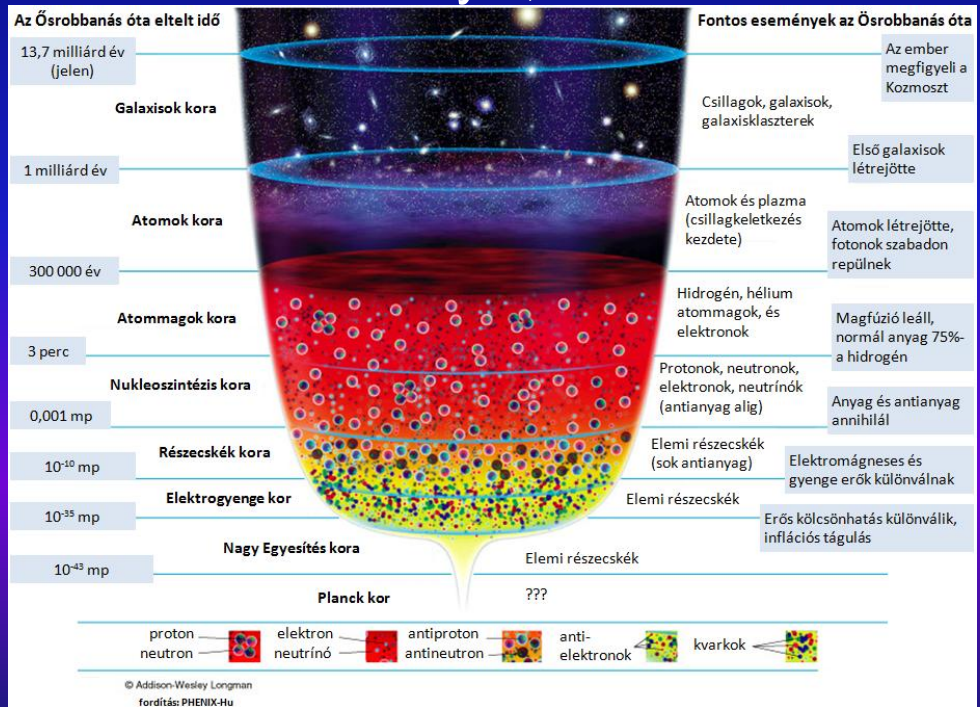
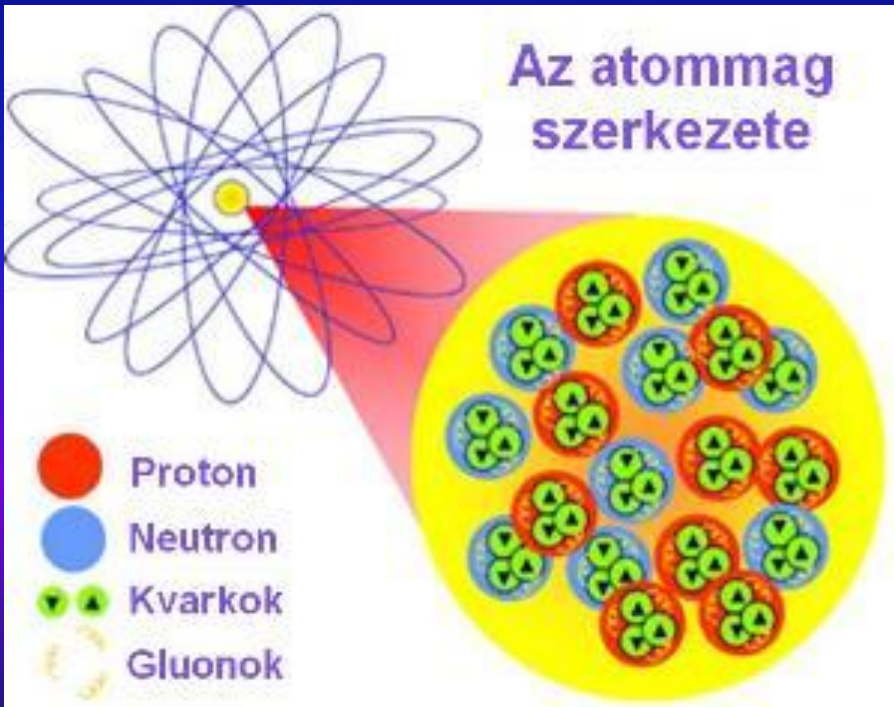


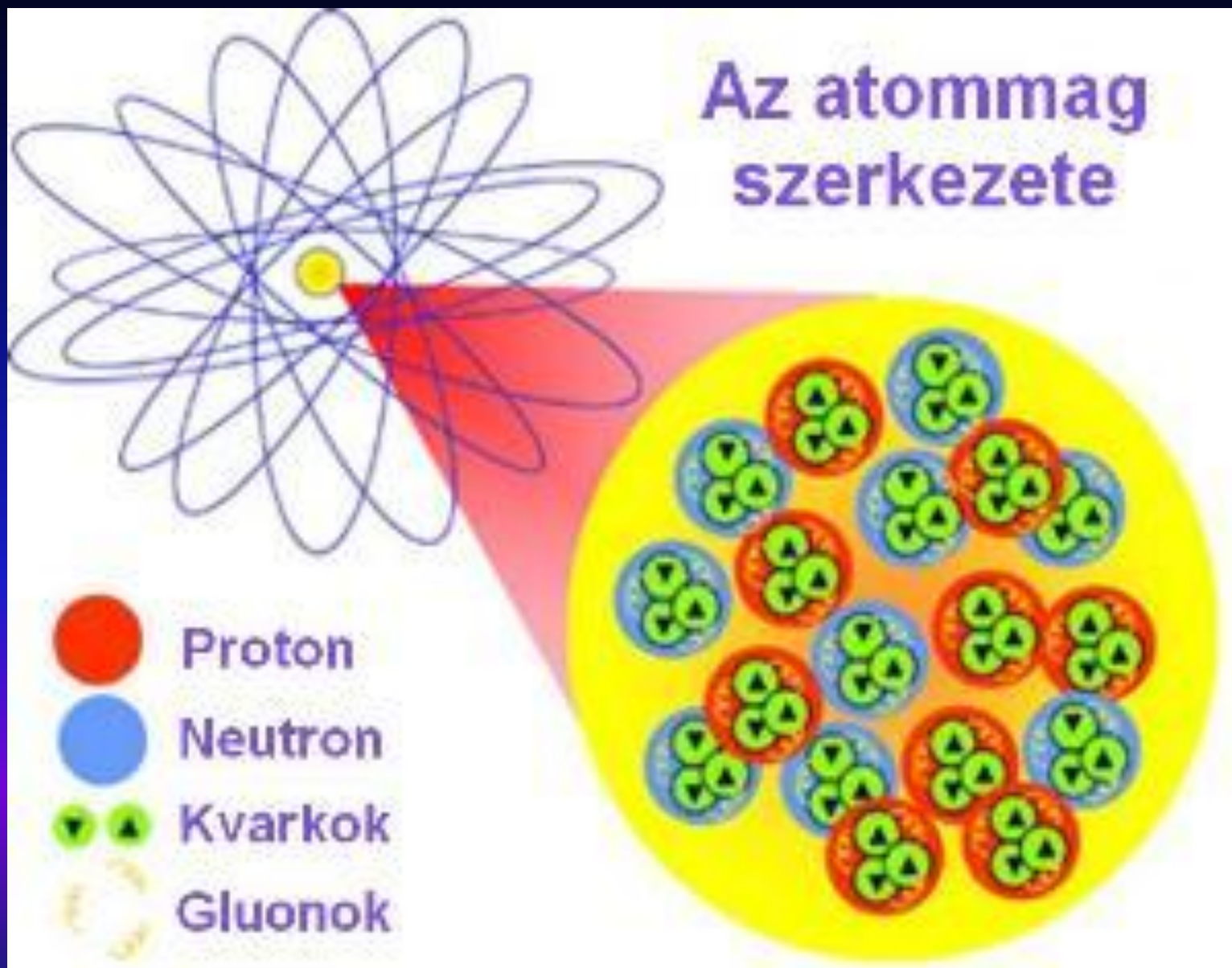
A QCD KRITIKUS PONT KÍSÉRLETI KUTATÁSA ÉS A RHIC \sqrt{s} PÁSZTÁZÁSI PROGRAM ELSŐ EREDMÉNYEI

Csörgő Tamás
MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont

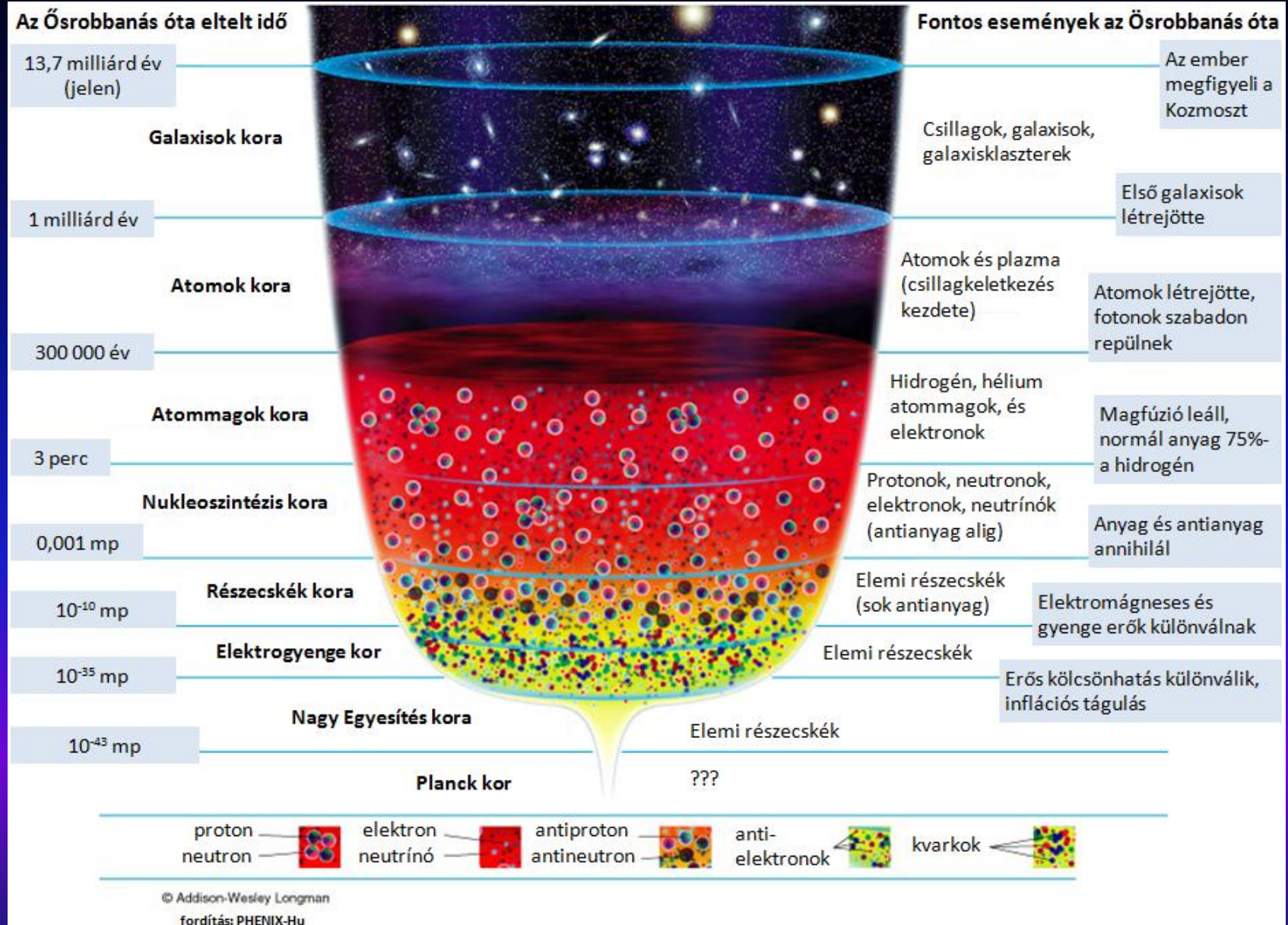
A RHIC mérföldkövei
A termodinamikai és hidrodinamikai kép és korlátai
A QCD kritikus pontja és keresésének stratégiája
A PHENIX és a STAR első eredményei, $\sqrt{s} = 14-60$ GeV



