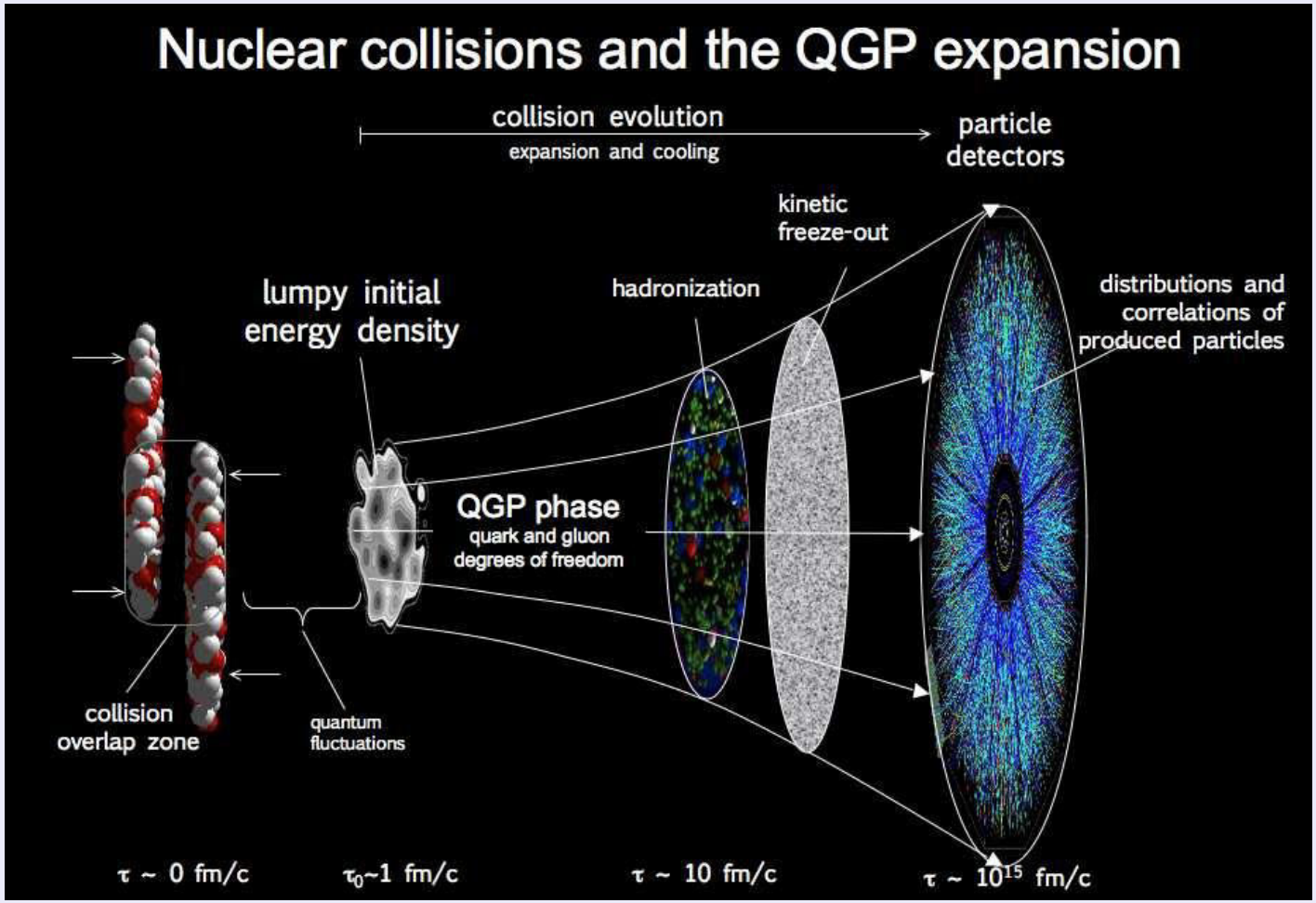
Корреляции между второй и высшими гармониками анизотропного потока частиц в соударениях ионов свинца на LHC.

Фотина Елизавета Сергеевна
Научный руководитель:
Д.ф.-м.н., в.н.с. И.П. Лохтин

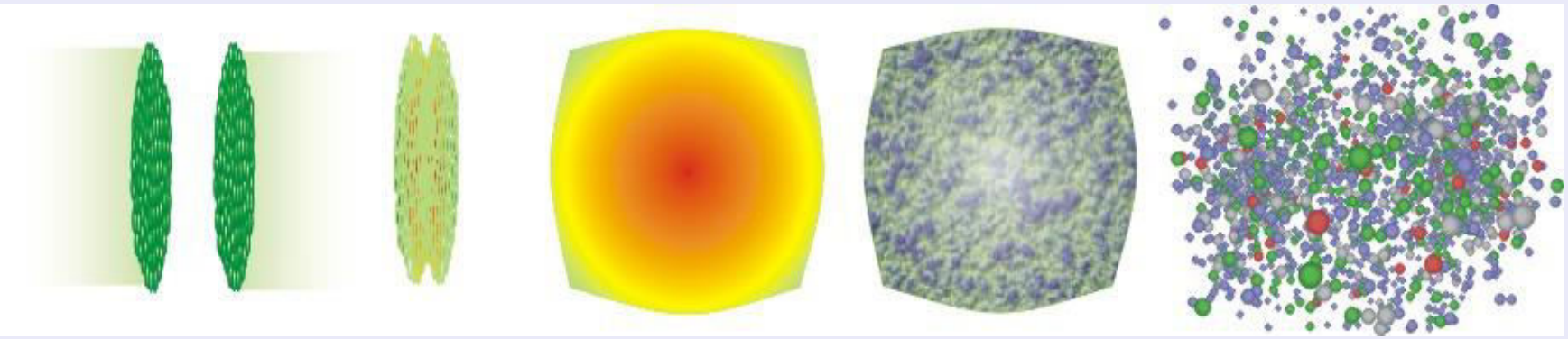
Москва
7 апреля 2015

Кварк-глюонная плазма



Начальная плотность энергии → расширение кварк-глюонной плазмы → фаза адронизации → фаза кинетического вымораживания → наблюдение треков частиц в детекторе

Основные эффекты, свидетельствующие об образовании горячей и плотной кварк-глюонной материи в соударениях PbPb на LHC при $\sqrt{s_{NN}}$=2.76 ТэВ



Гидродинамические (коллективные) свойства среды

- анизотропный поток (“flow”)
- двухчастичные азимутальные корреляции (“ridge”)

Потери энергии кварков и глюонов в среде (“jet quenching”)

- асимметрия поперечной энергии в процессах рождения *jet+jet, γ+jet, Z+jet*
- подавление выхода жестких адронов и адронных струй
- модификация внутренней структуры адронных струй

Экранирование цветового заряда в среде

- подавление выхода кварконией (J/ψ, Υ)
- регенерация и анизотропный поток “мягких” J/ψ

Цель и мотивация работы

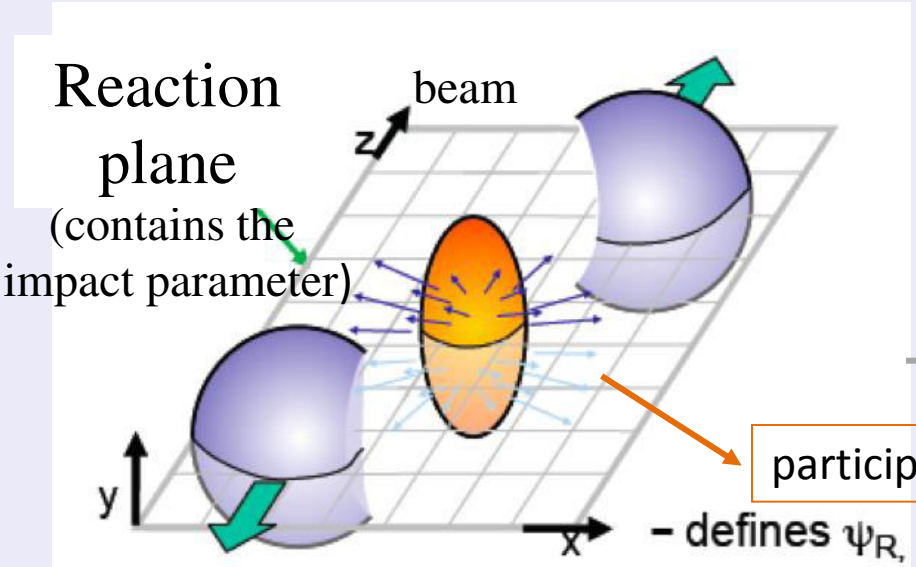
Целью данной работы является изучение корреляций между второй и высшими гармониками анизотропного потока заряженных частиц в соударениях ионов свинца при энергии LHC 2.76 ТэВ на пару нуклонов.

Изучение анизотропного потока частиц представляет собой важную задачу, поскольку особенности поведения его различных Фурье гармоник несут информацию о коллективных свойствах образованной материи.

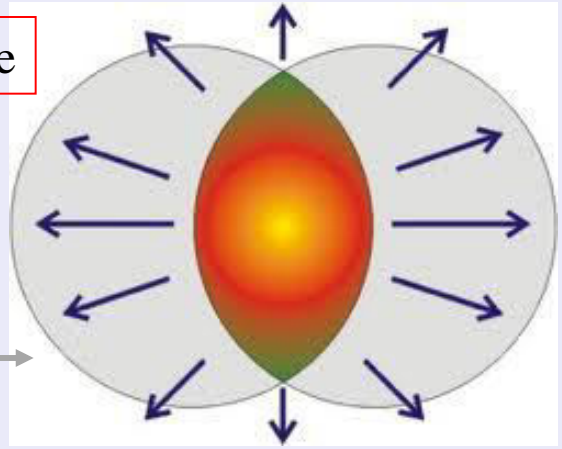
n = 2 n = 3 n = 4 n = 5 n = 6

Сопоставление результатов моделирования с экспериментальными данными дает возможность **протестировать заложенные в модель предположения**.

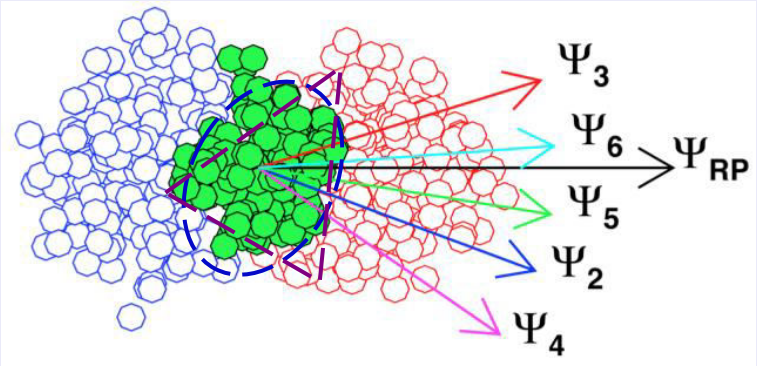
Схематическое представление анизотропного потока в нецентральных ядро-ядерных взаимодействиях



Event plane



Smooth Initial Conditions



Fluctuations in IC

Elliptic flow Triangular flow

$$\frac{dN}{d\phi} \sim 1 + 2v_2 \cos 2(\phi - \psi_2) + 2v_3 \cos 3(\phi - \psi_3) + \ldots$$

Высшие гармоники анизотропного потока

Наиболее изучен коэффициент Фурье v_2 - так называемый «эллиптический поток», так как он связывает напрямую анизотропную форму перекрытия сталкивающихся ядер и соответствующую ему анизотропию импульсного распределения частиц. С ростом центральности эллиптический поток v_2 увеличивается.

Коэффициенты высшего порядка v_n ($n>2$) также несут важную информацию о коллективных свойствах образованной среды. Помимо второй гармоники, достаточно хорошо изучены третья (v_3) и четвертая (v_4) гармоники анизотропного потока. Пятая (v_5) и шестая (v_6) изучены в меньшей степени, но в гидродинамических моделях для них существуют некоторые предсказания.

Модель HYDJET ++

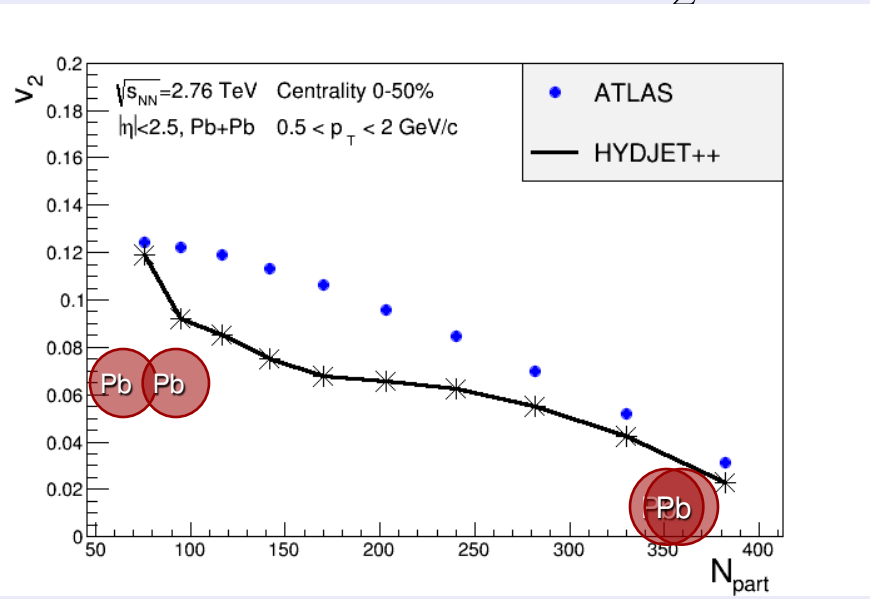
В настоящей работе модельный анализ данных LHC по корреляциям гармоник эллиптического потока проводится в рамках двухкомпонентной модели HYDJET++ (*I.P.Lokhtin, L.V.Malinina, S.V.Petrushanko, A.M.Snigirev, I.Arsene, K.Tywoniuk, Comput. Phys. Commun.180 (2009) 779*).

