



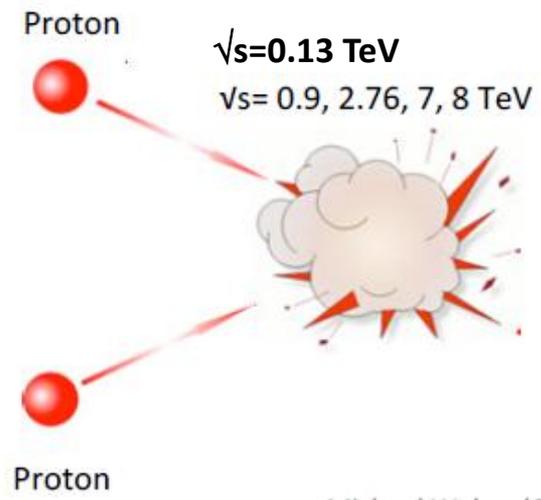
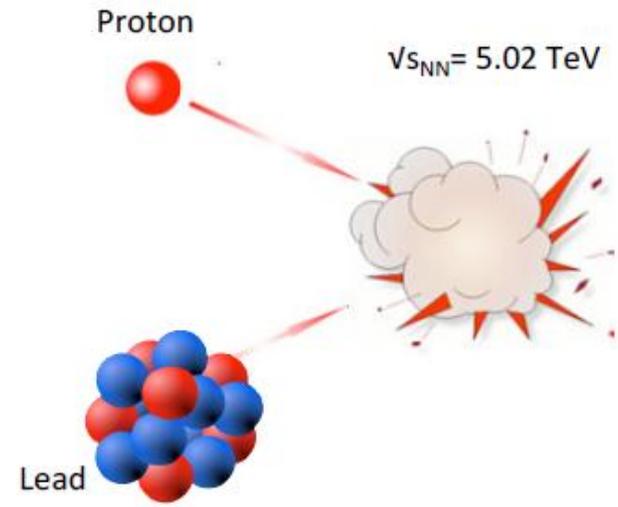
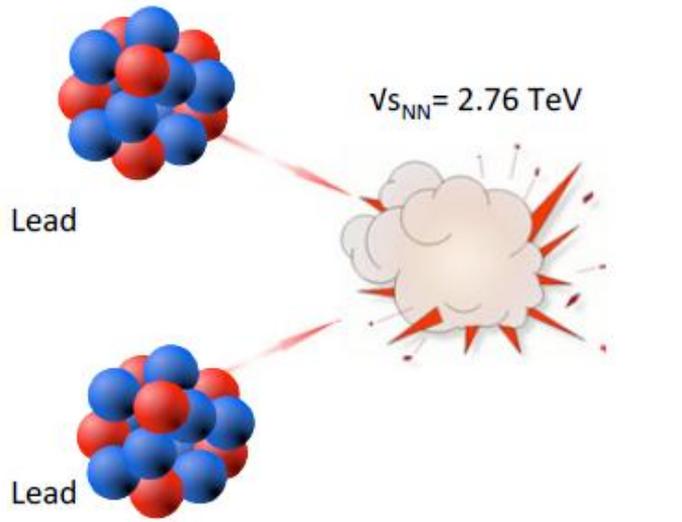
# Коллективный поток в столкновениях малых нуклонных систем

В.Л. Коротких

## Содержание

1. Ридж-эффект в  $pp$ ,  $pPb$ ,  $PbPb$
2. Hot spots in  $d+Au$ ,  $^3He+Au$
3. Collectivity in  $pPb$  and  $PbPb$
4. Scaling  $pPb$  and  $PbPb$

# Three systems studied at LHC



# Кардинальные вопросы



1. Если **есть** признаки потоковых явлений в **pPb** аналогичные в PbPb, то почему **нет** подавления струй и уменьшения фактора  $R_{pA}$  в **pPb** ?
2. Являются ли анизотропия частиц в **pp, pPb и PbPb** при малых  $p_T$  проявлением КГП среды и, если **да**, то в чём источник и какова пространственная структура КГП?
3. Может ли структура среды КГП из **горячих капель** (hot spots) или гранул-кластеров описать наблюдаемые потоковые эффекты?

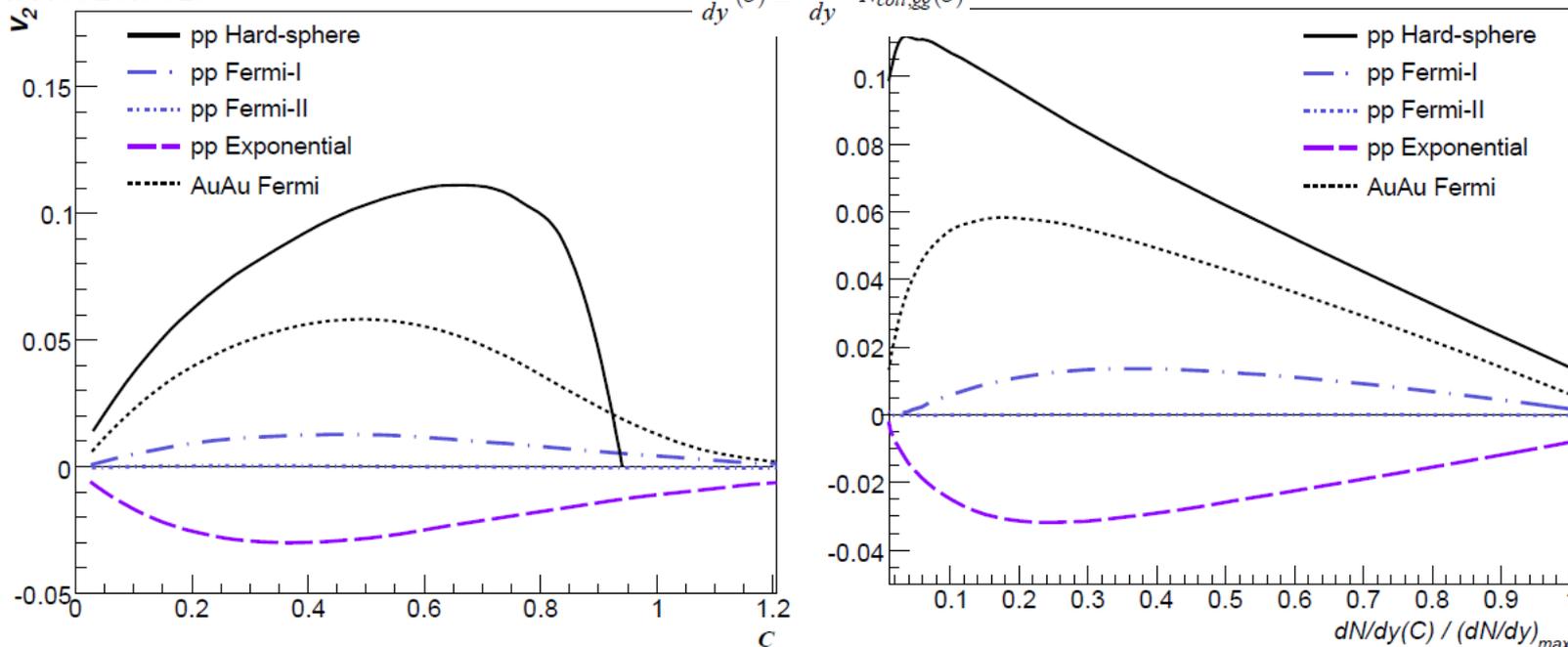
- [Estimates of hadron azimuthal anisotropy from multiparton interactions in proton-proton collisions at  \$\sqrt{s} = 14\$  TeV](#)
- [d'Enterria D., Eyyubova G.Kh, Korotkikh V.L., Lokhtin I.P., Petrushanko S.V., Sarcheva L.I., Snigirev A.M.](#)

[The European Physical Journal C](#) March 2010, Volume 66, Issue 1, pp 173-185

arXiv:0910.3029

Cited by 38 records

$$\frac{dN}{dy}(b) = \frac{dN_0}{dy} \cdot N_{coll,gg}(b)$$



**Fig. 8.** Integrated elliptic flow  $v_2$  parameter as function of centrality (left panel) and of normalised particle multiplicity (right panel) at midrapidity in  $p$ - $p$  collisions at  $\sqrt{s} = 14$  TeV for the different proton density distributions considered in this work (Table 1). For comparison, the  $v_2$  for  $Au$ - $Au$  at RHIC energies is shown as a dotted line.

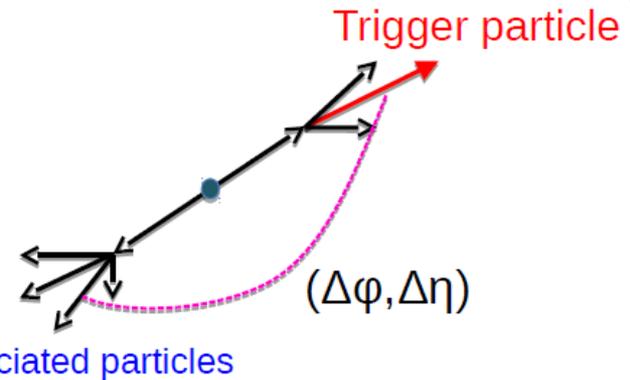
For realistic proton transverse profiles, we find integrated elliptic flow  $v_2$  parameters below **3% in  $p$ - $p$**  collisions at  $\sqrt{s} = 14$  TeV.