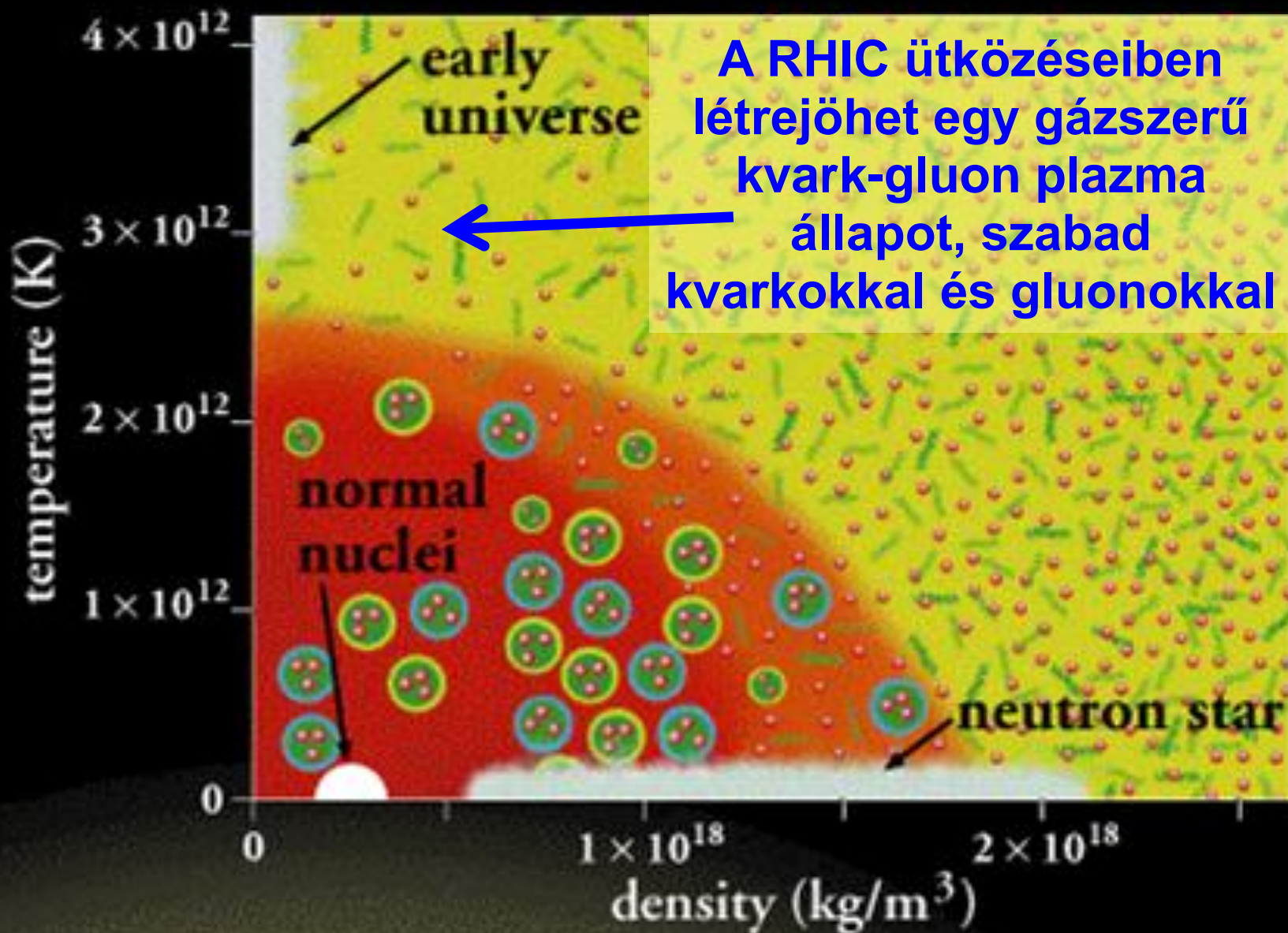
ATOMOK ÉS AZ ATOMMAG SZERKEZETE



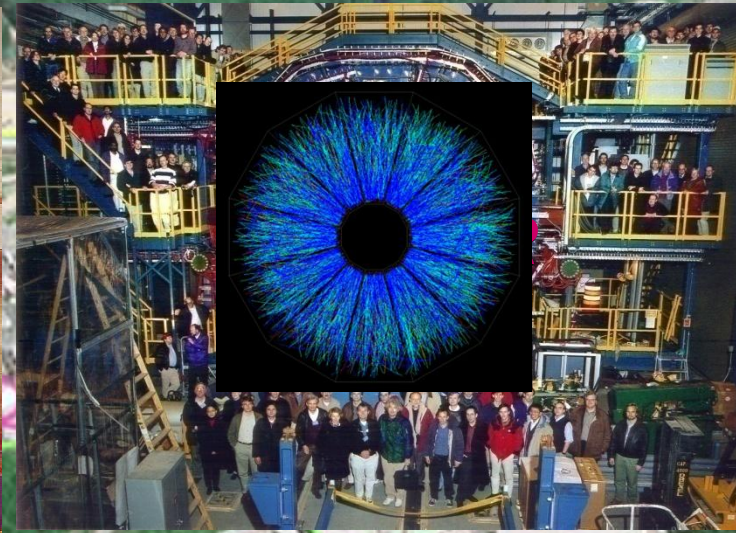
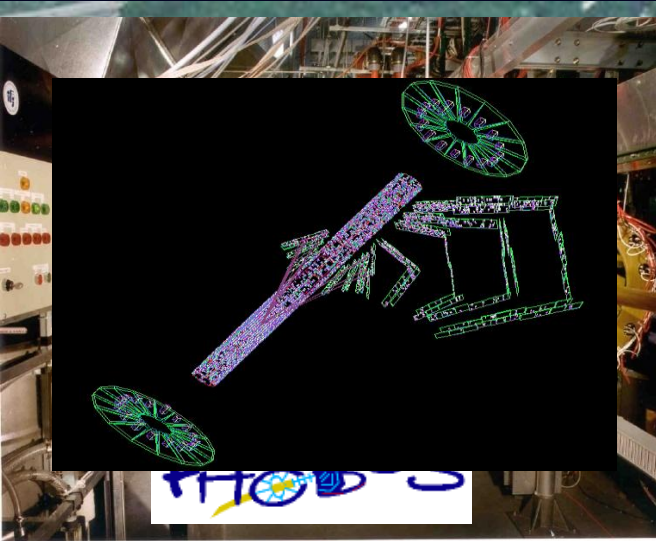
VILÁGEGYETEMÜNK ÉS A MAI FIZIKA



Várakozás 2000 körül



A RHIC gyorsító és a 4 RHIC kísérlet



Nyelvezet

A használt alapvető nukleáris tulajdonságok: **A, Z ...**

A nehézionfizika specifikus mennyiségei

V_2 Azimutális anizotrópia - Fourier együttható- “elliptikus folyás”

R_{AA} Nukleáris modifikációs faktor (AA/pp spektrum arány),
értéke 1 ha nincs magfizikai hatás

R_{CP} Nukleáris modifikációs faktor (centrális/periferiális spektrum arány),
értéke 1 ha nincs magfizikai hatás

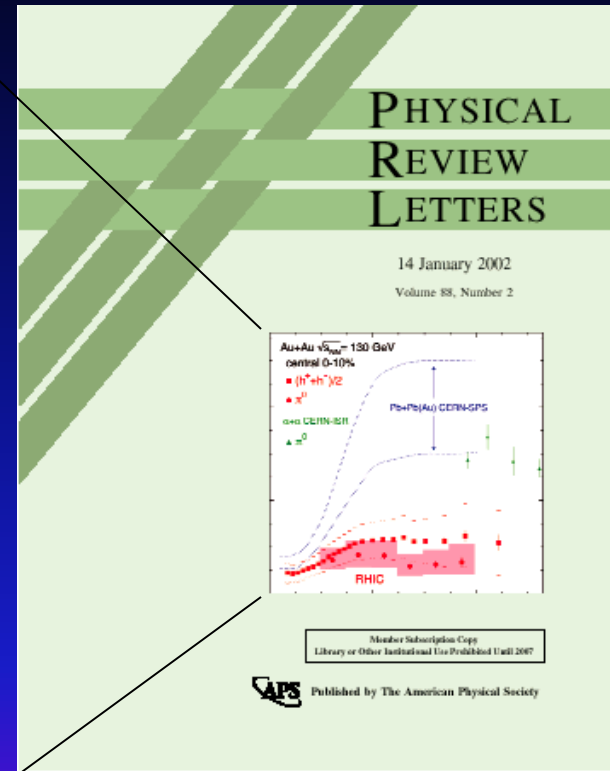
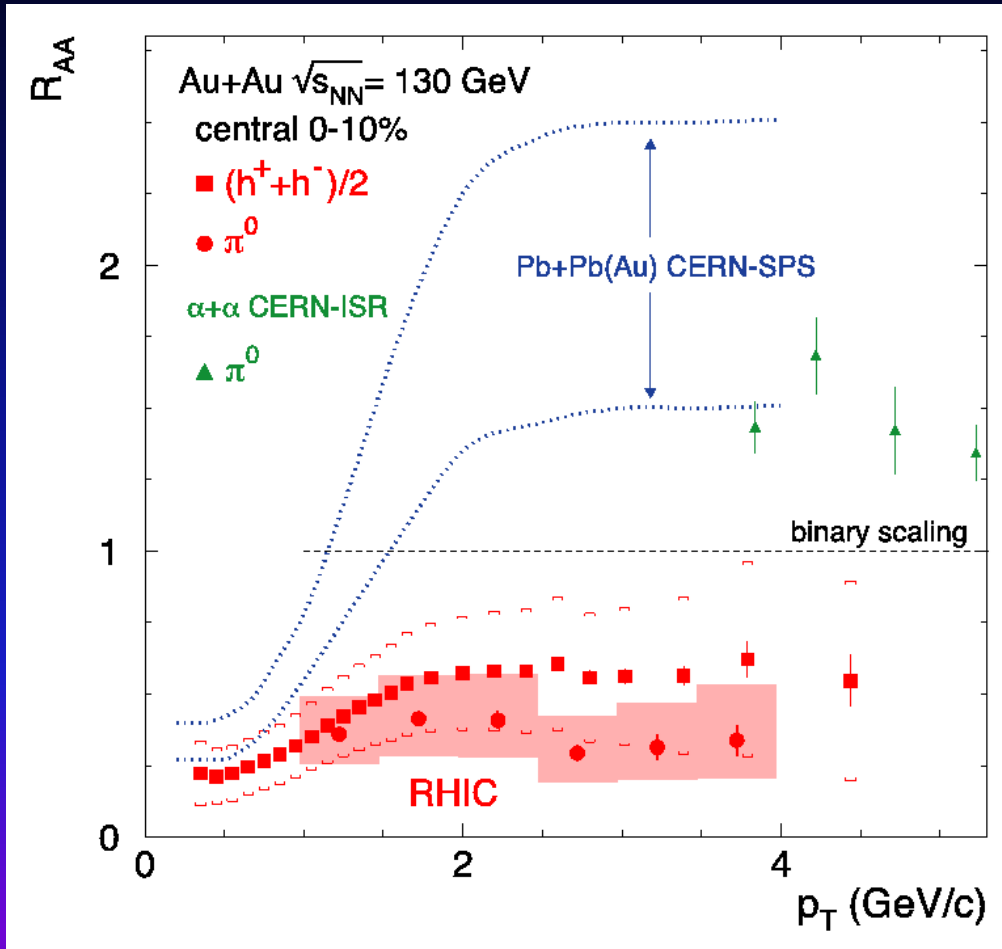
T Hőmérséklet (**MeV**)

μ_B Barion kémiai potenciál (**MeV**) ~ *nettó* barion sűrűség

η Viskozitás (**MeV³**) ($\hbar = c = 1$)

S Entrópiasűrűség (**MeV³**) ~ “részecske” sűrűség

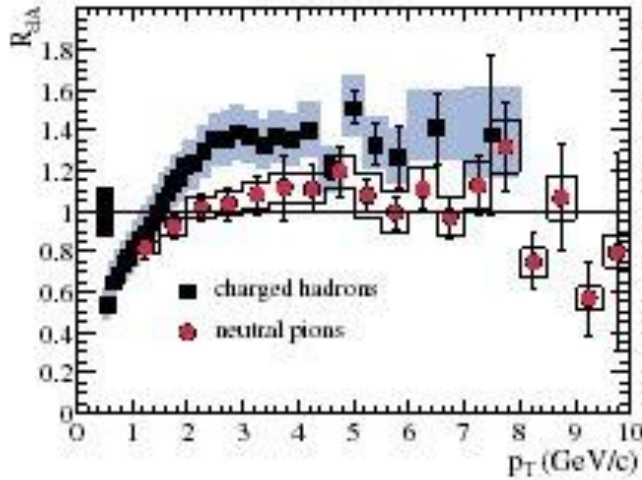
Első mérőföldkő: új jelenség



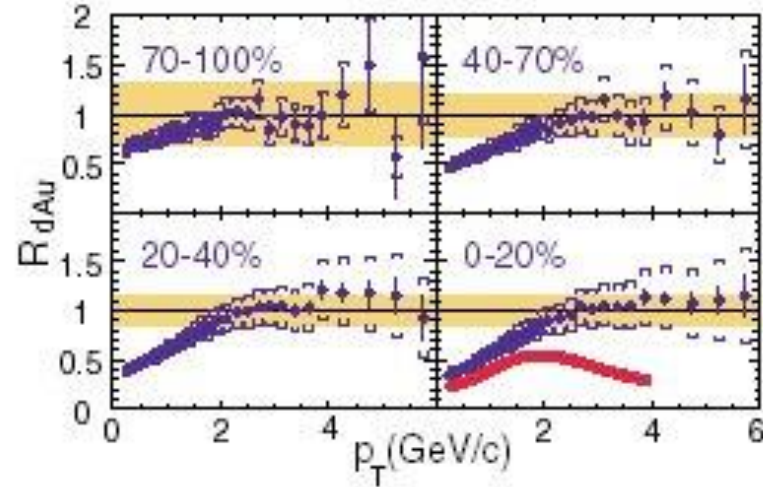
A RHIC-nél a nagy transzverzális impulzusú részecskékeltetés jelentős elnyomása az Au+Au ütközésben a PHENIX felfedezése

2. mérőldkő: új anyag

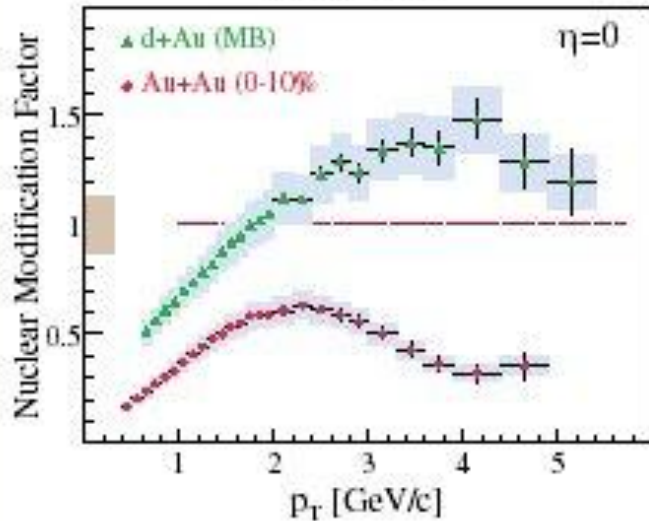
PHENIX



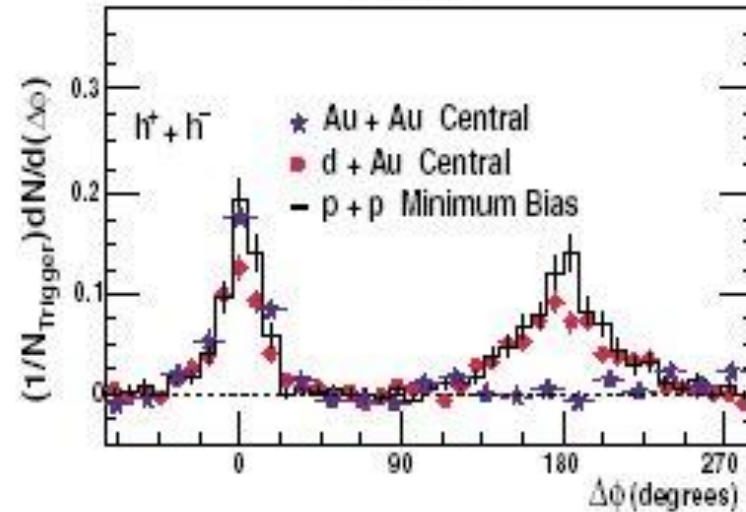
PHOBOS



BRAHMS



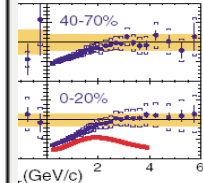
STAR



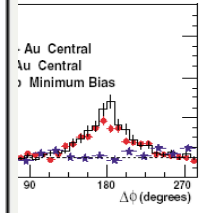
PHYSICAL VIEW LETTERS

published week ending
AUGUST 2003
Volume 91, Number 7

PHOBOS




STAR



Preprint Copy
Use Prohibited Until 2008

American Physical Society

3. mérföldkő: Nem gáz, de folyadék!

