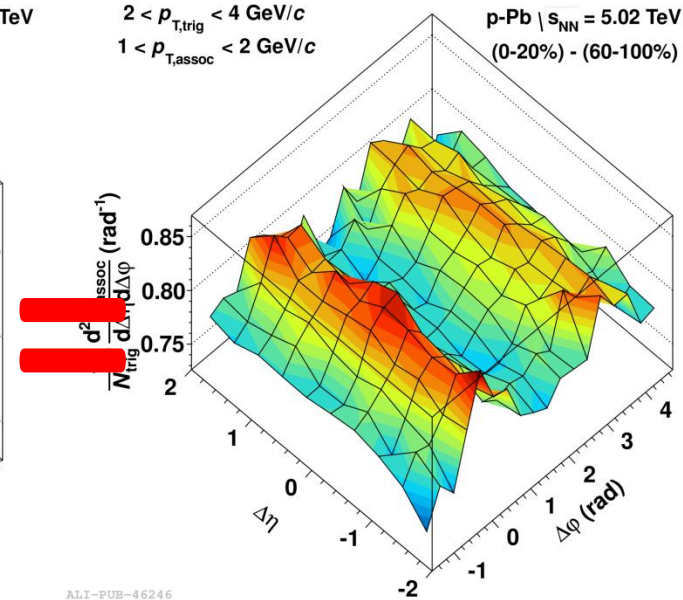
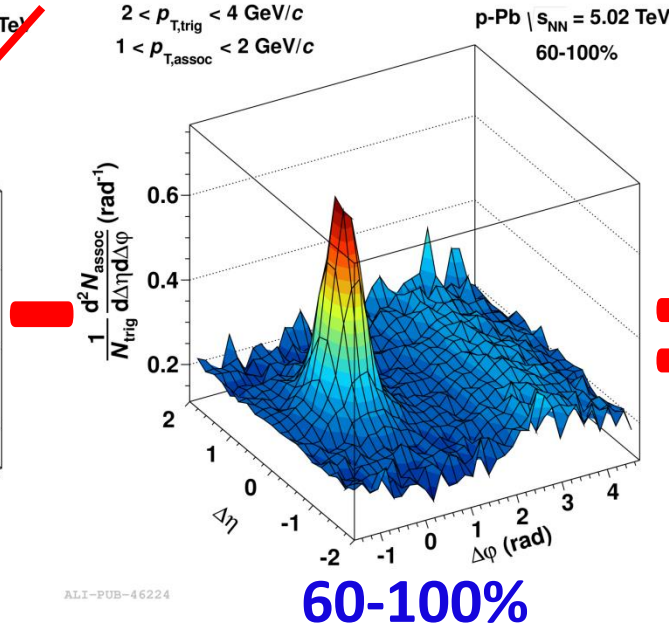
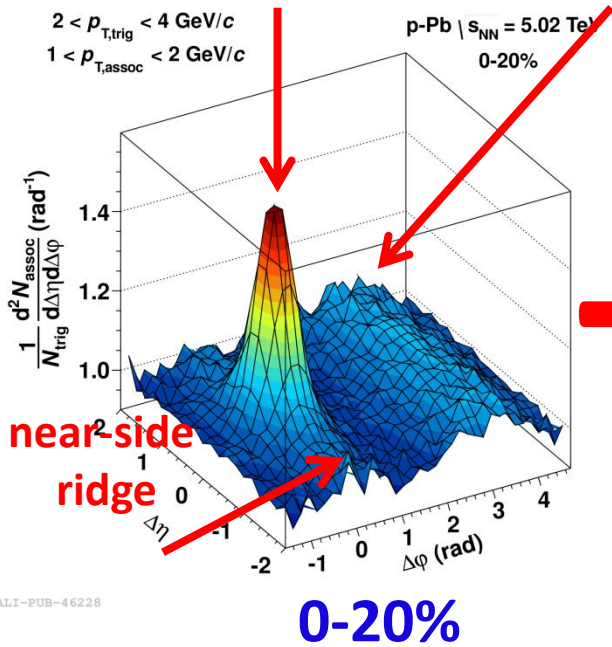
Двойной ридж!

- В ALICE предложен новый метод: вычитание вклада струй, используя корреляции в событиях с малой множественностью

near-side jet correlations

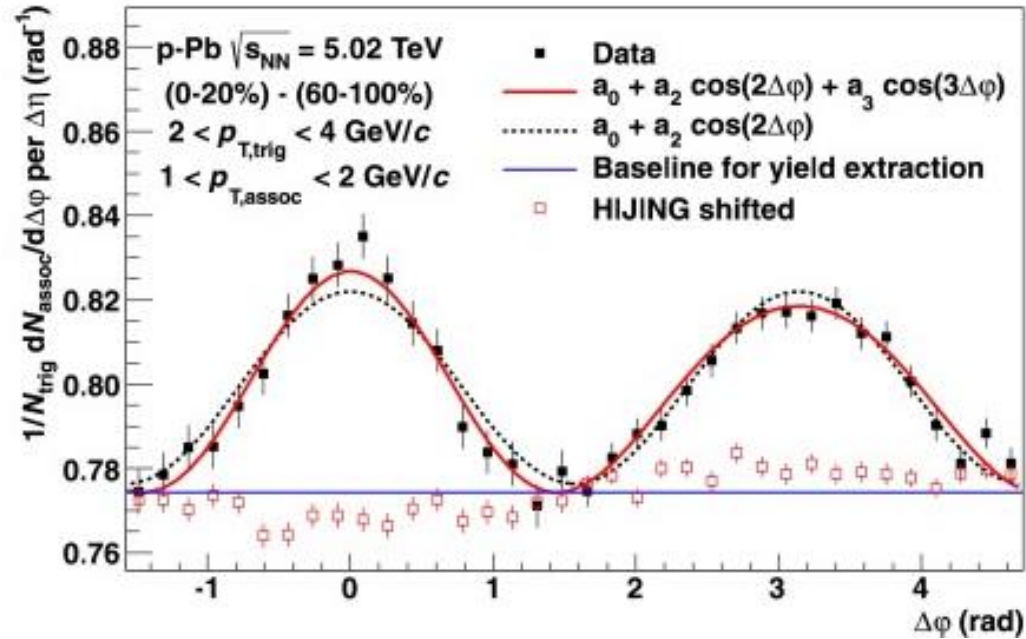
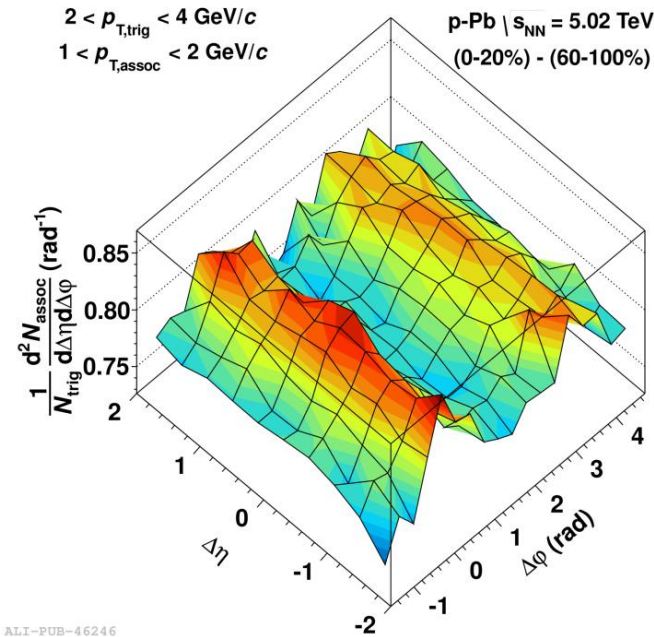
away-side jet correlations

Phys. Lett. B 719 (2013) 29



Двойной ридж напоминает структуру в Pb-Pb, которая традиционно интерпретировалась как коллективный эллиптический поток

Извлечение Фурье коэффициентов



$$\frac{dN^{\text{pairs}}}{d\Delta\phi} \propto 1 + \sum_{n=1}^{\infty} 2v_n(p_T^t) v_n(p_T^a) \cos(n\Delta\phi)$$

Несколько предположений:

