

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования Национальный исследовательский ядерный университет
«МИФИ»

**Поляризация Λ -гиперонов вдоль направления пучка в столкновениях ядер
золота при $\sqrt{s_{NN}} = 14.6 - 62$ ГэВ в эксперименте STAR**

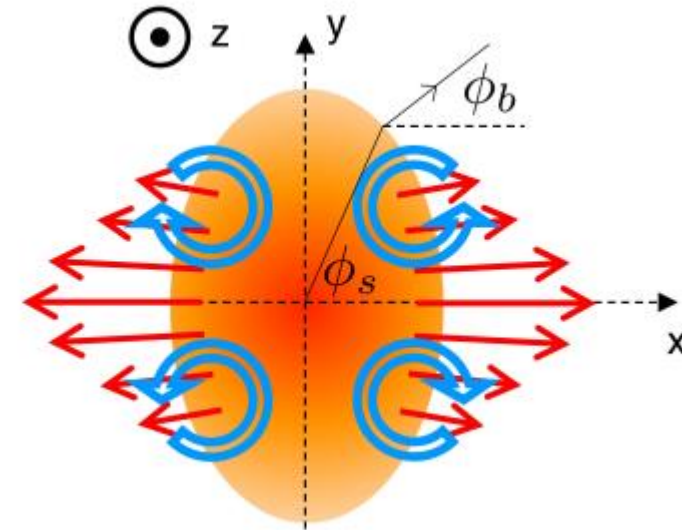
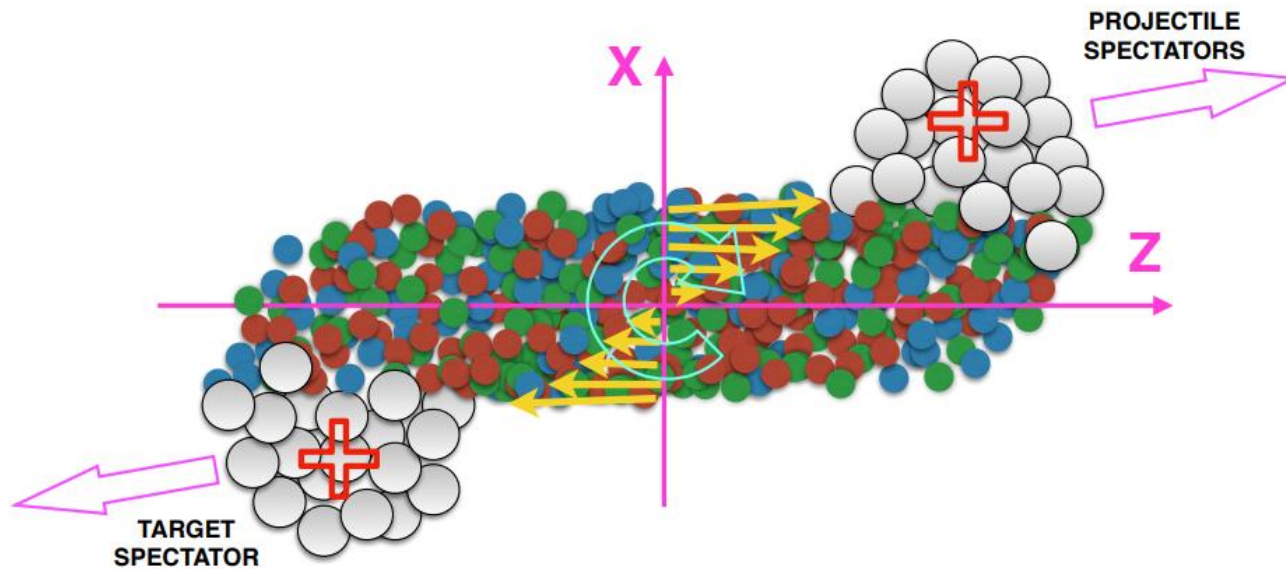


Выполнил:
Студент группы М25-114
Морозов М. А.

Научный руководитель:
Алпатов Е. В.

Москва
2026

Поляризация частиц в КГМ



- В ультрарелятивистских столкновениях тяжелых ионов образуется кварк-глюонная материя (КГМ).
- Для нецентральных столкновений тяжелых ионов характерна вихревая структура КГМ.
- Вектор завихренности ($\vec{\omega} = \nabla \vec{v}$), в среднем направлен вдоль вектора углового момента системы.
- Нетривиальное распределение скоростей порождает локальные вихри, знак завихренности которых варьируется от квадранта к квадранту.
- Спин дочерних частиц поляризуется вдоль вектора завихренности, что приводит к появлению поляризации вдоль направления пучка.

Измерение поляризации вдоль направления пучка

- 1) Угловое распределение дочерних барионов в системе покоя Λ -гиперона:

$$\frac{dN}{d\Omega^*} = \frac{1}{4\pi} (1 + \alpha_H \mathbf{P}_H^* \widehat{\mathbf{p}}_p^*),$$

α_H - параметр распада Λ -гиперона

\mathbf{P}_H^* - вектор поляризации

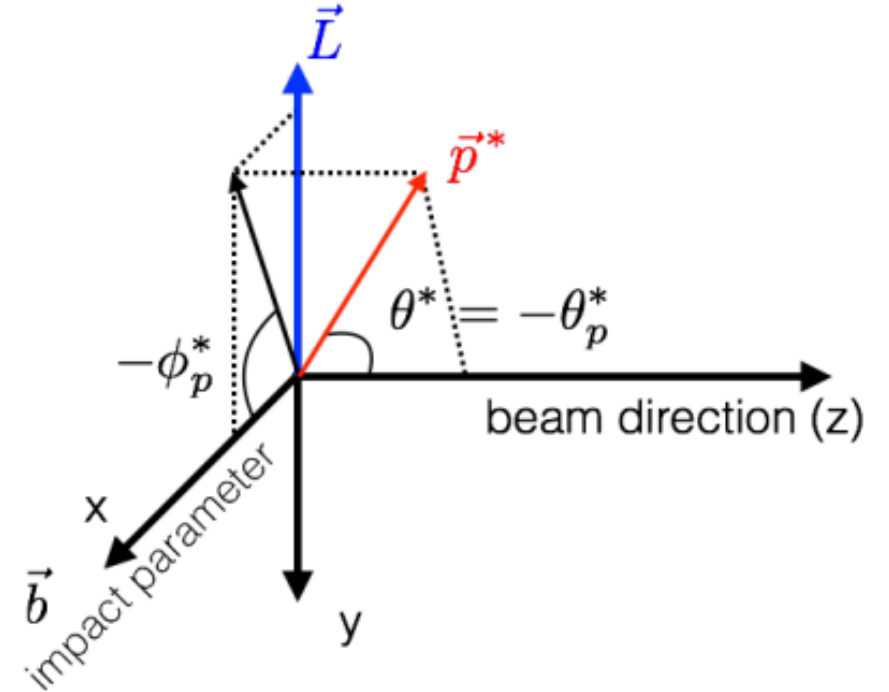
$\widehat{\mathbf{p}}_p^*$ - единичный вектор, направленный вдоль импульса дочернего протона в системе покоя Λ -гиперона

- 2) Формула поляризации вдоль направления пучка:

$$P_z = \frac{\langle \cos \theta_p^* \rangle}{\alpha_H \langle \cos^2 \theta_p^* \rangle},$$

θ_p^* - полярный угол дочернего протона в системе покоя Λ -гиперона

- 3) Из за симметрии системы $\langle P_z \rangle = 0$, поэтому измеряют величину $\langle P_z \sin(n(\phi - \Psi_n)) \rangle$, где ϕ – азимутальный угол гиперона, Ψ_n - n-гармоника угла наклона плоскости реакции (плоскость, которая задается вектором движения ядер и прицельным параметром)

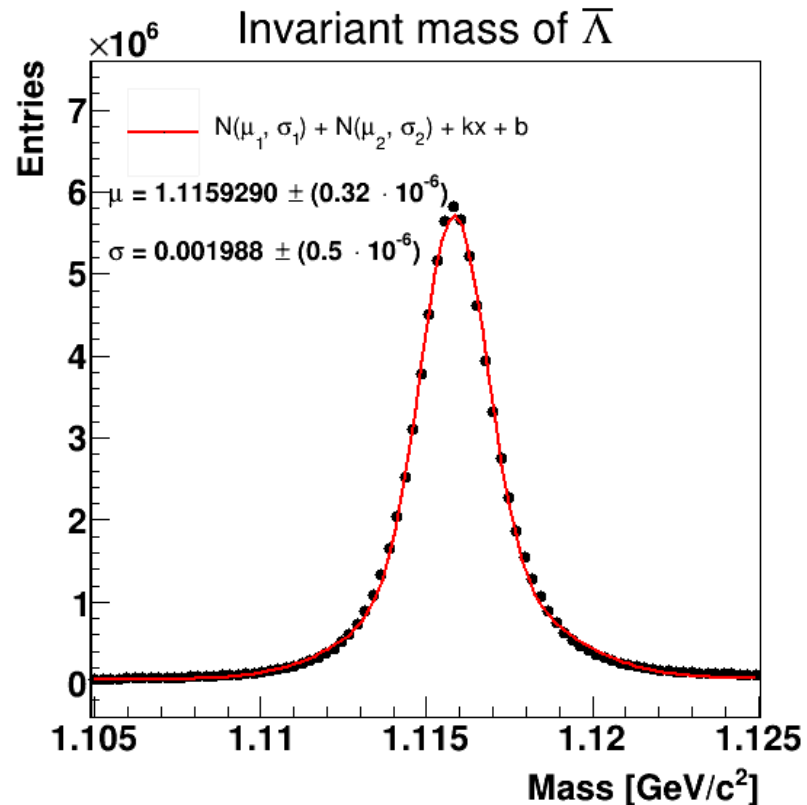
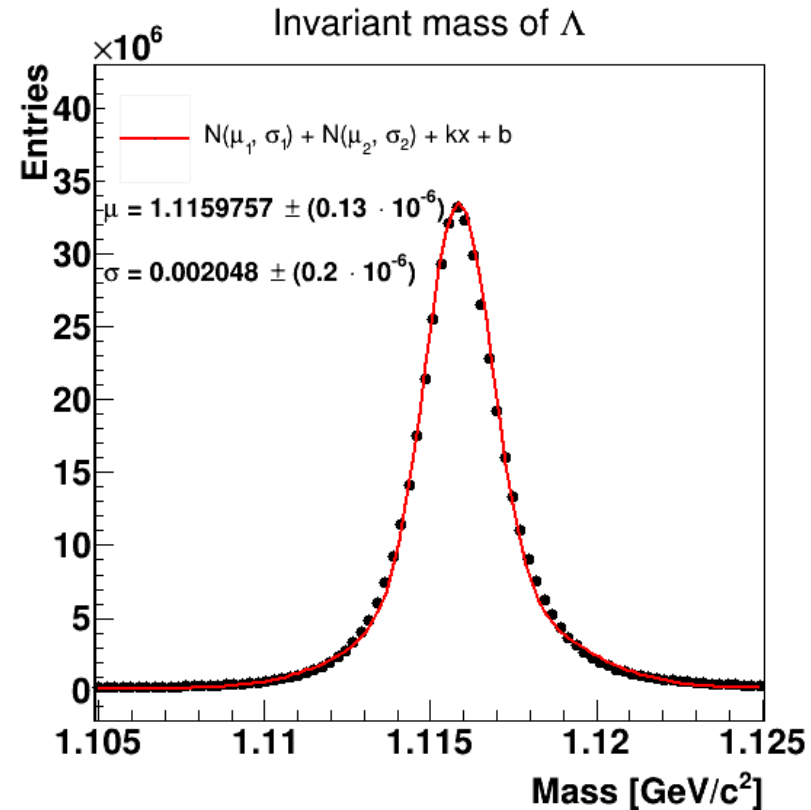


Отбор событий

- Результаты, представленные в этой работе, получены на основе данных, собранных в эксперименте STAR для столкновений ядер золота при $\sqrt{s_{NN}} = 14.6 - 62$ ГэВ.
- Ограничения на события, связанные с областью видимости детекторов:

	14.6 ГэВ	17.3 ГэВ	19.6 ГэВ	27 ГэВ	39 ГэВ	62 ГэВ
z компонента первичной вершины	$ V_z \leq 145$ см	$ V_z \leq 145$ см	$ V_z \leq 145$ см	$ V_z \leq 70$ см	$ V_z \leq 40$ см	$ V_z \leq 40$ см
Радиальная компонента первичной вершины	$ V_r \leq 2$ см	$ V_r \leq 2$ см	$ V_r \leq 2$ см	$ V_r \leq 2$ см	$ V_r \leq 2$ см	$ V_r \leq 2$ см
Количество событий после наложения ограничений	413M	250M	657M	457M	103M	42M

Восстановление Λ – гиперонов

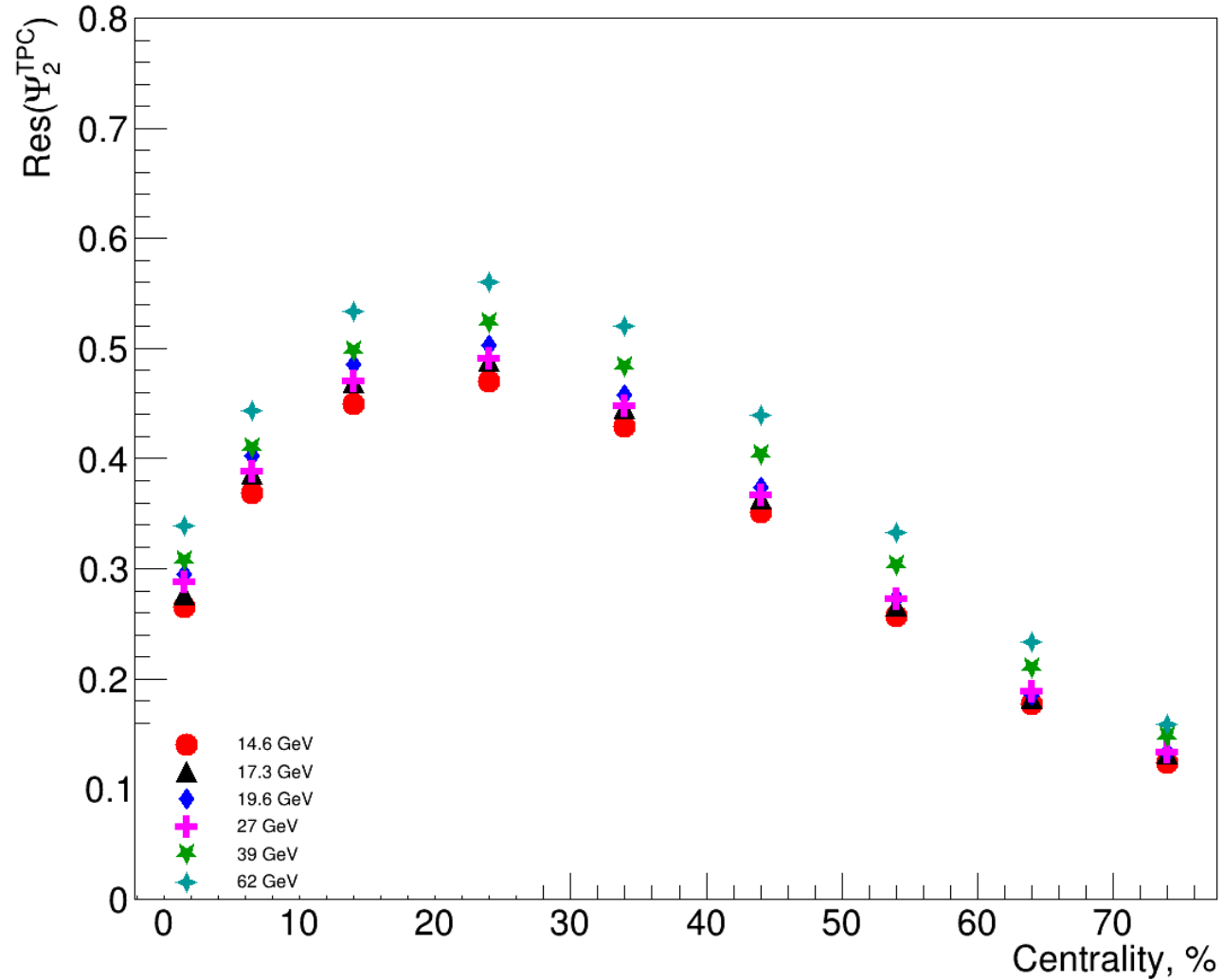


	14.6, 17.3, 19.6 ГэВ	27, 39, 62 ГэВ
Импульс	$p > 0.15 \text{ GeV}$	$p > 0.15 \text{ GeV}$
$nHits$	≥ 15	≥ 15
$\frac{nHits}{nHitsPoss}$	≥ 0.52	≥ 0.52
Псевдо-быстрота	$ \eta \leq 1.5$	$ \eta \leq 1$

- Λ – гипероны восстановлены через топологию распада ($\Lambda \rightarrow p + \pi^-$)
- Дочерние частицы Λ – гиперонов идентифицированы с помощью детектора TPC и ToF.
- Ограничения на треки дочерних частиц представлены в таблице

Восстановление плоскости реакции

Resolution



- Плоскость реакции восстановлена методом плоскости события
- Угол наклона плоскости события измерен с помощью детектора TPC:

$$\Psi_2 = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{\sum_i w_i \sin(2\phi_i)}{\sum_i w_i \cos(2\phi_i)} \right),$$

where $w_i = p_T$, $0.1 < p_T < 2 \text{ GeV}$,
 $0.1 \leq |\eta| \leq 1.5$, $\eta \text{ gap} = 0.2$

- Разрешение угла плоскости события:

$$Res_{full}(\Psi_2) = \sqrt{2 \langle \cos(2(\Psi_2^{east} - \Psi_2^{west})) \rangle}$$

Ψ_2^{east} рассчитан для частиц с $\eta < 0$

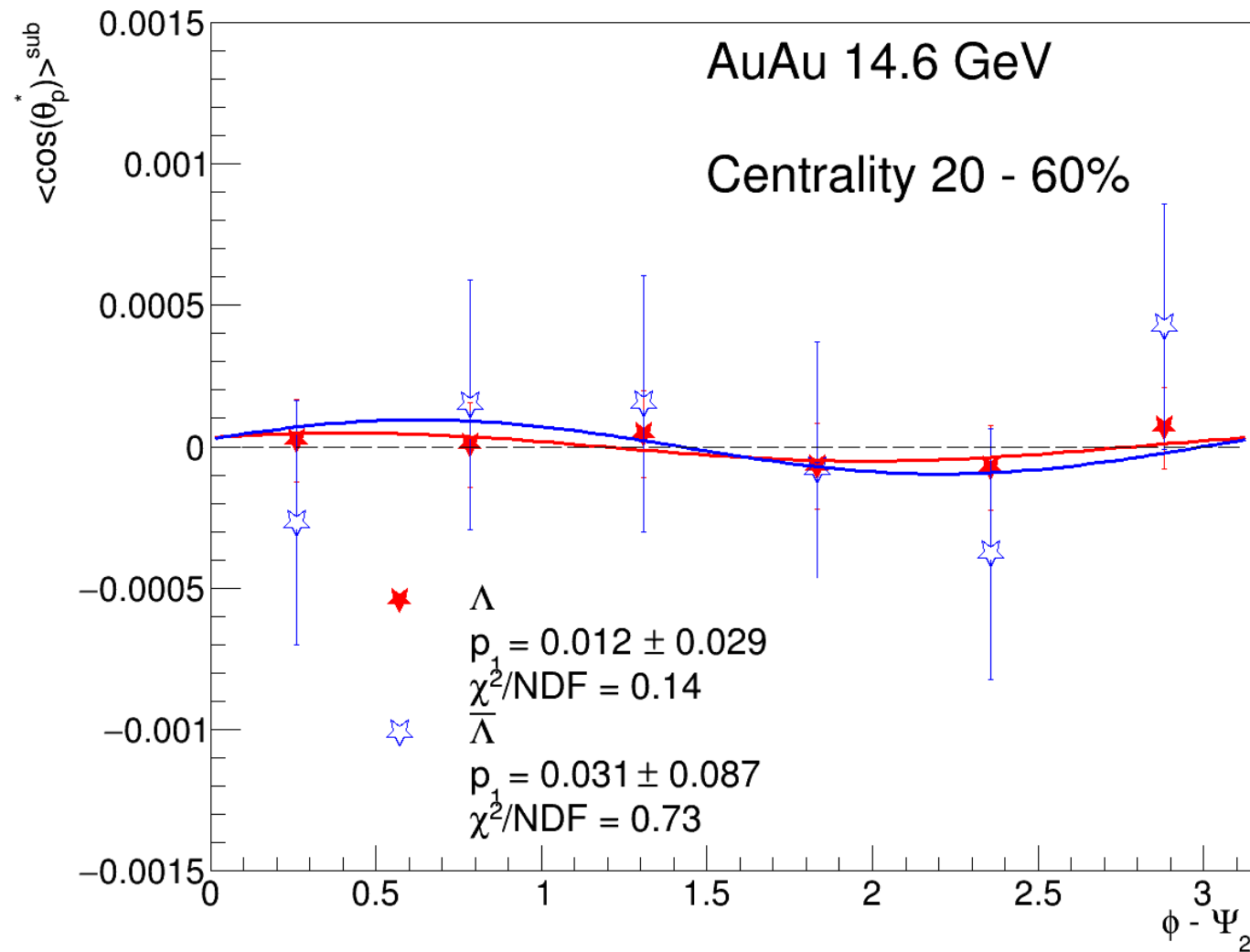
Ψ_2^{west} рассчитан для частиц $\eta > 0$

- Для измерения P_z :

Ψ_2^{east} использовался для Λ с $\eta > 0$

Ψ_2^{west} использовался для Λ с $\eta < 0$

Измерение P_Z методом плоскости события



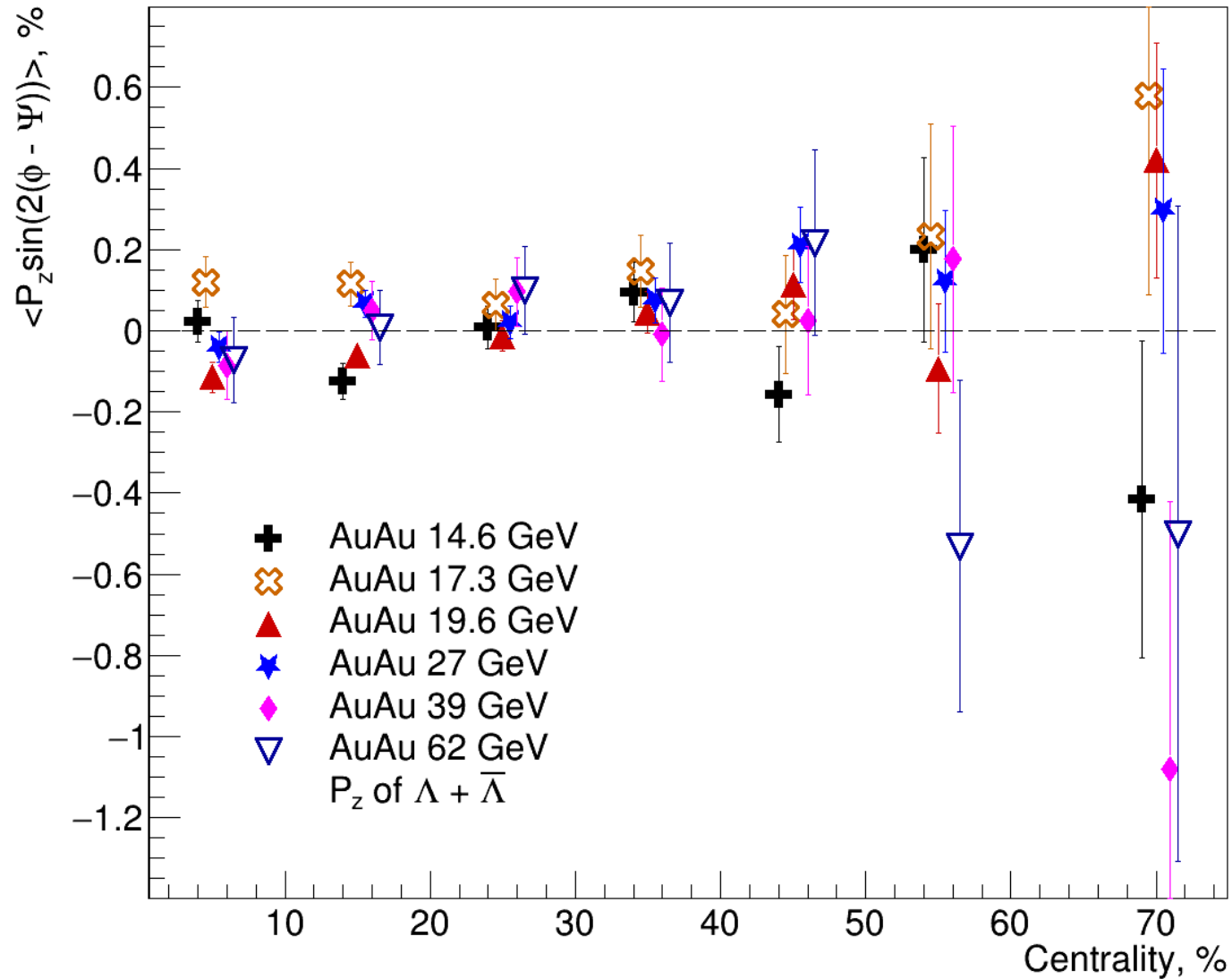
- $P_Z = \frac{\langle \cos \theta_p^* \rangle}{\alpha_H \langle \cos^2 \theta_p^* \rangle}$
- В случае идеального детектора $\langle \cos^2 \theta_p^* \rangle = 1/3$. В данной работе использовалось именно это значение.
- Измеряем зависимость $\langle \cos \theta_p^* \rangle$ от разницы азимутального угла гиперона и угла наклона плоскости события ($\phi - \Psi_2$).
- Поправляем $\cos \theta_p^*$ на среднее значение:

$$\langle \cos \theta_p^* \rangle^{sub} = \langle \cos \theta_p^* \rangle_i - \frac{\sum_i \langle \cos \theta_p^* \rangle_i}{n_{bin}}$$
- Разлагаем $\langle \cos \theta_p^* \rangle^{sub}$ в ряд Фурье:

$$\langle \cos(\theta_p^*) \rangle^{sub} = p_0 + p_1 \sin(2(\phi - \Psi_2)) + p_2 \cos(2(\phi - \Psi_2))$$
- Находим $\langle P_Z \sin(2(\phi - \Psi_2)) \rangle = \frac{3}{\alpha_H Res(\Psi_2)} p_1$

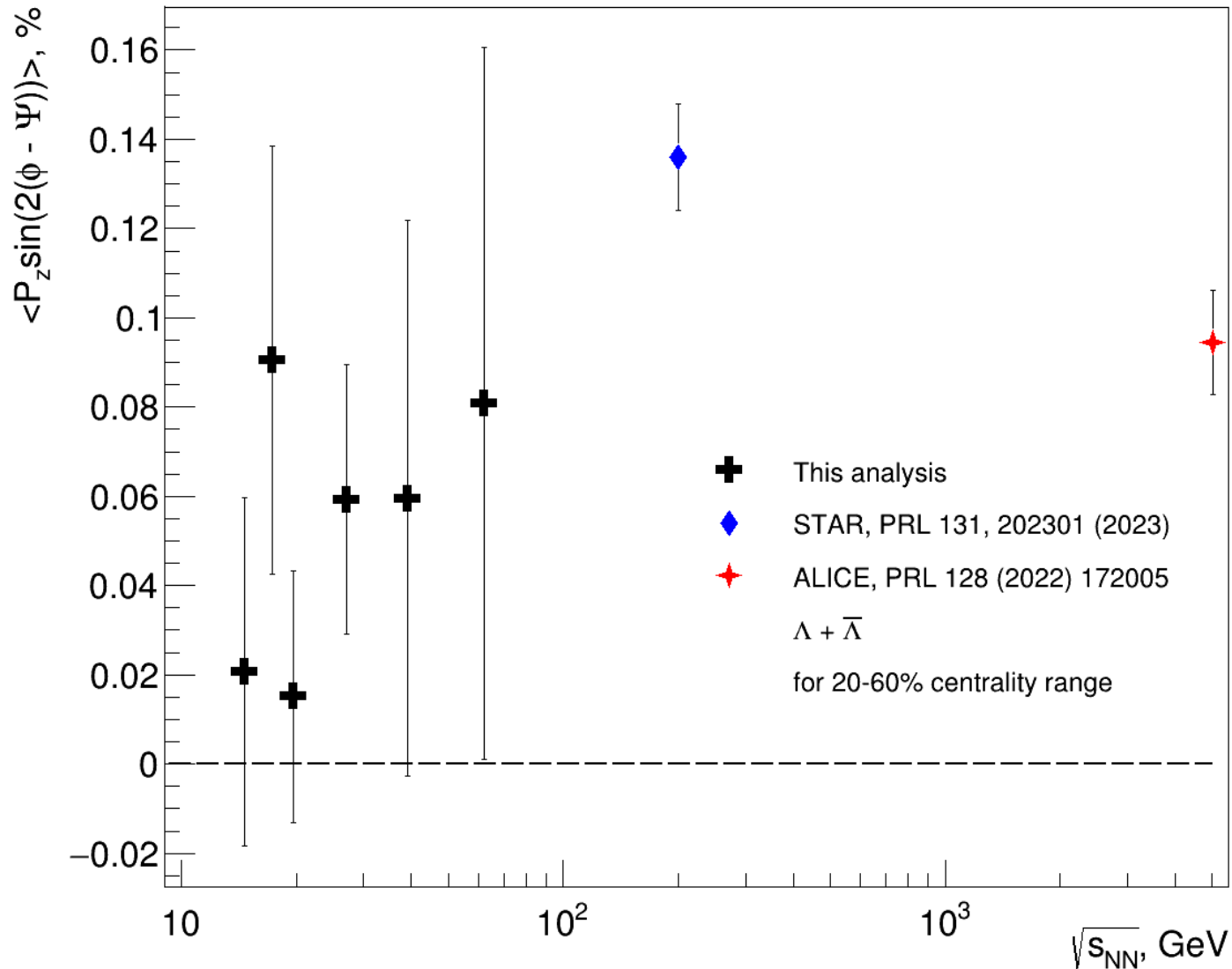
Зависимость $\langle P_z \sin(2(\phi - \Psi_2)) \rangle$ от центральности

$\langle P_z \sin(2(\phi - \Psi)) \rangle$ Vs Centrality



- Построено распределение $\langle P_z \sin(2(\phi - \Psi_2)) \rangle$ от центральности столкновения для суммарного вклада Λ и $\bar{\Lambda}$ – гиперонов для $\sqrt{s_{NN}} = 14.6 - 62$ ГэВ
- Определенной зависимости $\langle P_z \sin(2(\phi - \Psi_2)) \rangle$ от центральности не наблюдается

Зависимость $\langle P_z \sin(2(\phi - \Psi_2)) \rangle$ от энергии столкновения



- Построено распределение $\langle P_z \sin(2(\phi - \Psi_2)) \rangle$ от $\sqrt{s_{NN}}$
- На рисунке наблюдается рост поляризации вдоль направления пучка с ростом энергии столкновения
- Видно, что при $\sqrt{s_{NN}} = 14.6$ ГэВ значение $\langle P_z \sin(2(\phi - \Psi_2)) \rangle$ становится сравнимо с нулем

Заключение

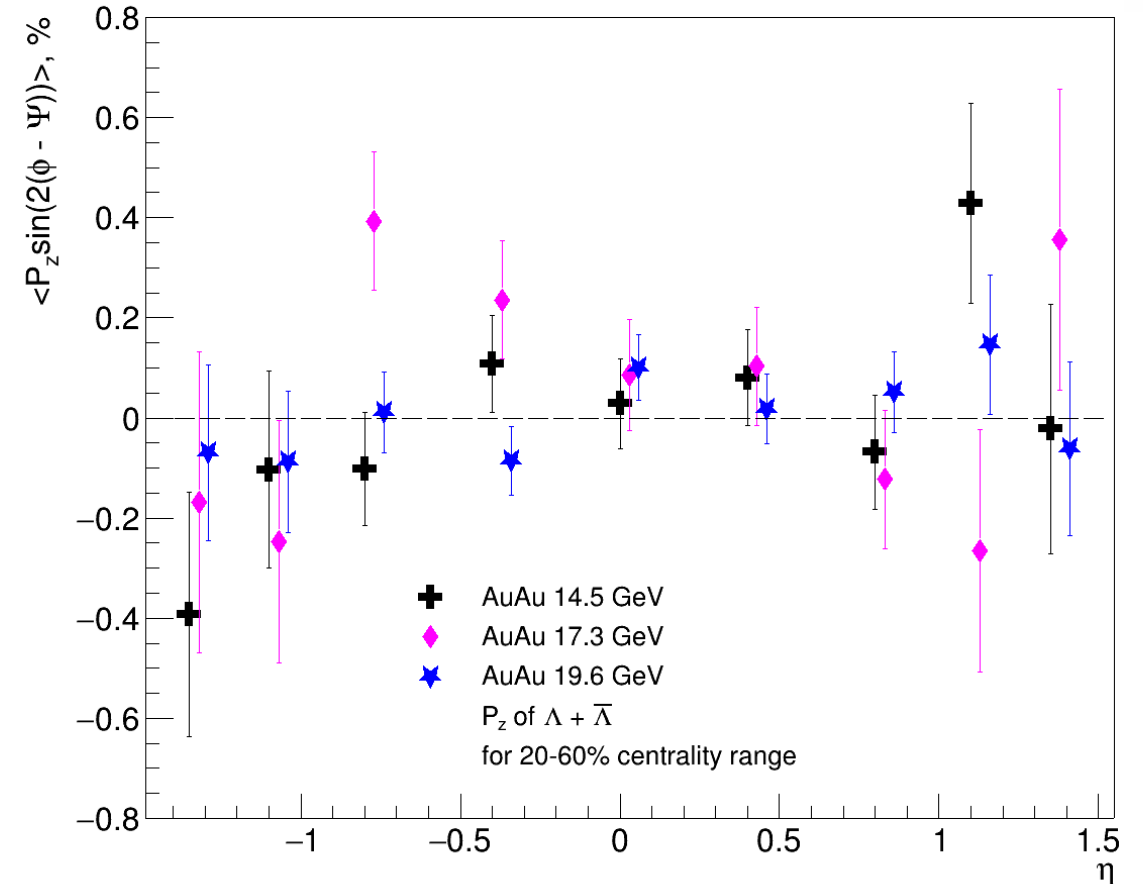
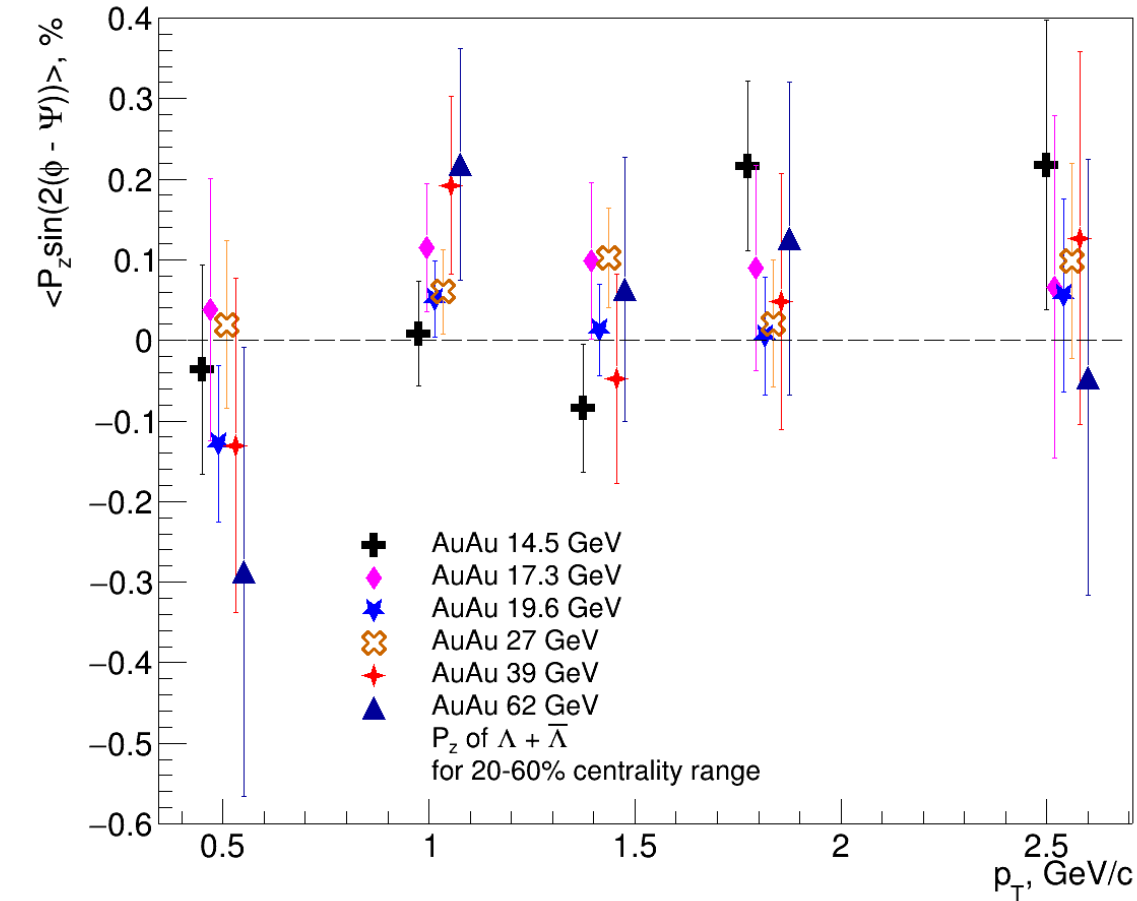
- Измерена зависимость поляризации вдоль направления пучка от вклада $\Lambda + \bar{\Lambda}$ гиперонов в столкновениях ядер золота при $\sqrt{s_{NN}} = 14.6 - 62$ ГэВ от центральности столкновения. Определенной зависимости не обнаружено.
- Измерена зависимость поляризации вдоль направления пучка от вклада $\Lambda + \bar{\Lambda}$ гиперонов от $\sqrt{s_{NN}}$. Поляризация возрастает с ростом энергии столкновения. При $\sqrt{s_{NN}} = 14.6$ ГэВ поляризация становится сравнима с 0. Это может указывать на то, что при низких энергиях равновесие в системе не устанавливается полностью, и поляризация преимущественно развивается в КГМ.
- Следующий этап работы предполагает вычисления поляризации для Ξ - гиперонов.