Cím 

AMERICAN INSTITUTE OF PHYSICS [advanced search](#) [home](#)

Physics News Update

The AIP Bulletin of Physics News

Number 757 #1, December 7, 2005 by Phil Schewe and Ben Stein

The Top Physics Stories for 2005

At the Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) on Long Island, the four large detector groups agreed, for the first time, on a consensus interpretation of several year's worth of high-energy ion collisions: the fireball made in these collisions -- a sort of stand-in for the primordial universe only a few microseconds after the big bang -- was not a gas of weakly interacting quarks and gluons as earlier expected, but something more like a liquid of strongly interacting quarks and gluons ([PNU 728](#)).

Other top physics stories for 2005 include, in general chronological order of their appearance throughout the year, the following:

- the arrival of the Cassini spacecraft at Saturn and the successful landing of the Huygens probe on the moon Titan ([PNU 716](#));
- the development of lasing in silicon ([Nature 17 February](#));

[Subscribe to Physics News Update](#)

[Physics News Graphics](#)

[Physical Review Focus](#)

[Physics News Links](#)

Archives

- [2006](#)
- [2005](#)
- [2004](#)

<http://arxiv.org/abs/nucl-ex/0410003>

1500+ hivatkozás ~ 9 év alatt

Tökéletes folyadékok hidrodinamikája

A nemrelativisztikus hidrodinamika alapegyenletei:

$$\partial_t n + \nabla \cdot (n\mathbf{v}) = 0,$$

$$\partial_t \mathbf{v} + (\mathbf{v} \cdot \nabla)\mathbf{v} = -(\nabla p)/(mn),$$

$$\partial_t \epsilon + \nabla \cdot (\epsilon\mathbf{v}) = -p\nabla \cdot \mathbf{v},$$

nem zárt, állapotegyenlet kell még:

$$p = nT, \quad \epsilon = \kappa(T)nT,$$

Tökéletes folyadék

1: no bulk and shear viscosities, and no heat conduction.

2: energy-momentum tensor diagonal in the local rest frame.

ideális folyadék: inekvivalens definíciók

#1: térfogatát megtartja, de felveszi az edény alakját

#2: nem viszkozus folyadék

Egzakt, ellipszoidális megoldások

A nemrelativisztikus hidrodinamika új, önhasonló megoldásai

- T. Cs. Acta Phys. Polonica B37 (2006) 1001, hep-ph/0111139

$$n(t, \mathbf{r}) = n_0 \frac{V_0}{V} \nu(s)$$

$$\mathbf{v}(t, \mathbf{r}) = \left(\frac{\dot{X}}{X} r_x, \frac{\dot{Y}}{Y} r_y, \frac{\dot{Z}}{Z} r_z \right)$$

$$T(t, \mathbf{r}) = T_0 \left(\frac{V_0}{V} \right)^{1/\kappa} \mathcal{T}(s)$$

$$\nu(s) = \frac{1}{\mathcal{T}(s)} \exp \left(-\frac{T_i}{2T_0} \int_0^s \frac{du}{\mathcal{T}(u)} \right)$$

$$s = \frac{r_x^2}{X^2} + \frac{r_y^2}{Y^2} + \frac{r_z^2}{Z^2}$$

$$X\ddot{X} = Y\ddot{Y} = Z\ddot{Z} = \frac{T_i}{m} \left(\frac{V_0}{V} \right)^{1/\kappa}$$

**A hőmérséklet skálafüggvénye tetszőleges,
pld. homogén hőmérséklet \Rightarrow Gauss sűrűség**

Buda-Lund profil:

$$\mathcal{T}(s) = \frac{1}{1 + bs}$$

$$\nu(s) = (1 + bs) \exp \left[-\frac{T_i}{2T_0} (s + bs^2/2) \right]$$

Zimányi-Bondorf-Garpman profil:

$$\mathcal{T}(s) = (1 - s) \Theta(1 - s)$$

$$\nu(s) = (1 - s)^\alpha \Theta(1 - s)$$

A folyadék dinamika skálajóslatai

$$T'_x = T_f + m\dot{X}_f^2,$$

$$T'_y = T_f + m\dot{Y}_f^2,$$

$$T'_z = T_f + m\dot{Z}_f^2.$$

- Az effektív hőmérsékletek tömeggel arányosan növekednek
- Az elliptikus folyás univerzális skálázást jósol. Az univerzális w skálaváltozó arányos a transzverz kinetikus energiával és az effektív meredekségek különbségeitől függ.

$$v_2 = \frac{I_1(w)}{I_0(w)}$$

$$w = \frac{k_t^2}{4m} \left(\frac{1}{T'_y} - \frac{1}{T_x} \right),$$

$$w = \frac{E_K}{2T_*} \varepsilon$$

A HBT sugarak inverzei a tömeggel lineárisan nőnek az analízisből kiderül, hogy határértékük ugyanakkora

Relativisztikus korrekciók:

$m \rightarrow m_t$

hep-ph/0108067,

nucl-th/0206051

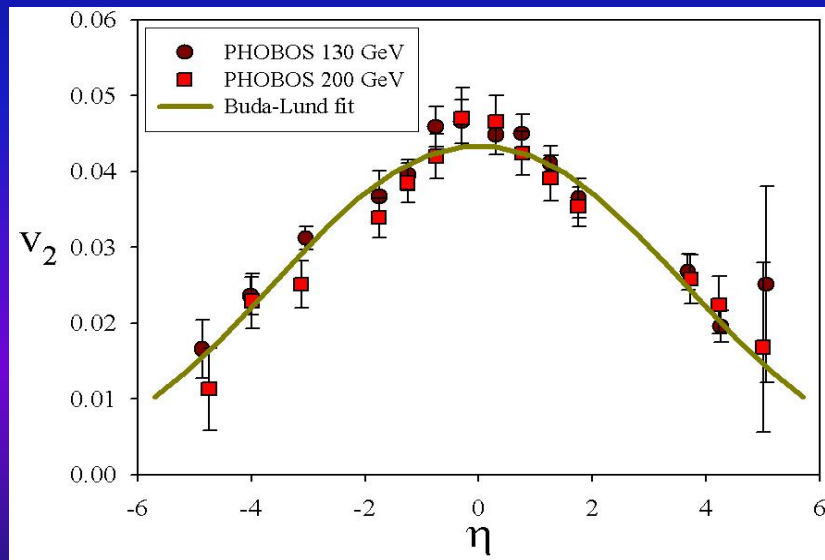
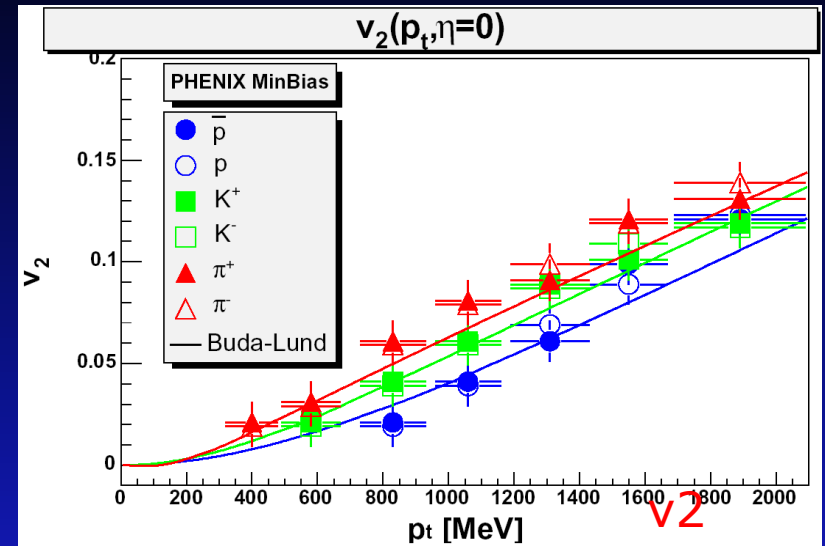
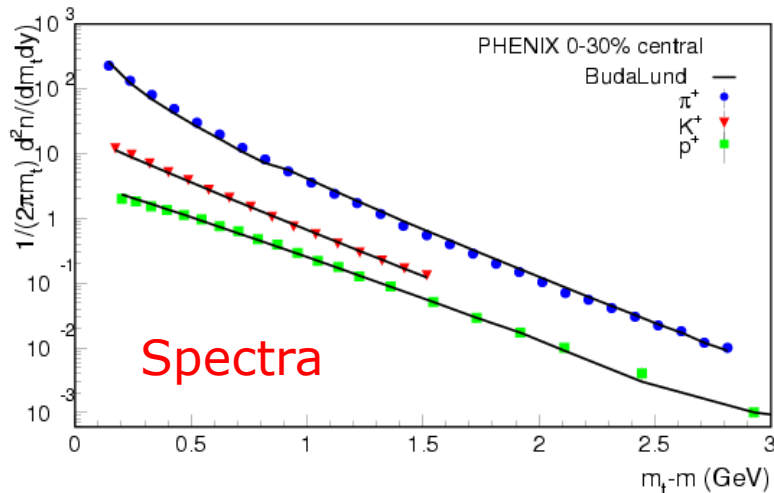
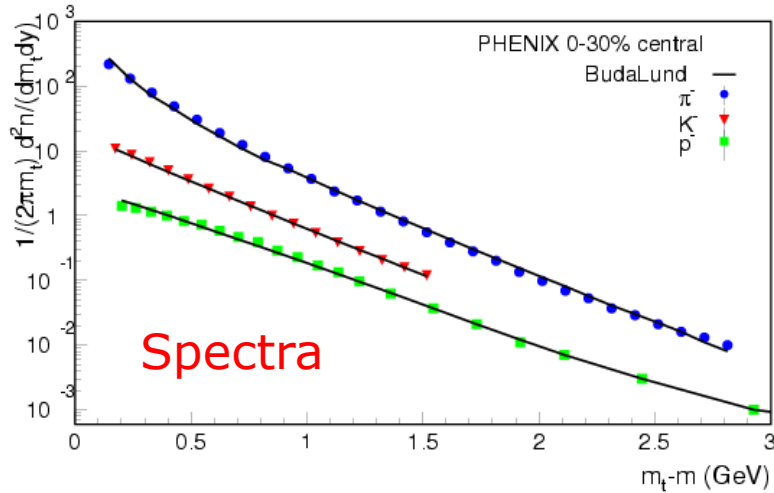
$$R'_x{}^{-2} = X_f^{-2} \left(1 + \frac{m}{T_f} \dot{X}_f^2 \right),$$

$$R'_y{}^{-2} = Y_f^{-2} \left(1 + \frac{m}{T_f} \dot{Y}_f^2 \right),$$

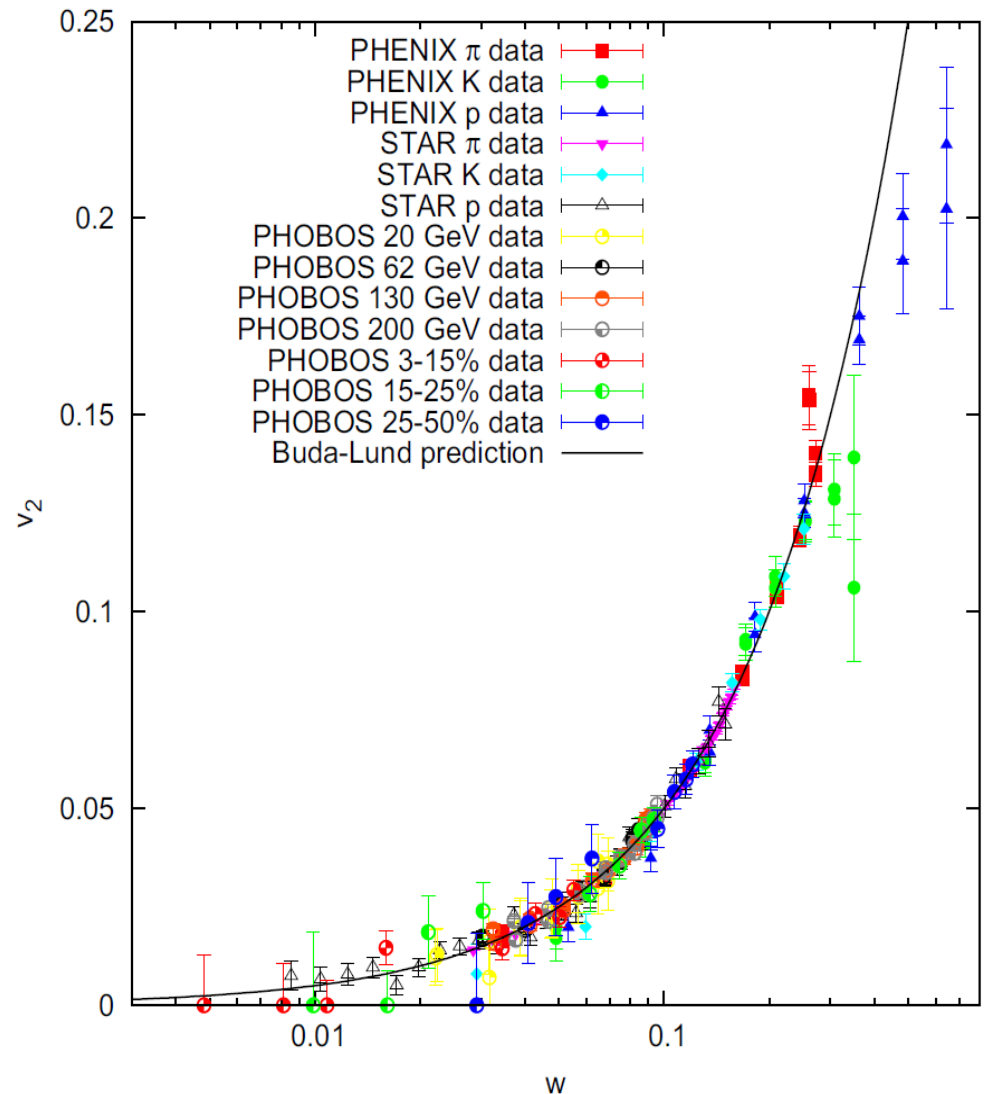
$$R'_z{}^{-2} = Z_f^{-2} \left(1 + \frac{m}{T_f} \dot{Z}_f^2 \right).$$

