

Корреляция эллиптического потока при малых и больших p_T

В. Л. Коротких, Г.Х. Эйюбова

1. Экспериментальные результаты
2. Возможные интерпретации
3. Новые результаты HYDJET++, 2019 г.
4. Обсуждение
5. Предложение

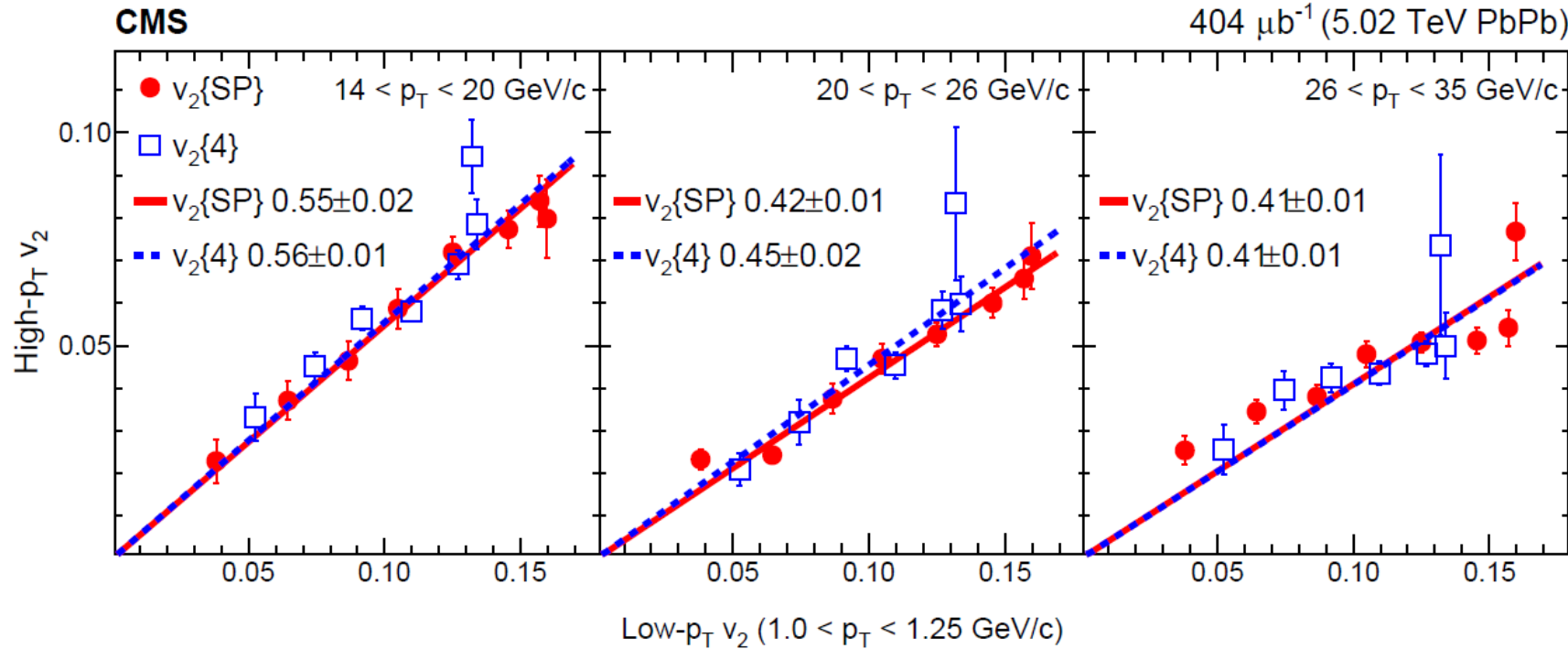
1. CMS, Phys. Lett. B 776 (2017) 195, <http://arxiv.org/abs/1702.00630>
2. ATLAS [<http://arxiv.org/abs/1808.03951>]
3. ALICE [<http://arxiv.org/abs/1804.02944>]

Эпиграфы

«Нет плохих моделей,
есть плохо подобранные параметры»
И.П. Лохтин

«Под лежащий камень вода не течёт»
Русская поговорка

Azimuthal anisotropy of charged particles with transverse momentum up to 100 GeV/c in PbPb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV



CMS,
Phys. Lett. 776(2017)195
Fig.3

1. v_2 при больших и малых p_T сильно коррелируют и не малы.
2. Их значения увеличиваются линейно с ростом интервалов центральностей от (0-5%) до (50-60%) как

