

A v_n harmonikusok nehézion-ütközésekben

Bagoly Attila

ELTE TTK

Kísérleti mag- és részecskefizikai szeminárium
2014. december 13.

Tartalomjegyzék

- 1 Bevezető
- 2 Tökéletes kvarkfolyadék
 - Kvark-gluon plazma
 - Hidrodinamika
 - Mérhető mennyiségek
- 3 A v_n paraméterek mérése
 - Eseménysík módszer
 - Kumulánsok módszere
- 4 v_n ábrák
 - A v_2 különböző centralitás és részecskék esetén
 - Skálaviselkedés
 - J/ψ részecske v_2 spektruma
 - Direkt fotonok v_2 spektruma

- Célunk: természet alapvető működésének megismerése
- Ma már tudjuk, hogy a minket körülvevő világ atomokból épül fel
- Jelenlegi tudásunk szerint minden felépíthető kvarkokból, leptonokból, bozonokból
- Kvarkok színtöltéssel rendelkeznek, erős kölcsönhatás ezek közt hat
- Erős kölcsönhatást a kvantum-színdinamika írja le, ez egy $SU(3)$ szimmetriájú kvantumtérelmélet
- QCD: kvarkbezártság és aszimptotikus szabadság (kvark-gluon plazma)
- Ősrobbanás

Az Ősrobbanás óta eltelt idő

13,7 milliárd év
(jelen)

Galaxisok kora

1 milliárd év

Atomok kora

300 000 év

Atommagok kora

3 perc

Nukleosintézis kora

0,001 mp

Részecskék kora

 10^{-10} mp

Elektrogyenge kor

 10^{-35} mp

Nagy Egyesítés kora

 10^{-43} mp

Planck kor

Fontos események az Ősrobbanás óta

Az ember
megfigyeli a
KozmosztCsillagok, galaxisok,
galaxisklaszterekElső galaxisok
létrejöttéAtomok és plazma
(csillagkeletkezés
kezdeté)Atomok létrejötté,
fotonok szabadon
repülnekHidrogén, hélium
atommagok, és
elektronokMagfúzió leáll,
normál anyag 75%-
a hidrogénProtonok, neutronok,
elektronok, neutrínók
(antianyag alig)Anyag és antianyag
annihilálElemi részecskék
(sok antianyag)Elektromágneses és
gyenge erők különválnak

Elemi részecskék

Erős kölcsönhatás különválk,
inflációs tágulás

Elemi részecskék

???

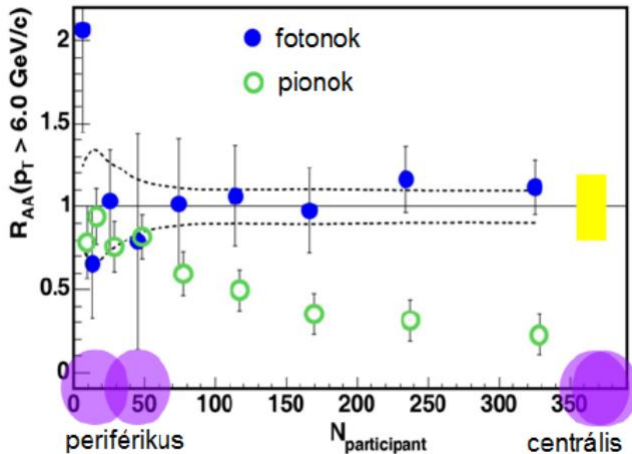
proton
neutronelektron
neutrínóantiproton
antineutronanti-
elektronok

kvarkok



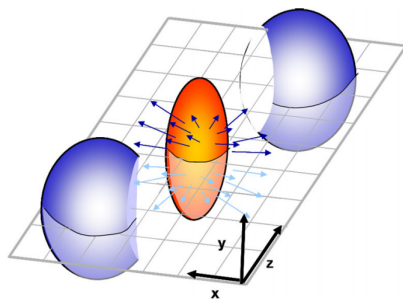
Kvark-gluon plazma

- Az elemi részecskék világának vizsgálata részecskegyorsítókban történik, két legnagyobb LHC és RHIC
- Hogyan fedezték fel?
- Kemény folyamatok: nagyenergiás részecskezáporok (jetek) keletkeznek, 2, impulzus megmaradás: ellentétes irányba haladnak
- Arany-Arany ütközés, nagy centralitás: a jetpár egyik tagja nem jelent meg
- Próba: Deutérium-arany ütközéseknél semmilyen centralistánál nincs jet-elnyomás
- Ebből következtettek erősen kölcsönható közeg létrejöttére