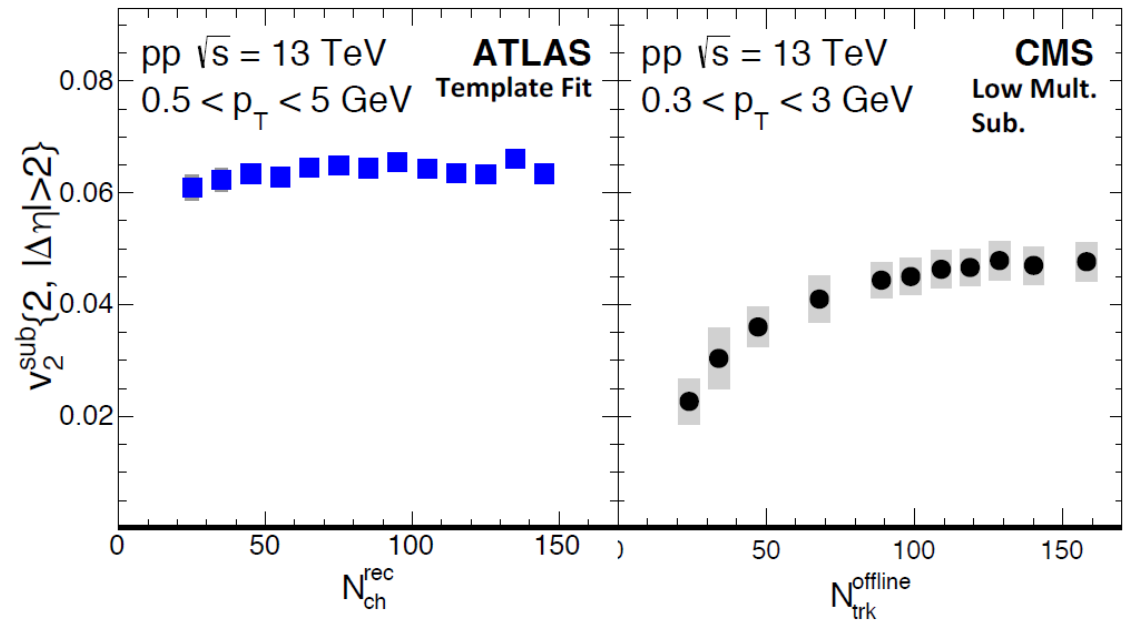
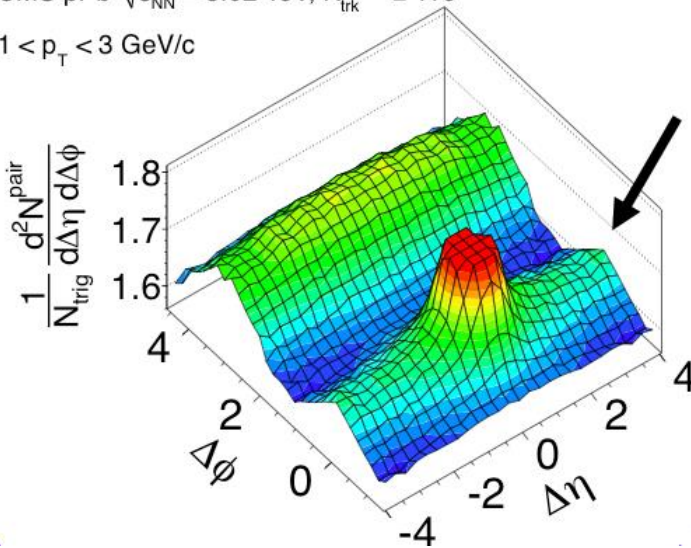
- Факторизация: Фурье-коэффициенты в двух-частичных корреляциях равны произведению Фурье-коэффициентов анизотропного потока триггерных и ассоциированных частиц
- Поток в периферических столкновениях пренебрежимо мал, поэтому вычитая (60-100%) мы убираем только струйные корреляции

Как убрать струйные корреляции?

- near-side легко убирается катом на $|\Delta\eta| > 2$
- с away-side сложнее:
 - CMS: вычитание корреляций при малой множественности в предположении, что там $v_n = 0$ (типа ALICE)
 - ATLAS: темплейт-фит в предположении, что поток одинаков в двух бинах с наименьшей множественностью

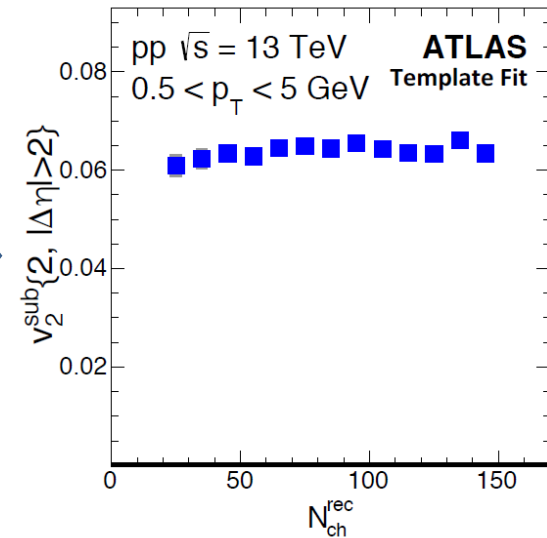
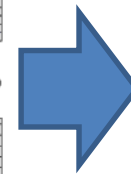
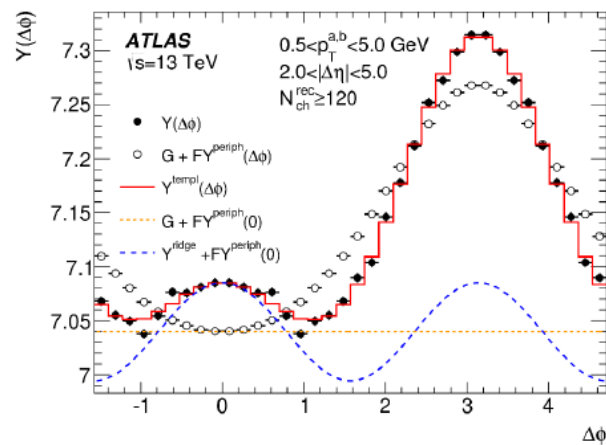
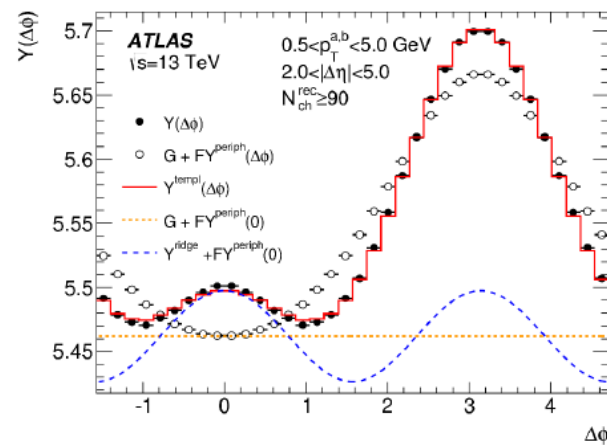
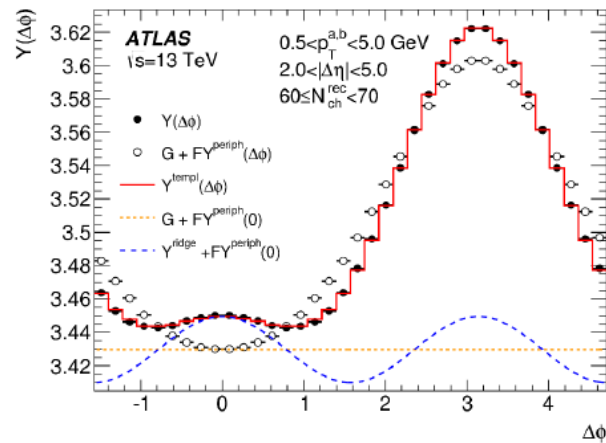
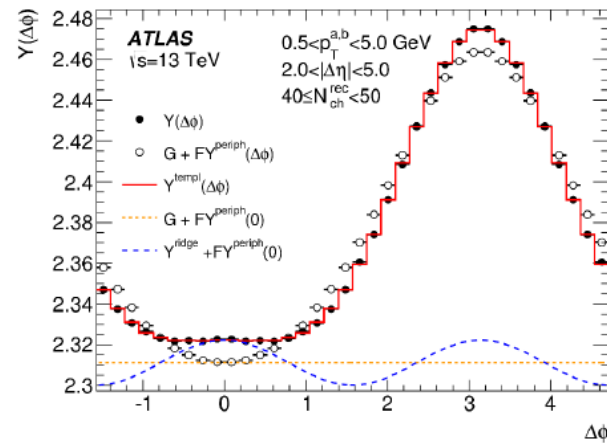
CMS pPb $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV, $N_{trk}^{offline} \geq 110$