Elméleti eredmények

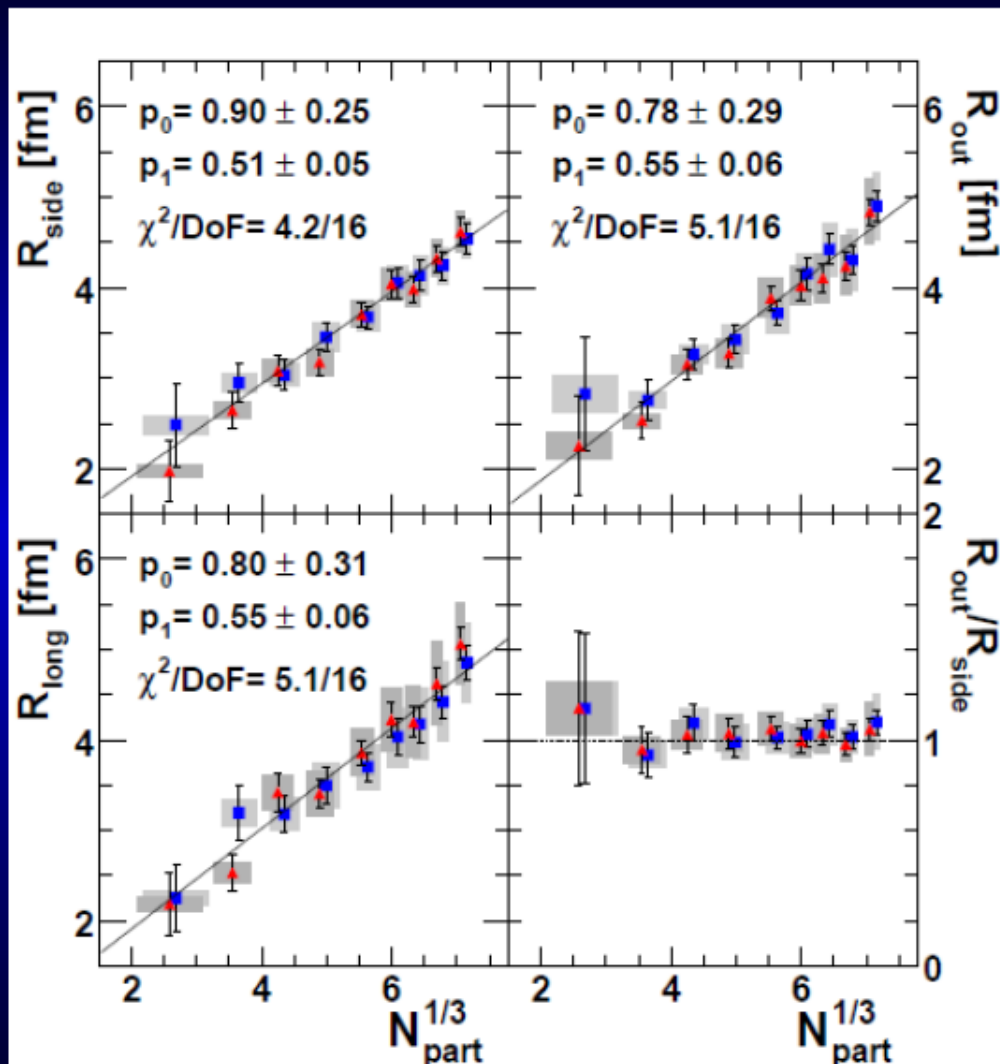
BudaLund v1.5 hydro fits to 200 AGeV Au+Au



A RHIC tökéletes folyadék



Multiplicitás skálázás: HBT sugarak



Gaussian HBT Radii
scale as initial volume,
with $N_{\text{part}}^{1/3}$

These data extend $R_{\text{out}} \sim R_{\text{side}}$
to broad centrality, m_t range
hence exclude:

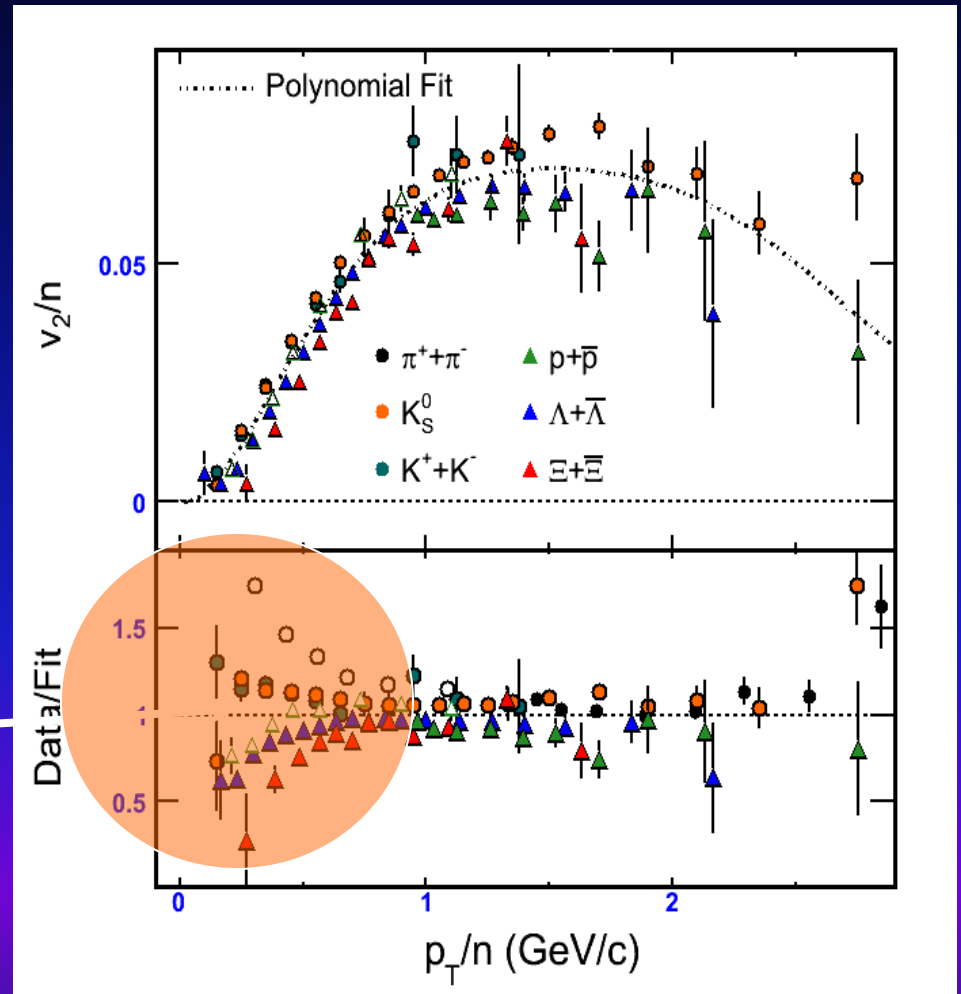
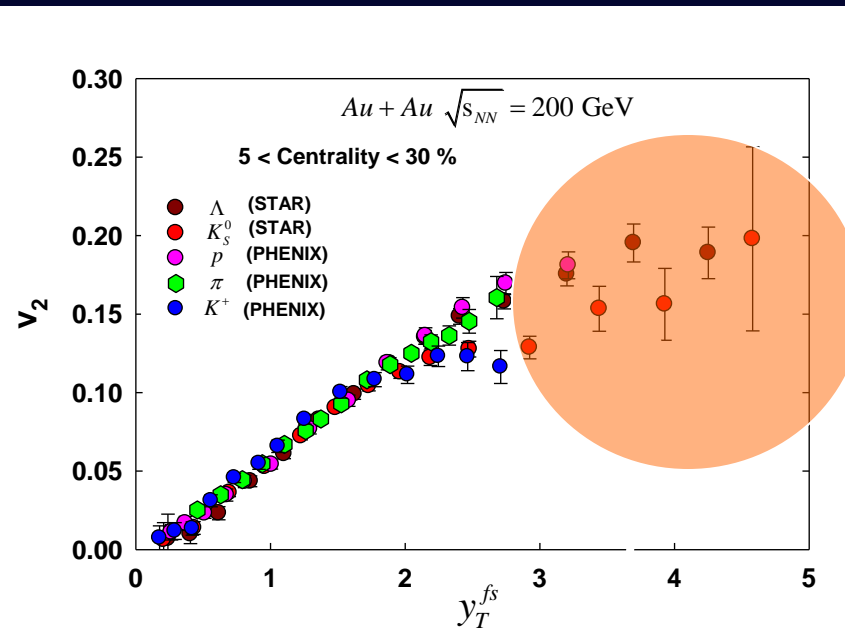
Strong, equilibrium
1st order phase transitions
and > 50 hydro models

For a second order PT:

check excitation function of
non-Gaussian parameter α

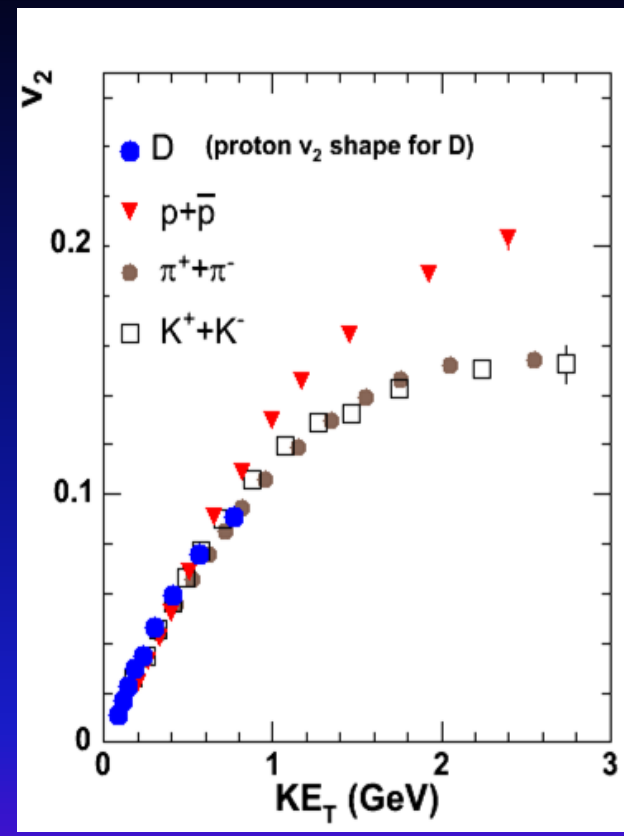
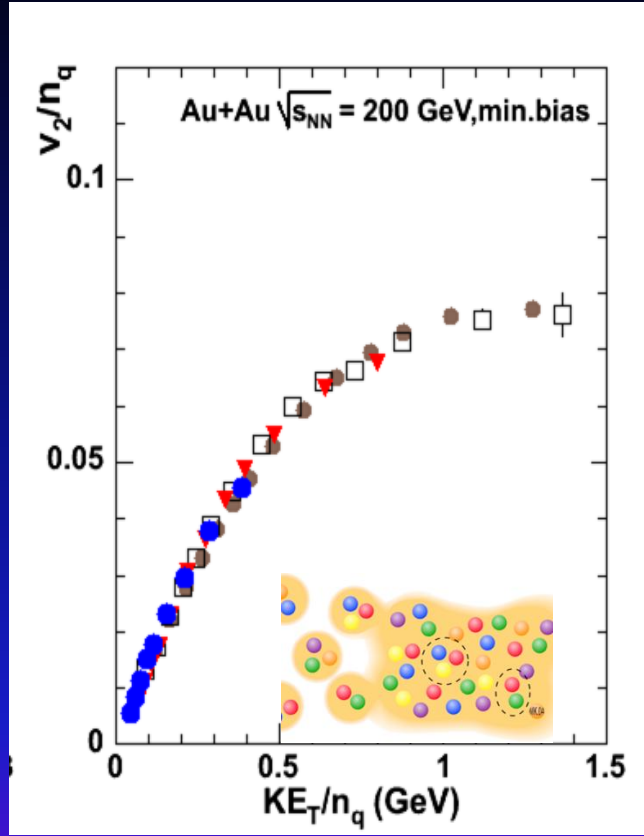
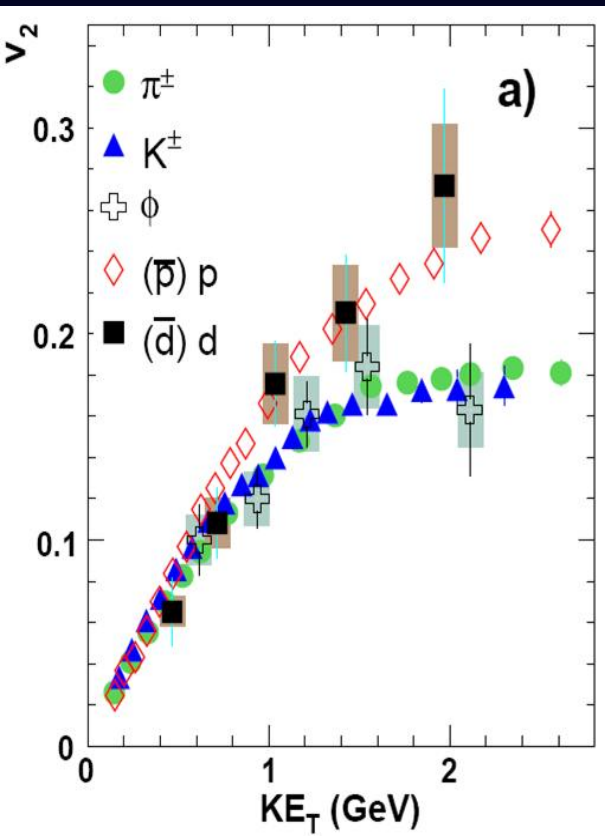
New analysis and/or
new data are needed

A hidro skálázás és sérülése



Az univerzális hidrodinamikai skálázás megszűnik, éppen ott, ahol a kvark szám skálázás megjelenik $\sim 1\text{-}2 \text{ GeV}$ KVARK-ok folyadéká!!

4. mérőkö: A kvarkfolyadék



A ϕ mezon v_2 értéke követi a többi mezonét

$$v_2^h(KE_T^h) \approx n v_2^q(KE_T^q)$$

$$KE_T^h \approx n KE_T^q$$

A D mezon v_2 értéke követi a többi mezonét

A ritka és a bájos kvarkok is részt vesznek a folyásban

5. mérőöldkő: A tökéletesség foka

Minden eddigi "realisztikus" hidrodinamikai számítás a RHIC folyadékokra 0 viszkozitást tételezett fel

$\eta = 0 \rightarrow$ "tökéletes folyadék"

Azonban létezik egy (feltételezett) quantum limit:

"A Viscosity Bound Conjecture", [P. Kovtun, D.T. Son, A.O. Starinets, hep-th/0405231](#)

$$\eta \geq \frac{\hbar}{4\pi} (\text{rendetlenség}) \equiv \frac{\hbar}{4\pi} s$$

Hogy viszonyulnak a "rendes" folyadékok ehhez a limithez?