Kvark-gluon plazma

- Az új anyag vizsgálatából kiderült: QGP tökéletes folyadékként viselkedik
- Tökéletes folyadék: nincs viszkozitás! Ilyen magas hőmérsékleten?
- AdS/CFT alsó határ viszkozitásra: $\hbar/4\pi$
- Folyadék: kezdeti eloszlás aszimmetriája megjelenik a detektált részecskék spektrumaiban



Hidrodinamika

- Folyadékok kollektív viselkedésének leírására: HIDRODINAMIKA
- Fénysebességhez közeli sebességgel robban a kvarkfolyadék, ezért relativisztikus hidrodinamikát kell alkalmazni (energia-impulzus tenzor általános relativitáselméletből elegánsan kapható)

$$T^{\mu\nu} = (\varepsilon + p)u^\mu u^\nu - pg^{\mu\nu}, \quad \partial_\mu T^{\mu\nu} = 0 \quad (1)$$

- Állapotegyenlet: $\varepsilon = \kappa(T)p$
- Összeütköző atommagok speciális kezdeti eloszlásokat eredményeznek, a kezdeti eloszlásokban megjelenő aszimmetriákat fenti egyenletek szerint fejlődnek az időben

Mérhető mennyiségek

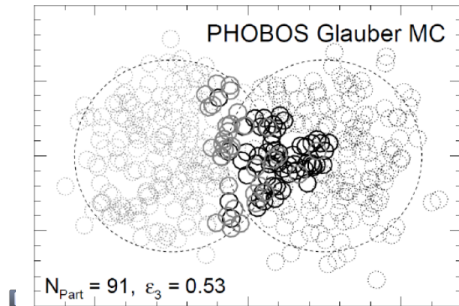
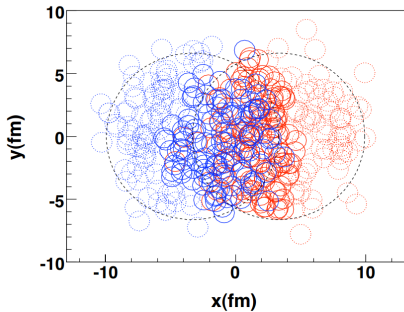
- A tágulás során a kvarkfolyadék hűl, amikor elér egy bizonyos hőmérsékletet kifagy (rácsQCD $T_c = 170\text{MeV}$)
- Kifagyást leírhatjuk:

$$S(x, p) d^4x = \mathcal{N} n(x) \exp\left(-\frac{p_\mu u^\mu}{T(x)}\right) H(\tau) p_\mu d^3\Sigma_\mu d\tau \quad (2)$$

- A forrásfüggvényt kiintegrálva a teljes térre kapjuk a p impulzusú részecskék számát: $N(p) = \int S(x, p) d^4x$
- Transzverz síkban a szögfüggő részt Fourier-sorba fejtjük:

$$N(p_t, \phi) = N(p_t) \left(1 + \sum_{n=1}^{\infty} \left[v_n \cos(n\phi)\right]\right) \quad (3)$$