$1 < p_T < 3$ GeV/c



Пример темплайт-фитов

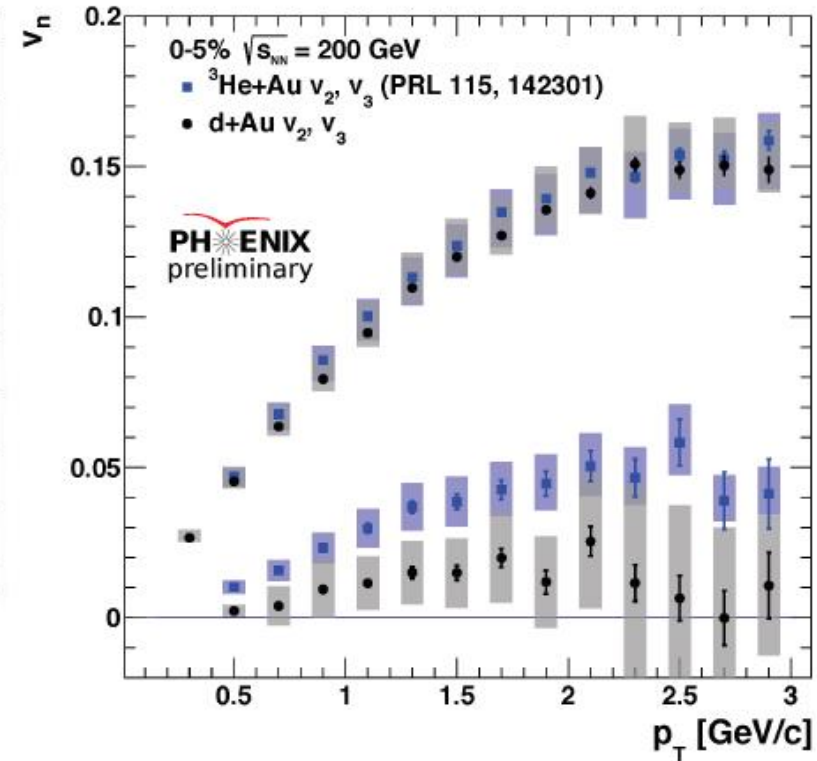
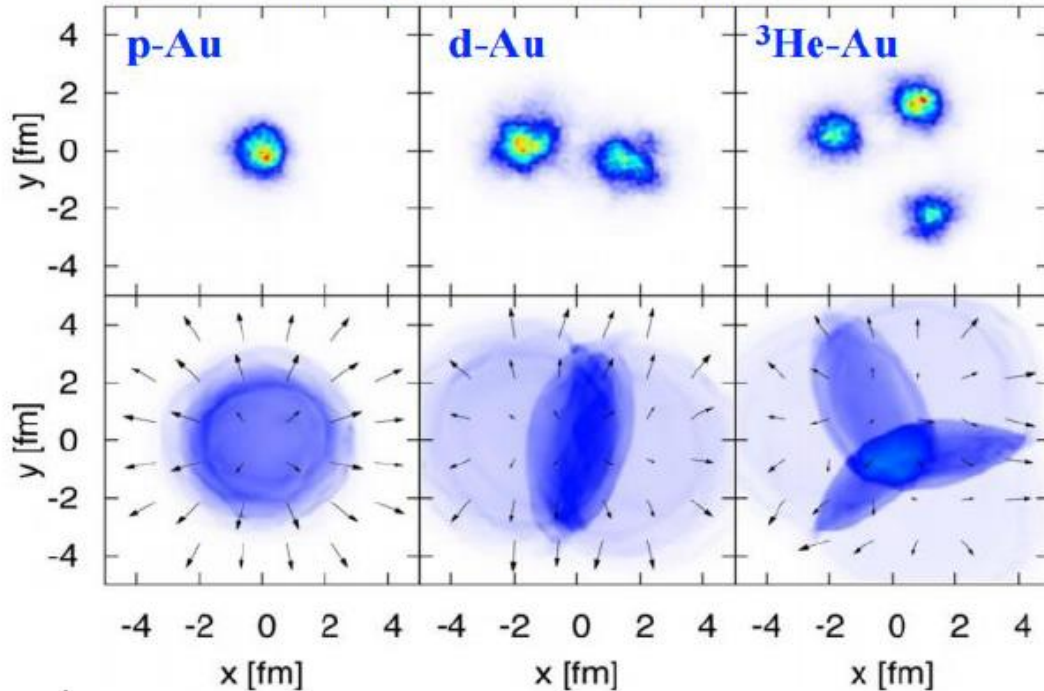
$$Y^{\text{templ}}(\Delta\phi) = Y^{\text{ridge}}(\Delta\phi) + FY^{\text{periph}}(\Delta\phi)$$



Поток не зависит от множественности???

Изменение геометрии начального состояния

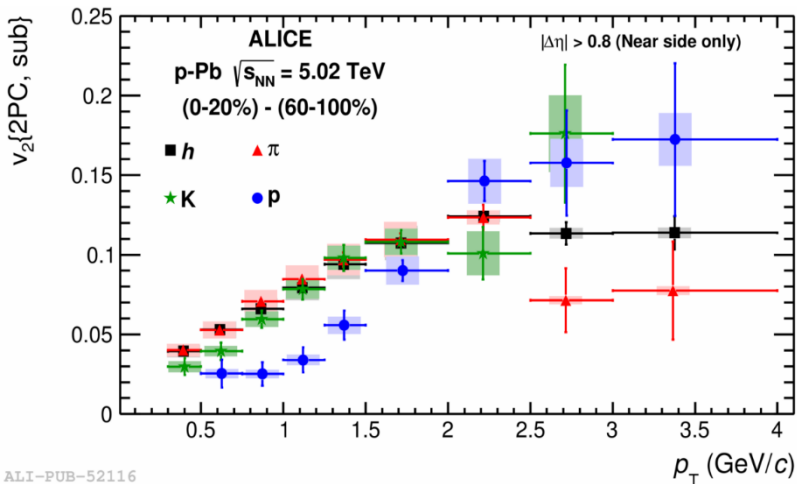
Phys. Rev. Lett. 113, 112301 (2014), figure courtesy of B. Schenke



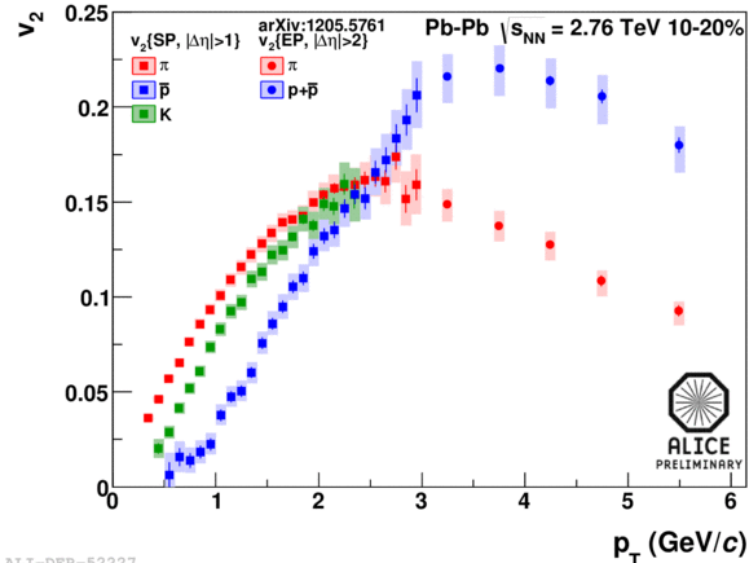
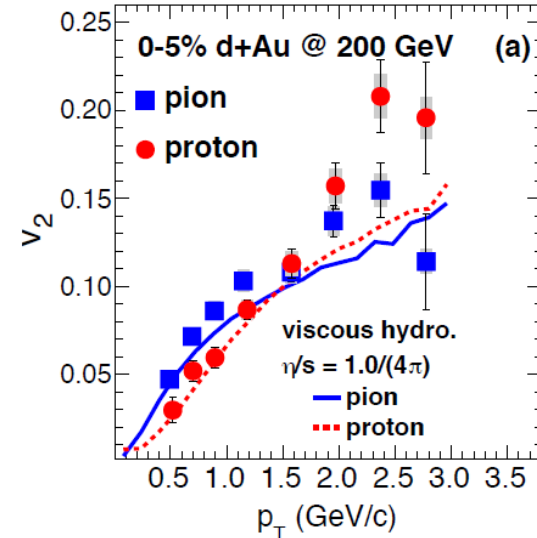
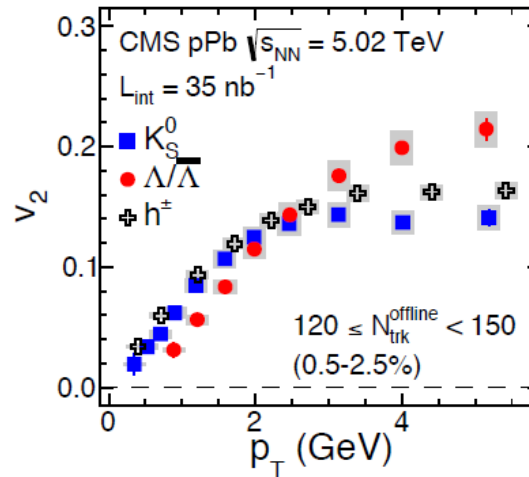
- Похожие значения v_2 в p+Au, d+Au и $^3\text{He+Au}$
- v_3 больше в $^3\text{He+Au}$

Упорядоченность по массе

ALICE, PLB 726,164 (2013)



ALI-PUB-52116

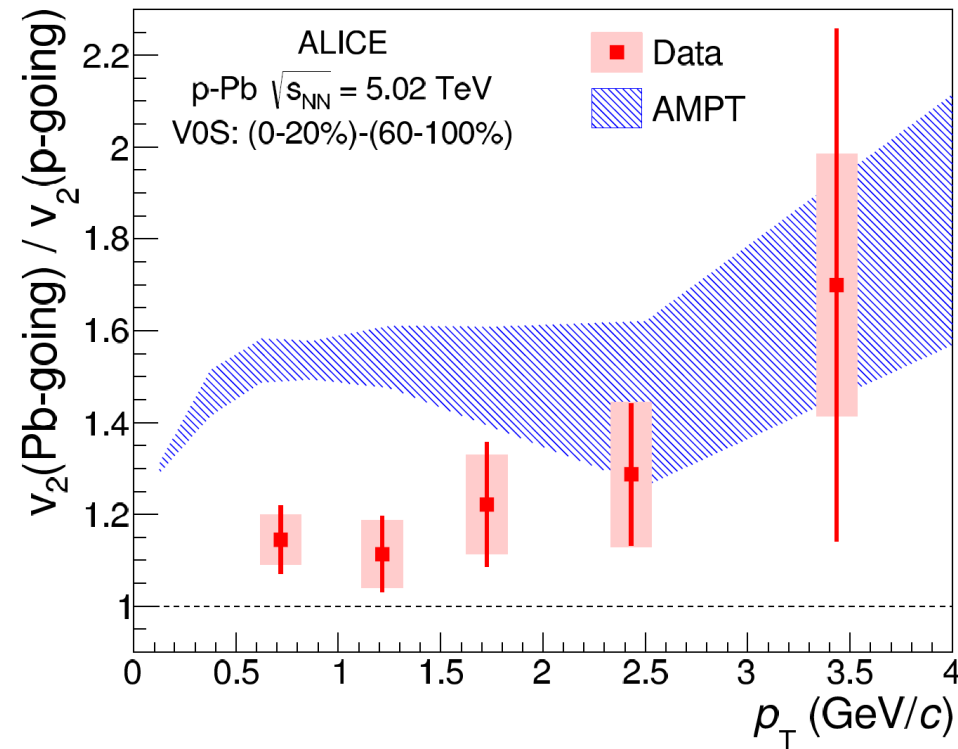
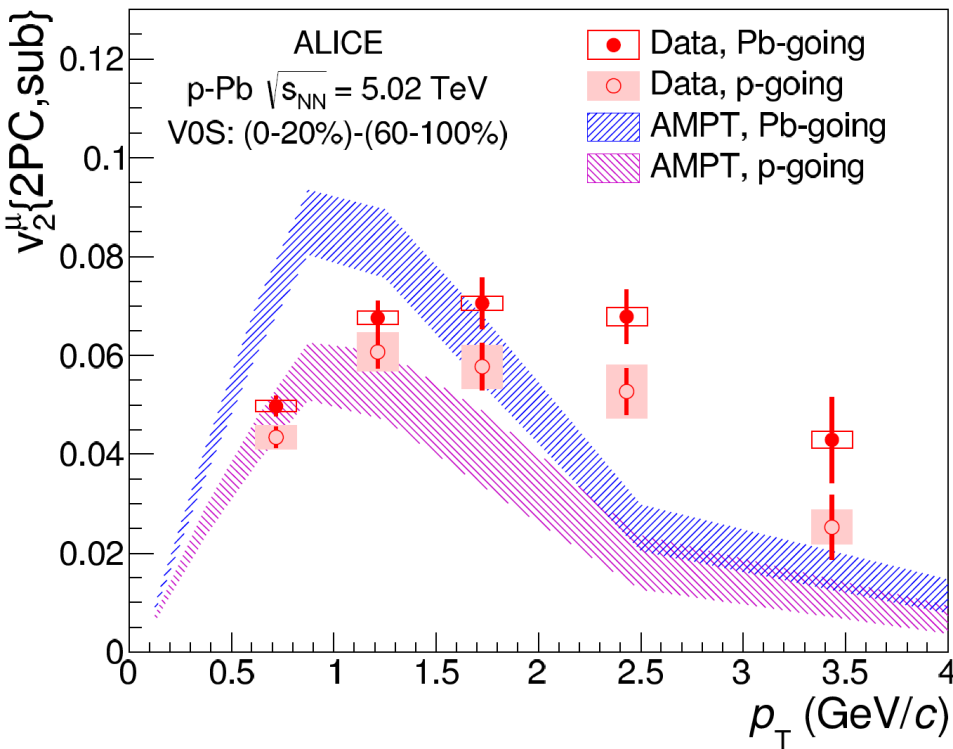