Extra slides

p_T and η dependence of $\langle P_z \sin(2(\phi - \Psi_2)) \rangle$

$\langle P_z \sin(2(\phi - \Psi)) \rangle$ Vs p_T

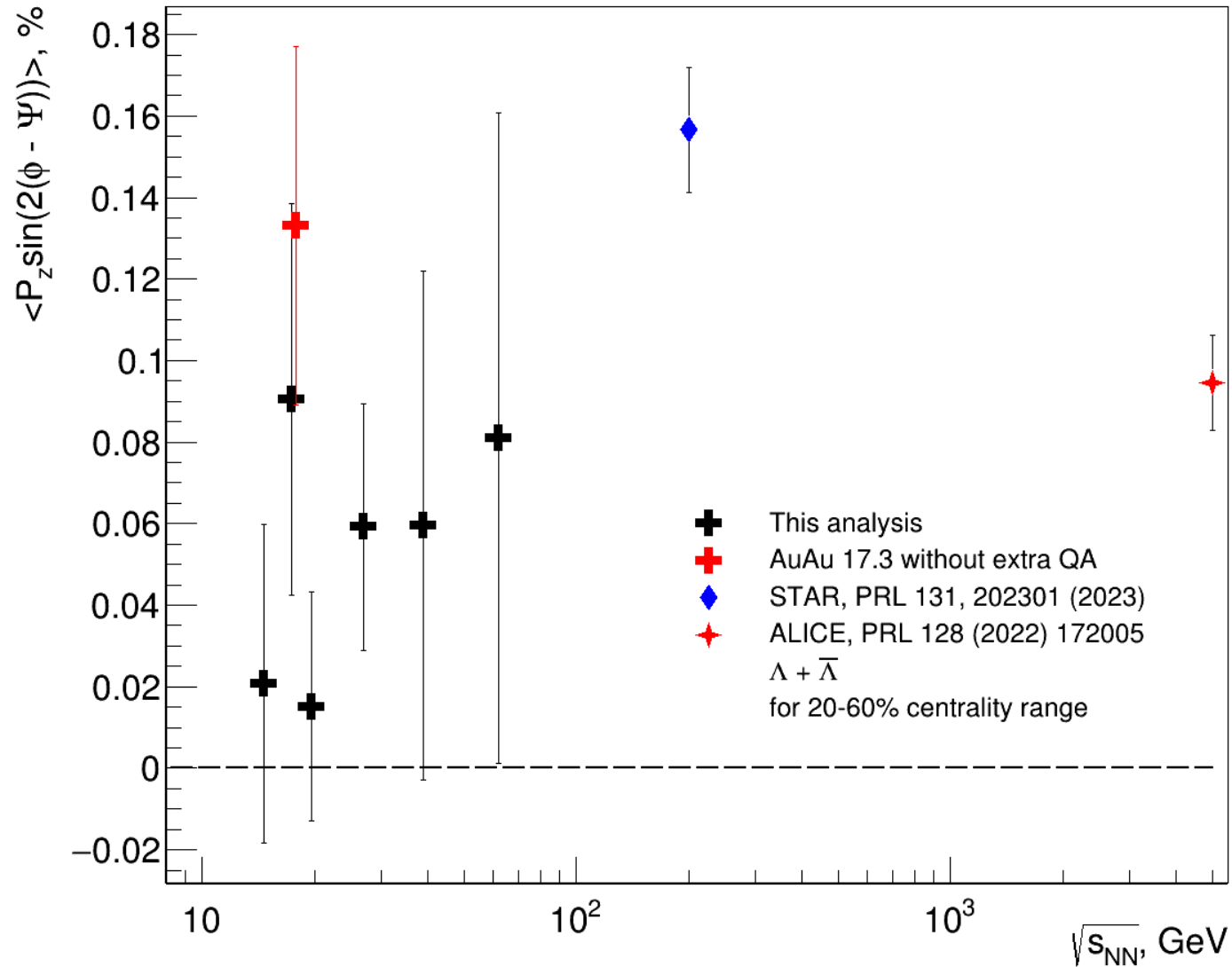
$\langle P_z \sin(2(\phi - \Psi)) \rangle$ Vs η



- $\langle P_z \sin(2(\phi - \Psi_2)) \rangle$ vs p_T dependence for $\sqrt{s_{NN}} = 14.6 - 62$ GeV was obtained.
- There is no observed dependence on transverse momentum.

- $\langle P_z \sin(2(\phi - \Psi_2)) \rangle$ vs η dependence for $\sqrt{s_{NN}} = 14.6, 17.3, 19.6$ GeV was obtained.
- There is a hint of pseudorapidity dependence for 14.6 and 17.3

Motivation for extra QA for 17.3 GeV data set



- $\langle P_z \sin(2(\phi - \Psi_2)) \rangle$ vs $\sqrt{s_{NN}}$ dependence was obtained.
- As be seen the value of polarization for 17.3 GeV is higher then expected
- Make an extra QA for 17.3 GeV data set to increase this value

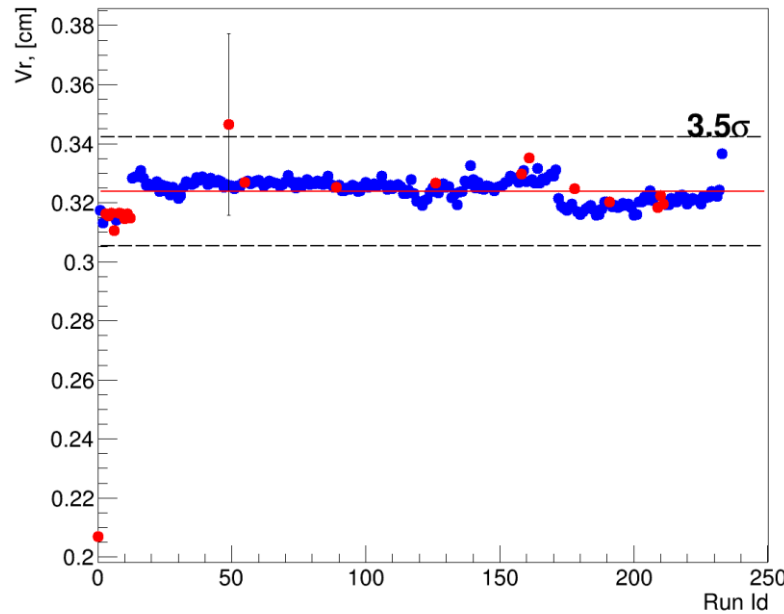


QA for 17.3 GeV data set

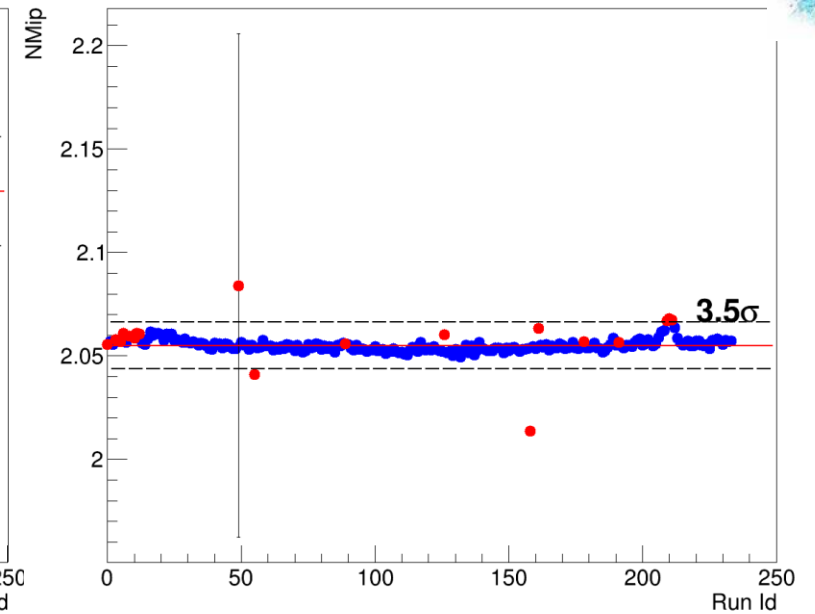
Final bad run list :

- 22145028, 22145045,
- 22145046, 22146001,
- 22146002, 22146007,
- 22146008, 22146009,
- 22146010, 22146012,
- 22149004, 22149016,
- 22150023, 22152003,
- 22155004, 22155007,
- 22155044, 22156034,
- 22157021, 22157023,
- 22157025

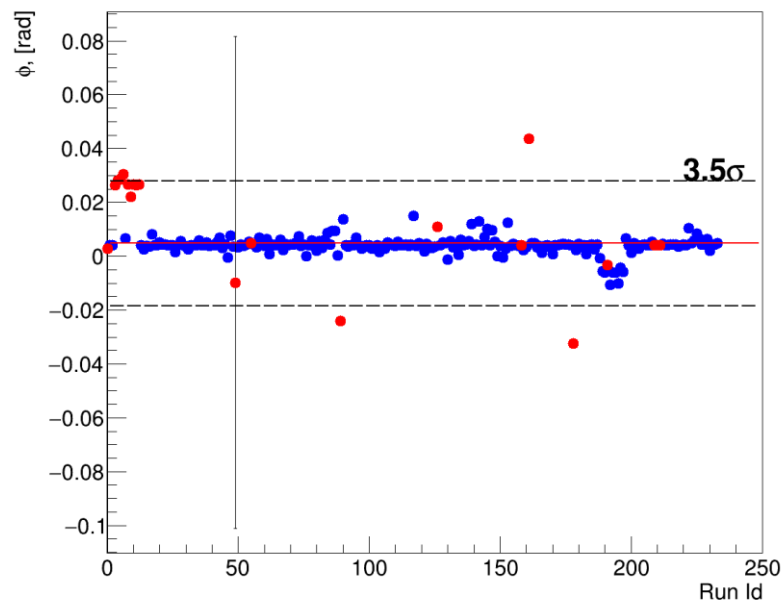
Vr vs RunId



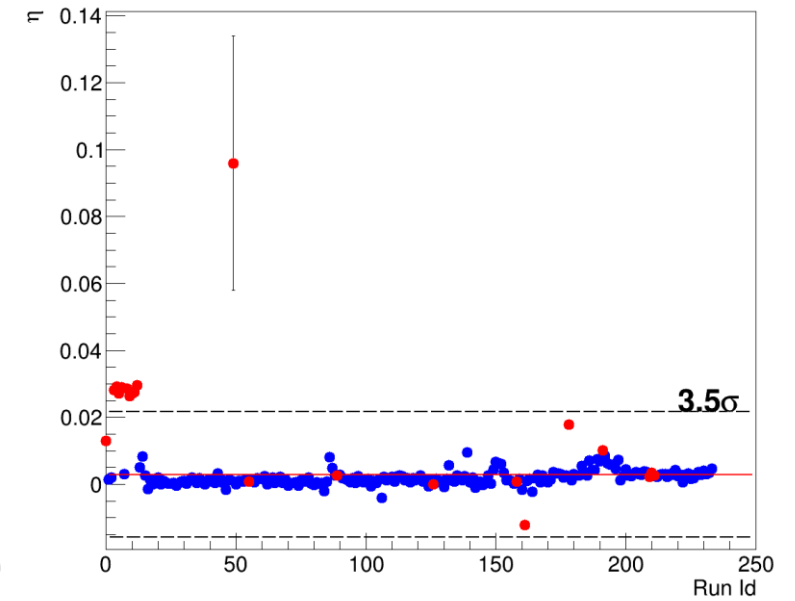
NMip vs RunId



phi vs RunId

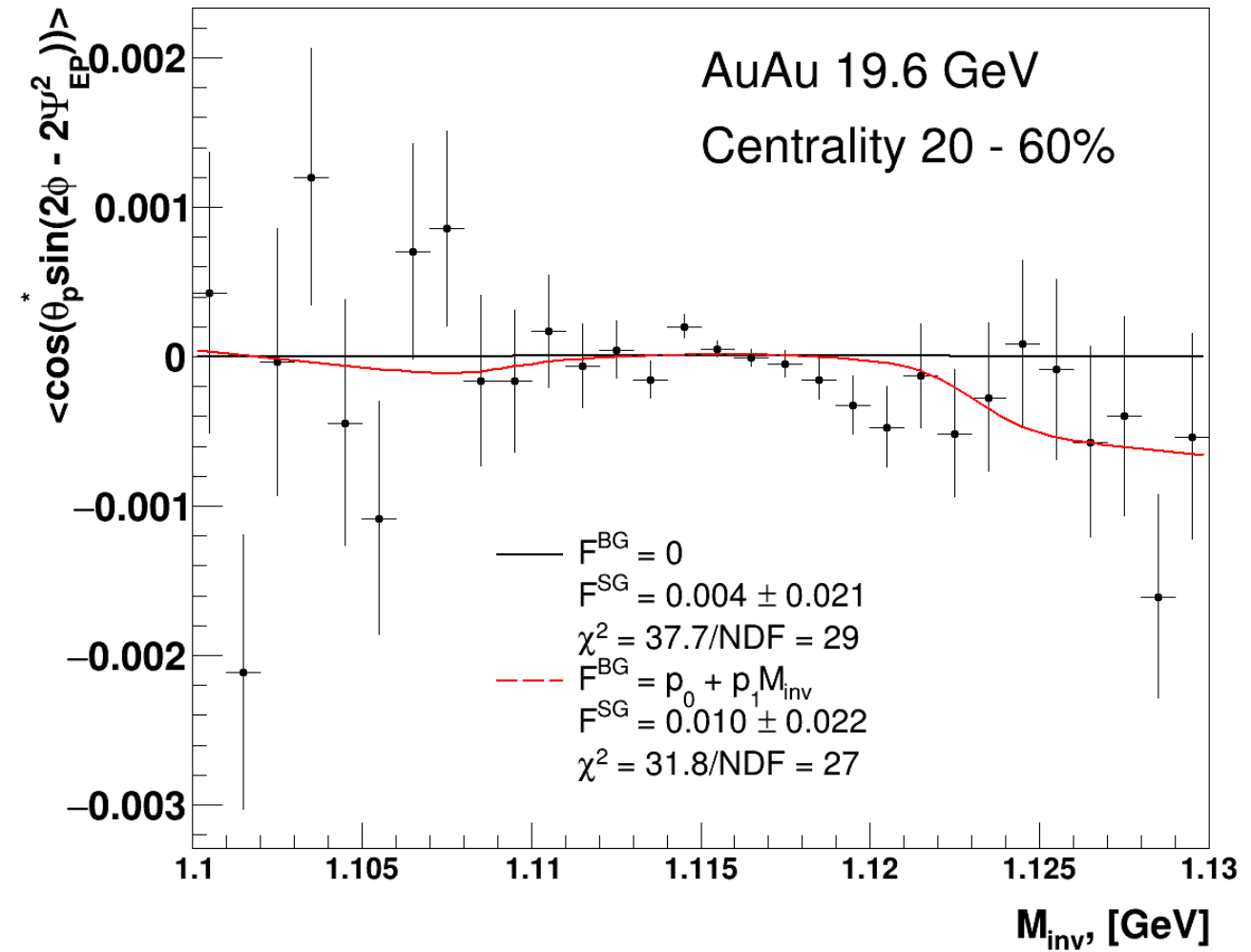


η vs RunId



P_z measurements with Invariant Mass method

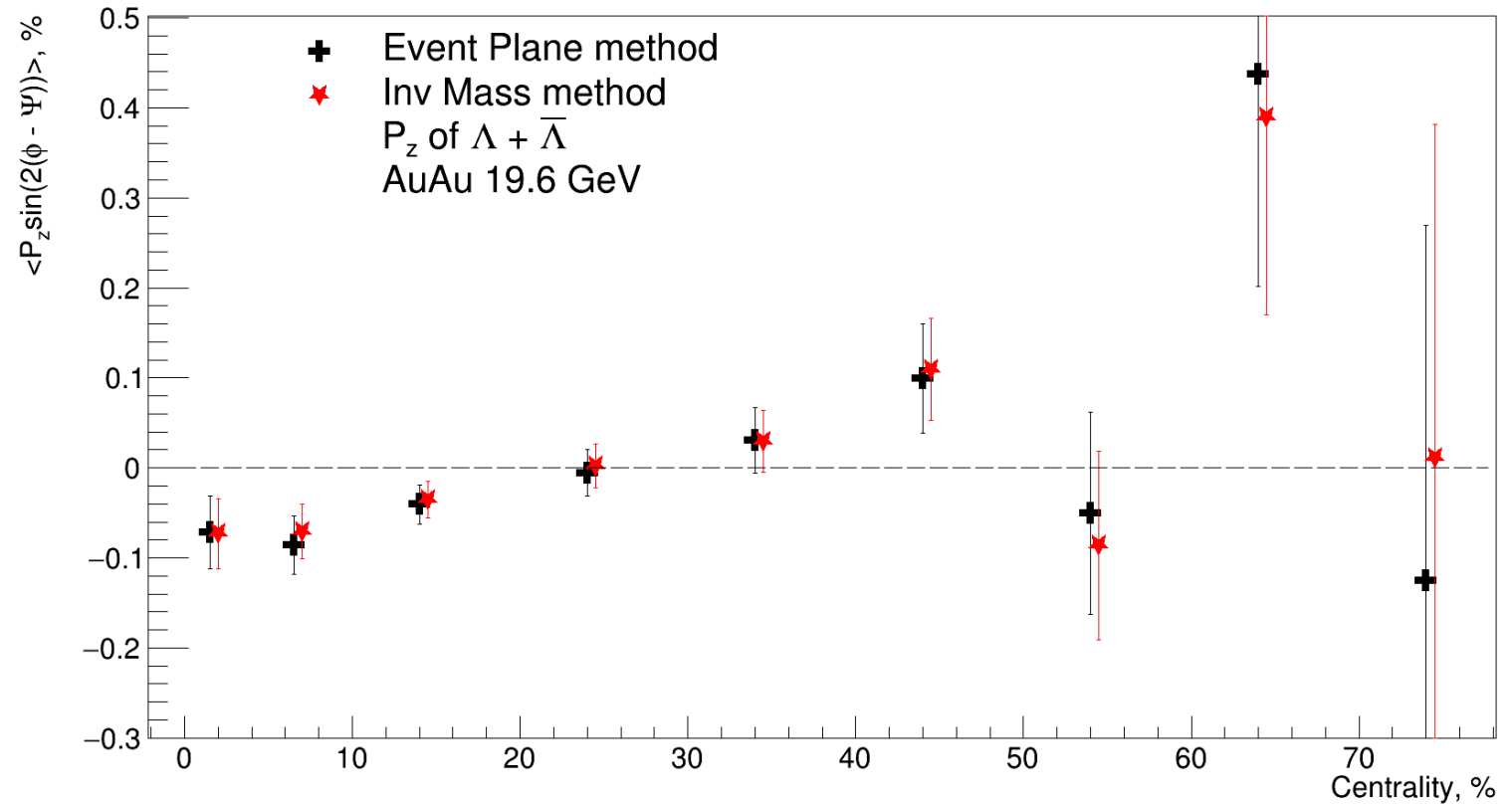
- $\langle P_z \sin(2(\phi - \Psi_2)) \rangle = \frac{\langle \cos\theta_p^* \sin(2(\phi - \Psi_2)) \rangle}{\alpha_H \langle \cos^2 \theta_p^* \rangle}$
- $F(M_{inv}) = \langle \cos\theta_p^* \sin(2(\phi - \Psi_2)) \rangle$ vs Lambda M_{inv} distribution was obtained for each centrality bin
- Fit $F(M_{inv})$ with next function: $F(M_{inv}) = (1 - f^{BG})F^{SG} + f^{BG}F^{BG}$
 $f^{BG} = \frac{BG(M_{inv})}{SG(M_{inv}) + BG(M_{inv})}$, F^{BG} estimates the combinatorial background
- $\langle P_z \sin(2(\phi - \Psi_2)) \rangle = \frac{3}{\alpha_H Res(\Psi_2)} F^{SG}$ is what we are looking for.



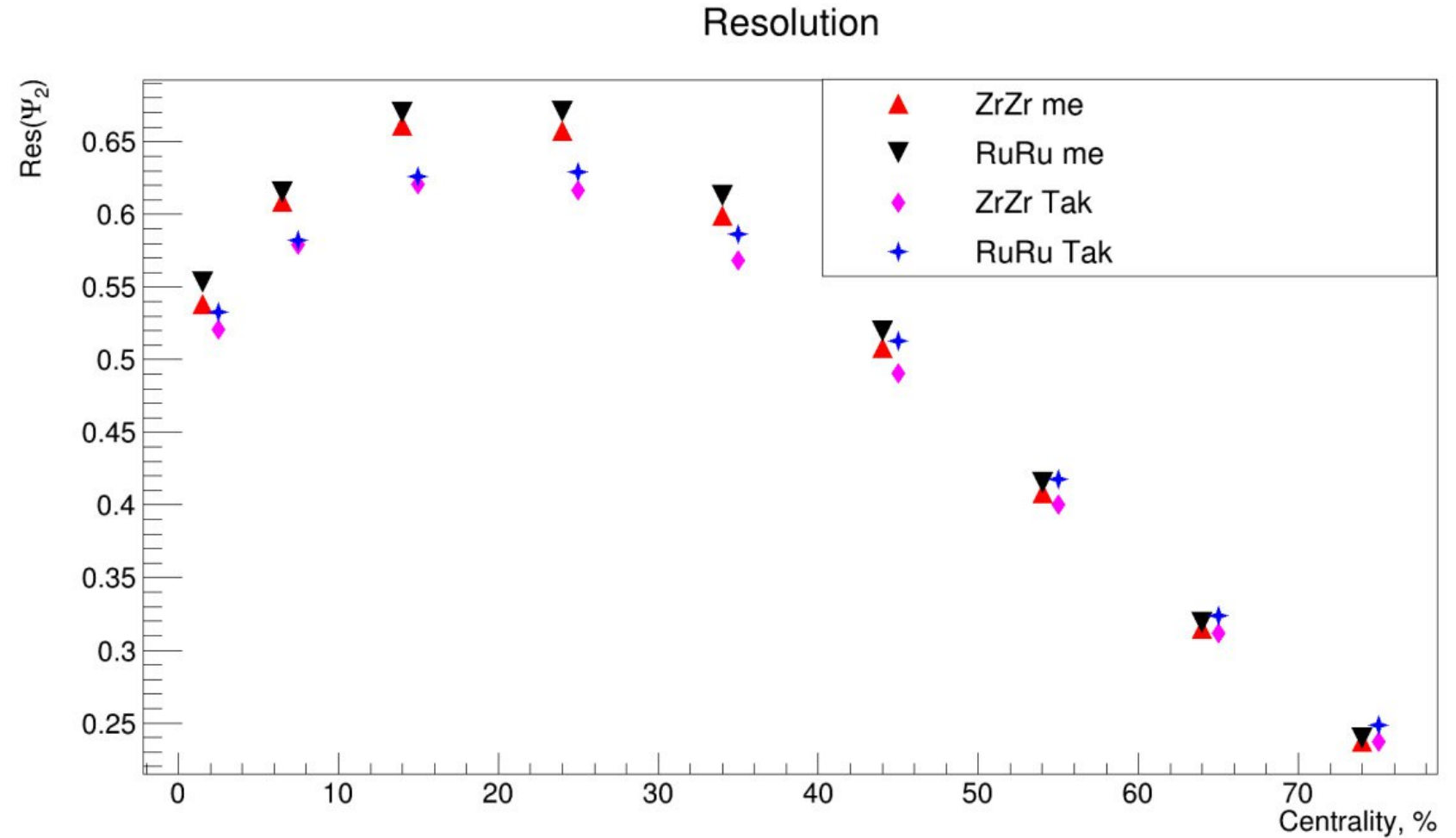
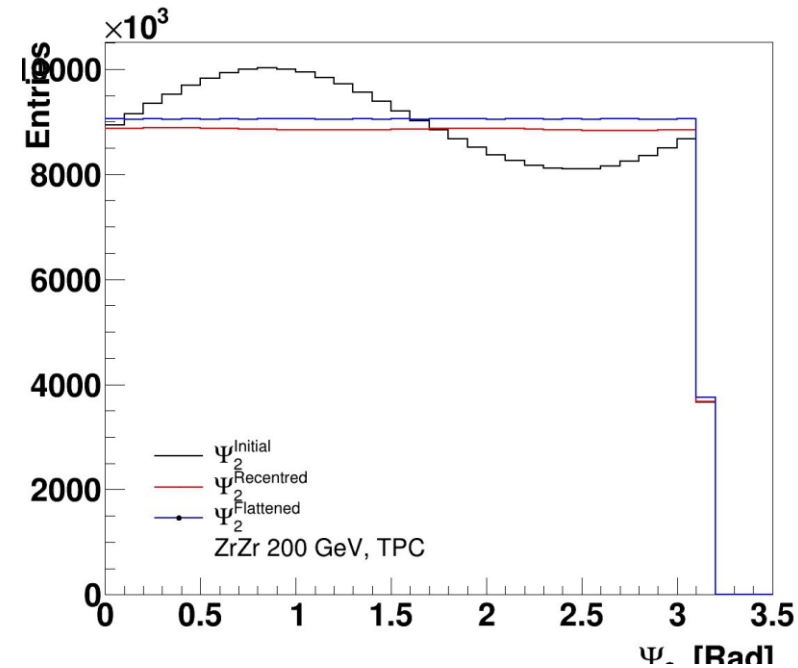
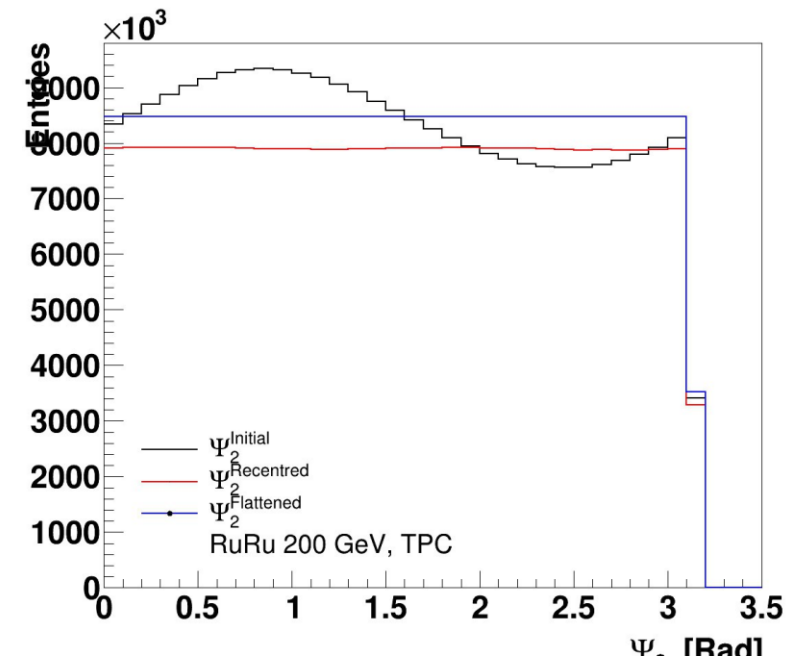
Comparing polarization values extracted via two methods

$\langle P_z \sin(2(\phi - \Psi)) \rangle$ Vs Centrality

- $\langle P_z \sin(2(\phi - \Psi_2)) \rangle$ vs centrality distribution for $\sqrt{s_{NN}} = 19.6$ GeV was obtained with two methods.
- The both methods agree well with each other

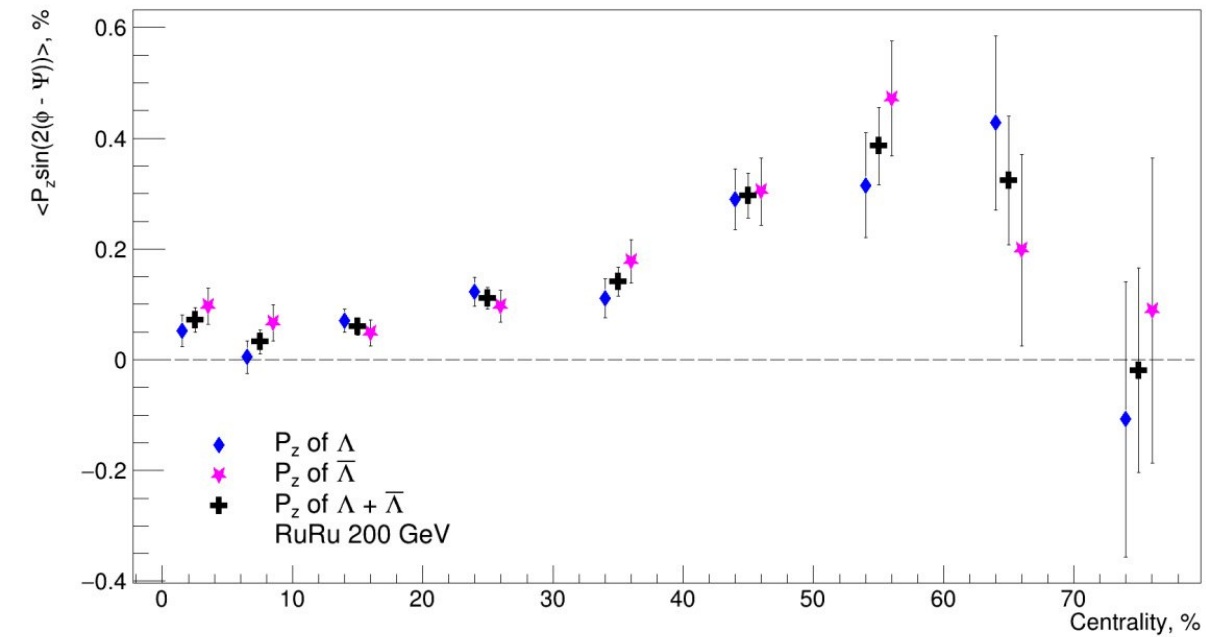


Second order event plane reconstructing for isobars collisions

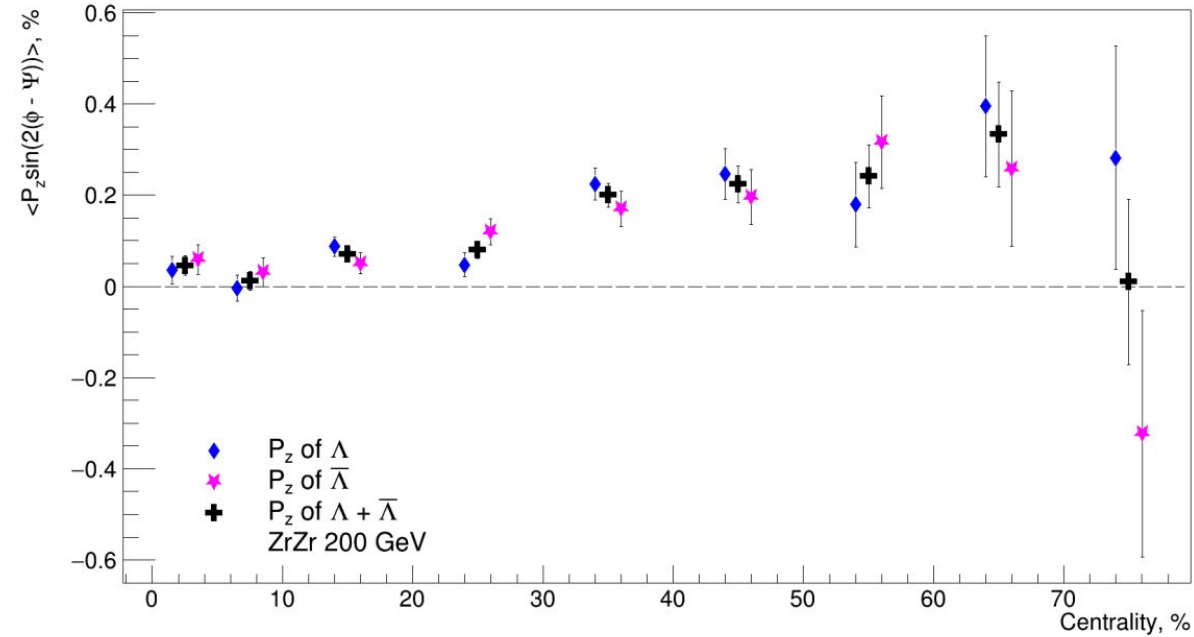


$\langle P_z \sin(2(\phi - \Psi_2)) \rangle$ vs centrality distributions for isobars collisions