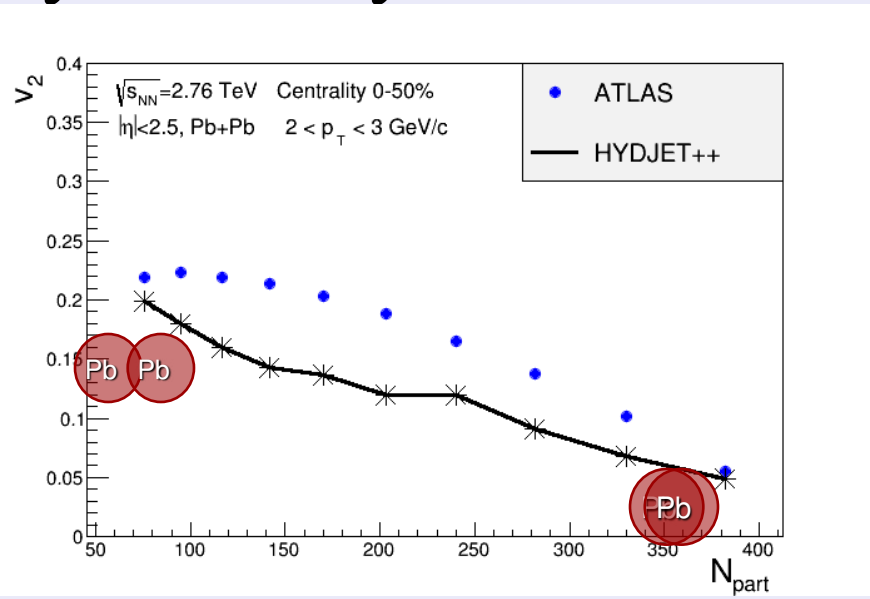
Конечное адронное состояние в данной модели представляет суперпозицию гидродинамической (мягкой) и струйной (жесткой) компонент. HYDJET++ с настроенными входными параметрами описывает данные LHC по зависимости множественности, импульсным спектрам, фемтоскопическим корреляциям и зависимость коэффициентов анизотропного потока частиц от поперечного импульса частиц в PbPb соударениях при энергии 2.76 ТэВ на пару нуклонов (*I.P.Lokhtin, A.V.Belyaev, L.V.Malinina, S.V.Petrushanko, E.P.Rogochaya, A.M.Snigirev. Eur. Phys. J. C 72 (2012) 2045; L.V.Bravina, B.H.Brusheim Johansson, G.Kh.Eyyubova, V.L.Korotkikh, I.P.Lokhtin, L.V.Malinina, S.V.Petrushanko, A.M.Snigirev, E.E.Zabrodin. Eur. Phys. J. C 74 (2014) 2807.)*

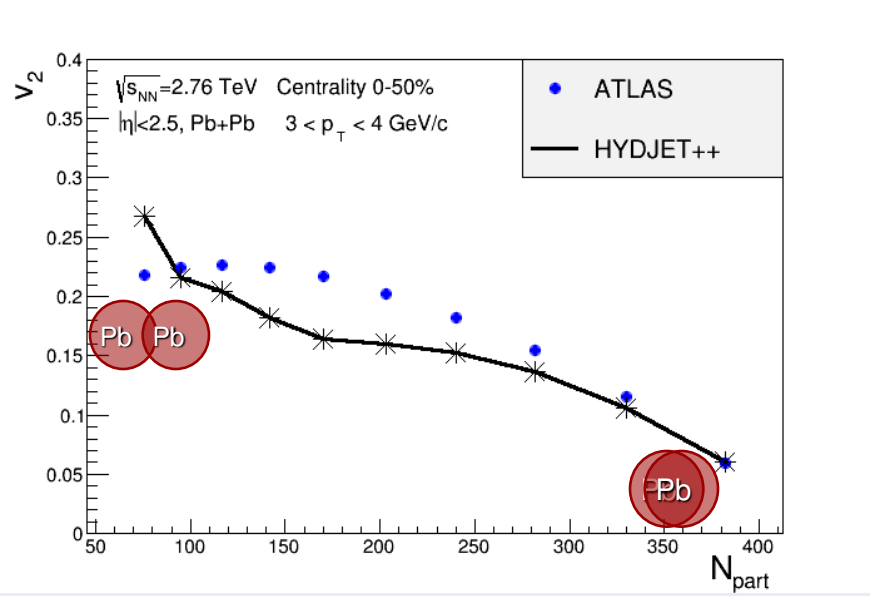
Характерные особенности генерации гармоник анизотропного потока в HYDJET++:

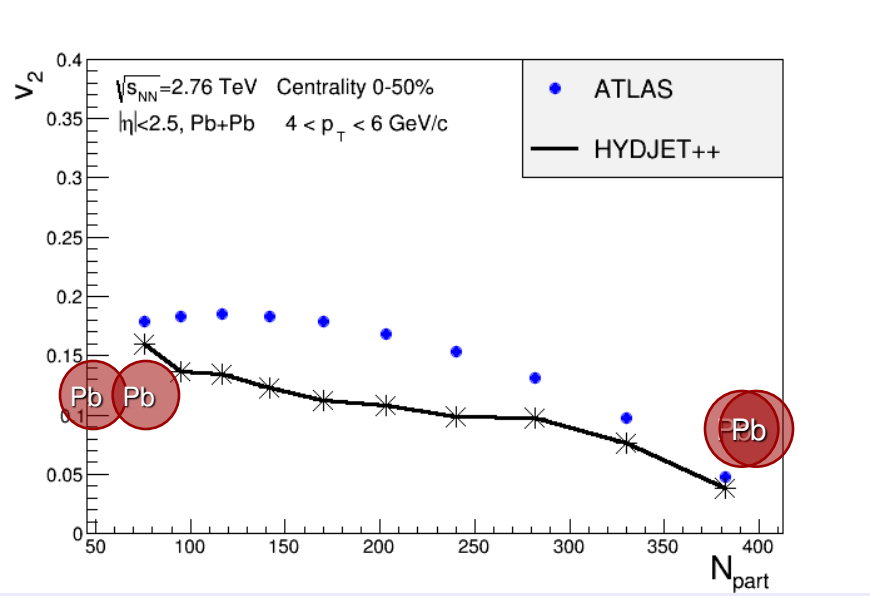
- Различные механизмы генерации второй и третьей гармоник потока для мягкой компоненты обеспечивают наличие высших гармоники потока (при этом важную роль играет интерференционный процесс между v_2 и v_3). Для четвертой гармоники v_4 предусмотрена возможность дополнительного вклада (помимо вклада от v_2).
- Наличие жесткой компоненты в модели позволяет проанализировать влияние рождения партоных струй и эффекта потерь энергии кварков и глюонов в плотной материи на формирования анизотропного потока частиц.