- Legjelentősebb tag v_2 (elliptikus folyás), de mások is megjelenhetnek



A v_n paraméterek mérése

Eseménysík módszer

- A sorfejtés alapján a paraméterek megkaphatóak: $v_n = \langle \cos(n\phi) \rangle$
- Általában az eseményekre való átlagolást is beleértjük
- KR: nyalábirányba föl vesszük a z tengelyt, rá merőleges a transzverz sík
- A z tengely és az ellipszoid legközelebb eső tengelye valamilyen szöget zár be: $\theta_{\text{flow}} \approx \langle p_x \rangle / p_{\text{nyalab}}$
- El kell forgatni a KR-et a harmonikusok vizsgálatához! De nagy energián, kicsi a szög, ezért elhanyagoljuk

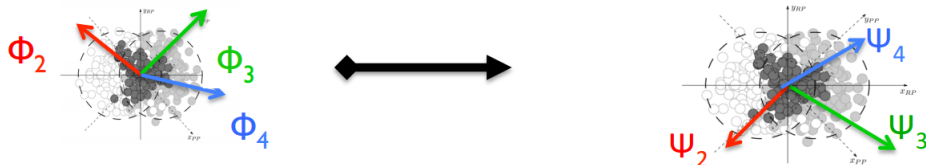
A v_n paraméterek mérése

Eseménysík módszer

- Transzverz síkban KR-et a detektorunk kitüntetheti, de ez nem a vizsgált objektumhoz igazodik
- v_n számolásánál sok eseményre átlagolunk, QGP tetszőlegesen el lehet fordulva, ezért nem tudjuk meghatározni a v_n paramétereket
- Másodrendű reakciósík: sebességvektorok jelölik ki, v_2 kezdőpontja
- Laborrendszer síkja nem releváns az adatok kiértékelésnél, ezért a másodrendű reakciósíkot tekintjük reakciósíknak
- Ebben a rendszerben ki meg tudjuk határozni a v_2 paramétert
- Ennek mintájára magasabb rendű reakciósíkok a v_3 , v_4 , stb. meghatározására

A v_n paraméterek mérése

Eseménysík módszer



- Nehéz feladat: bázisválasztás
- Ezek a kvarkfolyadék orientációjához rögzítettek
- Különböző eseményekre egymásba forgathatjuk

A v_n paraméterek mérése

Eseménysík módszer

- Tehát a reakciósíkhöz képest mindenik harmonikusnak más a kezdőpontja:

$$v_n = \langle \cos(n(\phi - \psi_n)) \rangle \quad (4)$$

- A ψ_n n-ed rendű reakciósíkot kísérletileg meghatározzuk, ekkor eseménysíknak szoktuk nevezni
- Az eloszlás n-edik harmonikusának folyási vektorát definiálhatjuk

$$X_n = Q_n \cos(n\psi_n) = \sum_i w_i \cos(n\phi) \quad (5)$$

$$Y_n = Q_n \sin(n\psi_n) = \sum_i w_i \sin(n\phi) \quad (6)$$

A v_n paraméterek mérése

Eseménysík módszer

- Az n -ed rendű reakciósík meghatározható:

$$\psi_n = \left(\tan^{-1} \frac{\sum_i w_i \sin(n\phi_i)}{\sum_i w_i \cos(n\phi_i)} \right) / n \quad (7)$$

- Összegzés részecskékre, a w_i súlyok lehetnek például a transzverz impulzus
- Meghatározzuk a reakciósíkokat, a különböző események esetén egymásba forgatjuk így megkaphatjuk a keresett v_n paramétereket
- Bármely n harmonikus meghatározható az m reakciósík segítségével amennyiben $n > m$ és n egész számú többszöröse m -nek

A v_n paraméterek mérése

Eseménysík módszer

- A meghatározott v_n értékeben különböző hibák jelennek meg, ezeket korrigálni kell
- Véges számú részecskét detektálunk ezért szögeloszlást véges pontossággal detektáljuk
- Ebből adódó hibára lehet korrigálni ha osztunk az eseménysík felbontásával, mert

$$\langle \cos(n(\phi - \Delta\psi)) \rangle = \langle \cos(n\phi) \rangle \langle \cos(n\Delta\psi) \rangle \quad (8)$$

- Tehát erre a hibára korrigálhatunk:

$$v_n = v_n^{\text{mert}} / \langle \cos(km(\psi_m - \psi_r)) \rangle \quad (9)$$