ALI-DER-52227

- Упорядоченность v_2 по массе
- Аналогичная картина в АА связана с **радиальным потоком**:
общая скорость радиального потока ($p_1 = m_1 v\gamma$, $p_2 = m_2 v\gamma \dots$) => **одинаковый v_2 при одинаковой скорости**

Дальние корреляции при больших быстротах

v_2 извлекается из двухчастичных корреляций мюонов ($2.5 < |\eta| < 4$) и треков в центральном барреле $|\eta| < 1$



- $v_2(\text{Pb-going}) > v_2(\text{p-going})$ в качественном согласии с гидродинамическими моделями

*We have to ensure that we're not measuring correlations of a few particles in many events, but rather **correlations of many particles** in a single event.*

Jürgen Schukraft

Многочастичные кумулянты

- $c_2\{k\}$ – измерение угловых корреляций k частиц.
- Корреляции $< k$ частиц вычитаются

$$c_n\{2\} = \langle\langle 2 \rangle\rangle = \langle\langle \cos n(\varphi_1 - \varphi_2) \rangle\rangle$$

$$c_n\{4\} = \langle\langle 4 \rangle\rangle - 2 \langle\langle 2 \rangle\rangle^2$$

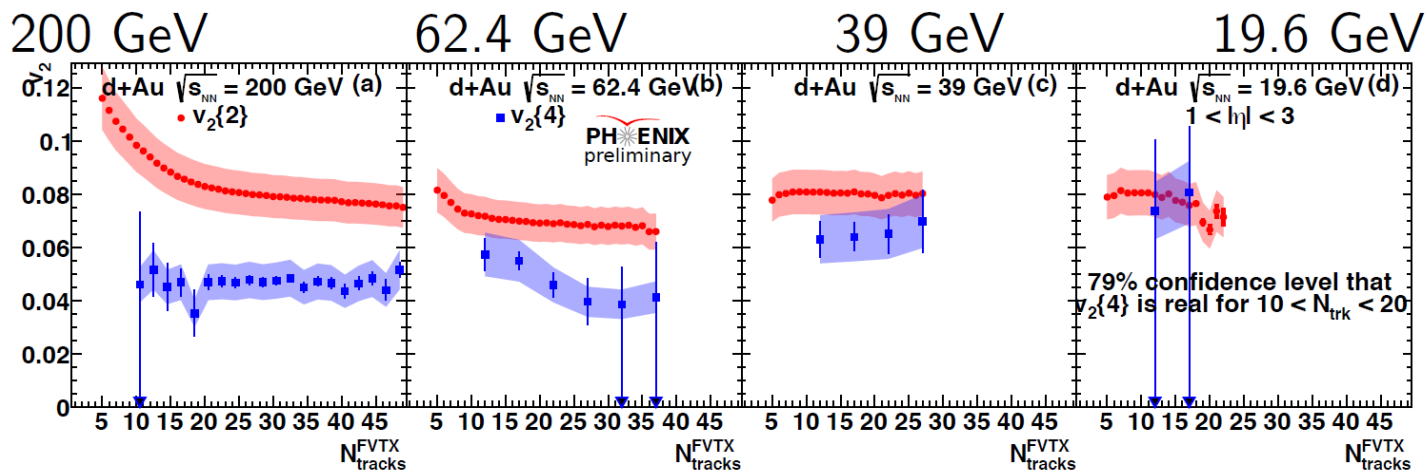
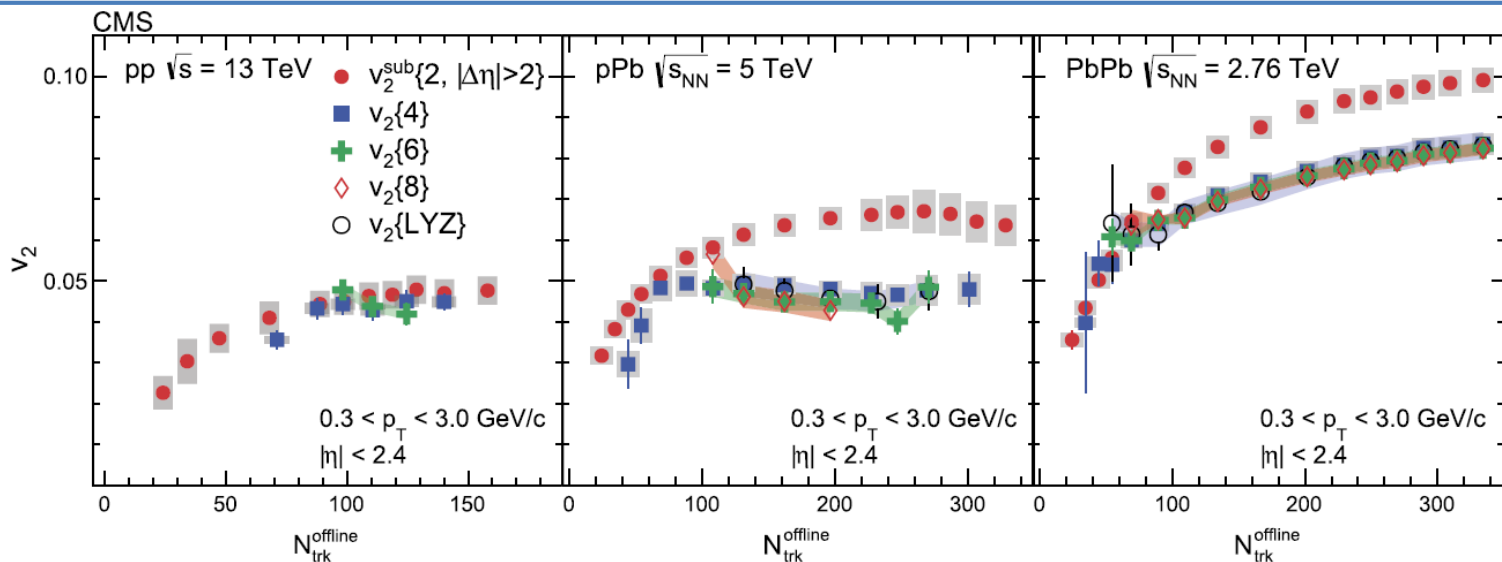
$$c_n\{6\} = \langle\langle 6 \rangle\rangle - 9 \langle\langle 4 \rangle\rangle \langle\langle 2 \rangle\rangle + 12 \langle\langle 2 \rangle\rangle^3$$

- $c_n\{k\}$ связаны с $v_n\{k\}$

$$v_n\{2\} = \sqrt{c_n\{2\}}, \quad v_n\{4\} = \sqrt[4]{-c_n\{4\}}, \quad v_n\{6\} = \sqrt[6]{c_n\{6\}/4}$$

- Кумулянты служат мерой корреляций многих частиц, корреляции меньшего числа частиц сильно подавлены