Зависимость v_2 от числа нуклонов-участников



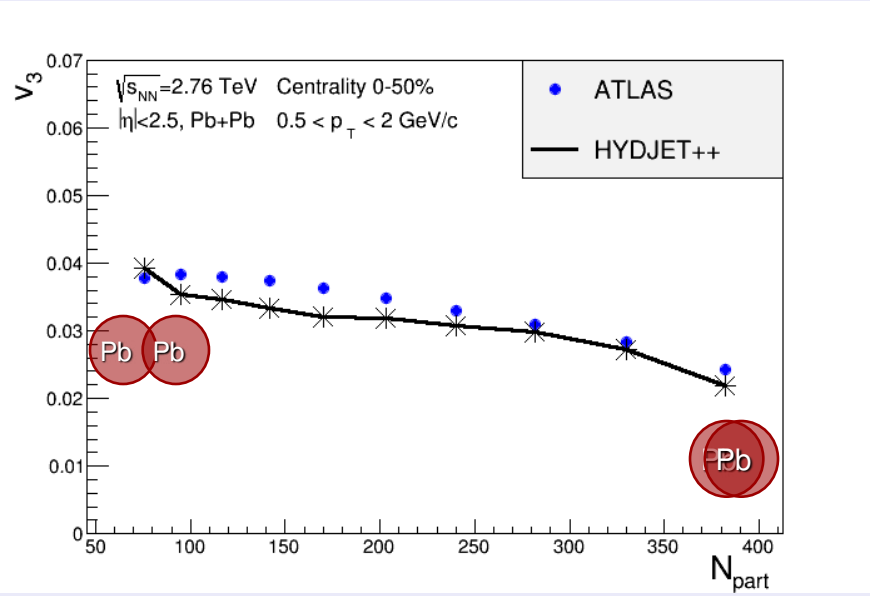


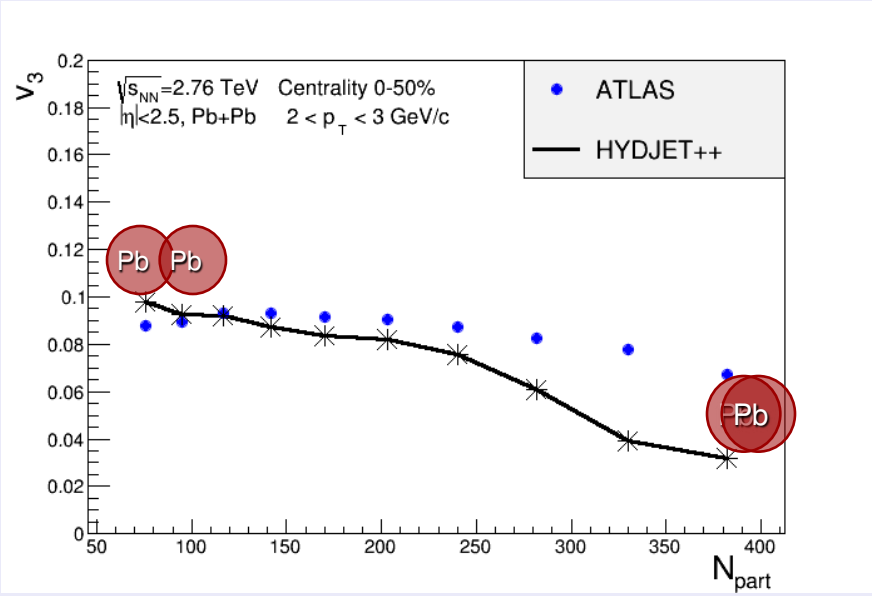


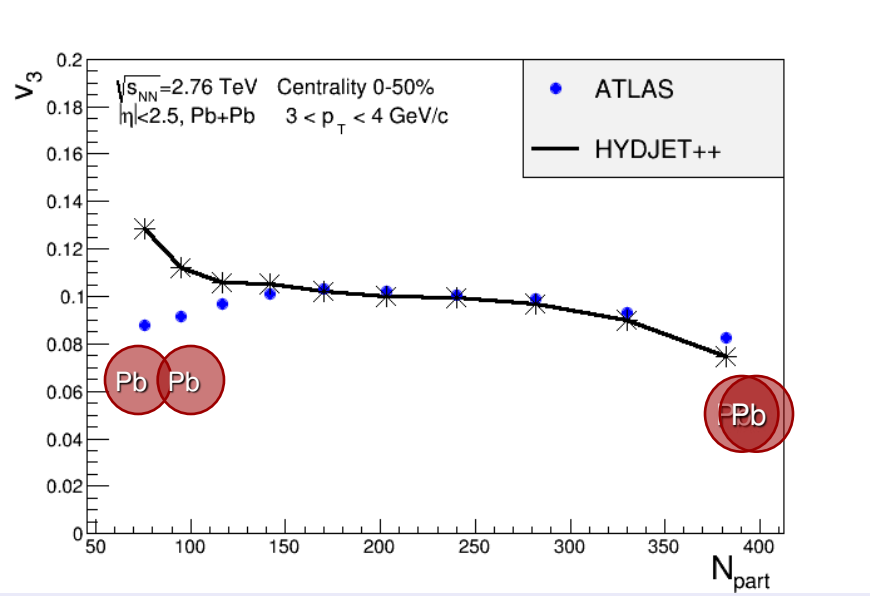


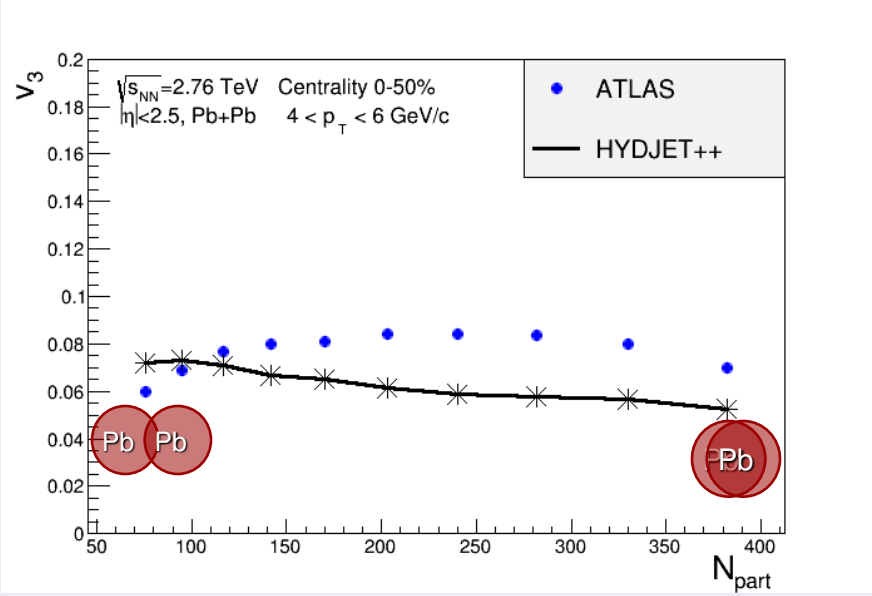
Данные: ATLAS-CONF-2014-022

Зависимость v_3 от числа нуклонов-участников



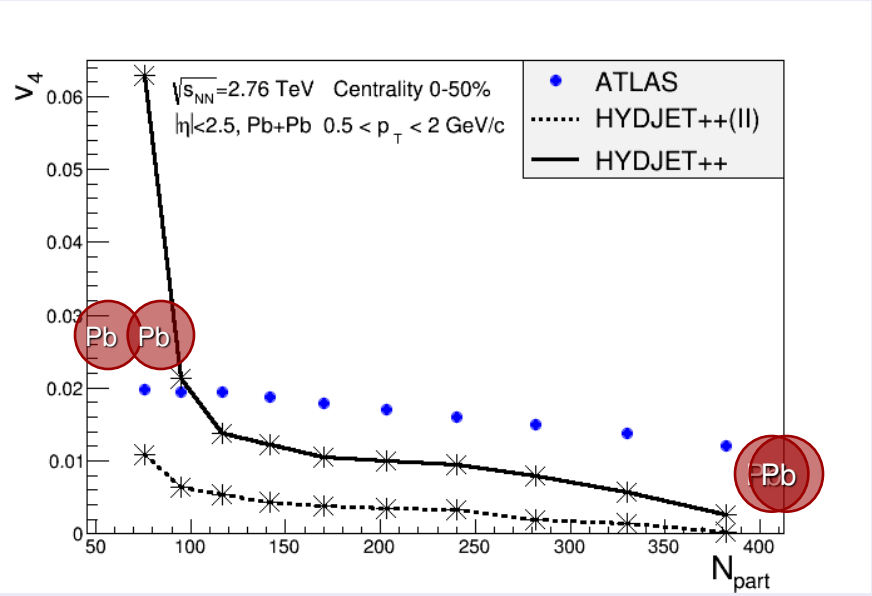


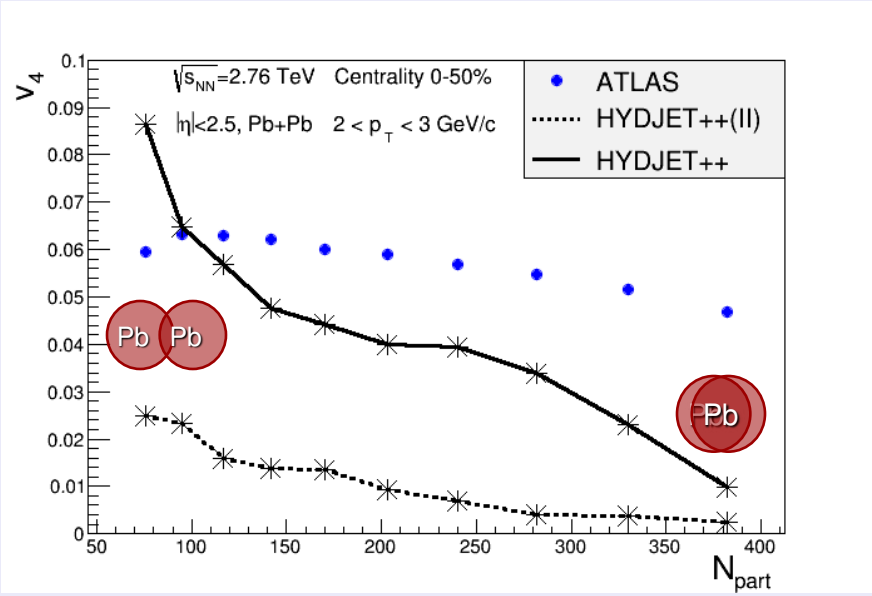


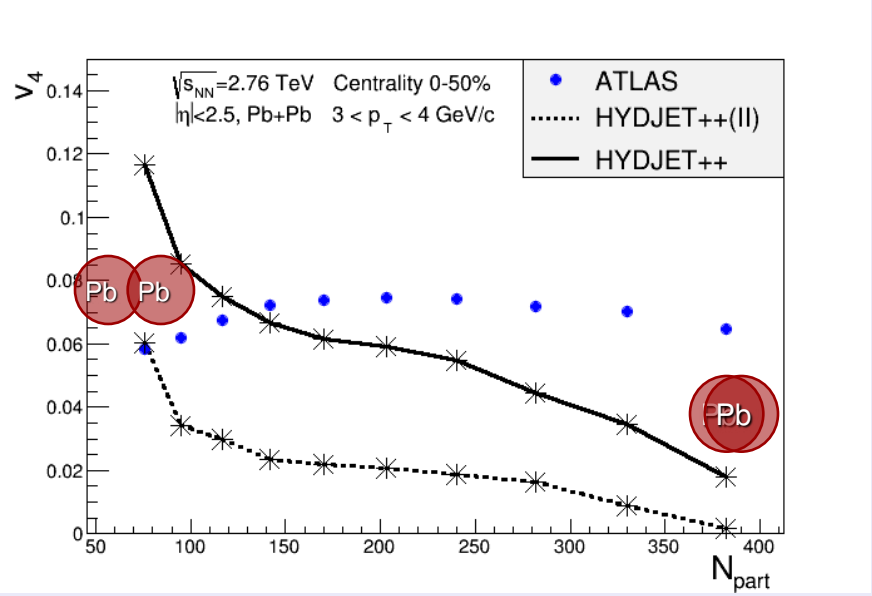


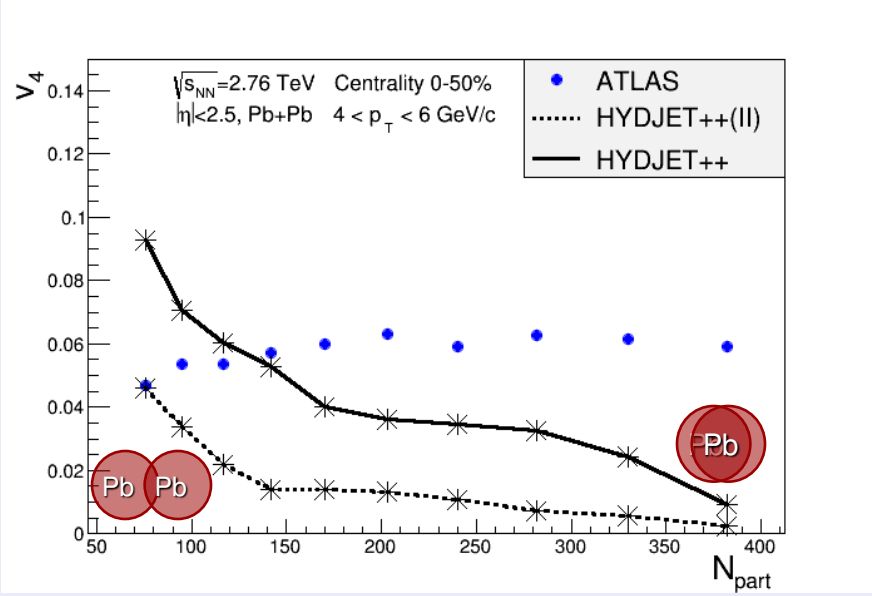
Данные: ATLAS-CONF-2014-022

Зависимость v_4 от числа нуклонов-участников



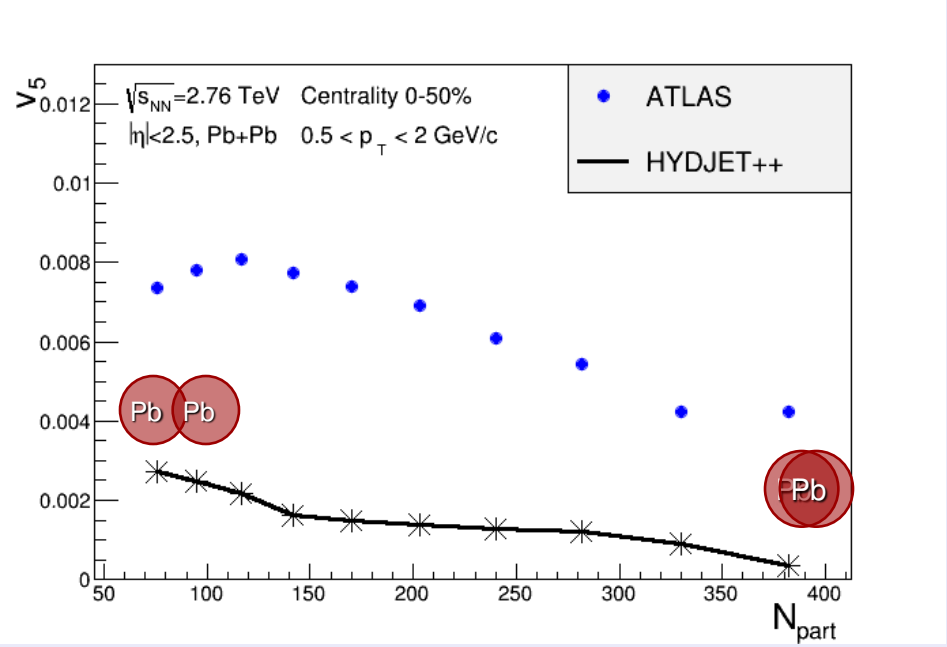


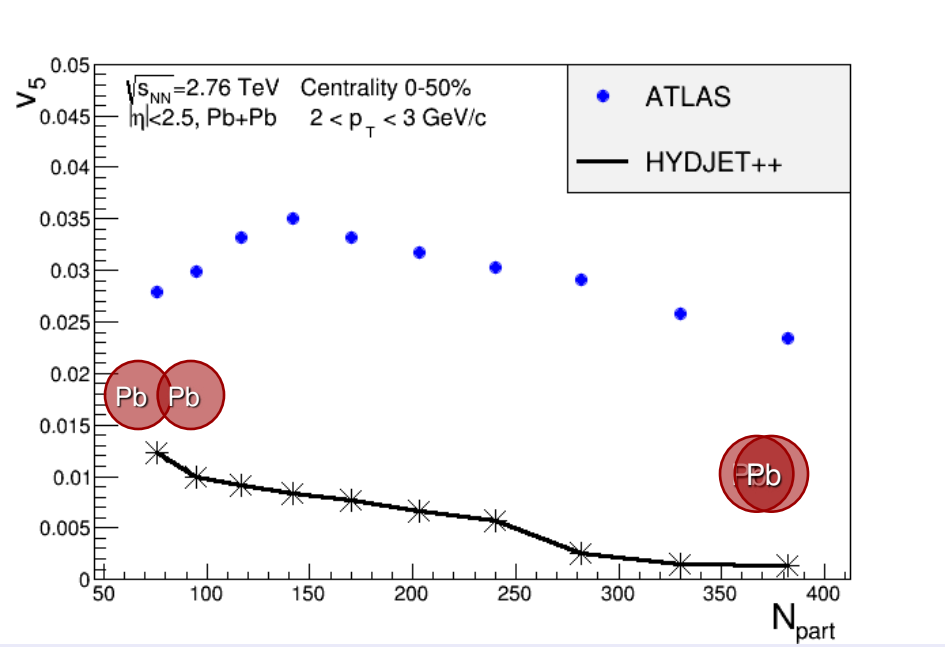




Данные: ATLAS-CONF-2014-022

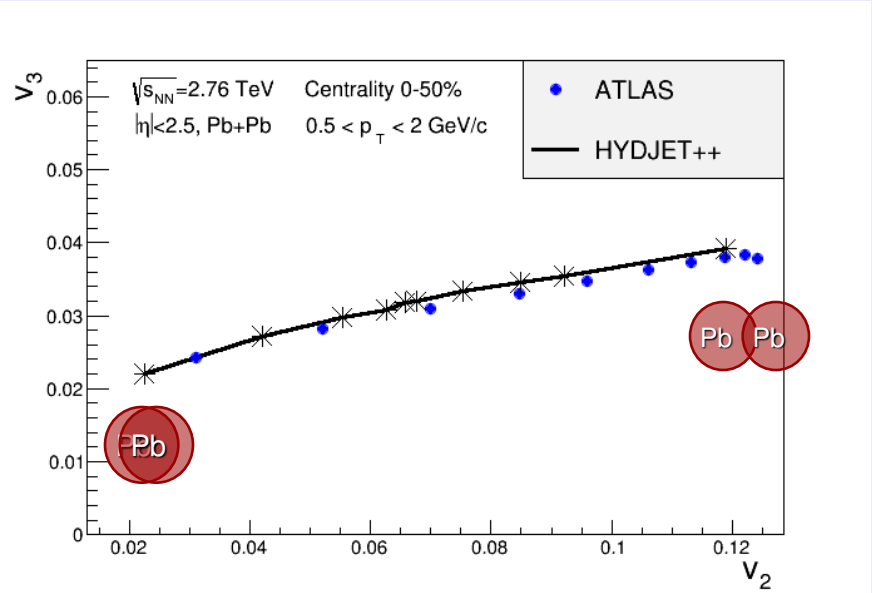
Зависимость v_5 от числа нуклонов-участников

