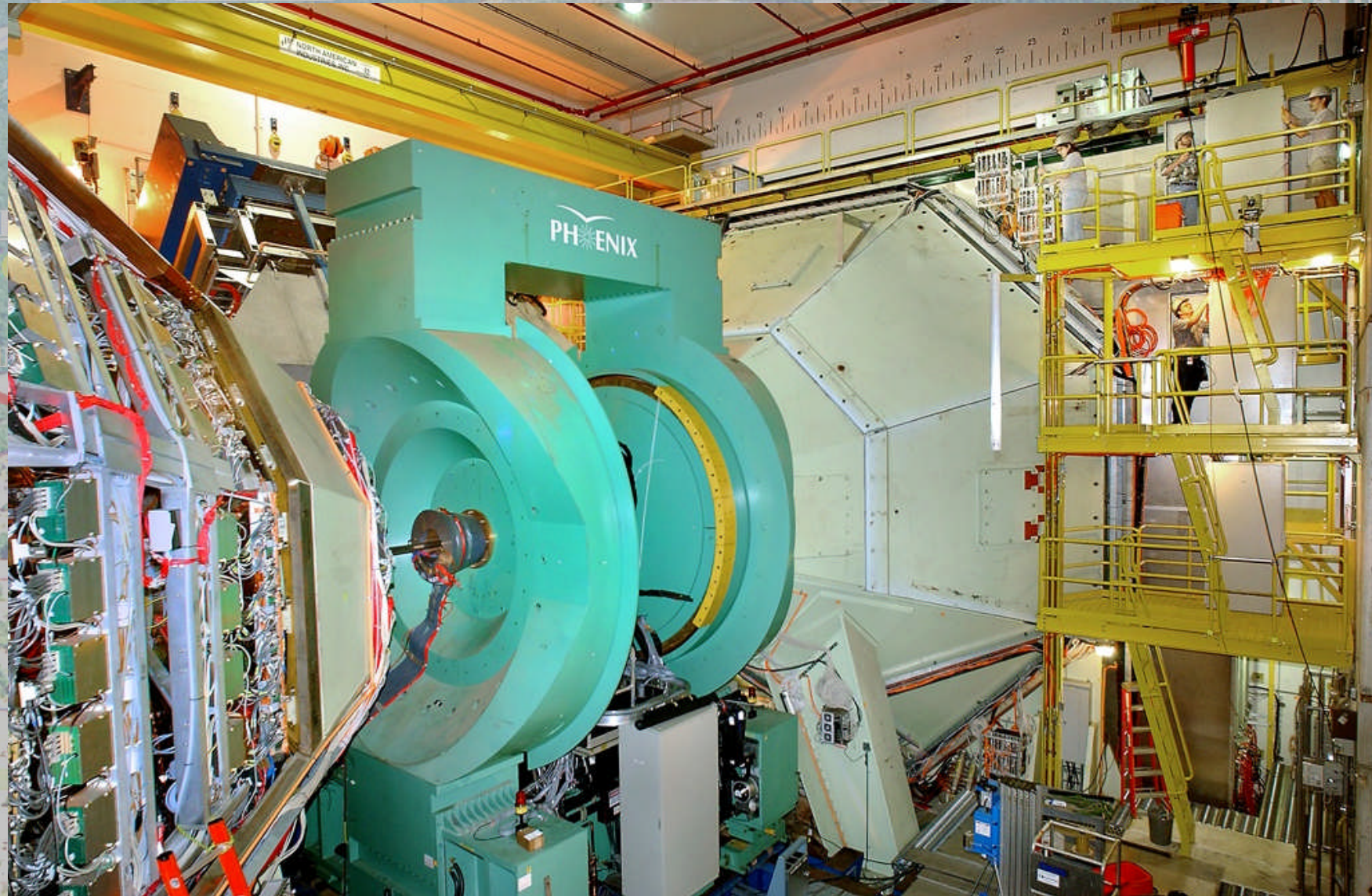


A PHENIX kísérlet a RHIC-nél



A QGP Folyadéktermészete

A folyadék definíciója Oxford English Dictionary szerint:

1) Primary definition: (adj.) *fluid* :

"Having the property of flowing; consisting of particles that move freely among themselves, so as to give way before the slightest pressure. (A general term including both gaseous and liquid substances.)"

2) Secondary definition: (adj.)

"Flowing or moving readily; not solid or rigid; not fixed, firm, or stable."

RHIC kutatások:

- a) **Felfedezési időszak**, amely során világossá vált, hogy a „Kvark-Gluon Plazma” valójában folyadék, ezt követően
- b) **Paradigma váltás**, amely során a RHIC-nél előállított rendkívüli folyadék tulajdonságainak szilárd megértésére törekszünk

Tervek 2000 környékén

Kihasználni a RHIC példátlan képességeit

Nagy \sqrt{s}

Megbízható pQCD szondák rendelkezésre állása

A ütközési barionok tiszta szétválaszása a „glue”-tól

Döntő kísérleti evidencia találása a QGP létezése mellett/ellen

Polarizált p+p ütközések

Két kisebb és két nagyméretű detektor

Ezek egymást kiegészítő, de átfedésekkel is rendelkező képességek

Kis detektorok 3-5 év élettartammal

Nagy detektorok ~ Nagyberendezések (facilities)

Komoly összegű beruházásokkal

Hosszú élettartamok

Lehetőség az elért felfedezések alapján kezdeményezett

továbbfejlesztésekre (Luminozitásnövelés alacsony energián, Ritka próbák, lepton párok, direkt fotonok, elektron-ion collider ...)

RHIC és a Kísérletek



Azóta...

A RHIC gyorsító komplexum

Rutinszerű működés a tervezett luminozítás 2-4-szeresével (Au+Au)

A működési módok rendkívüli változatosságával

Ütközési nyalábkombinációk: Au+Au, d+Au, Cu+Cu, $p\uparrow + p\uparrow$

Energiák: 22 GeV (Au+Au, Cu+Cu, $p\uparrow$), 56 GeV (Au+Au),
62 GeV (Au+Au, Cu+Cu, $p\uparrow + p\uparrow$), 130 GeV (Au+Au),
200 GeV (Au+Au, Cu+Cu, d+Au, $p\uparrow + p\uparrow$), 410 GeV ($p\uparrow$), 500 GeV ($p\uparrow$)

Kísérletek:

Sikeresek !

Tudományos eredmények:

>160 referált közlemény, ebből > 90 PRL

Jelentős felfedezések

A jövő alapjai:

Bizonyított képesség a detektorok továbbfejlesztésére

Kulcsfontosságú tudományos kérdések felismerése/meghatározása

A gyorsítókomplexum és a kísérletek detektorrendszereinek bővítése folyamatban van az újabb tudományos célok elérésére

Nyelvezet

A közösen használt alapvető nukleáris tulajdonságok

$A, Z \dots$

A nehézionfizika specifikus mennyiségei

V_2 Azimutális anizotrópia másodrendű Fourier együtthatója “elliptic flow”

R_{AA} Értéke 1, ha a hozam azonos a kezdeti parton-parton fluxussal

T Hőmérséklet (MeV)

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

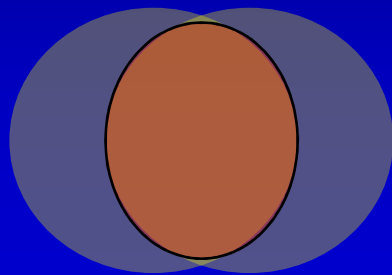
η Viskozitás (MeV³)

S Entrópiasűrűség (MeV³) ~ “részecske” sűrűség

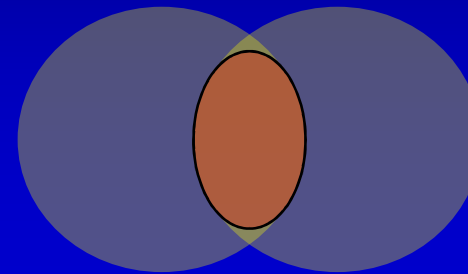
Állítás

A bonyolult eseményekben , rendelkezünk az eseménygeometria feletti (*a posteriori*) kontrollal:

Az átfedés mértéke

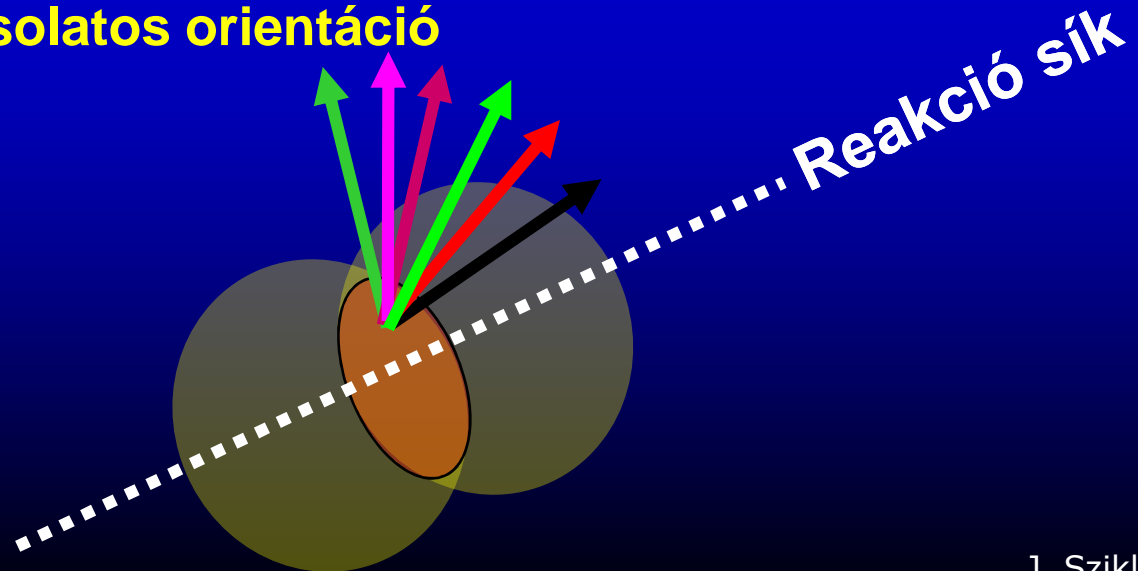


“Centrális”

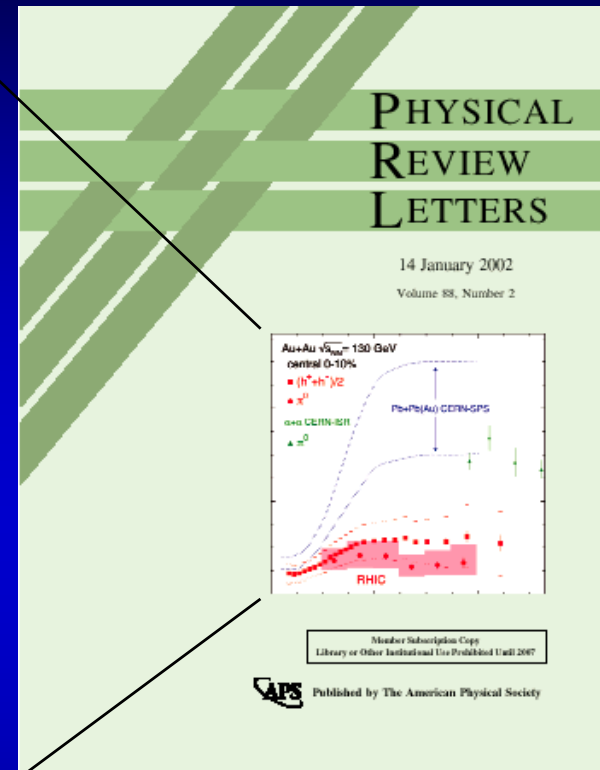
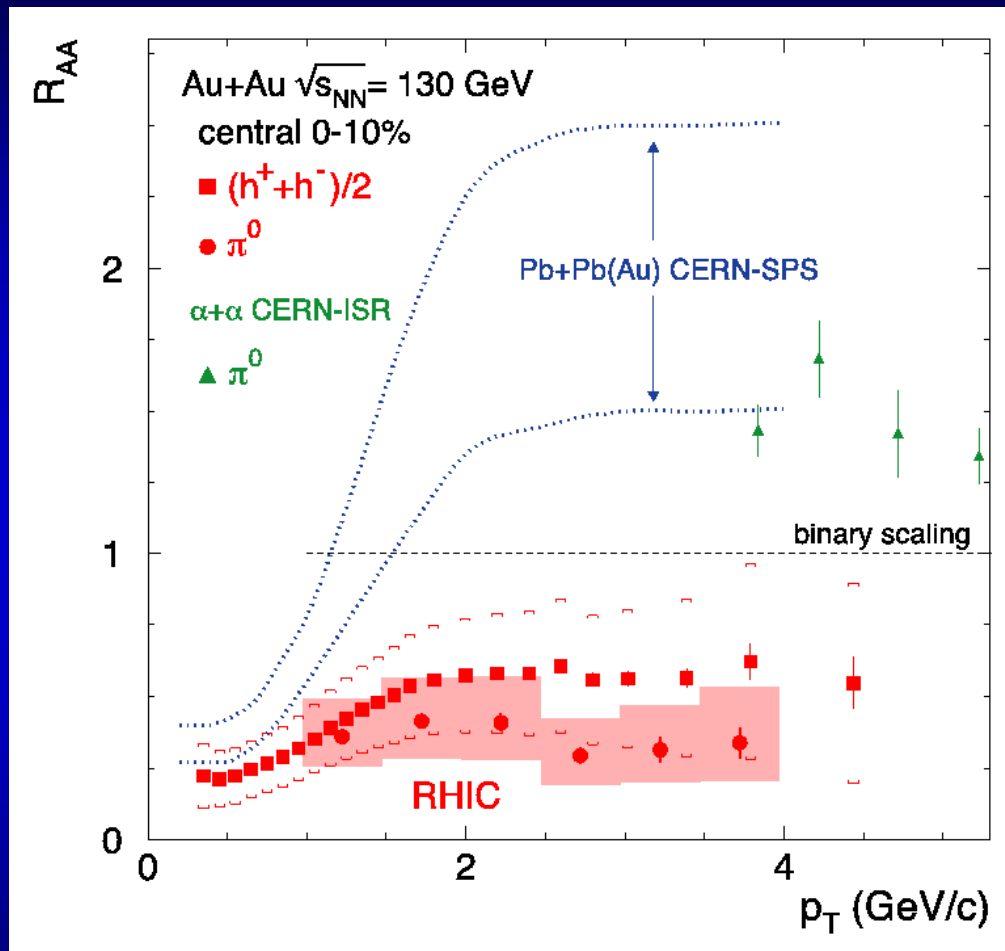


“Periférikus”