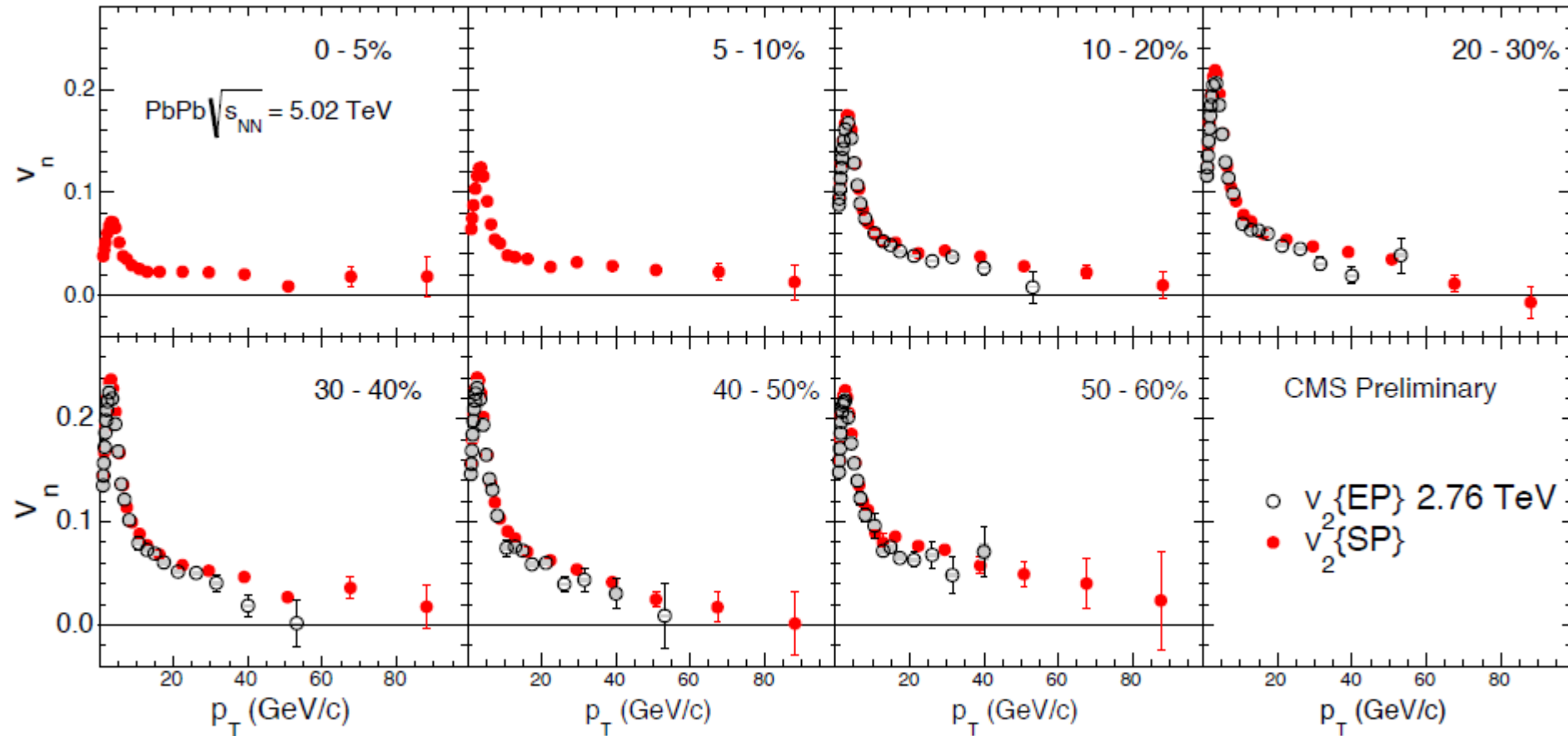
$$v_2^{\text{High-}p_T} = k_2 \cdot v_2^{\text{Low-}p_T}$$

Наклон k_2 одинаков для $v_2(\text{SP})$ и для $v_2\{4\}$ и меняется от 0.55 до 0.4 при переходе к большим p_T .

3. При этом для центральностей 50-60% значения $v_2 \cong 0.03 - 0.05$ для больших p_T и $0.03 - 0.15$ для малых p_T . Подчеркнём, что для отобранных интервалов p_T параметр потока v_2 увеличивается с ростом периферичности. (слева направо точки соответствуют **0–5, 5–10, 10–15, 15–20, 20–30, 30–40, 40–50, and 50–60%**)

Сравнение v_2 при 2.76 (HIN-11-012) и 5.02 TeV (HIN-15-014), CMS 2015 г.

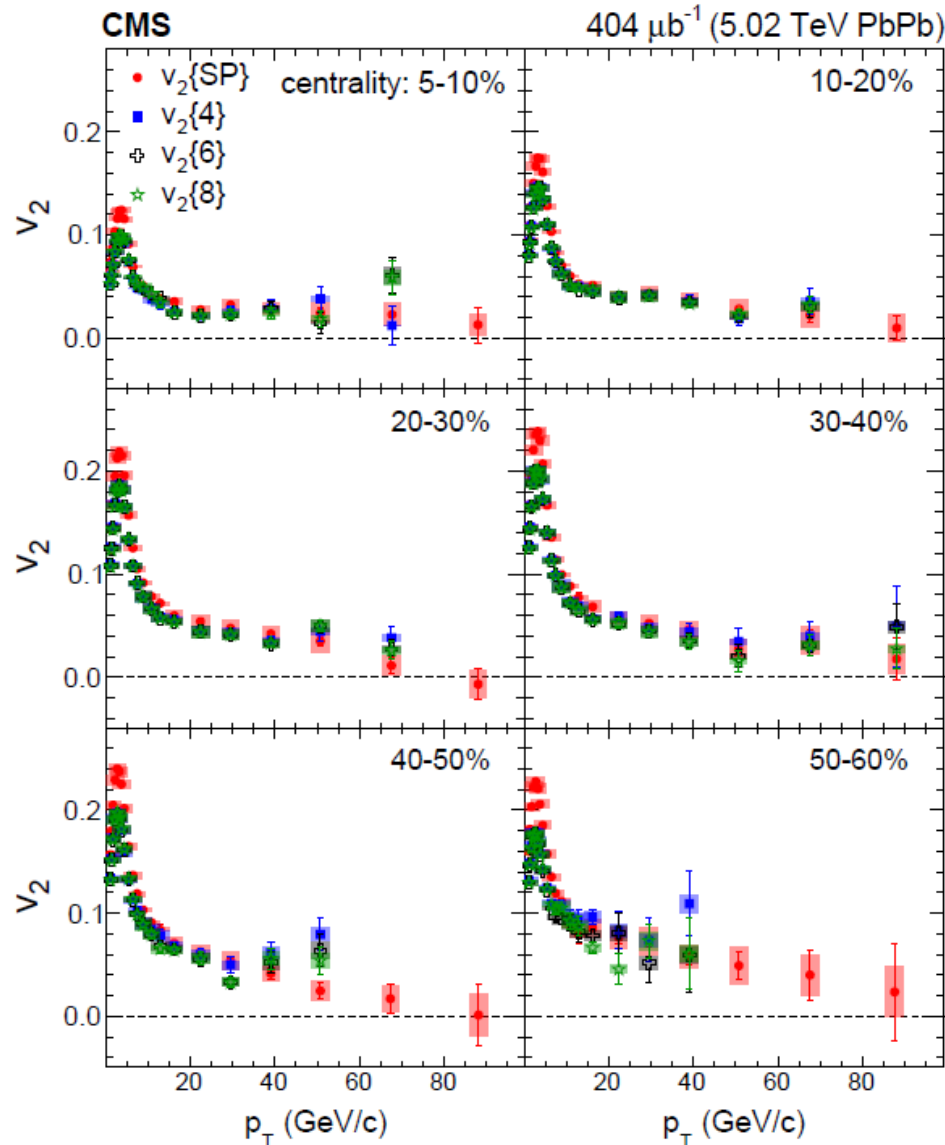
❖ $v_2\{\text{SP}\}$ at 5.02 TeV compared with $v_2\{\text{EP}\}$ at 2.76 TeV