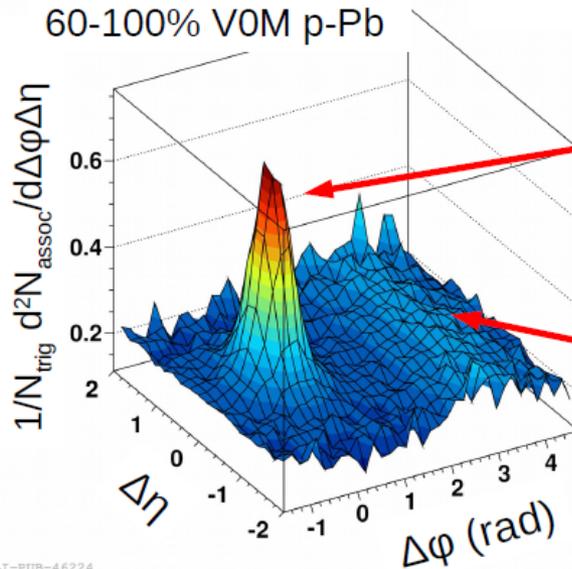
# Two-particle angular correlations



Associated particle per-trigger yield:  
 count "associated" particles in given pT range  
 relative to "trigger" particles in given pT range  
 vs azimuthal angle and pseudo-rapidity difference



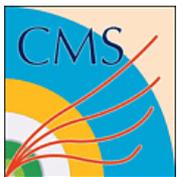
$2 < p_{T, \text{trig}} < 4 \text{ GeV}/c$   
 $1 < p_{T, \text{assoc}} < 2 \text{ GeV}/c$   
 60-100% V0M p-Pb



Near-side jet  
 + resonances  
 $(\Delta\phi \sim 0, \Delta\eta \sim 0)$

Away-side jet  
 + mom. conversation  
 $(\Delta\phi \sim \pi, \text{ along } \Delta\eta)$

ALICE-PUB-46224



# Ридж-эффект (2PC метод) для pp, pPb, PbPb

## CMS

pp 7 TeV

JHEP 09 (2010) 091

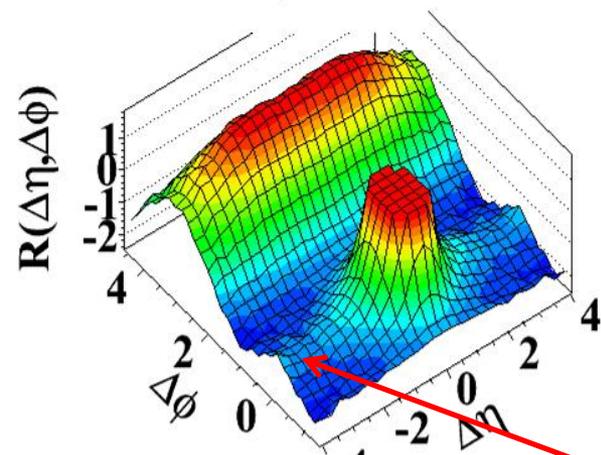
p+Pb 5.02 TeV

PLB 718 (2013) 795

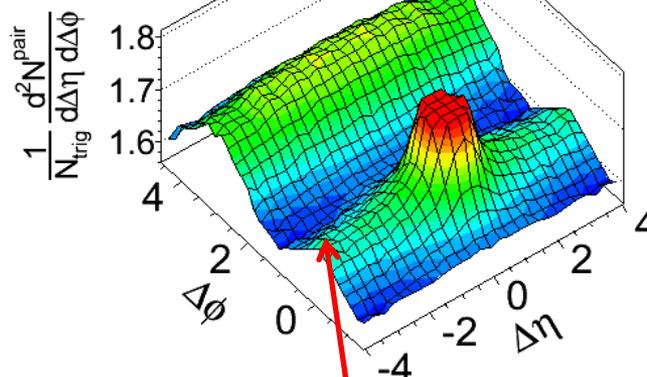
Pb+Pb 2.76 A TeV, 0-5%

JHEP 07 (2011) 076

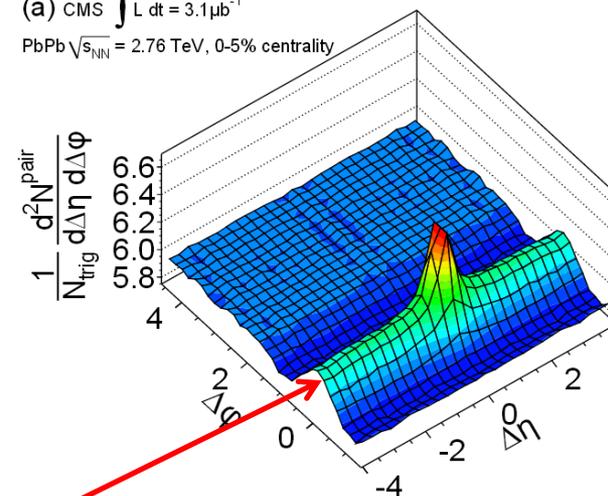
(d)  $N > 110, 1.0 \text{ GeV}/c < p_T < 3.0 \text{ GeV}/c$



CMS pPb  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02 \text{ TeV}, N_{\text{trk}}^{\text{offline}} \geq 110$   
 $1 < p_T < 3 \text{ GeV}/c$

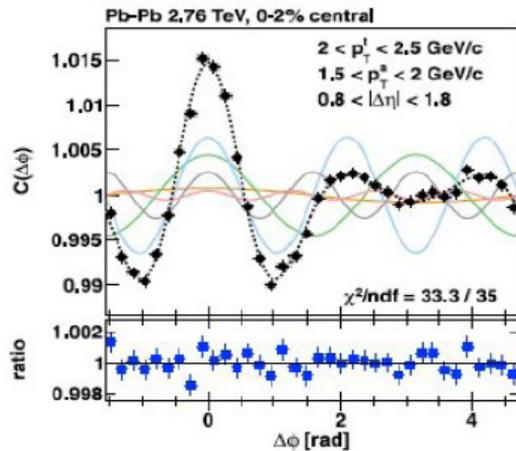


(a) CMS  $\int L dt = 3.1 \mu\text{b}^{-1}$   
PbPb  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76 \text{ TeV}, 0\text{-}5\%$  centrality



”Ridge” (*long-range azimuthal correlations*) is observed  
in high multiplicity pp and pPb as well as in central and semi-central PbPb collisions

# Область коллективного потока частиц по $p_T$ для $v_n(2PC)$



пункт. кривая -- сумма гармоник  $V_n$   
PLB 708, 249 (2012) ALICE

- Разложение  $C(\Delta\varphi)$  в ряд Фурье:

$$C(\Delta\varphi, \Delta\eta) \sim 1 + 2 \sum V_{n\Delta} \cos(n\Delta\varphi), \quad V_{n\Delta} = \langle \cos(n\Delta\varphi) \rangle$$

- Выполняется факторизация гармоник  $V_{n\Delta}$  на одночастичные коэффициенты  $v_n(p_T)$  в промежуточном диапазоне  $p_T$ :

$$V_{n\Delta} \approx \langle v_n\{2\}(p_T^{tr}) v_n\{2\}(p_T^{2c}) \rangle$$

- Сумма первых 5 гармоник описывает структуру корреляций

7

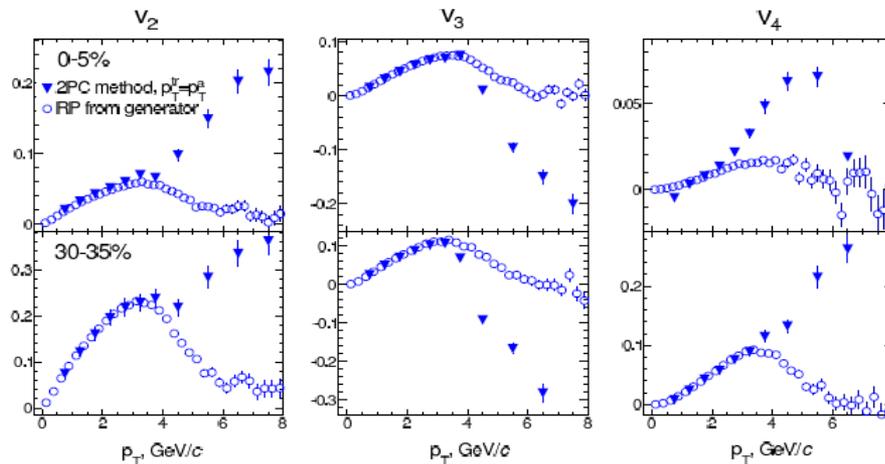


Figure 5: Top row: Single-particle coefficients  $v_n$  obtained w.r.t. known reaction plane and  $v_n\{2PC\}$  extracted from  $V_n$  for the same  $p_T^a = p_T^r$  in HYDJET++ generated 0-5% central PbPb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV. Bottom row: The same as top but for 30-35% centrality.