$\langle P_z \sin(2(\phi - \Psi)) \rangle$ Vs Centrality

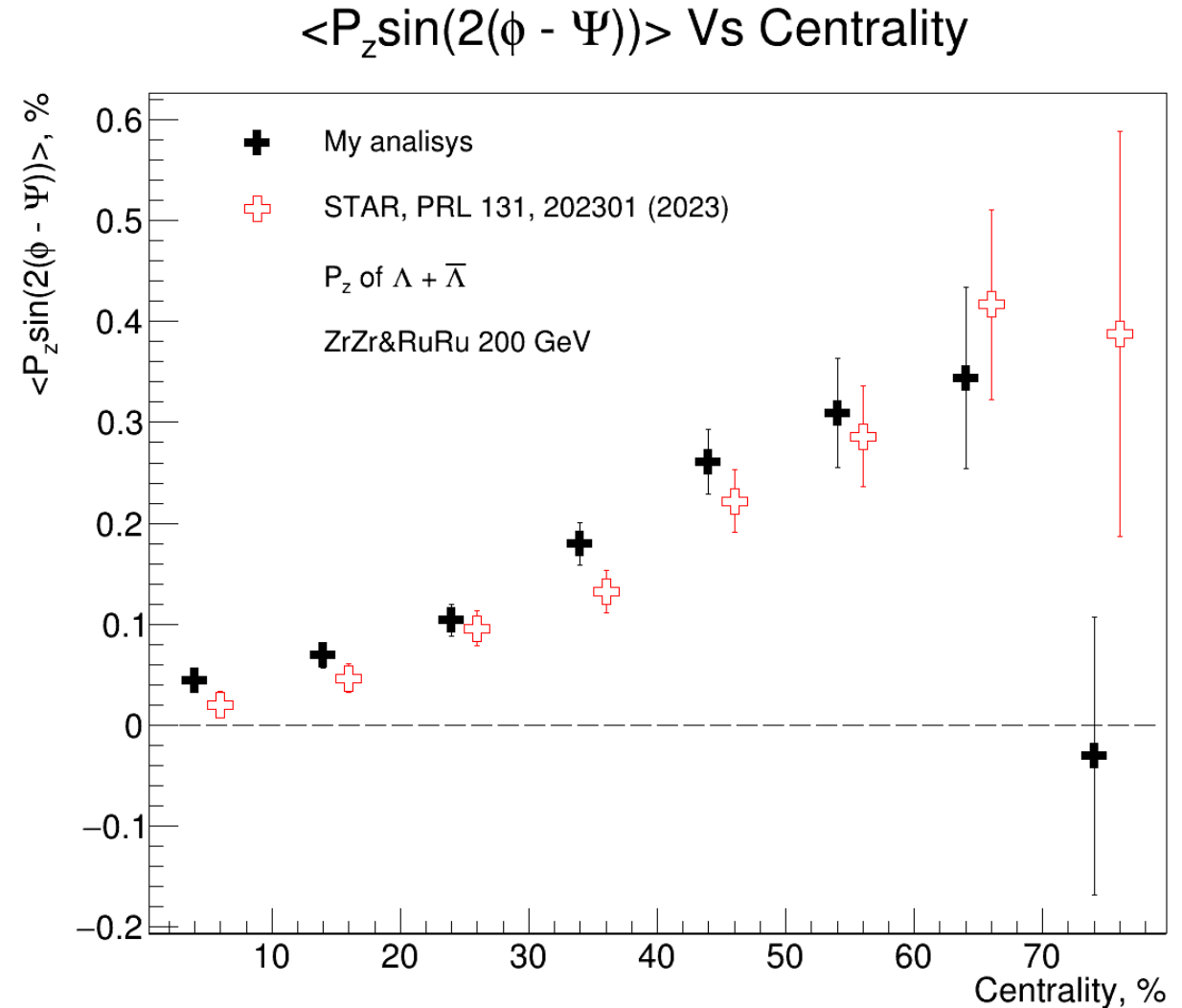


$\langle P_z \sin(2(\phi - \Psi)) \rangle$ Vs Centrality



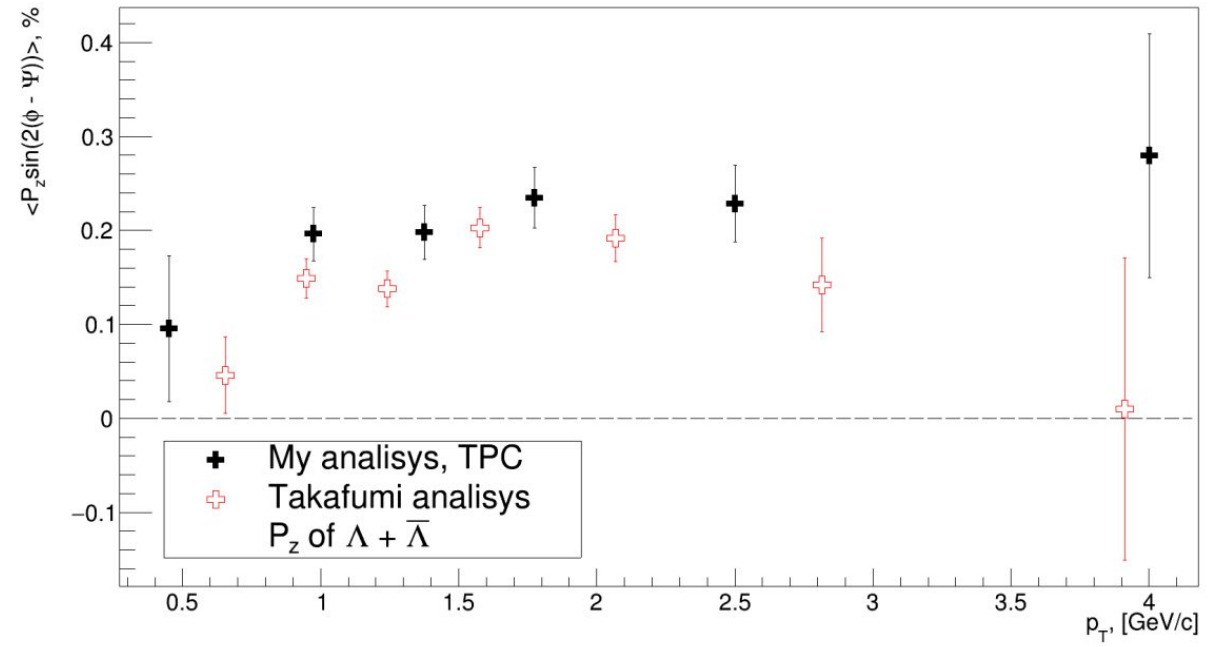
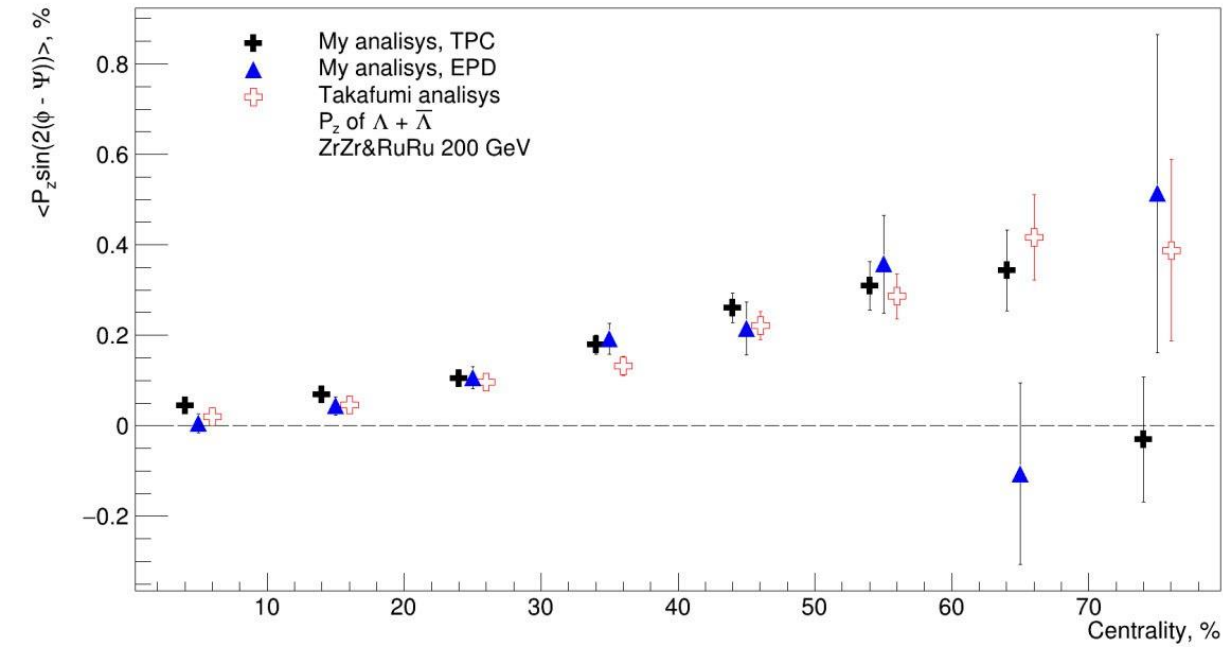
Comparison to previous results: Isobars 200 GeV

1. Same analysis technique as for <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.131.202301>
 - Reaction plane was reconstructed via TPC, used primary tracks with $0.15 \leq p_T \leq 2 \text{ GeV}$, $0.1 \leq |\eta| \leq 1$
 - Λ – hyperons were reconstructed via KFParticle with track cuts: $0.15 \leq p_T \leq 10 \text{ GeV}$, $|\eta| \leq 1$
 - For polarization extraction Event Plane method was used
2. Results
 - $\langle P_z \sin(2(\phi - \Psi_2)) \rangle$ vs centrality distribution was obtained for isobars collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200 \text{ GeV}$.
 - The results agree well with published results



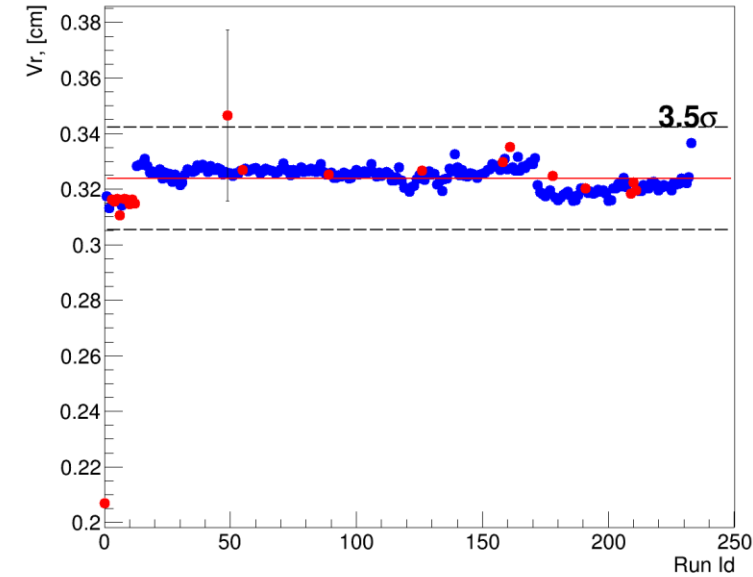
Comparing isobars results with another analysis

$\langle P_z \sin(2(\phi - \Psi)) \rangle$ Vs Centrality

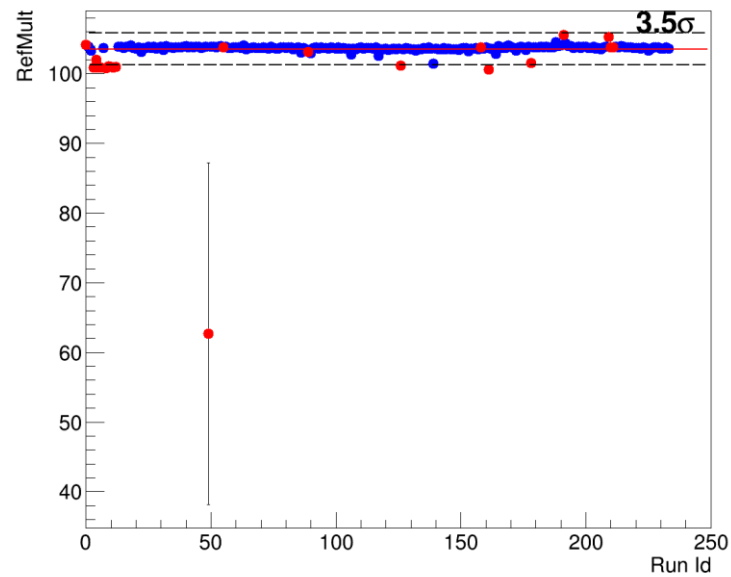


QA for 17.3 GeV data set by events

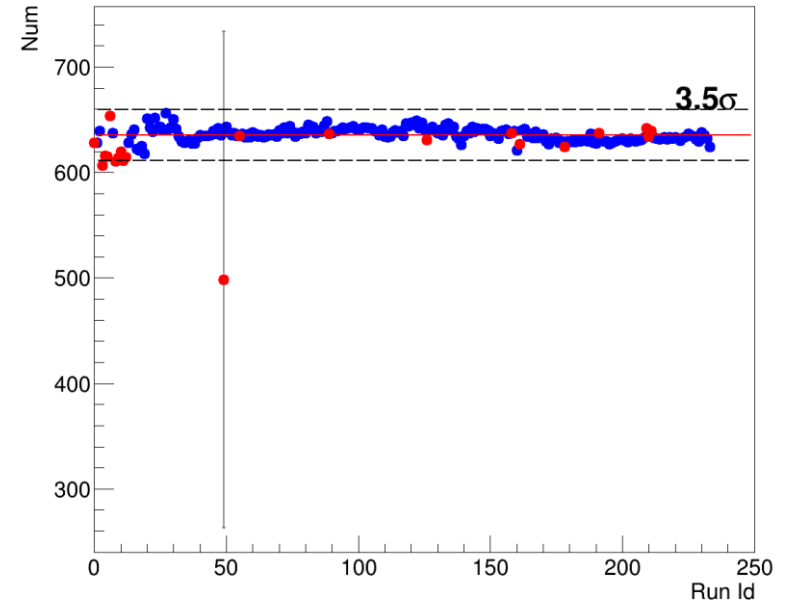
Vr vs RunId



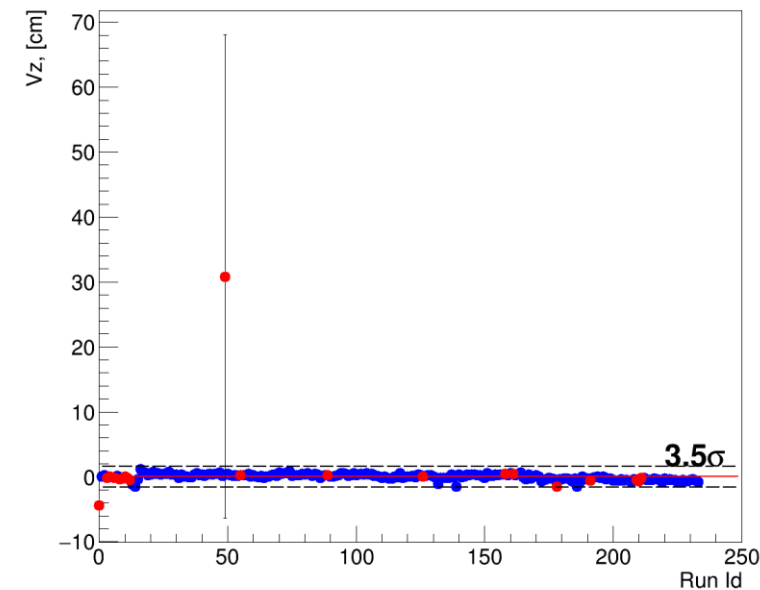
RefMult vs RunId



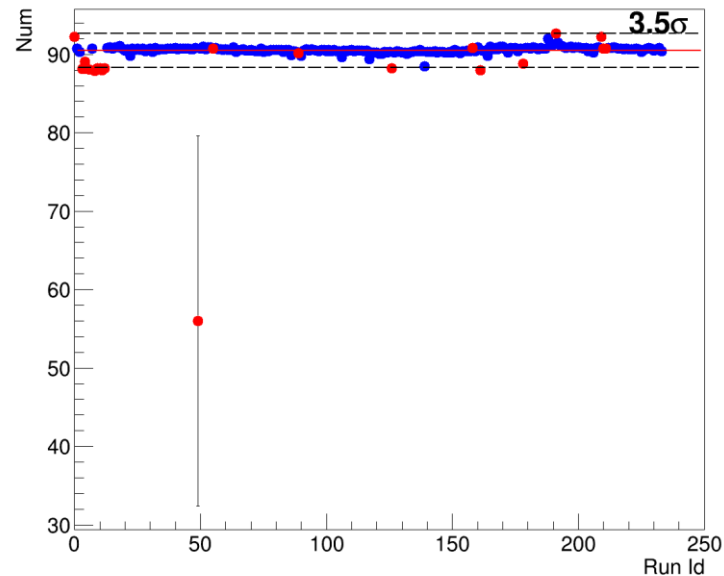
Number of global tracks vs RunId



Vz vs RunId



Number of ToF match tracks vs RunId

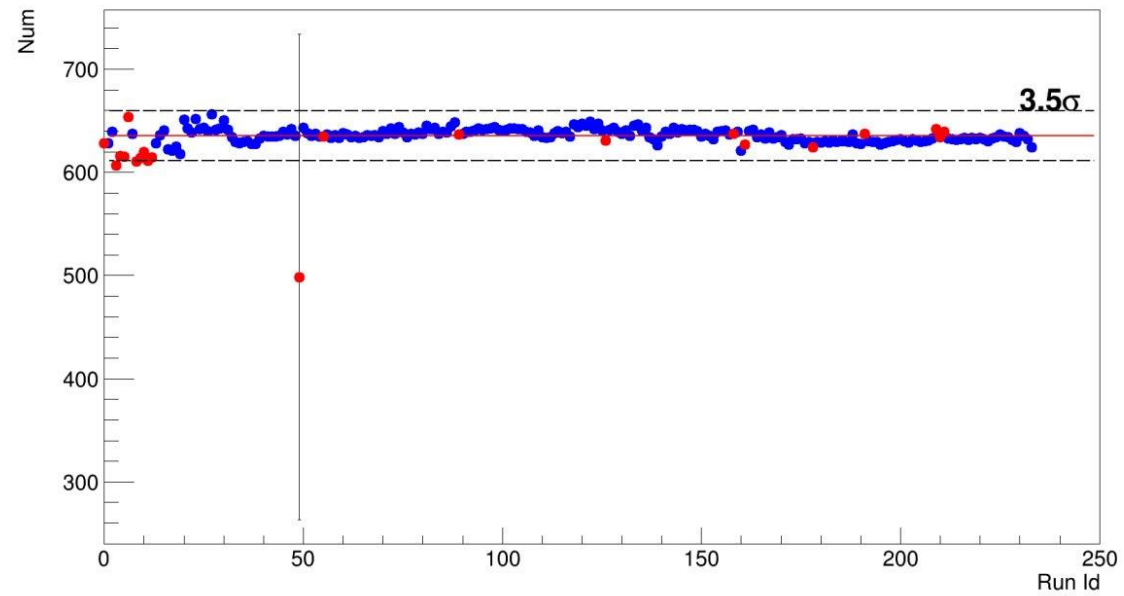


Bad run list by events analysis:

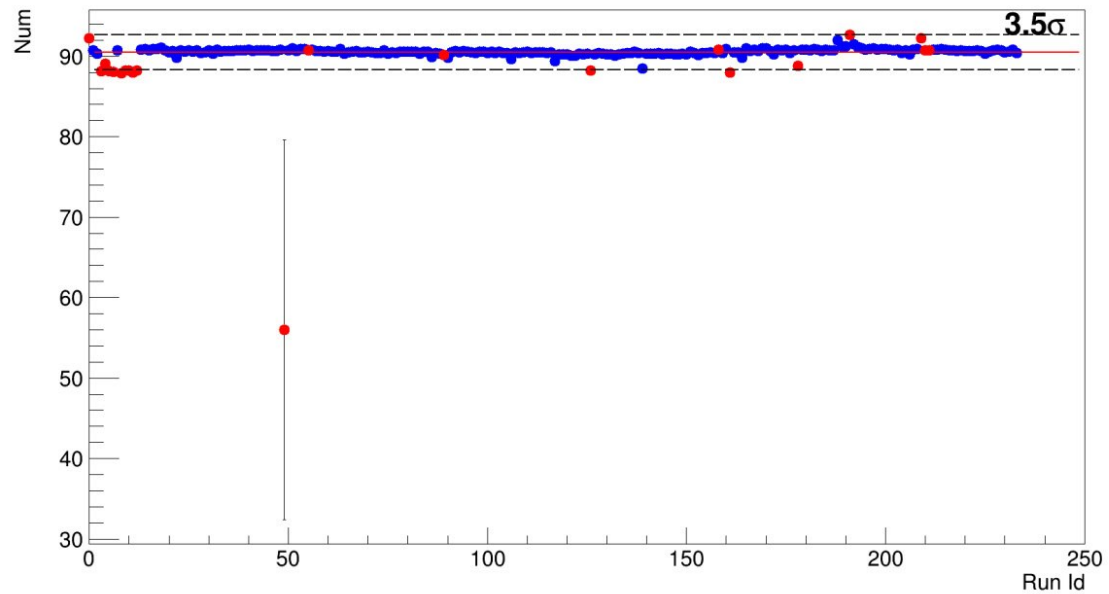
22145028,	22145045,	22146001,
22146002,	22146007,	22146008,
22146009,	22146010,	22146012,
22149016,	22150023,	22155004,
22155007,	22156034,	22157021,
22157023,	22157025	