Az átfedéssel kapcsolatos orientáció

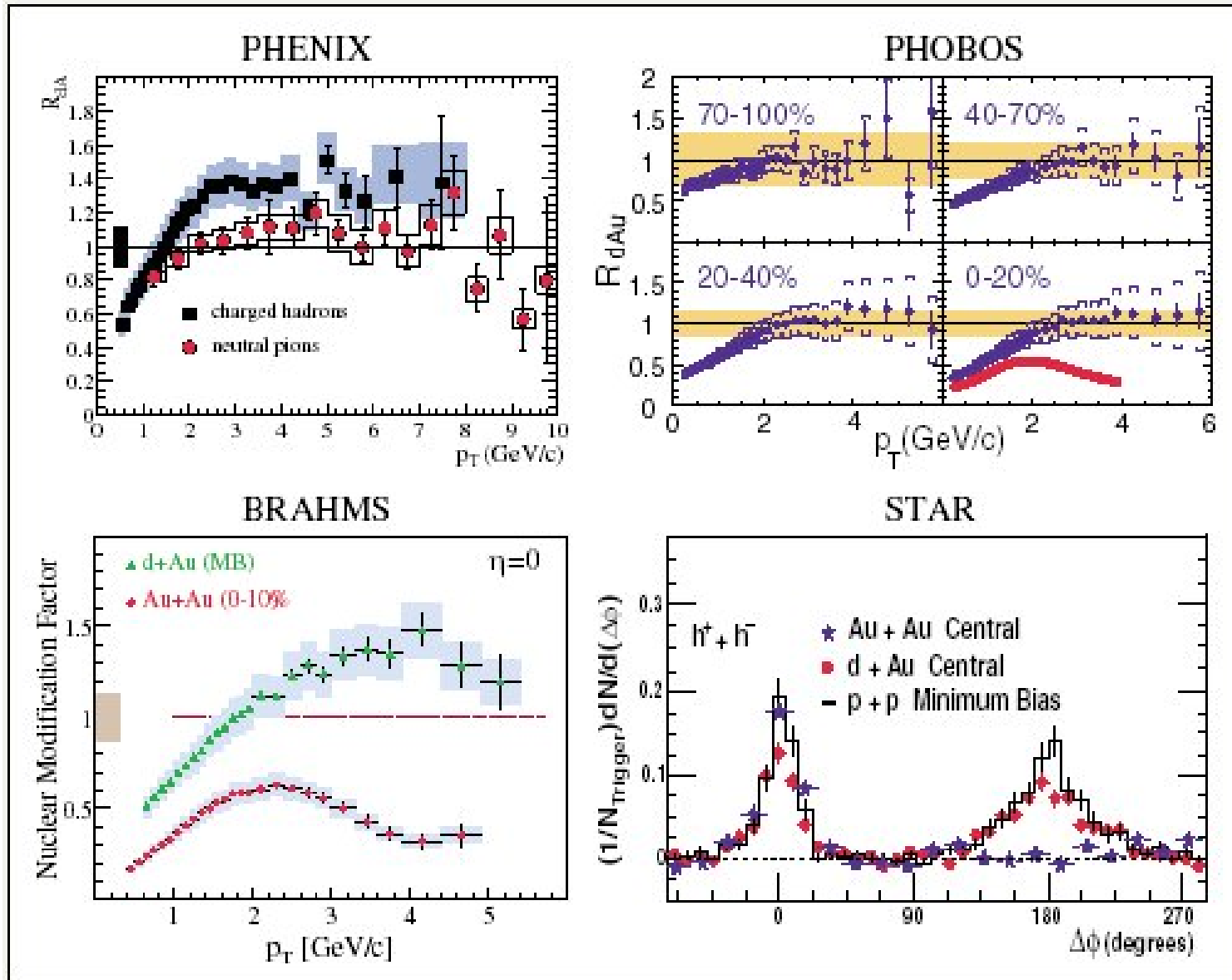


Első mérőföldkő: új jelenség



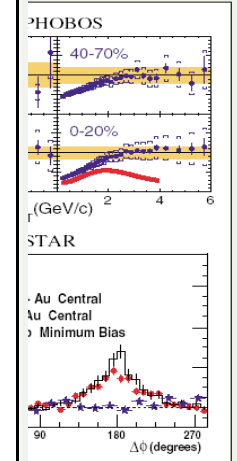
A RHIC-nél a nagy transzverzális momentumú részecskekeltés jelentős elnyomása az Au+Au ütközésben

Második mérőkö: az anyag új formája



PHYSICAL
VIEW
LETTERS

Published week ending
AUGUST 2003
Volume 91, Number 7



Preprint Copy
Use Prohibited Until 2008

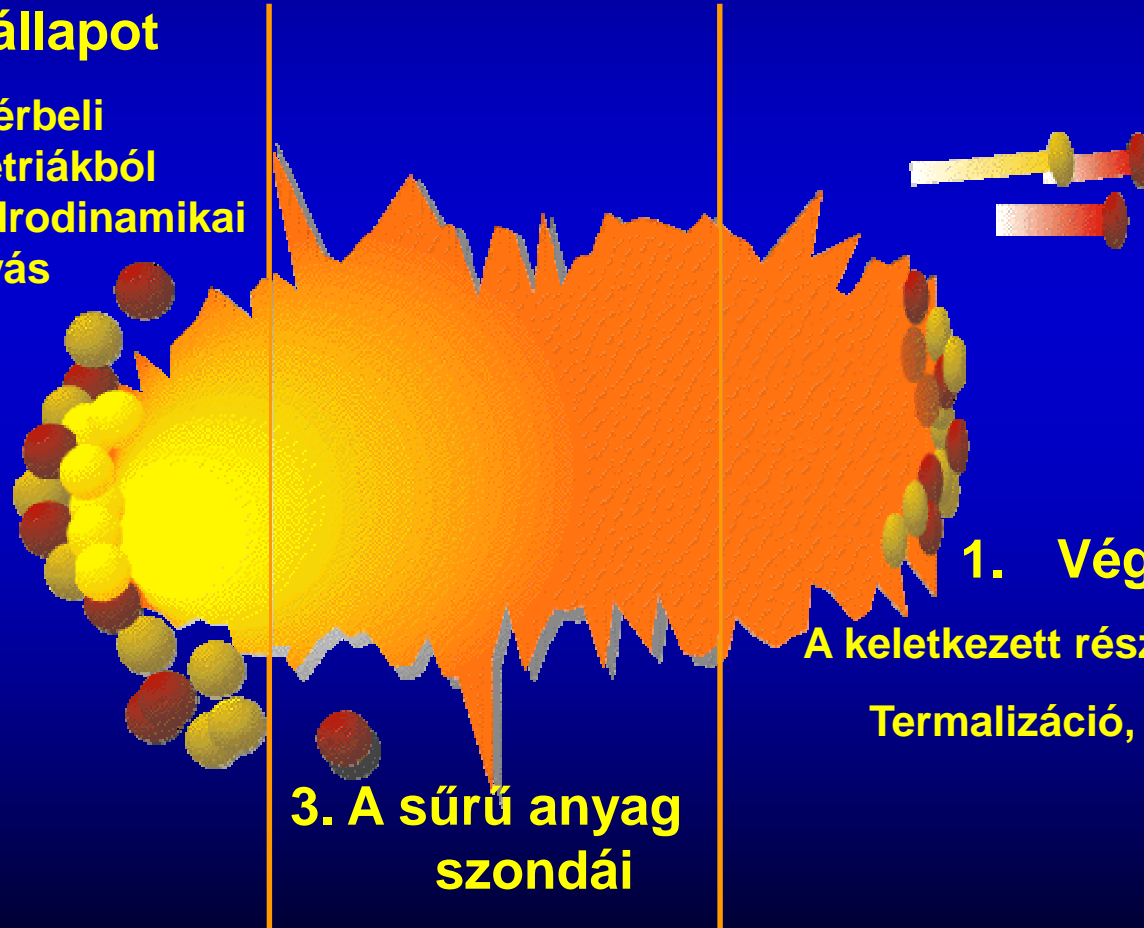
American Physical Society

Közelítés

Az ütközési folyamat különböző fázisai:

2. Kezdeti állapot

A kezdeti térbeli
aszimmetriákból
származó Hidrodinamikai
folyás



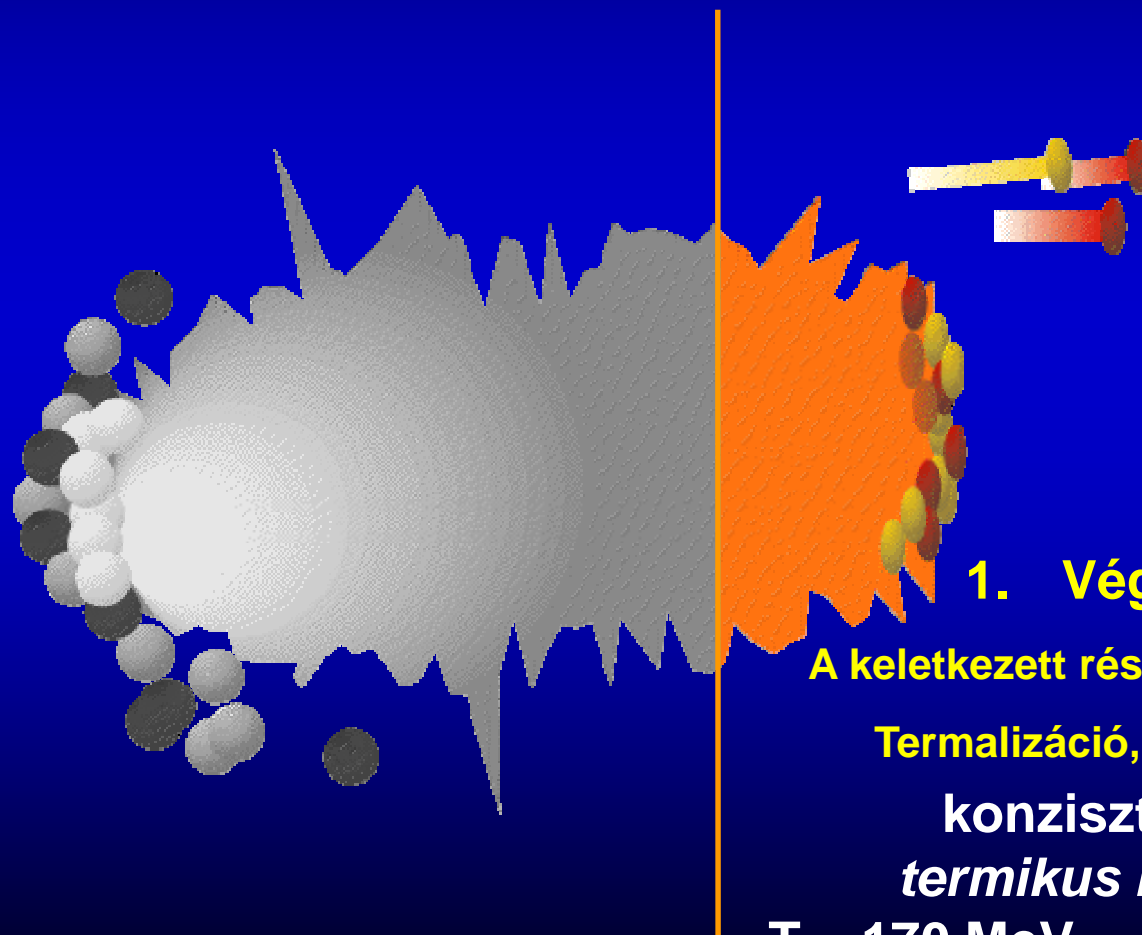
1. Végállapot

A keletkezett részecskék hozamai
Termalizáció, Hadronkémia

3. A sűrű anyag szondái

Final State

Tükröz-e **termikus** eloszlást a végállapotú részecskék hatalmas bősége?:



1. Végállapot

A keletkezett részecskék hozamai

Termalizáció, Hadronkémia

konzisztens

termikus keltéssel

$T \sim 170 \text{ MeV}$, $\mu_B \sim 30 \text{ MeV}$



Origin of the (Hadronic) Species

- **Apparently:**

- Assume all distributions described by one temperature T and

$$dn \sim e^{-(E-\mu)/T} d^3 p$$

one (baryon) chemical potential μ :

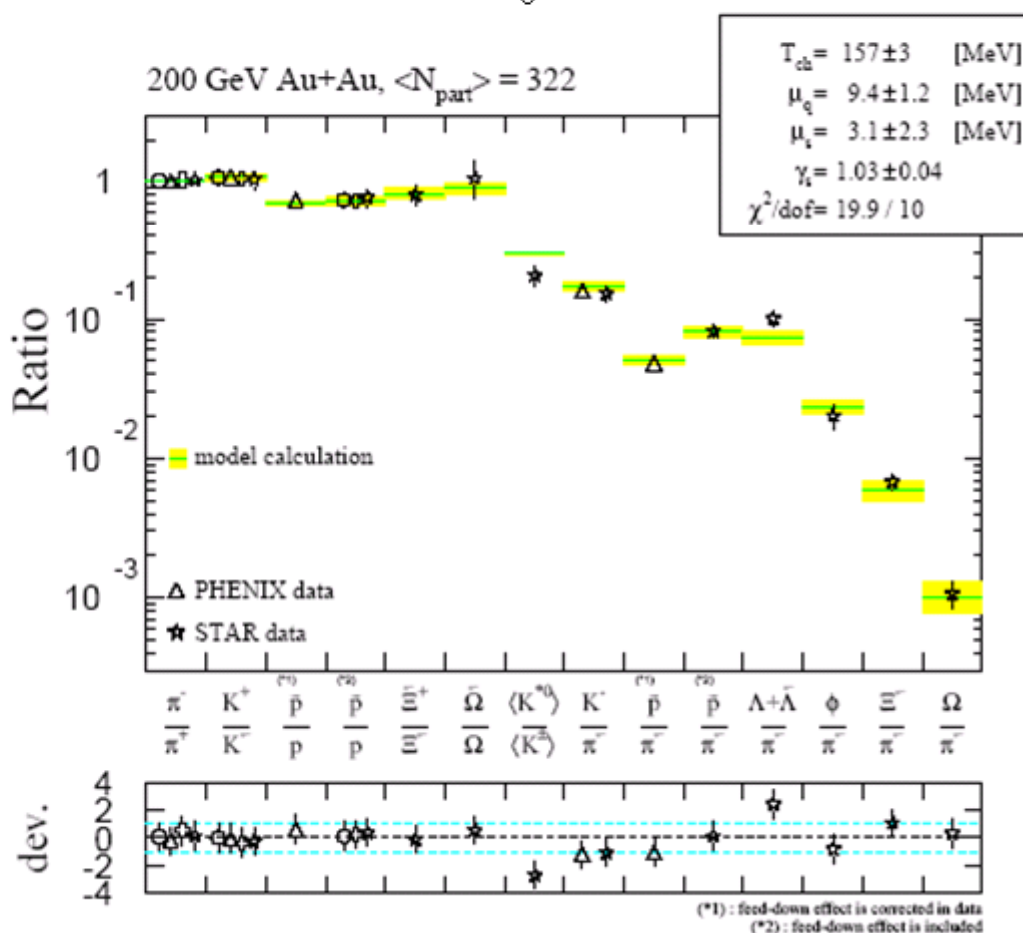
$$\frac{\bar{p}}{p} = \frac{e^{-(E+\mu)/T}}{e^{-(E-\mu)/T}} = e^{-2\mu/T}$$