- n ő akkor k is nő, tehát magasabb rendű harmonikusokat pontatlanabbul mérünk

A v_n paraméterek mérése

Kumulánsok módszere

- Ötlet: keresett paramétereket valahogyan a részecskék korrelációjából határozzuk meg
- Azimutális (transzverz síkban) sokrészecske korrelációs függvény: $\langle e^{in(\phi_1 + \dots + \phi_k + \phi_{k+1} + \dots + \phi_{k+l})} \rangle$, átlagolás az összes részecskekombinációra és az eseményekre megy
- Kétrészecske korreláció esetén a következőképpen írható:

$$\langle e^{in(\phi_1 - \phi_2)} \rangle = \langle \langle e^{i2(\phi_1 - \phi_2)} \rangle \rangle + \langle e^{i2\phi_1} \rangle \langle e^{-i2\phi_2} \rangle \quad (10)$$

- Kifejezés első tagját másodrendű kumulánsnak nevezzük, ez a korrelációt méri, amennyiben nulla részecskék függetlenek
- Tökéletes detektor esetén a második tag 0, ekkor a bevezetett korrelációs függvény nulla ha a részecskék közt nincs korreláció

A v_n paraméterek mérése

Kumulánsok módszere

- Tekintsük a részecskék szögeloszlását:

$$N(\phi) = \frac{1}{2\pi} \left[1 + \sum_n v_n \cos(n(\phi - \psi_n)) \right] \quad (11)$$

- Tökéletes detektort feltételezve felírhatjuk a fenti mennyiségeket:

$$\int_0^\pi \int_0^{2\pi} N(\phi_i) e^{\pm i2\phi_i} d\phi_i d\psi_2 = 0 \quad (12)$$

$$\int_0^\pi \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} N(\phi_1) N(\phi_2) e^{i2(\phi_1 - \phi_2)} d\phi_1 d\phi_2 d\psi_2 = \frac{v_2^2}{4\pi} \quad (13)$$

- Tehát a keresett v_2 paraméter a másodrendű kumulánsal megadható
 $v_2^2 = \langle \langle e^{i2(\phi_1 - \phi_2)} \rangle \rangle + \langle e^{i2\phi_1} \rangle \langle e^{-i2\phi_2} \rangle$

A v_n paraméterek mérése

Kumulánsok módszere

- Probléma: nem folyási tagok is adhatnak járulékot a korrelációban (pl. jet)
- Nem folyási tagok $1/M$ -el arányosak, ahol M a detektált részecskék száma
- Láttuk, hogy folyási tagok v_n^2 arányosak
- Kétrészecske korreláció jó, ha: $v_n \gg 1/\sqrt{M}$
- Többrészecskés korreláció adhat pontosabb eredményt?
- Négyrészecske korreláció esetén folyási tagok v_n^4
- Nem folyási tagok pedig $1/M^3$ arányosak
- Tehát itt $v_n \gg 1/M^{3/4}$, nagy M esetén jelentős különbség

A v_n paraméterek mérése

Kumulánsok módszere

- Hogy néz ki a négyrészecskés korreláció?

$$\begin{aligned} \langle e^{in(\phi_1+\phi_2-\phi_3-\phi_4)} \rangle &= \langle \langle e^{in(\phi_1+\phi_2-\phi_3-\phi_4)} \rangle \rangle \\ &+ \langle e^{in(\phi_1-\phi_3)} \rangle \langle e^{in(\phi_2-\phi_4)} \rangle + \langle e^{in(\phi_1-\phi_4)} \rangle \langle e^{in(\phi_2-\phi_3)} \rangle \end{aligned}$$

- Ha párosával korreláltak csak a második két tag ad járulékot
- A kumulánsok előállítására definiáljuk a következő függvényt:

$$G_n(z) = \prod_{j=1}^M \left(1 + \frac{ze^{-in\phi_j} + z^*e^{in\phi_j}}{M} \right)$$