QA for 17.3 GeV data set by events

Number of global tracks vs RunId

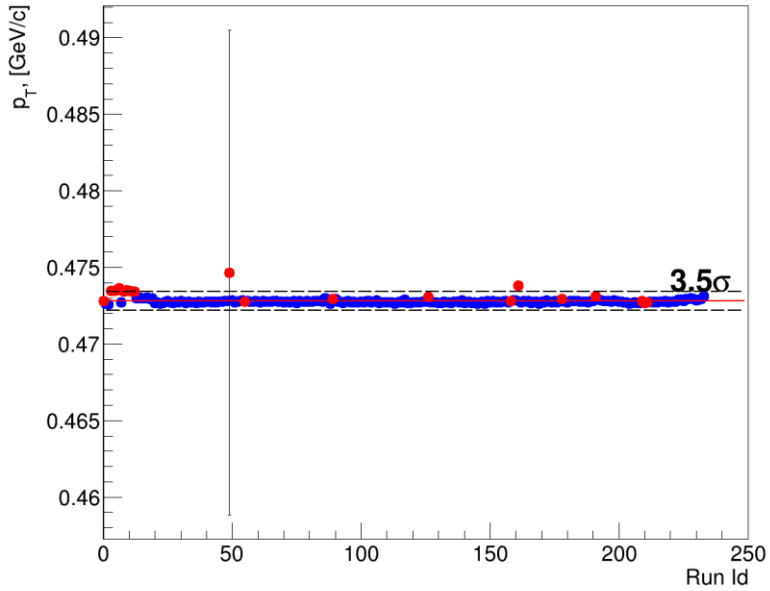


Number of ToF match tracks vs RunId

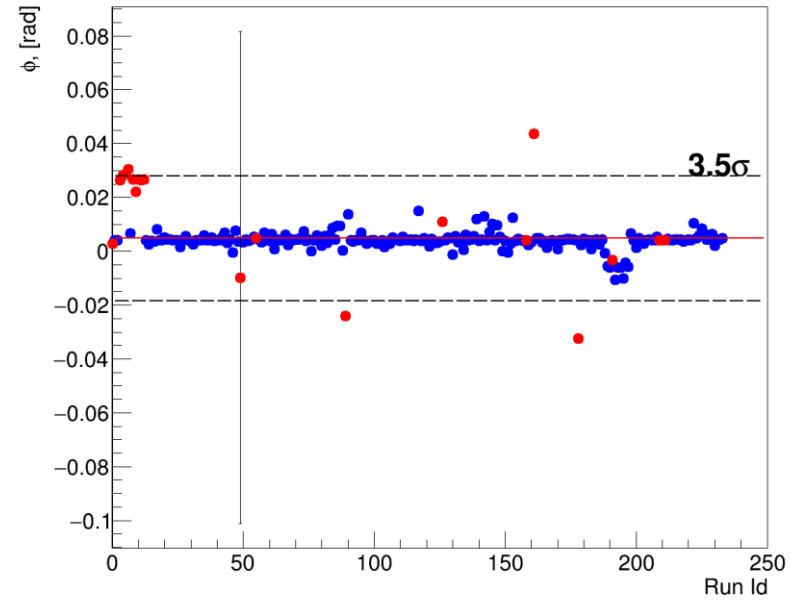


QA for 17.3 GeV data set by tracks

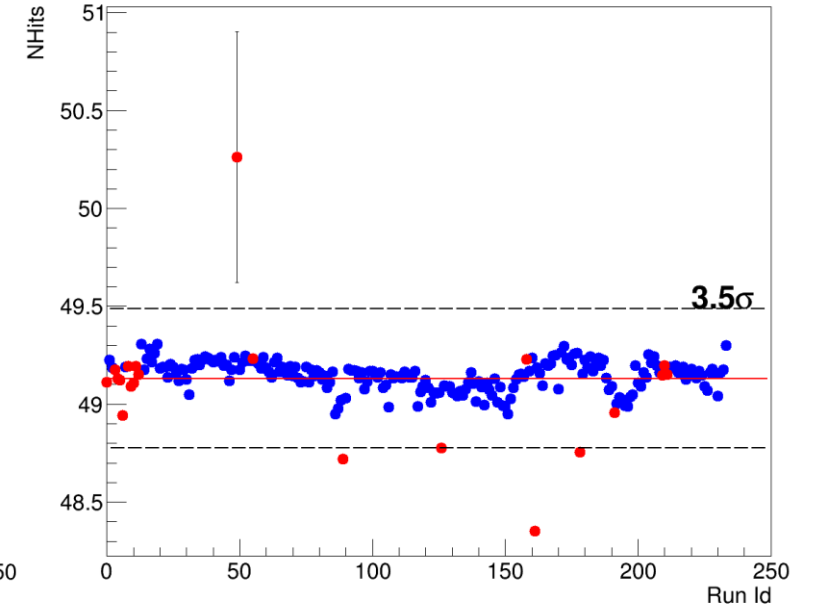
pT vs RunId



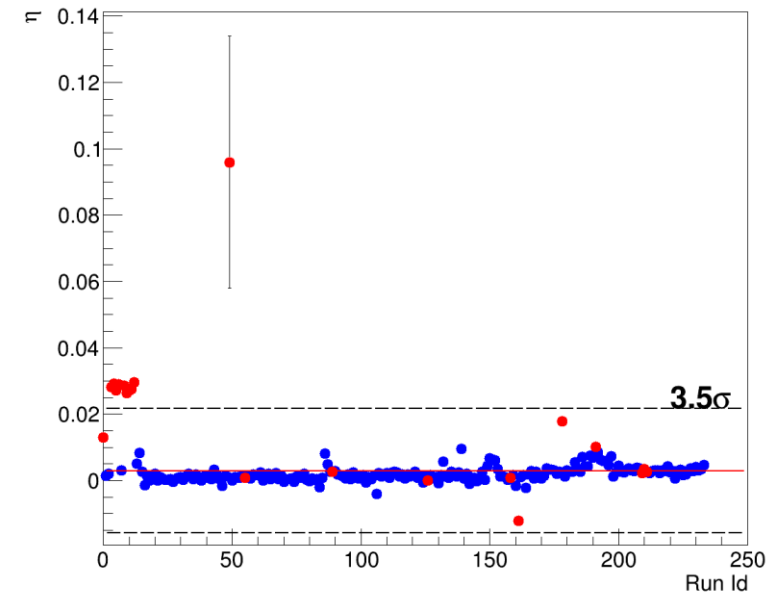
phi vs RunId



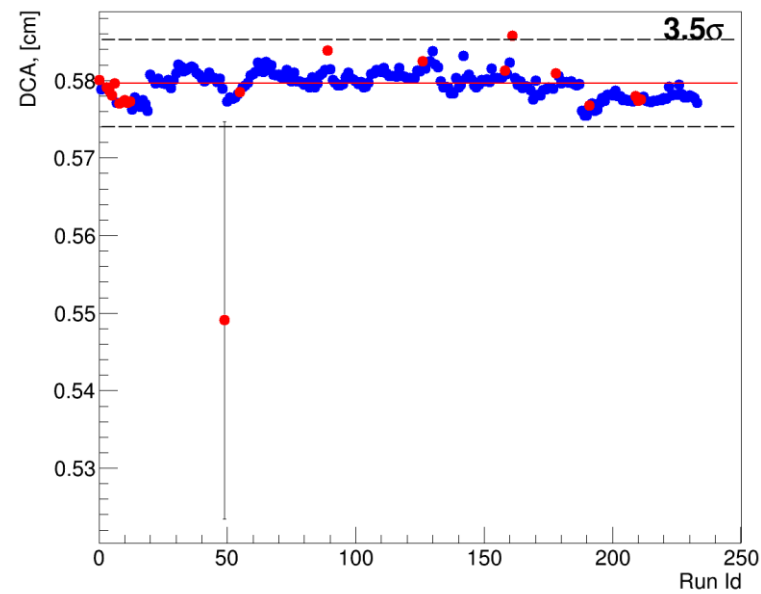
NHits vs RunId



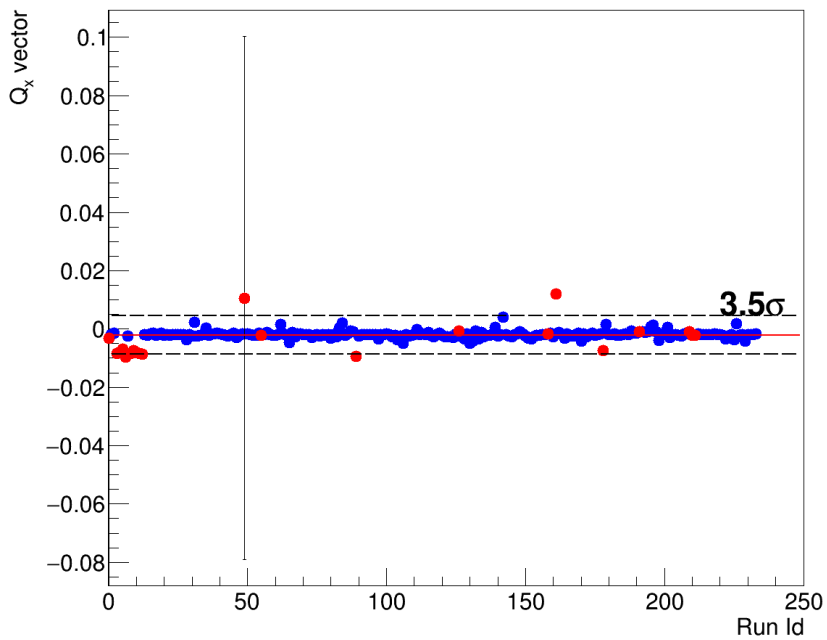
η vs RunId



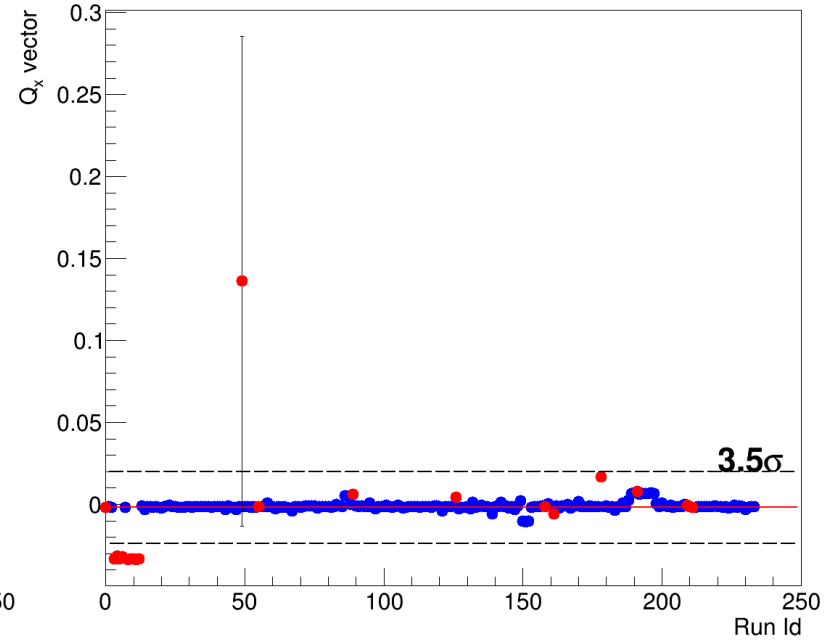
DCA vs RunId



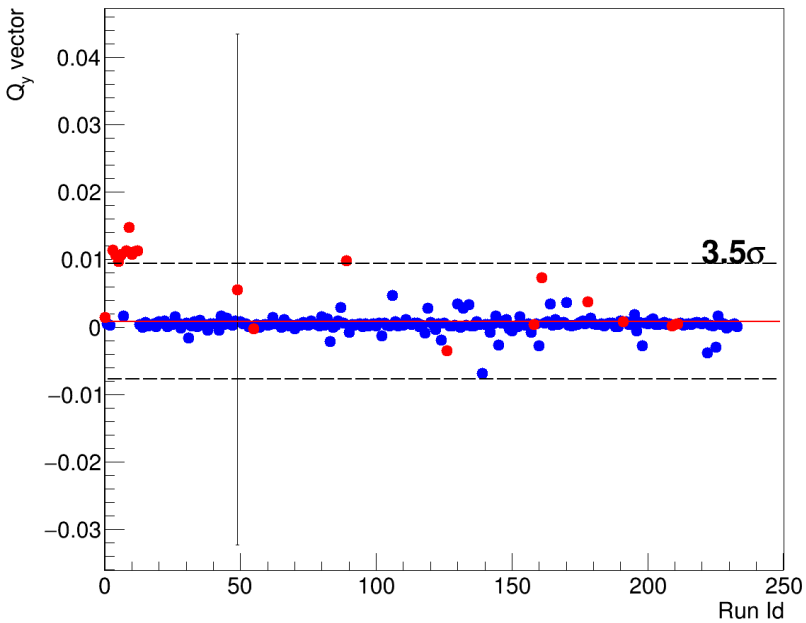
Qx_West_TPC vs RunId



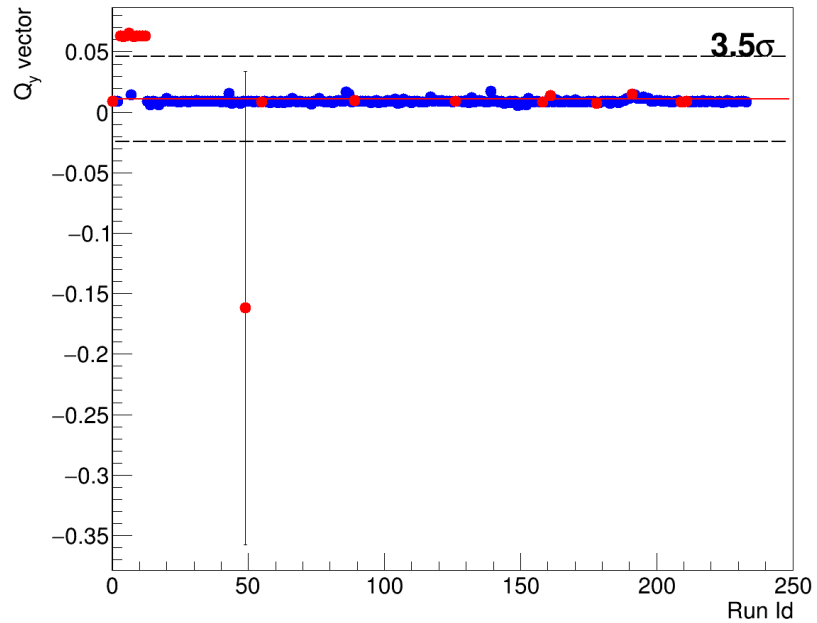
Qx_East_TPC vs RunId



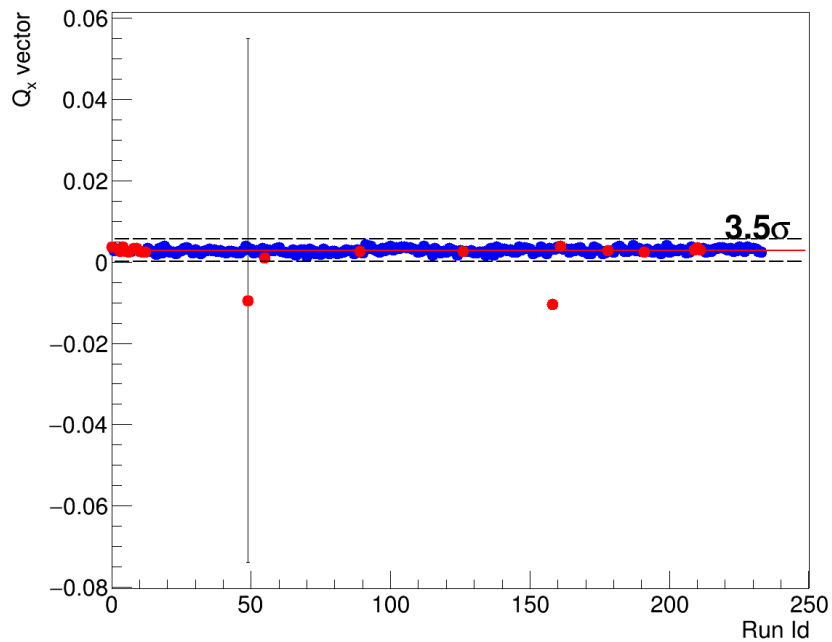
Qy_West_TPC vs RunId



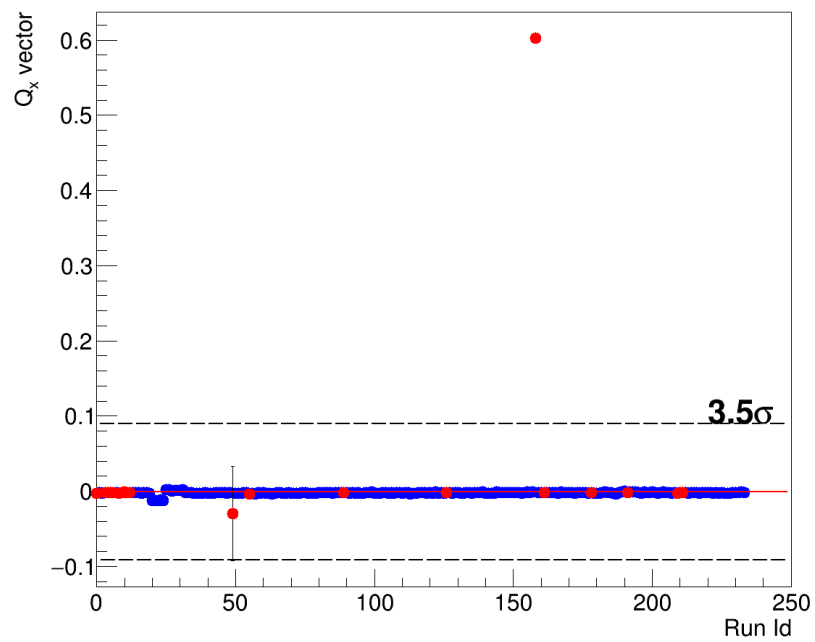
Qy_East_TPC vs RunId



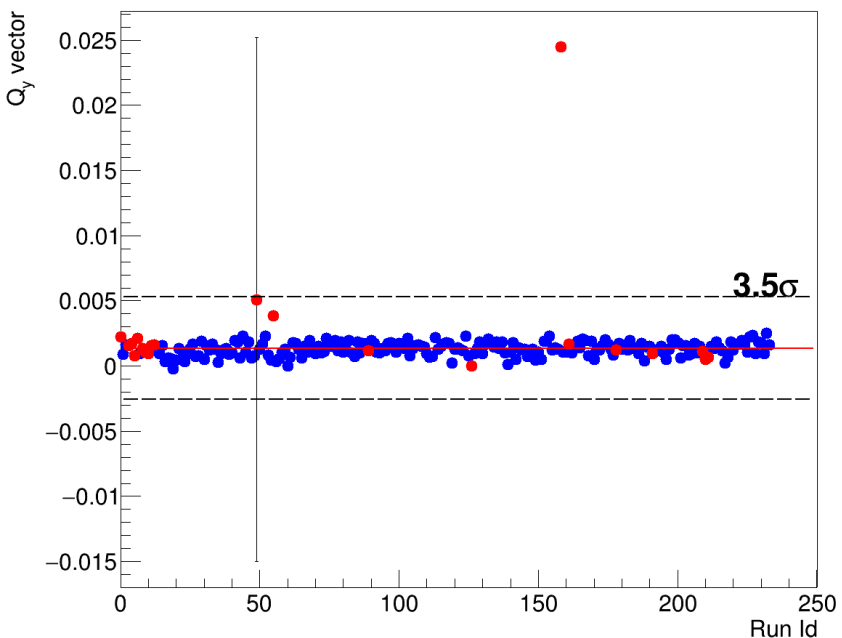
Qx_East_EPD vs RunId



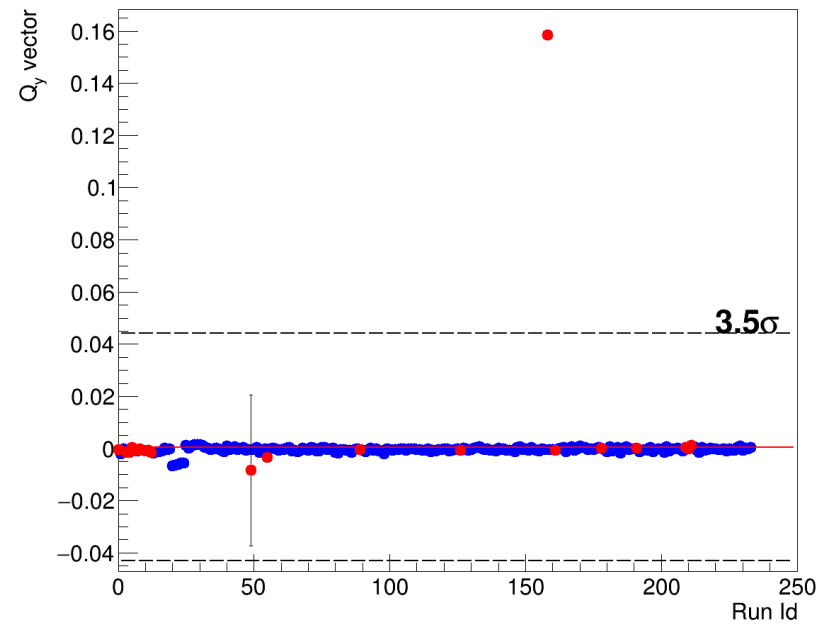
Qx_West_EPD vs RunId



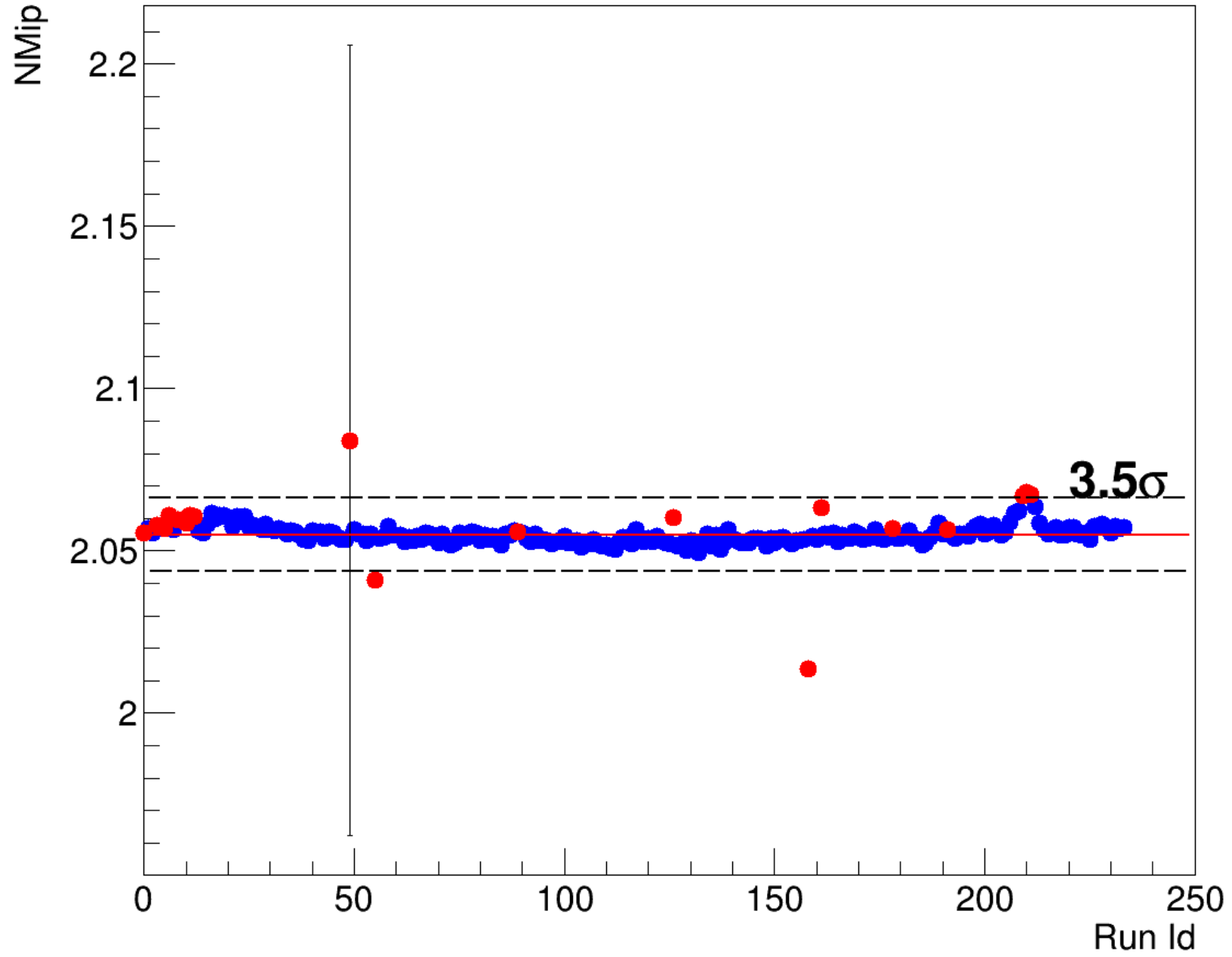
Qy_East_EPD vs RunId



Qy_West_EPD vs RunId

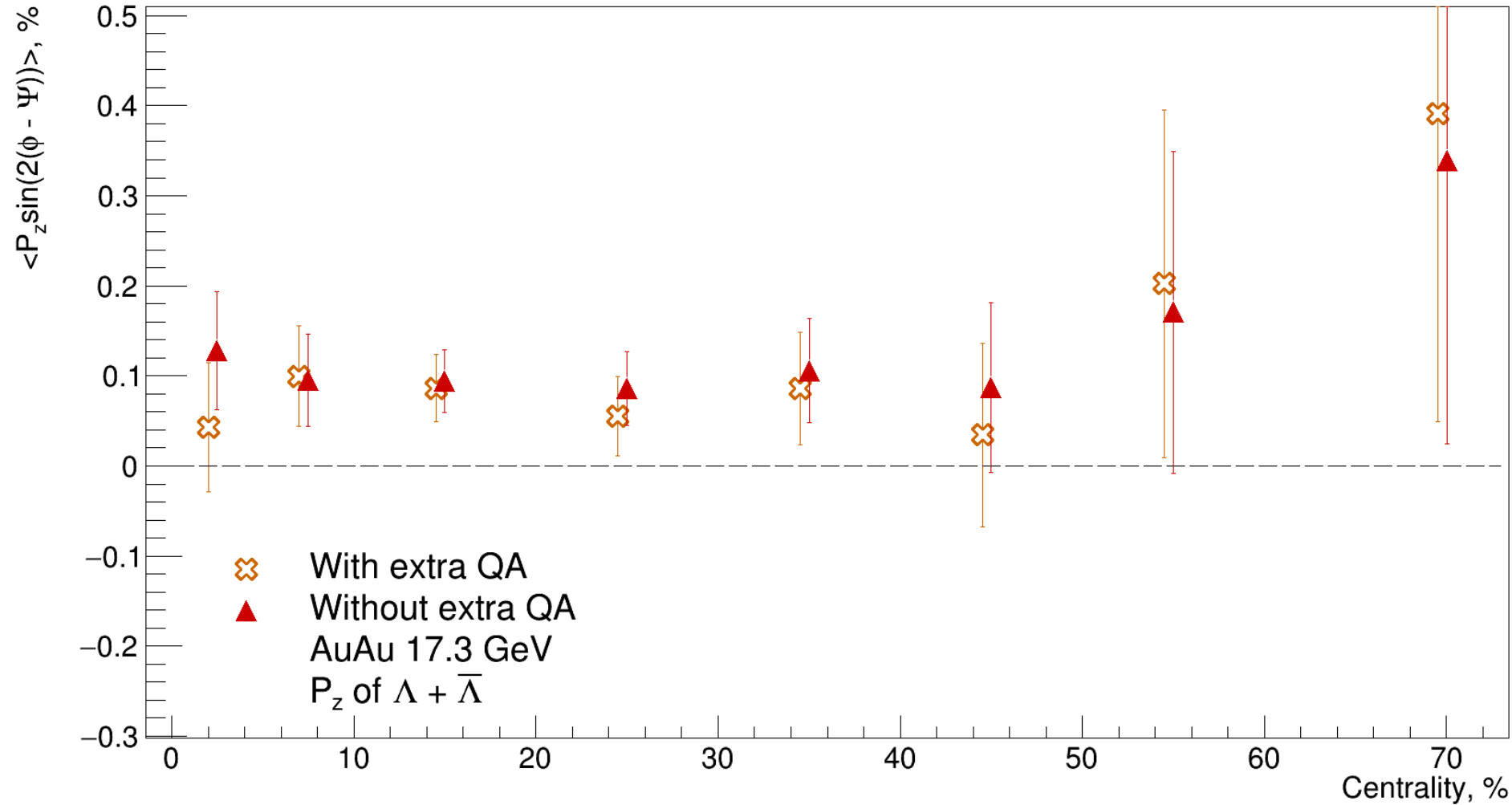


NMip vs RunId

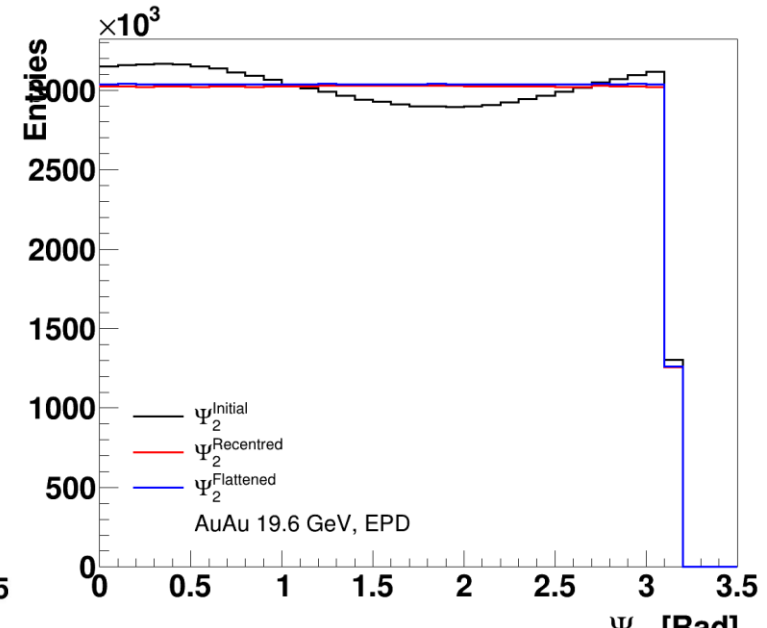
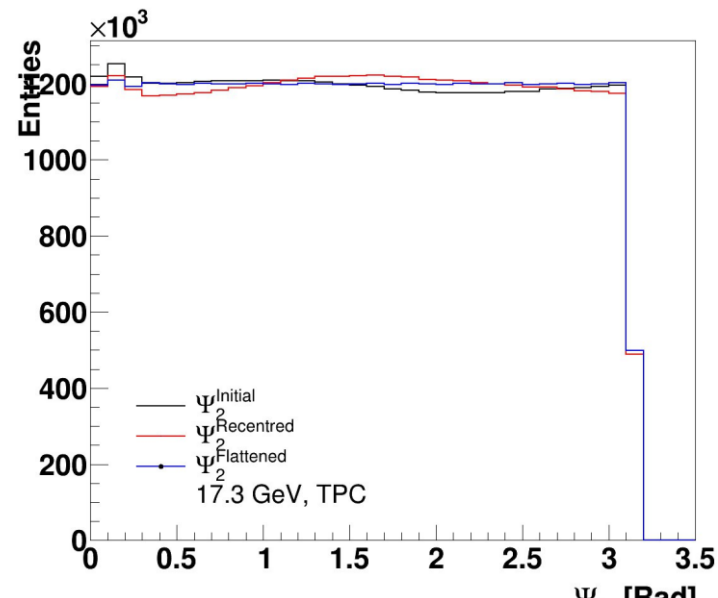
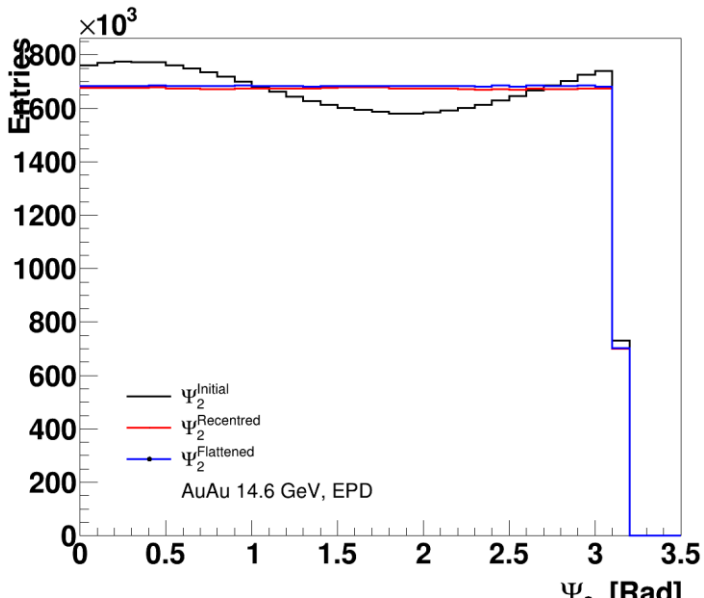
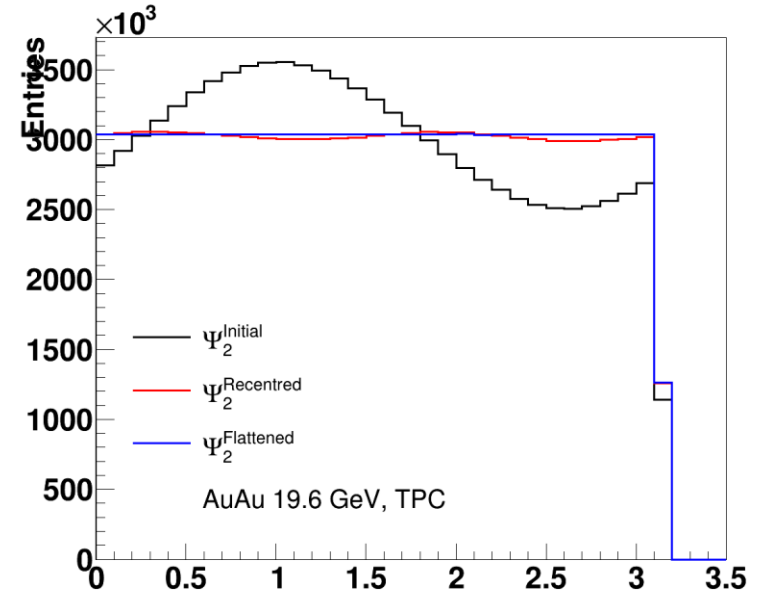
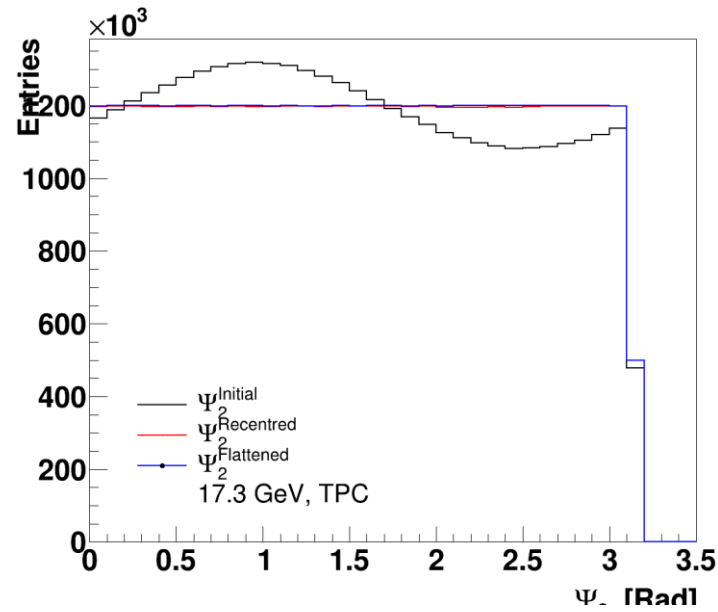
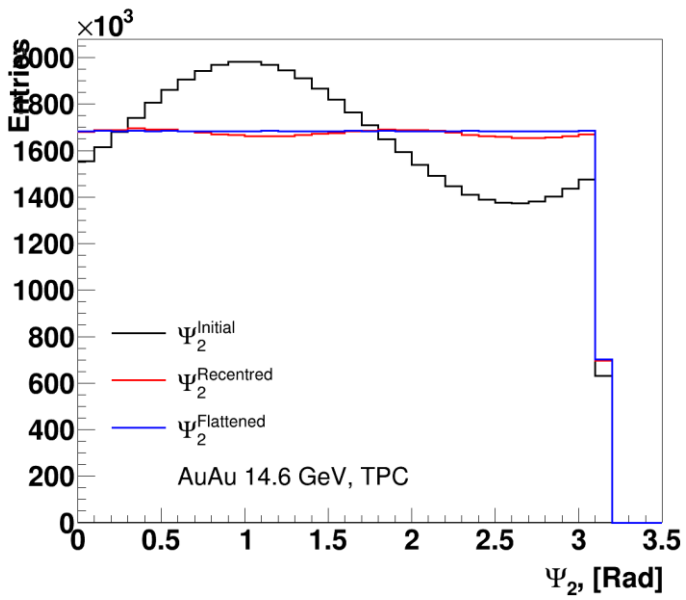


Comparison P_z value with extra QA for 17.3 GeV data set to without

$\langle P_z \sin(2(\phi - \Psi)) \rangle$ Vs Centrality

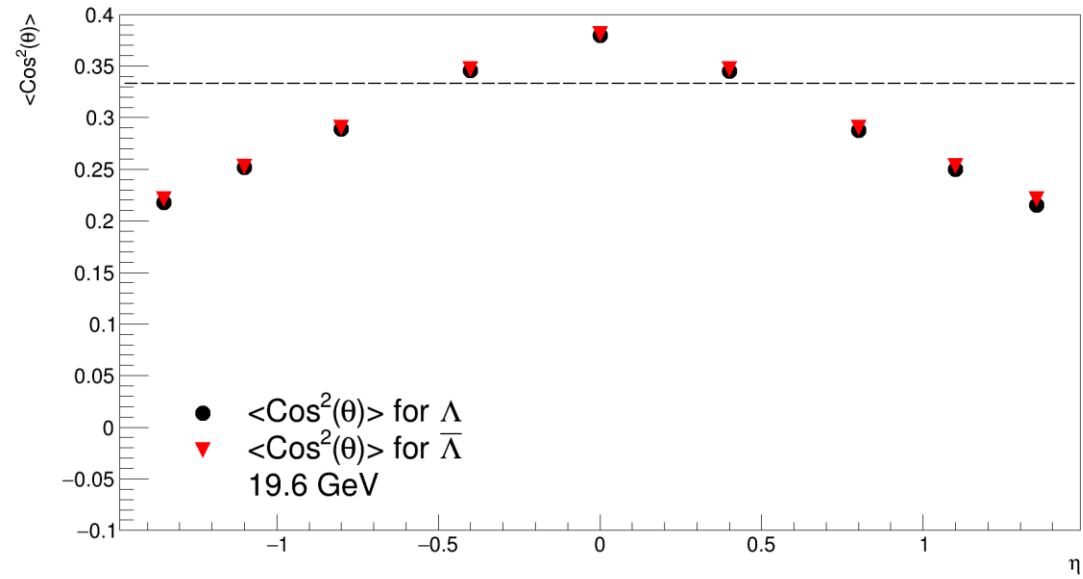


Event plane angle distributions reconstructed by EPD and TPC for 14.6, 17.3 and 19.6 GeV

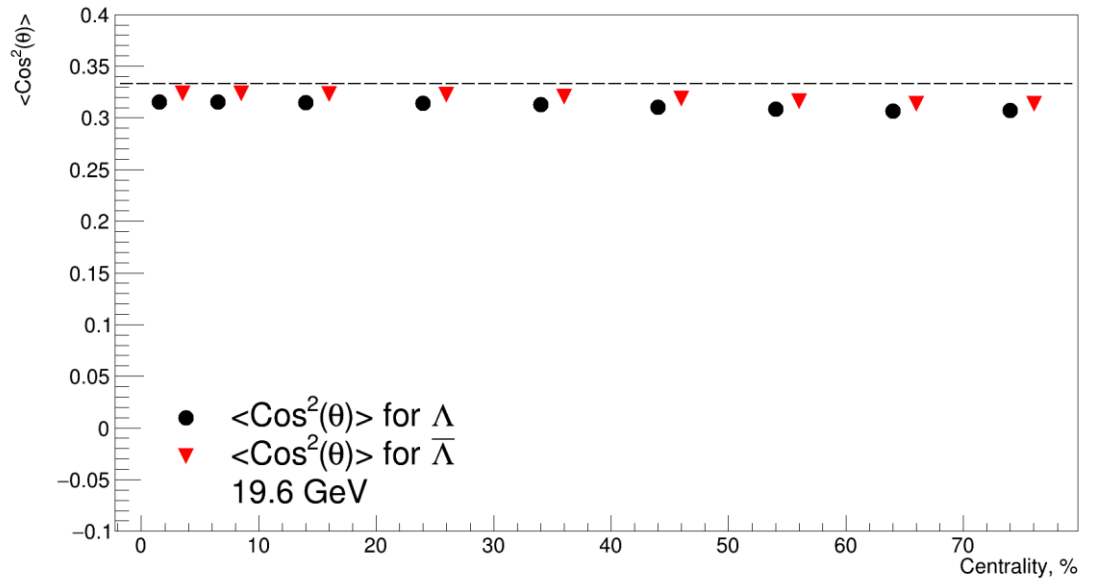


$\langle \cos^2 \theta_p^* \rangle$ vs centrality, p_T , η distributions for 19.6 GeV.