Многочастичные кумулянты в pp, pPb и dAu

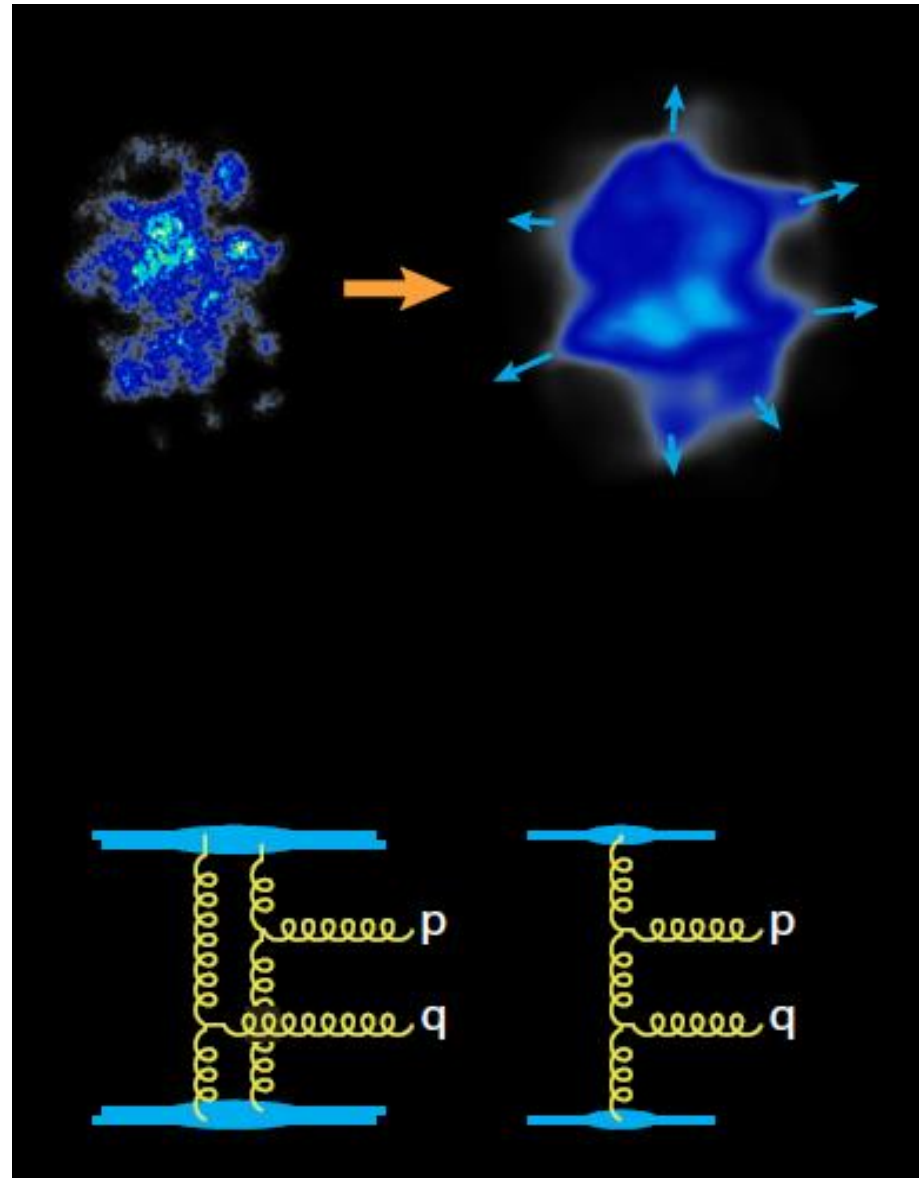


$v_2\{4\} = v_2\{6\} = v_2\{8\} > 0 \Rightarrow$ наблюдаемый эффект имеет многочастичную природу

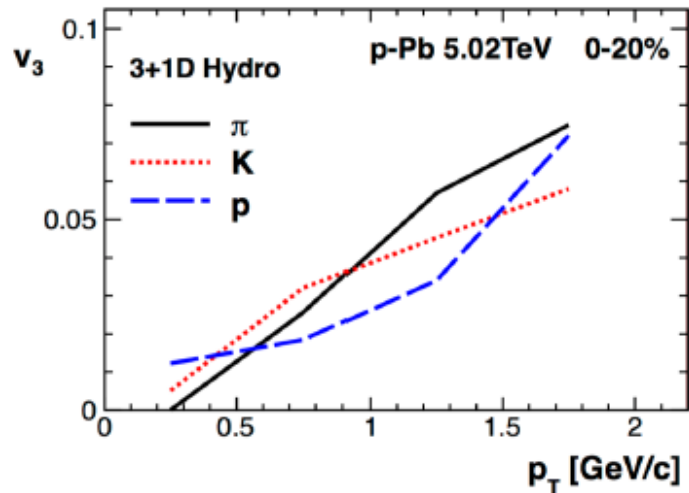


Два основных подхода

- Эффект возникает в процессе эволюции системы: корреляции возникают в результате взаимодействия в конечном состоянии (пространственные неоднородности в начальном состоянии приводят к корреляциям по импульсу в конечном состоянии)
- Эффект начального состояния: Частицы сразу рождаются скоррелированными по направлению импульса (глазма, CGC и т.п.)



Гидродинамика



- Гидродинамика позволяет одновременно описать v_n в pp, pPb и Pb-Pb при малых p_T
- Упорядоченность по массе и многочастичные корреляции возникают естественным образом

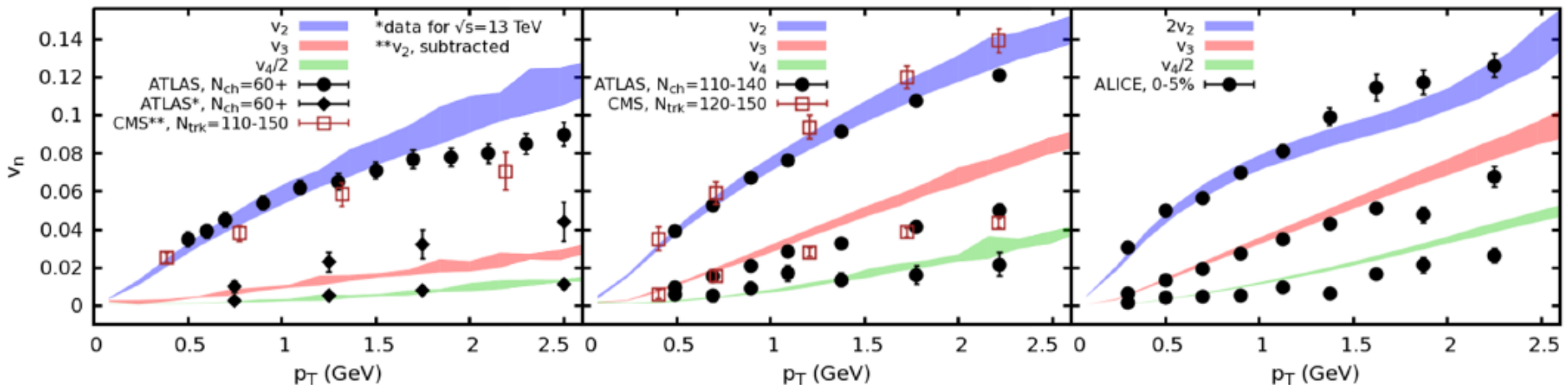
Основные требования:

- большая плотность энергии
- сильно связанная система
- Пространственная анизотропия в начальном состоянии

superSONIC for p+p, $\sqrt{s}=5.02$ TeV, 0-1%

superSONIC for p+Pb, $\sqrt{s}=5.02$ TeV, 0-5%

superSONIC for Pb+Pb, $\sqrt{s}=5.02$ TeV, 0-5%

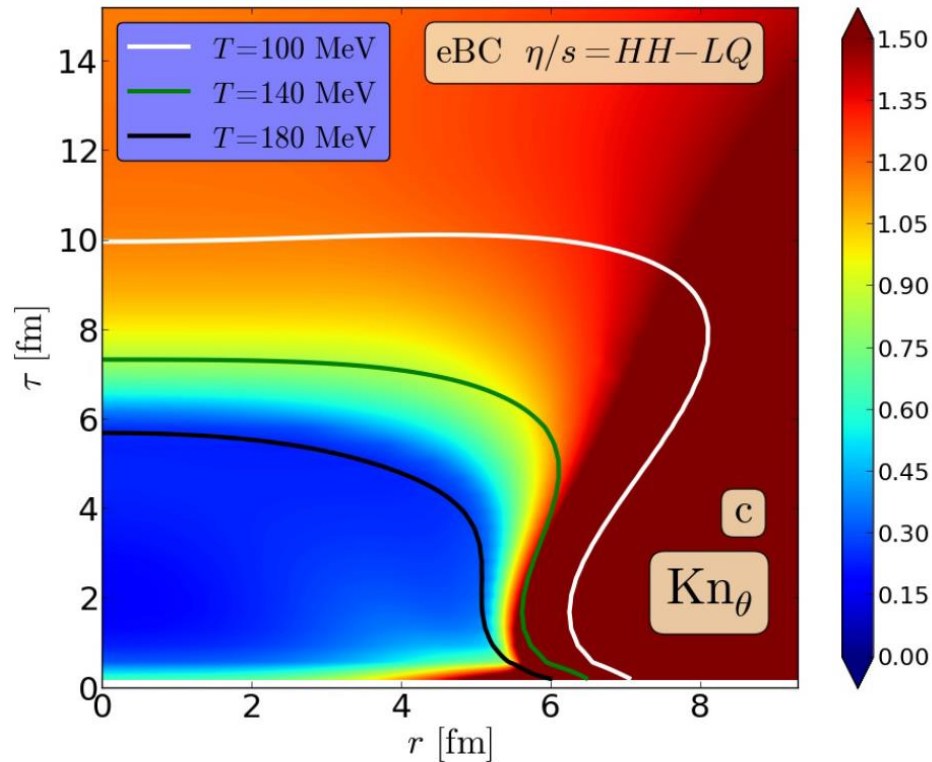


Применимость гидродинамики в малых системах?