$(4\pi) \eta/s > 10!$

RHIC tökéletes folyadék

$(4\pi) \eta/s \sim 1$

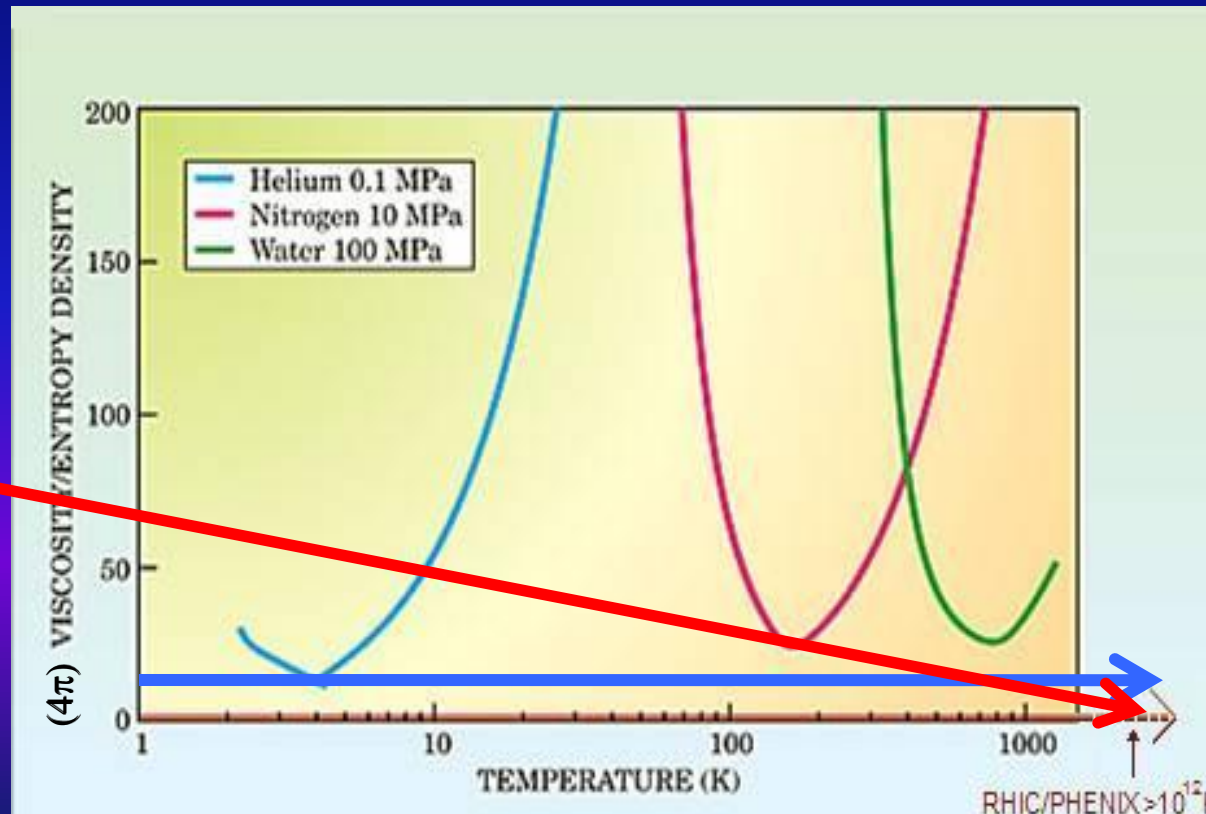
A legforróbb

($T > 4$ Terakelvin)

és a legtökéletesebb

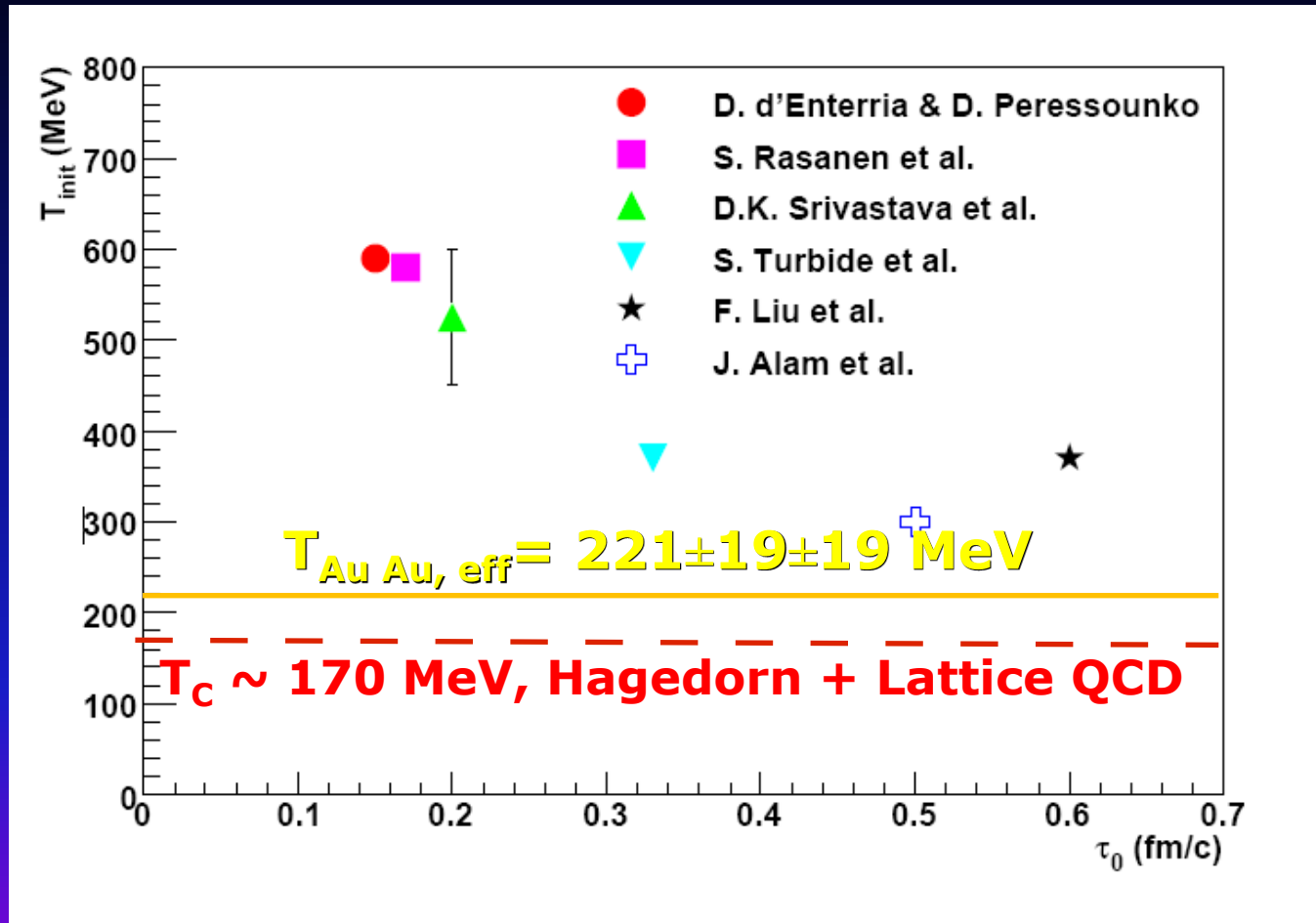
bizonyítottan előállított

folyadék...



RHIC/PHENIX $> 10^{12}$ K

6. mérődkő: a kezdeti hőmérséklet



A. Adare et al. PHENIX Collaboration, Phys. Rev. Lett. 104:132301 (2010)

Közvetlenül az adatokból: $T_{ini} > T_{Au Au} \sim 221$ MeV

Hidrodinamika: $T_{ini} \geq 300$ MeV ~ 4 Terakelvin, ha $\tau_{init} = 0.15 - 0.6$ fm/c

Részecskék Hagedorn tömegspektruma: $T_c \sim 170$ MeV ~ 2 Terakelvin

7. mérföldkő: az átmenet folytonos

A RHIC-nél

- Új jelenség
- Új anyag
- tökéletes folyadék
- kvarkok folyadéka

Jellemzői:

Opálos, $R_{AA} \sim 0.2$

Csillapítási hossz ~ 2 fm

$C_s = 0.35 \pm 0.05$

Hubble állandó: $(2-4) 10^{22}$ Hz

$\eta/s \leq$ szuperfolyékony He/5

$T_{init} \geq 300$ MeV

$\varepsilon_{init} \geq 15$ GeV/fm³

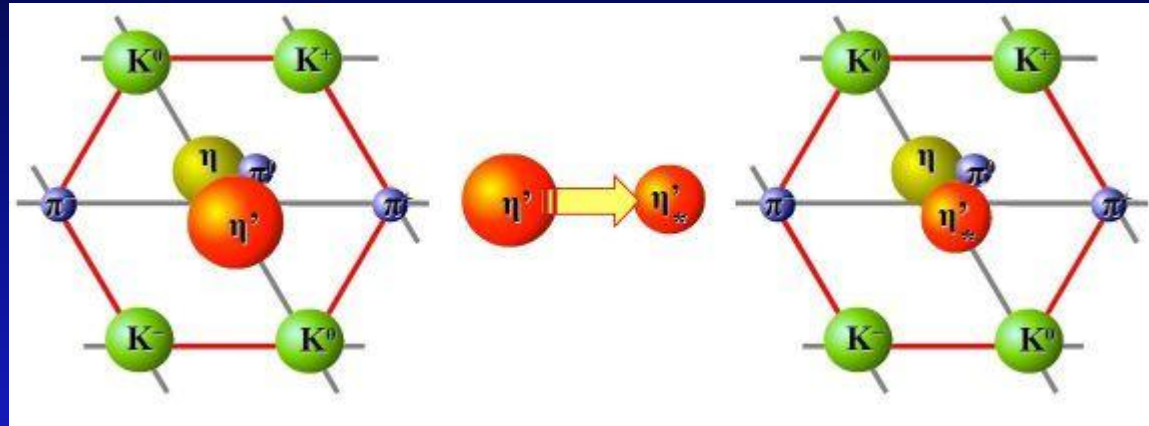
$p_{init} \geq 1.5$ GeV/fm³

Folytonos átmenet!

$\Delta m_{\eta'} \geq 200$ MeV

A RHIC-nél

az η' mezon tömegcsökkenése
egy elveszett szimmetria helyreáll



T. Cs, R. Vértési, J. Sziklai
[Phys.Rev.Lett.105:182301,2010](#)

R. Vértési, T. Cs, J. Sziklai
Nucl.Phys. A830 (2009) 631C-632C
[Phys. Rev. C83 \(2011\) 054903](#)

$\leftrightarrow T[U_A(1)] < T_c$

Mérföldkövek – az előadás alapja

A KVARKOK FOLYADÉKÁNAK MEGLEPŐ TULAJDONSÁGAI

MÉRFÖLDKÖVEK

A nagyenergiás magfizikában a legfontosabb és legérdekesebb kérdéseket óriási gyorsítók, az úgynevezett relativisztikus nehézion-ütköztetők segítségével tehetjük fel a Természetnek. A fénysebességhez igen közeli sebességű nehézionokat, azaz héliumnál nehezebb atommagokat ütköztetünk egymással. Ezen ütközések során az anyag olyan állapotba jut, amilyen egy szempillantással a Világegyetemünk keletkezése, azaz néhány mikromásodperccel a Nagy Bumm után uralkodott. Emiatt a nagyenergiás gyorsítóknak zajló nehézion-ütközéseket – a bennük uralkodó óriási energiasűrűség és hőmérséklet miatt – Kis Bummoknak is nevezhetjük.

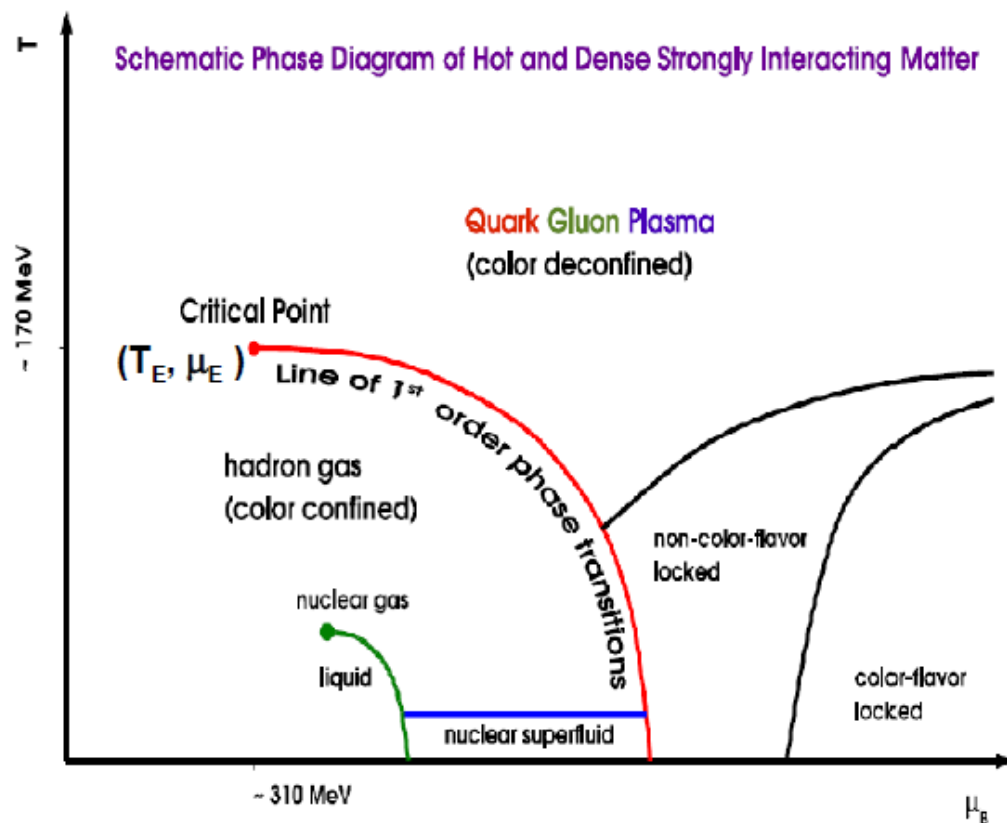
OTKA

A cikk az OTKA és az
Élet és Tudomány közös
pályázatán első helyezést ért el.

