A v_n harmonikusok nehézion-ütközésekben

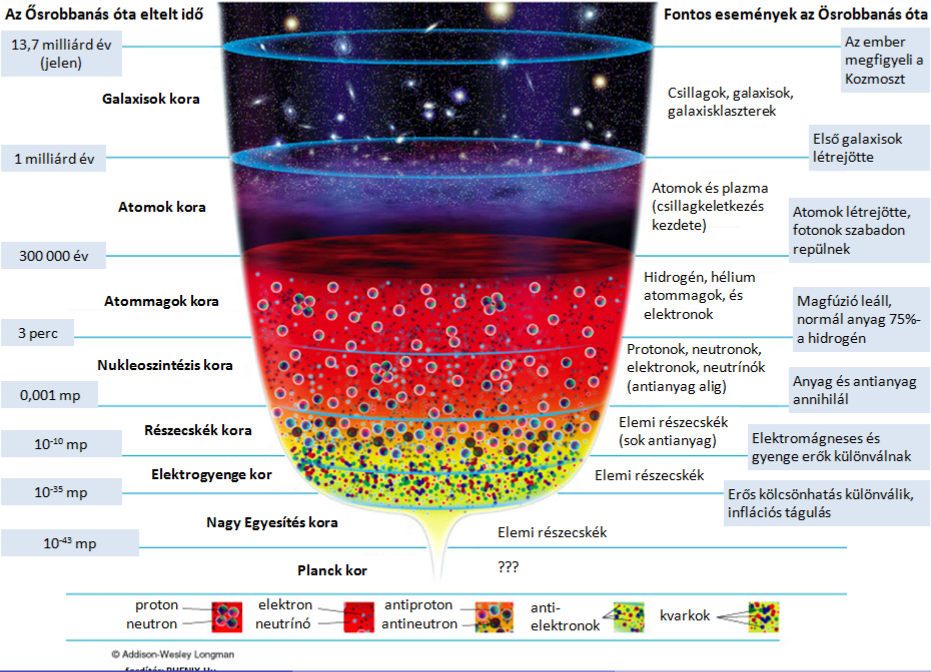
Bagoly Attila

ELTE TTK

Kísérleti mag- és részecskefizikai szeminárium
2014. november 27.

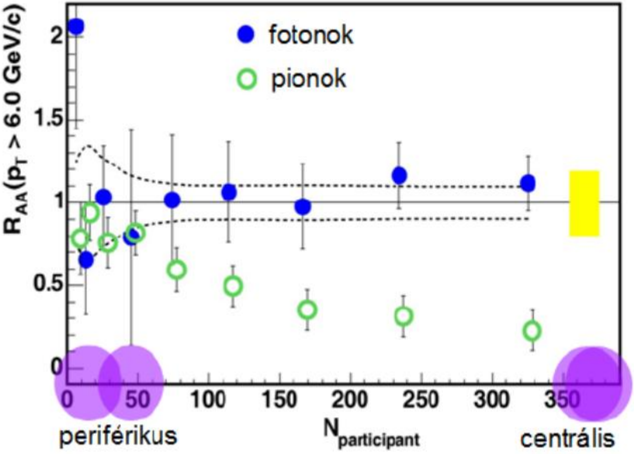
Tartalomjegyzék

- 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 $\mathrm{SU}(3)$ szimmetriájú kvantumtérelmélet
- QCD: kvarkbezártság és aszimptotikus szabadság (kvark-gluon plazma)
- Ősrobbanás


Az Ősrobbanás óta eltelt idő
Fontos események az Ősrobbanás óta
13,7 milliárd év (jelen)
Az ember megfigyeli a Kozmoszt
Galaxisok kora
Csillagok, galaxisok, galaxisklaszterek
1 milliárd év
Első galaxisok létrejötte
Atomok kora
Atomok és plazma (csillagkeletkezés kezdete)
Atomok létrejötte, fotonok szabadon repülnek
300 000 év
Atommagok kora
Hidrogén, hélium atommagok, és elektronok
Magfúzió leáll, normál anyag 75%-a hidrogén
3 perc
Nukleoszintézis kora
Protonok, neutronok, elektronok, neutrínók (antianyag alig)
Anyag és antianyag annihilál
0,001 mp
Részecskék kora
Elemi részecskék (sok antianyag)
Elektromágneses és gyenge erők különválnak
10^{-10} mp
Elektrogyenge kor
Elemi részecskék
10^{-35} mp
Erős kölcsönhatás különválik, inflációs tágulás
Nagy Egyesítés kora
Elemi részecskék
10^{-43} mp
Planck kor
???
proton
neutron
elektron
neutrínó
antiproton
antineutron
anti-elektronok
kvarkok
© Addison-Wesley Longman