A v_n paraméterek mérése

Kumulánsok módszere

- Átlagoljuk az M multiplicitású eseményekre:

$$\langle G_n(z) \rangle = 1 + \frac{z}{M} \left\langle \sum_j e^{-in\phi_j} \right\rangle + \frac{z^*}{M} \left\langle \sum_j e^{in\phi_j} \right\rangle + \frac{z^2}{M} \left\langle \sum_{j < k} e^{-in(\phi_j - \phi_k)} \right\rangle + \dots$$

- Sorfejtés

$$\langle G_n(z) \rangle = 1 + z \langle e^{-in\phi_1} \rangle + z^* \langle e^{in\phi_1} \rangle + \frac{M-1}{M} \left[\frac{z^2}{2} \langle e^{-in(\phi_1 + \phi_2)} \rangle + \frac{z^{*2}}{2} \langle e^{in(\phi_1 + \phi_2)} \rangle + \frac{zz^*}{2} \langle e^{in(\phi_1 - \phi_2)} \rangle \right] + \dots$$

- $z^{*k} z^l$ tagig sorbafejtve épp a $(k+l)$ részecske korrelációt kapjuk

A v_n paraméterek mérése

Kumulánsok módszere

- Definiáljuk a generátorfüggvényt és fejtsük sorba:

$$C_n(z) \equiv M(\langle G_n(z) \rangle^{1/M} + 1) = \sum_{k,l} \frac{z^{*k} z^l}{k!l!} \langle \langle e^{in(\phi_1 + \dots + \phi_k - \dots - \phi_{k+l})} \rangle \rangle$$

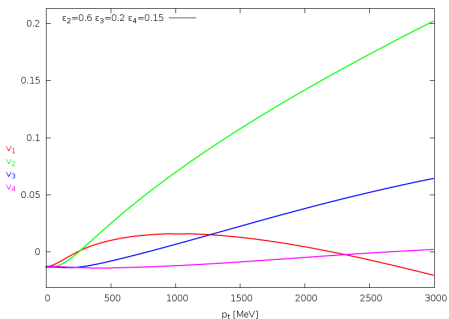
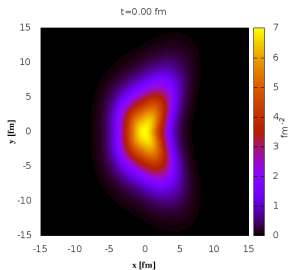
- Tökéletes detektor csak a diagonális elemeket méri, fizikailag csak ezek relevánsak, ezeket jelöljük $c_n\{2k\} = \langle \langle e^{in(\phi_1 + \dots + \phi_k - \dots - \phi_{2k})} \rangle \rangle$
- Keresett paraméterek felírhatóak: $v_n^2\{2\} = c_n\{2\}$, $v_n^4\{4\} = -c_n\{4\}$