Results are similar within uncertainties but 5.02 TeV reach a much higher p_T range with significant positive v_2

Azimuthal anisotropy of charged particles with transverse momentum up to 100 GeV/c in PbPb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV

CMS Phys. Lett. B 776 (2017) 195



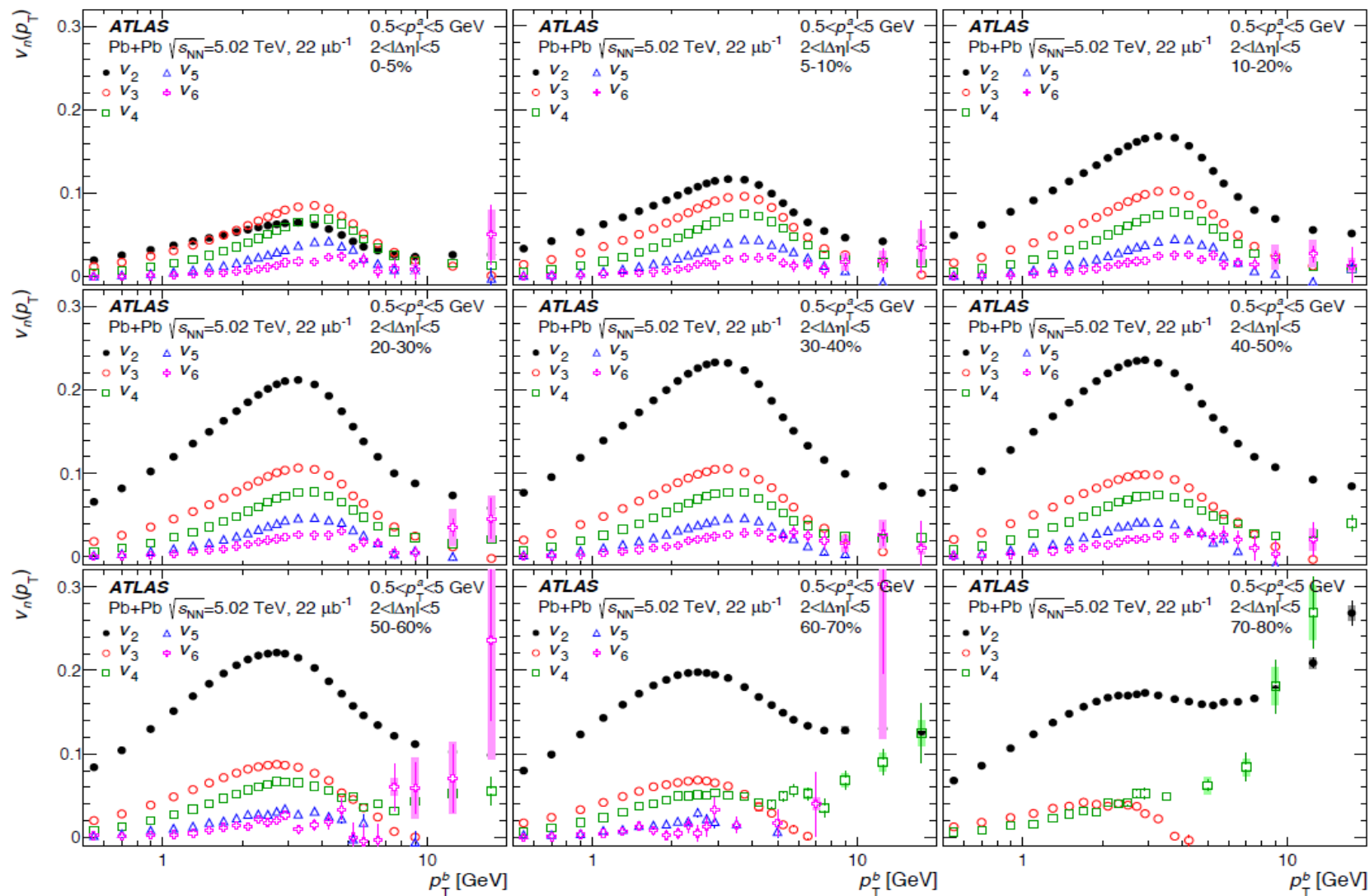
Кумулянт $v_2\{4\}$ увеличивается с ростом периферичности с ростом периферичности.
 При 40 ГэВ/с $v_2\{4\} \approx 0.1$ для 50-60%

Figure 2: Comparison between the v_2 results from the SP and the 4-, 6-, and 8-particle cumulant methods, as a function of p_T , in six centrality ranges from 0–5% to 50–60%. The vertical bars (shaded boxes) represent the statistical (systematic) uncertainties.

Measurement of the azimuthal anisotropy of charged particles produced in $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV

Pb+Pb collisions

ATLAS [<http://arxiv.org/abs/1808.03951>]



Ещё более выразительное увеличение $v_2(2PC)$ (в лог-масштабе по оси p_T) с ростом p_T до 20 ГэВ.с наблюдается в эксперименте ATLAS [<http://arxiv.org/abs/1808.03951>].

Для самых периферических областей $> 70\%$ $v_2(2PC)$ даже больше, чем при малых p_T . Растёт также $v_4(SP)$.

Figure 6: The v_n values obtained with the 2PC method as a function of p_T^b for $0.5 < p_T^a < 5$ GeV. Each panel represents a different centrality interval. The vertical error bars indicate statistical uncertainties. The shaded bands indicate systematic uncertainties.