**Pb+Pb, 2.76 TeV, HJ++**  
G.Eyubova et al. Phys.Rev. C91 (2015)  
6, 064907

$$v_n\{2PC\}(p_T) = \frac{V_n(p_T, p_T^{low})}{v_n(p_T^{low})}$$

До  $p_T \approx 4$  GeV/c  
метод 2-х частичных  
(2PC)корреляций с триггерной  
частицей даёт те же значения  
гармоник, что и Фурье разложение  
одночастичных распределений на  
генераторном уровне.

7



# Факторизация в области Риджа в PbPb на CMS



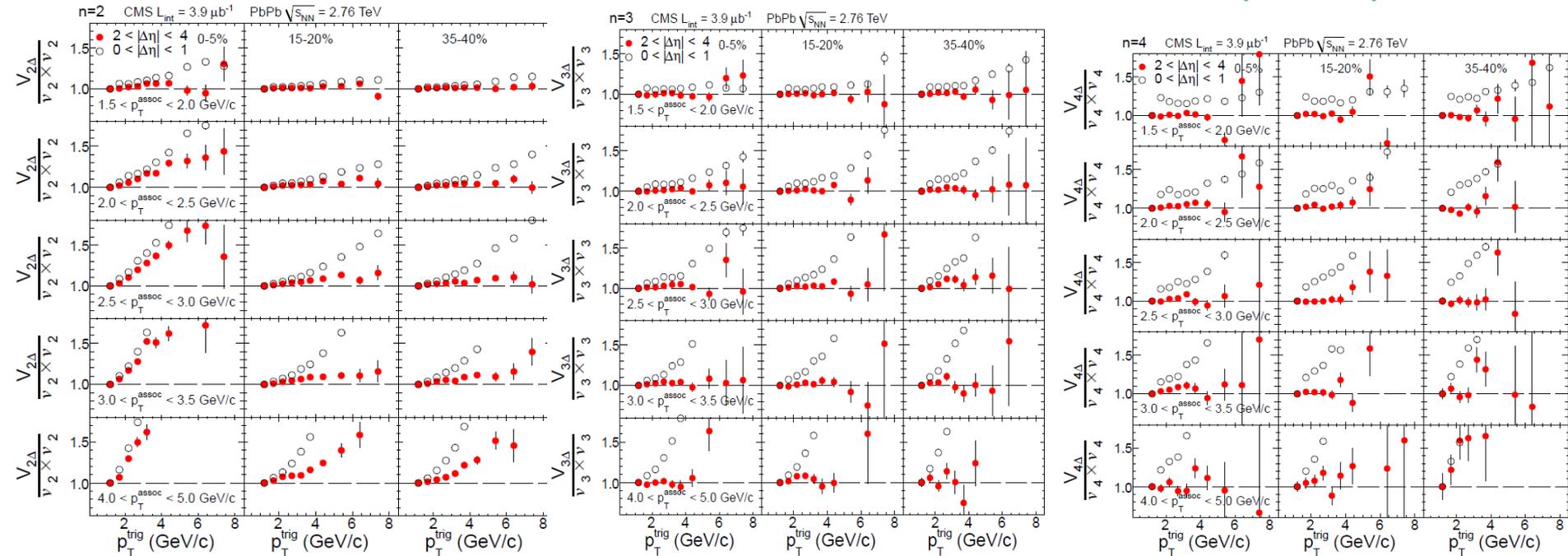
CMS, PbPb 2.76 TeV, arXiv:1201.3158

$$V_{n\Delta}(p_T^{\text{trig}}, p_T^{\text{assoc}}) = v_n(p_T^{\text{trig}}) \times v_n(p_T^{\text{assoc}}),$$

$$\frac{V_{2\Delta}}{v_2 \times v_2} \qquad \frac{V_{3\Delta}}{v_3 \times v_3}$$

$$v_n\{2PC\}(p_T) = \frac{V_n(p_T, p_T^{\text{low}})}{v_n(p_T^{\text{low}})}$$

$$\frac{V_{4\Delta}}{v_4 \times v_4}$$



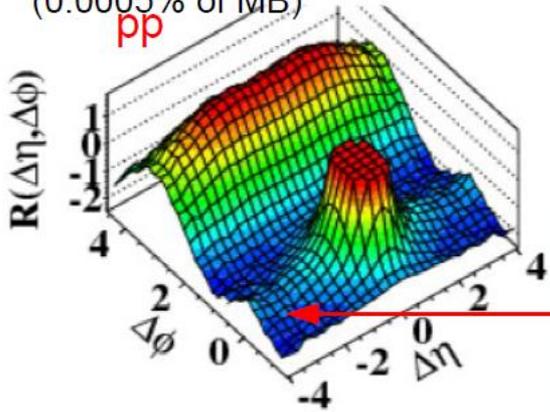
Факторизация отлично выполняется при  $2 < |\Delta\eta| < 4$ , т.е. при исключении пика от струй, при 15-20% и 35-40% для  $V_2, V_3, V_4$  до  $p_T^{\text{trig}} < 2 \text{ GeV/c}$  и  $p_T^{\text{assoc}} < 4 \text{ GeV/c}$



# NS ridge structures in angular correlations

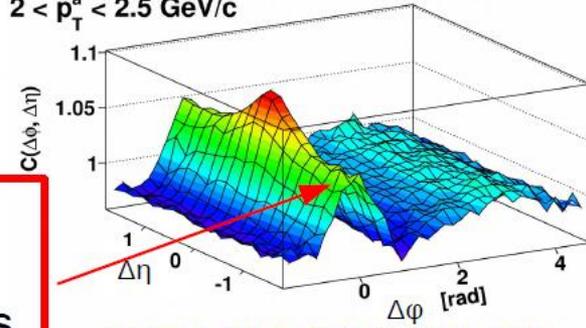


CMS  $N \geq 110$ ,  $1.0 \text{ GeV}/c < p_T < 3.0 \text{ GeV}/c$   
(0.0005% of MB)  
**pp**



CMS, JHEP 1009 (2010) 91

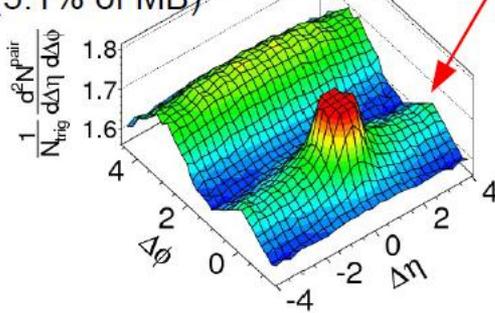
$3 < p_T^i < 4 \text{ GeV}/c$  **Pb-Pb** Pb-Pb 2.76  
 $2 < p_T^a < 2.5 \text{ GeV}/c$  0-10%



ALICE, PLB 708 (2012) 249

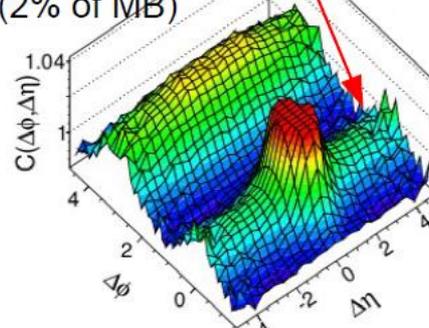
Near-side (NS)  
ridges in high  
multiplicity events  
at LHC energies

CMS pPb  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02 \text{ TeV}$ ,  $N_{\text{trk}}^{\text{offline}} \geq 110$   
 $1 < p_T < 3 \text{ GeV}/c$  **p-Pb**  
(3.1% of MB)



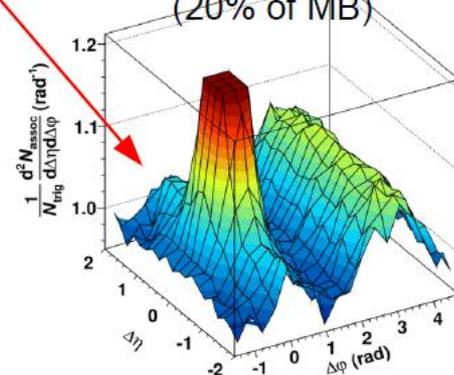
CMS, PLB 718 (2012) 795

p+Pb  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02 \text{ TeV}$   
 $0.5 < p_T^{a,b} < 4 \text{ GeV}$  **p-Pb**  $\Sigma E_T^{\text{Pb}} > 80 \text{ GeV}$   
(2% of MB)



ATLAS, PRL 110 (2013) 182302

$2 < p_{T,\text{trig}} < 4 \text{ GeV}/c$  **p-Pb** p-Pb |  $s_{NN} = 5.02 \text{ TeV}$   
 $1 < p_{T,\text{assoc}} < 2 \text{ GeV}/c$  0-20%  
(20% of MB)