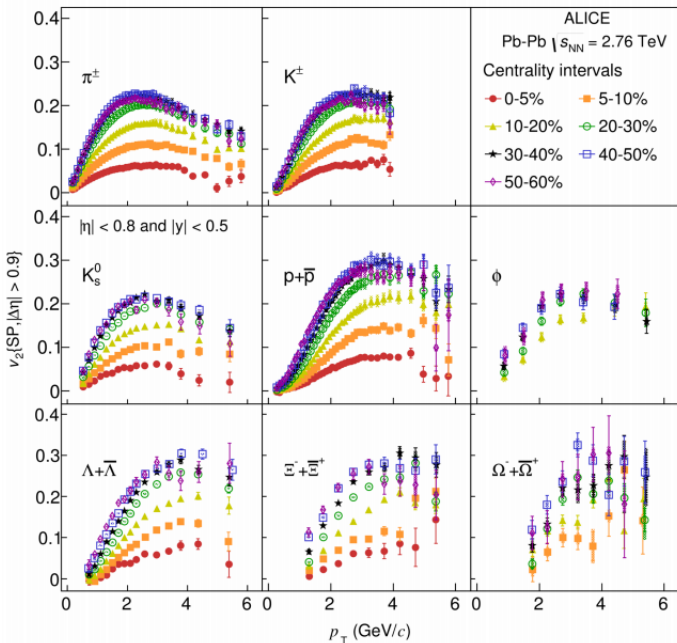
A v_n paraméterek mérése

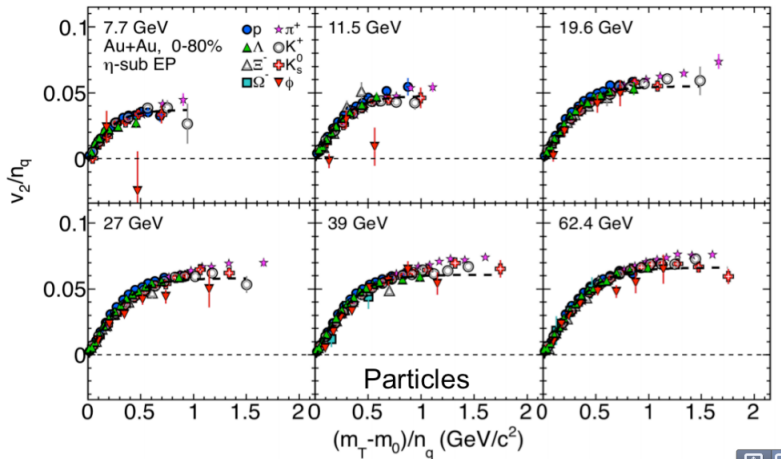
Kumulánsok módszere

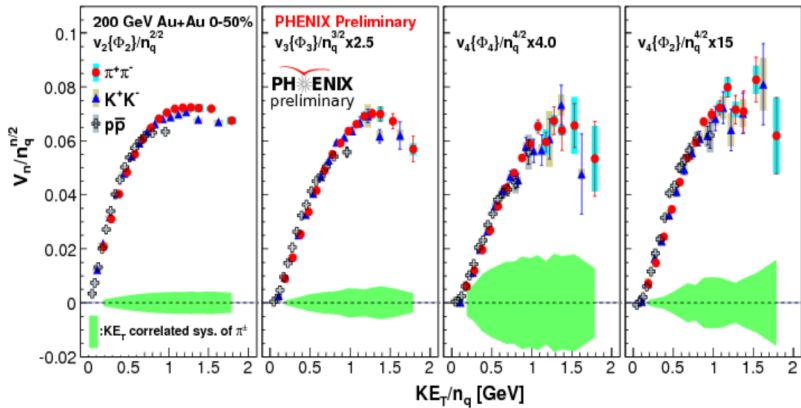
- Az így kapott paraméterek és a valós paraméterek közti legnagyobb eltérés: nem folyási tagok járuléka
- $2k$ részecske korrelációban nem folyási tagok járuléka M^{1-2k} nagyságrendű
- Hiba kicsi legyen: $v_n^{2k} \gg M^{1-2k}$
- Statisztikus hiba a részecskék véges számából is adódik
- Hányféleképp választhatunk ki $2k$ eseményt M multiplicitás esetén? (Becslés $M^{2k}N$)
- A hiba $1/\sqrt{M^{2k}N}$ -vel arányos
- Kísérletben optimális: négyrészecske korreláció

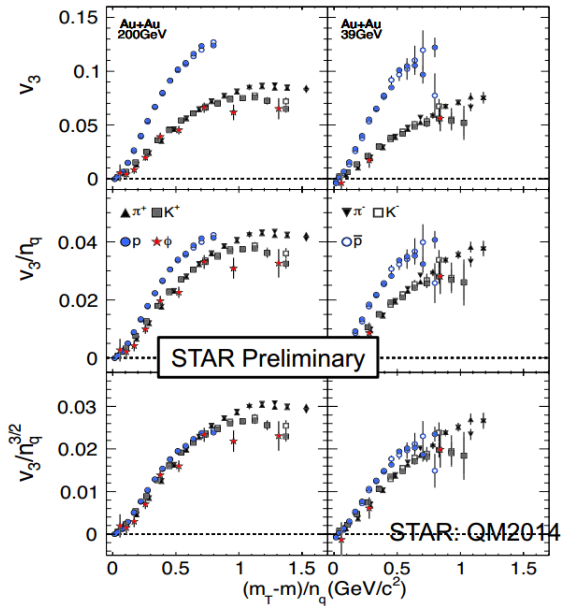
Adott kezdőeloszlás, milyen v_n spektrum?