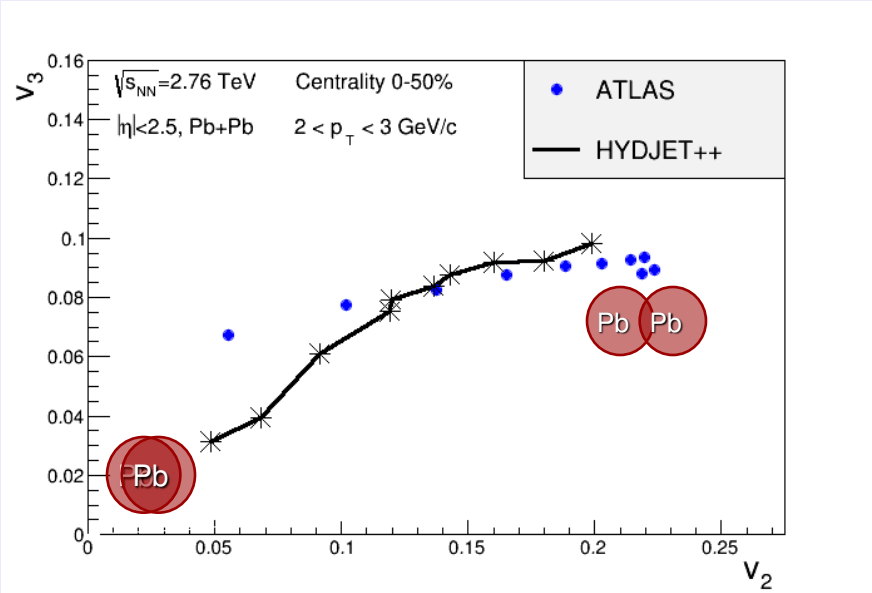


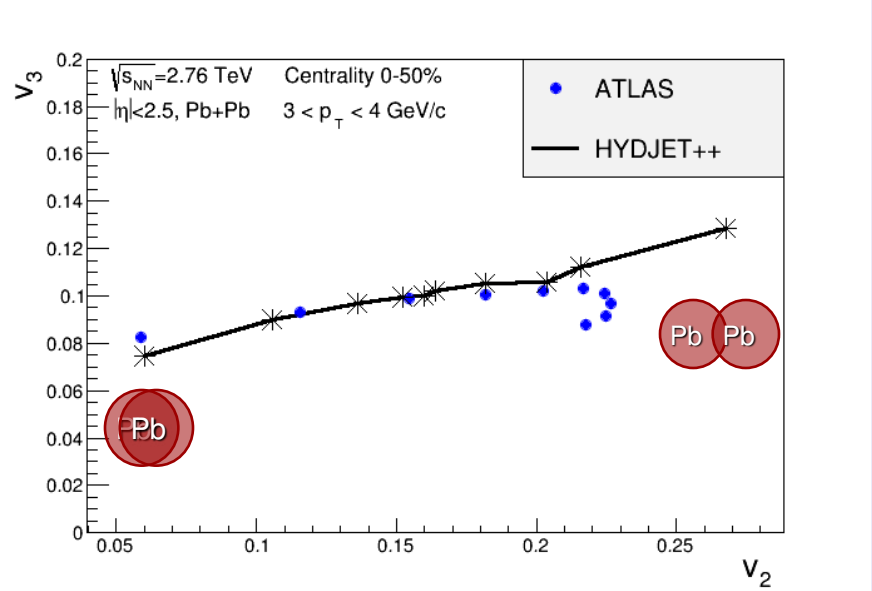


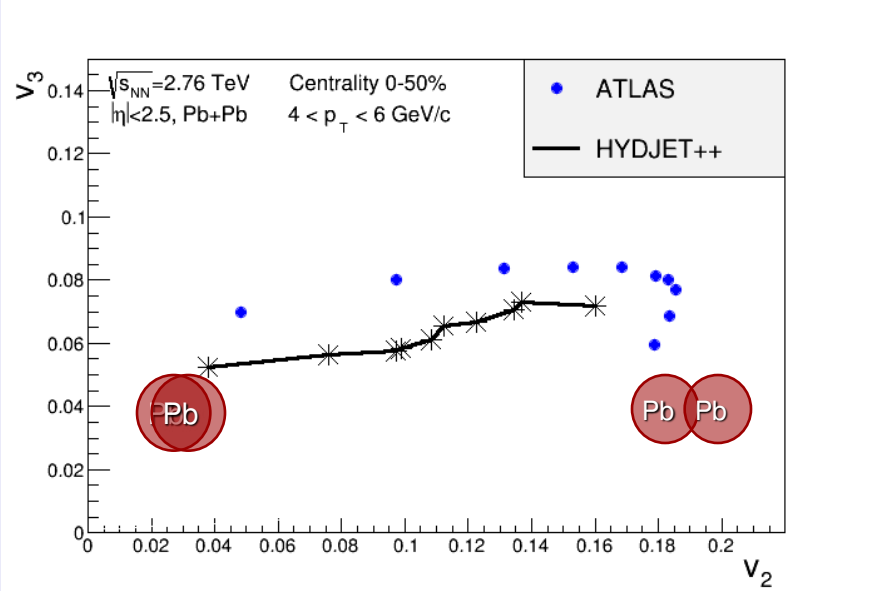
Данные: ATLAS-CONF-2014-022

Результаты моделирования v_3-v_2



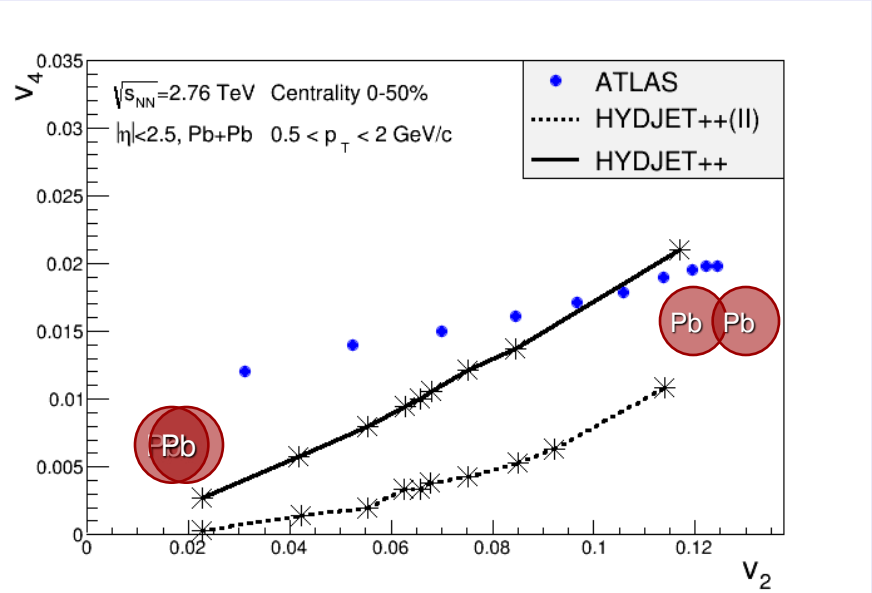


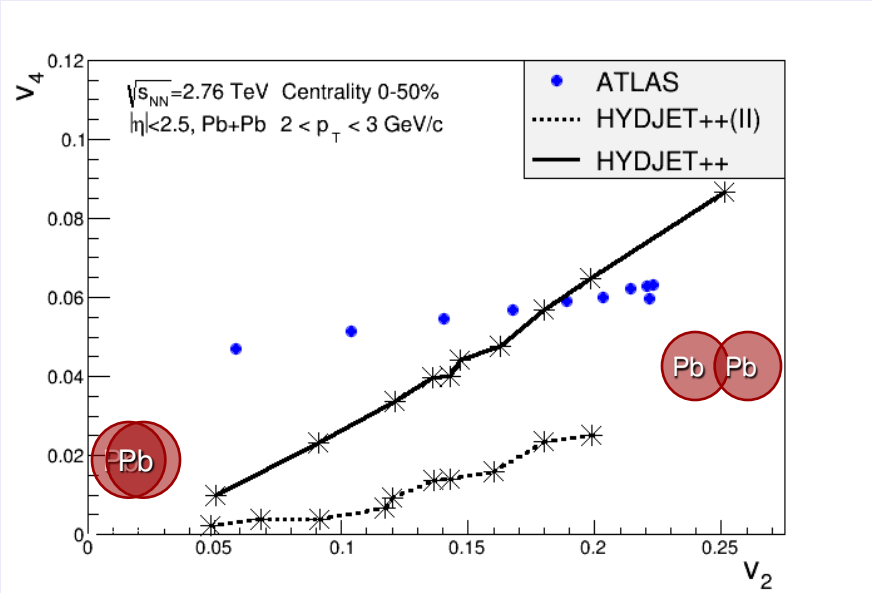


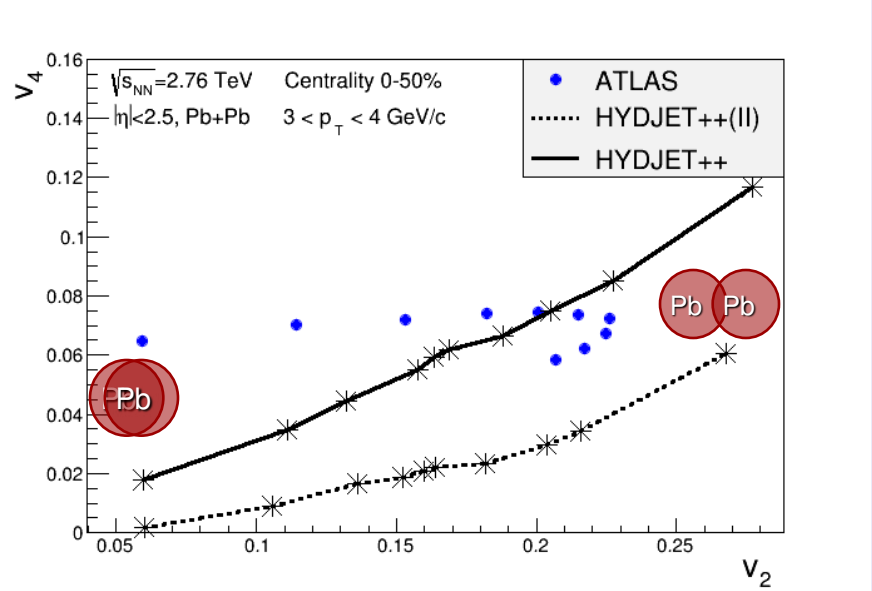


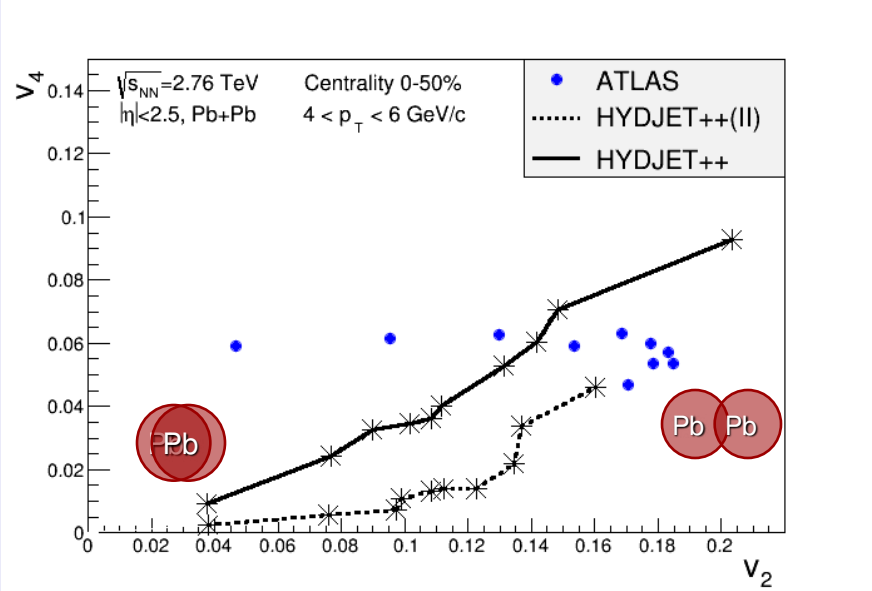
Данные: ATLAS-CONF-2014-022

Результаты моделирования v_4-v_2



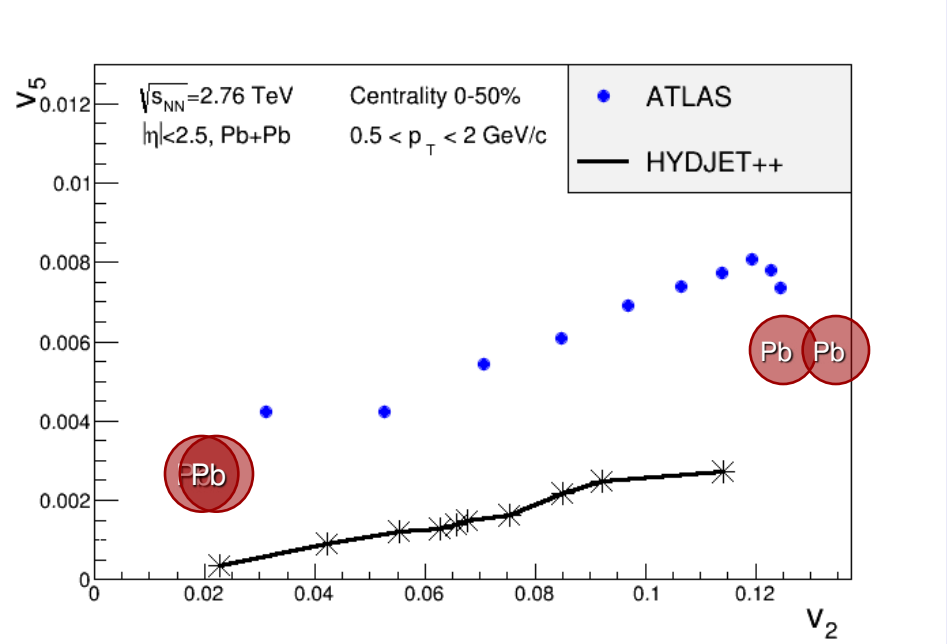


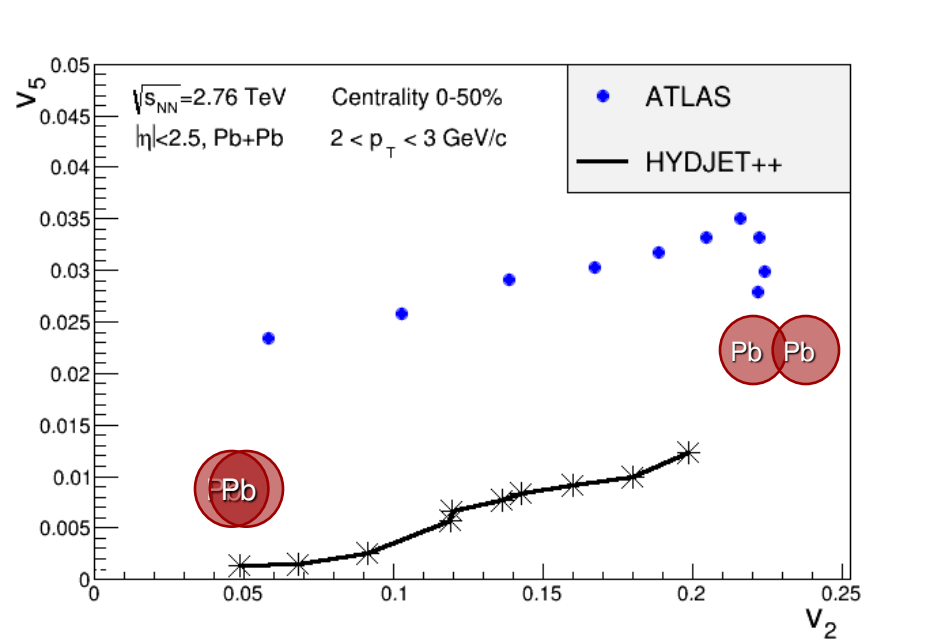




Данные: ATLAS-CONF-2014-022

Результаты моделирования v_5-v_2





Данные: ATLAS-CONF-2014-022

Заключение

С помощью модели релятивистских соударений тяжелых ионов HYDJET++ проведен феноменологический анализ данных эксперимента ATLAS по корреляциям между второй и третьей, второй и четвертой и второй и пятой гармониками потока при различных центральностях взаимодействий и поперечных импульсах частиц.

- **Корреляция между v_2-v_3**: хорошее описание, согласуется с заложенным в HYDJET++ предположением о независимых механизмах генерации четных и нечетных гармоник.
- **Корреляция между v_2-v_4**: слишком слабый сигнал для v_4 в предположении что v_4 определяется только v_2; в случае дополнительного вклада (помимо v_2) корреляция описывается лучше, но зависимость v_4 от центральности слишком сильная.
- **Корреляция между v_2-v_5**: слишком слабый сигнал для v_5.

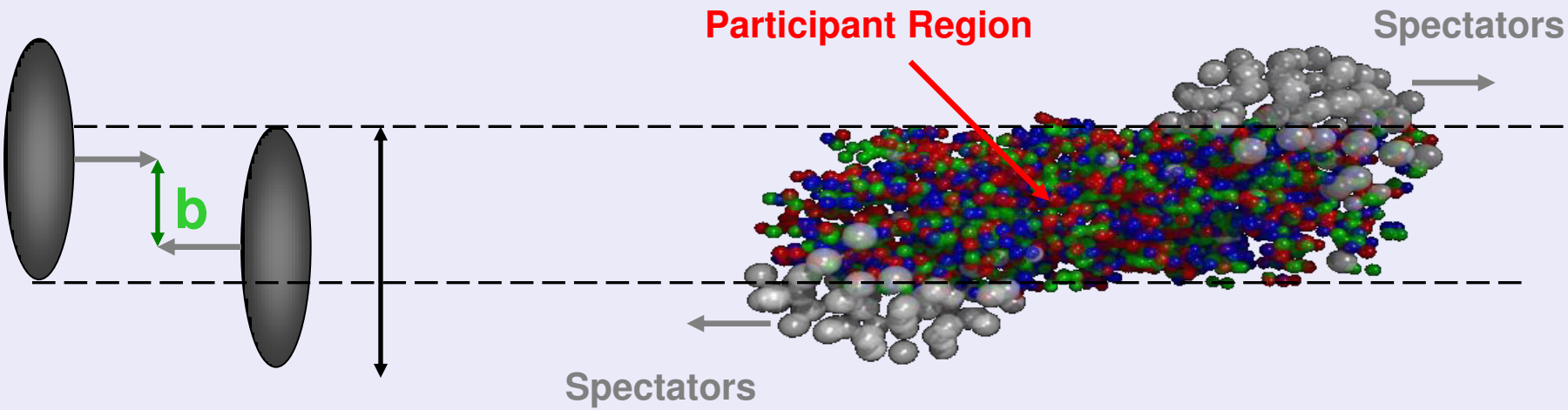
Однако для высших гармоник (для v_4 и особенно для v_5) значение выделенного сигнала и его зависимость от центральности чувствительны к методам определения v_n (вследствие непотоковых эффектов и флуктуаций потока), в то время как для смоделированных событий рассматривалась "идеальная" ситуация - коэффициенты v_n определялись относительно известного в модели угла плоскости реакции. В частности, применение экспериментальных методов к смоделированным событиям может значительно увеличить v_5.