- One ratio (e.g., \bar{p}/p) determines μ/T :
- A second ratio (e.g., K/π) provides $T \rightarrow \mu$

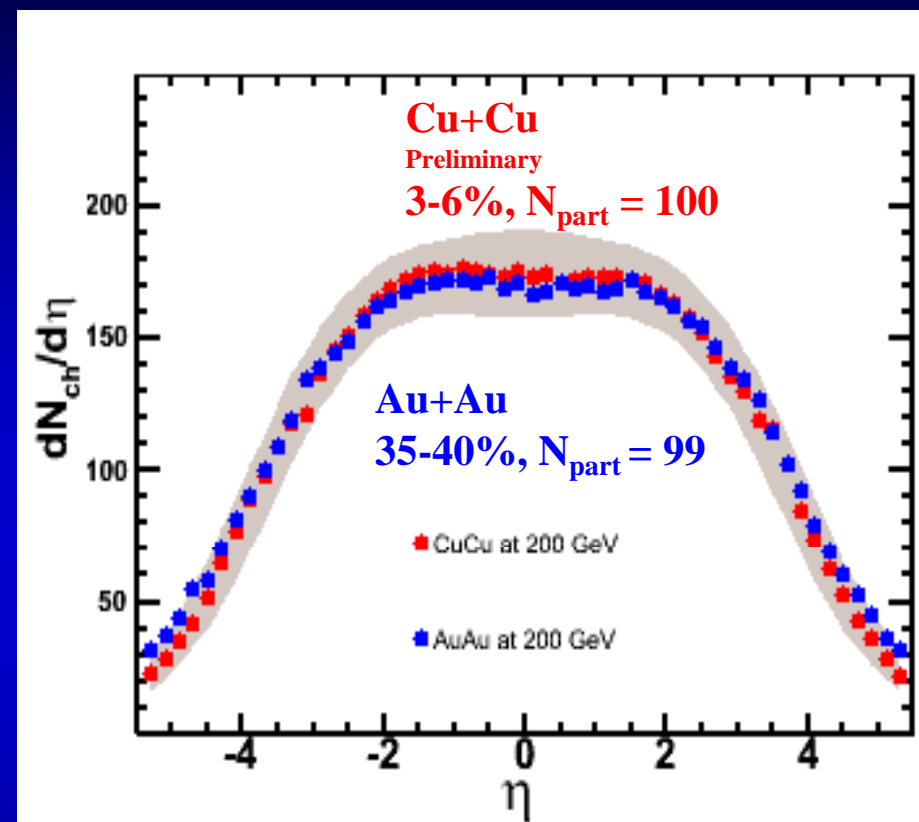
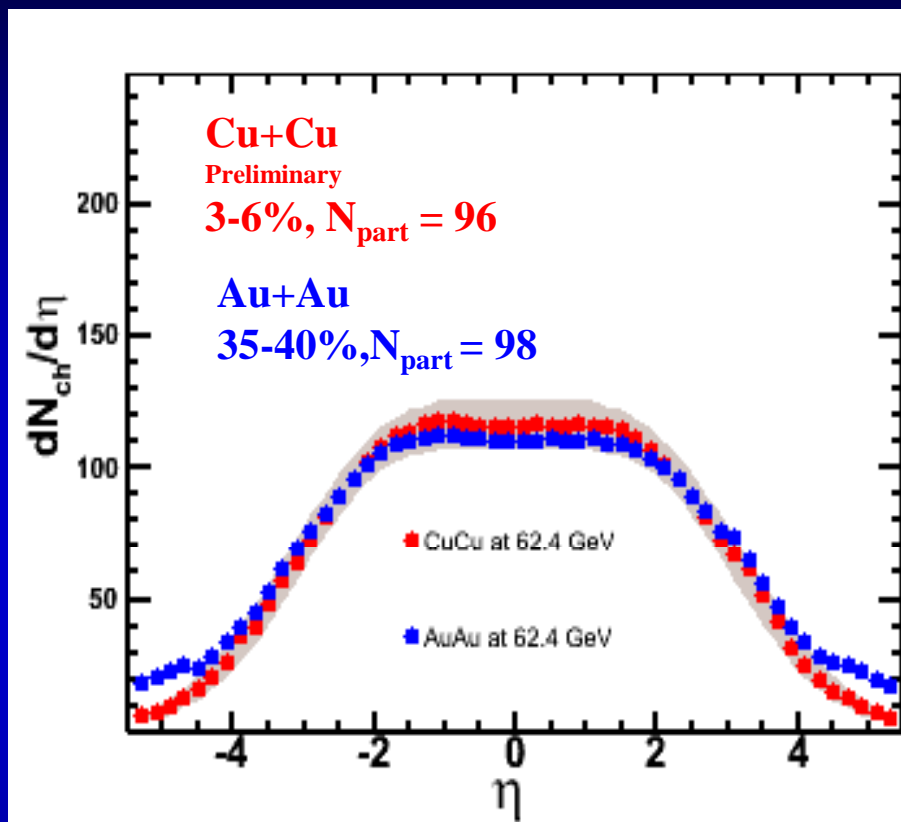
- Then predict all other hadronic yields and ratios:

- **NOTE: Truly thermal implies *No memory (!)***

$\pi^\pm, \pi^0, K^\pm, K^{*0}(892), K_s^0, \eta, p, d, \rho^0, \phi, \Delta, \Lambda, \Sigma^*(1385), \Lambda^*(1520), \Xi^\pm, \Omega, D^0, D^\pm, J/\Psi's,$
 (+ anti-particles) ... $\Rightarrow T \sim 170 \text{ MeV} \sim 2 \times 10^{12} \text{ K}$



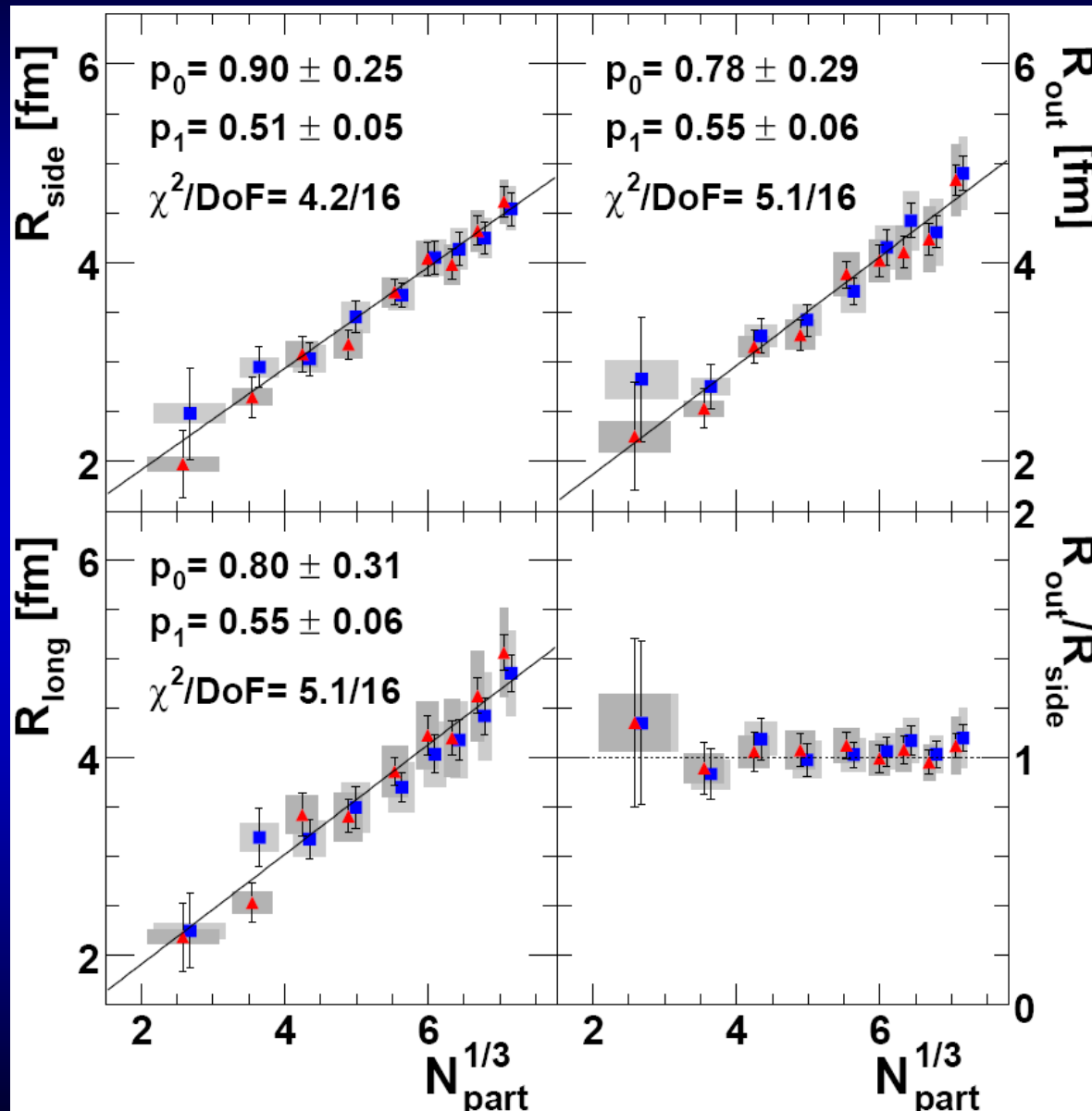
PHOBOS: Termikus állapot nem emlékszik



$dN/d\eta$ nagyon hasonló az Au+Au és Cu+Cu esetén, ha azonos

N_{part}
A multiplicitás eloszlása a függetlenség hipotézisét követi !

PHENIX HBT: termikus, nincs emlékezés



(Hanbury-Brown-Twiss)
HBT sugarak
Szimmetrikus függése
 N_{part} -tól

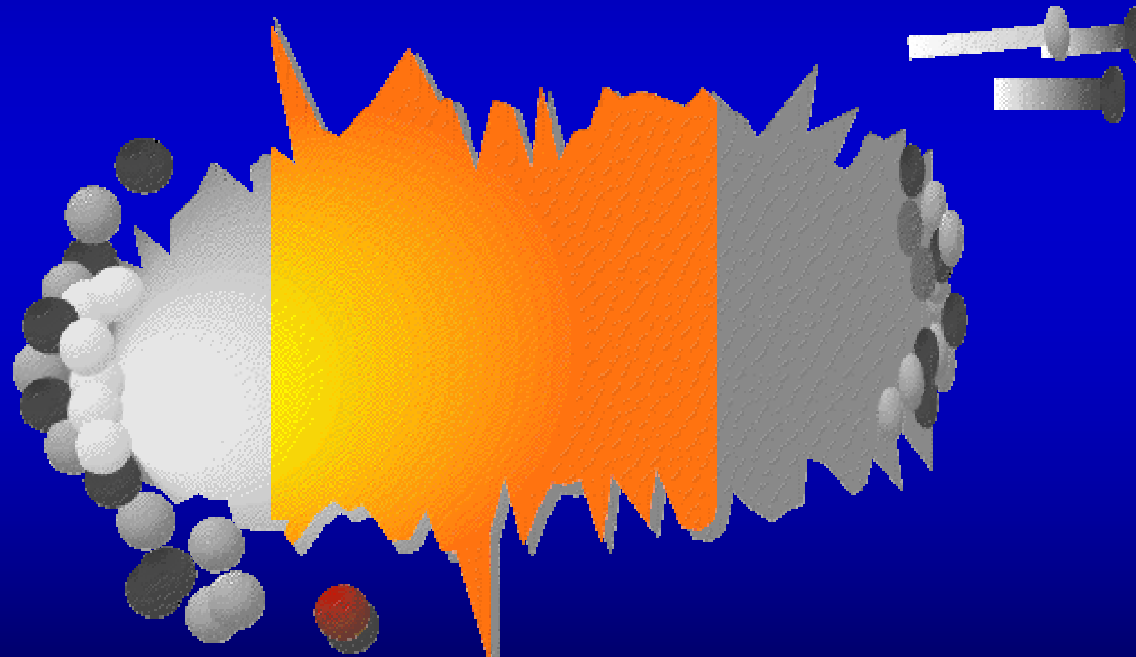
Tartalmaz egy
3D szférikus
Hubble folyást

Sűrűségbeli
Aszimmetria lehetséges

A sűrű anyag szondái

K. Milyen sűrű az anyag?

V. Végezzünk pQCD Rutherford szórás számításokat „auto-generált” szondákkal a legbelsőbb tartományon:



2. A sűrű anyag szondái

Alap: p+p Mérések és pQCD

Inkluzív π^0 keltés p+p reakció vizsgálat a RHIC-nél, invariáns differenciális hatáskeresztmetszet meghatározása.