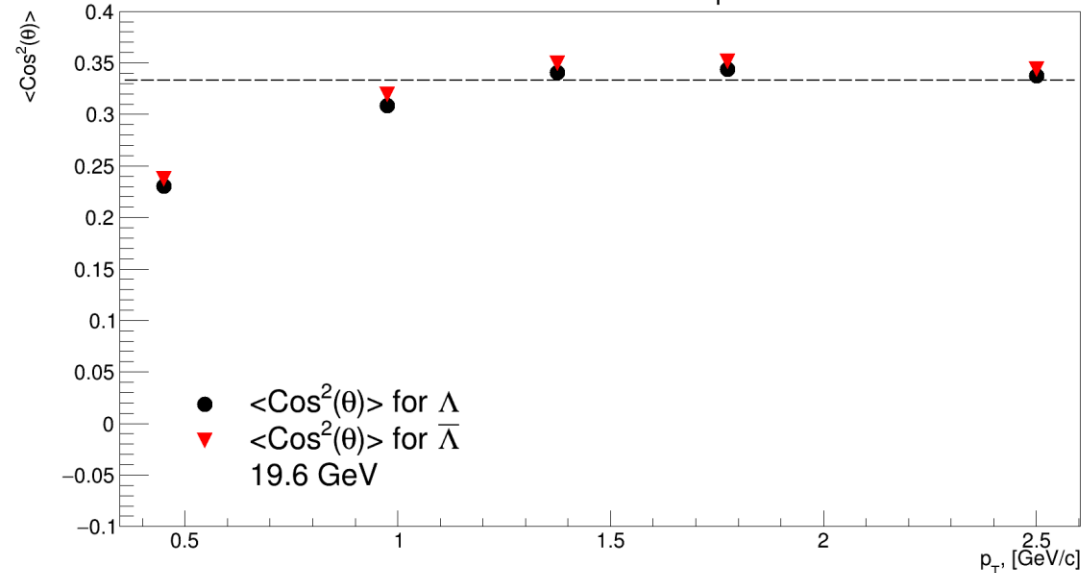
$\langle \text{Cos}^2(\theta) \rangle$ Vs pseudorapidity



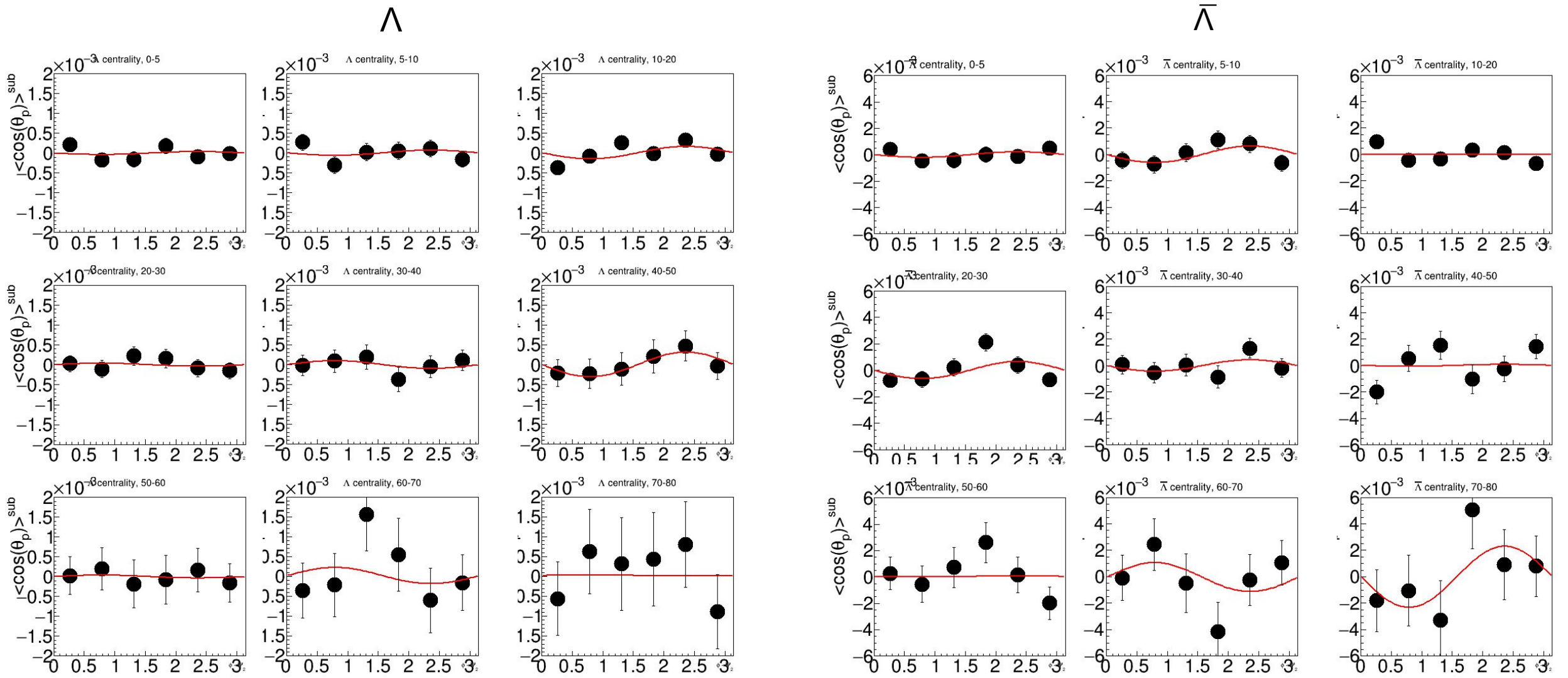
$\langle \text{Cos}^2(\theta) \rangle$ Vs centrality



$\langle \text{Cos}^2(\theta) \rangle$ Vs p_T



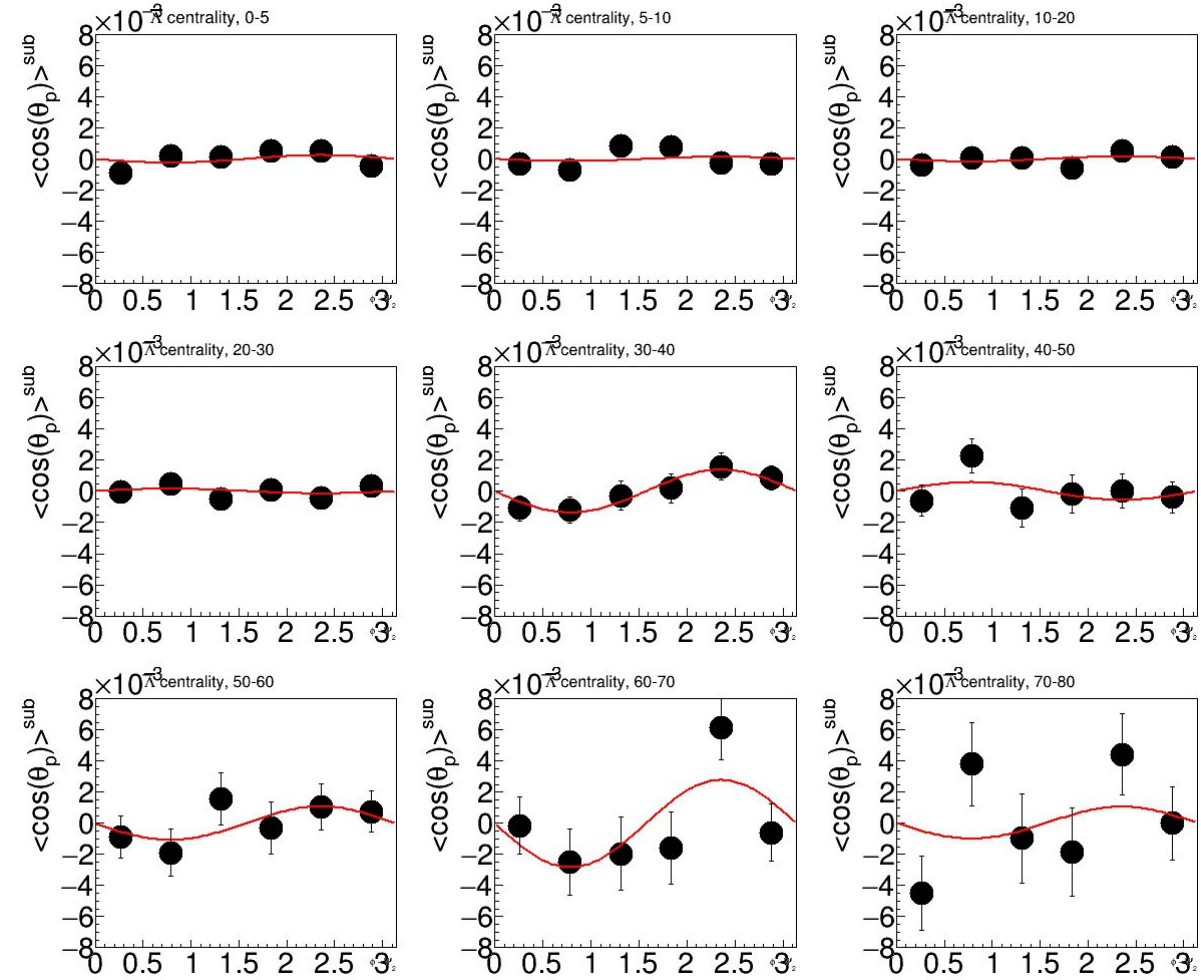
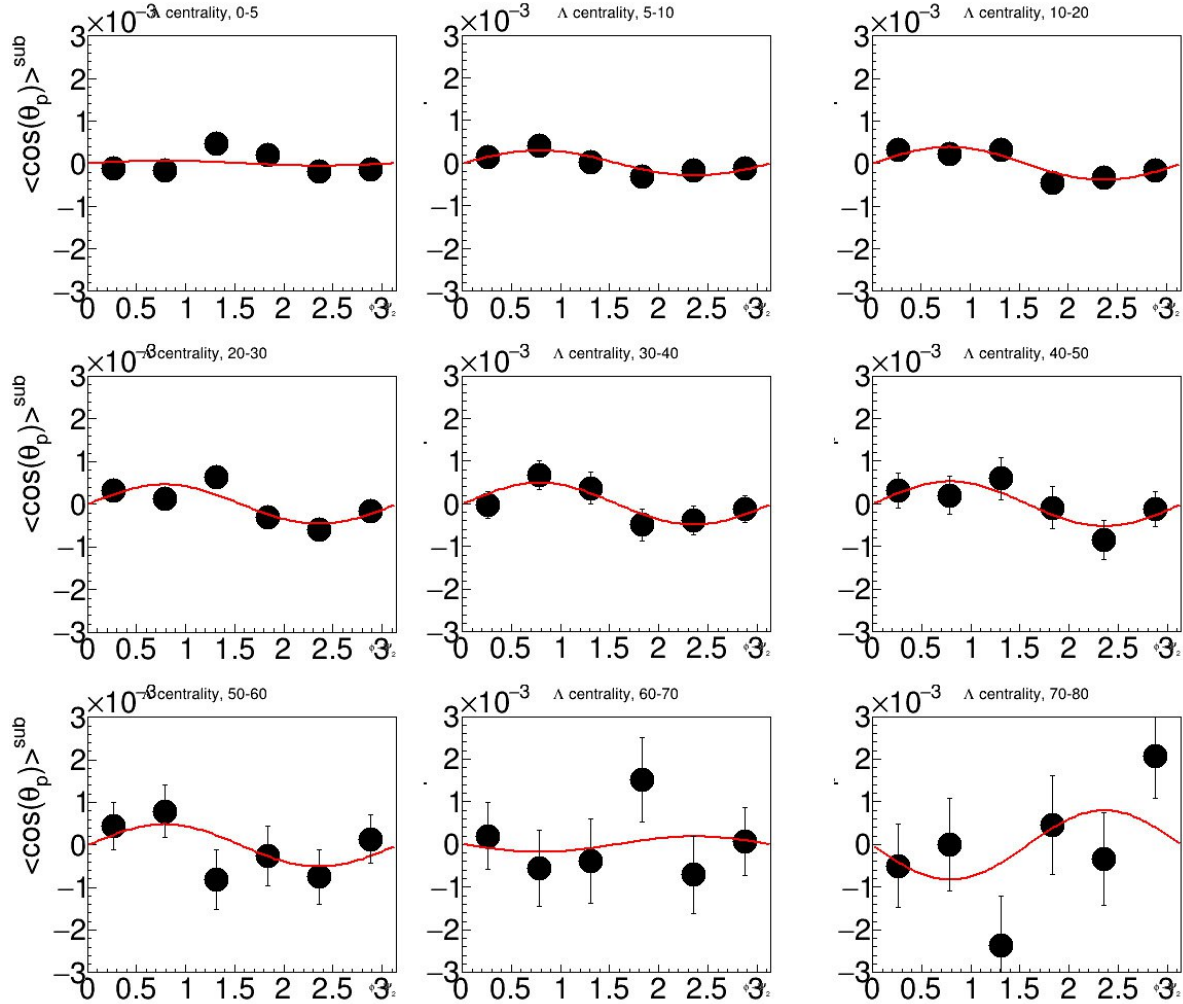
$\langle \cos\theta_p^* \rangle$ vs $\phi - \Psi_2$ distributions for each centrality bin for 14.6 GeV.



$\langle \cos\theta_p^* \rangle$ vs $\phi - \Psi_2$ distributions for each centrality bin for 17.3 GeV.

Λ

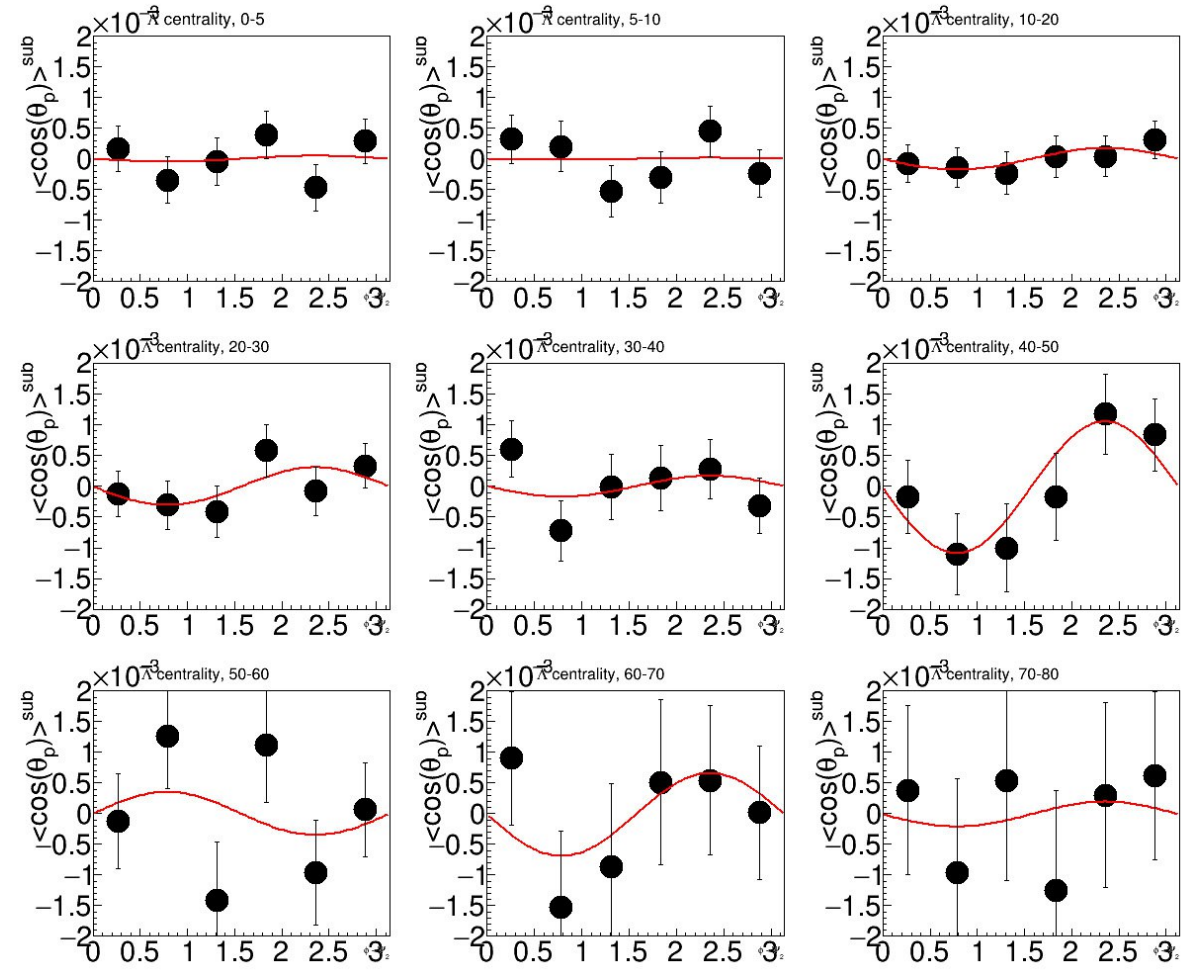
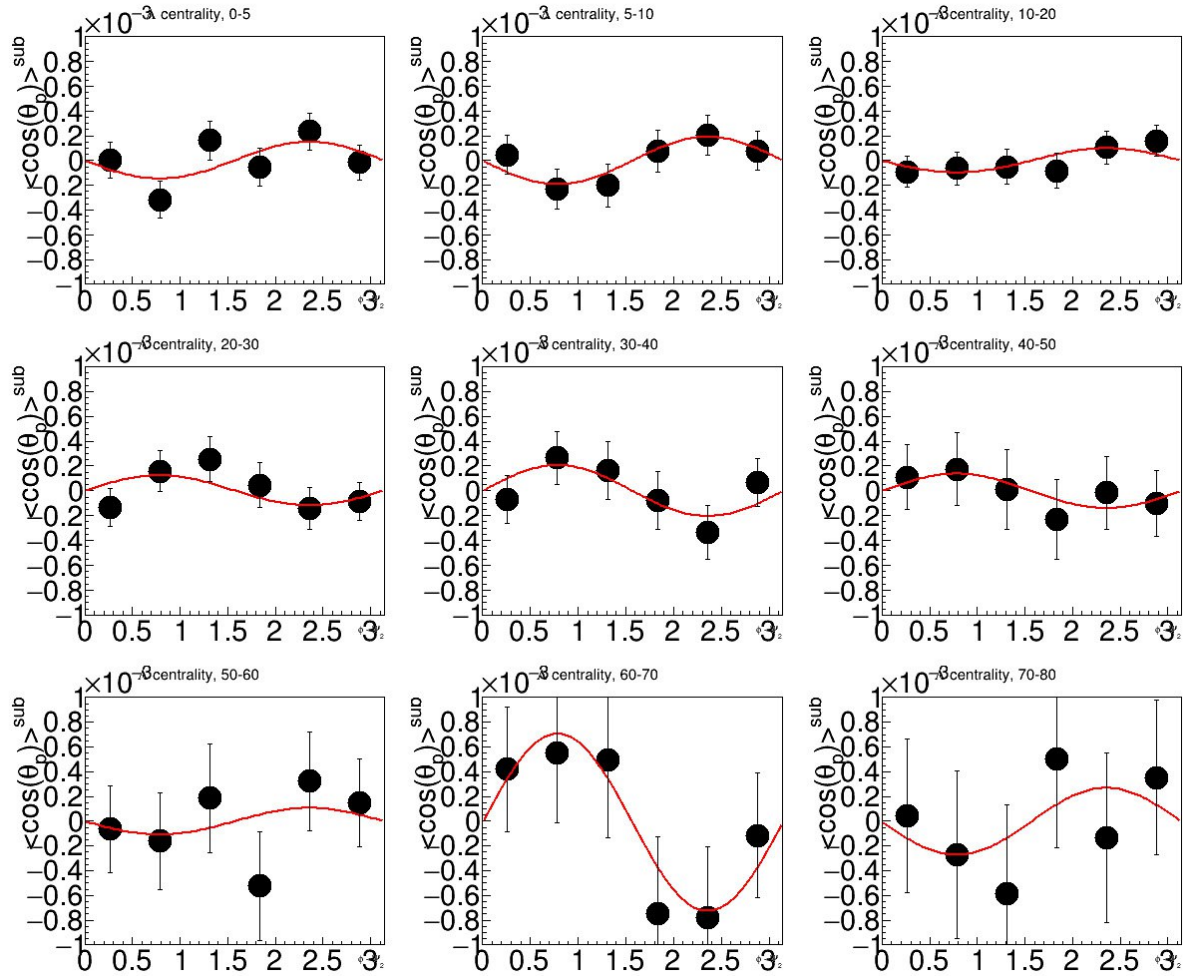
$\bar{\Lambda}$



$\langle \cos\theta_p^* \rangle$ vs $\phi - \Psi_2$ distributions for each centrality bin for 19.6 GeV.

Λ

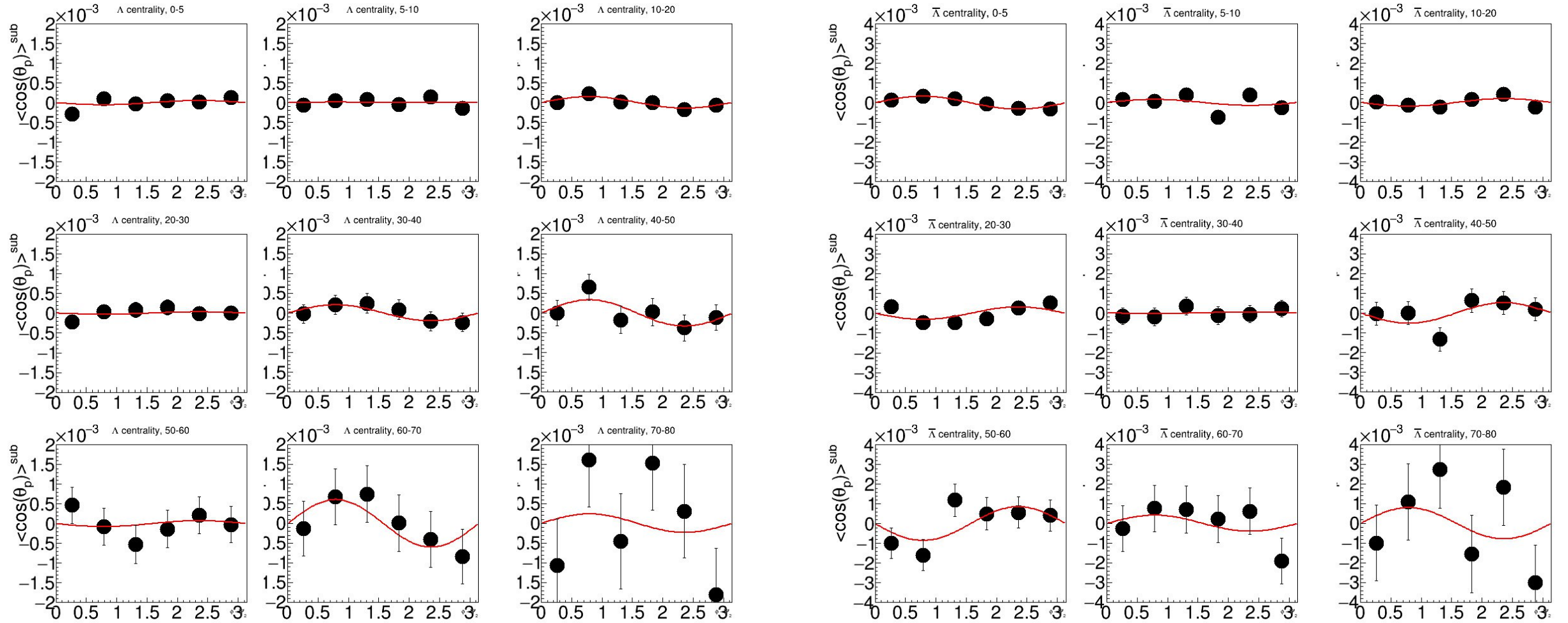
$\bar{\Lambda}$



$\langle \cos\theta_p^* \rangle$ vs $\phi - \Psi_2$ distributions for each centrality bin for 27 GeV.

Λ

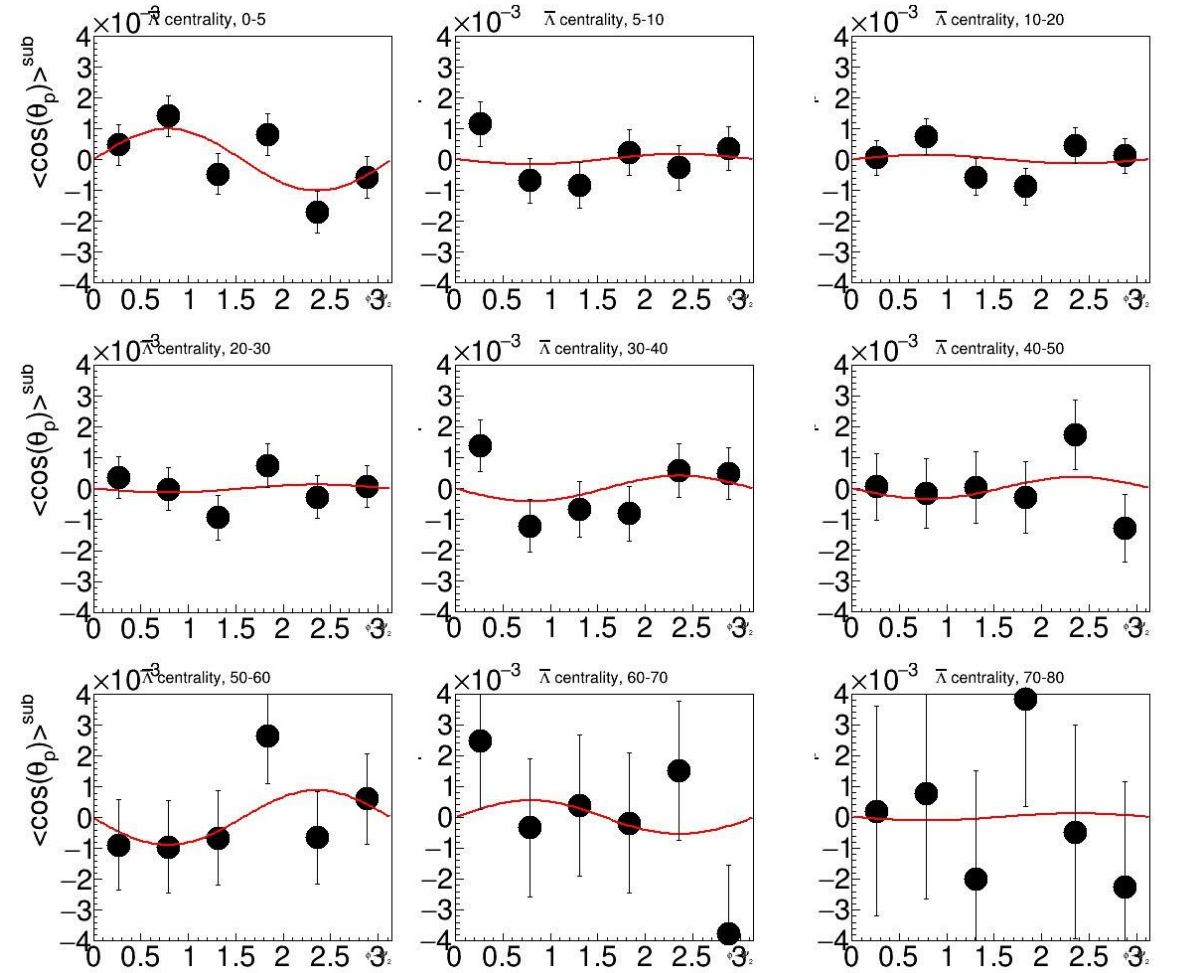
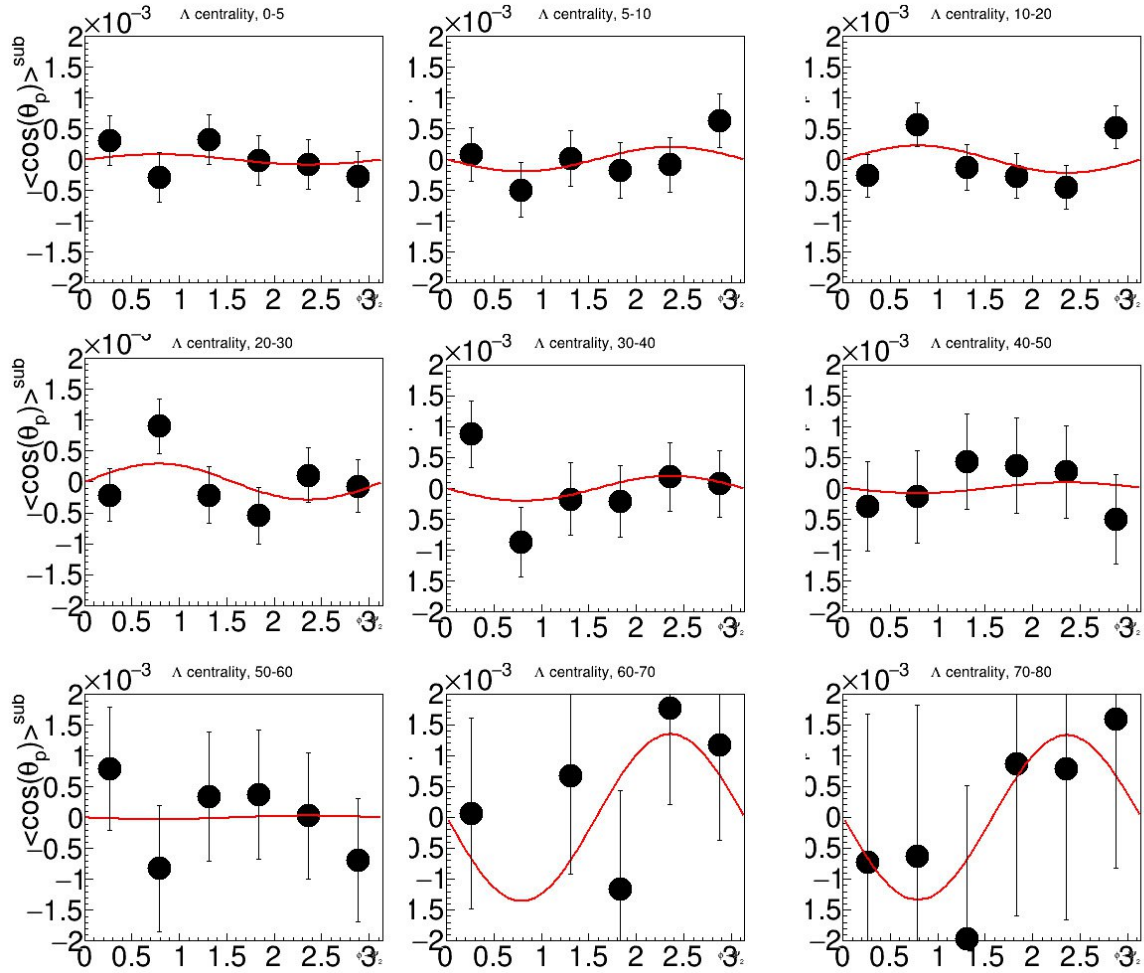
$\bar{\Lambda}$



$\langle \cos\theta_p^* \rangle$ vs $\phi - \Psi_2$ distributions for each centrality bin for 39 GeV.

Λ

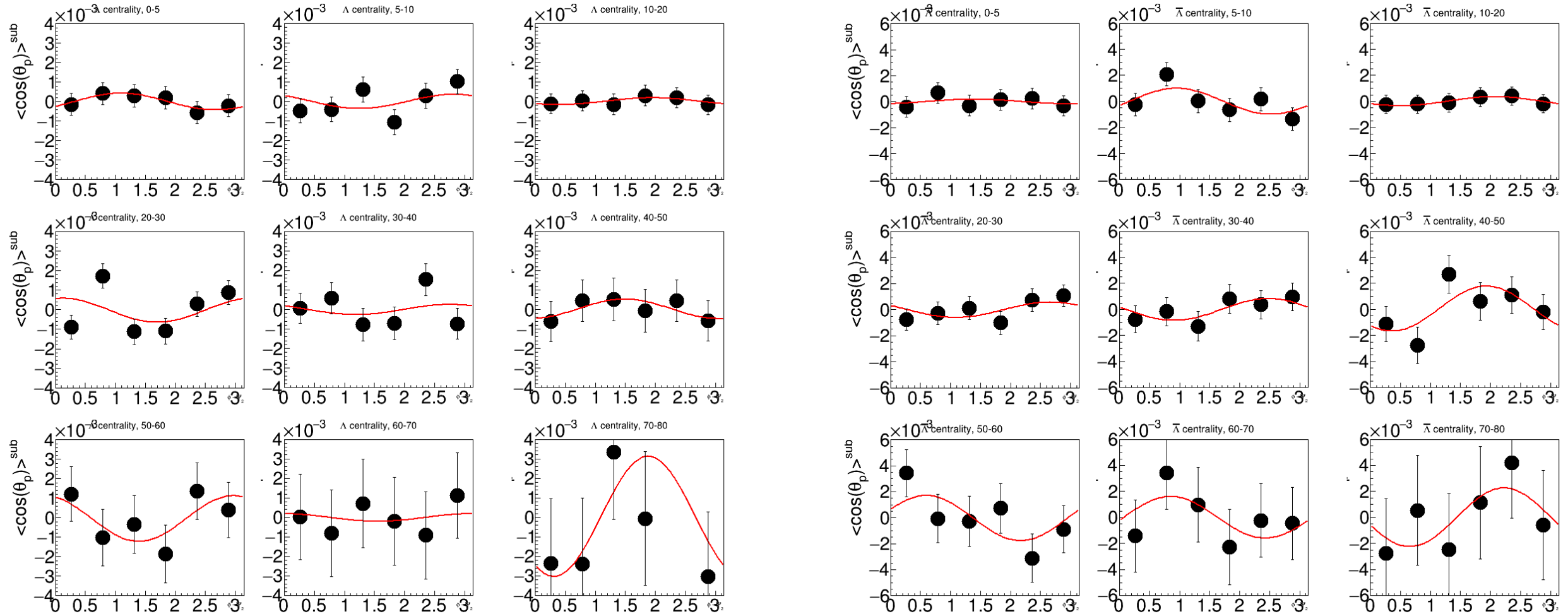
$\bar{\Lambda}$



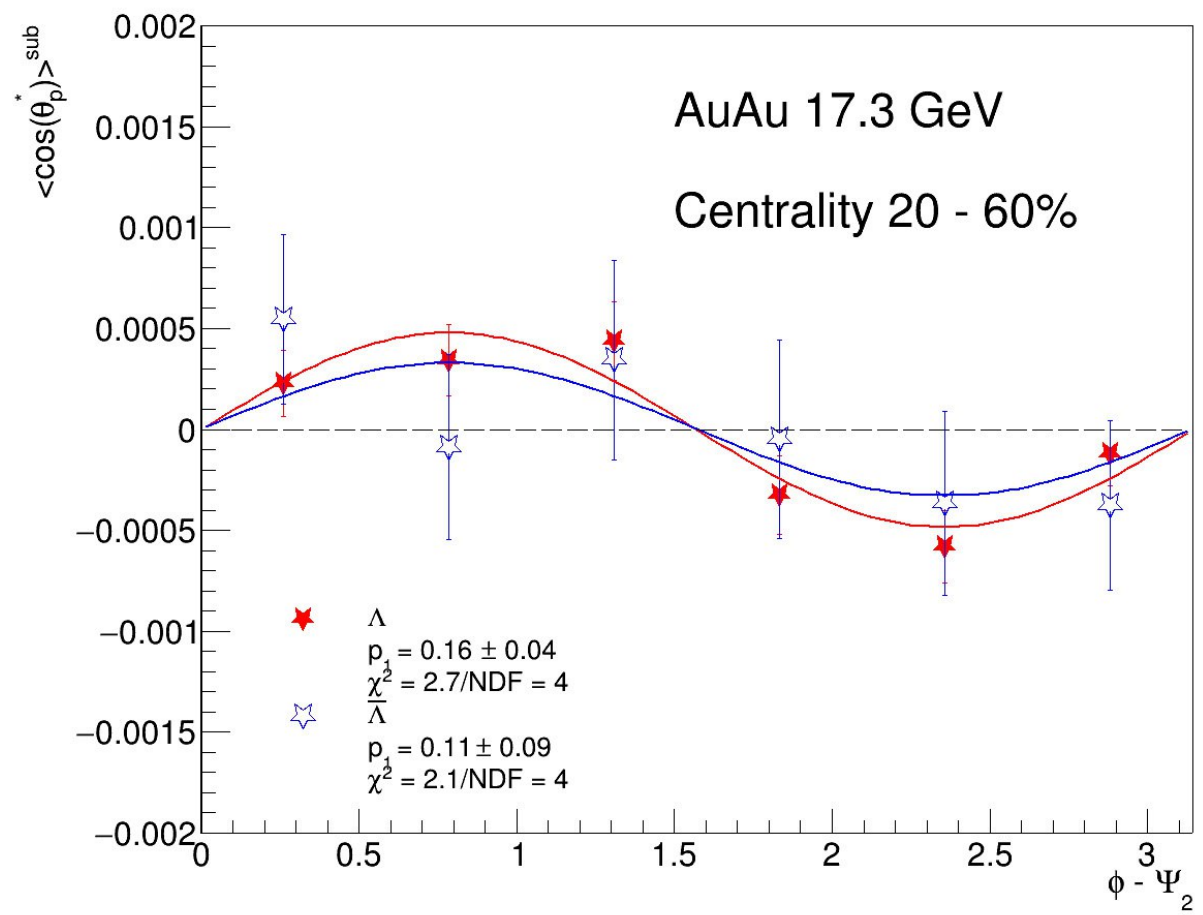
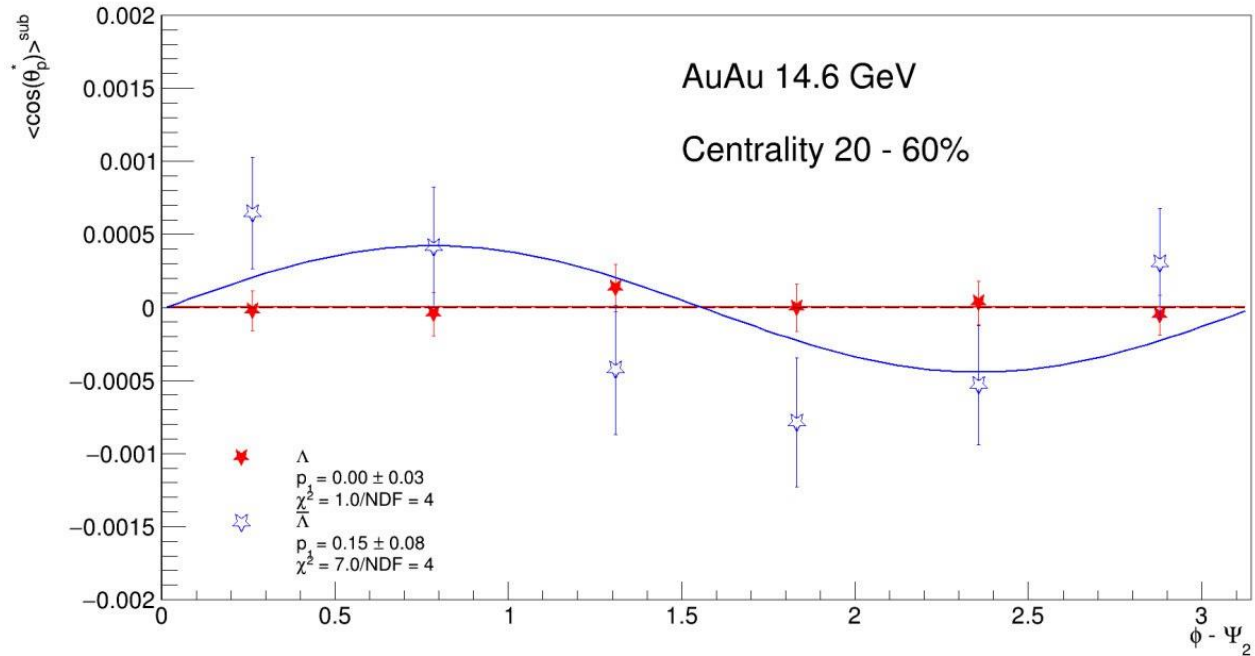
$\langle \cos\theta_p^* \rangle$ vs $\phi - \Psi_2$ distributions for each centrality bin for 62 GeV.