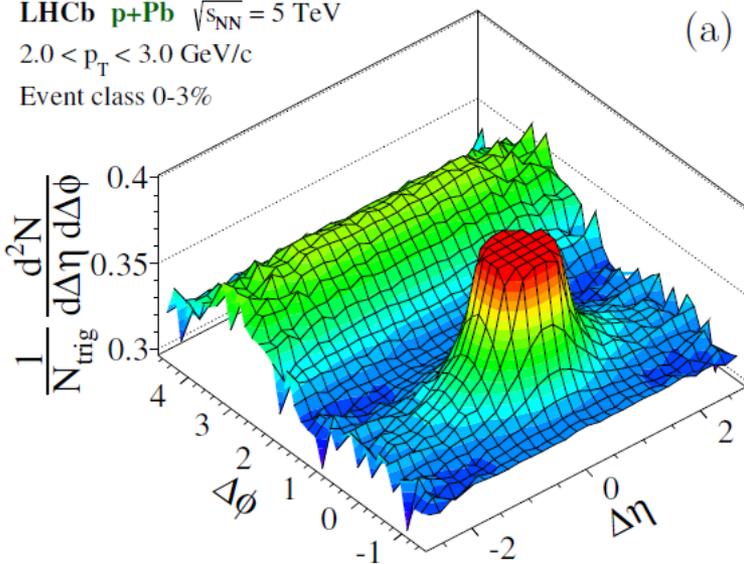


ALICE, PLB 719 (2013) 29

**Все экспериментальные группы** наблюдают Ридж-эффект при высокой множественности, даже LHCb (след.слайд) LHCb-CONF-2015-004

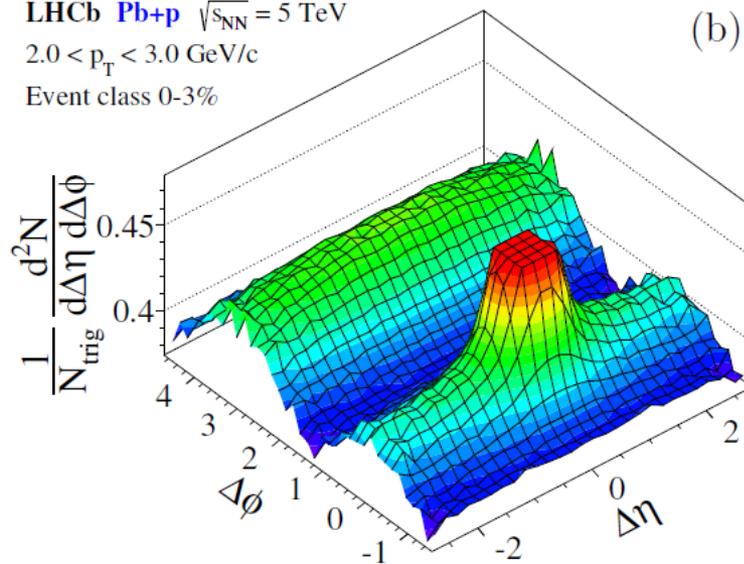
LHCb-CONF-2015-004

LHCb  $p+Pb$   $\sqrt{s_{NN}} = 5$  TeV  
 $2.0 < p_T < 3.0$  GeV/c  
 Event class 0-3%



(a)

LHCb  $Pb+p$   $\sqrt{s_{NN}} = 5$  TeV  
 $2.0 < p_T < 3.0$  GeV/c  
 Event class 0-3%



(b)

Figure 4: Two-particle correlation functions for events recorded in the  $p+Pb$  (a) and  $Pb+p$  (b) configurations, showing the 0 – 3% event-activity class. The analysed pairs of prompt charged particles are selected in a  $p_T$ -range of 2 – 3 GeV/c. The near-side peak around  $(\Delta\eta = \Delta\phi = 0)$  is truncated in each histogram.

arXiv:1509.04776

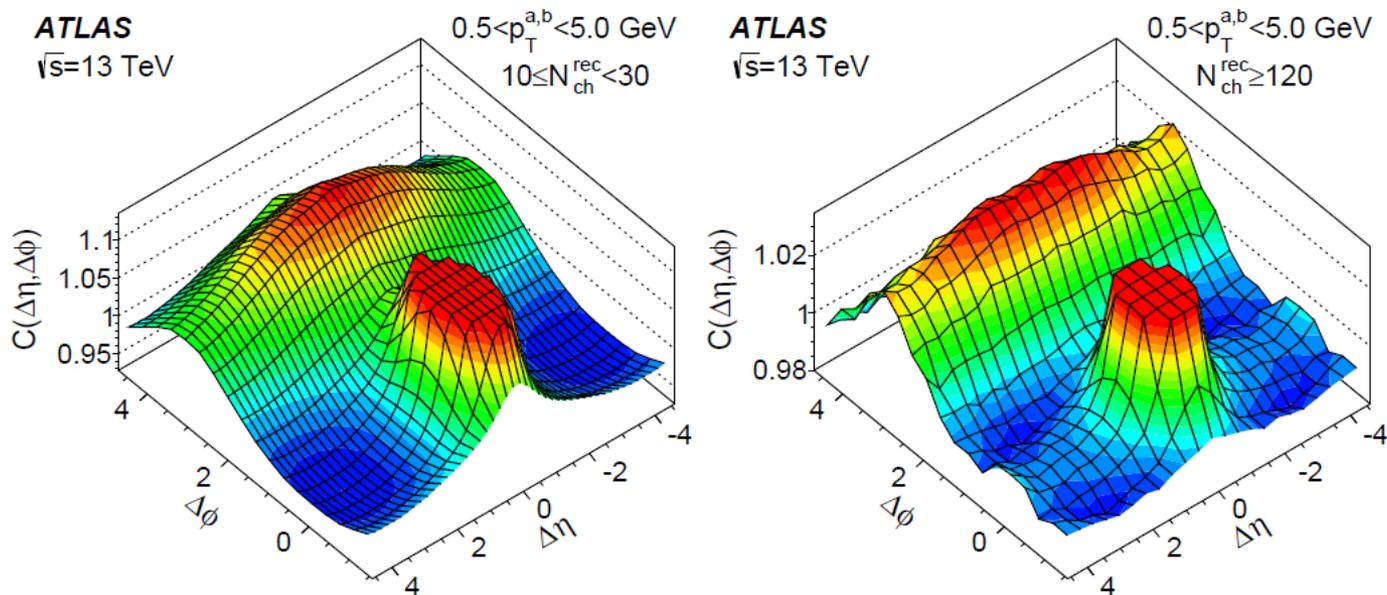


Figure 2: Two-particle correlation functions,  $C(\Delta\eta, \Delta\phi)$ , in 13 TeV  $pp$  collisions in  $N_{ch}^{rec}$  intervals 10–30 (left) and  $\geq 120$  (right) for charged particles having  $0.5 < p_T < 5.0$  GeV. The distributions have been truncated to suppress the peak at  $\Delta\eta = \Delta\phi = 0$  and are plotted over  $|\eta| < 4.6$  to avoid statistical fluctuations at larger  $|\Delta\eta|$ .

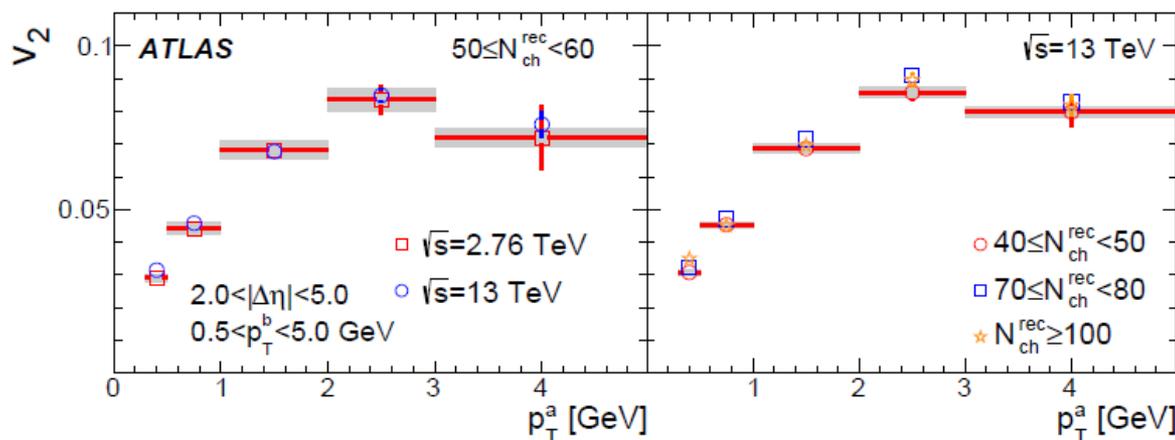
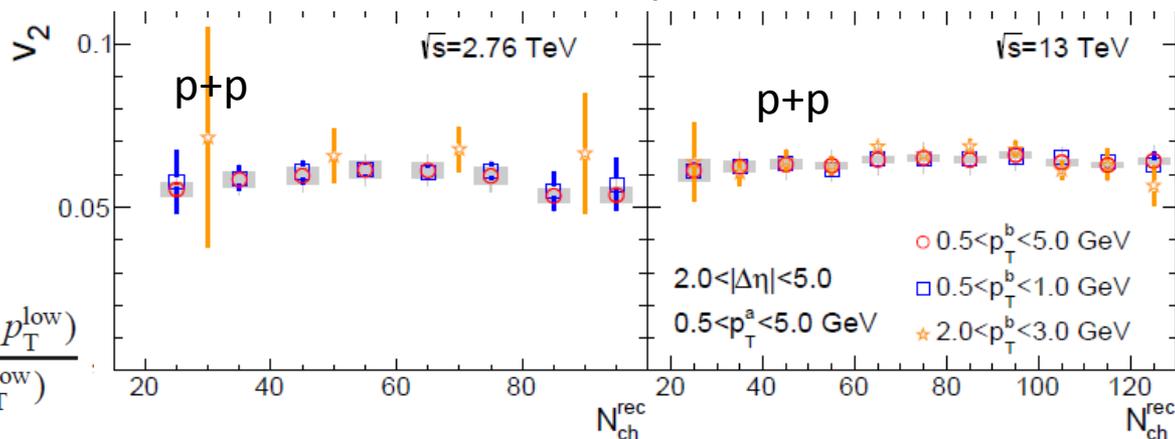
# Azimuthal anisotropy harmonics from long range correlators in high multiplicity **pp** collisions at 13 TeV, **ATLAS**