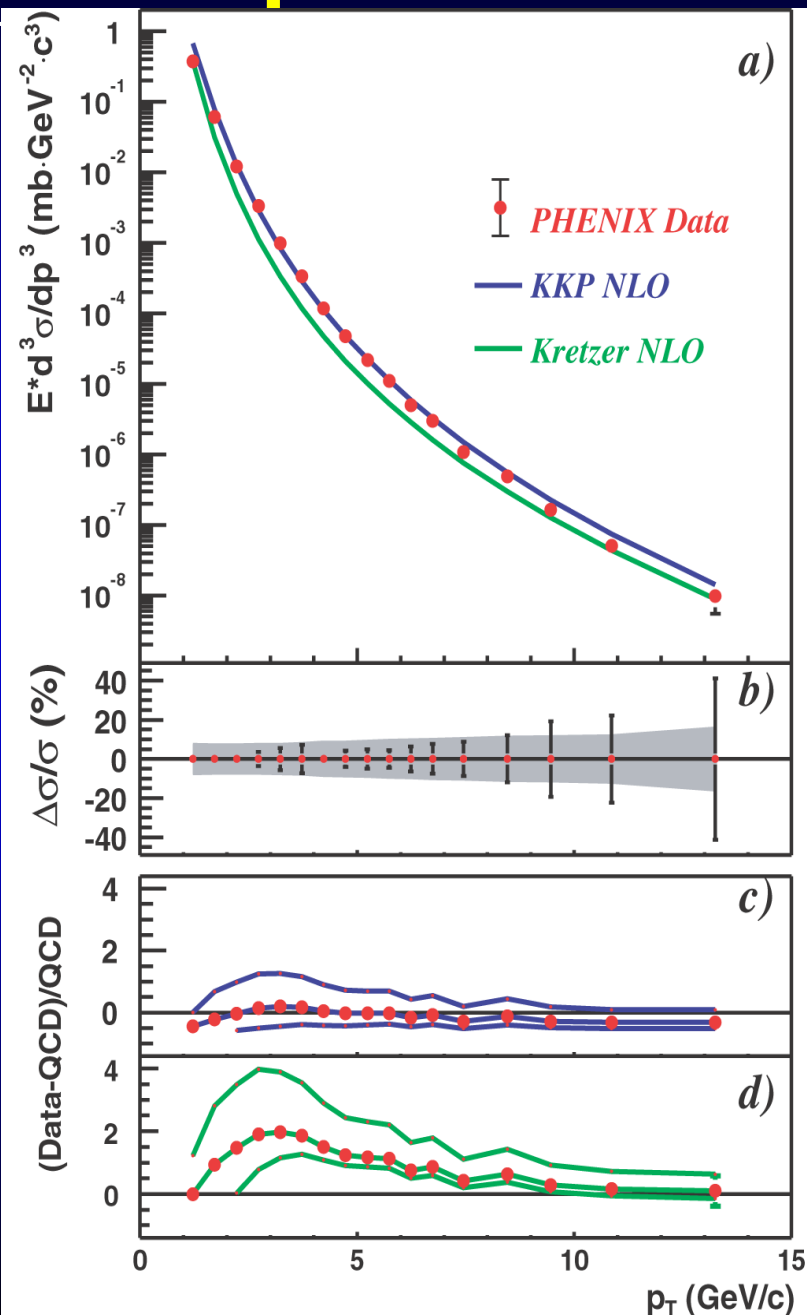
Összehasonlítás pQCD számításokkal

- Egyetemes PDF (parton distribution functions) használata

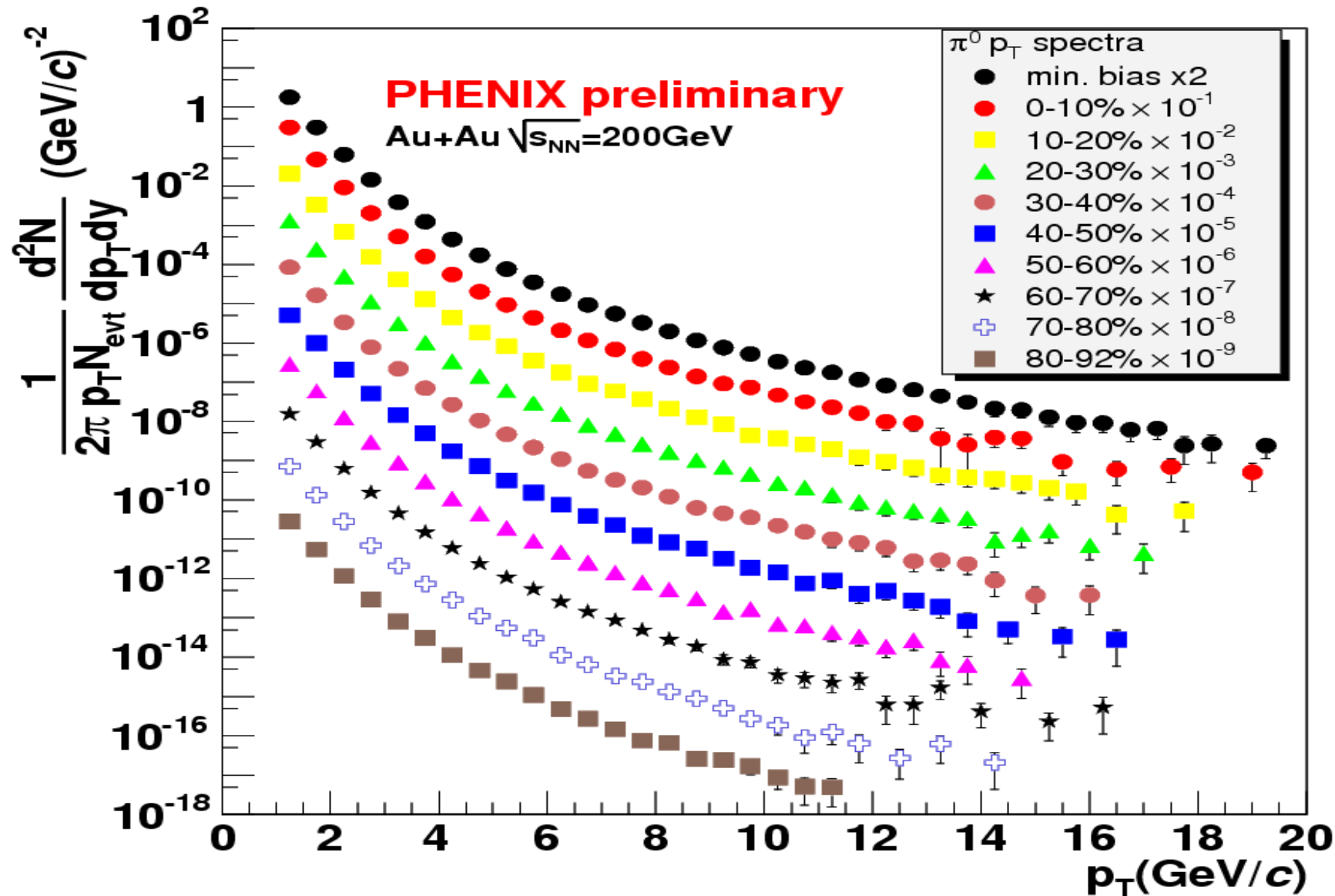
- NLO pQCD számításokhoz a hatáskeresztmetszet faktorizálása: proton PDF-ekre, parton-to-pion fragmentációs függvényekre és rövid hatótávú partonic hard-scattering hatáskeresztmetszeteire.

- Kétféle fragmentációs függvénnyel illesztve, Kniehl-Kramer-Pötter(KKP) és Kretzer, jó leírás!

Phys. Rev. Lett. 91, 241803 (2003)



Au+Au: Szisztematikus Elnyomás Minta

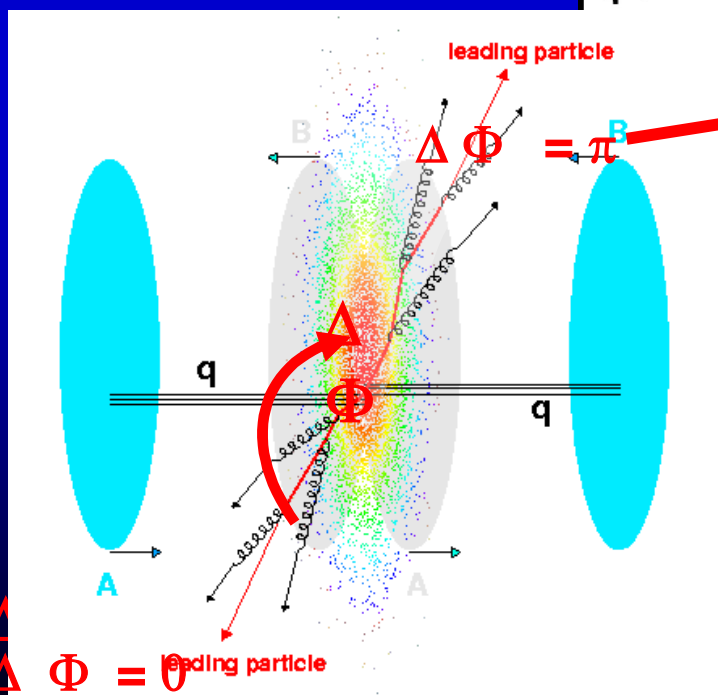
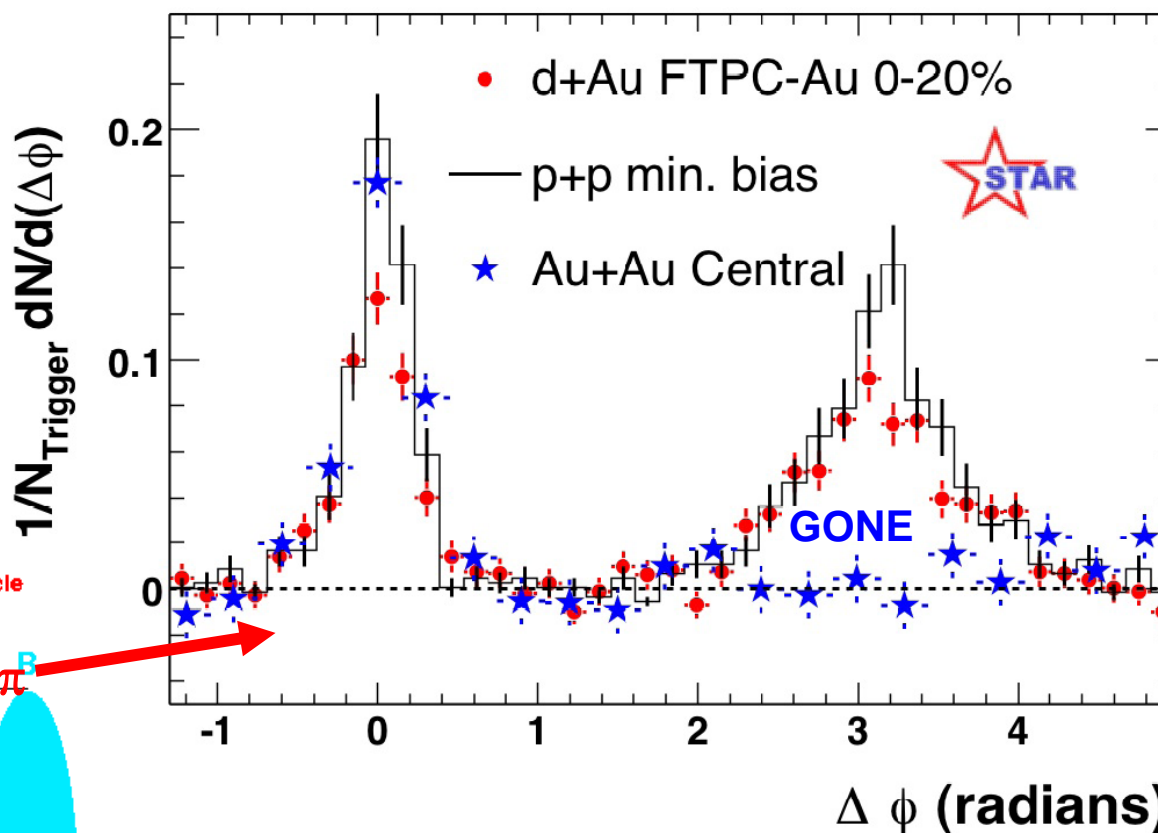


Felerősít

Elnyomás

Az új anyag nem átlátszó

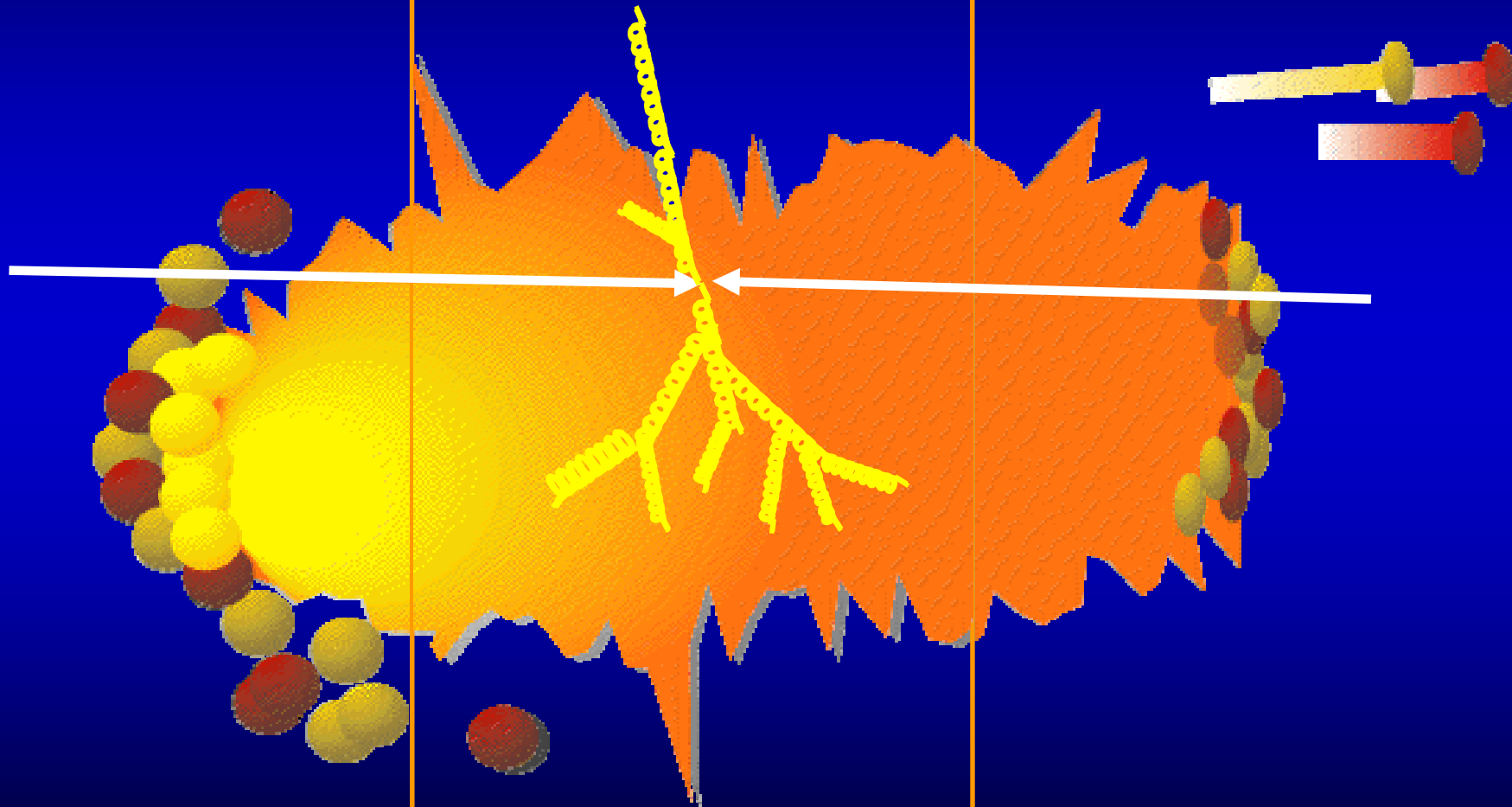
- STAR azimutális korrelációs függvénye ~ az "away-side" jet teljes hiányát mutatja