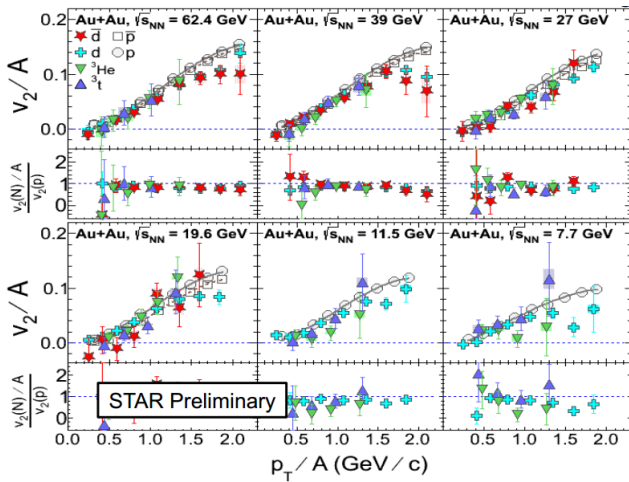


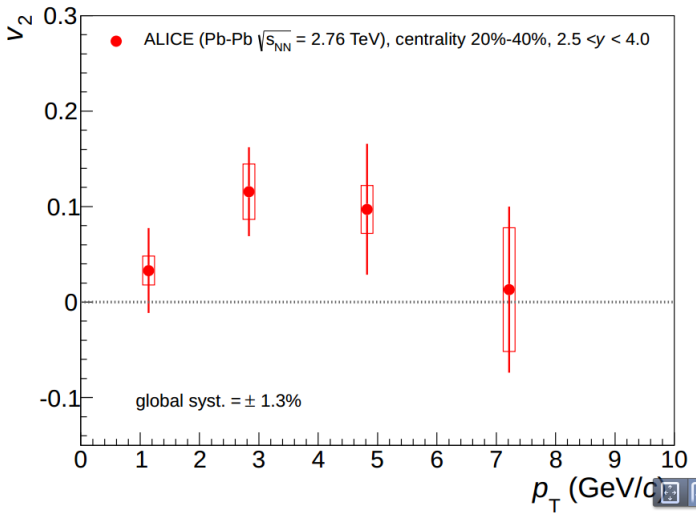


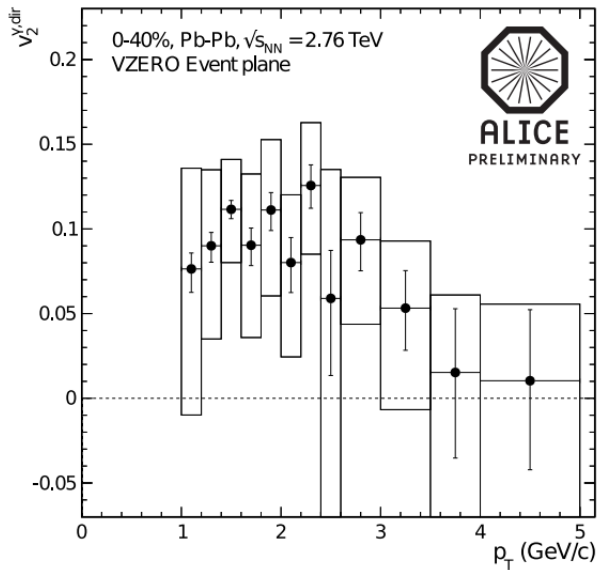












Köszönöm a figyelmet!

Köszönöm a figyelmet!