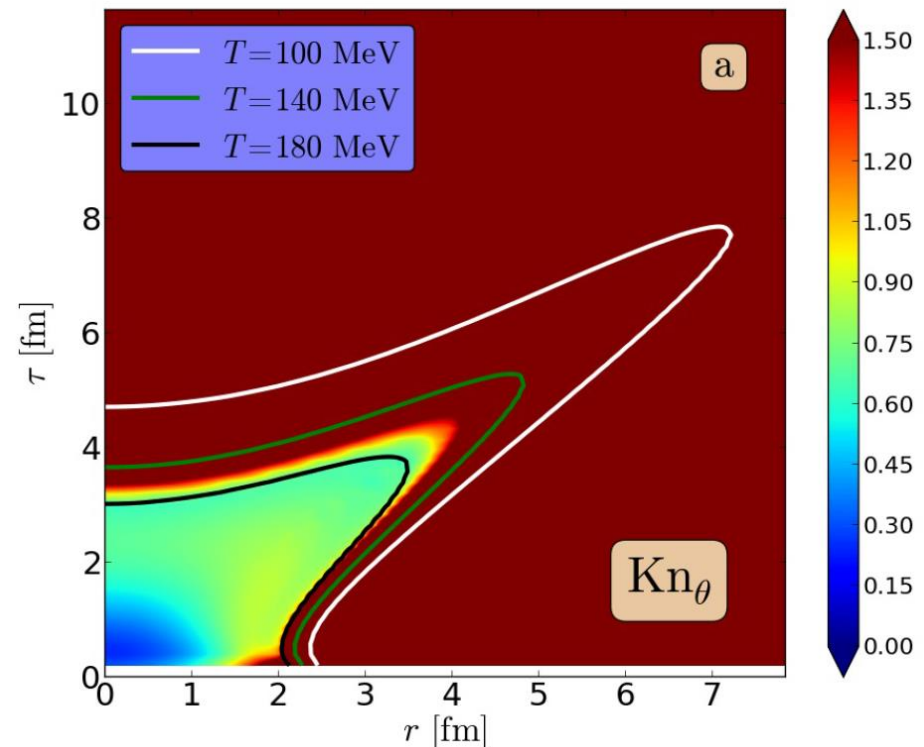
- Условие применимости гидродинамики $\text{Kn} < 0.5$ (arxiv:1404.7327):

$$\text{Kn} = \frac{\lambda}{L}, \quad \begin{array}{l} \text{длина свободного пробега} \\ \text{характерный размер системы} \end{array}$$

Pb-Pb

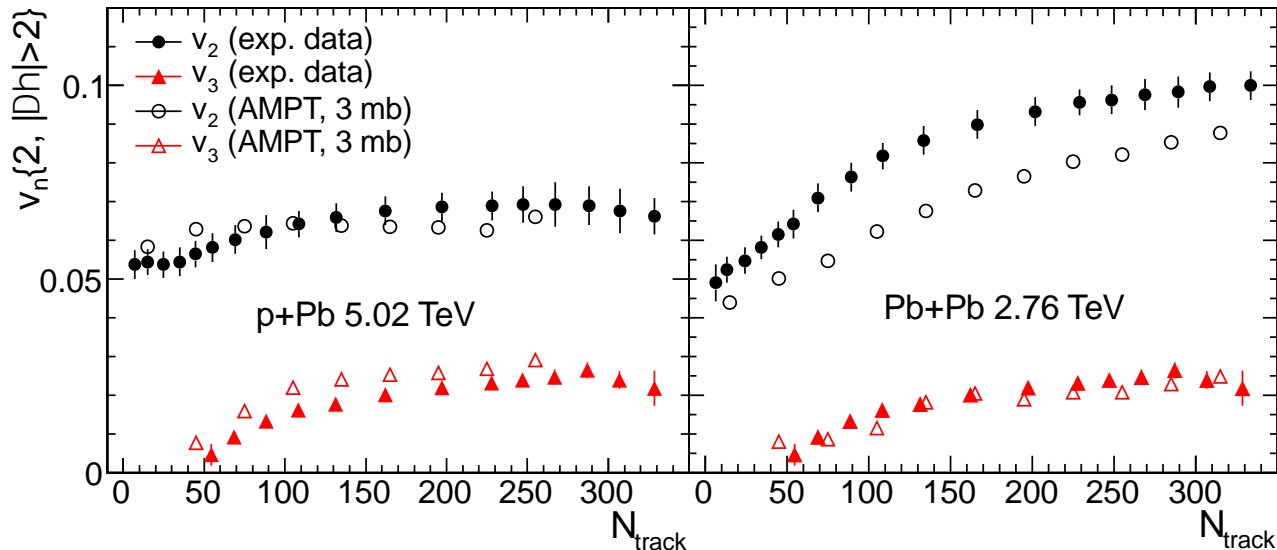


p-Pb



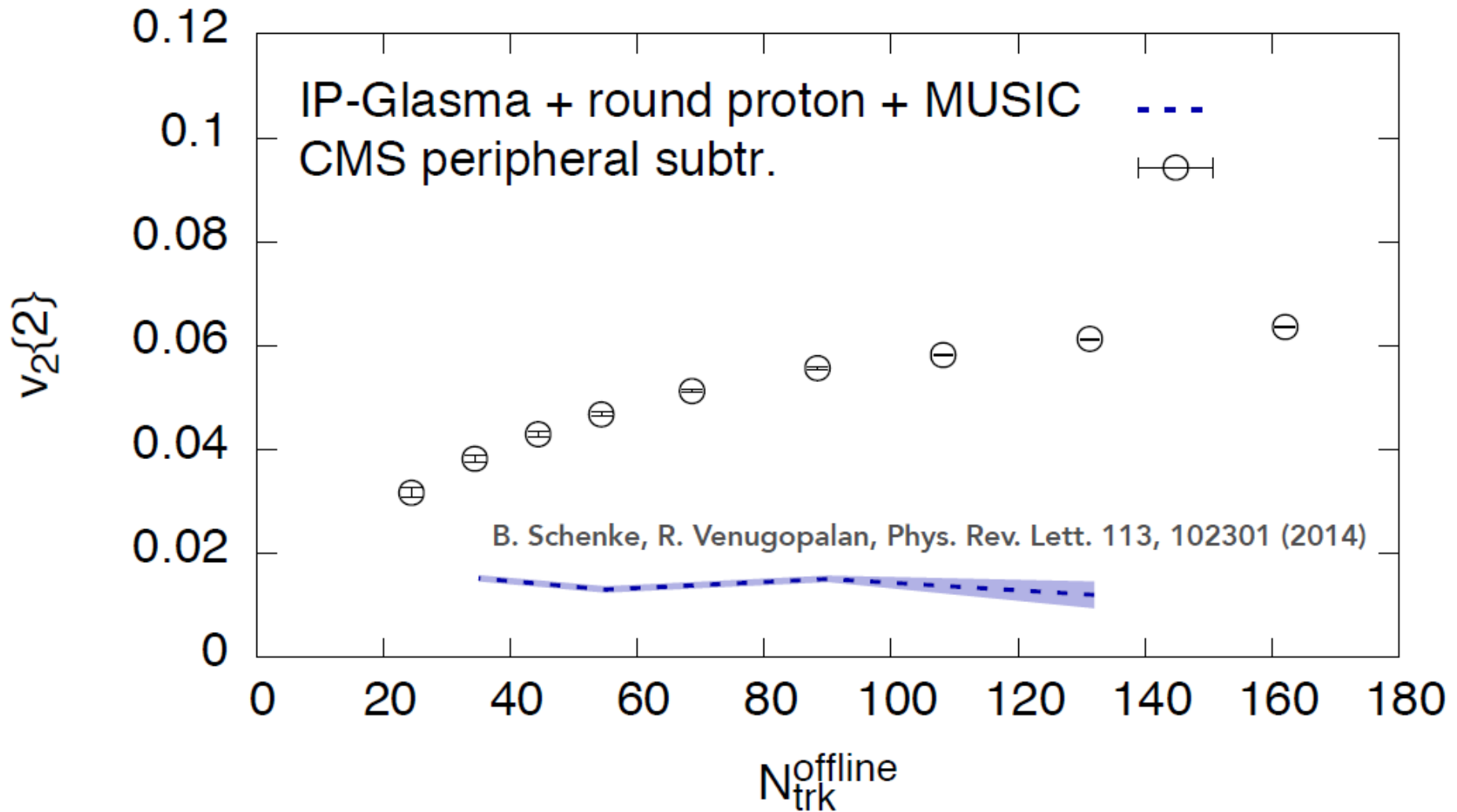
Альтернатива: транспортные модели

- Пример: AMPT = A Multi-Phase Transport Model
- партонный каскад + коалесценция
- Основные параметры: партонное сечение + механизм «расплавления» струн (string melting), позволяющий значительно увеличить плотность партонов в начальном состоянии
- Хорошо описывает эллиптические потоки как в Pb-Pb, так и в pPb



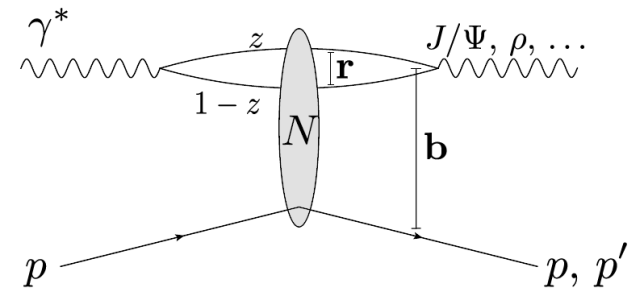
Bzdak and Ma, PRL 113 (2014)
AMPT (String Melting version).