- Two--particle correlation
  - Fourier harmonics extracton

arXiv:1509.0477 CERN-PH-EP-2015-251  
September 17, 2015

$$v_n\{2PC\}(p_T) = \frac{V_n(p_T, p_T^{\text{low}})}{v_n(p_T^{\text{low}})}$$



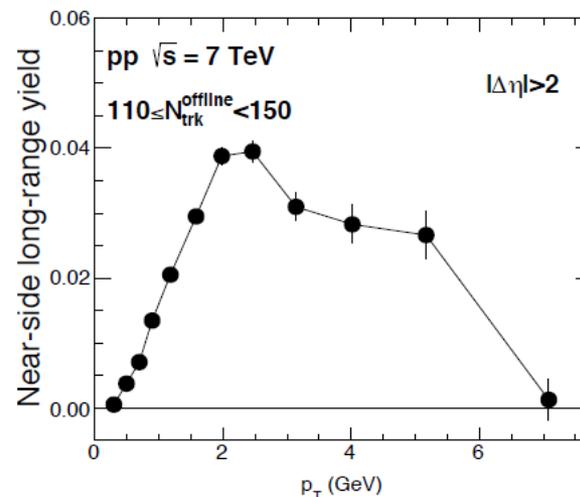
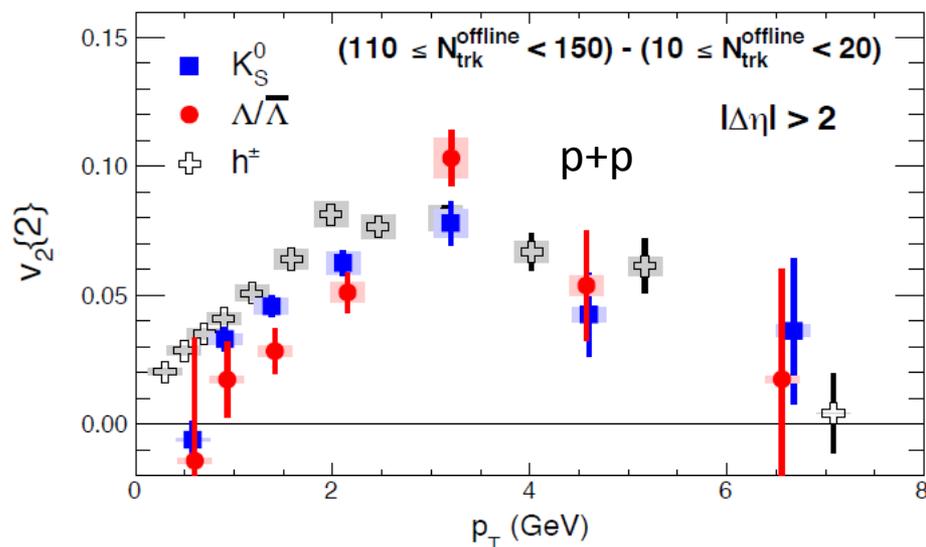
The  $v_2$  values in the 13 and 2.76 TeV data are consistent within uncertainties. These results suggest that the ridge in pp collisions arises from the same or similar underlying physics as observed in p+Pb collisions, and that the dynamics responsible for the ridge has no strong energy dependence

# Azimuthal anisotropy harmonics from long range correlators in high multiplicity **pp** collisions at 7 TeV, **CMS**



- Two--particle correlation
  - Fourier harmonics extracton
  - Peripheral subtracton procedure

AN2015\_066\_v9\_15-009, HIN-15-009-pas-v2



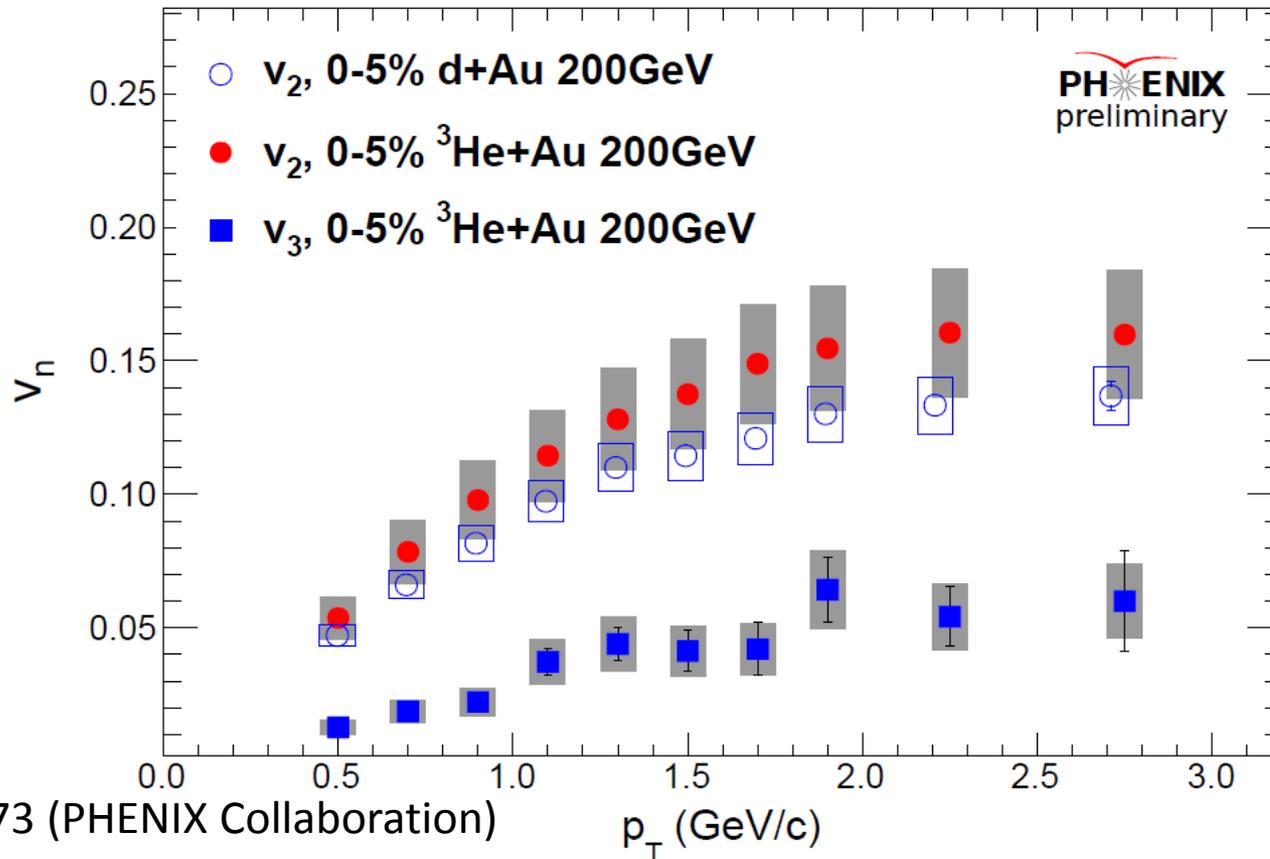
- After peripheral subtraction
  - $v_2$  decrease at high  $p_T$ , converges to 0 for all particle species
  - Mass ordering observed at low  $p_T$ , identical  $v_2$  at higher  $p_T$
- Overall, for high multiplicity **pp** events (before & after subtraction)
  - At low  $p_T$  region, same observation as for **pPb** and **PbPb**
  - At higher  $p_T$ , reverse of mass ordering is not observed