Ближайшие планы

Применить к смоделированным событиям метод определения v_n (двухчастичный кумулянт) и повторить сравнение модели с экспериментальными данными.

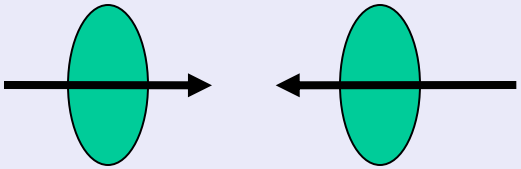
Дополнительные слайды

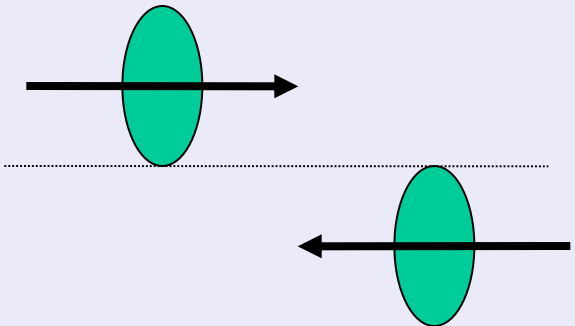
Центральность ядро-ядерного взаимодействия



Периферические столкновения, b ≈ 2R

Центральные столкновения, b = 0





Генерация анизотропного потока в HYDJET++ (мягкая компонента)

Эллиптический поток v_2

$$v_2 \propto \frac{2(\delta-\epsilon)}{(1-\delta^2)(1-\epsilon^2)}$$

- пространственная модуляция поверхности вымораживания
- модуляция скоростей жидкости на поверхности

Пространственная анизотропия

$$\epsilon(b) = \frac{R_y^2 - R_x^2}{R_y^2 + R_x^2},$$

Импульсная анизотропия

$$\tan\varphi_u = \sqrt{\frac{1-\delta(b)}{1+\delta(b)}}\,\tan\varphi.$$

R(b) – радиус поверхности

φ_u : азимутальный угол вектора скорости жидкости

φ : пространственный азимутальный угол

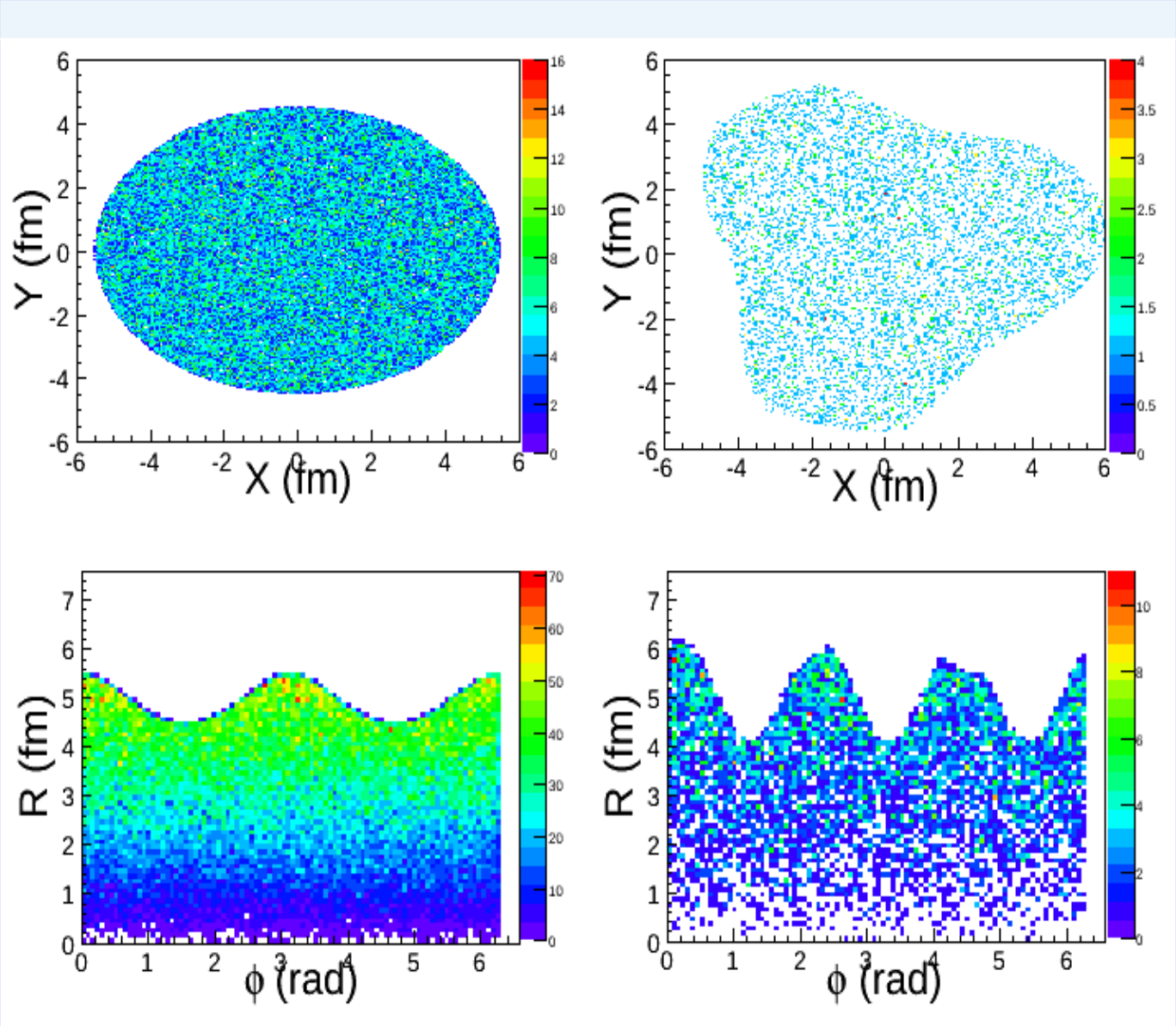
Триангулярный поток v_3

Пространственная модуляция поверхности вида cos(3φ) с независимой фазой Ψ_3 и параметром ε_3

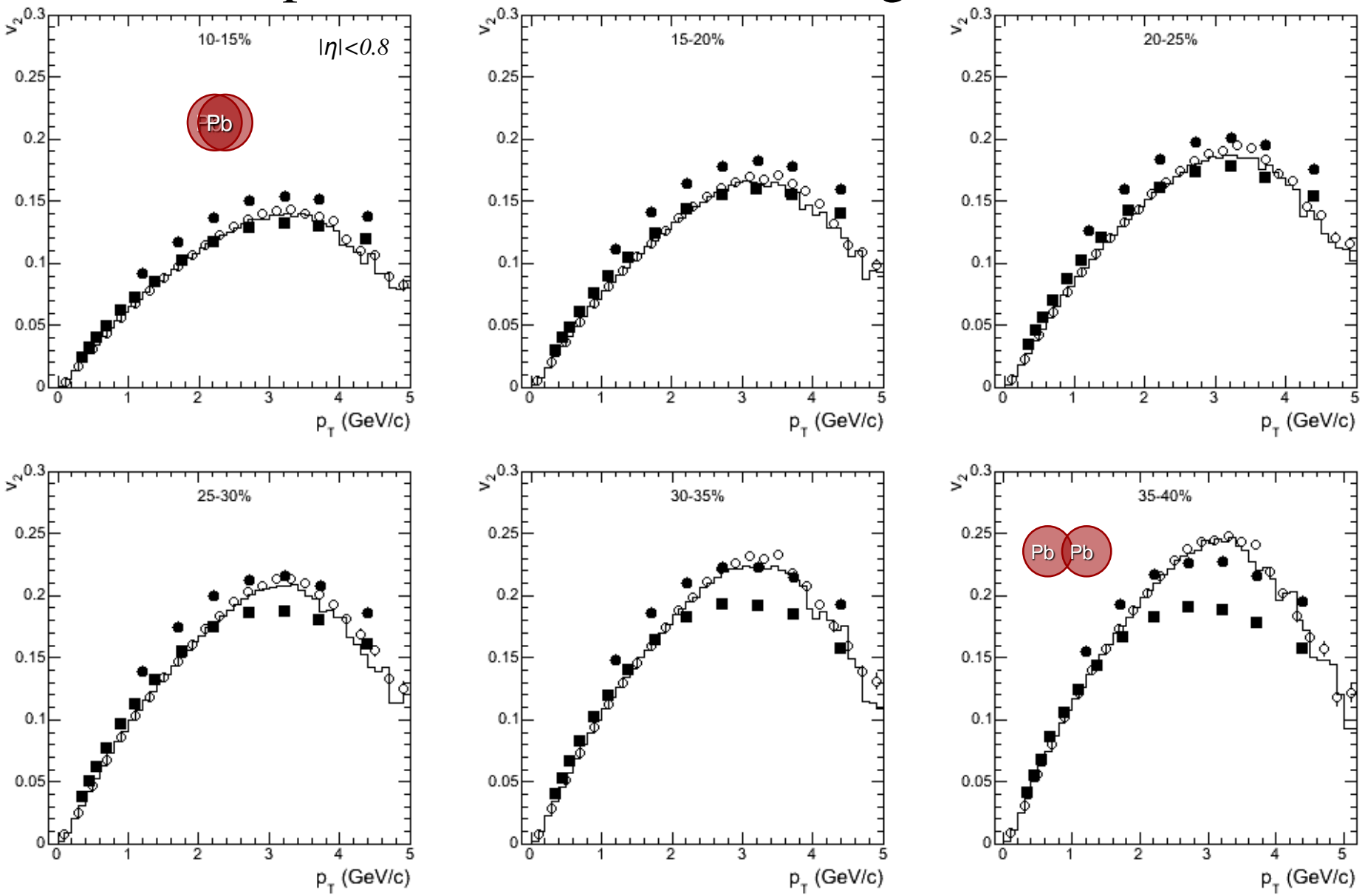
$$R(b,\phi) = R_f(b)\frac{\sqrt{1-\epsilon^2(b)}}{\sqrt{1+\epsilon(b)\cos 2\phi}}[1+\epsilon_3(b)\cos 3(\phi+\Psi_3^{\mathrm{RP}})]$$

Параметры $\varepsilon(b_0)$, $\varepsilon_3(b_0)$ и $\delta(b_0)$ подбираются из фита данных

Генерация анизотропного потока в HYDJET++ (мягкая компонента)