Élet és Tudomány 2010 év [49 szám 1542. oldal](#),

Cs.T. Zimányi 2010 Nehézionfizikai Téli Iskola előadása

A definitív CEP felfedezés feltételei



1. Identify:

What type of transition
chiral ?
deconfinement ?
quarkionic ? liquid-gas?

2. Locate:

Where is (T_E, μ_E) ?
At what centrality, $\sqrt{s_{NN}}$?
critical opalescence
onset of 1st order PT

3. Characterize:

measure
order parameters,
critical exponents,
universality classes.

4. Controll:

Cross-checks for
consistency,
significance,
quality.

What about

- random fields?
- experimentally measurable order pars ?
- 1st order PT: speed of sound, latent heat?

Különféle QGP-k – különböző jelek

Transition to hadron gas may be:

1st order (strong)

2nd order (Critical Point, CP)

Cross-over

Non-equilibrium, e.g. from a supercooled state (scQGP)

Type of phase transition:

its correlation signature:

Strong 1st order QCD phase transition:
(Pratt, Bertsch, Rischke, Gyulassy)

$R_{out} \gg R_{side}$

2nd order QCD phase transition:
(T. Cs, S. Hegyi, T. Novák, W.A. Zajc)

non-Gaussian shape
 α (Lévy) decreases to 0.5

Cross-over quark matter-hadron gas:
(lattice QCD, Buda-Lund hydro fits)

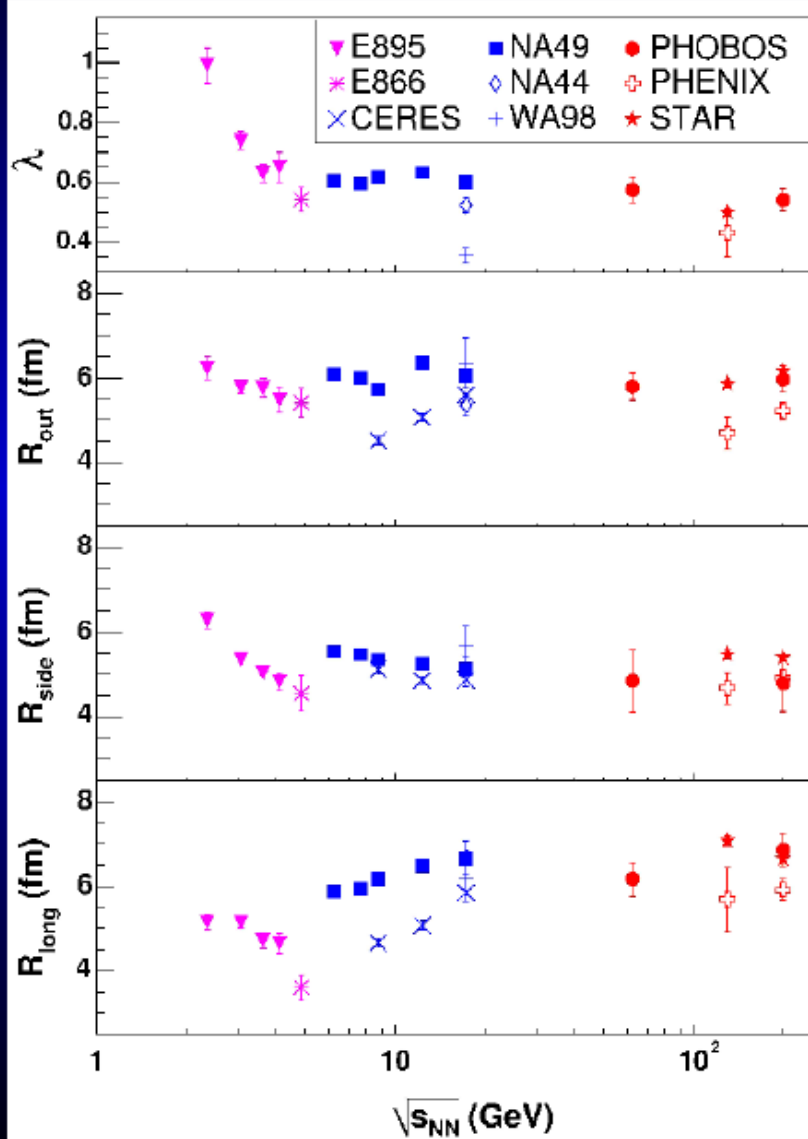
hadrons appear from
a region with $T > T_c$

Supercooled QGP (scQGP) -> hadrons:
(T. Cs, L.P. Csernai)

pion flash ($R_{out} \sim R_{side}$)
same freeze-out for all particles
strangeness enhancement
no mass-shift of ϕ

A HBT sugarak gerjesztési függvénye

STAR, Phys.Rev.C71:044906,2005



These data indicate

$$R_{out} \sim R_{side}$$

hence exclude:

Strong, equilibrium
1st order phase transit.
> 50 hydro models

For a second order PT:

check excitation function of
non-Gaussian parameter α

New analysis /
new data are needed

HBT Radii
independent of energy
perhaps initial volume ?
subtle mt dependencies?

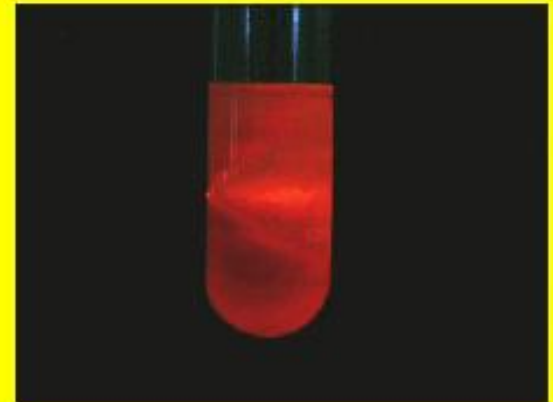
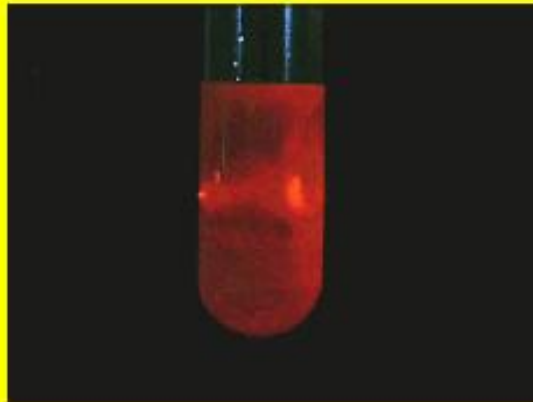
Kritikus Opaleszcencia

Critical Opalescence: a laboratory method to observe a 2nd order PT

correlation length diverges, clusters on all scales appear incl. the wavelength of the penetrating (laser) probe

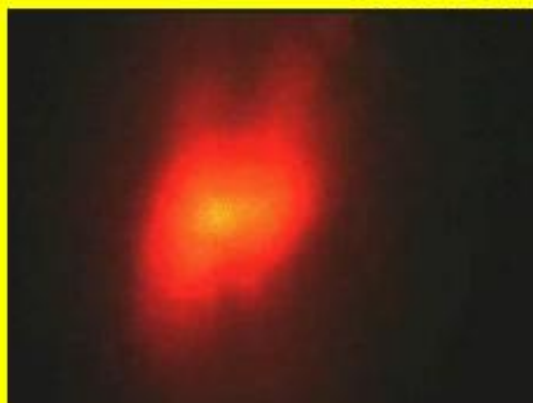
side view:

<http://www.msm.cam.ac.uk/doitpoms/tplib/solidsolutions/videos/laser1.mov>



front view:

matter becomes opaque at the critical point (CP)



$T \gg T_c$

$T \approx T_c$

$T = T_c$

Optikai opacitás: hosszskála kell!

$$I = I_0 \exp(-\kappa x) = I_0 \exp(-x/\lambda)$$

$$\frac{\partial I}{\partial x} = -\kappa I$$

$$\kappa = \frac{I(\text{generated}) - I(\text{transmitted})}{I(\text{generated})\Delta x}$$

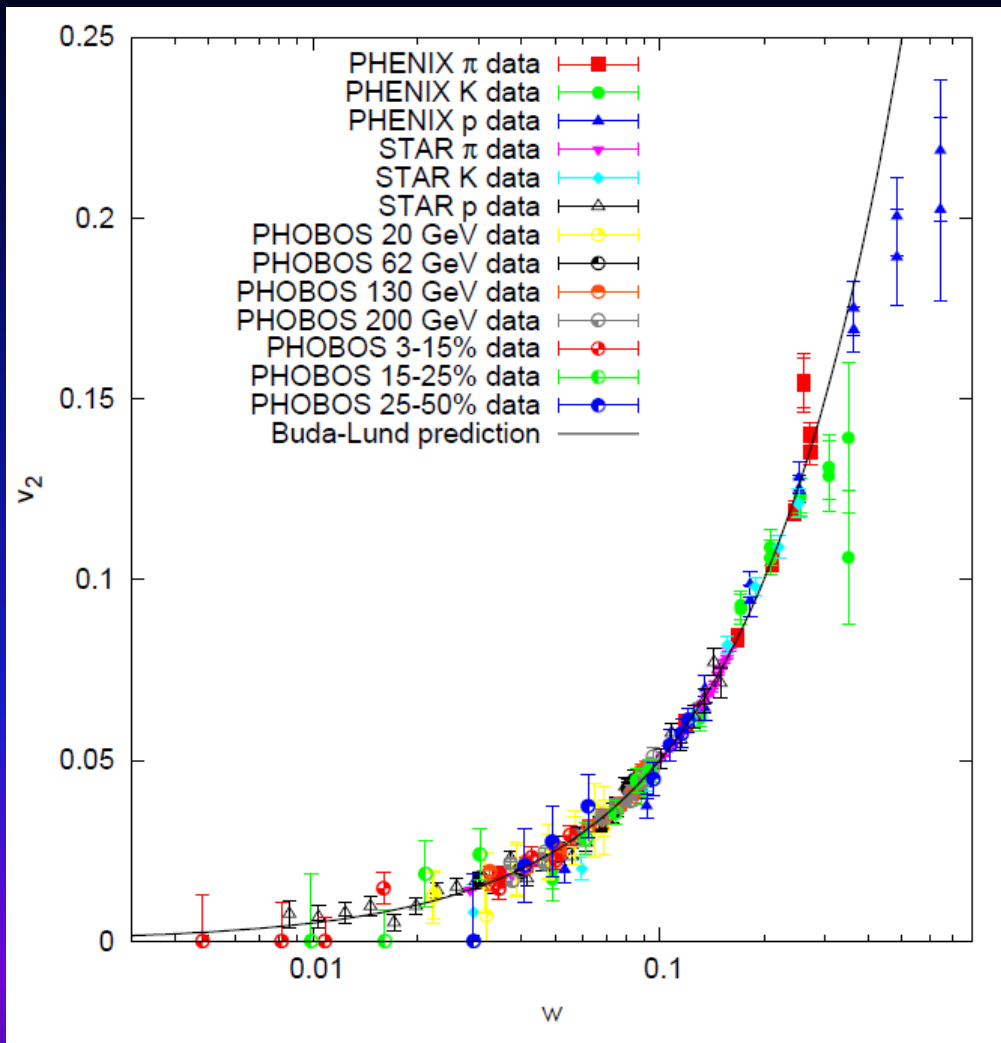
$$R_{AA} = \frac{I(\text{transmitted})}{I(\text{generated})} = \frac{I(\text{measured})}{I(\text{expected})}$$

$$I(\text{measured}) = \frac{1}{N_{event}^{AA}} \frac{d^2 N_{AA}}{dy dp_t}$$

$$I(\text{expected}) = \frac{\langle N_{coll} \rangle}{\sigma_{inel}^{NN}} \frac{d^2 \sigma_{NN}}{dy dp_t}$$

$$\kappa = -\frac{\ln(R_{AA})}{R_{HBT}}$$

Tökéletes folyadékkép



A CERN SPS adatok alapján, 1994-:

a hidrodinamikai képet javasoltuk a kísérletileg megfigyelt skálaviselkedések értelmezésére spektrum, v_2 , HBT

2005, RHIC adatok:

Hidro a releváns fizikai kép

T. Cs, B.Lörstad, Phys. Rev. C54 (1996) 1390: spektrumok, HBT sugarak
M. Csanád, T. Cs, B. Lörstad, Nucl. Phys. A747, 80 (2004): v_2