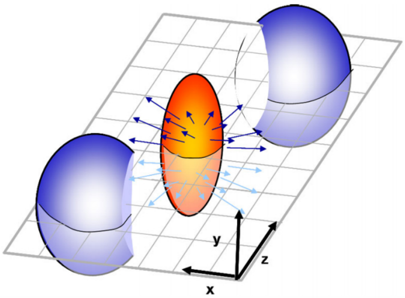
Kvark-gluon plazma

- 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


fotonok
pionok
$R_{AA}(p_T > 6.0$ GeV/c)
0
0.5
1
1.5
2
0
50
100
150
200
250
300
350
$N_{participant}$
periférikus
centrális

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)

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

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

Mérhető mennyiségek

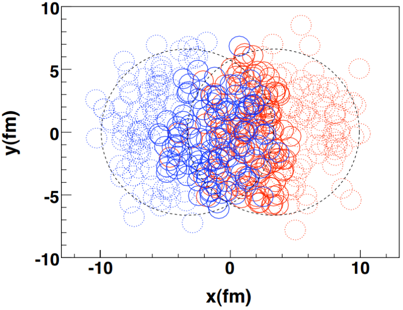
- A tágulás során a kvarkfolyadék hűl, amikor elér egy bizonyos hőmérsékletet kifagy (rácsQCD $T_c = 170 MeV$)
- Kifagyást leírhatjuk:

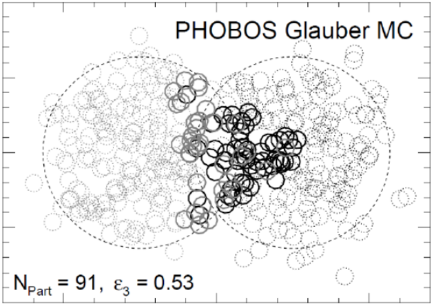
$$S(x,p)d^4x = \mathcal{N} n(x) \exp\left(-\frac{p_\mu u^\mu}{T(x)}\right) H(\tau) p_\mu d^3\Sigma_\mu d\tau \qquad (2)$$

- 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:

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

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


10
5
0
-5
-10
-10
0
10
y(fm)
x(fm)


PHOBOS Glauber MC
N_{Part} = 91, ε_3 = 0.53

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 fölvesszük a z tengelyt, rá merőleges a transzverz sík
- A z tengely és az ellipszoid legközelebb eső tengelye valamilyen szöget zár be: $\theta_{\mathrm{flow}} \approx \langle p_x \rangle / p_{\mathrm{nyalab}}$
- El kell forgatni a KR-et a harmonikusok vizsgálatához! De nagy energián, kicsi a szög, ezért elhanyagoljuk

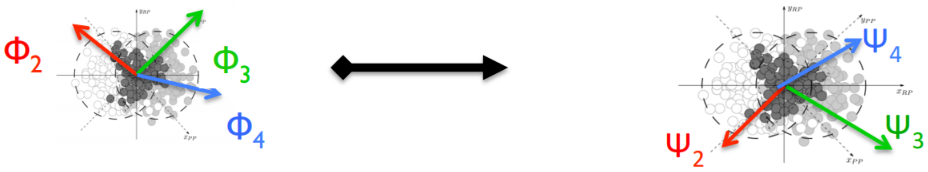
A v_n paraméterek mérése

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 reakciósíkhoz képest mindenik harmonikusnak más a kezdőpontja:

$$v_n = \langle \cos(n(\phi - \psi_n)) \rangle \tag{4}$$

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

$$X_n = Q_n \cos(n\psi_n) = \sum_i w_i \cos(n\phi) \tag{5}$$

$$Y_n = Q_n \sin(n\psi_n) = \sum_i w_i \sin(n\phi) \tag{6}$$

A v_n paraméterek mérése

Eseménysík módszer

- Az n-ed rendű reakciósík meghatározható:

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

- 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

$$\langle \cos(n(\phi - \Delta\psi)) \rangle = \langle \cos(n\phi) \rangle \langle \cos(n\Delta\psi) \rangle \tag{8}$$

- Tehát erre a hibára korrigálhatunk:

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

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

A v_n paraméterek mérése

Kumulánsok módszere

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

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

- 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:

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

- Tökéletes detektort feltételezve felírhatjuk a fenti mennyiségeket:

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

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

- 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?