Важность эффектов начального состояния



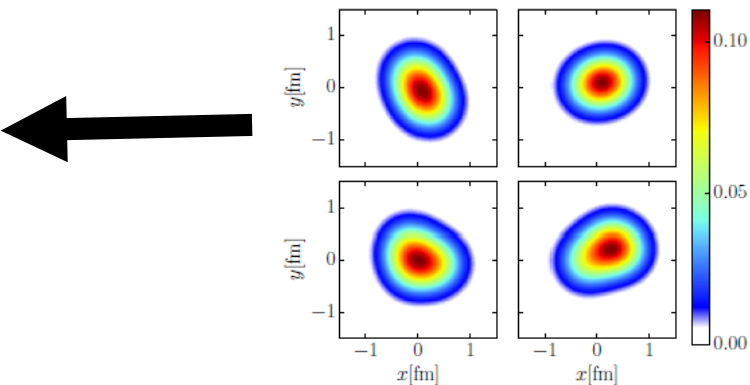
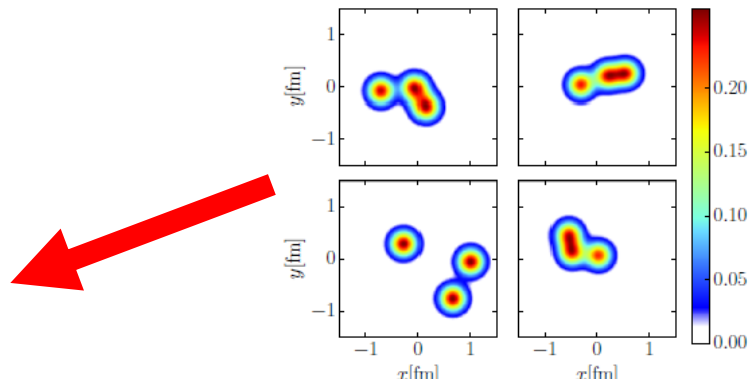
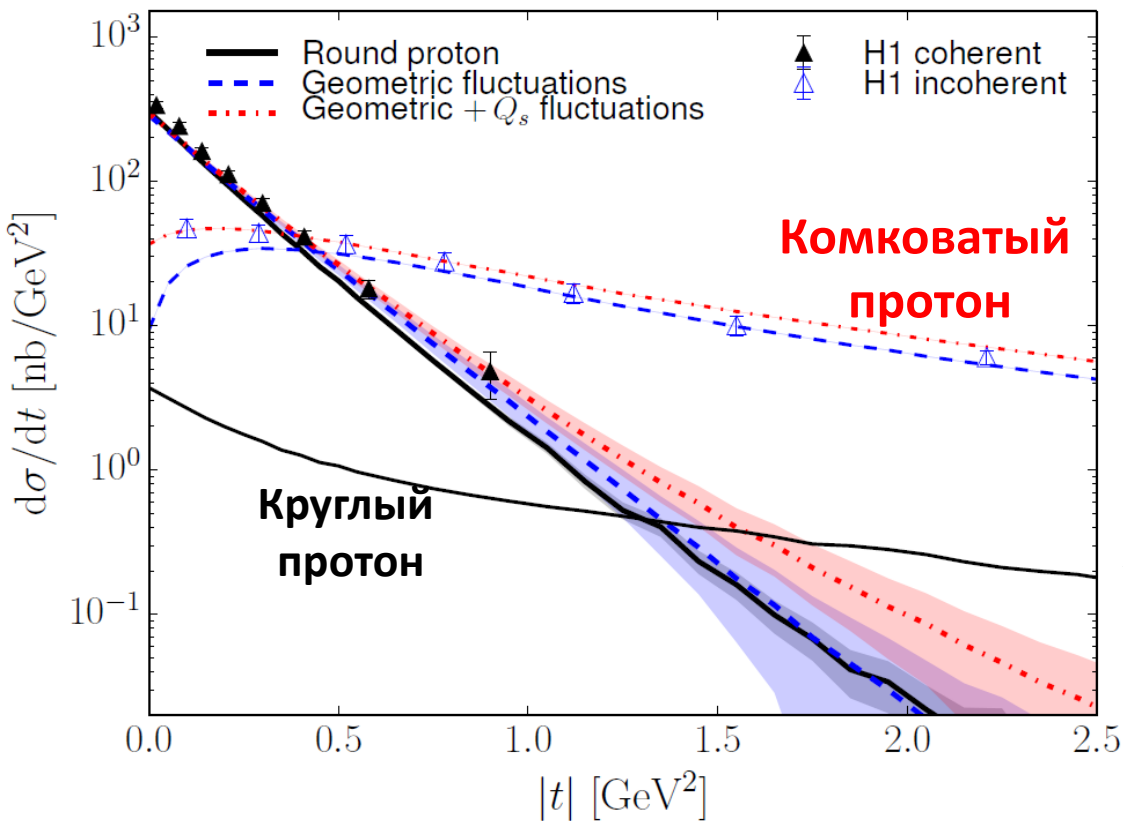
Experimental data: CMS Collaboration, Phys.Lett. B724, 213 (2013)

«Комковатый» протон

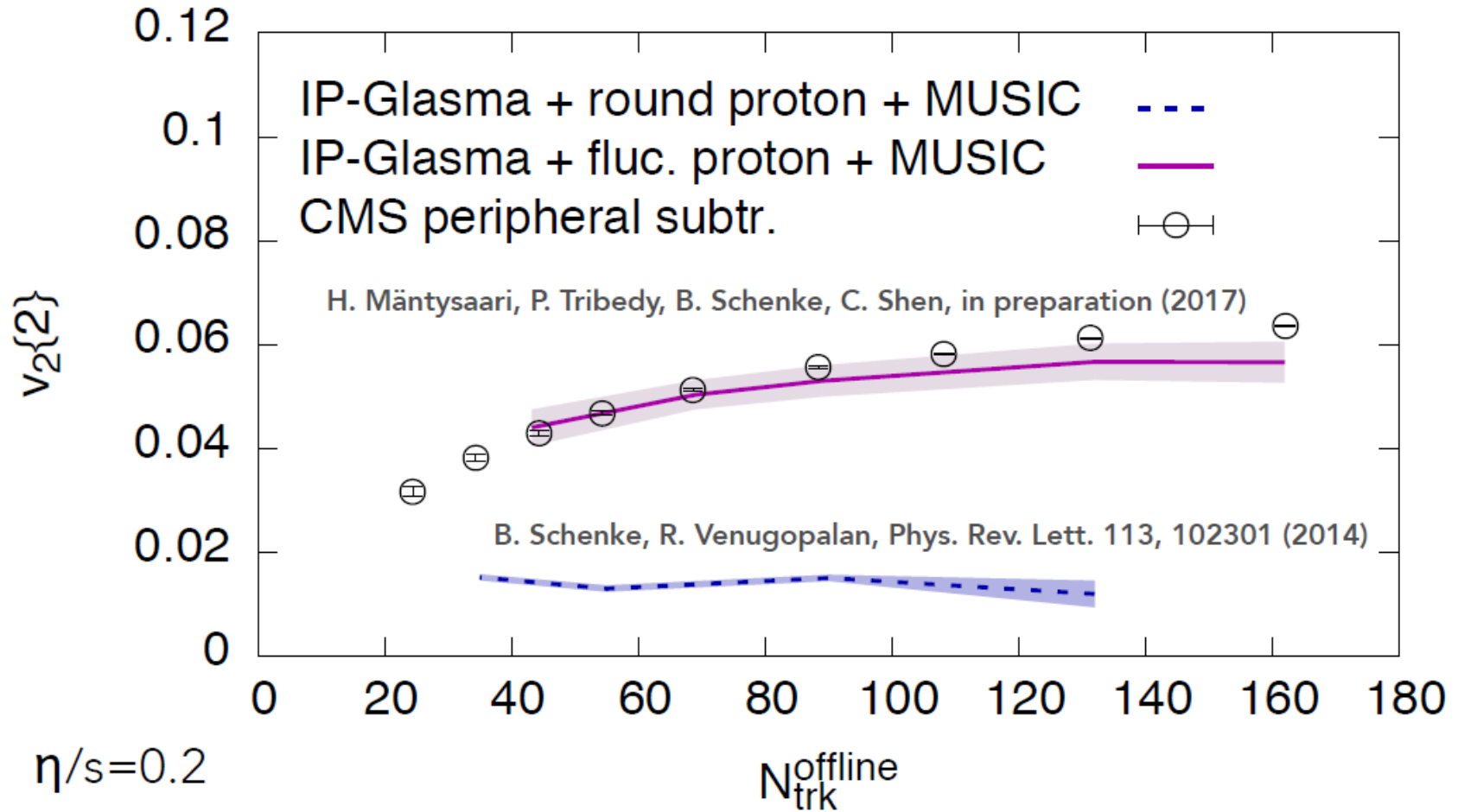


Когерентное сечение \sim средняя плотность
 Некогерентное сечение \sim флуктуации плотности

$$\frac{d\sigma^{\gamma^* p \rightarrow V p^*}}{dt} \sim \langle |\mathcal{A}(x, Q^2, t)|^2 \rangle - |\langle \mathcal{A}(x, Q^2, t) \rangle|^2$$