RHIC BES, nem-azonosított v2

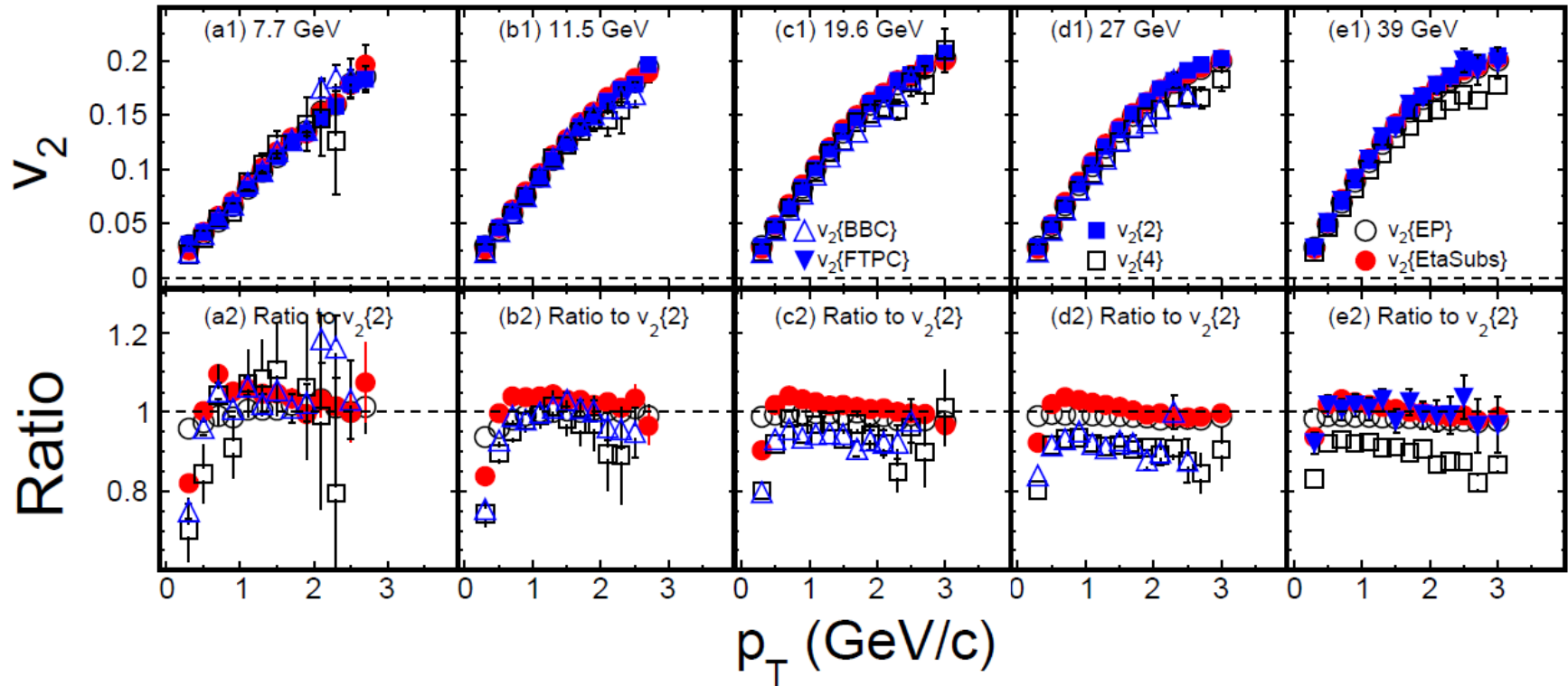
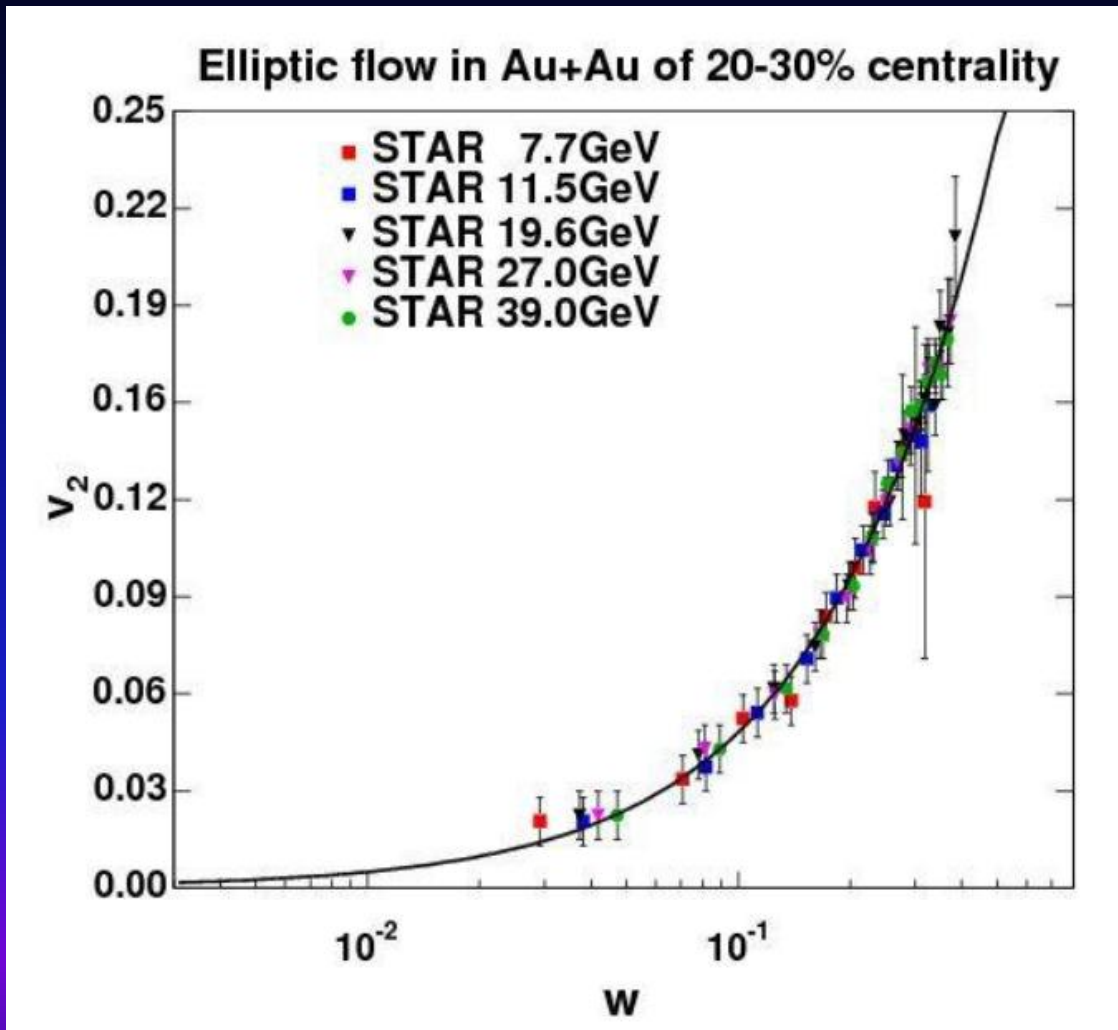


FIG. 5: (Color online) The v_2 as a function of p_T for 20–30% central Au + Au collisions at midrapidity for $\sqrt{s_{NN}} = 7.7$ GeV (a1), 11.5 GeV (b1), 19.6 GeV (c1), 27 GeV (d1) and 39 GeV (e1). The top panels show v_2 vs. p_T using various methods as labeled in the figure and discussed in the text. The bottom panels show the ratio of v_2 measured using the various methods with respect to $v_2\{2\}$.

RHIC BES, univerzális skálázás



Based on STAR
RHIC data, 2012-,
charged particle v_2

Hydro is the
relevant picture
from $\sqrt{s} = 7.7$
GeV up (?)

What about
identified particle
 v_2 ?

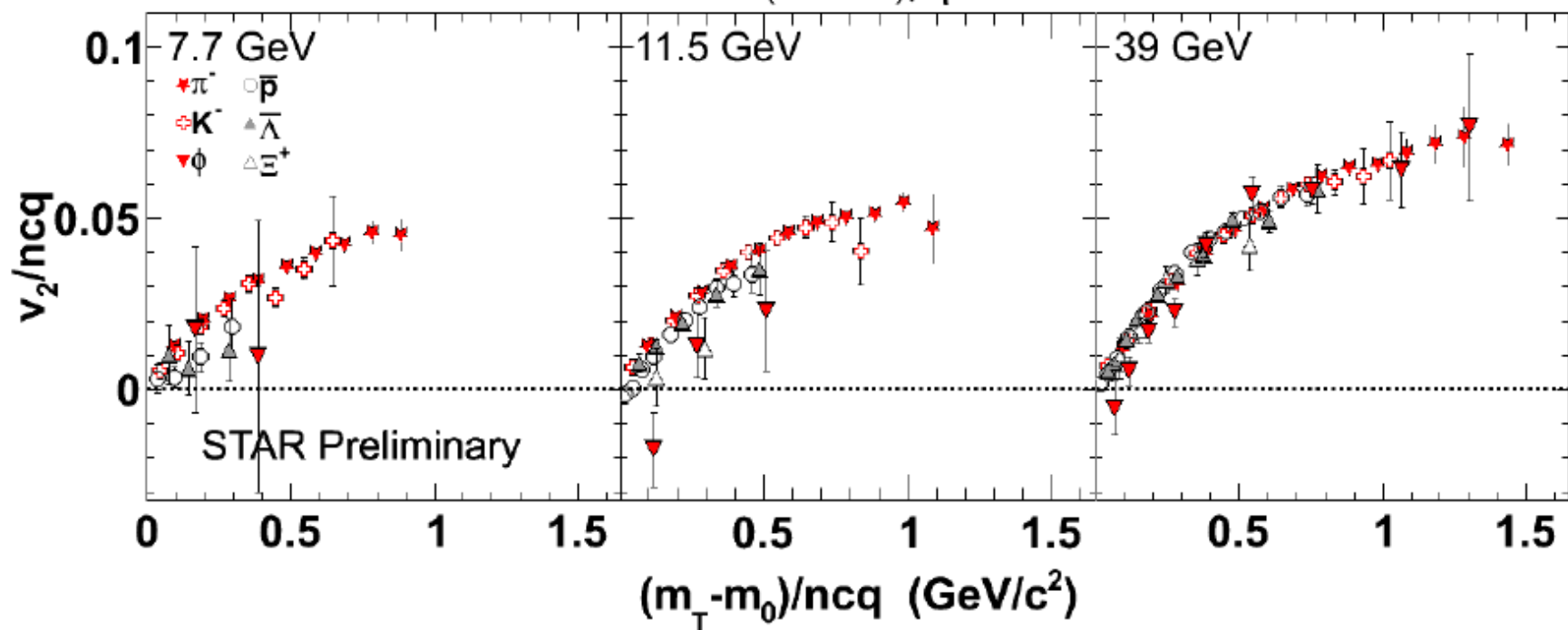
A. Ster, Zimányi 2012 Winter School on RHIC