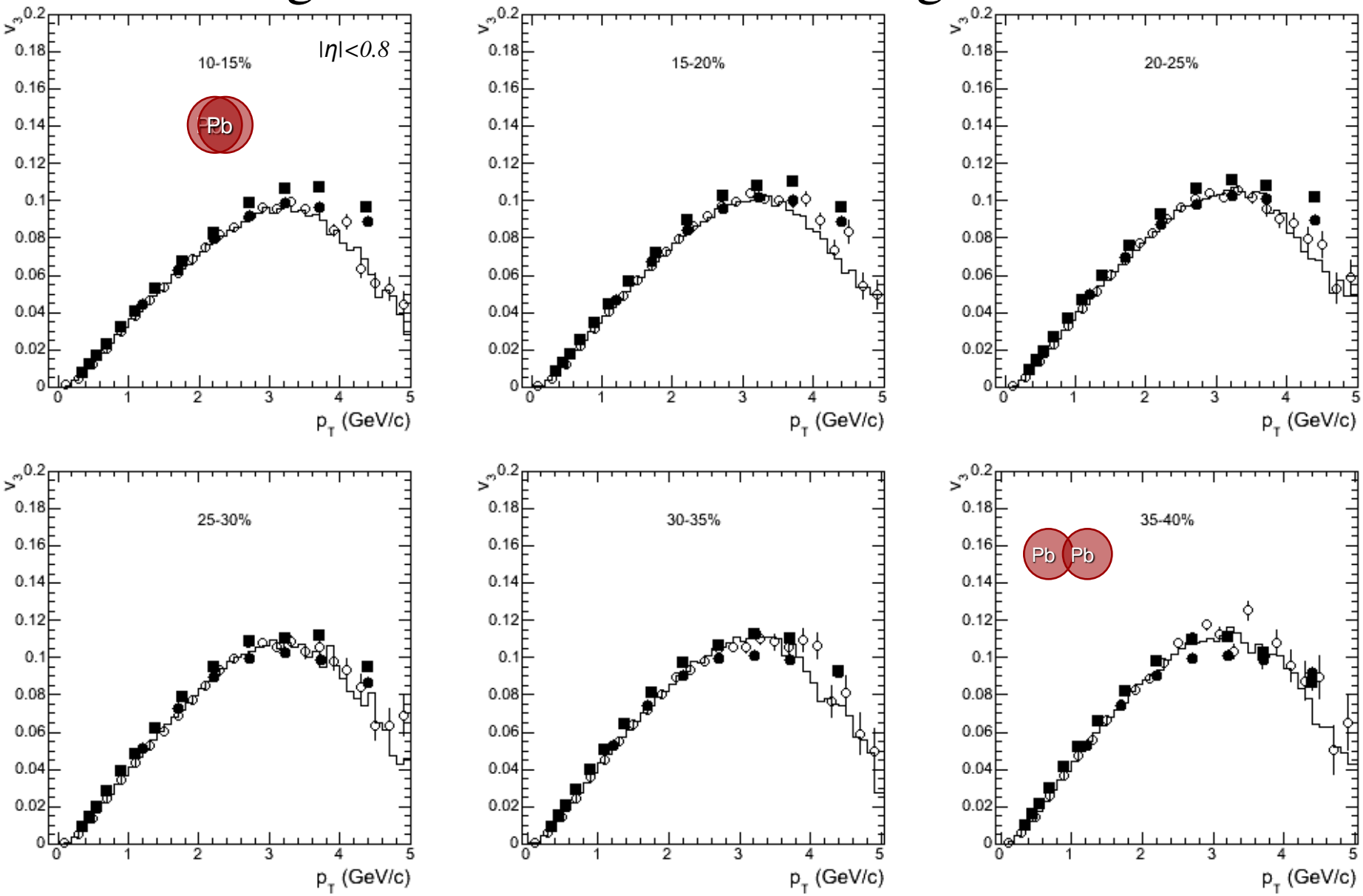


Elliptic flow of inclusive charged hadrons



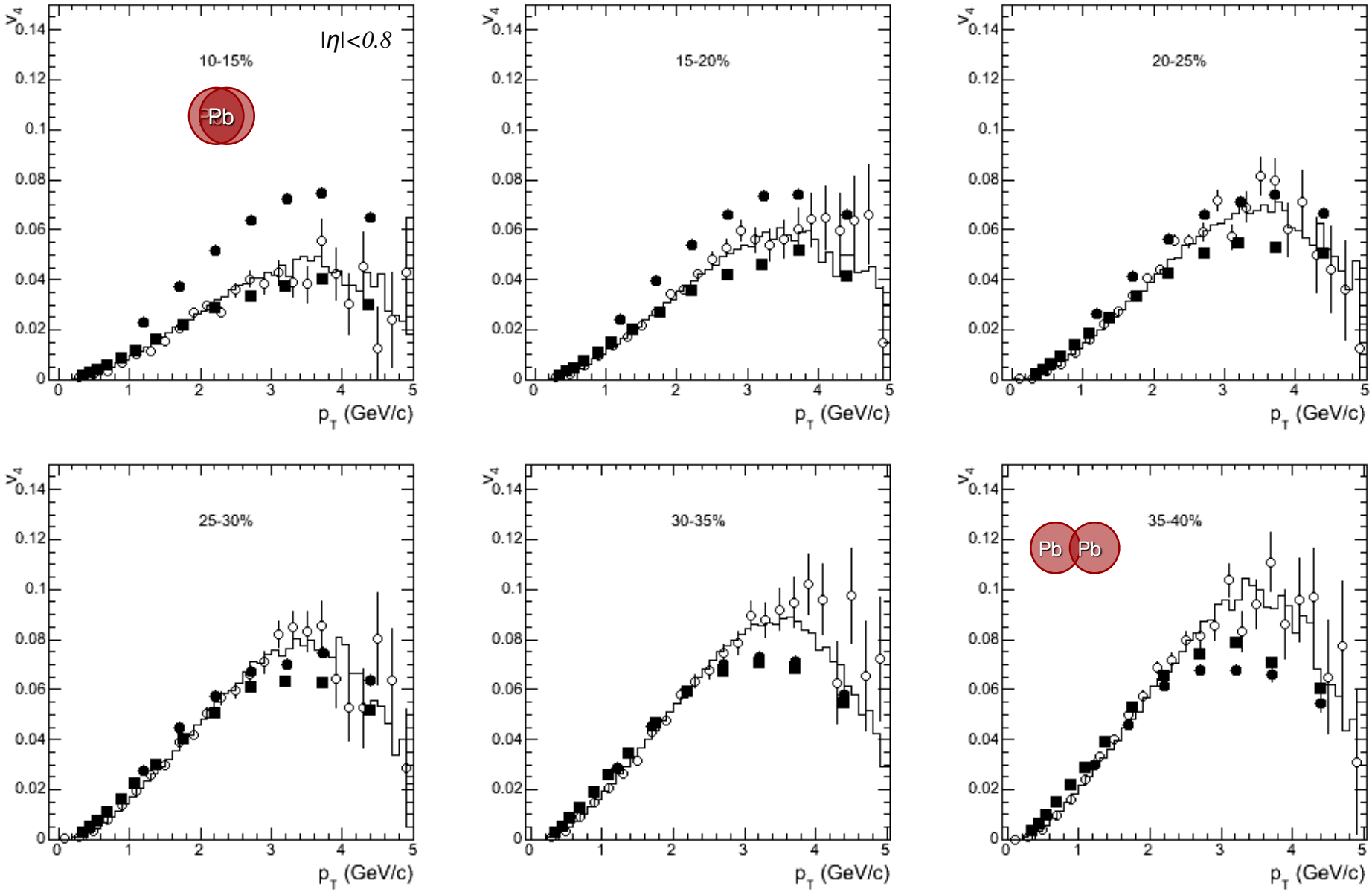
Closed circles and squares: CMS data $v_2\{2\}$ & $v_2\{LYZ\}$ *(PRC 87 (2013) 014902);*
histograms and open circles: HYDJET++ ("true" $v_2(\psi_2)$ & $v_2\{EP\}$)

Triangular flow of inclusive charged hadrons



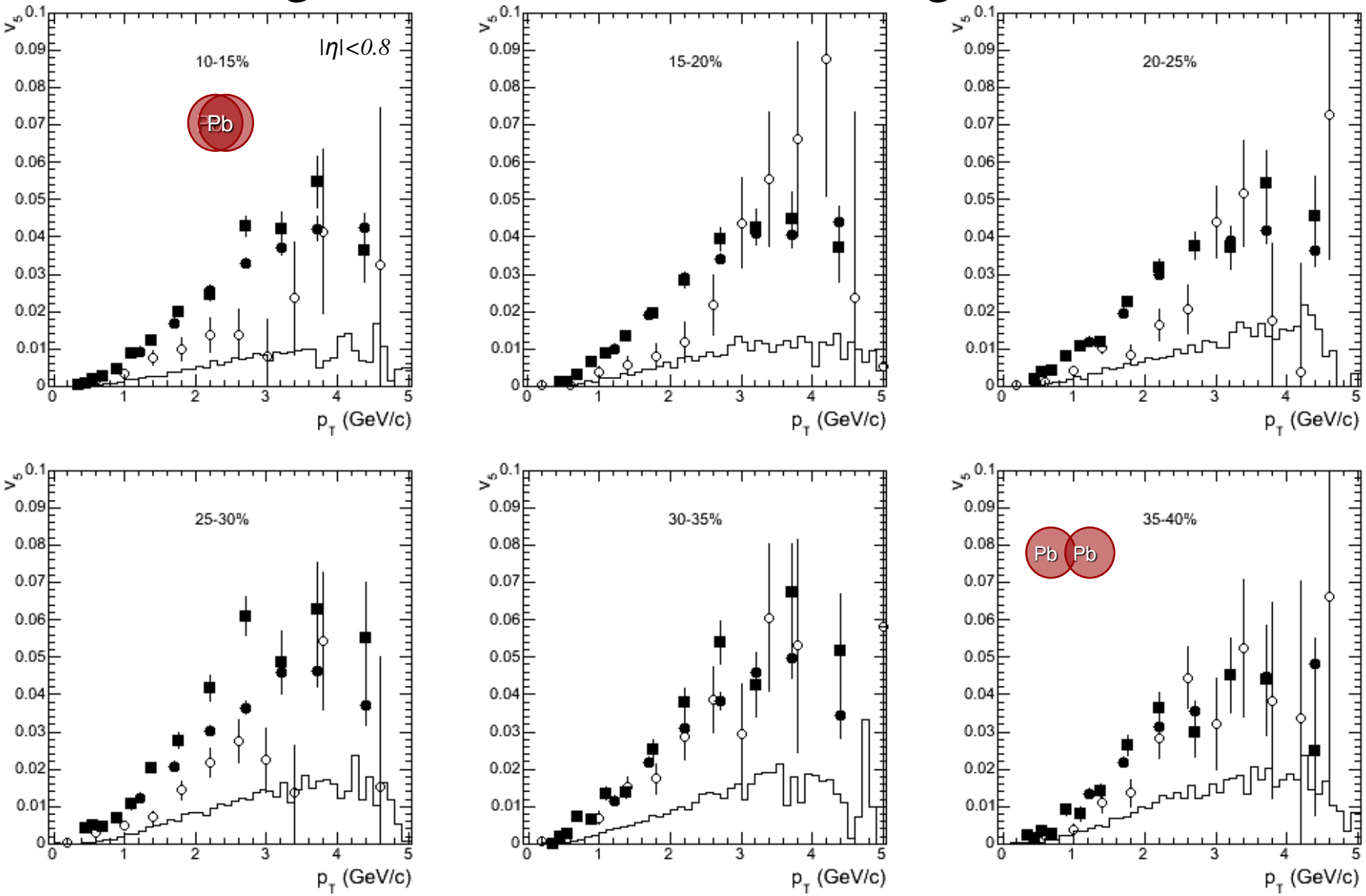
Closed circles and squares: CMS data $v_3\{2\}$ & $v_3\{EP\}$ *(PRC 89 (2014) 044906);*
histograms and open circles: HYDJET++ ("true" $v_3(\psi_3)$ & $v_3\{EP\}$)

Quadrangular flow of inclusive charged hadrons



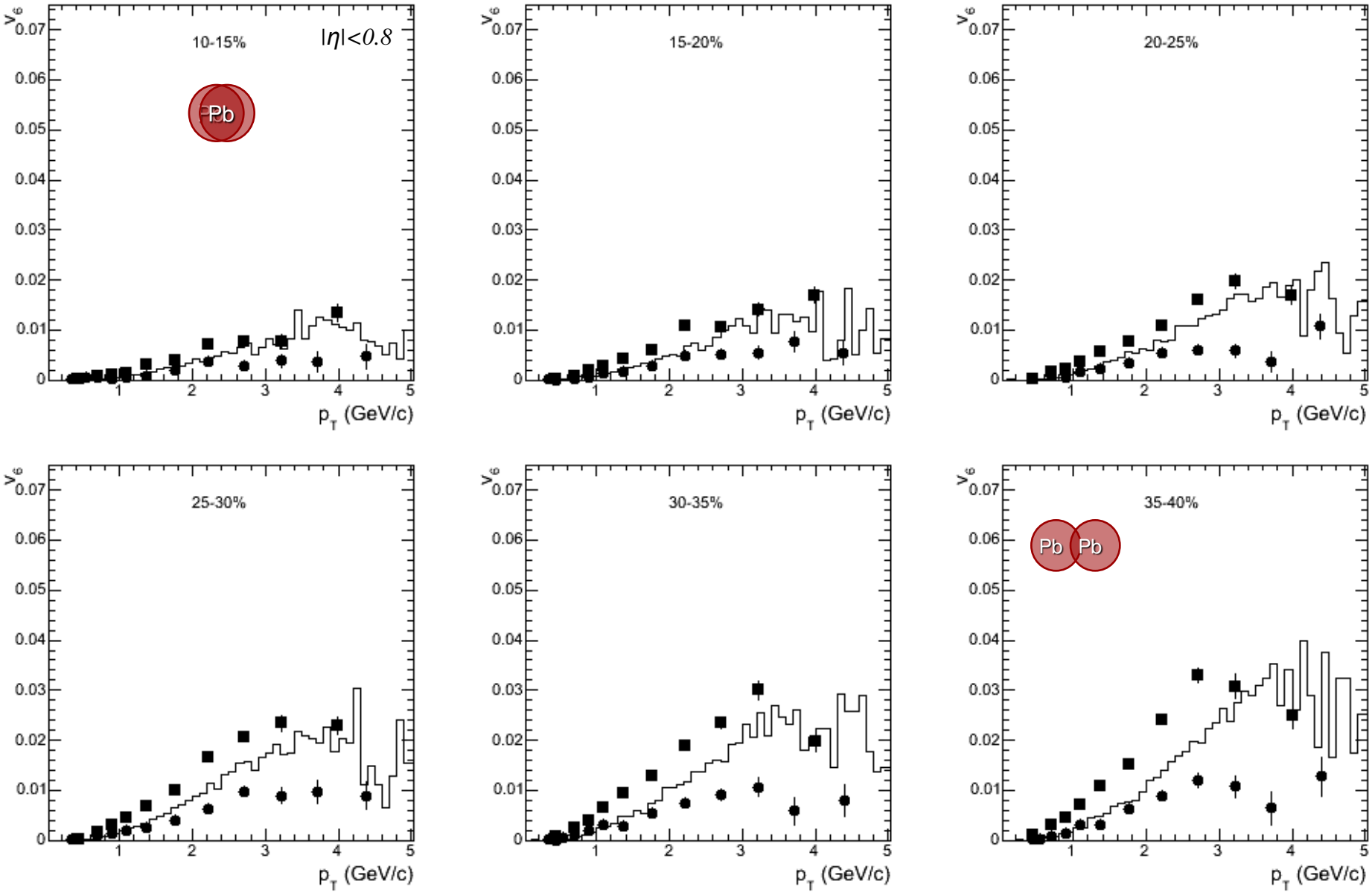
Closed circles and squares: CMS data $v_4\{2\}$ & $v_4\{LYZ\}$ *(PRC 89 (2014) 044906);*
histograms and open circles: HYDJET++ ("true" $v_4(\psi_2)$ & $v_4\{EP\}$)

Pentagonal flow of inclusive charged hadrons



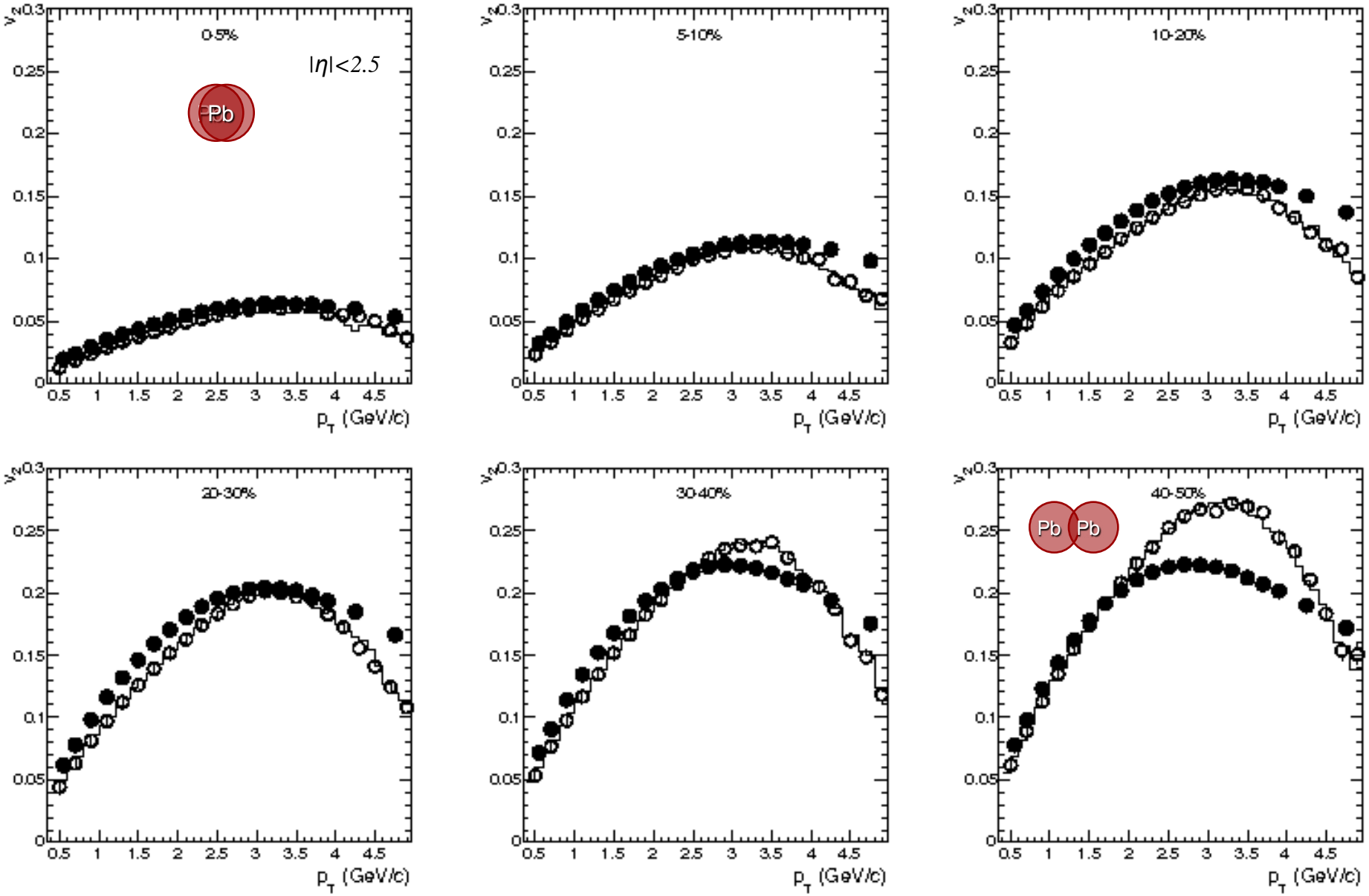
Closed circles and squares: CMS data $v_5\{2\}$ & $v_5\{EP\}$ *(PRC 89 (2014) 044906);*
histograms and open circles: HYDJET++ ("true" $v_5(\psi_3)$ & $v_5\{EP\}$)