Λ

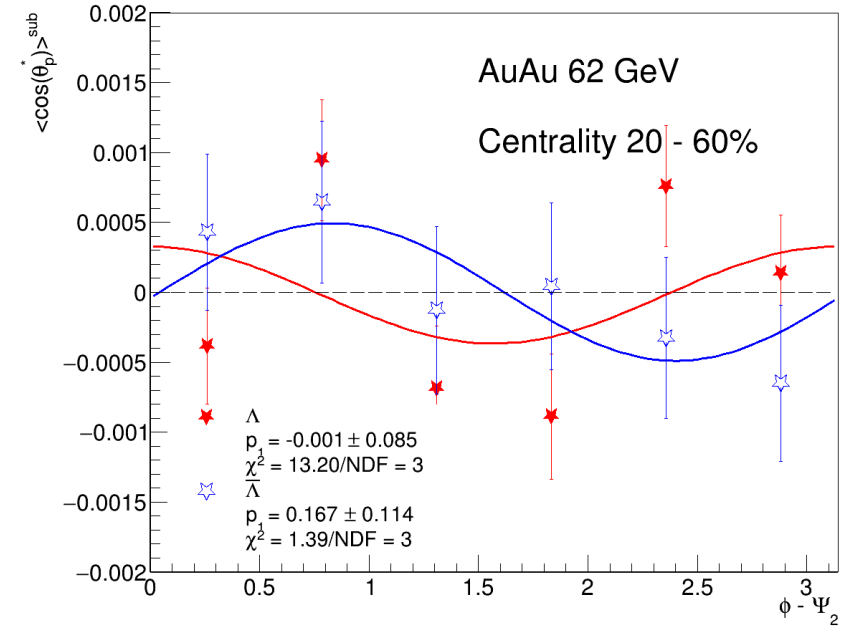
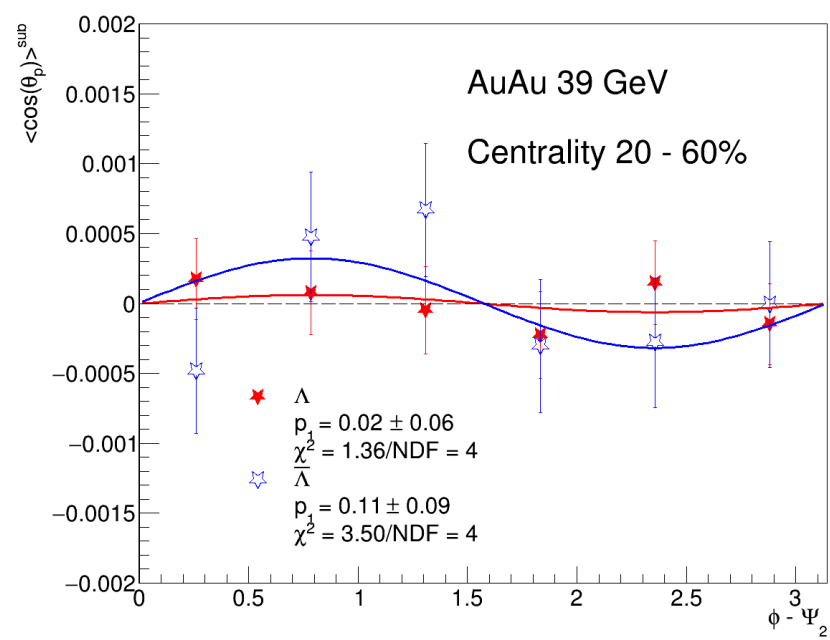
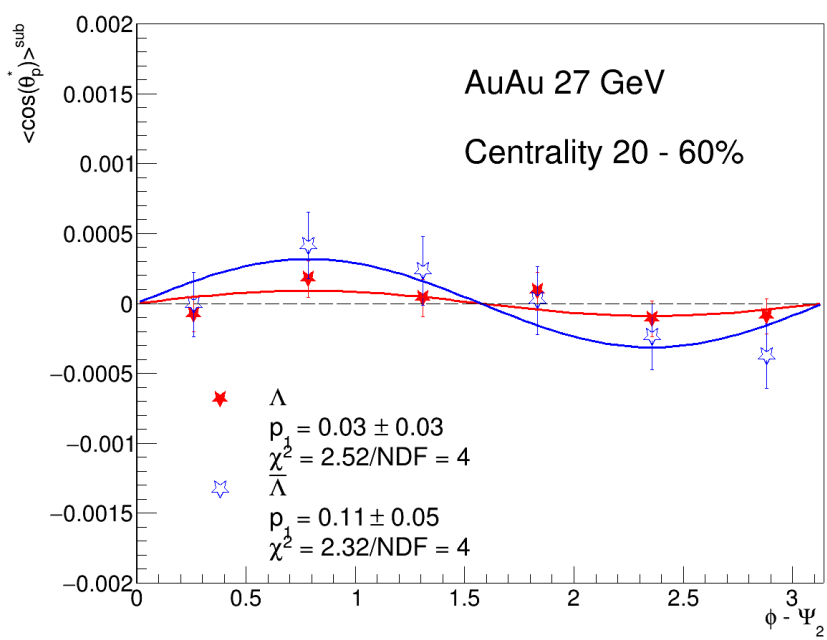
$\bar{\Lambda}$



$\langle \cos\theta_p^* \rangle$ vs $\phi - \Psi_2$ distributions for 20-60% centrality.



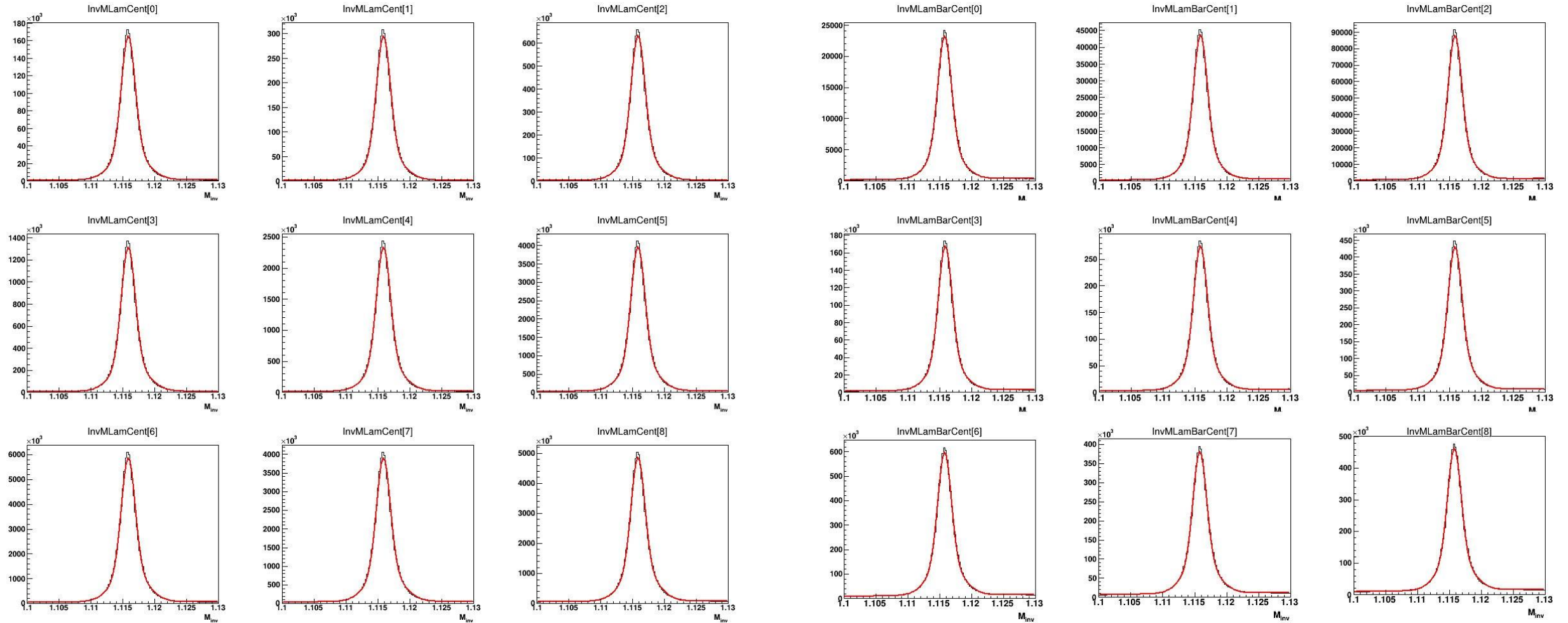
$\langle \cos\theta_p^* \rangle$ vs $\phi - \Psi_2$ distributions for 20-60% centrality.



Invariant mass distributions for each centrality bin for 14.6 GeV

Λ

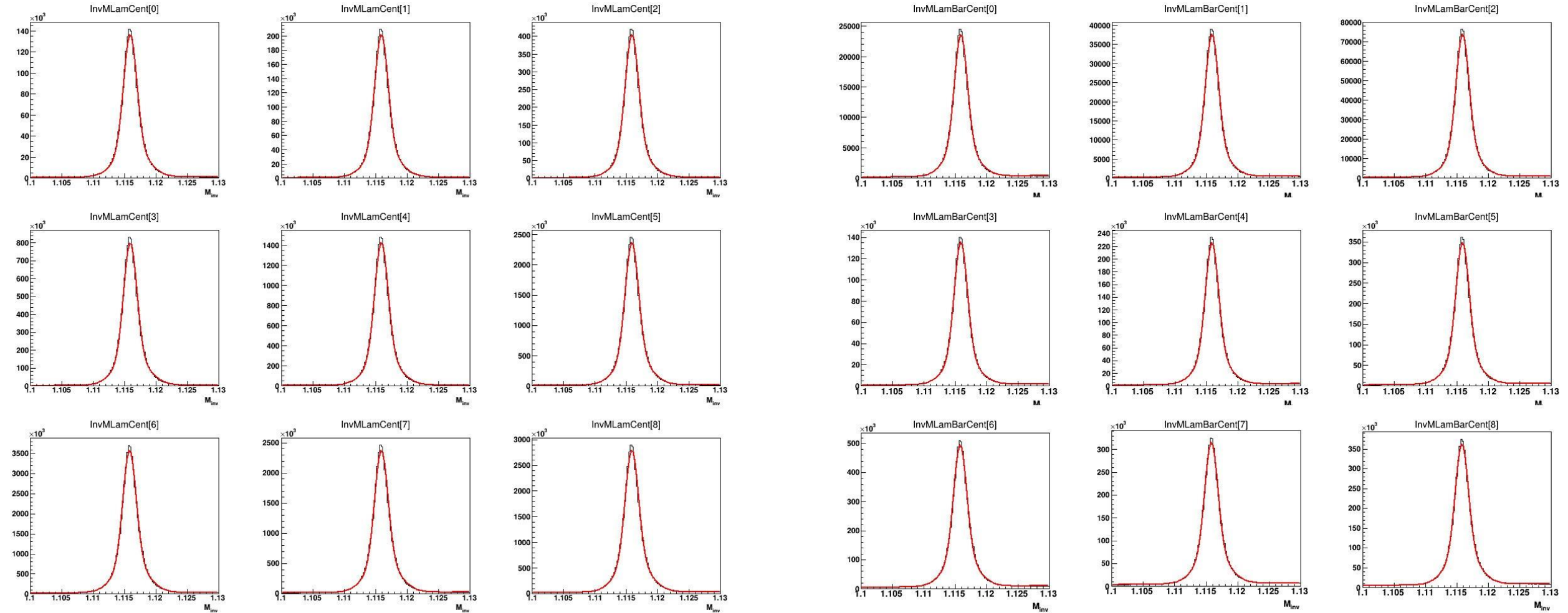
$\bar{\Lambda}$



Invariant mass distributions for each centrality bin for 17.3 GeV

Λ

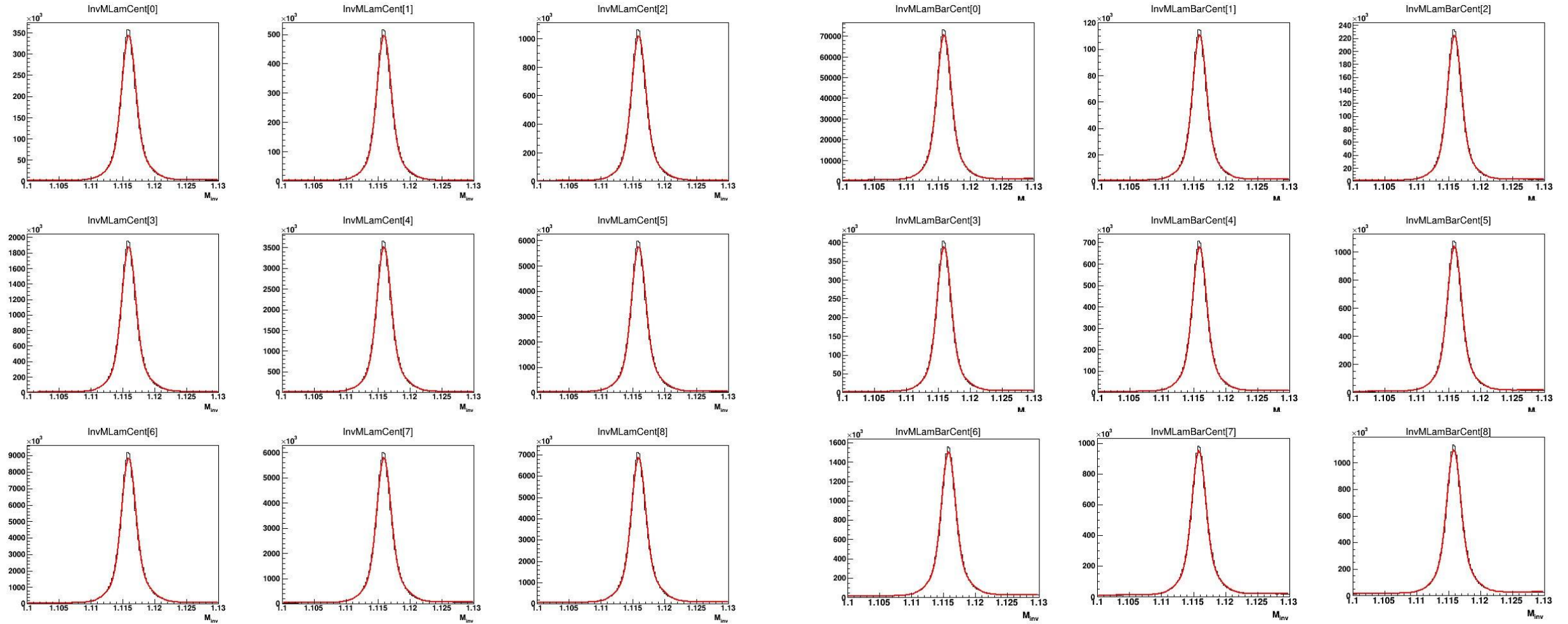
$\bar{\Lambda}$



Invariant mass distributions for each centrality bin for 19.6 GeV

Λ

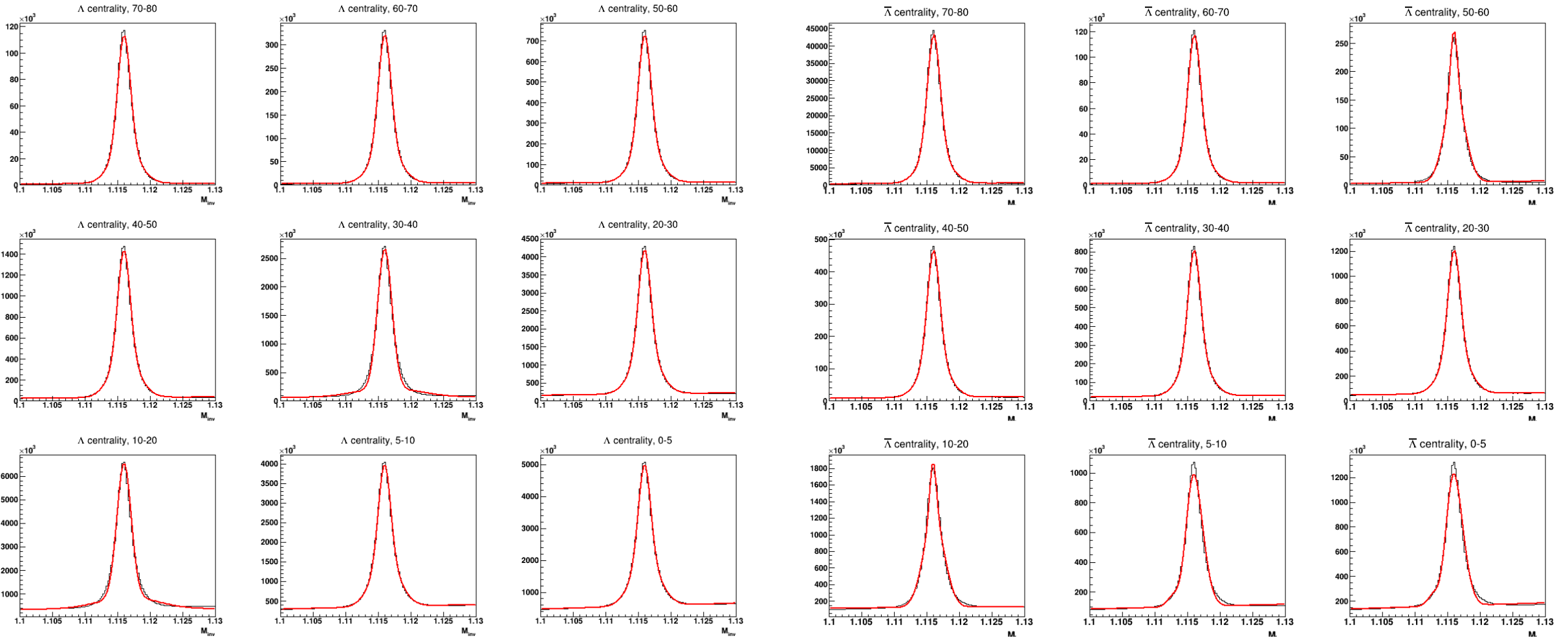
$\bar{\Lambda}$



Invariant mass distributions for each centrality bin for 27 GeV

Λ

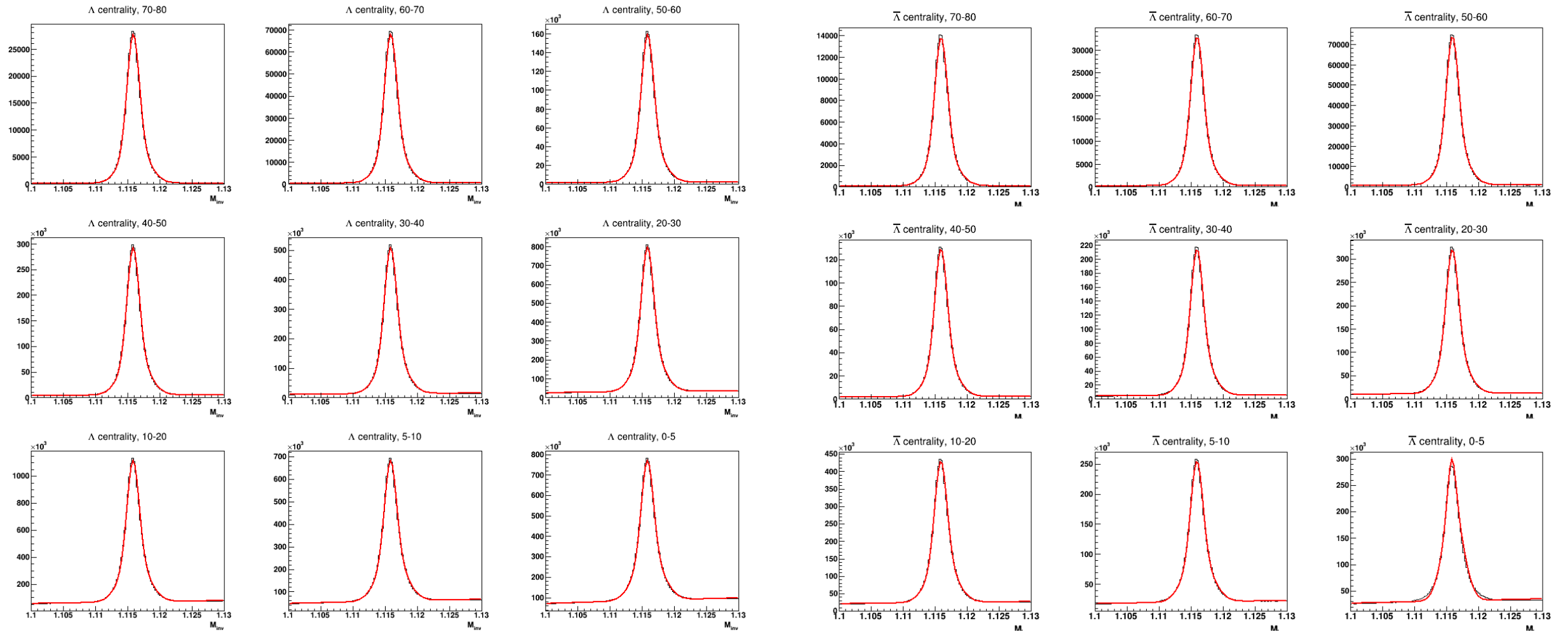
$\bar{\Lambda}$



Invariant mass distributions for each centrality bin for 39 GeV

Λ

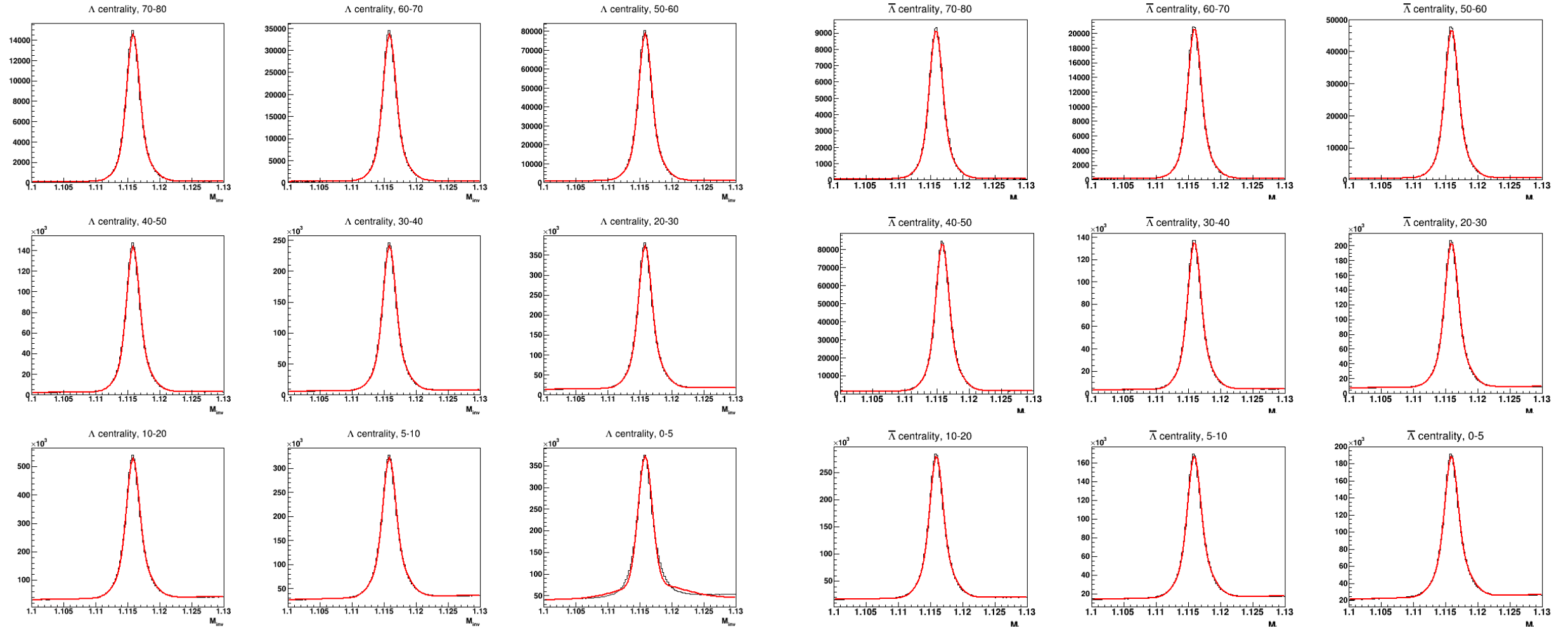
$\bar{\Lambda}$



Invariant mass distributions for each centrality bin for 62 GeV

Λ

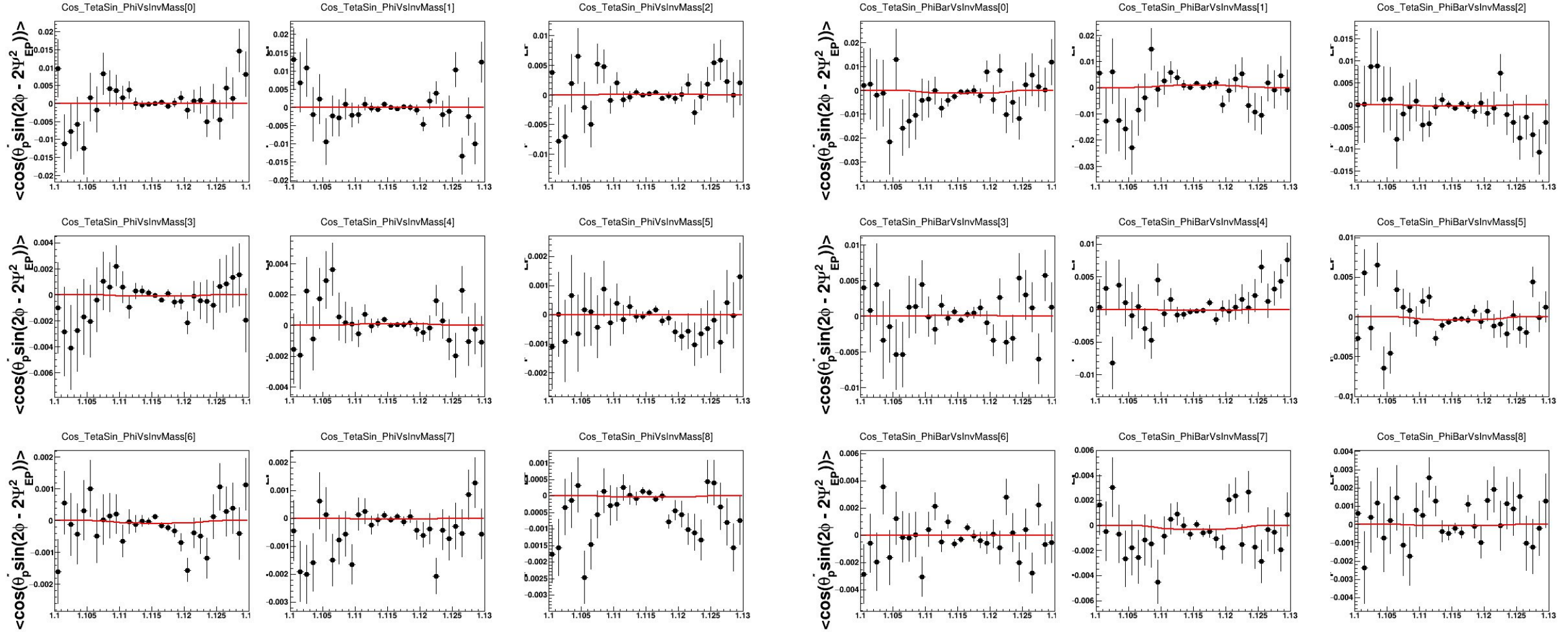
$\bar{\Lambda}$



$\langle \cos\theta_p^* \sin(2\phi - 2\Psi_2) \rangle$ vs M_{inv} distributions for each centrality bin for 14.6 GeV

\wedge

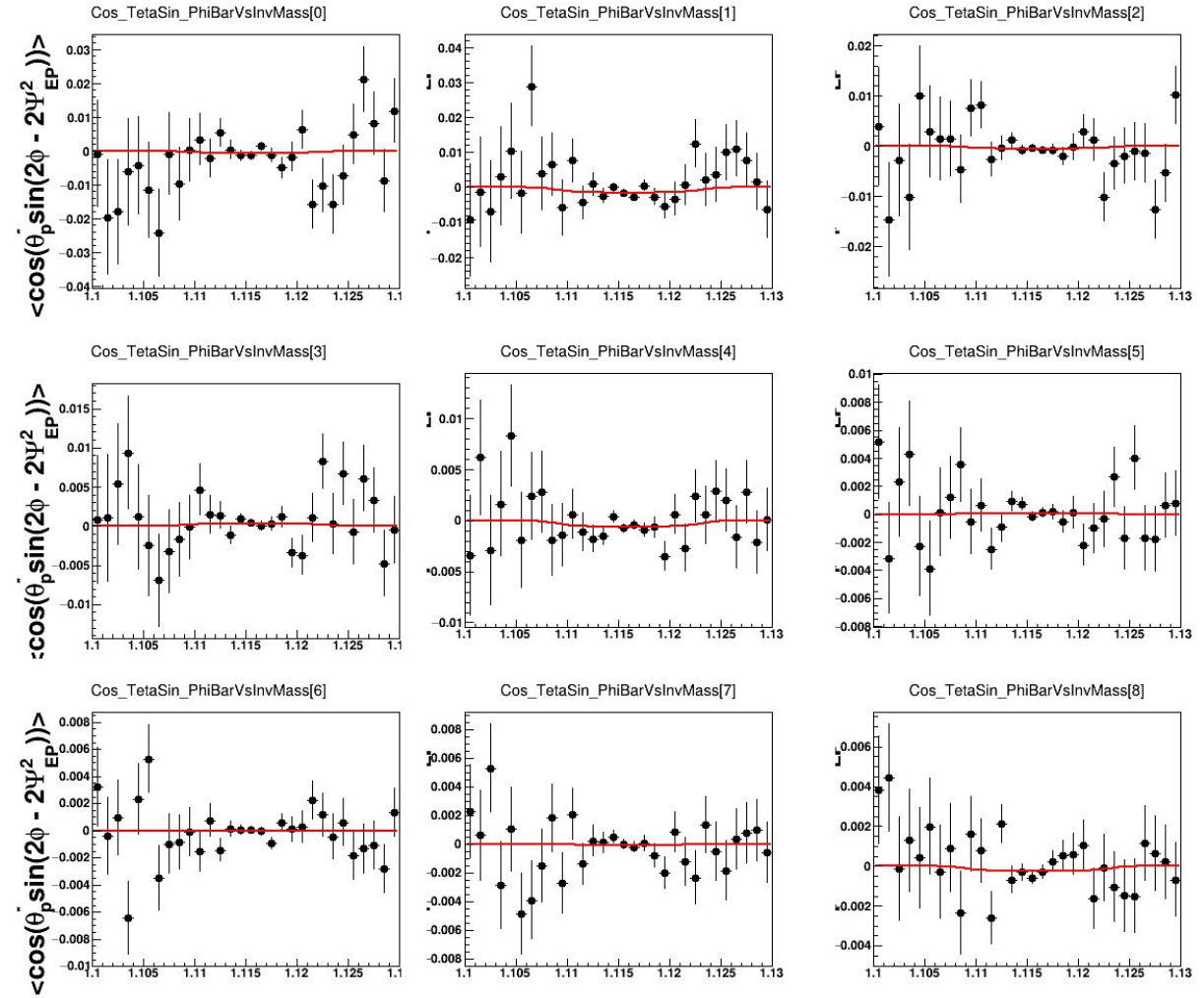
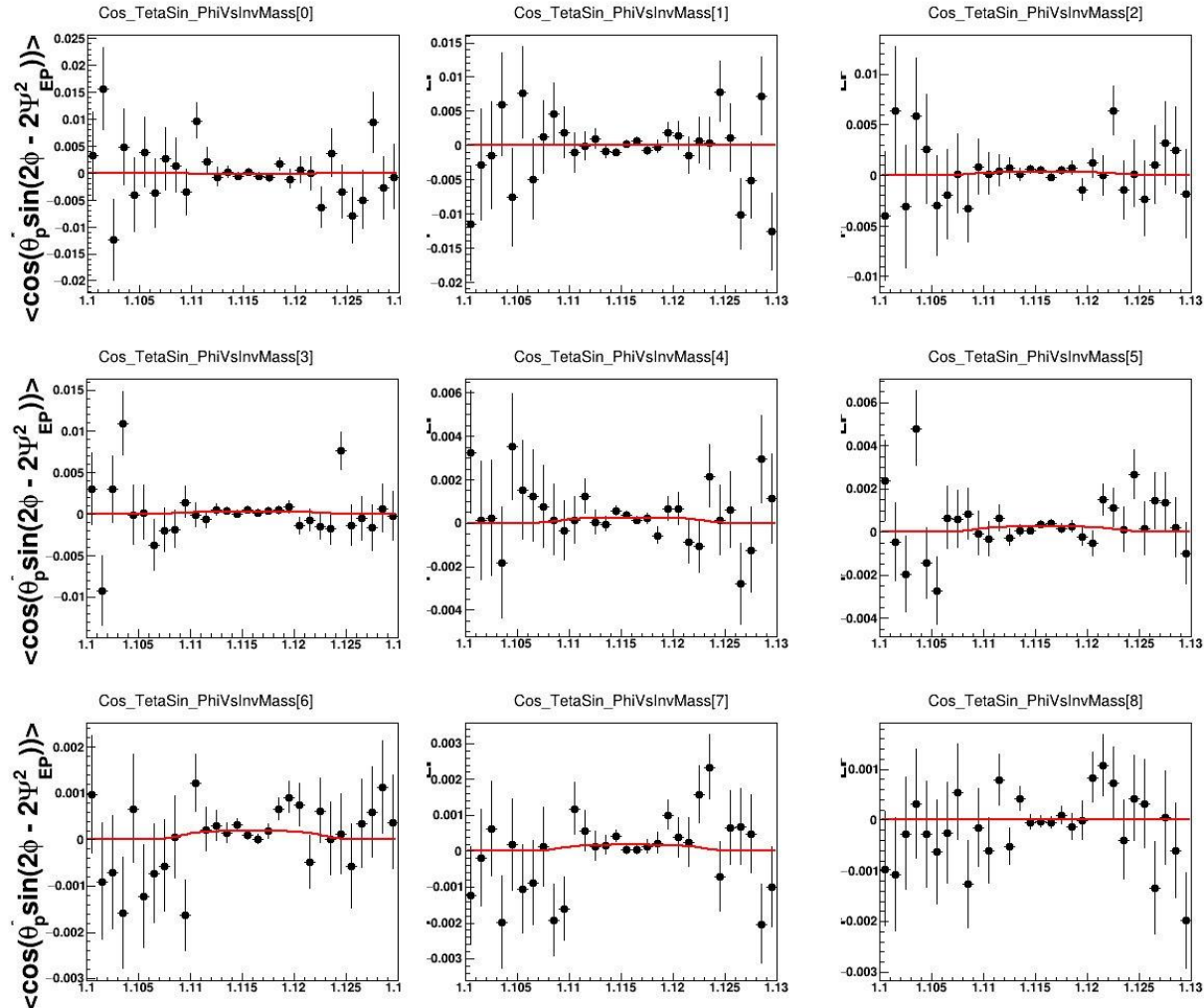
$\bar{\wedge}$