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

- 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:

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

- Sorfejtés

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

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

A v_n paraméterek mérése

Kumulánsok módszere

- Definiáljuk a generátorfüggvényt és fejtsük sorba:

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

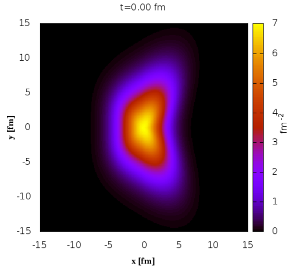
- Tökéletes detektor csak a diagonális elemeket méri, fizikailag csak ezek relevánsak, ezeket jelöljük $c_n\{2k\} = \langle\langle e^{in(\phi_1 + \ldots + \phi_k - \ldots \phi_{2k})}\rangle\rangle$
- Keresett paraméterek felírhatóak: $v_n^2\{2\} = c_n\{2\}$, $v_n^4\{4\} = -c_n\{4\}$

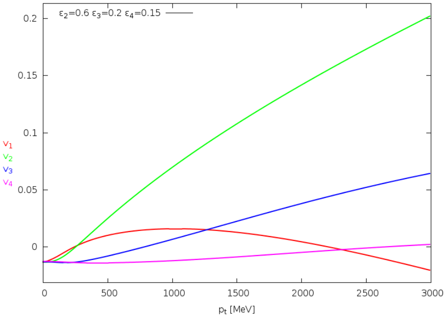
A v_n paraméterek mérése

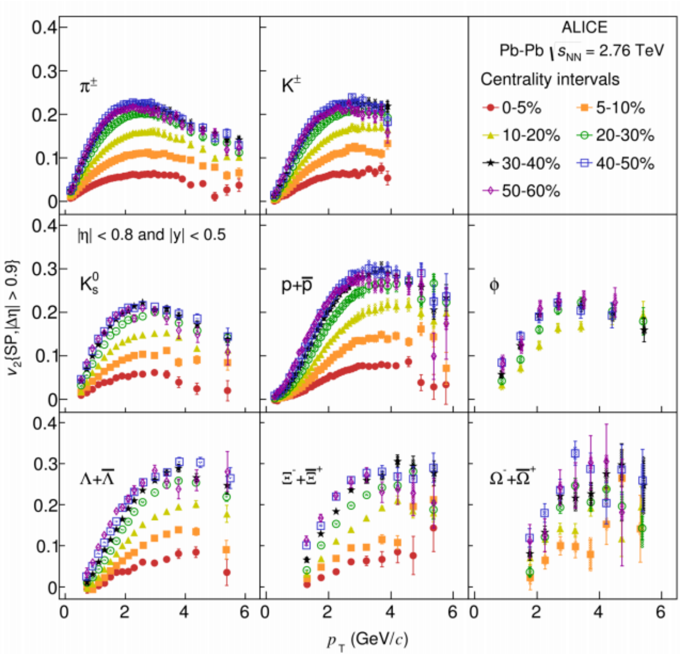
Kumulánsok módszere

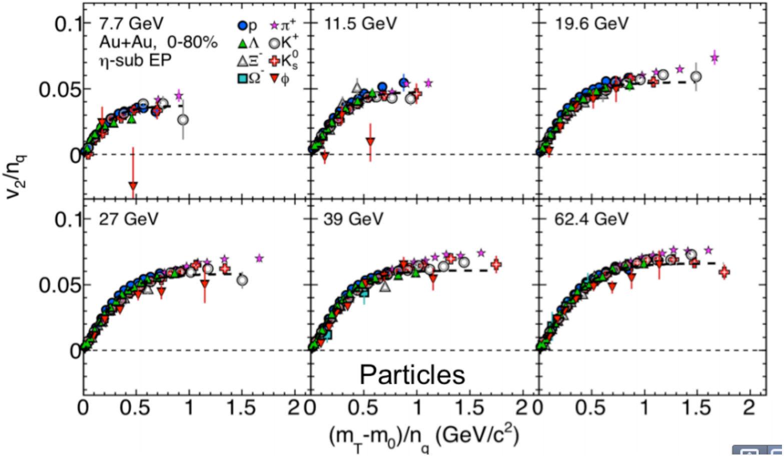
- Az így kapott paraméterek és a valós paraméterek közti legnagyobb eltérés: nem folyási tagok járuléka
- $2k$ részecske korrelációban nem folyási tagok járuléka M^{1-2k} nagyságrendű
- Hiba kicsi legyen: $v_n^{2k} \gg M^{1-2k}$
- Statisztikus hiba a részecskék véges számából is adódik
- Hányféleképp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