A jet partner a kemény szórás folyamán **teljesen elnyelődik** a sűrű médiumban

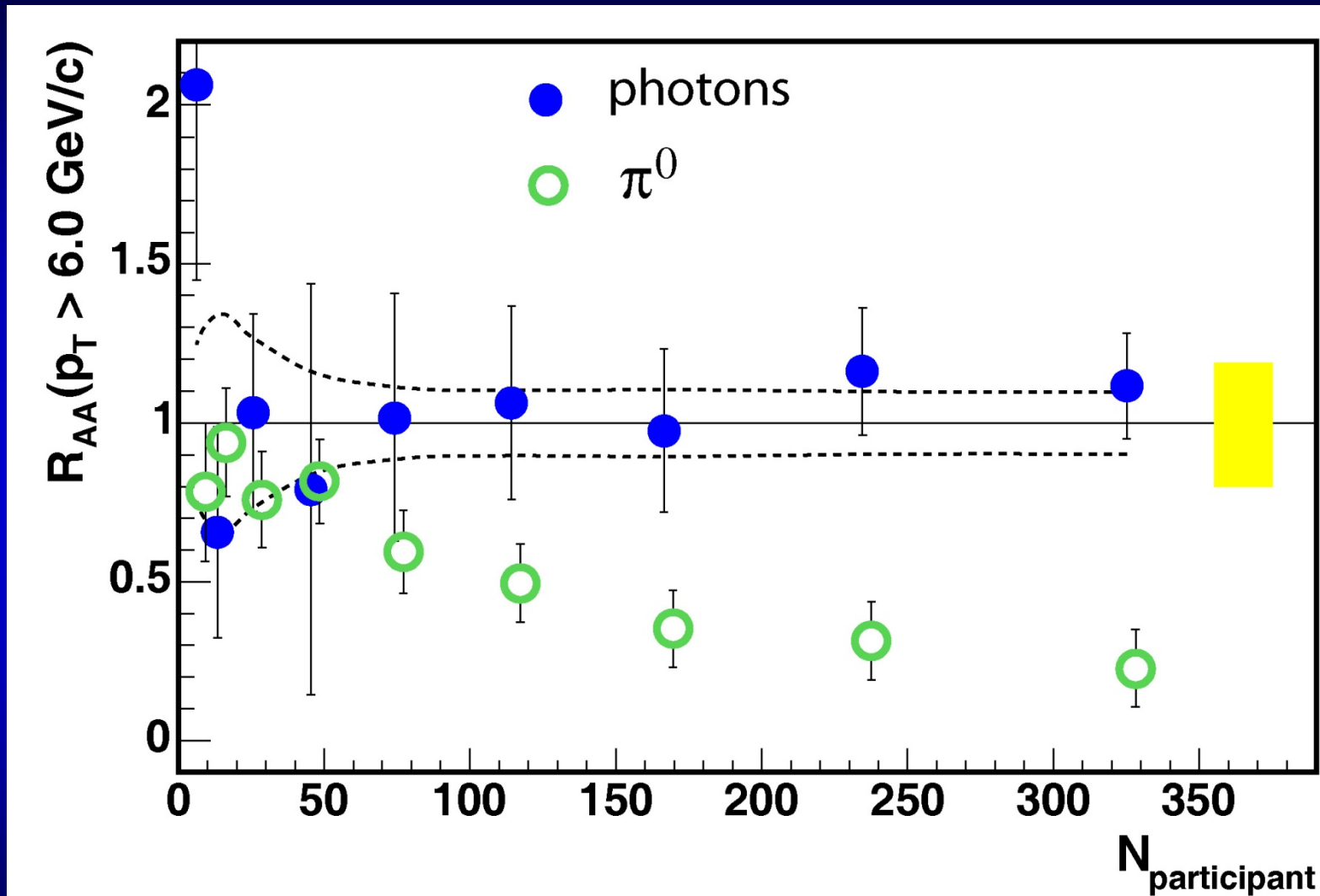
Sematikusan (Partonok)

A szóródott partonok a “near side”-on *energiát vesztenek*,
de kijutnak;



a “far side” felé haladók teljesen elnyelődnek

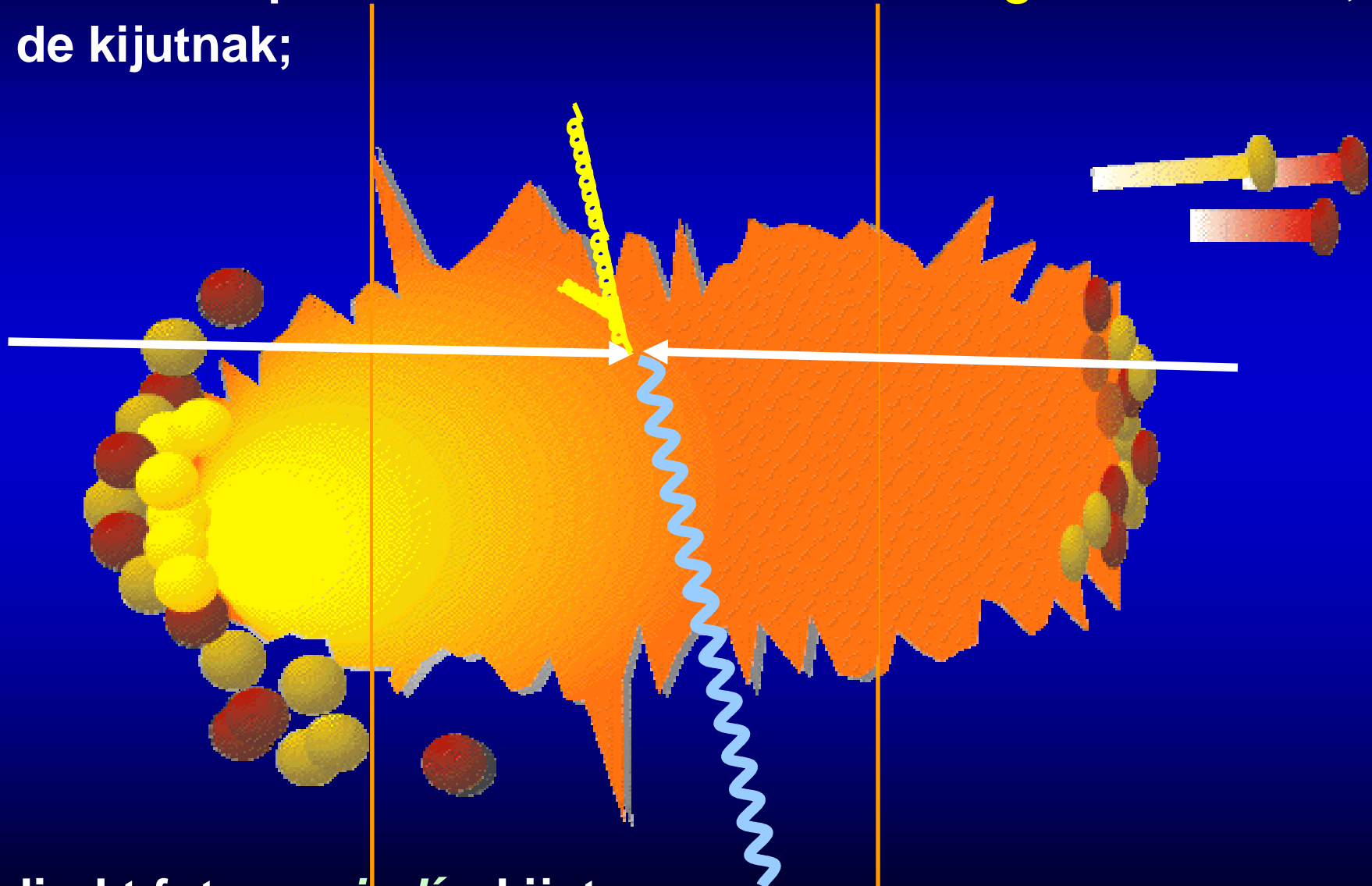
Ellenőrzés: Fotonok ragyognak, Pionok nem



Direkt fotonokra **nem** hat tiltóan a forró/sűrű médium
inkább: **átragyognak** a pQCD jóslatnak megfelelően

Sematikuan (Fotonok)

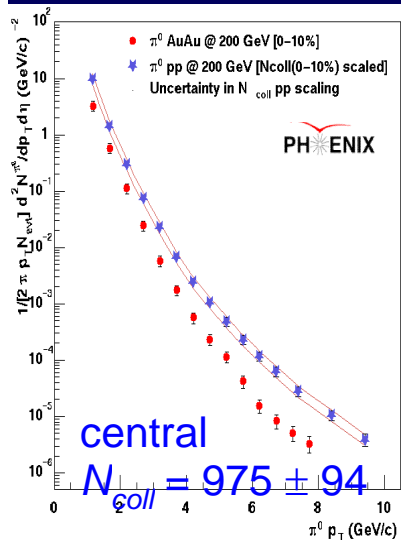
A szóródott partonok a “near side”-on *energiát vesztenek*,
de kijutnak;



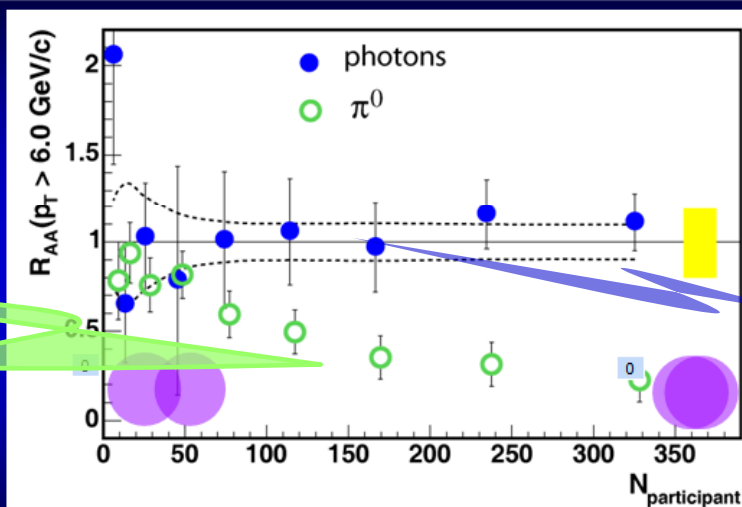
a direkt foton *mindíg* kijut

Precíziós Szondák

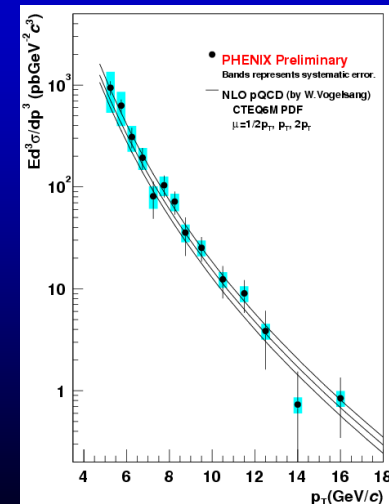
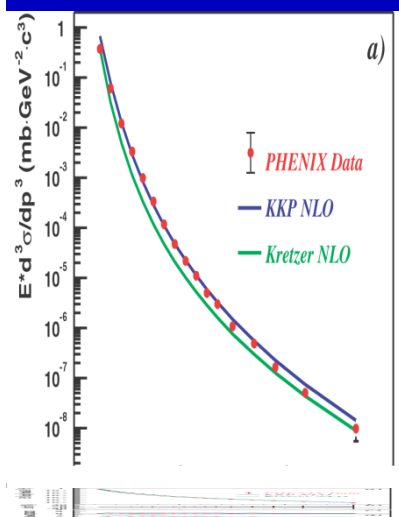
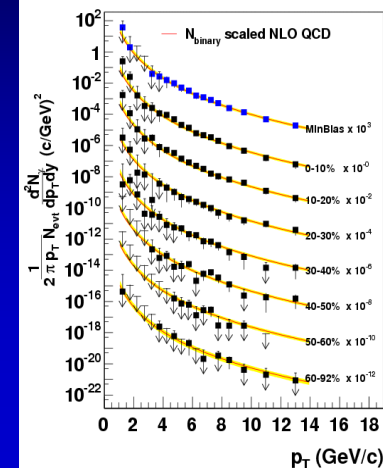
Egyetlen ábra a szisztematika szigorú kontrollját tartalmazza kódolva



Control: Photons shine, Pions don't



- Direct photons are **not** inhibited by hot/dense medium
- Rather: **shine** through consistent with pQCD



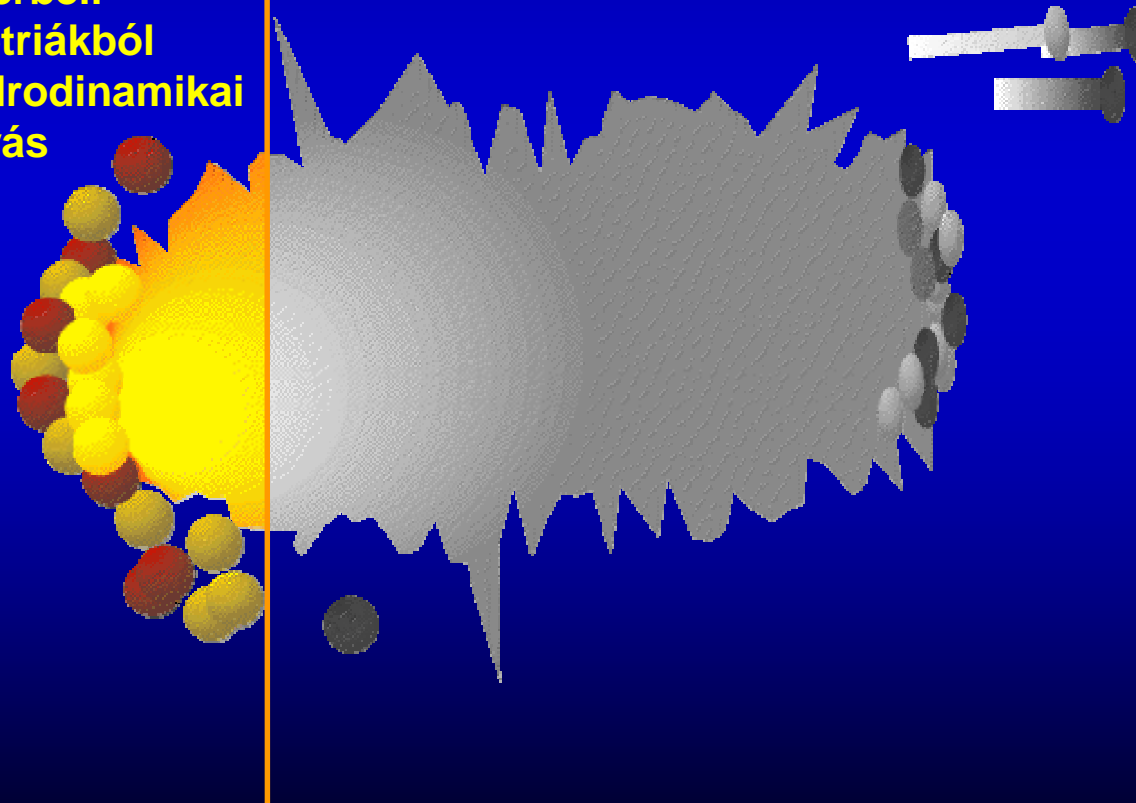
Négy különböző mérésben több nagyságrendet átfogva

Kezdeti Állapot

Hogyan vésődnek be a kezdeti állapotú sűrűségek és aszimmetriák a detektált eloszlásokba?