$\langle \cos\theta_p^* \sin(2\phi - 2\Psi_2) \rangle$ vs M_{inv} distributions for each centrality bin for 17.3 GeV

\wedge

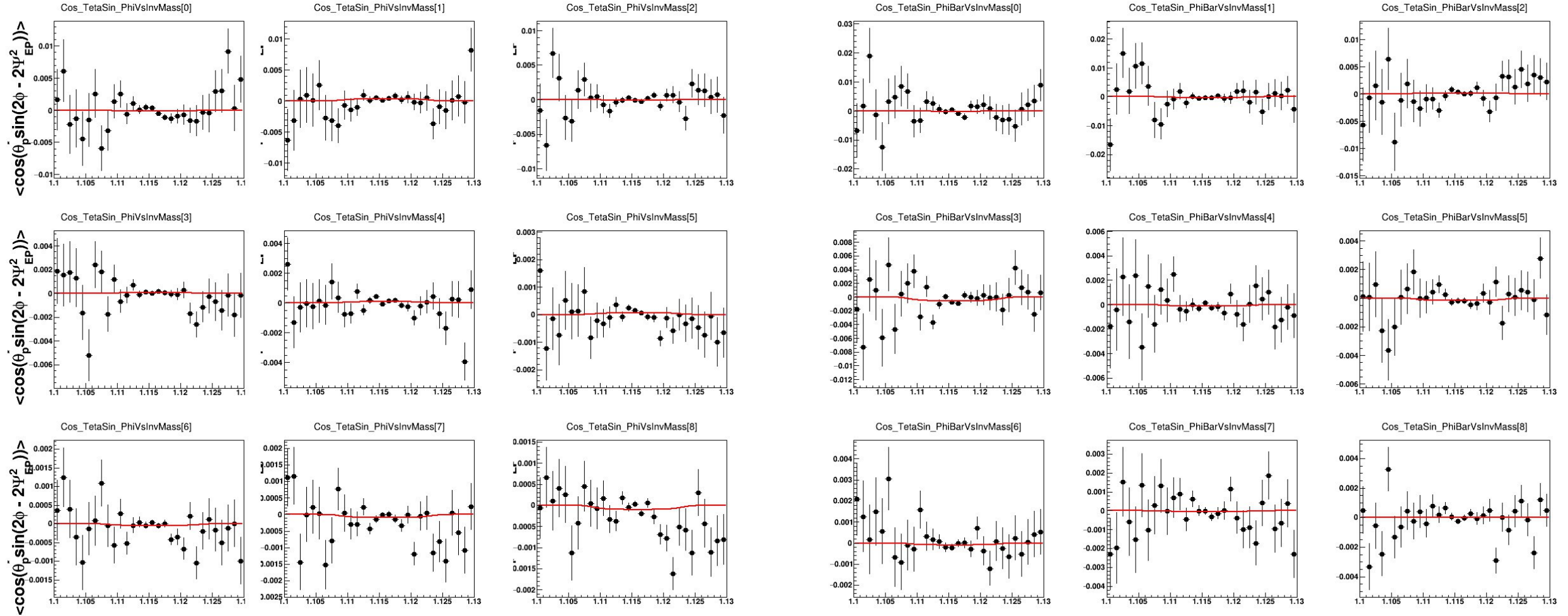
$\bar{\wedge}$



$\langle \cos\theta_p^* \sin(2\phi - 2\Psi_2) \rangle$ vs M_{inv} distributions for each centrality bin for 19.6 GeV

Λ

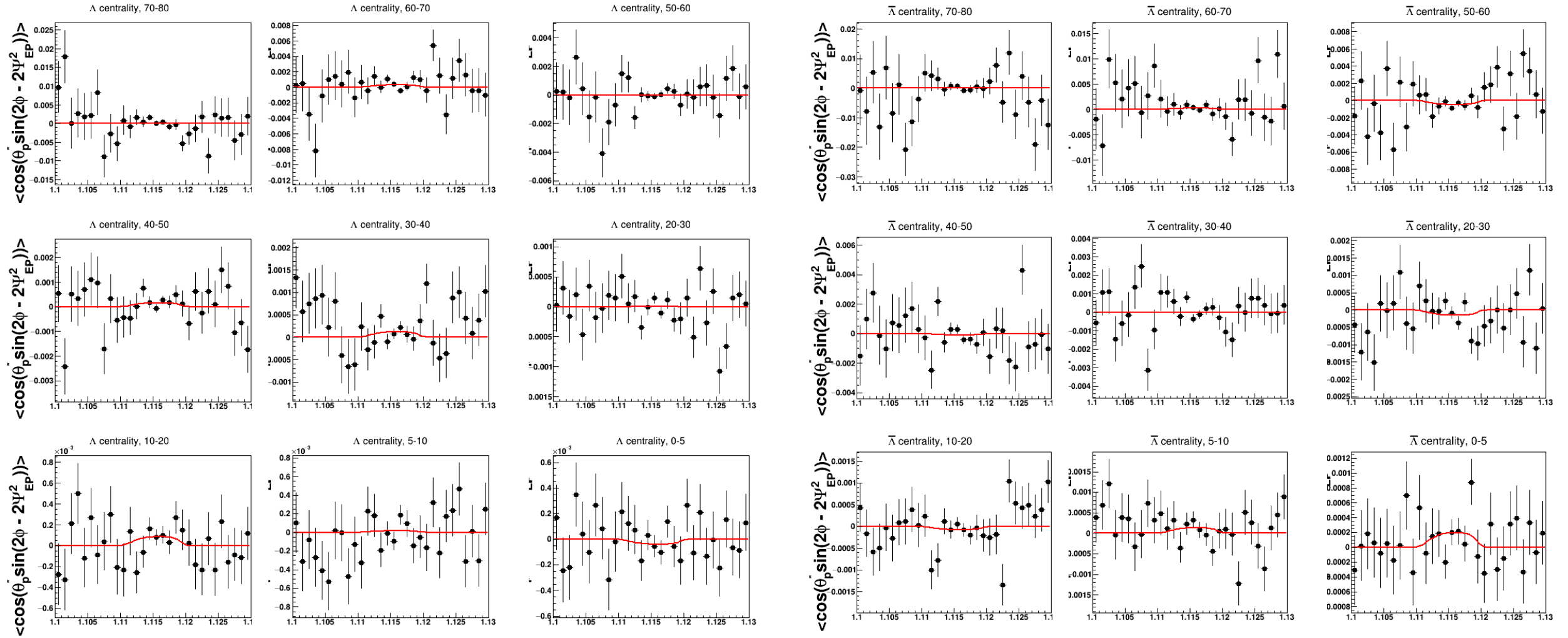
$\bar{\Lambda}$



$\langle \cos\theta_p^* \sin(2\phi - 2\Psi_2) \rangle$ vs M_{inv} distributions for each centrality bin for 27 GeV

Λ

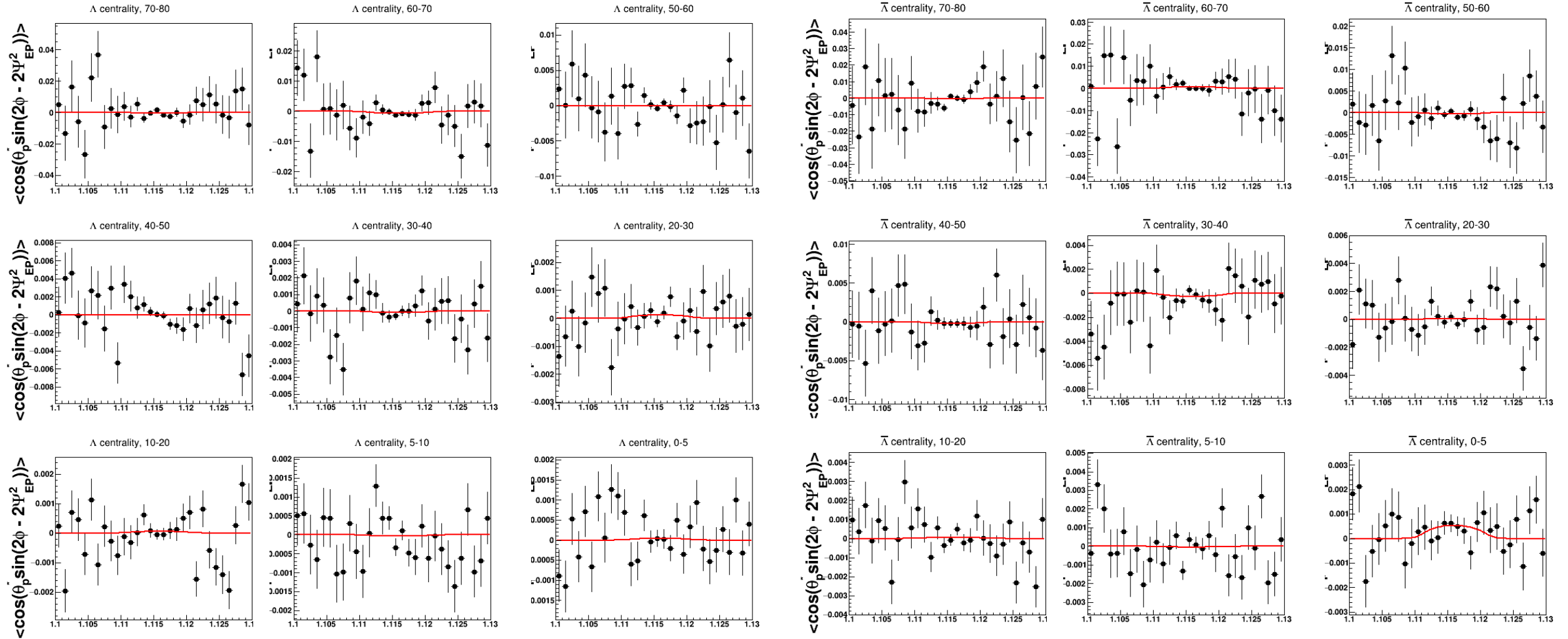
$\bar{\Lambda}$



$\langle \cos\theta_p^* \sin(2\phi - 2\Psi_2) \rangle$ vs M_{inv} distributions for each centrality bin for 39 GeV

Λ

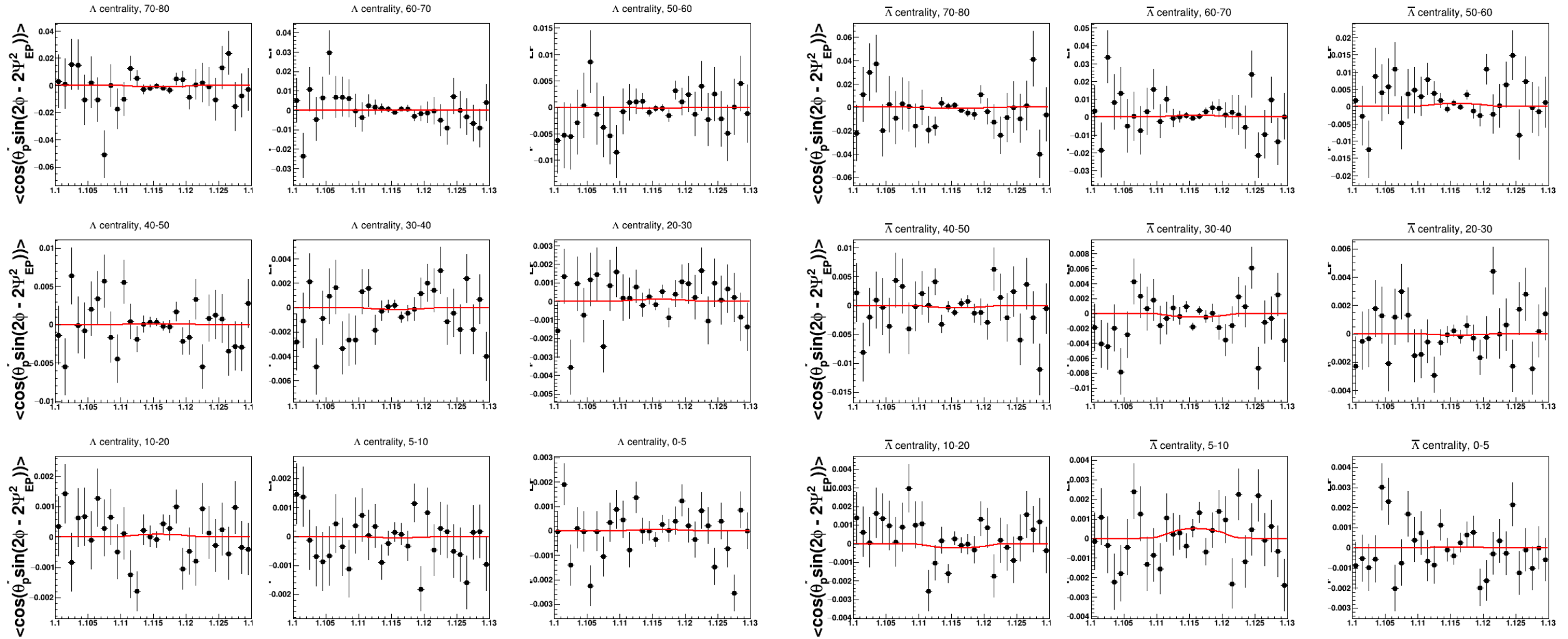
$\bar{\Lambda}$



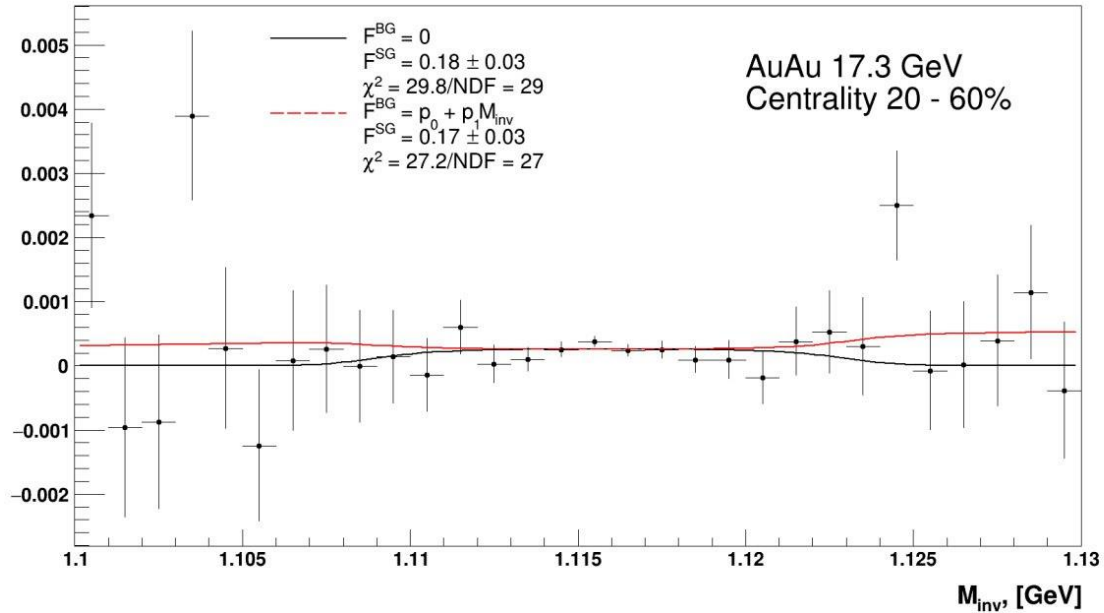
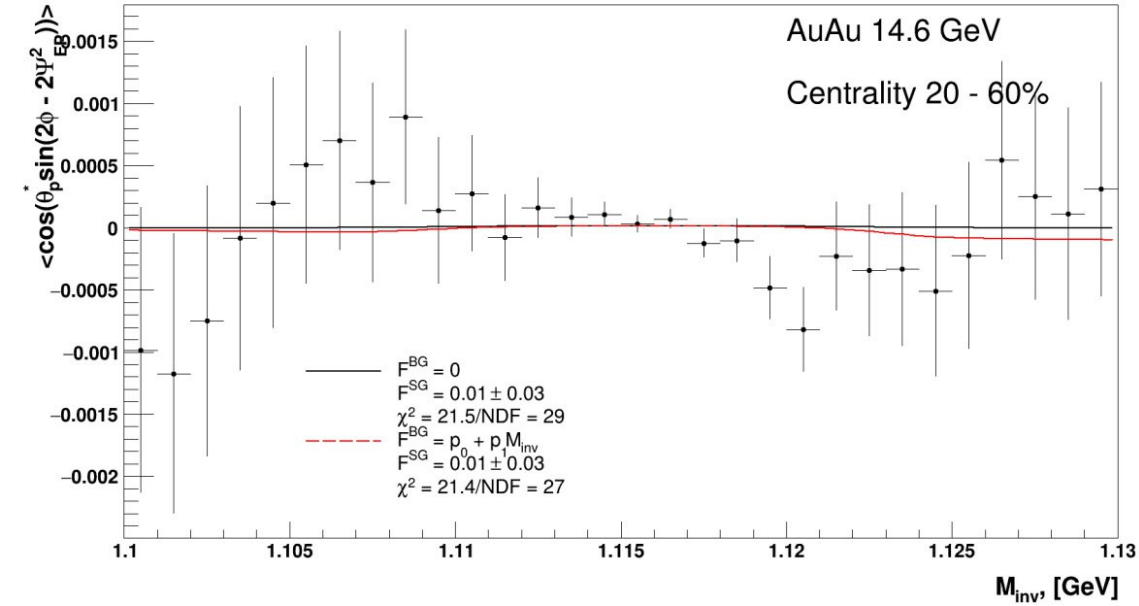
$\langle \cos\theta_p^* \sin(2\phi - 2\Psi_2) \rangle$ vs M_{inv} distributions for each centrality bin for 62 GeV

Λ

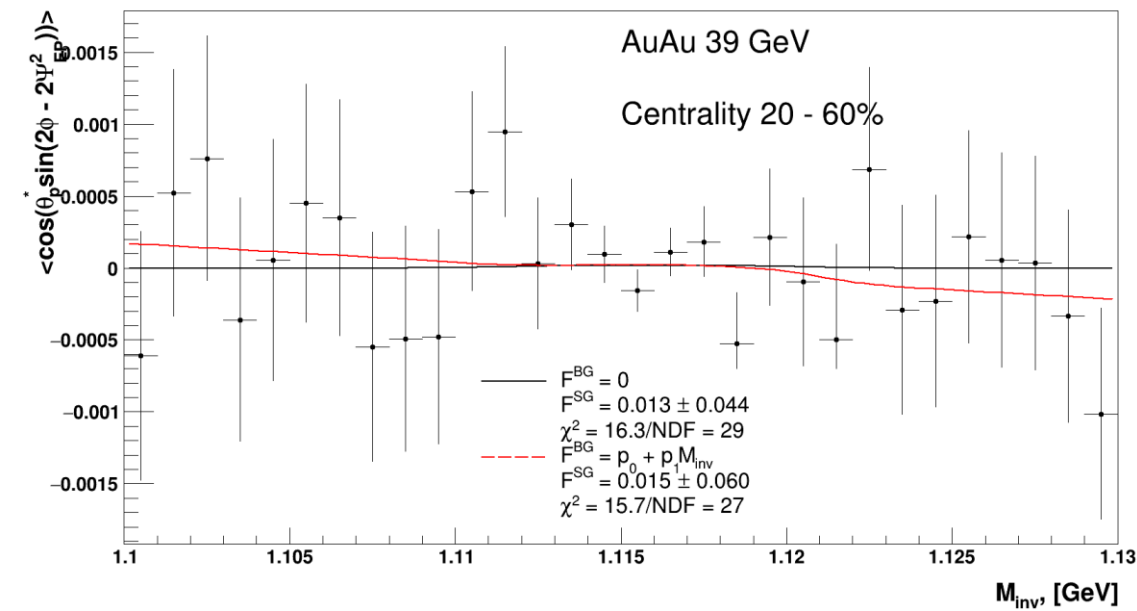
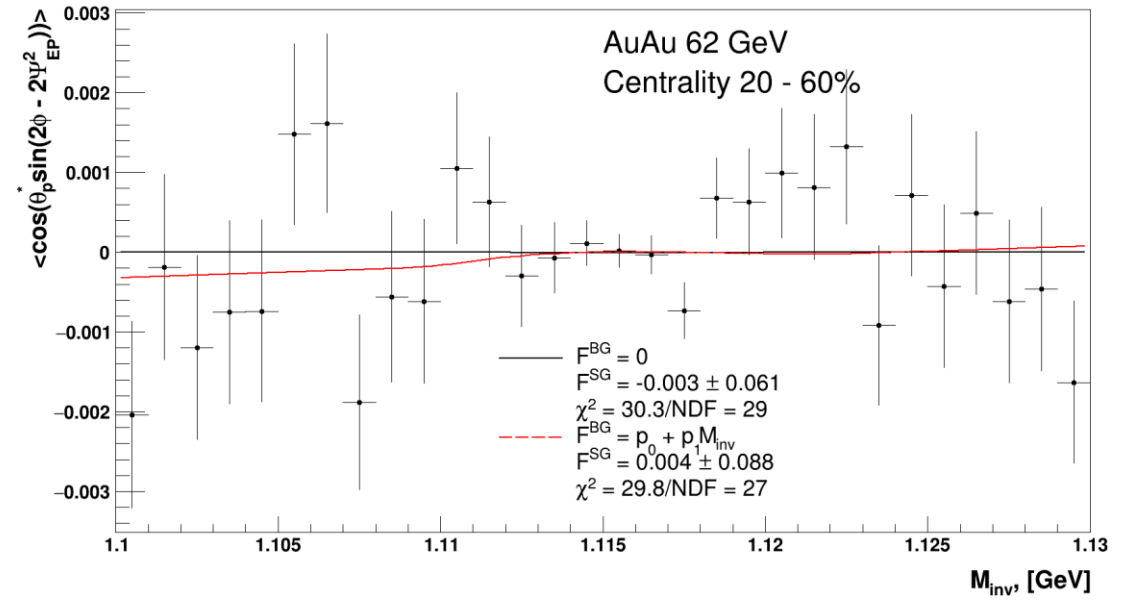
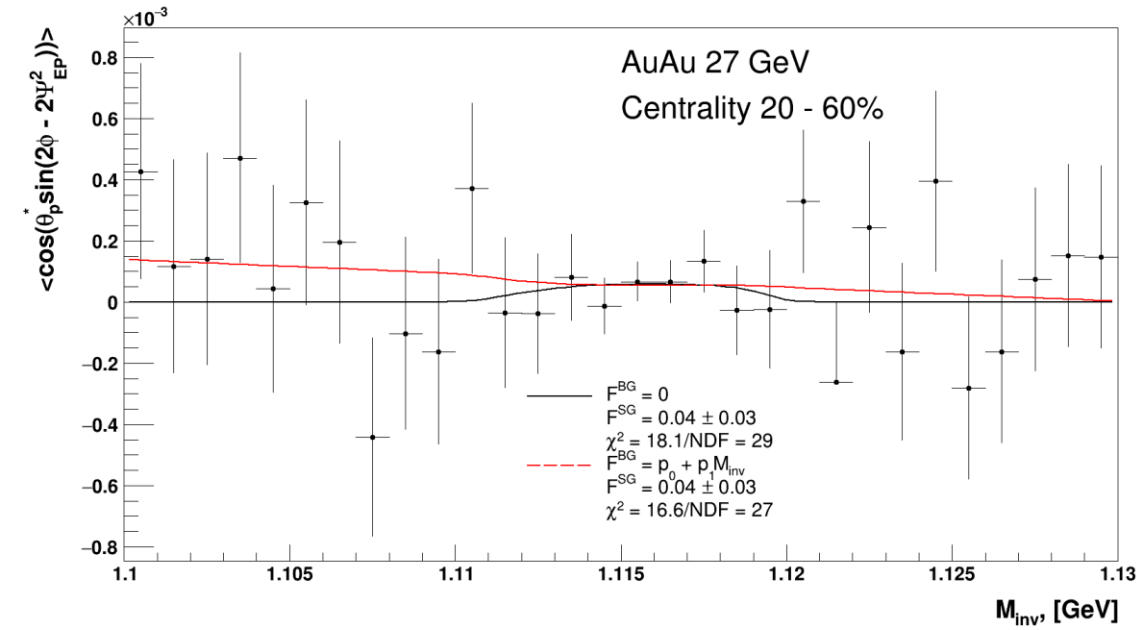
$\bar{\Lambda}$



$\langle \cos\theta_p^* \sin(2\phi - 2\Psi_2) \rangle$ vs M_{inv} distributions for 20-60% centrality for 14.6, 17.3 GeV.

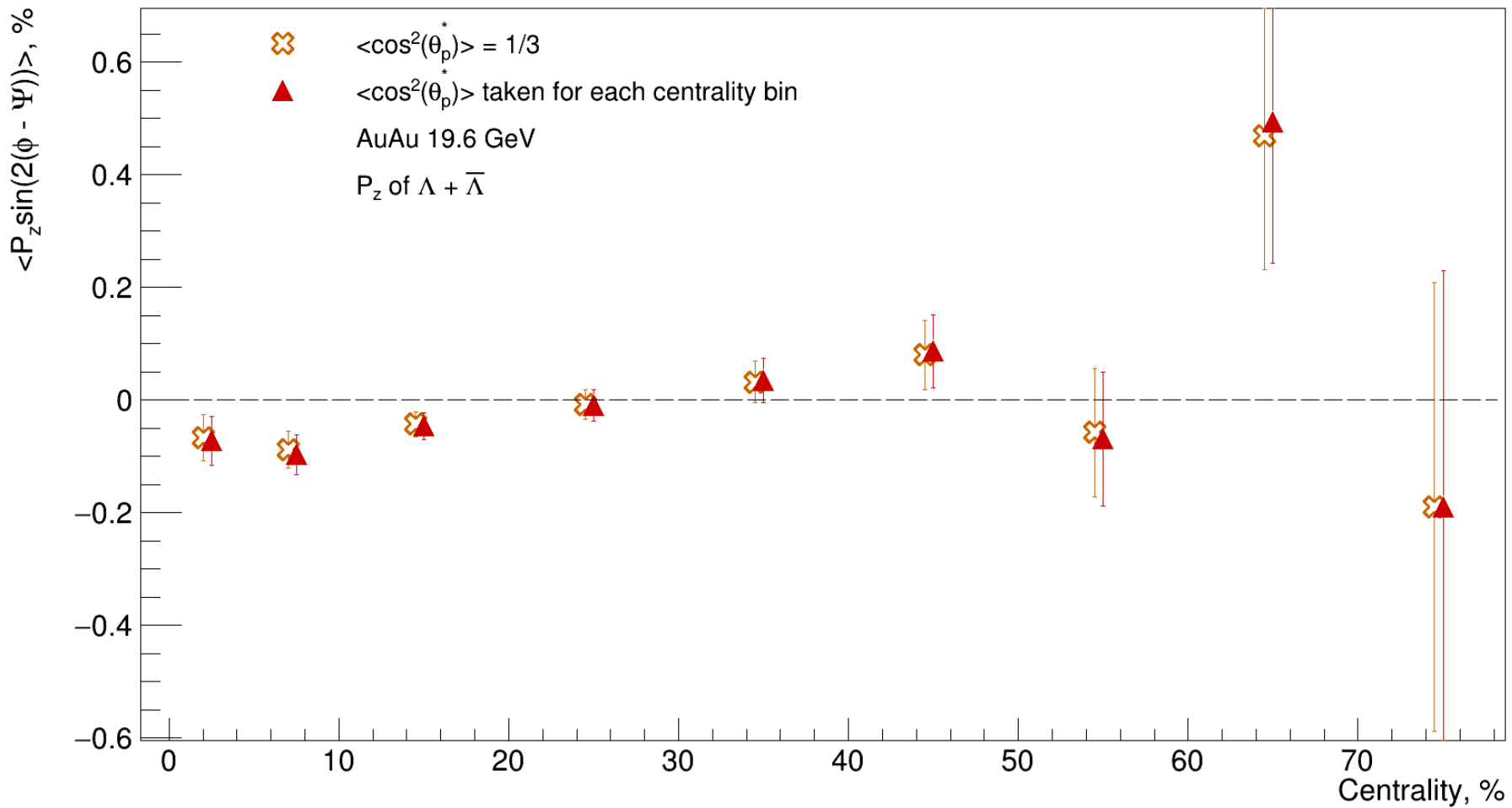


$\langle \cos\theta_p^* \sin(2\phi - 2\Psi_2) \rangle$ vs M_{inv} distributions for 20-60% centrality for 27, 39, 62 GeV.