Возможные интерпретации

(M.Guilbaud AppTalk_HIN-15-014, 19.05.2016)

❖ v_2 at low p_T (0-3 GeV/c):

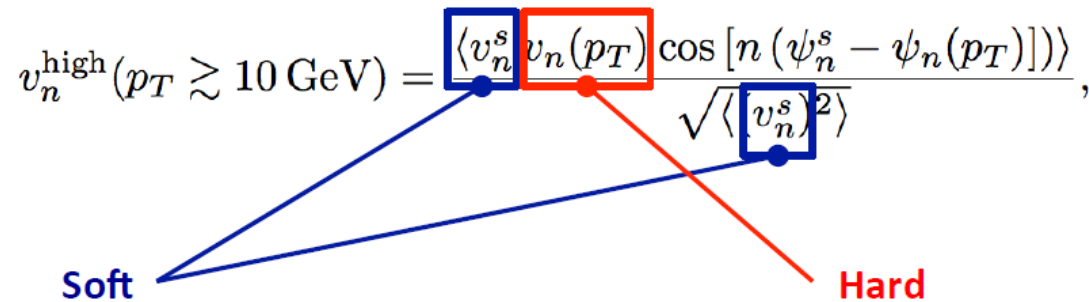
- Well defined → elliptic flow
 - Geometry + fluctuations
 - Describe by hydrodynamics

❖ v_2 at high p_T (> 10 GeV/c):

- No hydrodynamic

❖ v_2 at high- p_T is not measuring elliptic flow

❖ What do we measure?

$$v_n^{\text{high}}(p_T \gtrsim 10 \text{ GeV}) = \frac{\langle v_n^s v_n(p_T) \cos [n(\psi_n^s - \psi_n(p_T))] \rangle}{\sqrt{\langle (v_n^s)^2 \rangle}},$$


❖ Which are the potential contribution at high- p_T ?

- Fake tracks → Track cuts, fake correction
- Jets → large η -gap
- Back to back Jets → MC study with dijet embedded sample

Event-by-event hydrodynamics + jet energy loss: A solution to the $R_{AA} \otimes v_2$ puzzle

J.Noronha-Hostler et al.

[arXiv:1602.03788](https://arxiv.org/abs/1602.03788) [nucl-th]

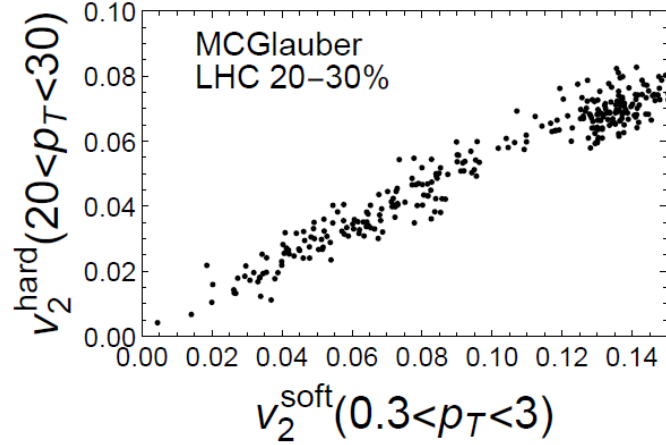


FIG. 3. Event-by-event correlation between v_2^{soft} (computed via viscous hydrodynamics) and v_2^{hard} (defined in Eq. (2)). The approximate linear correlation indicates that initial state fluctuations, which determine v_2^{soft} , also directly affect the 2nd harmonic of $R_{AA}(p_T, \phi)$.

$$\frac{R_{AA}(p_T, \phi)}{R_{AA}(p_T)} = 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} v_n^{hard}(p_T) \cos [n\phi - n\psi_n^{hard}(p_T)] \quad (1)$$

$$v_n^{hard}(p_T) = \frac{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} d\phi \cos [n\phi - n\psi_n^{hard}(p_T)] R_{AA}(p_T, \phi)}{R_{AA}(p_T)} \quad (2)$$

$$\text{and } \psi_n^{hard}(p_T) = \frac{1}{n} \tan^{-1} \left(\frac{\int_0^{2\pi} d\phi \sin(n\phi) R_{AA}(p_T, \phi)}{\int_0^{2\pi} d\phi \cos(n\phi) R_{AA}(p_T, \phi)} \right).$$

$$v_n^{exp}(p_T) = \frac{\langle v_n^{soft} v_n^{hard}(p_T) \cos [n(\psi_n^{soft} - \psi_n^{hard}(p_T))] \rangle}{\sqrt{\langle (v_n^{soft})^2 \rangle}}, \quad (3)$$

Do nuclear collisions create a locally equilibrated quark-gluon plasma?