M. Csanád, T. Cs, A. Ster et al, Eur.Phys.J. A38 (2008) 363-368

RHIC BES, azonosított részecske v2

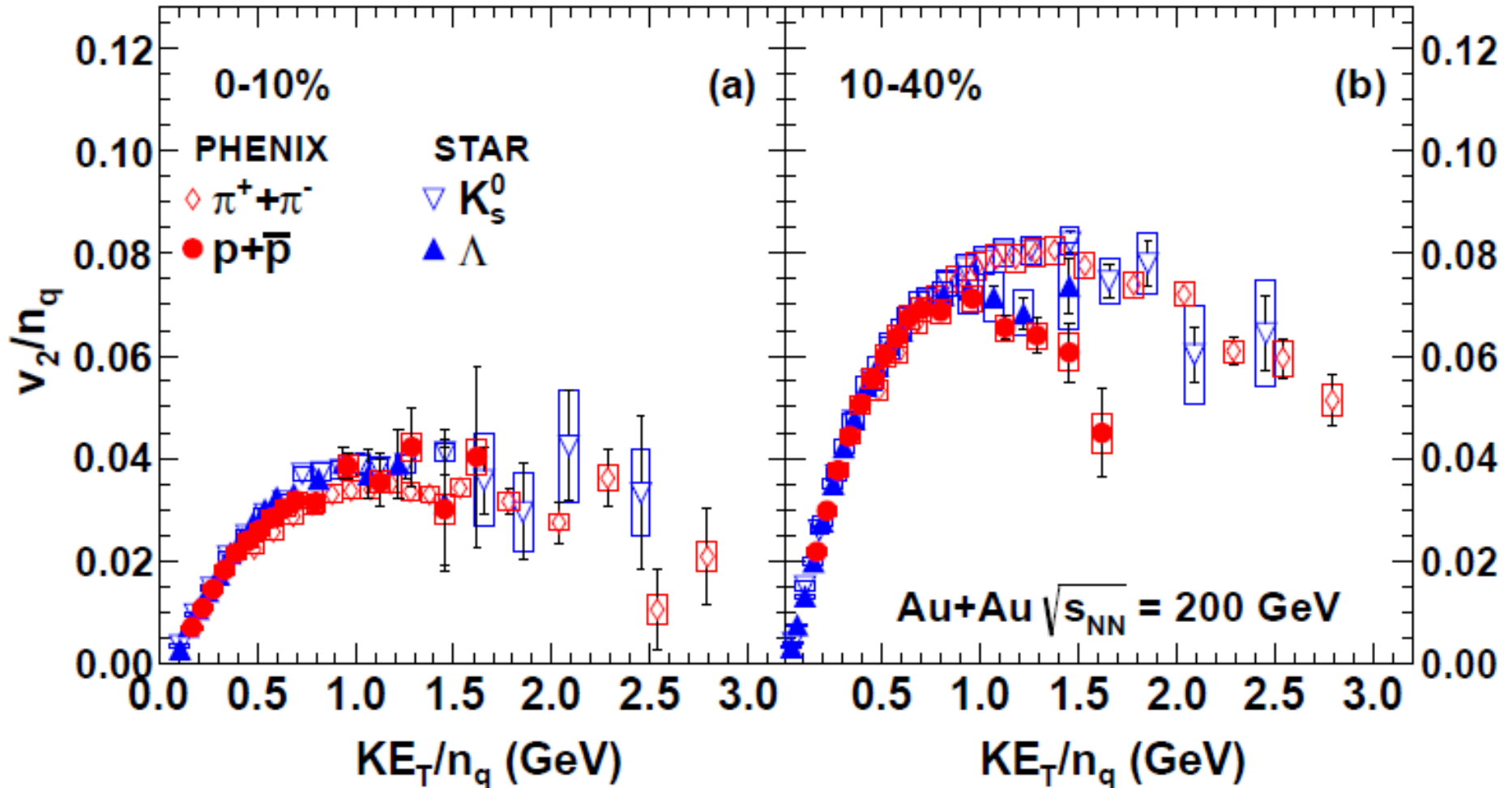
STAR CPOD 2011/QM2011

Au+Au (0-80%), η -sub EP



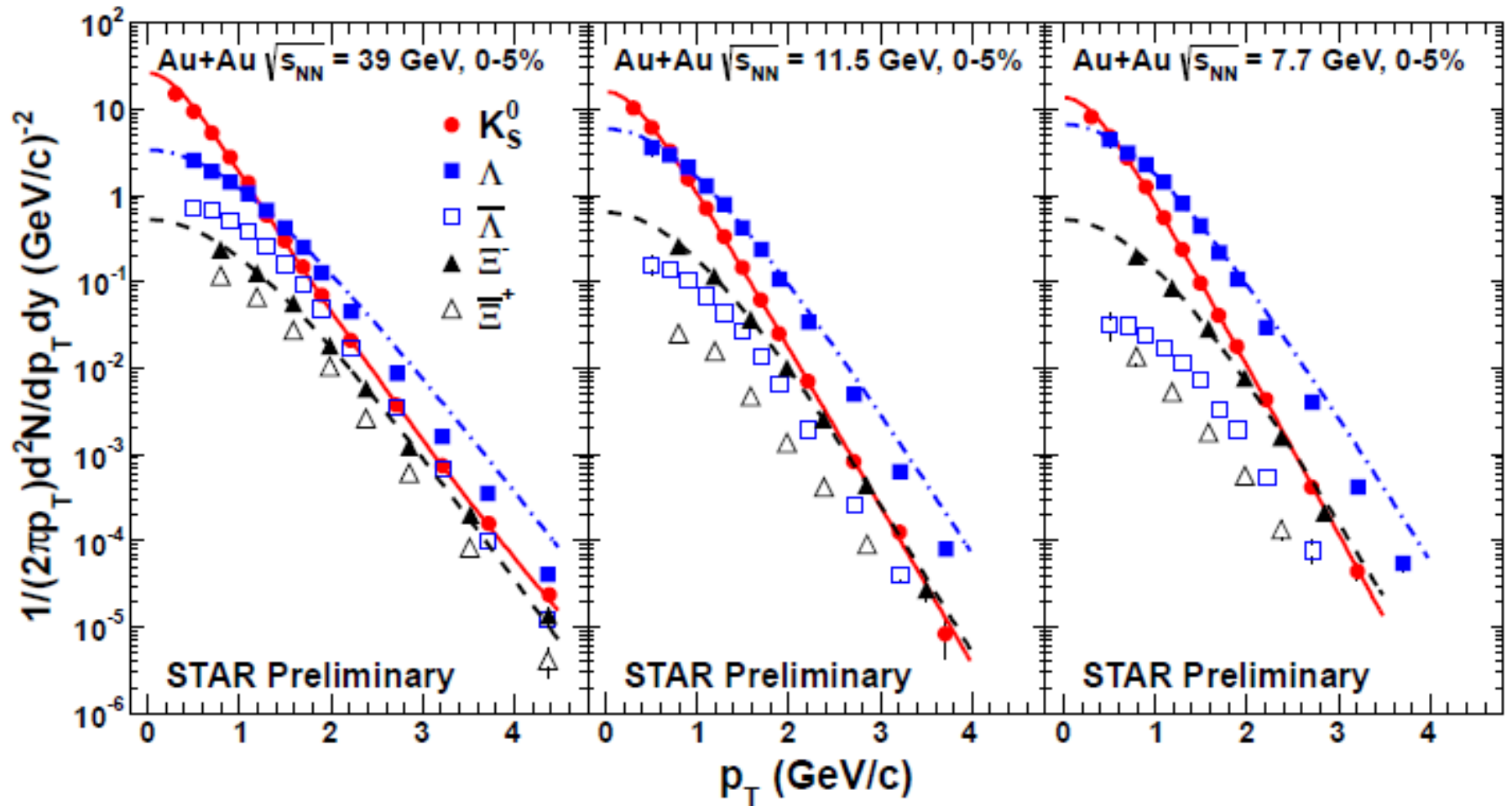
- Number-of-Constituent Quark scaling holds at 39 GeV, looks different at 7.7 and 11.5 GeV compared to particles
- ϕ -mesons show different trend, but no statistics at high m_T

A v_2 n_q skálázása of v_2 @ 200 GeV



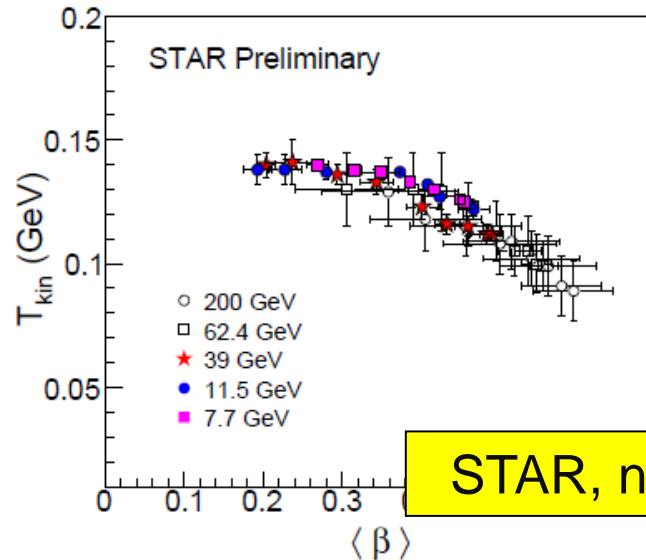
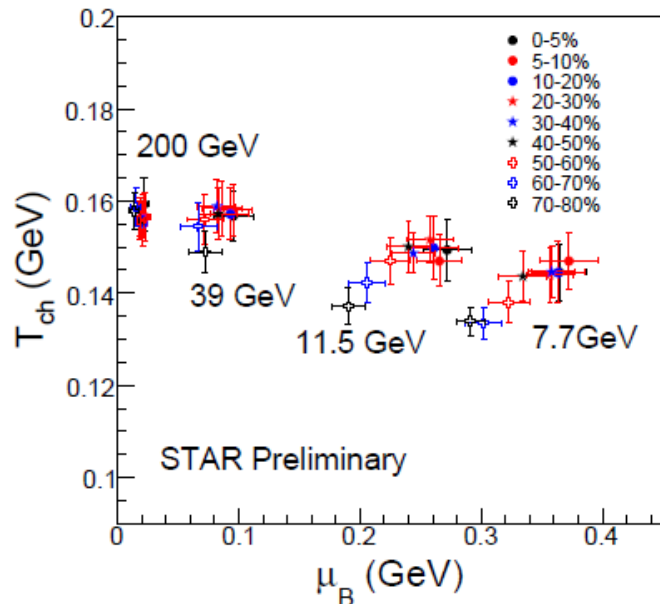
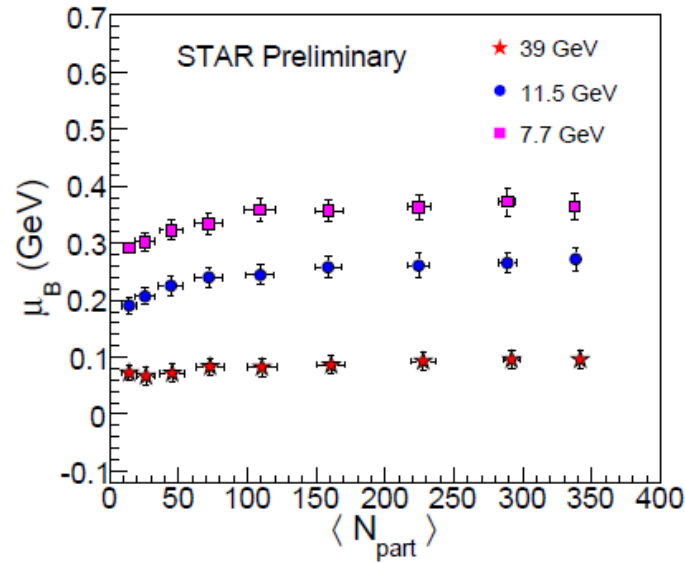
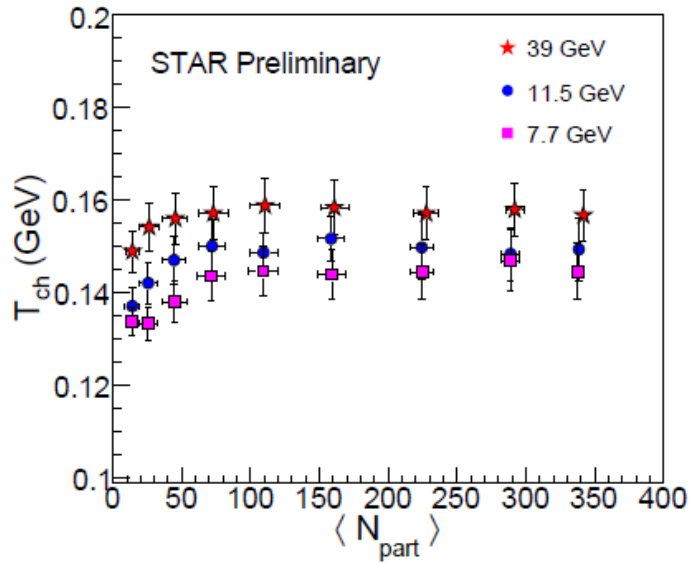
PHENIX Au+Au 200 GeV, nucl-ex/1203.2644:
scaling violations from 10% up
Radiális folyás hatása?

RHIC BES, azonosított r. spektrum



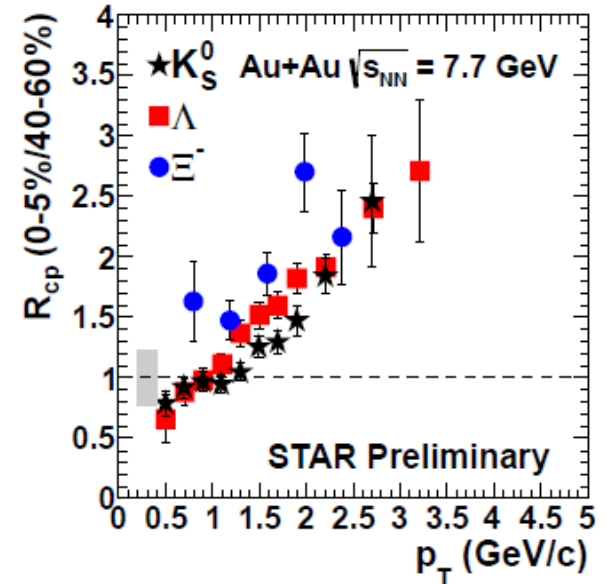
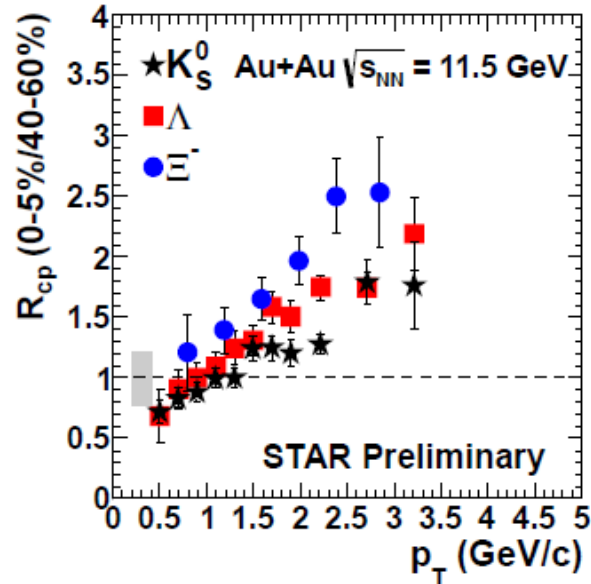
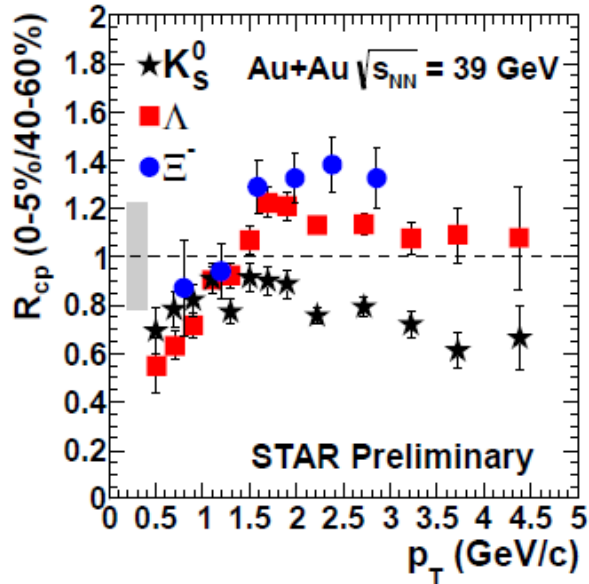
STAR, nucl-ex/1203.5183 : a spektrumok hidro/BL szerűek

RHIC BES + centralitás, kifagyás



STAR, nucl-ex/1201.4203

RHIC BES, azonosított részecske R_{cp}



STAR, nucl-ex/1203.5182 : R_{cp} közel konstans ~ 39 GeV-től

Kérdés: Ez vajon az sQGP, vagy a radiális folyás hatása?

Összefoglalás

Tökéletes folyadék \neq sQGP

Univerzális v_2 skálázás \neq v_2 n_q skálázás

$\sqrt{s} \sim 11$ GeV $\neq \sim 40$ GeV

$R_{AA} < 1$ és v_2 n_q skálázása
Ugyanannál a \sqrt{s} -nél kezdődik-e?

QCD CEP:

Kísérleti kutatás megkezdődött
Energiavesztés / egységnyi hossz

Keresünk

Kritikus opaleszcenciát
Kritikus exponenseket
Kapcsolatokat a Statisztikus Fizikával

RHIC: Tervek 2000 (és 2010) környékén

Kihasztnálni a RHIC példátlan képességeit

Kellően nagy \sqrt{s}

Megbízható pQCD szondák rendelkezésre állása

A kezdeti barionszám szétválasztása a keletkezett új részecskéktől

Döntő kísérleti evidencia találása a QGP létezése mellett/ellen

Polarizált p+p ütközések (honnan származik a p spinje?)

Két kisebb és két nagyméretű detektor

Egymást kiegészítő, és ellenőrző képességek

Kisebb detektorok 3-5 év élettartammal: BRAHMS, PHOBOS

Nagy detektorok ~ Nagyberendezések: PHENIX, STAR

Komoly összegű beruházások

Hosszú élettartamok (20+ év, 3. generációs PHENIX tervezés alatt)

Lehetőség a felfedezések alapján indokolt fejlesztésekre, 2010 -

Luminozitásnövelés alacsony energián,

QCD kritikus pont keresése,

direkt fotonok,

elektron-ion collider (eIC, eRHIC, e(s)PHENIX ...)

Azóta...

A RHIC gyorsító komplexum

Rutinszerű működés a tervezett luminozitás sokszorosával (Au+Au)

A működési módok rendkívüli változatosságával

Ütközési nyalábkombinációk: Au+Au, d+Au, Cu+Cu, pp+pp

Energiák: 22 GeV (Au+Au, Cu+Cu, pp+pp), 5.6, 7.7, 32, 56 GeV (Au+Au),

62 GeV (Au+Au, Cu+Cu, pp+pp), 130 GeV (Au+Au),

200 GeV (Au+Au, Cu+Au, Cu+Cu, d+Au, pp+pp), 410 GeV (p+p), 500 GeV (pp+pp)

Kísérletek:

Sikeresek ! PHOBOS és BRAHMS adatfelvétele 2005-ben lezárult

Tudományos eredmények:

500+ referált közlemény, ebből 150+ PRL

Jelentős felfedezések, az LHC megerősít és kiterjeszt (~2011-)

A jövő alapjai:

Bizonyított képesség a PHENIX és STAR detektorok fejlesztésére

Kulcsfontosságú tudományos kérdések meghatározása

A gyorsítókomplexum és a kísérletek detektorrendszereinek bővítése:

a 2. fázisba léptünk az újabb tud. célok elérésére

a QCD kritikus pontja

a 3. fázis anyagi lehetőségek függvénye, 5-10 év

A RHIC energiaváltoztatási program első eredményei

A QCD CP kísérleti keresése

Csörgő Tamás

**Wigner Fizikai Kutatóközpont,
Részecske és Magfizikai Intézet, Budapest**

**Kritikus pont, kritikus opaleszcenciával
Kritikus exponensek
Az ismert új jelenségek első megjelenése
Kitekintés**