Hexagonal flow of inclusive charged hadrons



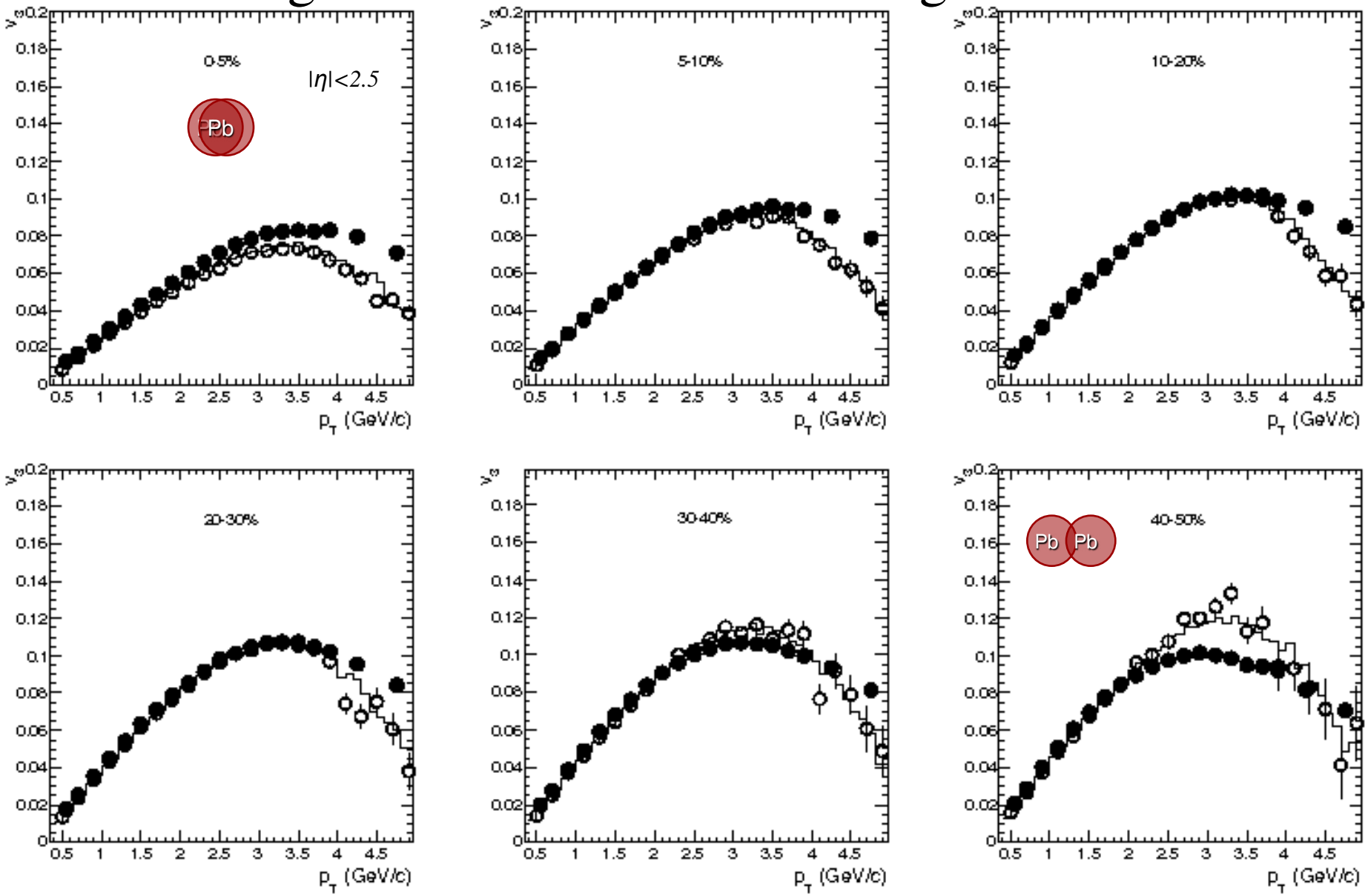
Closed circles and squares: CMS data $v_6\{EP/\psi_2\}$ & $v_6\{LYZ\}$ *(PRC 89 (2014) 044906);*
histograms: HYDJET++ ("true" $v_6(\psi_2)$)

Elliptic flow of inclusive charged hadrons



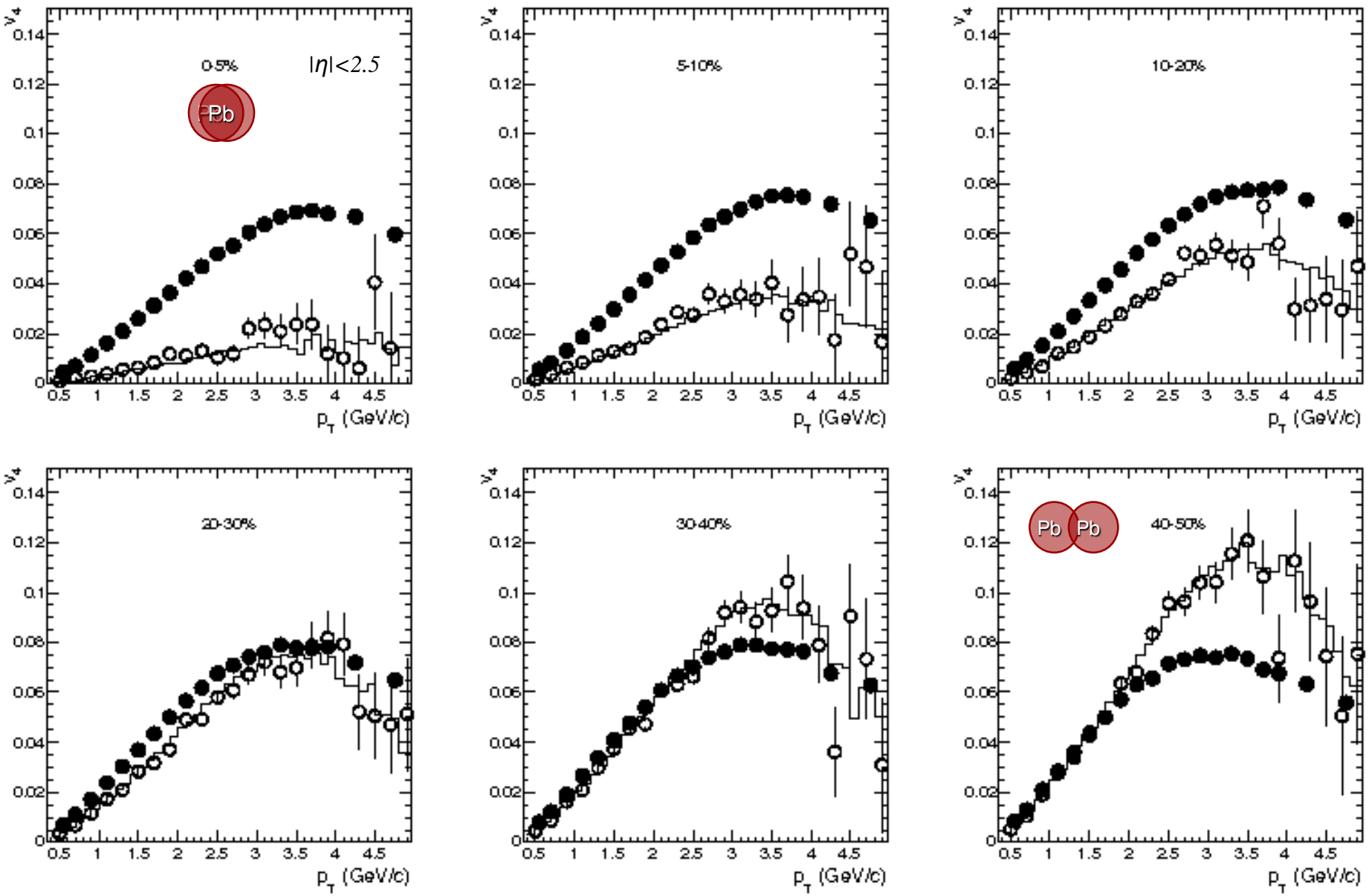
Closed circles: ATLAS data $v_2\{EP\}$ *(PRC 86 (2012) 014907);*
histograms and open circles: HYDJET++ ("true" $v_2(\psi_2)$ & $v_2\{EP\}$)

Triangular flow of inclusive charged hadrons



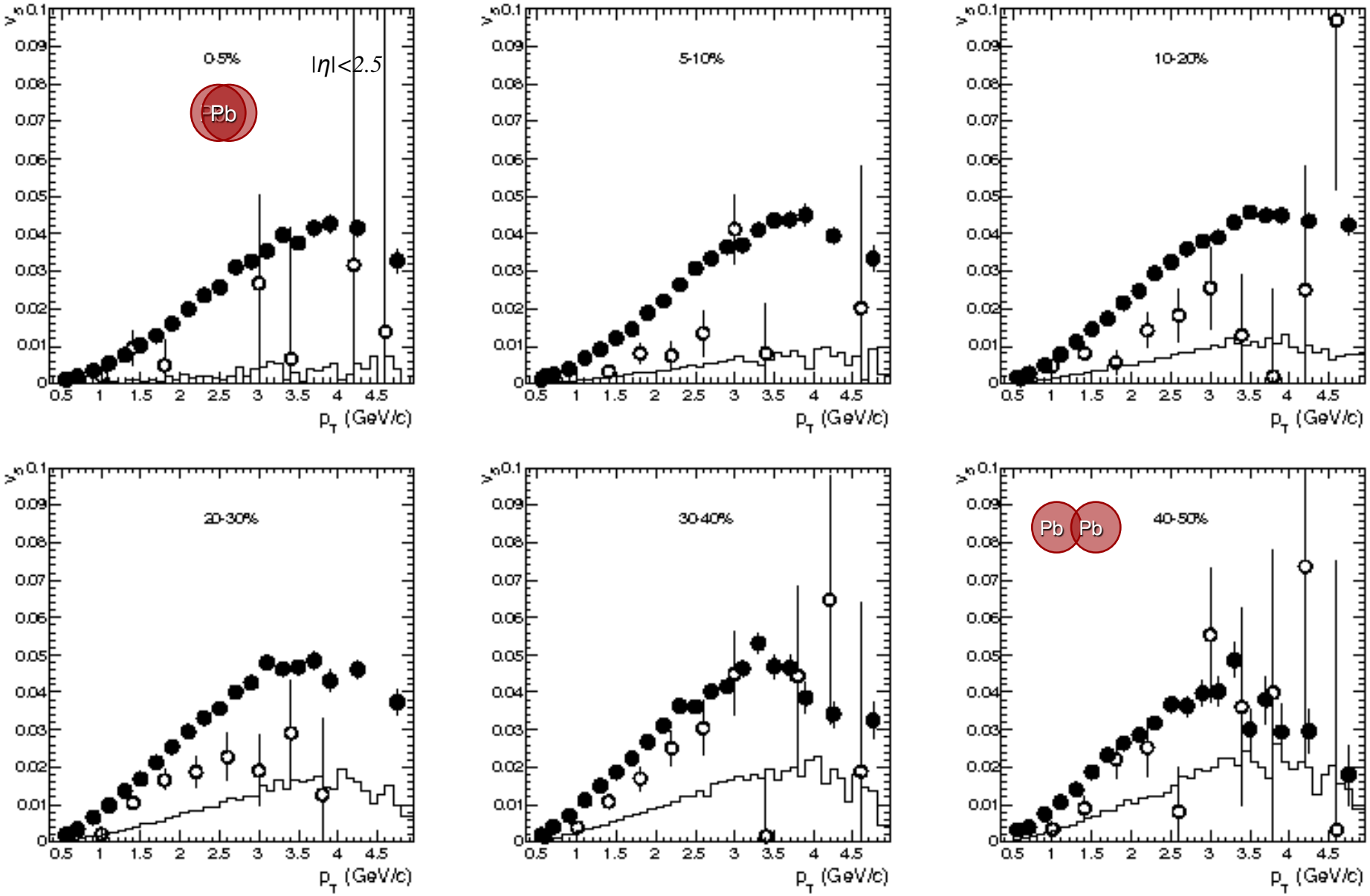
Closed circles: ATLAS data $v_3\{EP\}$ *(PRC 86 (2012) 014907);*
histograms and open circles: HYDJET++ ("true" $v_3(\psi_3)$ & $v_3\{EP\}$)