P. Romatschke, Eur.Phys.J. C77 (2017) no.1, 21, <https://arxiv.org/pdf/1609.02820.pdf>

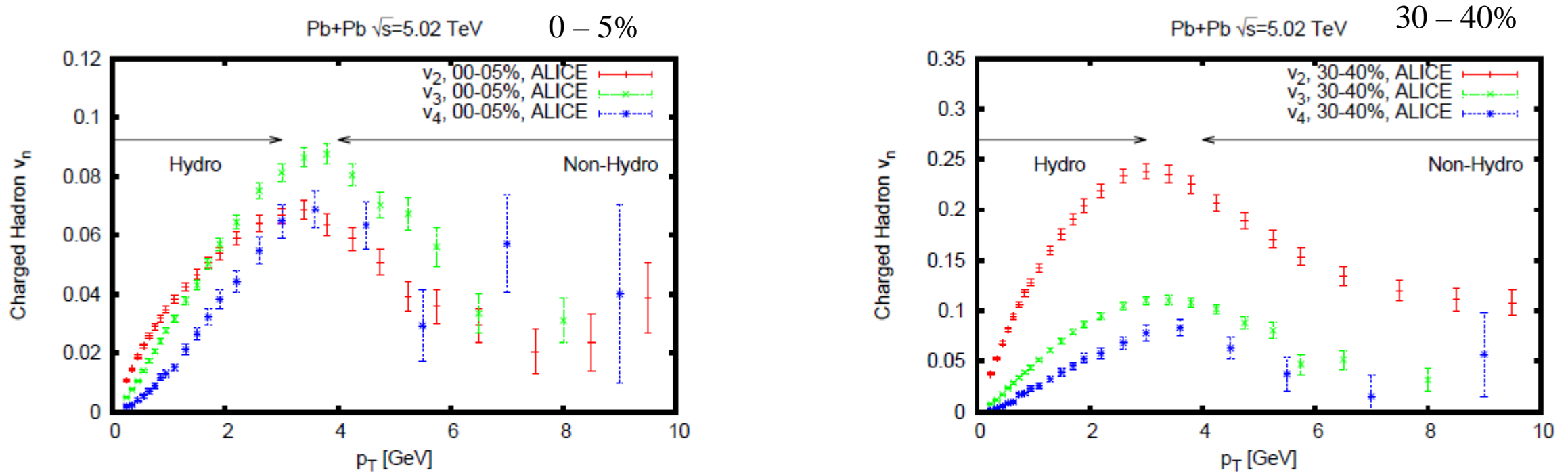


FIG. 5. Experimental data for flow coefficients v_n as a function of particle p_T for Pb+Pb collisions at $\sqrt{s} = 5.02$ TeV (ALICE, [59]). No hydrodynamic curves are shown, but it is known that hydrodynamics well describes the experimental data in the regime indicated as 'hydro' in the plot [60], possibly extending up to $p_T \simeq 3$ GeV. By contrast, for $p_T \gtrsim 4$ GeV, the experimental data seems to deviate systematically from the low-momentum behavior, and I have labeled this region 'non-hydro'.

New idea : for $p_T > 4$ GeV/c Non-Hydro mechanism works (no theory)

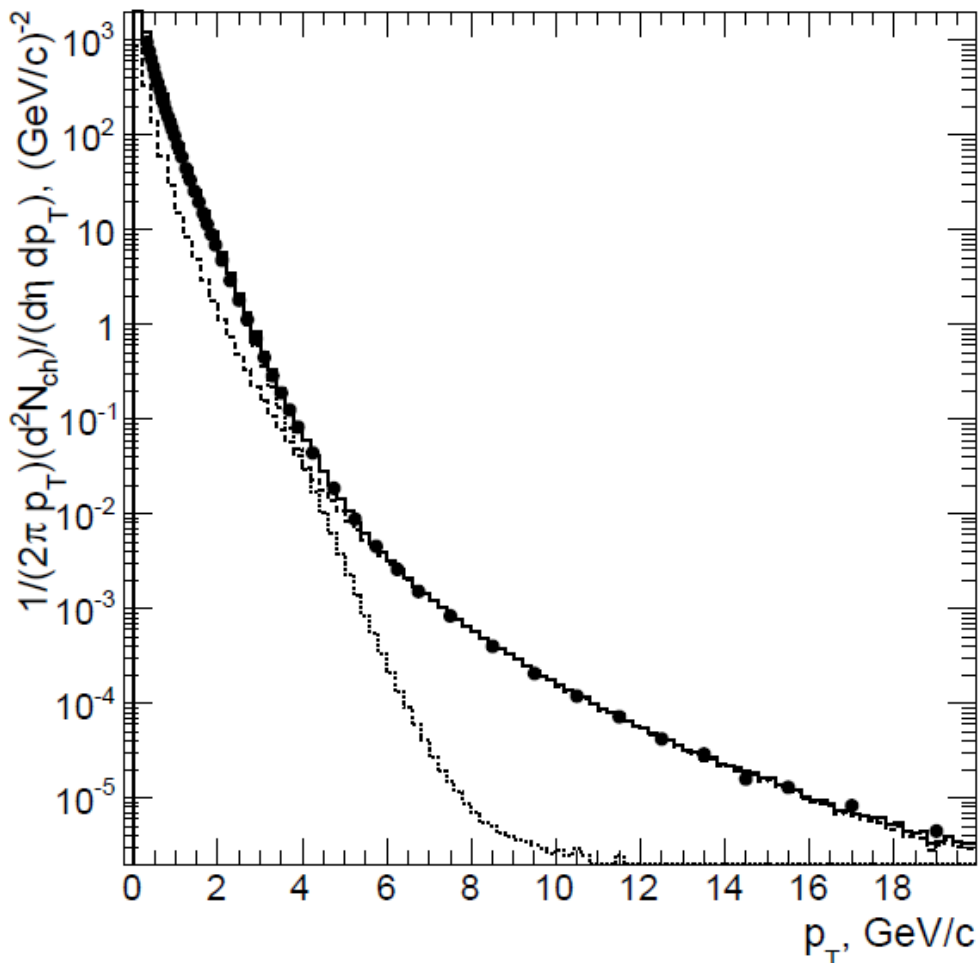
Известные пояснения и оценки потока при высоких p_T в HYDJET++ (2009-2012 г.г.)

Hadron spectra, flow and correlations in PbPb collisions at the LHC: interplay between soft and hard physics

I.P. Lokhtin¹, A.V. Belyaev¹, L.V. Malinina^{1,2}, S.V. Petrushanko¹, E.P. Rogochaya² and A.M. Snigirev¹

HYDJET++ simulations and reconstruction of the anisotropic flow in Pb+Pb collisions at the LHC

<http://arxiv.org/abs/1204.4820v2>



(solid – total result, dashed – hard component, dotted – soft component).