# Малые нуклонные системы d+Au, $^3\text{He}+\text{Au}$



ICNFP, Kolymbari, Aug. 23-30, 2015

Itzhak Tserruya



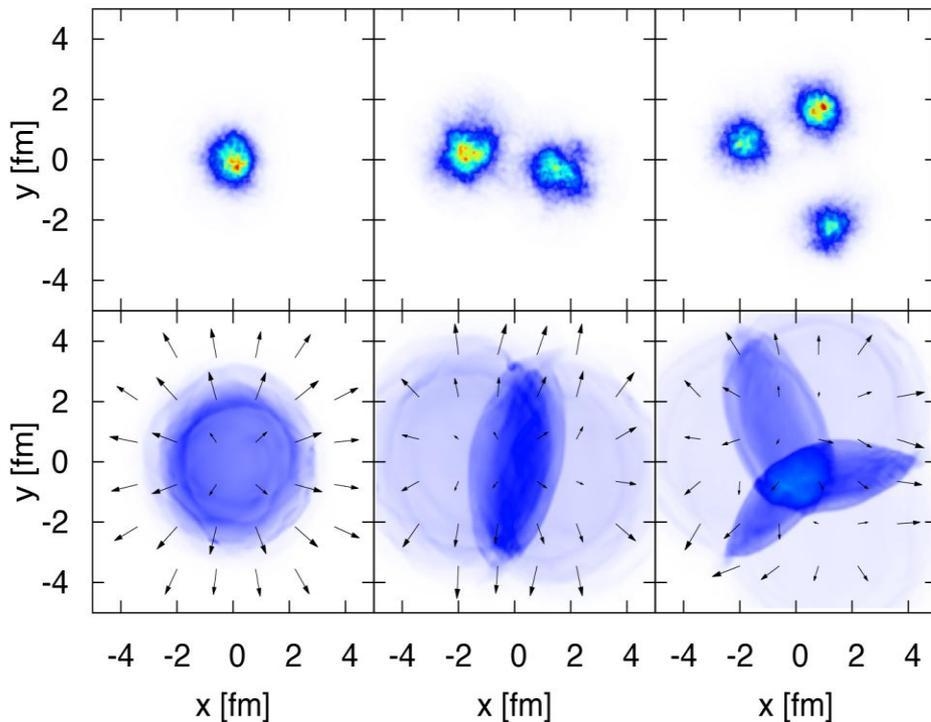
arXiv:1507.06273 (PHENIX Collaboration)

Comparison with various theoretical predictions are made, including to models where the hot spots created by the impact of the three  $^3\text{He}$  nucleons on the Au nucleus expand hydrodynamically to generate the triangular flow. The agreement of these models with data may indicate the formation of low-viscosity quark-gluon plasma even in these small collision systems.

“Tiny Drops of Early Universe 'Perfect' Fluid”

$\text{He}^3 + \text{Au}$ , RHIC

<https://www.bnl.gov/newsroom/news.php?a=11749>



**Jamie Nagle**

**Идея горячих капель КГП состоит в том, что 3 нуклона в столкновении с тяжёлым ядром Au образуют одно, два или три мгновенных капелек первичной КГП, которые затем дают анизотропное распределение частиц**

The upper panel of this image represents initial hot spots created by collisions of one, two, and three-particle ions with heavy nuclei. The lower panel shows the geometrical patterns of particle flow that would be expected if the small-particle collisions are creating tiny hot spots of quark-gluon plasma.

# AMPT (модель партонных взаимодействий)



Long-range azimuthal correlations in proton-proton and proton-nucleus collisions from the incoherent scattering of partons

G.-L. Ma and A.Bzdak , arXiv:1404.4129

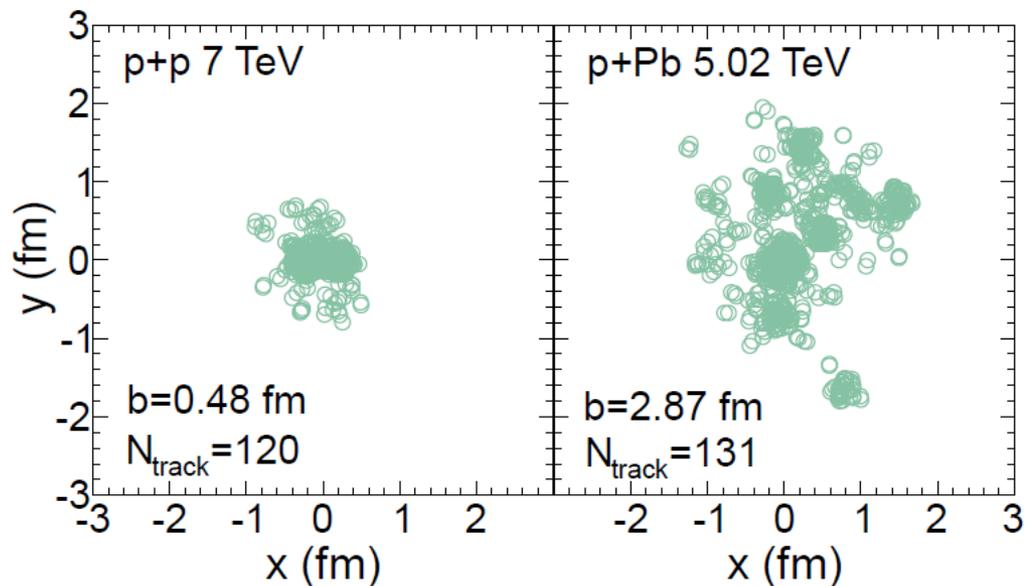


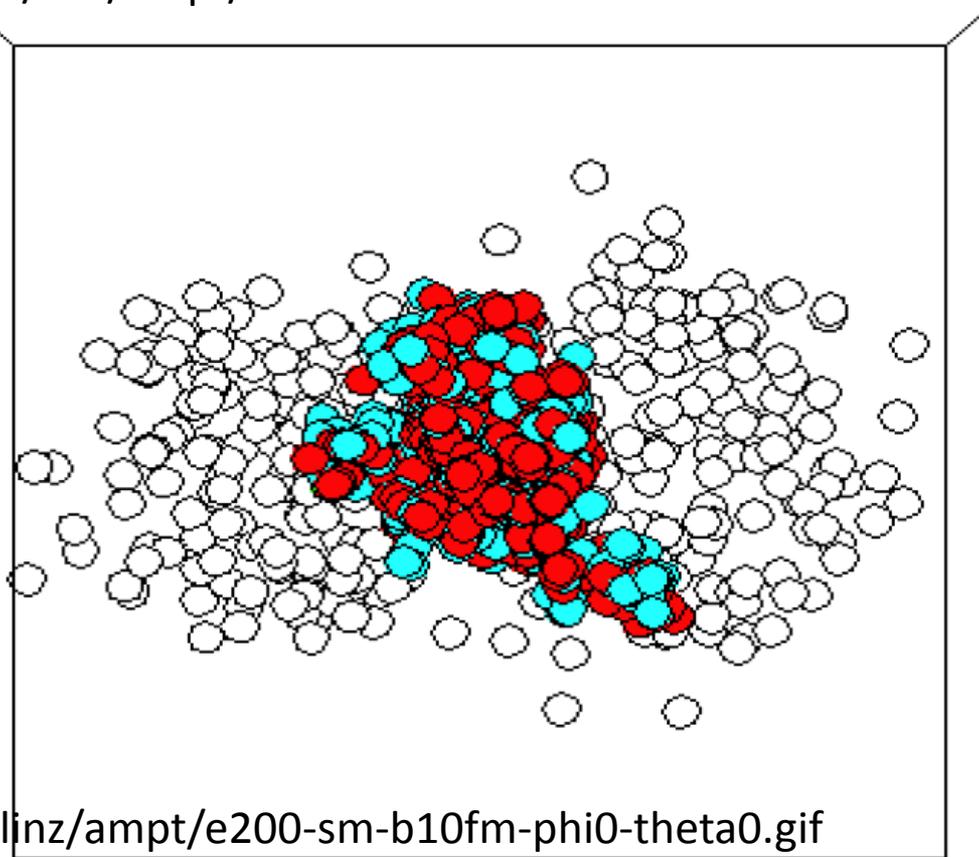
Figure 2: The initial parton distribution in a p+p collision (left panel) and a p+Pb collision (right panel) for two typical AMPT events (with string melting mechanism) with the number of produced charged particles,  $N_{\text{track}}$ , larger than 110 ( $|\eta| < 2.4$ ,  $p_T > 0.4$  GeV). Here  $b$  is the impact parameter.