2. Kezdeti Állapot

A kezdeti térbeli aszimmetriákból származó Hidrodinamikai folyás



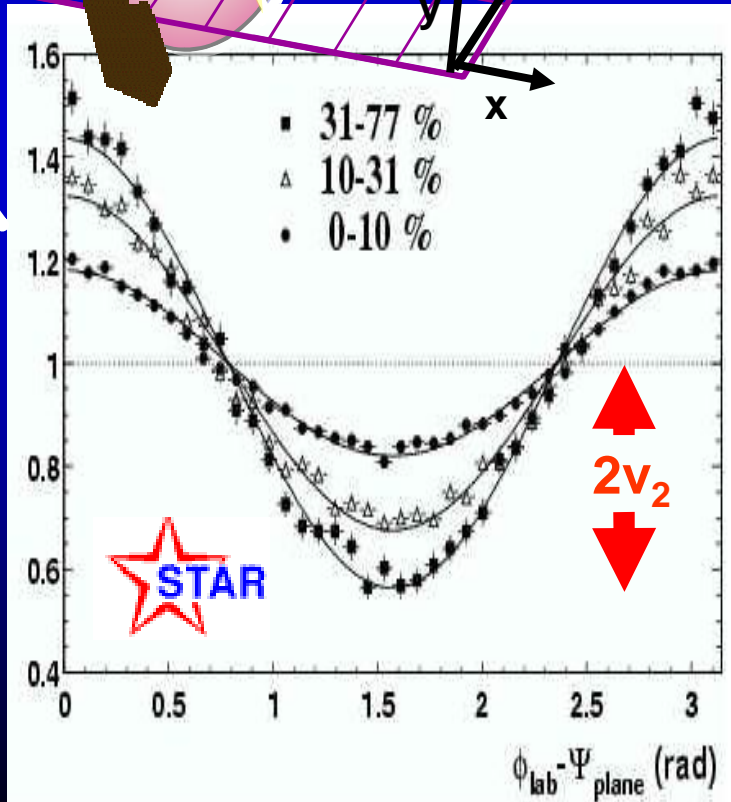
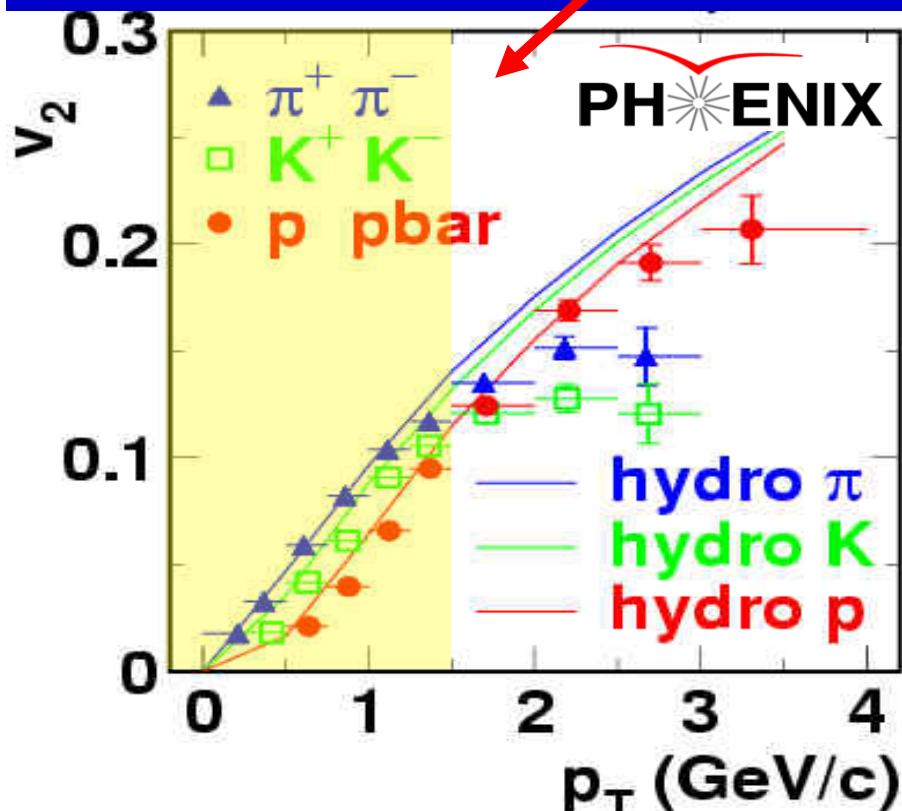
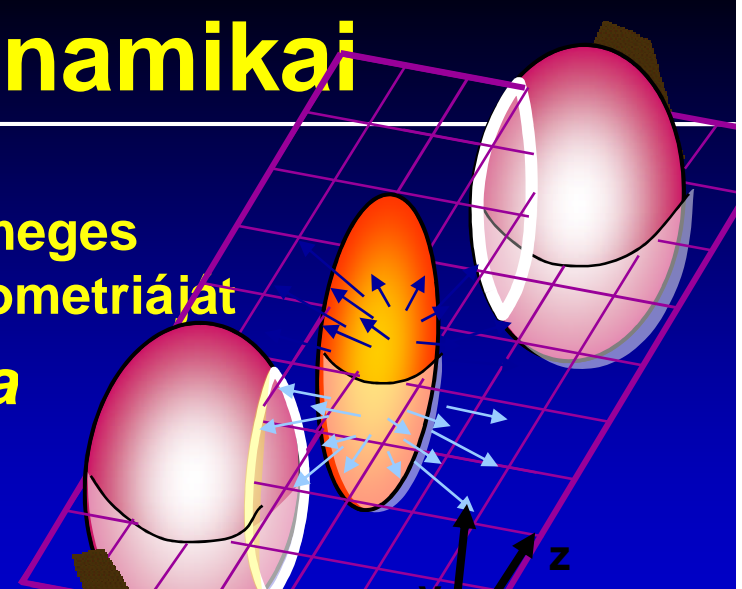
A Mozgás Hidrodinamikai

Mikor történik a termalizáció?

Erős evidencia arra, hogy a végállapot tömeges viselkedése tükrözi a kezdeti állapot geometriáját

Mivel a kezdeti *azimutális aszimmetria* megjelenik a végállapotban

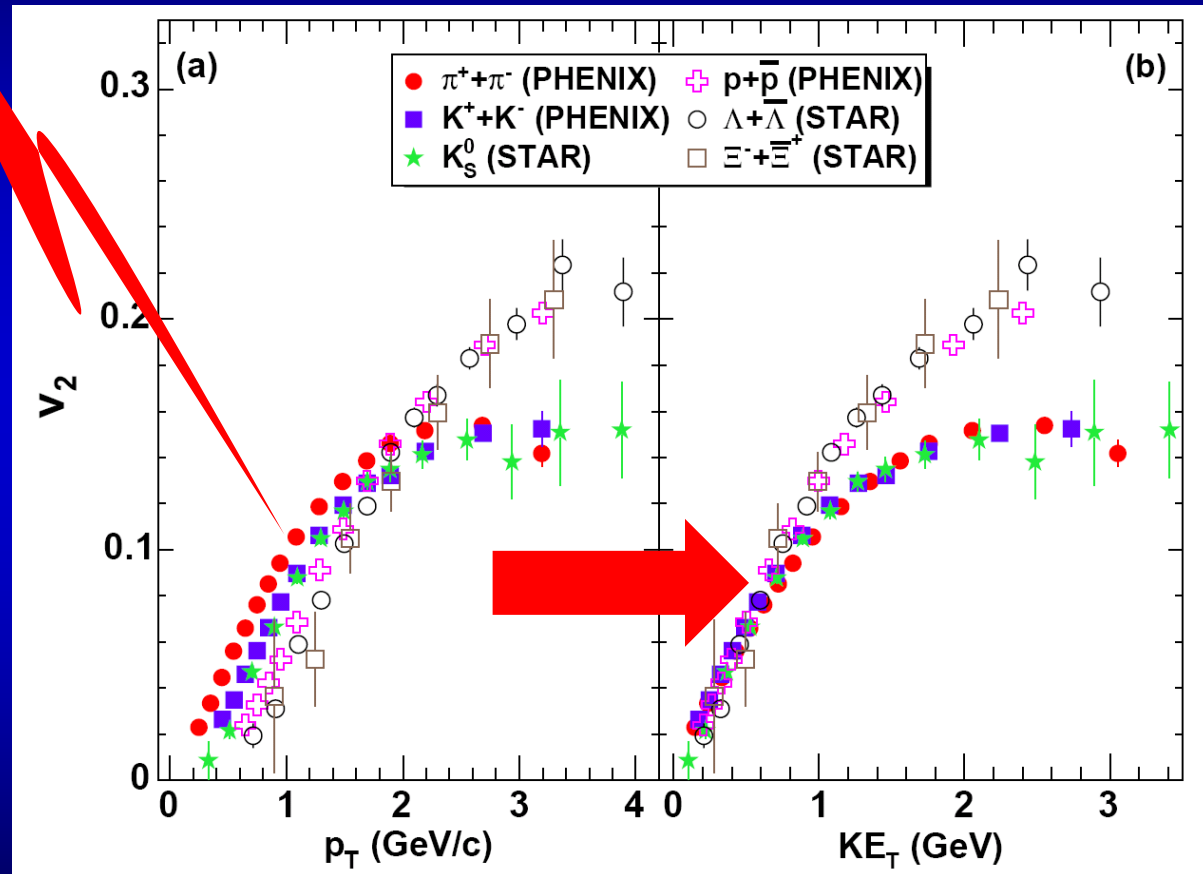
$$dn/d\phi \sim 1 + 2 v_2(p_T) \cos(2\phi) + \dots$$



A "Folyás" ~ Tökéletes

A $v_2(p_T)$ "finomszerkezete" a különböző tömegű részecskékre jó egyezést mutat a tökéletes folyadék hidrodinamikájával

$$KE_T = \sqrt{m^2 + p_T^2}$$




Közelítés: $\partial_\nu T^{\mu\nu} = 0 \rightarrow$ Munka-Energia Teoréma

$$\rightarrow \int \nabla P d(\text{vol}) = \Delta E_K \cong m_T - m_0 \equiv \Delta KE_T$$

Megjegyzés: Roy Lacey + Buda-Lund Hidro modell jóslás!

Harmadik mérföldkő: Top Physics Story 2005

Cím  <http://www.aip.org/pnu/2005/split/757-1.html>

AMERICAN INSTITUTE OF PHYSICS SEARCH [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

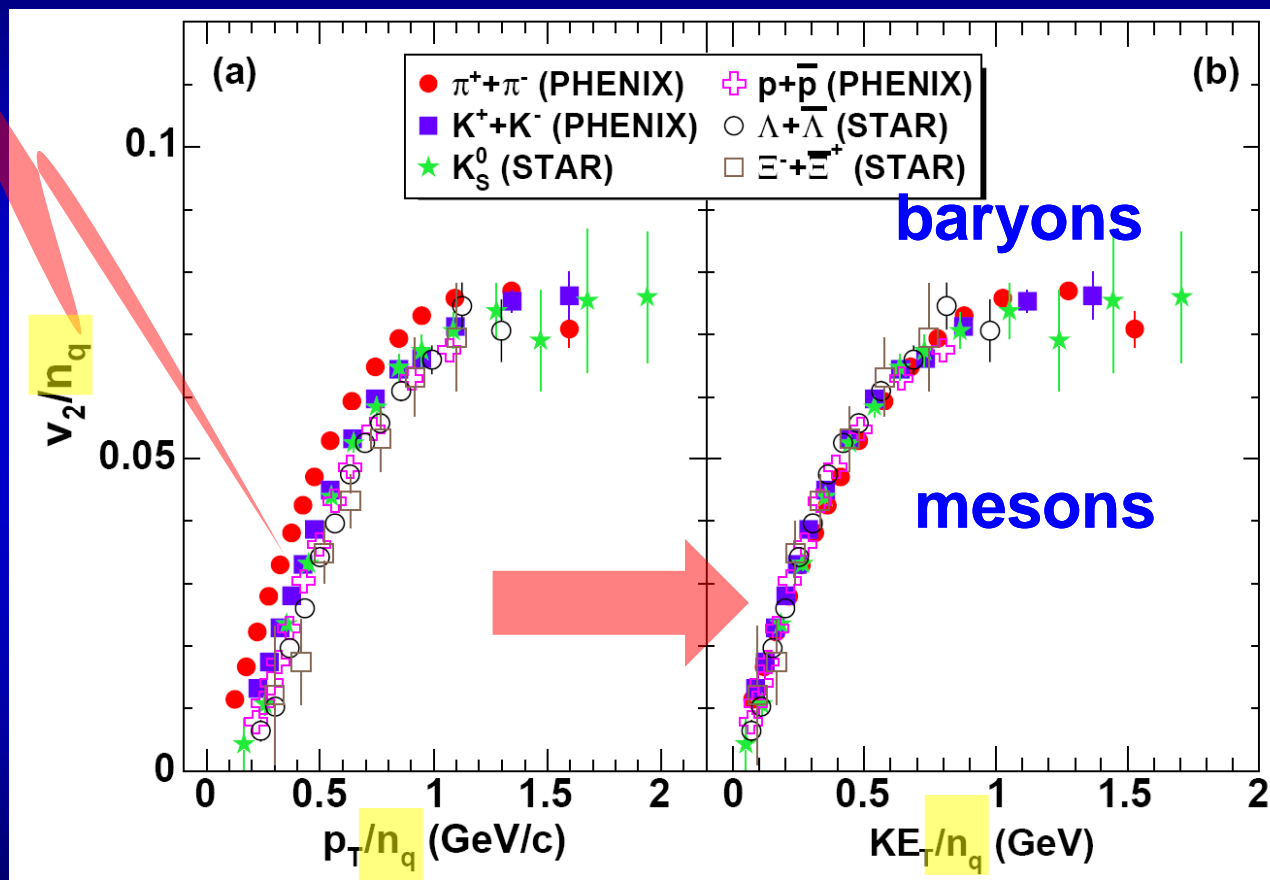
- [2006](#)
- [2005](#)
- [2004](#)