<http://arxiv.org/abs/0903.5175v1> PbPb, 2.76 TeV, 42%

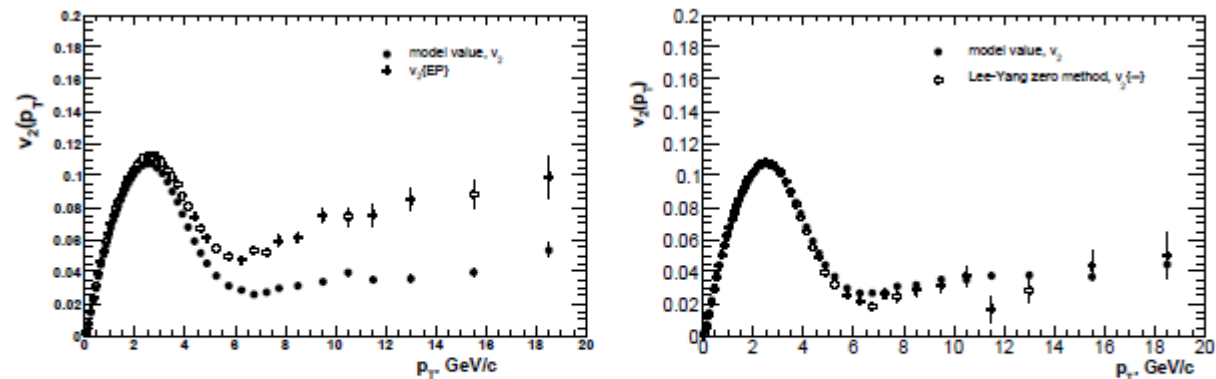


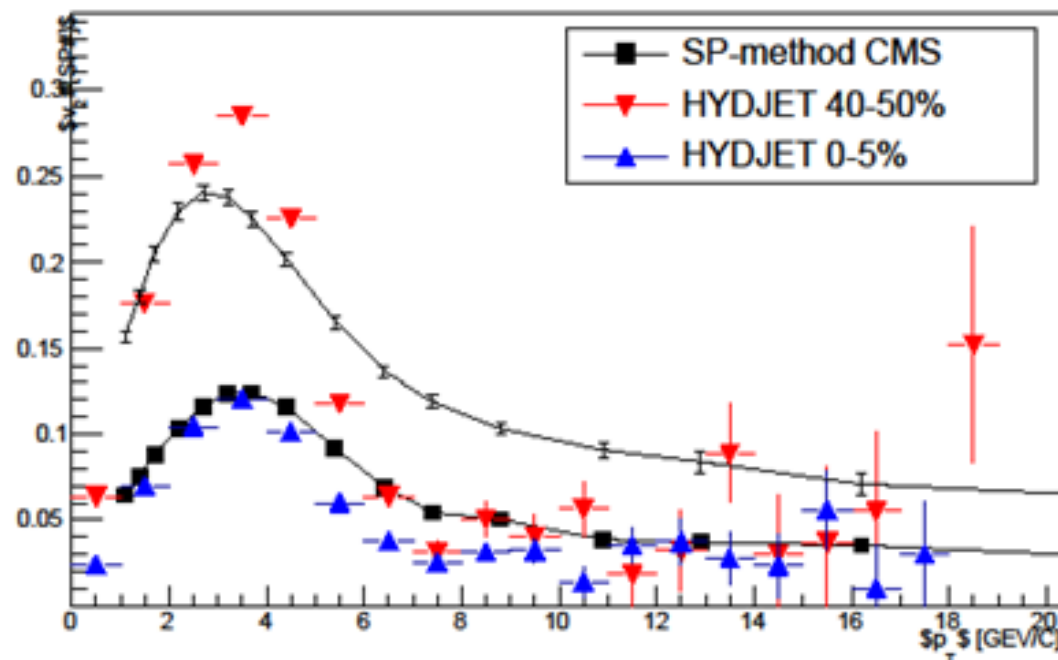
Figure 7: The p_T -dependence of elliptic flow in HYDJET++ model for Pb+Pb at LHC energies reconstructed by Event plane method (left) and Lee-Yang zeroes method (right). Centrality is 42%, charged hadrons.

Зависимость значений v_2 от прицельного параметра (центральности) при высоких $p_T > 10 \text{ GeV}/c$ в HYDJET++ не исследовалась !

Новые результаты HYDJET++, 2019 г.

Гульнара провела предварительные расчёты по HYDJET++ для сравнения с CMS PbPb 5.02 TeV до $p_T=20$ GeV/c.

0 - 5% и 40 - 50%



На рис.1 дано сравнение значений $v_2(SP)$ для CMS данных (чёрные точки) и результатов HYDJET++ (flow+jets) до высоких p_T порядка 20 ГэВ/С для 2-х значений центральности 0 - 5% (200К событий, синие) и 40 - 50% (200К событий, красные).

Результаты получены по отношению к плоскости реакции методом $v_2(RP) = \langle \cos 2(\phi_i - \Psi_{RP}) \rangle$.

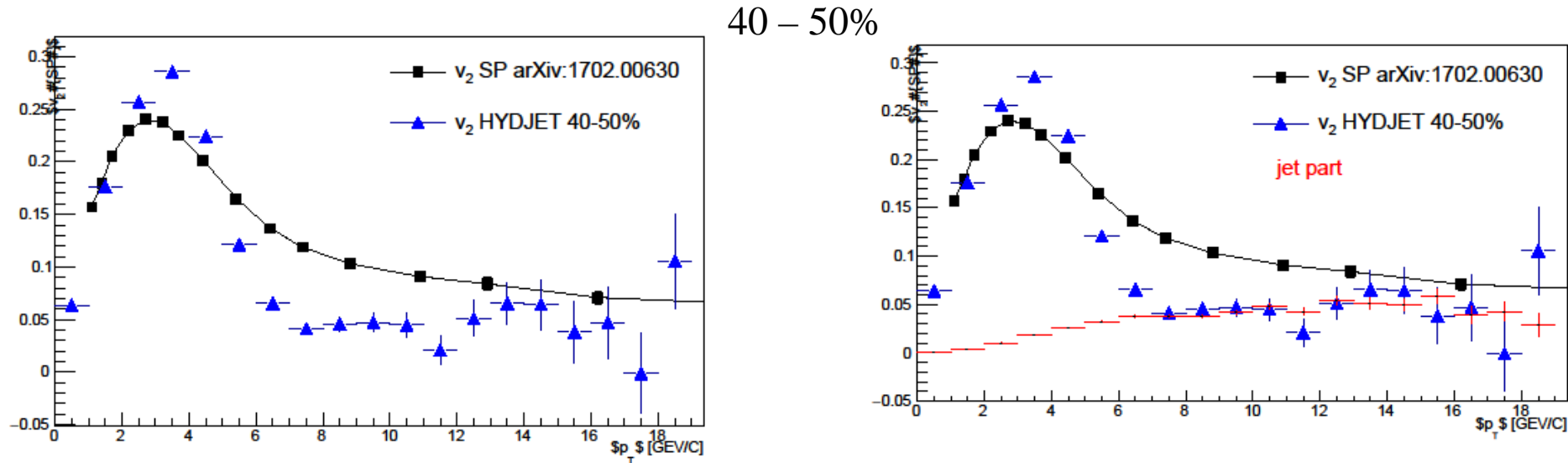
Отметим, что v_2 описывается хорошо при 0-5% и плохо для 40-50% при малых $p_T=1-3$ ГэВ/с, имеется провал при $p_T=6-13$ ГэВ/с для обеих центральностей.