Quadrangular flow of inclusive charged hadrons



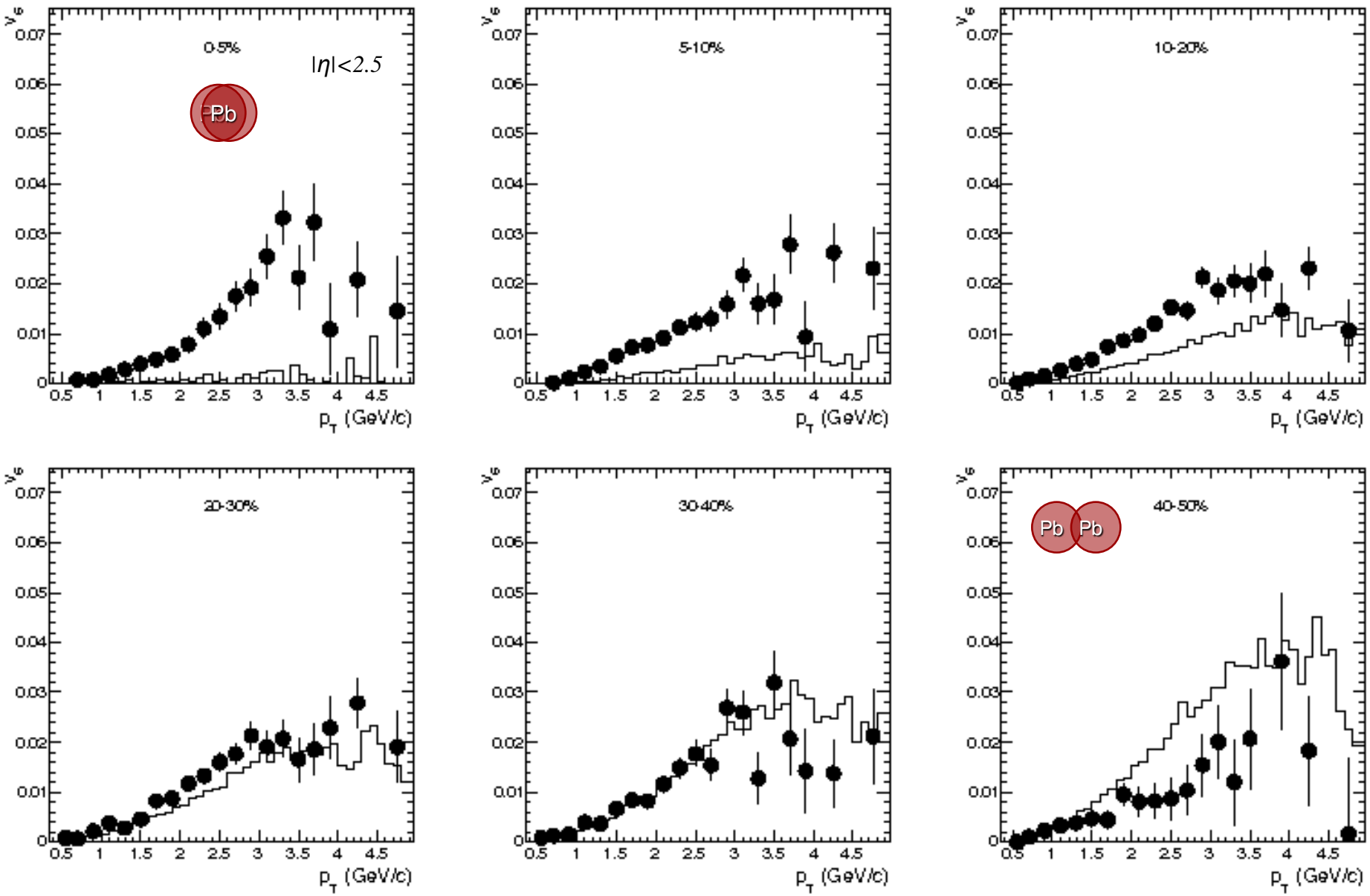
Closed circles: ATLAS data $v_4\{EP\}$ *(PRC 86 (2012) 014907);*
histograms and open circles: HYDJET++ ("true" $v_4(\psi_2)$ & $v_4\{EP\}$)

Pentagonal flow of inclusive charged hadrons



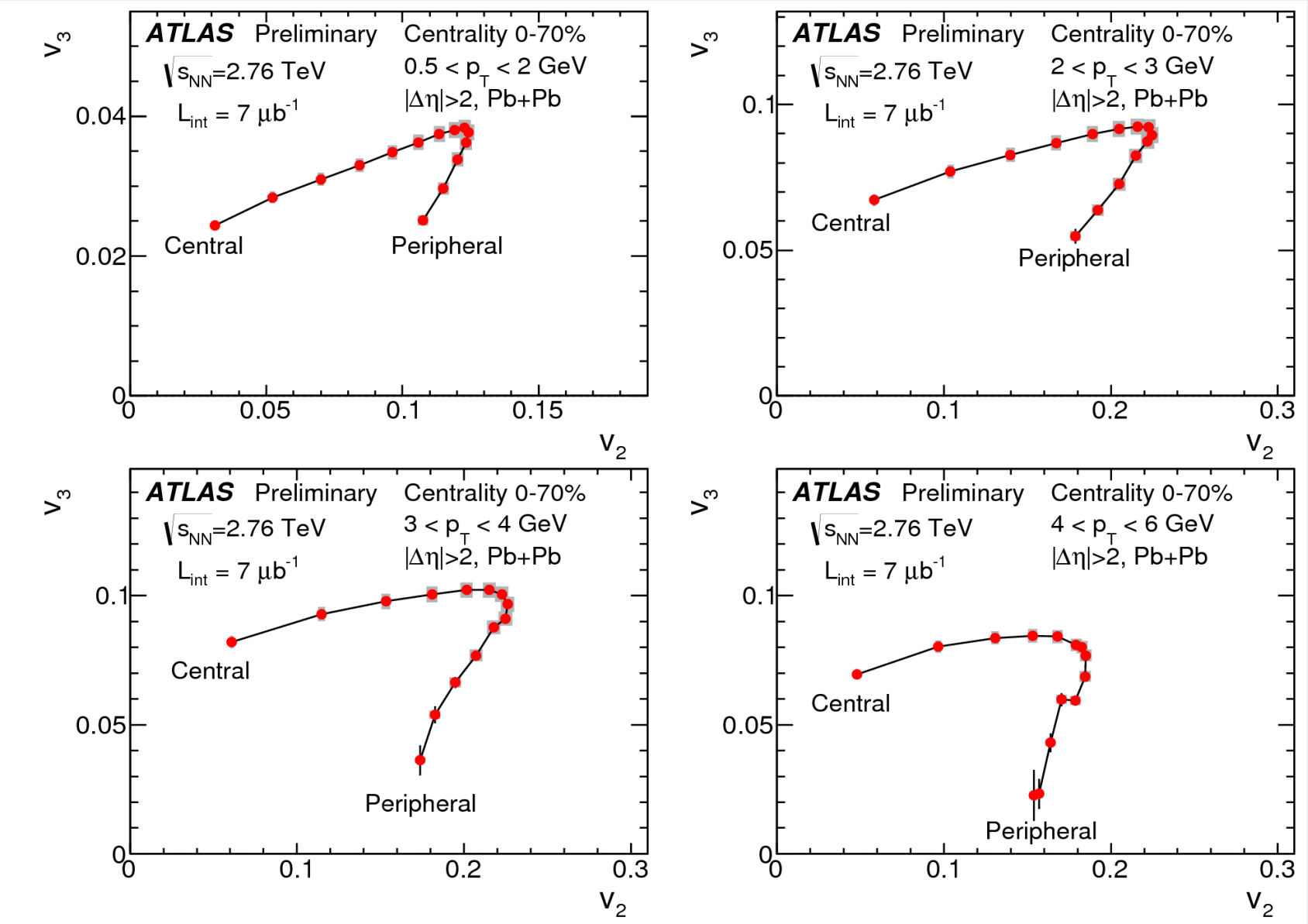
Closed circles: ATLAS data $v_5\{EP\}$ *(PRC 86 (2012) 014907);*
histograms and open circles: HYDJET++ ("true" $v_5(\psi_3)$ & $v_5\{EP\}$)

Hexagonal flow of inclusive charged hadrons

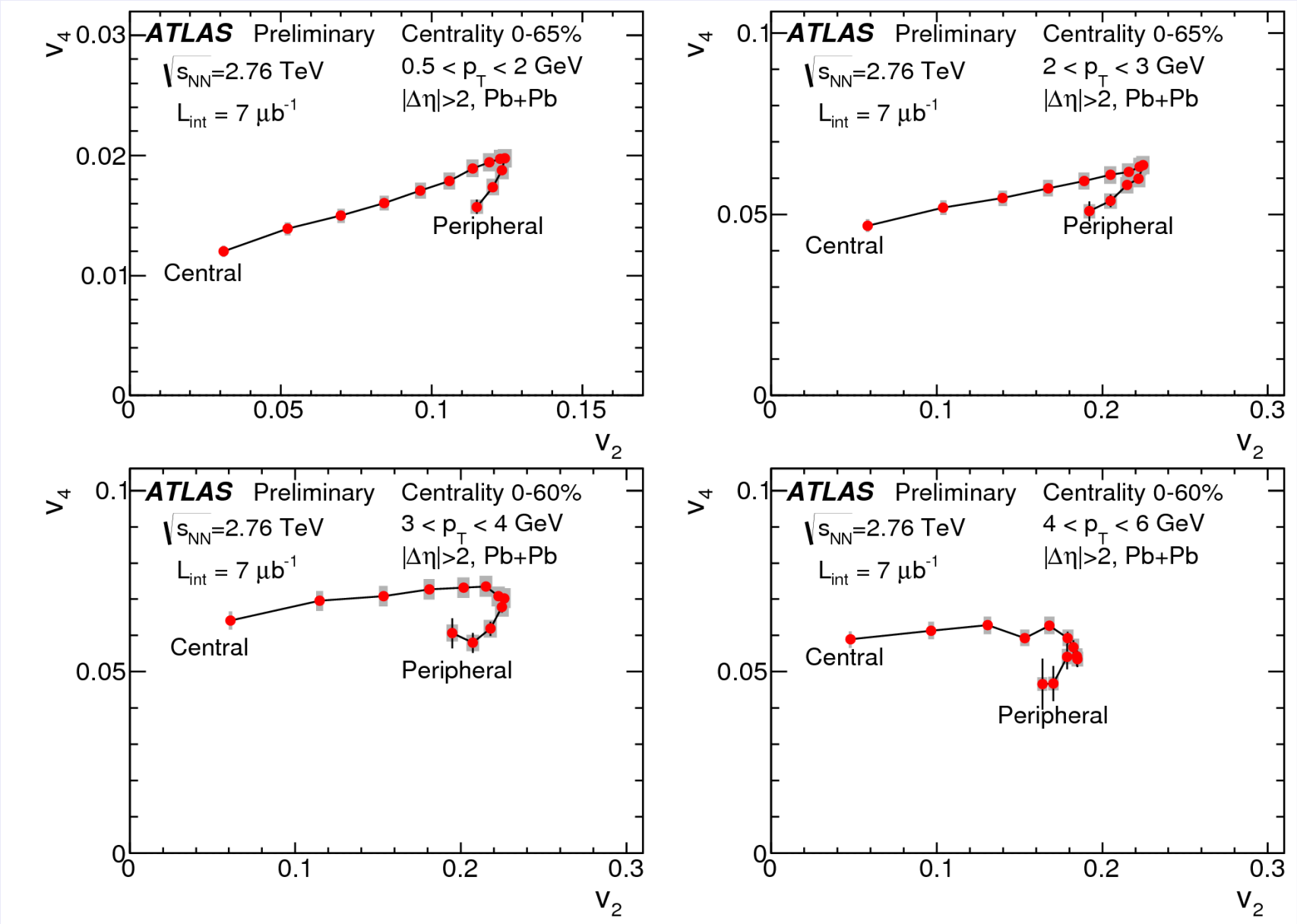
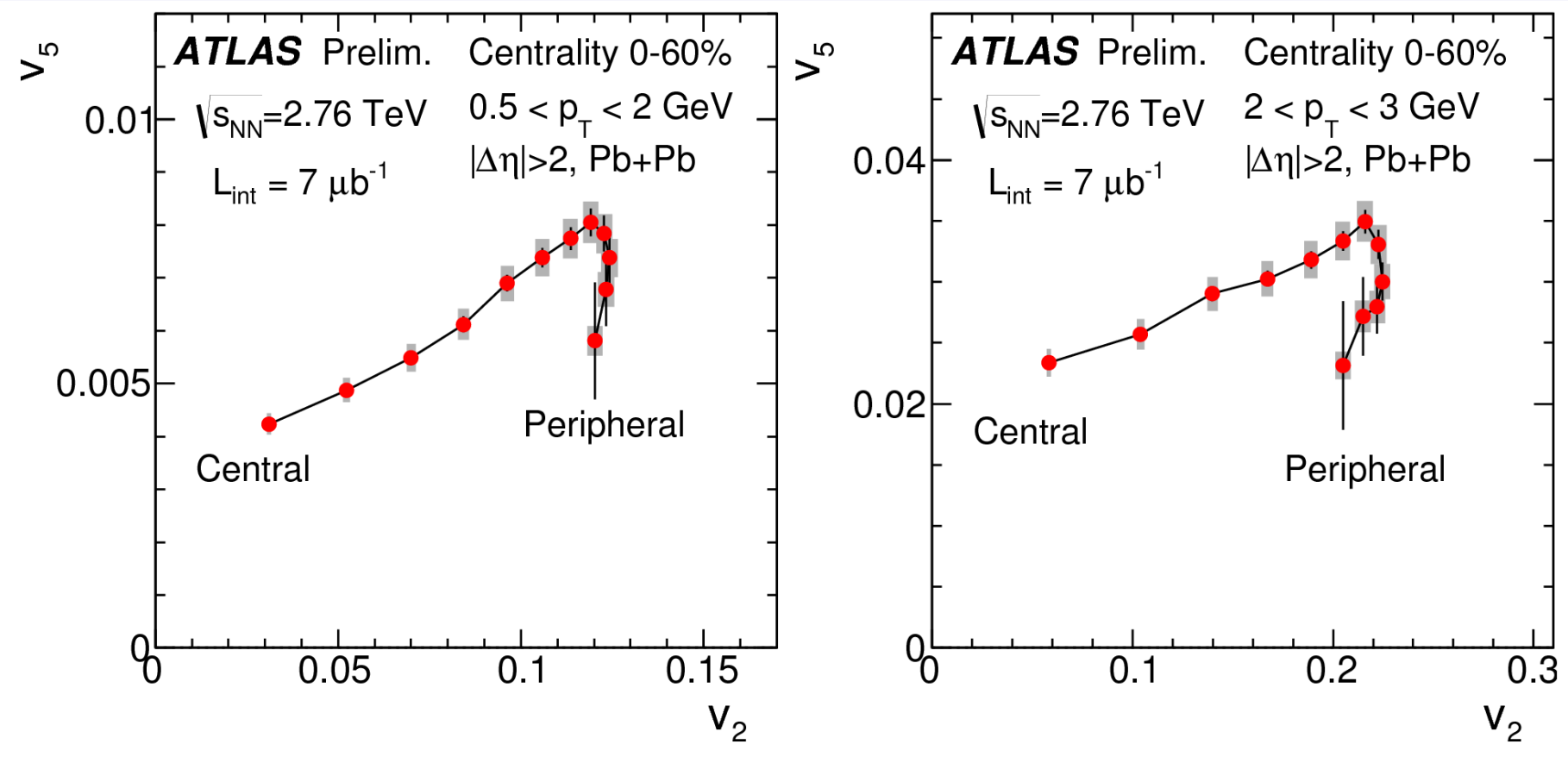


Closed circles: ATLAS data $v_6\{EP\}$ *(PRC 86 (2012) 014907);*
histograms: HYDJET++ ("true" $v_6(\psi_2)$)

Экспериментальные данные ATLAS для корреляций v_3-v_2



Экспериментальные данные ATLAS для корреляций v_4-v_2



Экспериментальные данные ATLAS для корреляций v_5-v_2