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

PHENIX White Paper: second most cited in nucl-ex during 2006

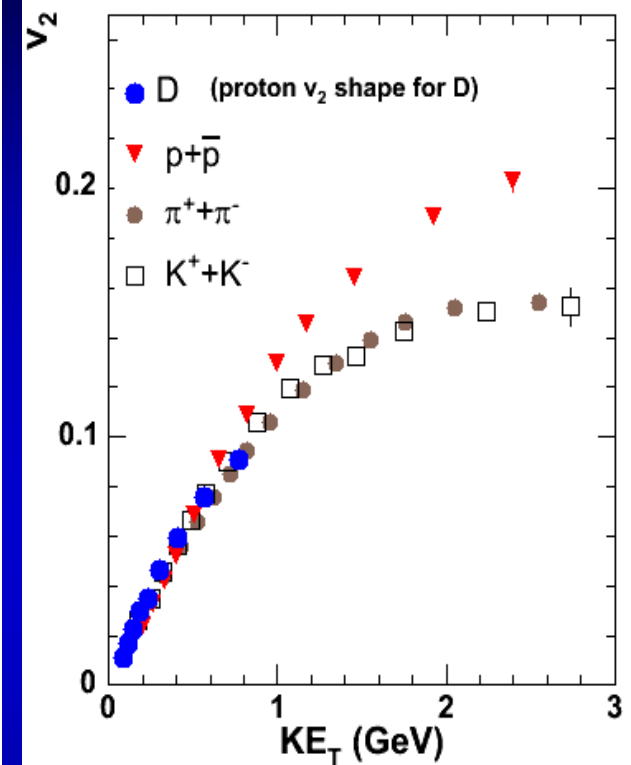
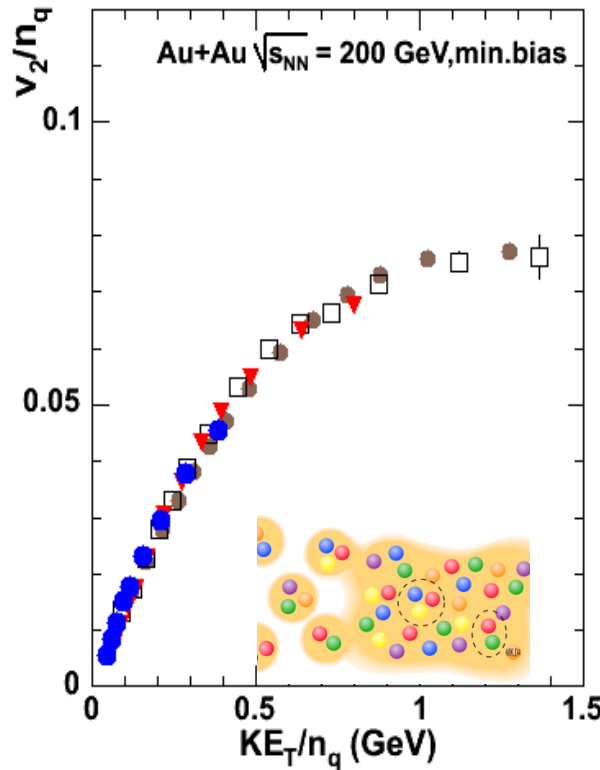
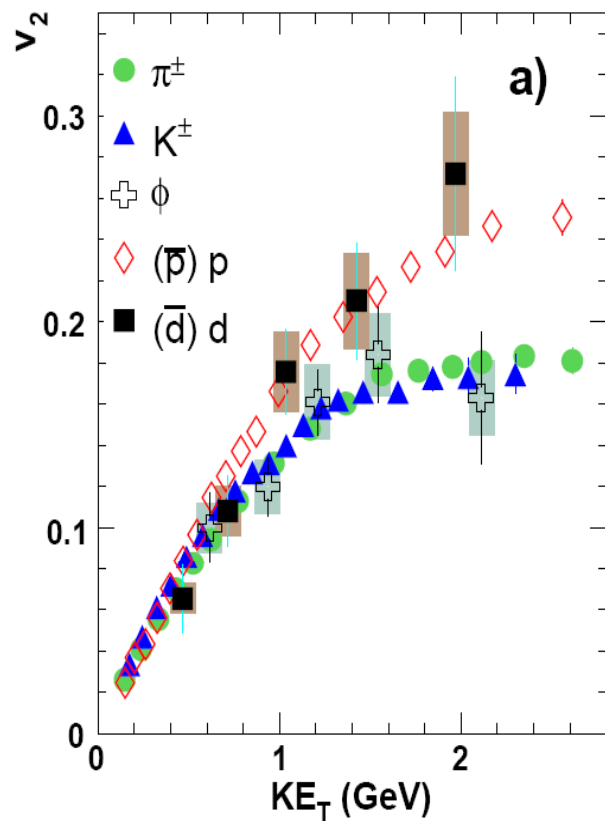
A Kvarkfolyadék

A $v_2(p_T)$ “finomszerkezete” a különböző tömegű részecskékre jó egyezést mutat a tökéletes folyadék hidrodinamikájával



A folyási paramétereknek az n_q vegyértékkvark-tartalommal való skálázása feloldja a végállapotú hadronok mezon-barion szétválását

Negyedik Mérföldkő: A kvarkfolyadék



A ϕ mezon v_2 értéke követi a többi mezonét

$$v_2^{hadron}(KE_T^{hadron}) \approx n v_2^{quark}(KE_T^{quark})$$

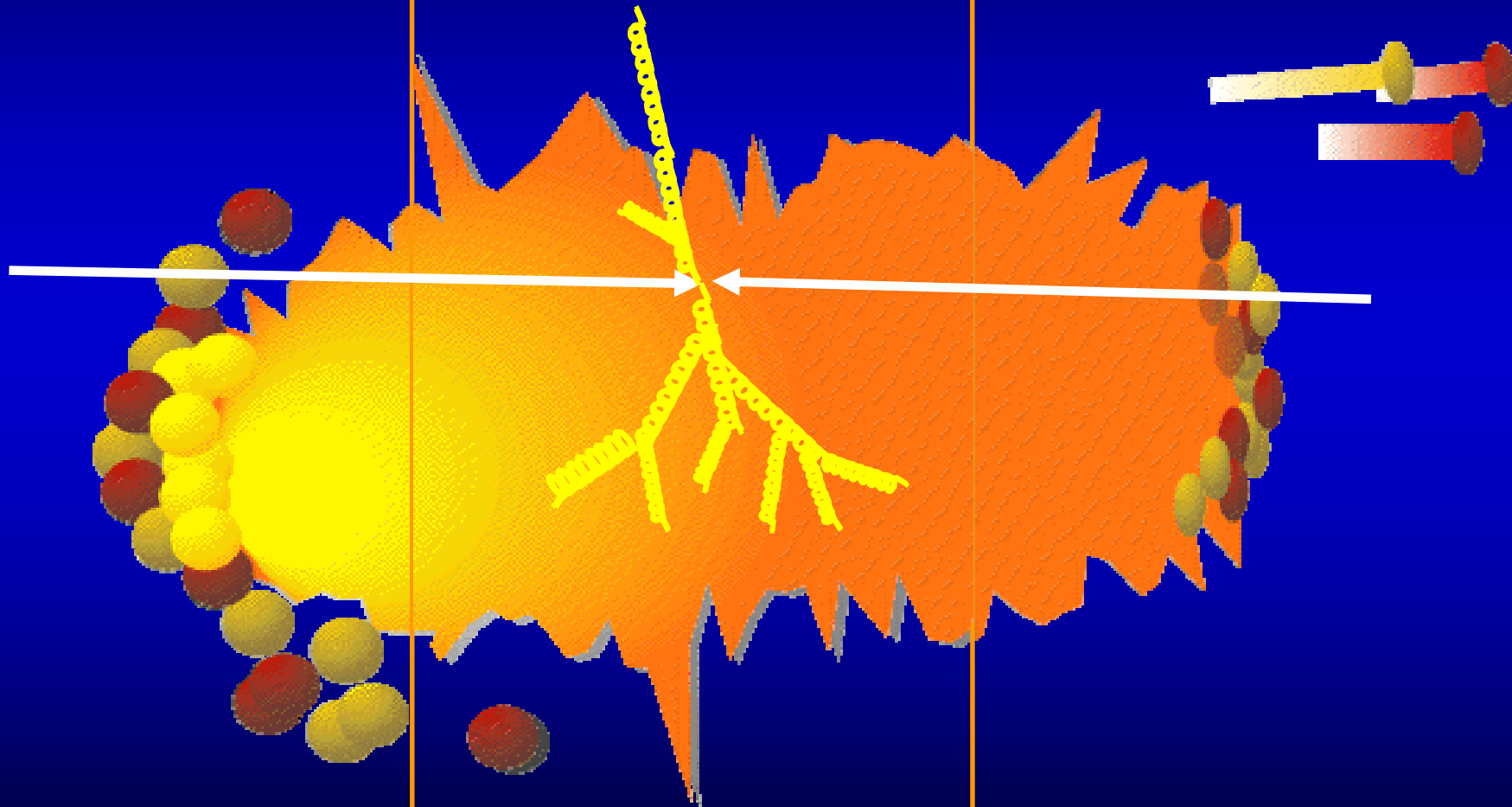
$$KE_T^{hadron} \approx n KE_T^{quark}$$

A D mezon v_2 értéke követi a többi mezonét

A Strange és Charm kvarkok is résztvesznek a folyásban

A Soft és Hard rendszerek közötti kapcsolat

A szóródott partonok a “near side”-on *energiát vesztenek*,
de kijutnak;



a “far side” felé teljesen elnyelődnek

→ *Valóban?*

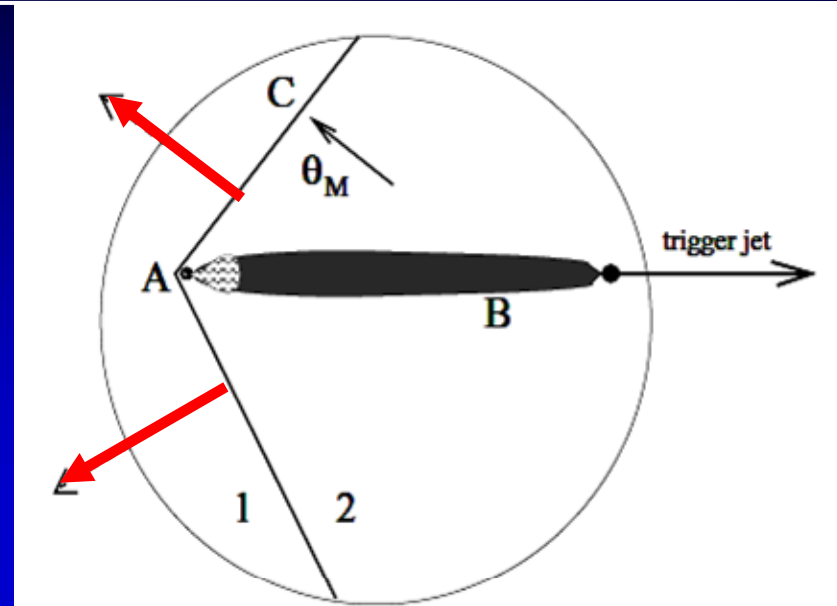
Jet-ek kölcsönhatása sűrű médiummal ?

Prandtl-Glauert szingularitás
kondenzációs kúpja?

Mach kúp?

A Jet-ek ha a médiumbeli hangsebesség környékén, vagy annál gyorsabban haladnak, ezalatt energiát adnak le gluonsugárzással.

PI. QCD “hangrobbanás” (?)
Ilyen folyamatok megjelenése várható **egy erősen-csatolt sűrű folyadékban.**



Nagy p_T Parton \rightarrow Kis p_T “Mach Kúp”?

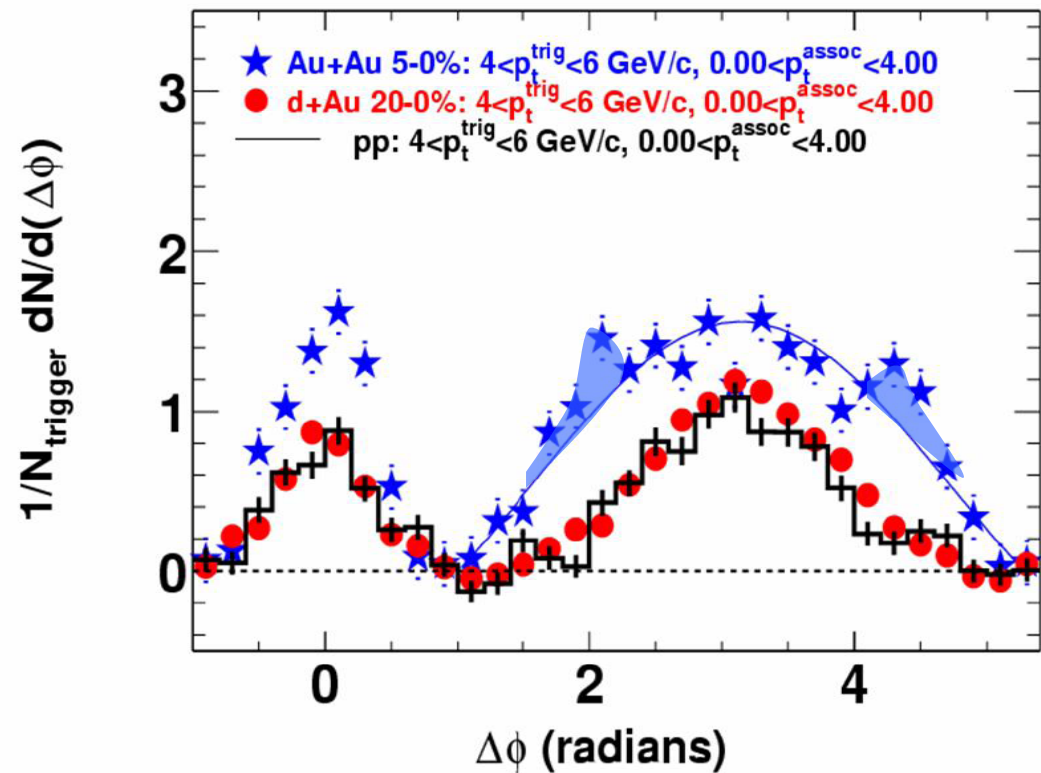
A nagy p_T -jű partner
“*eltűnik*”

De alacsony p_T , -n *újra feltűnik*

és

“Side-lobes” oldalfülek
(Mach kúpok?)
képében.

The Matter is Opaque



☞ Partner in hard scatter is
completely absorbed
in the dense medium

Tökéletes a “Tökéletes” ? MÉRJÜK η/s ÉRTÉKÉT !

Csillapítás (folyás, fluktuációk, nehéz kvark mozgás) ~

Nyírási-viszkozitás és entrópia arány: η/s

FLOW: *Has the QCD Critical Point Been Signaled by Observations at RHIC?*,
R. Lacey et al.,
Phys.Rev.Lett.98:092301,2007
(nucl-ex/0609025)

The Centrality dependence of Elliptic flow, the Hydrodynamic Limit, and the Viscosity of Hot QCD, H.-J. Drescher et al.,
(arXiv:0704.3553)

FLUCTUATIONS: *Measuring Shear Viscosity Using Transverse Momentum Correlations in Relativistic Nuclear Collisions*,
S. Gavin and M. Abdel-Aziz,
Phys.Rev.Lett.97:162302,2006
(nucl-th/0606061)

DRAG, FLOW: *Energy Loss and Flow of Heavy Quarks in Au+Au Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV (PHENIX Collaboration)*,
A. Adare et al.,
Phys.Rev.Lett.98:172301,2007 (nucl-ex/0611018)

$$\frac{\eta}{s} = (1.1 \pm 0.2 \pm 1.2) \frac{1}{4\pi}$$

$$\frac{\eta}{s} = (1.9 - 2.5) \frac{1}{4\pi}$$

$$\frac{\eta}{s} = (1.0 - 3.8) \frac{1}{4\pi}$$

$$\frac{\eta}{s} = (1.3 - 2.0) \frac{1}{4\pi}$$

C
H
A
R
M
!

Ötödik Mérföldkő: A tökéletesség limitált!

Minden eddigi “realisztikus” hidrodinamikai számítás a RHIC folyadékra 0 viszkozitást tételezett fel

$\eta = 0 \rightarrow$ “tökéletes folyadék”

Azonban létezik egy (feltételezett) quantum limit:

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

“A Viscosity Bound Conjecture”, P. Kovtun, D.T. Son, A.O. Starinets, hep-th/0405231

Hogy viszonyulnak a “rendes” folyadékok ehhez a limithez?