Интересующая нас область $p_T=14-20$ ГэВ/с. Нужна ещё большая статистика.

Кроме того, сравнения с CMS нужны ещё интервалы $p_T = (20-26), (26-55)$ ГэВ/с.

Новые результаты HYDJET++, 2019 г.

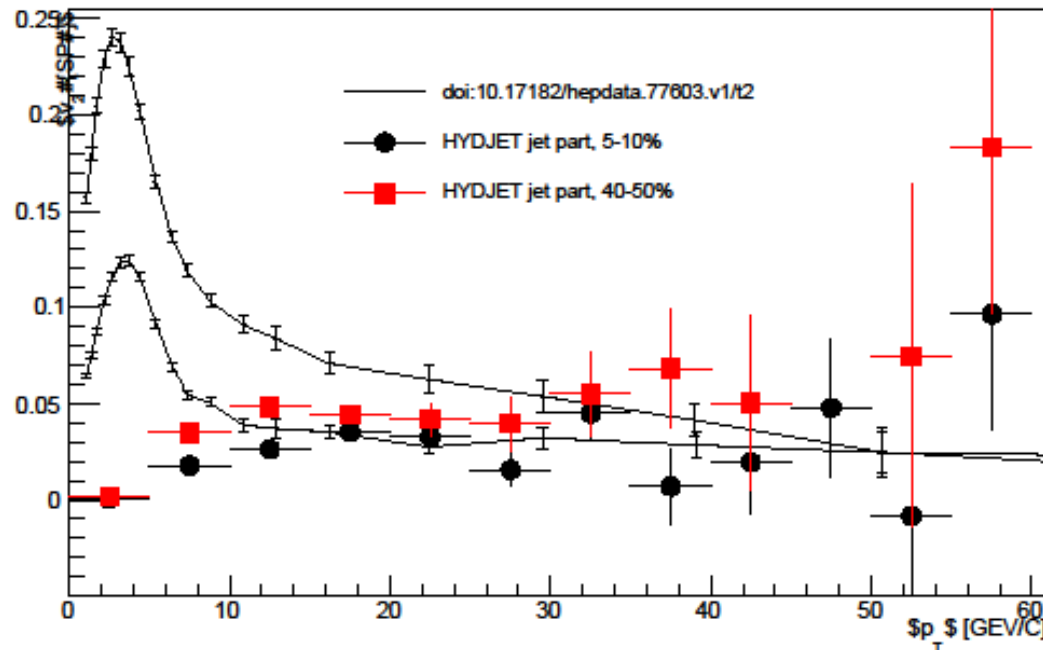
Гульнара провела предварительные расчёты по HYDJET++ для сравнения с CMS PbPb 5.02 TeV до $p_T=20$ GeV/c .



На рис.2 То же, что на рис.1 только для значений центральности 40 – 50%. и результаты HYDJET++ (flow+jets) слева и справа (200К), гистограмма справа (jets part) (3M events). Результаты получены по отношению к плоскости реакции $v_2(\text{RP}) = \langle \cos 2(\phi_i - \Psi_{\text{RP}}) \rangle$.

Пока трудно сделать существенные выводы из сравнения HYDJET++ с данными. Сумма flow и jet более менее описывает данные при малых $p_T < 4$ ГэВ/с, в промежуточной области 4 – 12 ГэВ/с HYDJET++ занижен и для высоких $p_T > 12$ ГэВ/с основной вклад дают jets.

Интересно посмотреть $v_2(\text{RP})$ при высоких p_T в модели HYDJET++ только от вклада от струй.



На рис.3 дано сравнение значений $v_2(\text{SP})$ для CMS данных (кривые) и результатов HYDJET++ (jets) для 2-х значений центральности 0 - 5% (2 млн событий) и 40 – 50% (3 млн событий) до высоких p_T порядка 60 ГэВ/С

Из рис.3 видно, что, естественно, область малых p_T без flow не описывается, а при высоких p_T модель завышает экспериментальные значения.

Т.е. без flow HYDJET++ с учётом погашения струй даёт рост v_2 при увеличении p_T .

Да ещё больше, чем в эксперименте !!! Пока это самый интересный вопрос.

Дальнейшие расчёты требуют много машинного времени и памяти, если к тому же сохранять базу событий для последующего расчёта высокого кумулянта $v_2\{4\}$ и др.

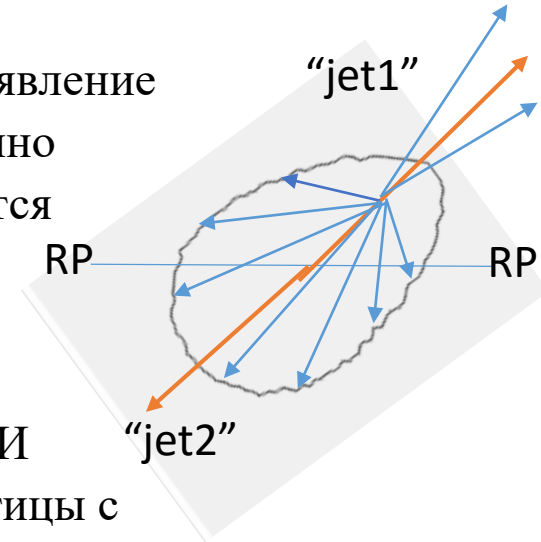
Обсуждение 1

Т.к. эффект погашения струй включён в модель HYDJET++, хорошо бы понять проявление этого эффекта в механизме образования потока частиц при высоких p_T . Уже недостаточно говорить только о потере энергии струй. Мы знаем, что меняется её форма, увеличивается число частиц со средними p_T и др.

В настоящий момент для вычисления v_2 угол плоскости события в HYDJET++ не используется. Допустим, что поток частиц создаётся от струи, испытавшей погашение. И направление максимального потока совпадает с осью струи. Именно эта струя даёт частицы с меньшими импульсами, чем не испытавшая погашения, и с разлётом частиц от оси струи. Тогда поток всех частиц от погашения струи может рассматриваться как «коллективный» поток, если частиц достаточно много, т.е. измеряется параметр потока частиц от струй $v_2^{\text{jet-part}}$ как экспериментальный v_2^{exp} .