# Флуктуации формы области “КГП” в модели AMPT



<http://myweb.ecu.edu/linz/ampt/>

Z.W. Lin,  
Vol. 7 (2014)  
Acta Physica  
Polonica B  
Proceedings  
Supplement,  
p 193



box range:  $\pm 15.00\text{fm}$

**View of the transverse plane along the beam axis at the time of  $1\text{ fm}=c$  for a 200 AGeV Au+Au event at impact parameter  $b = 10\text{ fm}$  from the string melting version of AMPT.**

# Гидродинамическая поперечная плотность энтропии в PbPb



Ulrich Heinz , J.Scott Moreland (Ohio State U. Phys.Rev. C84 (2011) 054905

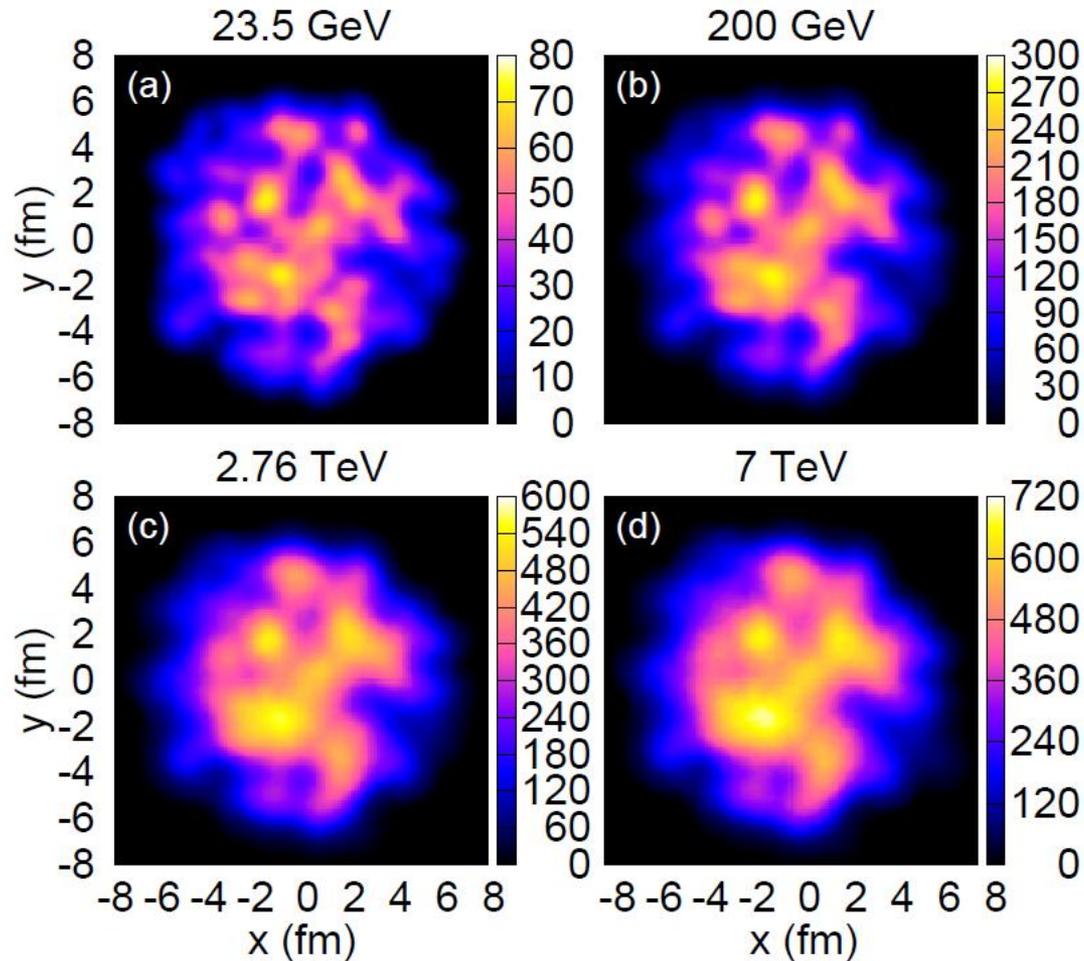
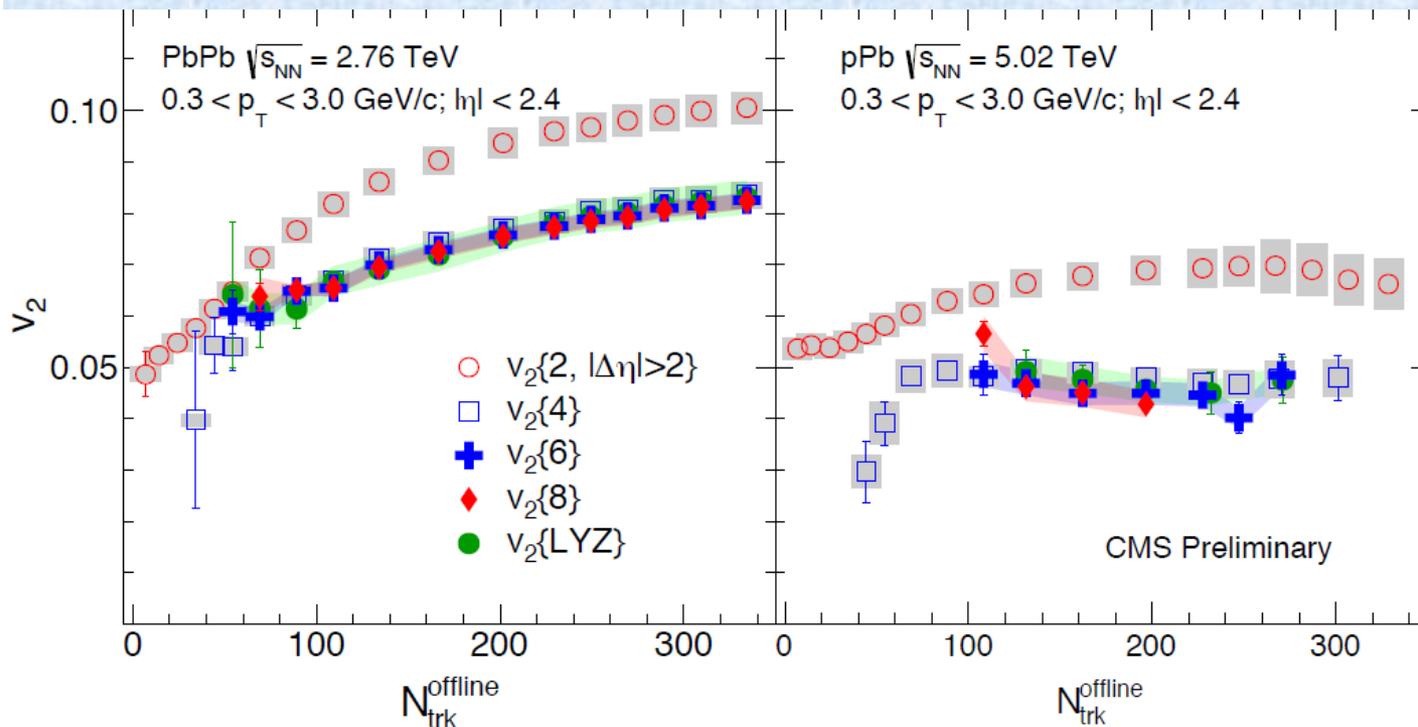


FIG. 3: (Color online) Influence of the growth of the proton with collision energy on the initial transverse entropy density  $s(r_{\perp}, \tau_0 = 0.4 \text{ fm}/c)$  (in  $\text{fm}^{-3}$ ) for a typical central ( $b=0$ ) Au+Au collision from the MC-KLN model. All four panels use identical nucleon distributions in the two colliding nuclei, but the width  $\sqrt{B}$  of the nucleon thickness function changes with  $\sqrt{s}$  (indicated above each panel) as listed in Table I.

# Сравнение **PbPb** и **pPb** для потока $V_2$

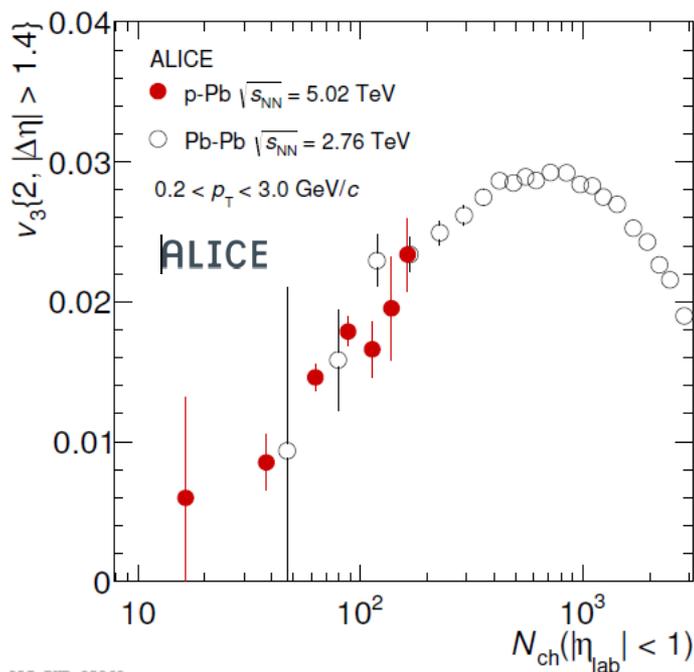


**Измерение  $V_2$  в pPb для высоких кумулянтов свидетельствует о многочастичных корреляциях**

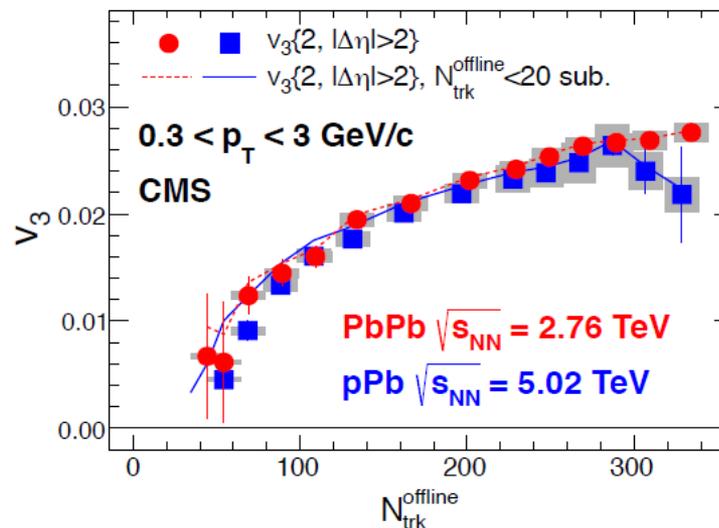
- Correlations in p-Pb **more than a 2-particle effect**
- But **difference in strength** of  $v_2$  between p-Pb and Pb-Pb

Удивительное сходство зависимостей  $V_2(N_{\text{track}})$  для **PbPb** и **pPb**

# Сравнение **PbPb** и **pPb** для потока $V_3$



ALI-PUB-85368



- $v_3$  is similar for both systems at same multiplicity
- Driven by fluctuations?