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

RHIC tökéletes folyadék

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

Ezen a skálán:

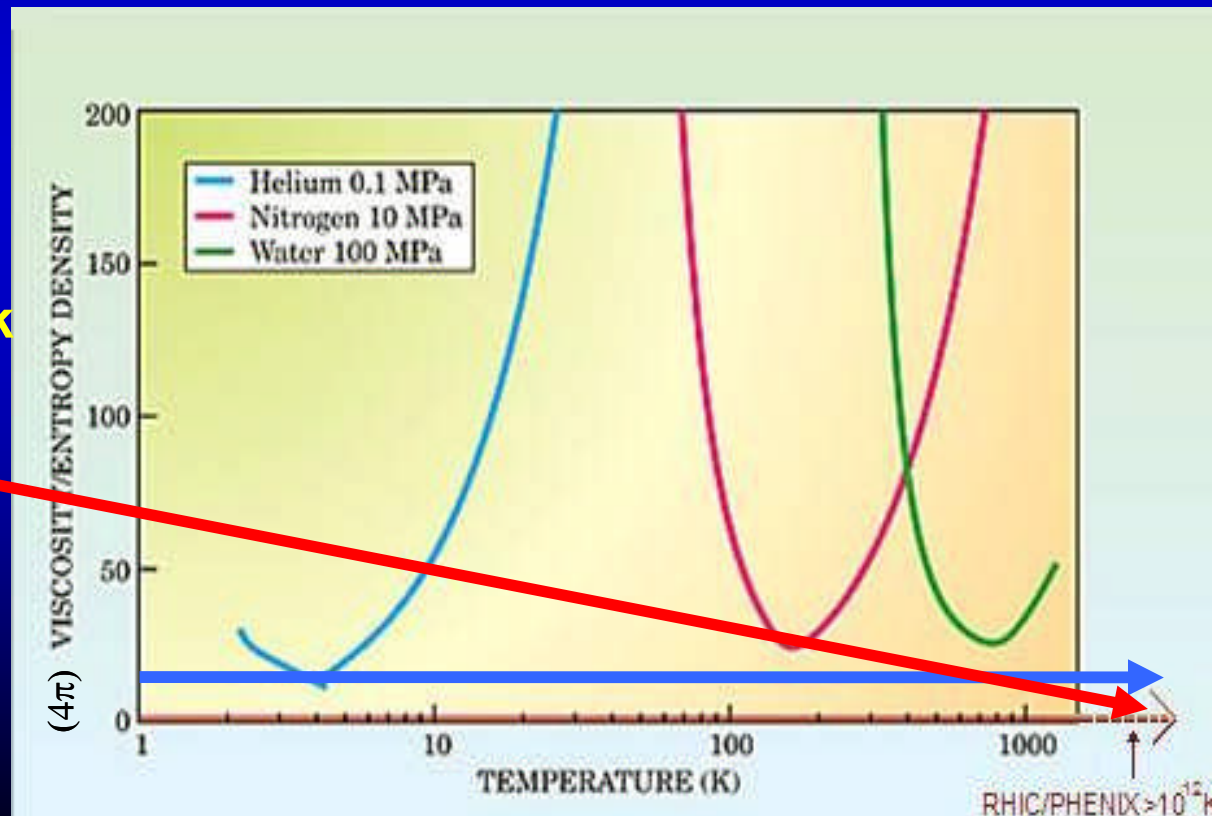
A legforróbb

($T > 2$ Terakelvin)

legtökéletesebb

valaha előállított

folyadék...



Összegzés: PHENIX Collaboration, 2009



Egyike a legjelentősebb
gyorsítóra alapozott

hep-ex és
nucl-ex projekteknek,

Köszönhetően

14 ország

68 intézményének

~550 kutatójának

Magyarországról:
Debreceni Egyetem, Kisérleti Fizikai Tanszék
ELTE, Atomfizikai Tanszék, Budapest,
MTA KFKI RMKI, Budapest

!!PQM: Direkt fotonok: a tökéletesség hírvivői!!

A kis tömegű e^+e^- spektrumból,
az $m \sim 0$ határesetre extrapolálva

Nagy növekmény kis p_t -n, 3 GeV alatt
az extrapolált p+p spektrumokhoz képest
exponenciális alak, fitt: $C \exp(-p_t/T_{avg})$

Eredmény: $T_{avg} = 221 \pm 23 \pm 18$ MeV

Hidro modellezés $\rightarrow T_{init} > 300$ MeV

Észrevétel: $T_{init} \tau_{init} = 89 - 150$ MeV fm/c

Viszkózus korrekció a hidrodinamikában:

$$d\varepsilon/d\tau = -(\varepsilon+p)/\tau + (4/3) \eta/\tau^2$$

$$\eta \ll (3/4) (\varepsilon+p) \tau$$

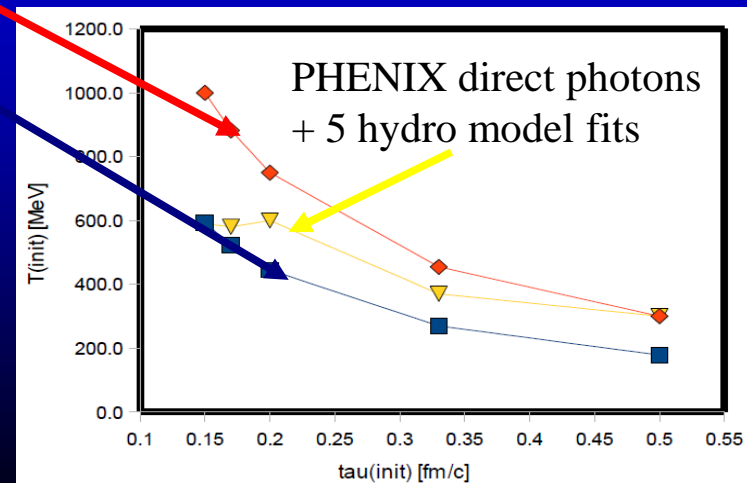
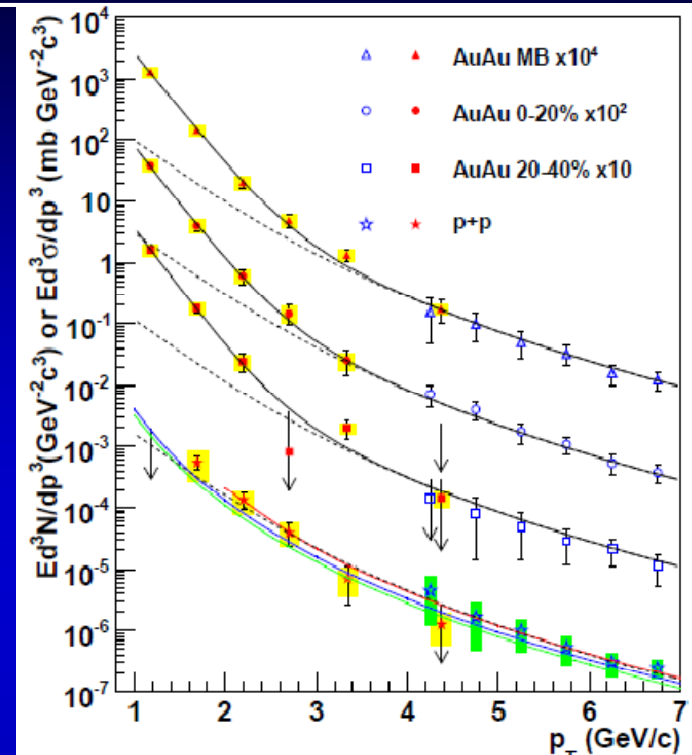
Termodinamika és $\mu_B \sim 0$:

$$\varepsilon+p = Ts$$

$$\eta/s \ll (3/4) T \tau$$

$$(4\pi) \eta/s \ll (4.3-7.2) \hbar$$

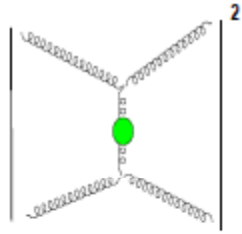
a kvarkfolyadék sokkal tökéletesebb, mint
a szuperfolyékony ^4He , ahol $(4\pi) \eta/s \geq 8 \hbar$



!!PQM: Direkt fotonok: a folyadék erősen csatolt!!

Észrevétel: $T_{init} \tau_{init} = 89 - 150 \text{ MeV fm/c}$

A csatolási állandó hidrodinamikából:
szabad úthossz $\lambda \ll$ méret $\sim \tau$

$$\ell_{m.f.p} \equiv \frac{1}{n\sigma} = \frac{1}{\underbrace{n}_{\sim T^3} \times \underbrace{\sigma}_{\alpha_s^2/T^2}} \sim \frac{\hbar}{\alpha_s^2 T}$$


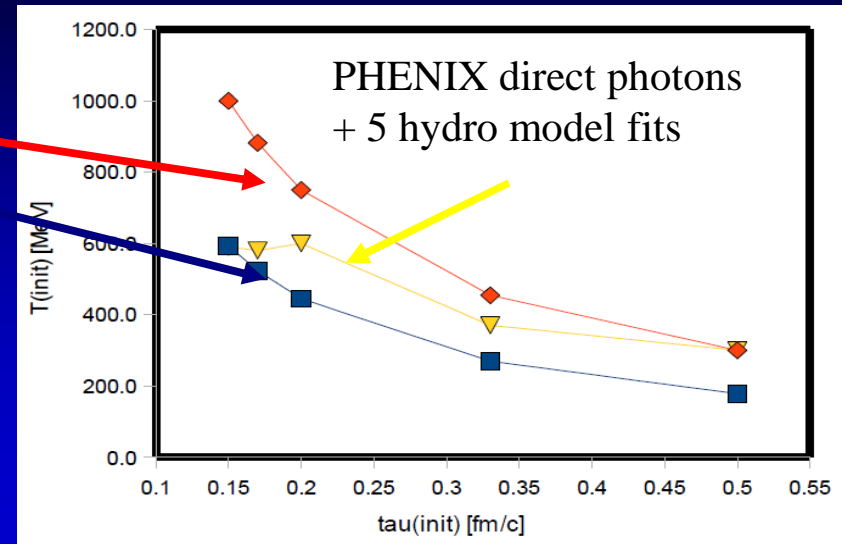
a hidrodinamika feltétele, hogy

tehát

$$\alpha_s^2 \gg \hbar / T \tau = 2.2 - 1.3 (!!)$$

- a perturbatív QCD számolások az erős csatolási állandó miatt nem igen használhatóak
- új módszerek kellene, pl. AdS/CFT, húrelméleti becslések a transzport együtthatókra (AdS/CFT* téma lesz az ELFT részecskefizikai nyári iskolán 2009 szeptemberében)
- Húrelméleti kutatók, és alacsony hőmérsékletű Fermi gázok kutatói gyülekeznek a **nehéziongyorsító** környékén. Ki gondolta volna ezt 2000-ben?

* AdS/CFT = Anti-de-Sitter space/Conformal Field Theory correspondence



$$\underbrace{\frac{\hbar/\alpha_s^2 T}{1/\alpha_s^2}}_{\text{Liquid Parameter}} \times \underbrace{\frac{1/\tau}{\hbar/\tau T}}_{\text{Expansion rate}} \ll 1$$

$$\underbrace{\frac{1}{\alpha_s^2}}_{\text{Liquid Parameter}} \times \underbrace{\frac{\hbar}{\tau T}}_{\text{Experimental Parameter}} \ll 1$$

BRIEF PHENIX STATUS & FUTURE

Recent detector improvements:

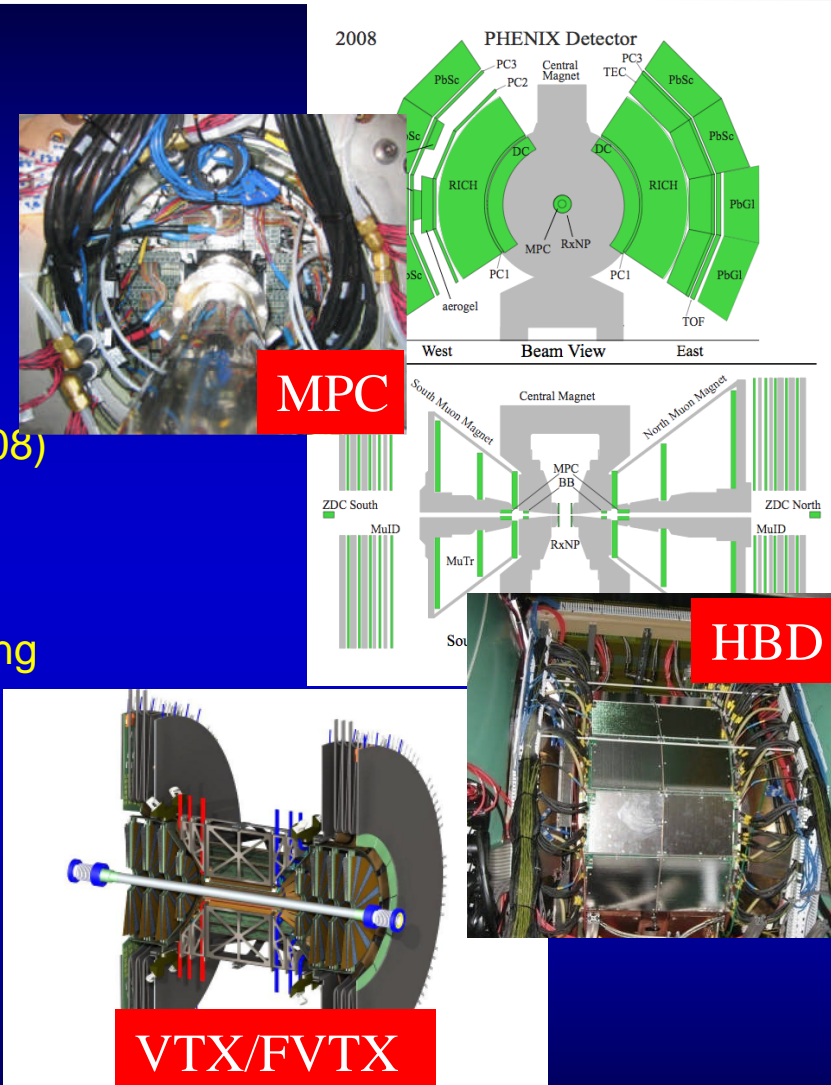
- large, more accurate reaction plane detector
- higher- p_T PID (TOF-West)
- forward (MPC) calorimeters
- Hadron blind detector (HBD)

Operations improvements:

- integrated luminosity: Au+Au (x3); d+Au (x30)
- data taking efficiency: 52% (2007) -> 68% (2008)

Future:

- HBD for clean low-mass dielectron measurements (next AuAu run)
- muon Trigger system for high- p_T muon triggering (W 's)
- silicon detectors for new level of robustness in heavy-quark measurements
- continuing DAQ upgrades to maintain high speed and efficiency



BNL & Google Maps