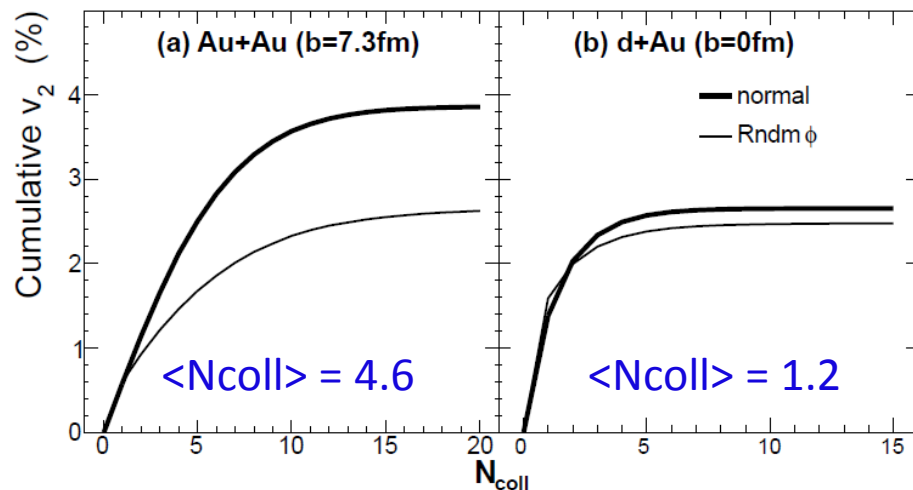
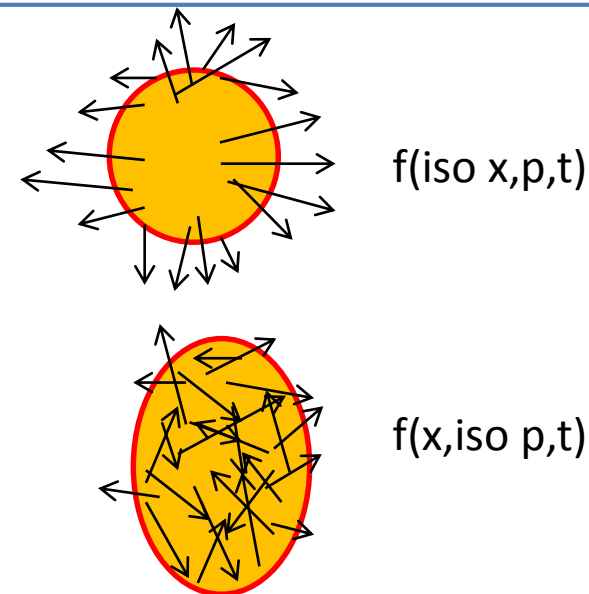
Эллиптический поток с «комковатым» протоном



- H. Mäntysaari, B. Schenke, Phys. Rev. Lett. 117 (2016) 052301; Phys.Rev. D94 (2016) 034042

“Escape” механизм?

- Два источника ненулевого эллиптического потока:
 - Коллективный поток: пространственная асимметрия в начальном состоянии приводит к асимметрии в импульсном пространстве за счет различных градиентов давления
 - Escape механизм: разная вероятность для партона «избежать» столкновения в зависимости от направления. Отвечает за ненулевой v_2 при больших p_T , где гидродинамика точно не работает
- Оба источника связаны в процессе эволюции



На примере АМРТ было показано, что escape механизм является основным источником v_2 в малых системах

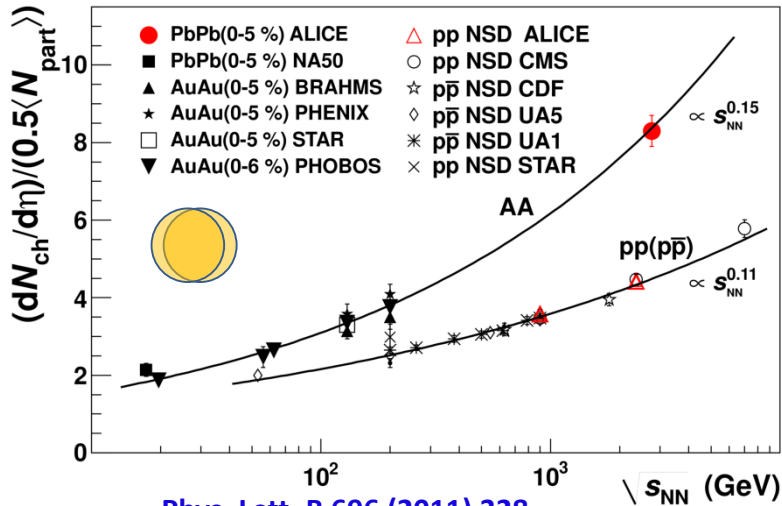
Заключение

- Экспериментально измерены v_2 и более высокие гармоники в нескольких малых системах (pp, p/d/ $^3\text{He}+A$) в широком диапазоне энергий (0.02-13 ТэВ)
- Нет очевидного указания на постепенное «проявление» коллективных эффектов с ростом множественности или энергии столкновения
- Нет единого объяснения коллективного потока. Много вопросов:
 - Почему так хорошо работает гидродинамика?
 - Какие степени свободы?
 - Начальное состояние, глазма, «комковатость» протона и т.п.
 - Важность escape механизма
 - Как наблюдаемые эффекты в малых системах влияют на наше понимание столкновений тяжелых ионов и КГП?

BACKUP

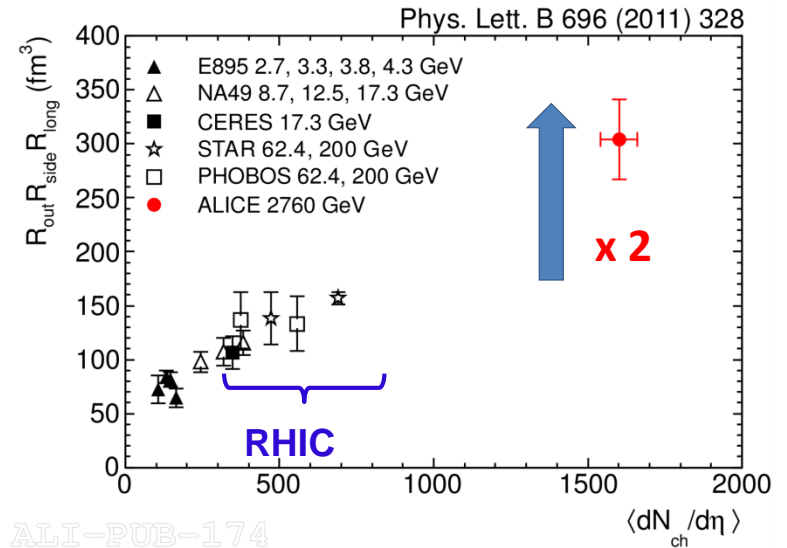
Global properties

Energy density $\sim 3 \times \text{RHIC} \sim 10 \text{ GeV}/\text{fm}^3$



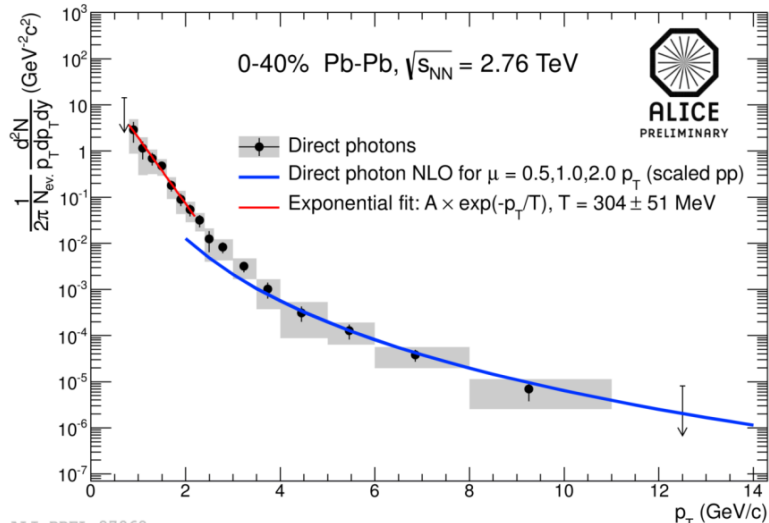
Phys. Lett. B 696 (2011) 328

Volume $\approx 2 \times \text{RHIC} (R^3 \approx 300 \text{ fm}^3)$



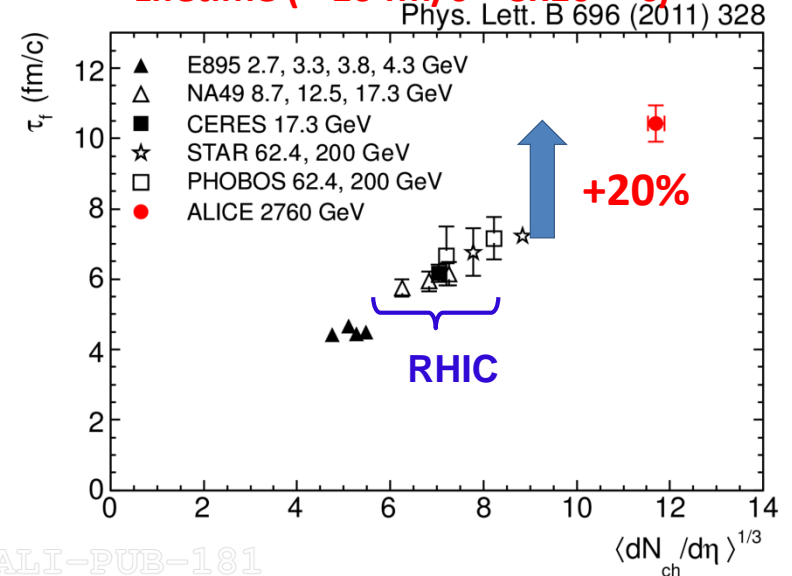
ALI-PUB-174

Photon T = $304 \pm 51 \text{ MeV} \sim 1.4 \times \text{RHIC}$



ALI-PREL-27968

Lifetime ($> 10 \text{ fm}/c \sim 3 \times 10^{-23} \text{ c}$)



ALI-PUB-181