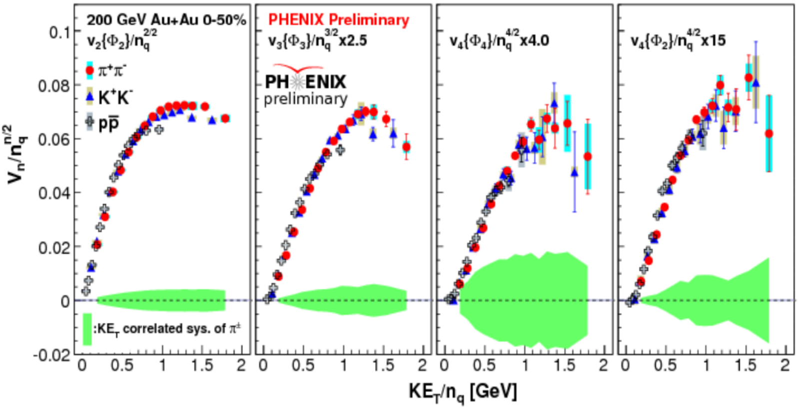
Adott kezdőeloszlás, milyen v_n spektrum?

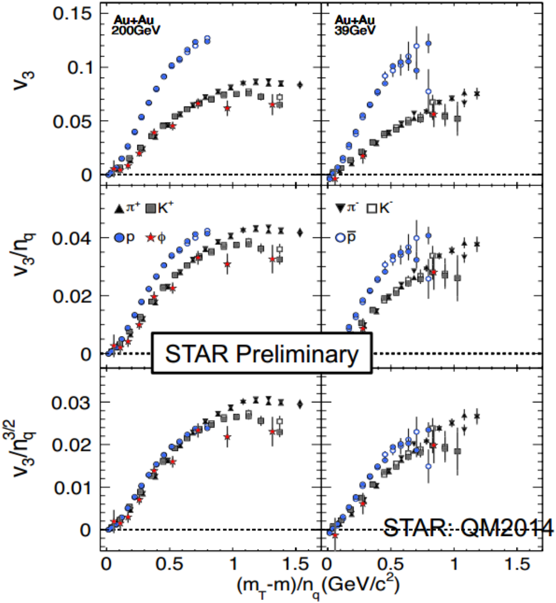




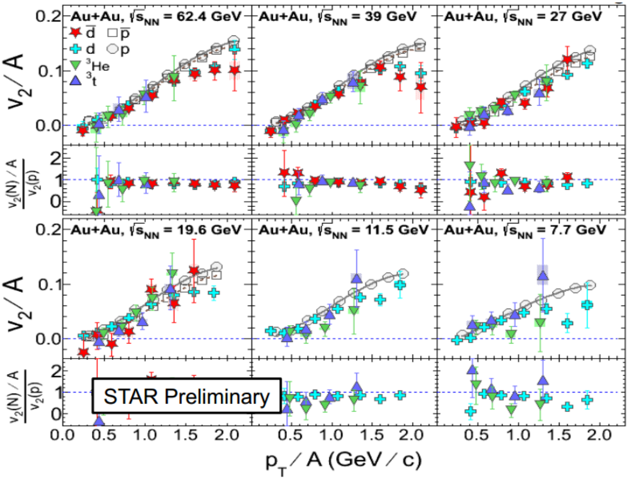

ALICE
Pb-Pb $\sqrt{s_{NN}}$ = 2.76 TeV
Centrality intervals
0-5%
5-10%
10-20%
20-30%
30-40%
40-50%
50-60%
$\pi^{\pm}$
$K^{\pm}$
$|\eta| < 0.8$ and $|y| < 0.5$
K^0_s
$p+\bar{p}$
ϕ
$\Lambda+\bar{\Lambda}$
$\Xi^- + \bar{\Xi}^+$
$\Omega^- + \bar{\Omega}^+$
$v_2\{SP, |\Delta\eta| > 0.9\}$
p_T (GeV/c)
0
0.1
0.2
0.3
0.4
2
4
6