Удивительное совпадение зависимостей  $V_3(N_{track})$  для **PbPb** и **pPb**

*Phys. Lett. B* 724, (2013) 213

*arXiv:1406.2474 [nucl-ex]*

Michael Weber (CERN) - WPCF 2014 - 25.08.2014

21

# Сравнение PbPb и pPb для flow $V_2$



G.Bazar,D.Teante,Phys.Rev. C90 (2014) 5, 0549036 arXiv:1312.6770

## A scaling relation between proton-nucleus and nucleus-nucleus collisions (arXiv:1312.6770) *“Кластерная модель КГП”*

«... источником потока в PbPb и pPb является одинаковый механизм коллективного отклика **на флуктуации в положении кластеров КГП** .....»

«... приближение одинакового отношения в PbPb и pPb длины пробега партона к размеру излучающей системы  $\ell_{\text{mfp}} / L$  при фиксированной множественности ...»

«... при этом возможно согласовать результаты  $V_2(N_{\text{track}})$  при исключении геометрического фактора в гармонике  $v_2$  для Pb+Pb »

$$(v_2\{2\})_{\text{PbPb,rscl}} \equiv \sqrt{1 - \frac{\epsilon_s^2}{\epsilon_2\{2\}^2}} (v_2\{2\})_{\text{PbPb}} .$$

«... связь между средней энергией потери энергии  $\Delta E$  и размером излучающей системы  $L$  зависит от начальной энергии партона. Критическая энергия для начала jet quenching  $E_{\text{cr}} = qL^2$  недостаточна для pPb столкновений. Потому не наблюдают jet quenching для pPb »

# Исключение геометрического фактора в гармонике $v_2$ для Pb+Pb



Для PbPb второй кумулянт эксцентриситета зависит от геометрической области

перекрывания  $\epsilon_s$ ,

и от флуктуаций

плотности кластеров и более высоких поправок

$$(\epsilon_2\{2\})_{AA}^2 = \epsilon_s^2 + \langle \delta\epsilon_2^2 \rangle + \mathcal{O}\left(\frac{\epsilon_s^2}{N_{\text{clust}}}\right) + \mathcal{O}\left(\frac{1}{N_{\text{clust}}^2}\right).$$

Для pPb первого члена нет,  $\epsilon_s = 0$ , а второй, управляющий флуктуациями плотности кластеров, с точностью до  $\mathcal{O}(1/N_{\text{clust}}^2)$  одинаков для pPb и PbPb.

$$\frac{\sqrt{\epsilon_2\{2\}^2 - \epsilon_s^2}}{\epsilon_2\{2\}} (v_2\{2\})_{AA} = k_2 \sqrt{\langle \delta\epsilon_2^2 \rangle_{AA}},$$

$$(v_2\{2\})_{pA} = k_2 \sqrt{\langle \delta\epsilon_2^2 \rangle_{pA}}.$$

Считая, что коллективный поток есть отклик на начальный эксцентриситет,

$\mathbf{v}_n \sim \mathbf{k}_n \boldsymbol{\epsilon}_n$ , можно геометрический фактор между динамическими

флуктуаций для PbPb.

и пересчитать второй кумулянт для PbPb

без его вл

$$(v_2\{2\})_{\text{PbPb,rscl}} \equiv \sqrt{1 - \frac{\epsilon_s^2}{\epsilon_2\{2\}^2}} (v_2\{2\})_{\text{PbPb}}.$$

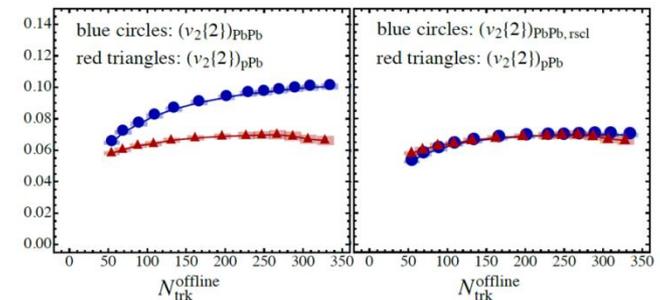


FIG. 2. The integrated  $v_2\{2\}$  for PbPb and pPb vs. multiplicity from [23]. Left: Original values. Right: The fluctuation dependent elliptic flow,  $(v_2\{2\})_{\text{PbPb,rscl}} = \sqrt{1 - \epsilon_s^2/\epsilon_2\{2\}^2} (v_2\{2\})_{\text{PbPb}}$ , compared to  $(v_2\{2\})_{\text{pPb}}$ . The scaling factor is extracted using the Phobos Glauber Model [24] in  $A+A$  simulations, and is not a fit.

Коэффициент  $k_2$  зависит одинаковым образом для PbPb и pPb от отношения  $\ell_{\text{mfp}} / L$ .

# Scaling pPb and PbPb



G.BASAR, D. TEANEY, A scaling relation between proton-nucleus and nucleus-nucleus collisions (arXiv:1312.6770)

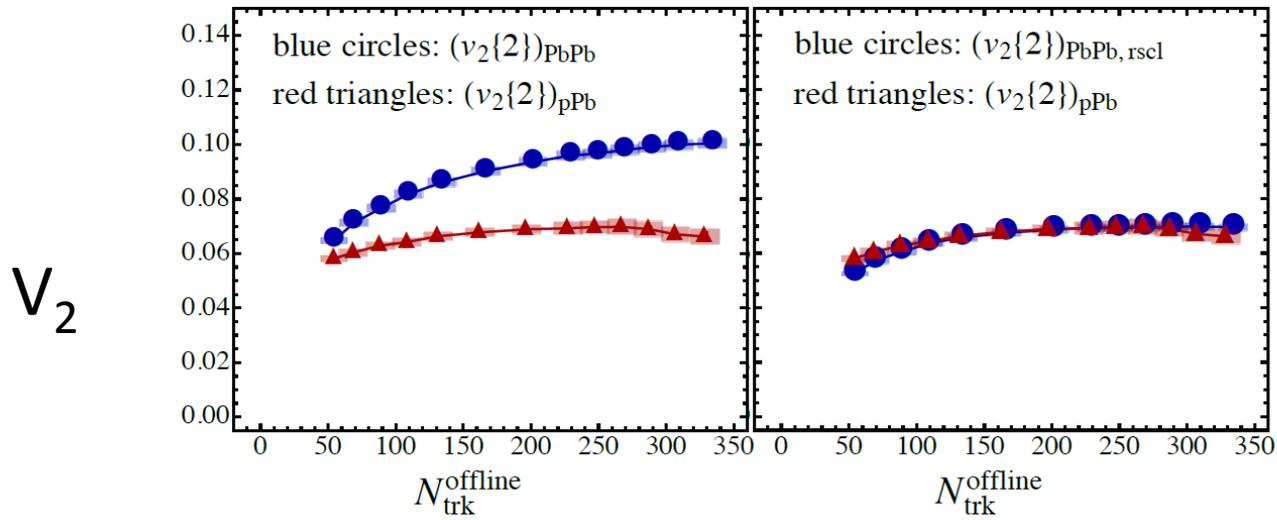


FIG. 2. The integrated  $v_2\{2}$  for PbPb and pPb vs. multiplicity from [23]. Left: Original values. Right: The fluctuation dependent elliptic flow,  $(v_2\{2})_{\text{PbPb,rscl}} = \sqrt{1 - \epsilon_s^2/\epsilon_2\{2\}^2} (v_2\{2})_{\text{PbPb}}$ , compared to  $(v_2\{2})_{\text{pPb}}$ . The scaling factor is extracted using the Phobos Glauber Model [24] in  $A + A$  simulations, and is not a fit.

**Пересчёт второй гармоники в PbPb с учётом геометрического фактора даёт полное совпадение результатов  $V_2$  для PbPb и pPb**

# Горячие капли КГП



Некоторые выводы:

- 1. Следует переходить на исследования наблюдаемых в зависимости от множественности.**
- 2. В теории желательно исследовать одновременно  $PbPb$ ,  $pPb$  и  $pp$  столкновения.**
- 3. НИ сообщество всё больше склоняется к идее образования кластеров (горячих капель) КГП, которые, перекрываясь, испускают анизотропный коллективный поток частиц.**
- 4. На QM15 наверняка будут доклады, претендующие на единый механизм коллективного потока при столкновении малых систем.**