Но:

1. направление струи, испытавшей погашение, не связано с углом плоскости реакции (RP) и при усреднении по событиям $v_2^{\text{jet-part}}$ должно бы быть равно нулю,
2. с увеличением периферичности эффект погашения должен бы ослабевать из-за уменьшения средней толщины сгустка материи в любом направлении, в котором струя проходит,
3. данные CMS свидетельствуют, что даже 4-х частичные корреляции, т.е. кумулянты $v_2\{4\}$, удаляющие непотоковые частицы, увеличиваются с ростом периферичности.



Обсуждение 2

Поэтому серьёзным вопросом остаётся объяснение природы эффекта корреляции эллиптического потока при малых и высоких поперечных импульсах частиц. Особенно **рост потока v_2 с увеличением периферичности при высоких p_T .**

Возможны следующие предположения («спекуляции») о механизме увеличения v_2 в периферических соударениях.

1. При погашении струй её частицы в большом количестве разлетаются, отклоняясь от оси струи, и могут сформировать поток для больших $p_T > 14 \text{ GeV}/c$.
При этом будем помнить, что направление струи и её частицы, которые могут образовать эллиптический поток, не обязательно совпадает с направлением вдоль малой оси эллипсоида.
2. Возможна также другая идея.
В периферических столкновениях поглощение струй меньше, т.к. меньше слой материи в любом направлении, и они меньше портят среду КГП, если она уже была в виде гидродинамического потока при высоких p_T .
Поэтому в периферических событиях v_2 больше.

Нужны новые идеи, связанные с необходимостью изменения HYDJET++, чтобы описать корреляцию $V_2^{\text{High-}p_T}$ и $V_2^{\text{Low-}p_T}$ и рост потока $V_2^{\text{High-}p_T}$ с увеличением периферичности при высоких p_T .

Выводы и предложение

1. Настроить параметры HYDJET++ для энергии 5.02 ТэВ
2. Вычислить с хорошей статистикой корреляцию значений v_2 при низких и высоких p_T в модели HYDJET++ с помощью кумулянта $v_2\{4\}$ и определить $v_2^{\text{High-}p_T} = k_2 \cdot v_2^{\text{Low-}p_T}$.
В частности, определить рост $v_2^{\text{High-}p_T}$ с переходом к большим значениям периферичности.
3. Проверить, описывает ли HYDJET++ корреляцию по результатам CMS, ALICE, ATLAS.
Если да, то понять, как рост $v_2^{\text{High-}p_T}$ с увеличением периферичности интерпретировать?
4. Если для $v_2(\text{SP})$ и для $v_2\{4\}$ корреляция не будет описываться, то придумать как улучшить модель.
Как это сделать в модели – вопрос, но вопрос достойный. Наша группа может это сделать.

Новая статья могла бы называться

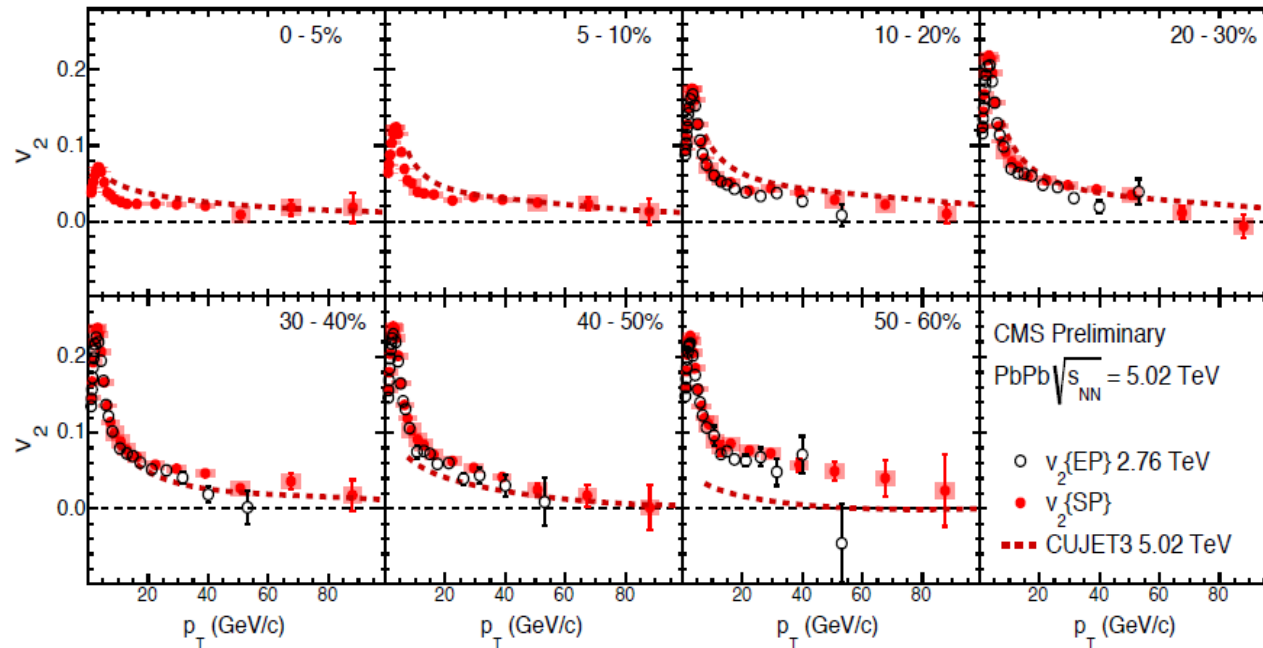
“New mechanism of elliptic flow at high p_T ”

Или иначе в зависимости от результатов.

Благодарим за внимание

Запасные

❖ $v_2\{\text{SP}\}$ at 5.02 TeV compared with $v_2\{\text{EP}\}$ at 2.76 TeV and CUJET calculations



→ Results are similar within uncertainties but 5.02 TeV reach a much higher p_T range with significant positive v_2

→ Too much jet quenching in CUJET?

A. Buzzatti, M. Gyulassy, <https://arxiv.org/abs/1207.6020v3>

An overview of the CUJET model: Jet Flavor Tomography applied at RHIC and LHC