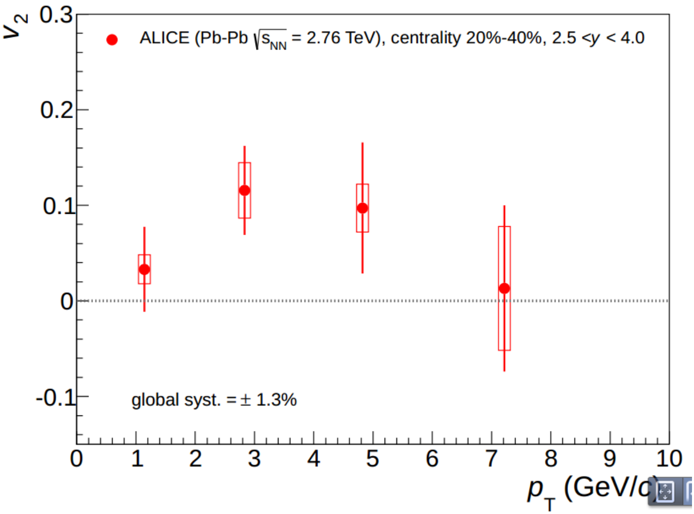

7.7 GeV
Au+Au, 0-80%
η-sub EP
p
π+
Λ
K+
Ξ-
K0s
Ω-
φ
11.5 GeV
19.6 GeV
27 GeV
39 GeV
62.4 GeV
Particles
v2/nq
(mT-m0)/nq (GeV/c2)
0.1
0.05
0
0.5
1
1.5
2

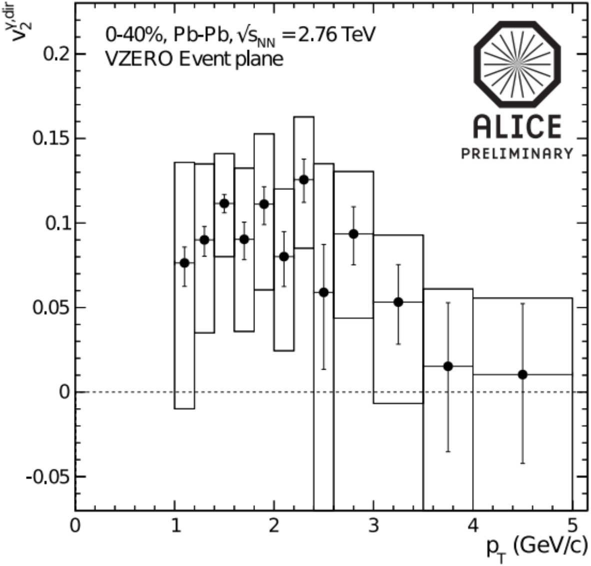

200 GeV Au+Au 0-50%
v2{Φ2}/nq^2/2
π+π-
K+K-
pp̄
:KE_T correlated sys. of π±
PHENIX Preliminary
v3{Φ3}/nq^3/2 x2.5
PHENIX
preliminary
v4{Φ4}/nq^4/2 x4.0
v4{Φ2}/nq^4/2 x15
Vn/nq^n/2
KE_T/nq [GeV]



Au+Au 200GeV
Au+Au 39GeV
v_3
v_3/n_q
$v_3/n_q^{3/2}$
▲π^+ ■K^+
●p ★ϕ
▼π^- □K^-
○$\bar{p}$
STAR Preliminary
STAR: QM2014
$(m_T-m)/n_q\,(GeV/c^2)$


Au+Au, $\sqrt{s_{NN}}$ = 62.4 GeV
Au+Au, $\sqrt{s_{NN}}$ = 39 GeV
Au+Au, $\sqrt{s_{NN}}$ = 27 GeV
Au+Au, $\sqrt{s_{NN}}$ = 19.6 GeV
Au+Au, $\sqrt{s_{NN}}$ = 11.5 GeV
Au+Au, $\sqrt{s_{NN}}$ = 7.7 GeV
$\bar{d}$
$\bar{p}$
d
p
^{3}He
^{3}t
v_2/A
$\frac{v_2(N)/A}{v_2(p)}$
p_T/A (GeV/c)
STAR Preliminary


ALICE (Pb-Pb $\sqrt{s_{NN}}$ = 2.76 TeV), centrality 20%-40%, 2.5 <y < 4.0
global syst. = ± 1.3%
v_2
0.3
0.2
0.1
0
-0.1
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
p_T (GeV/c)


0-40%, Pb-Pb, √s_NN = 2.76 TeV
VZERO Event plane
ALICE
PRELIMINARY
v_2^{γ,dir}
0.2
0.15
0.1
0.05
0
-0.05
0
1
2
3
4
5
p_T (GeV/c)

Köszönöm a figyelmet!