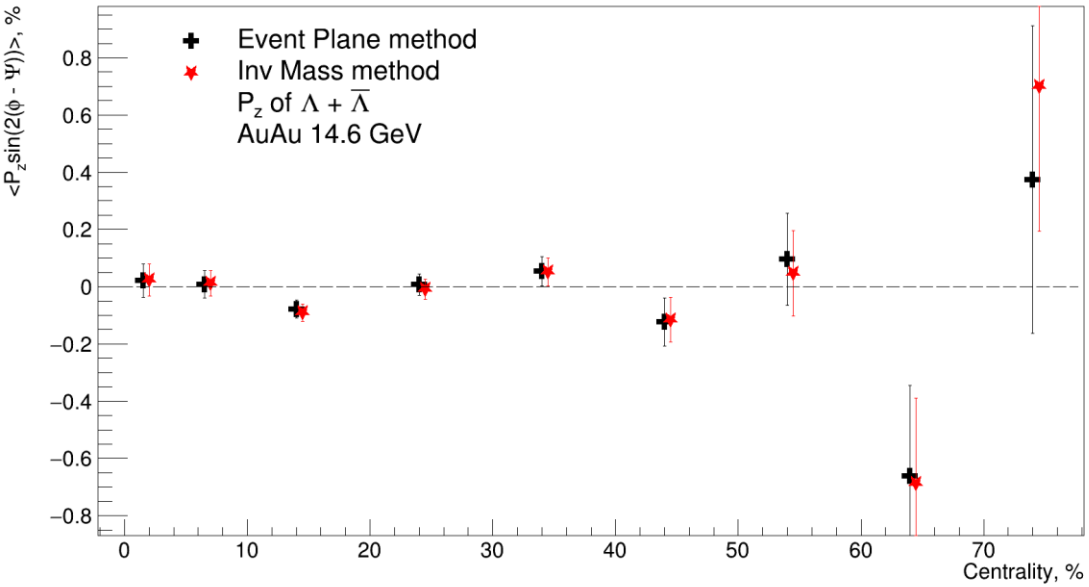
Comparison to P_z measurements without the assumption $\langle \cos^2 \theta_p^* \rangle = 1/3$

$\langle P_z \sin(2(\phi - \Psi)) \rangle$ Vs Centrality

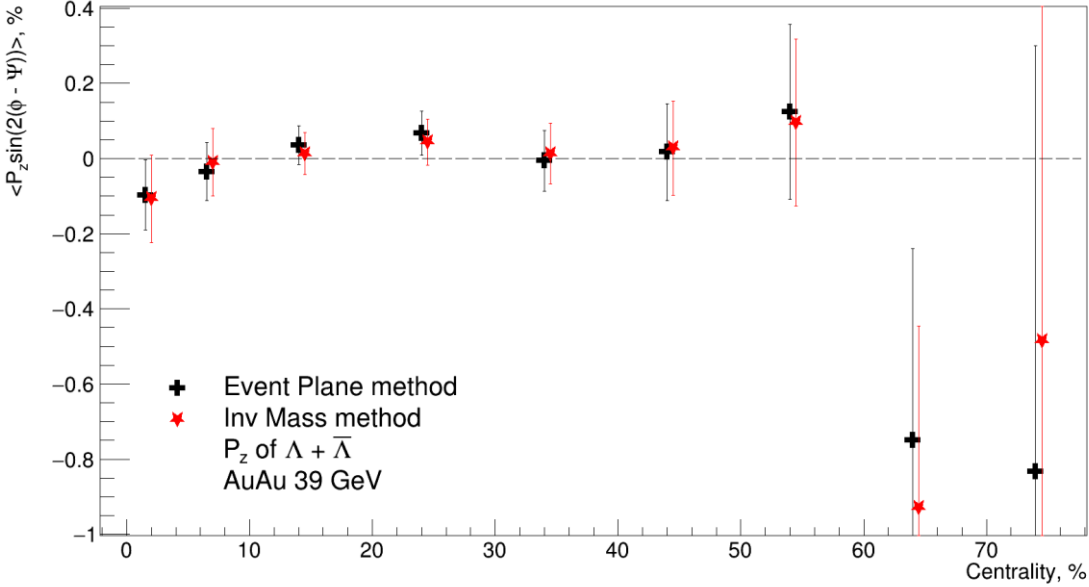


Comparing of polarization measured by two methods

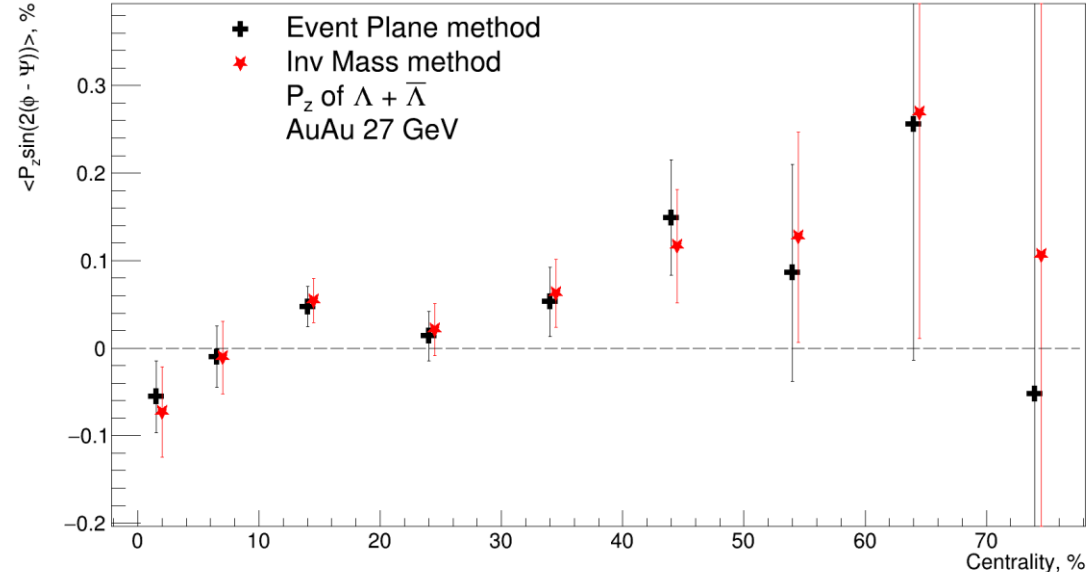
$\langle P_z \sin(2(\phi - \Psi)) \rangle$ Vs Centrality



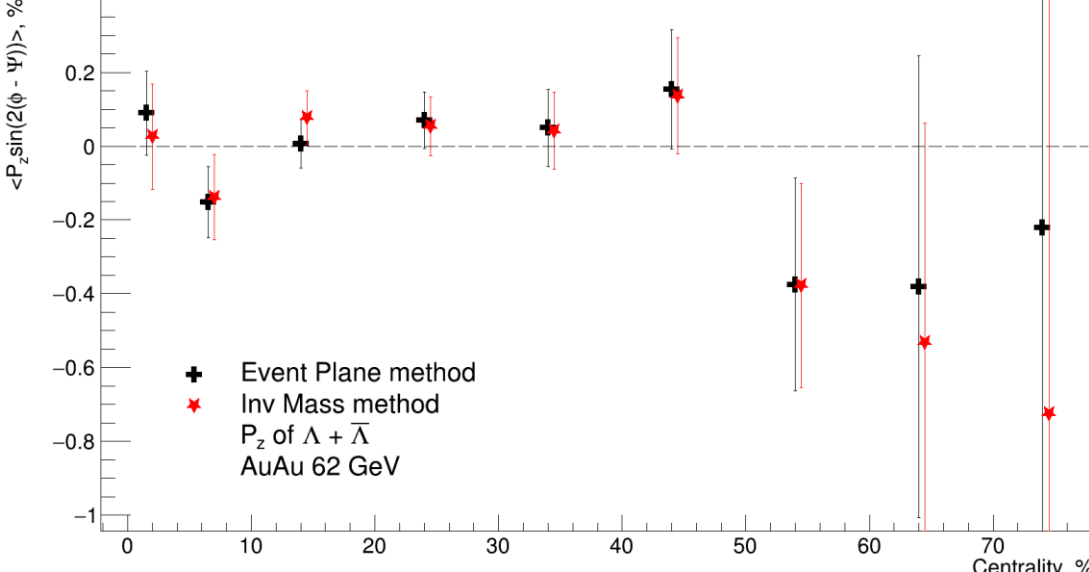
$\langle P_z \sin(2(\phi - \Psi)) \rangle$ Vs Centrality



$\langle P_z \sin(2(\phi - \Psi)) \rangle$ Vs Centrality

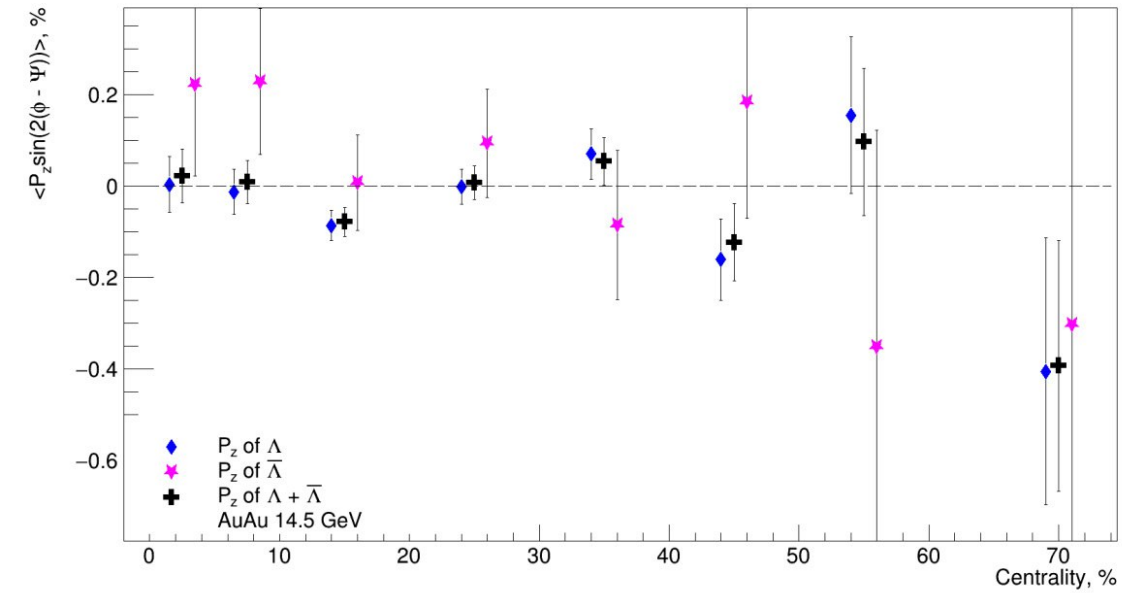


$\langle P_z \sin(2(\phi - \Psi)) \rangle$ Vs Centrality

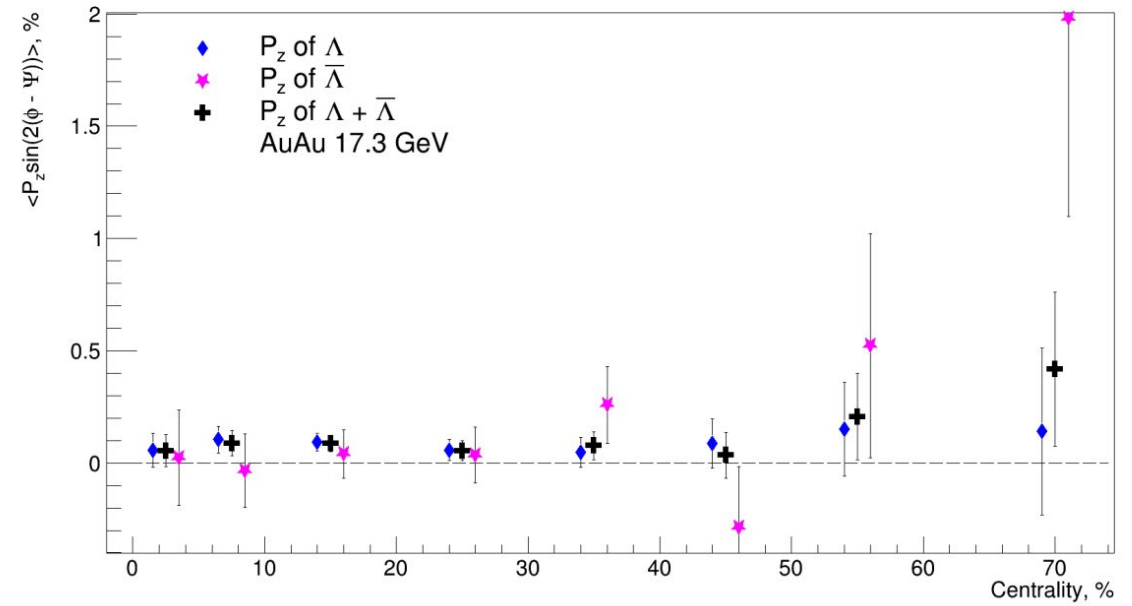


$\langle P_z \sin(2(\phi - \Psi_2)) \rangle$ vs centrality for each energy

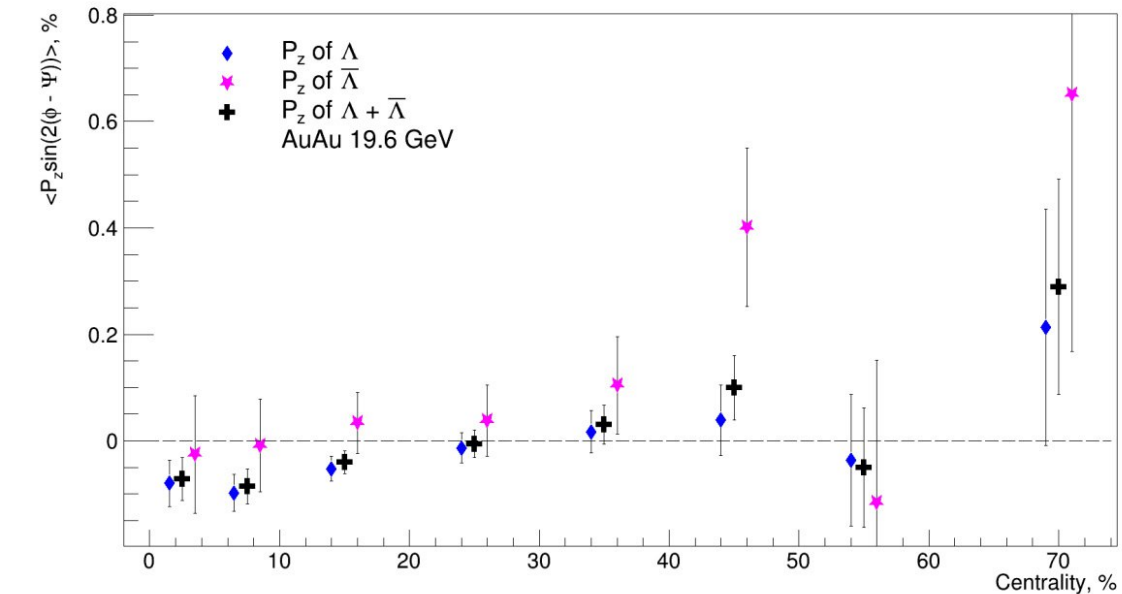
$\langle P_z \sin(2(\phi - \Psi)) \rangle$ Vs Centrality, 60 - 80% merged



$\langle P_z \sin(2(\phi - \Psi)) \rangle$ Vs Centrality, 60 - 80% merged

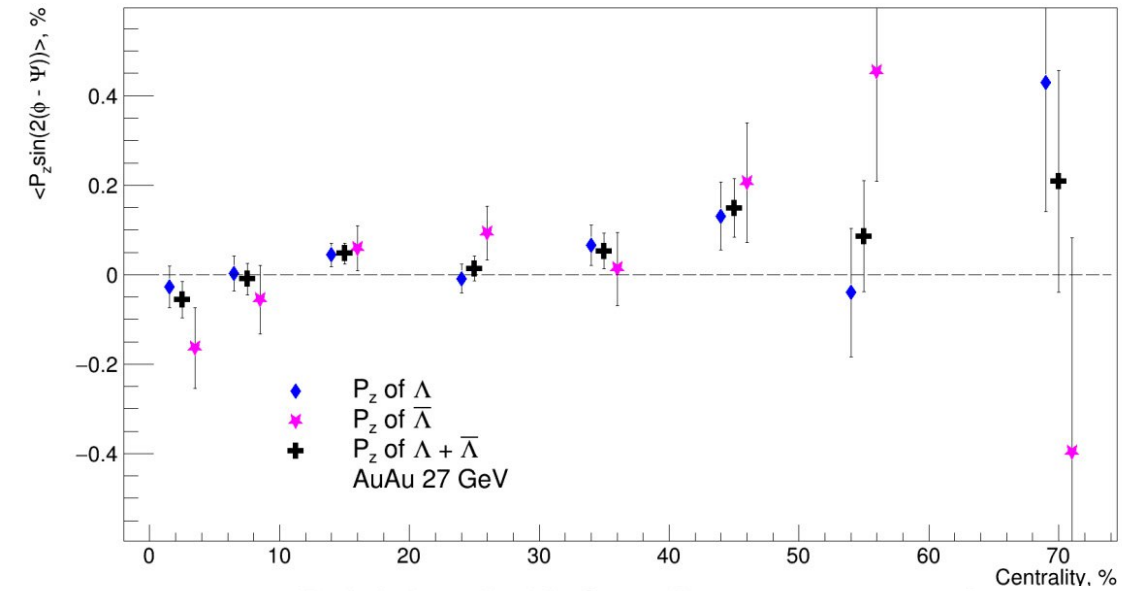


$\langle P_z \sin(2(\phi - \Psi)) \rangle$ Vs Centrality, 60 - 80% merged

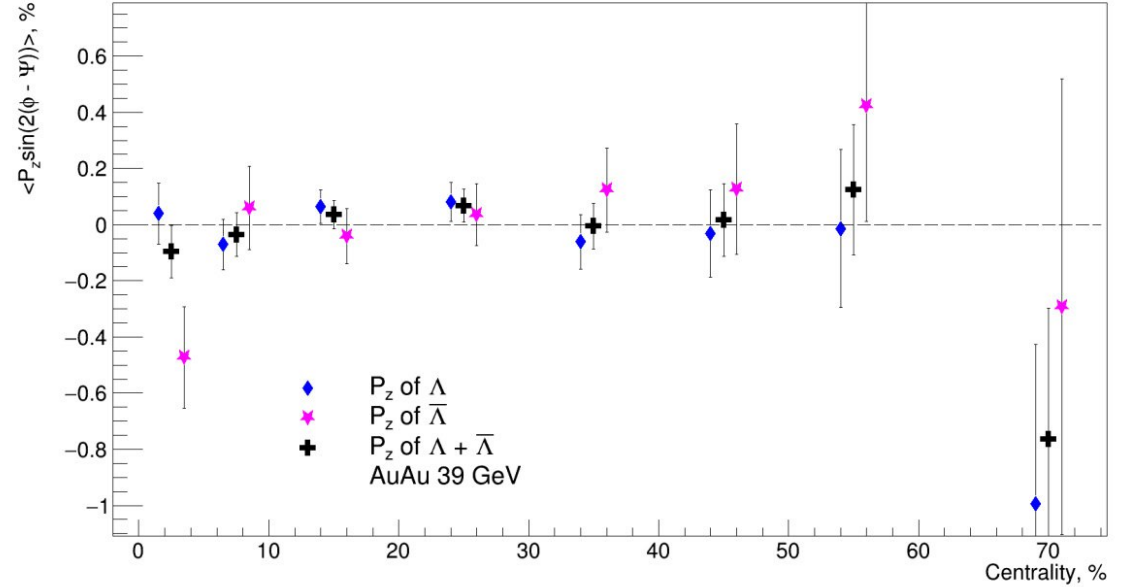


$\langle P_z \sin(2(\phi - \Psi_2)) \rangle$ vs centrality for each energy

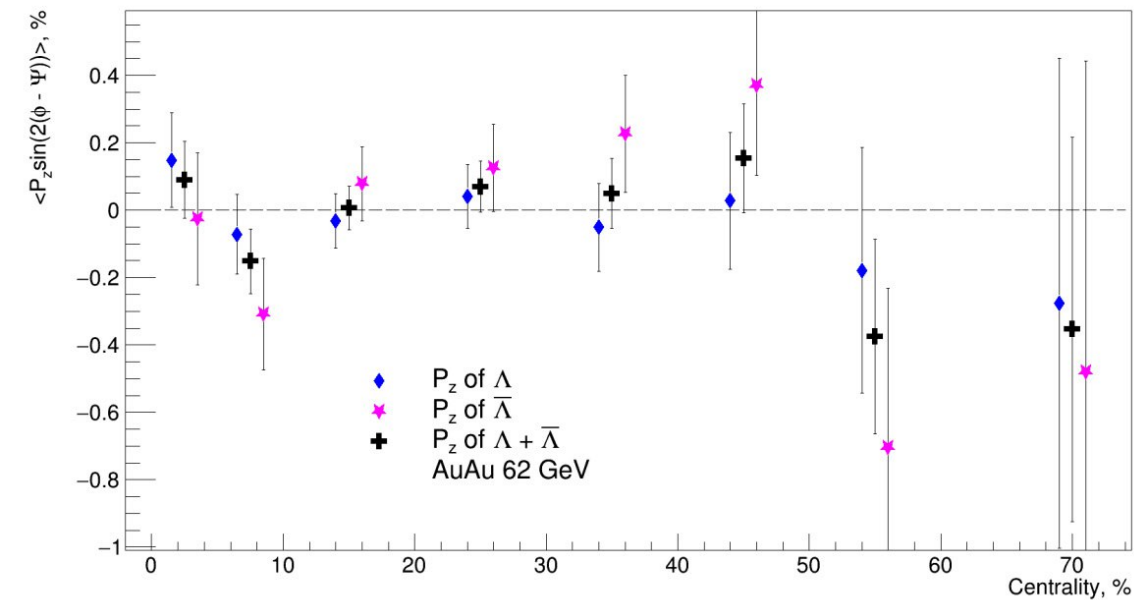
$\langle P_z \sin(2(\phi - \Psi)) \rangle$ Vs Centrality, 60 - 80% merged



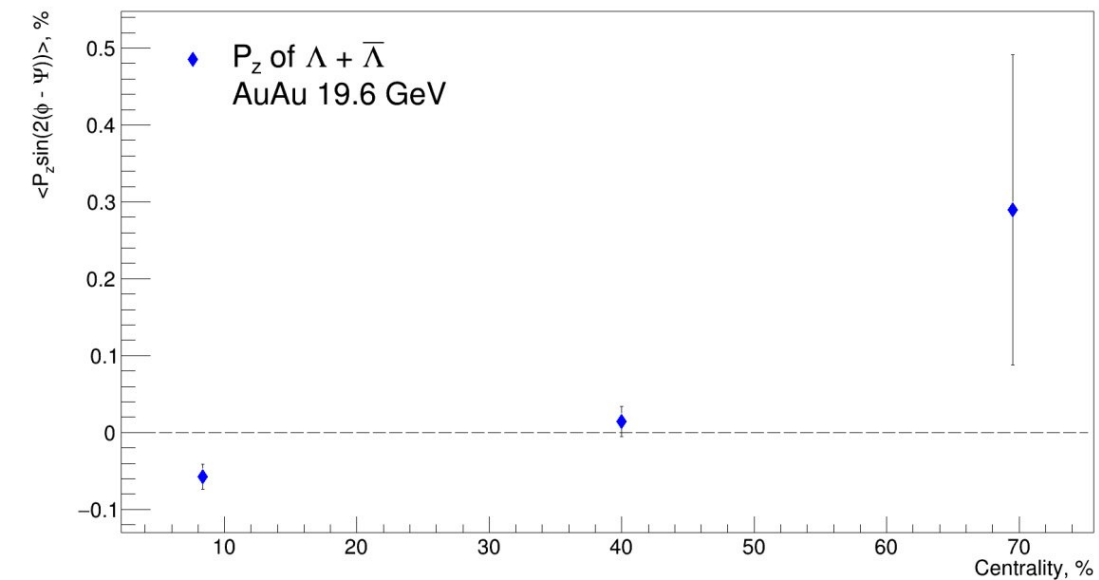
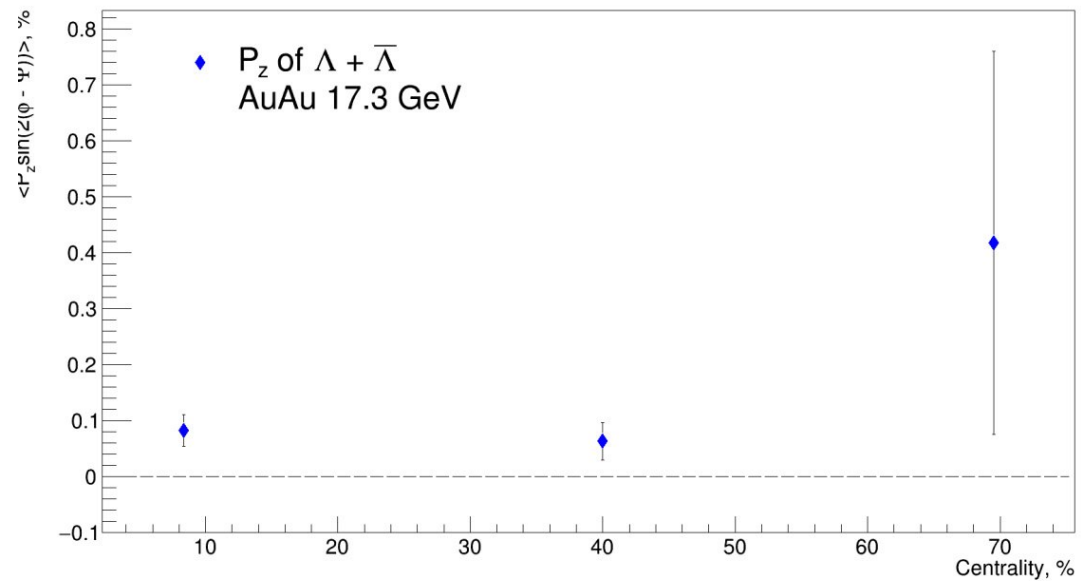
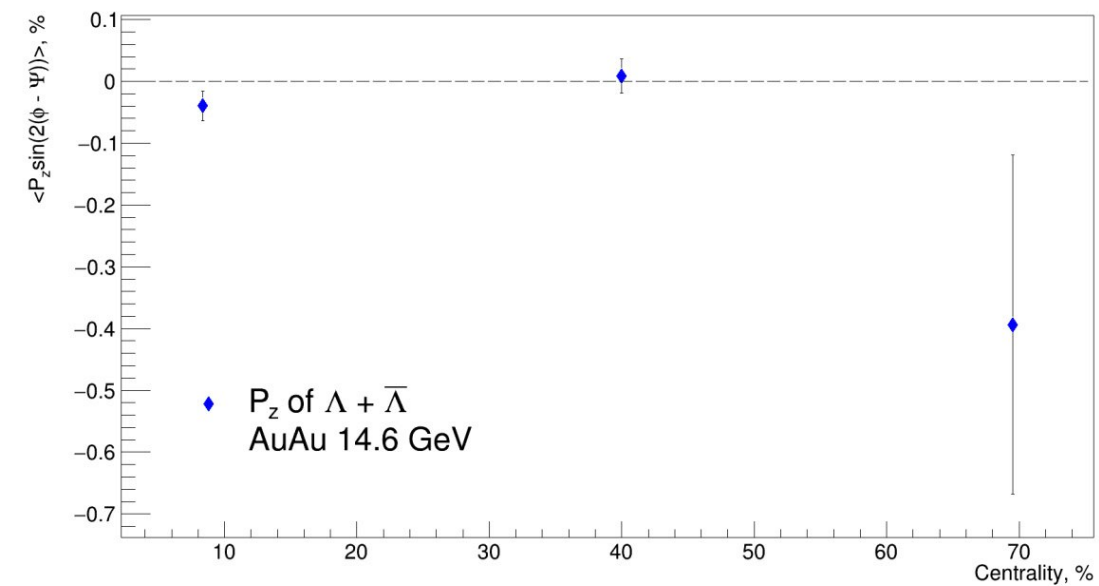
$\langle P_z \sin(2(\phi - \Psi)) \rangle$ Vs Centrality, 60 - 80% merged



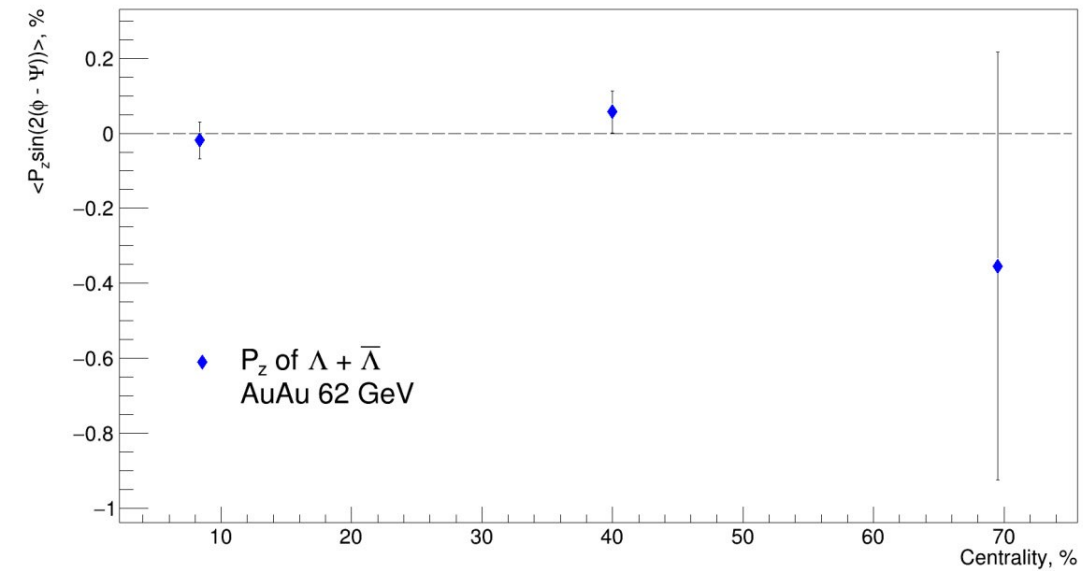
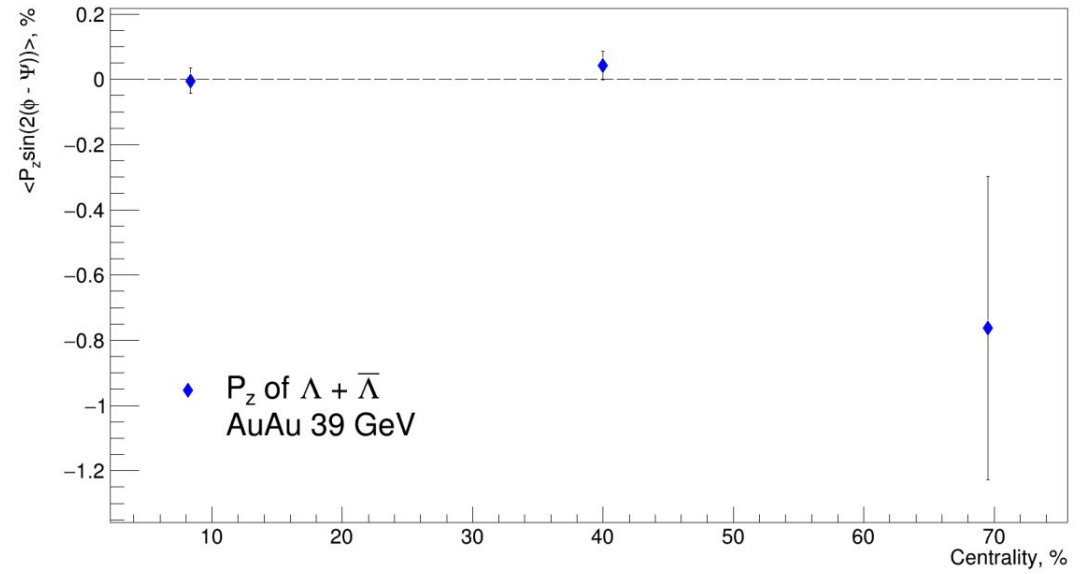
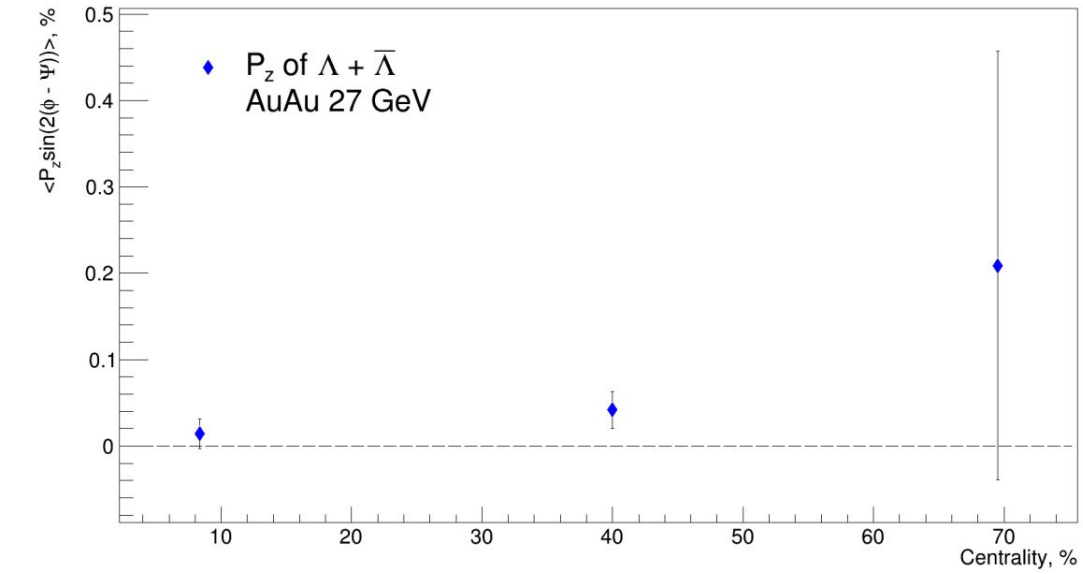
$\langle P_z \sin(2(\phi - \Psi)) \rangle$ Vs Centrality, 60 - 80% merged



$\langle P_z \sin(2(\phi - \Psi_2)) \rangle$ vs centrality for each energy

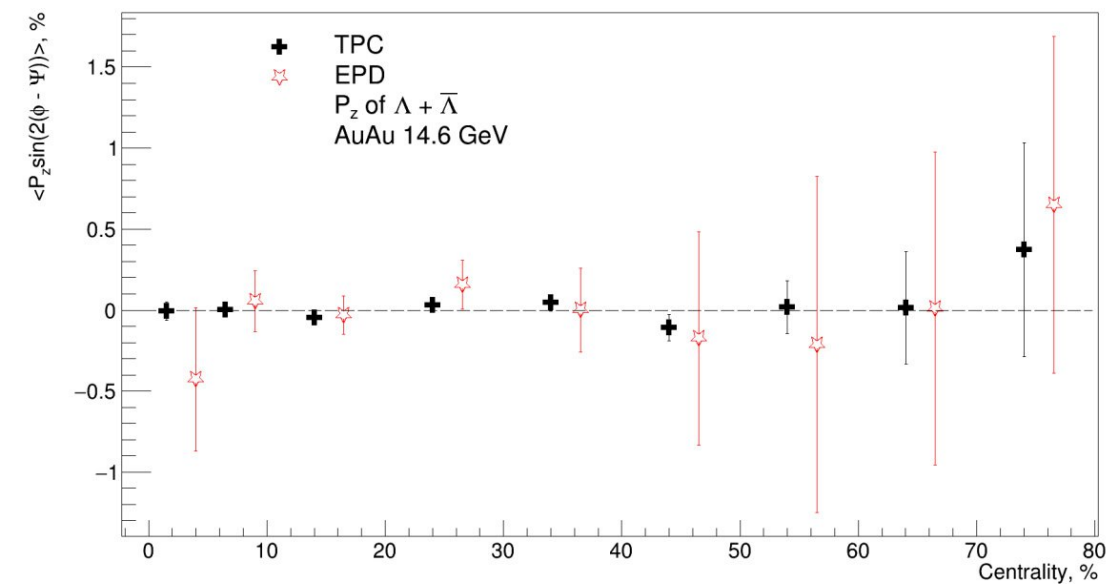


$\langle P_z \sin(2(\phi - \Psi_2)) \rangle$ vs centrality for each energy

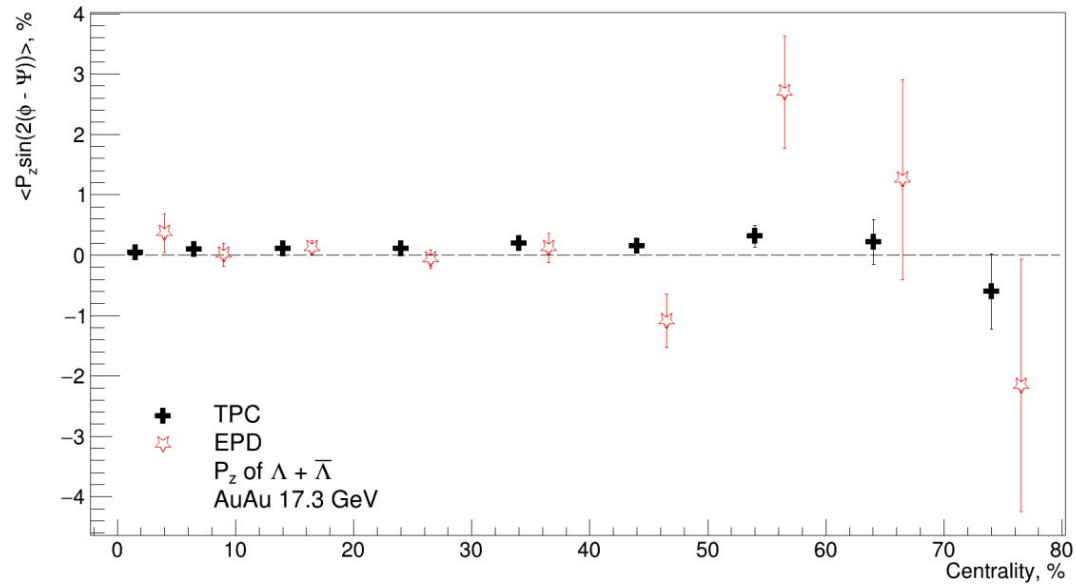


Comparison of results when planes were reconstructed using TPC and EPD

$\langle P_z \sin(2(\phi - \Psi)) \rangle$ Vs Centrality



$\langle P_z \sin(2(\phi - \Psi)) \rangle$ Vs Centrality



$\langle P_z \sin(2(\phi - \Psi)) \rangle$ Vs Centrality

