

Nehézionfizika gyalogosoknak

Magyarok az Ősanyag nyomában

Csörgő Tamás
MTA KFKI RMKI

- **Bevezető**

- Sajtóanyagok
- Motiváció
- Kisérletek
- Elméleti alapok

- **Eredmények**

- Új eredmények a budapesti Kvaranyag 2005 világkonferencián
- A tökéletes folyadék és a skála törvények

Sajtóanyagok

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

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](#)

Sajtóanyagok

http://www.mta.hu/index.php?id=634&backPid=645&swords=RHIC&tt_news=2072&cHash=c1a95b6958

Ugrás

MAGYAR TUDOMÁNYOS AKADÉMIA

English

ELÉRHETŐSÉGEK
KERESÉS
OLDALTÉRKÉP

Címlap > Hírek

HÍREK

Az MTA hírei

A tudomány világából

Sajtószemle

Archívum

Videóarchívum

ESEMÉNYNAPTÁR

AZ MTA TAGJAI

DOKTOR KÉPVISELŐK

KÖZTESTÜLETI TAGOK

PUBLIKÁCIÓS ADATTÁR
(TPA)

AZ MTA

AZ MTA FELÉPÍTÉSE

AZ MTA
KIUTATÓHÁI ÓZATA

HÍREK

2005 a fizikában

2006.01.24.



A 2005-ös esztendő legfontosabb fizikai eseményeinek lajstromából az Amerikai Fizikai Intézet (AIP) egy olyan hírt emelt ki első helyen mint 2005 vezető fizikai eredményét, amelyhez magyar akadémiai és egyetemi kutatók lényeges hozzájárulást adtak.

Az Egyesült Nemzetek Szervezete közgyűlésének döntése értelmében 2005 a Fizika Nemzetközi Éve volt. Az Albert Einstein legnagyobb felfedezéseinek százéves jubileumát ünneplő esztendő legfontosabb fizikai eseményeit az **American Institute of Physics összeállítása** alapján ismertetjük.

Sajtóanyagok

Ajánlat

PHENIX - a kísérlet honlapja (angol)

Közlemény a kutatási eredményekről
Nucl.Phys. A757
(2005) 184-283

Ebben a feltevéseben a magyar kutatók jelentős és nemzetközileg is elismert szerepet játszottak. A PHENIX kísérletben három magyar intézmény: a Debreceni Egyetem, az ELTE és a Magyar Tudományos Akadémia **KFKI Részecske és Magfizikai Kutató Intézet** munkatársai és doktoranduszai vesznek részt, a PHENIX-Magyarország együttműködés keretében, melynek tudományos témavezetője **Csörgő Tamás** (MTA KFKI RMKI). A **Dávid Gábor** (BNL és Debreceni

Egyetem) vendégprofesszor által vezetett debreceni csoport (**Tarján Péter, Vértesi Róbert, Veszprémi Viktor**) lényegesen járult hozzá az arany-arany ütközésekben keletkező új anyag azonosításához a részecskesugarak elnyelődését vizsgálva. Az **ELTE TTK Atomfizikai Tanszék** (**Csanád Máté, Deák Ferenc, Kiss Ádám**) és a KFKI RMKI kutatói (**Csörgő Tamás, Hidas Pál, Ster András** [aki az MTA MFA kutatója s], **Sziklai János** és **Zimányi József**) főleg az ütközések frontálisságának meghatározásához, és a folyadékkép érvényességének kísérleti igazolásához járultak hozzá.

<http://arxiv.org/abs/nucl-ex/0410003>
128 hivatkozás (2006. február 21)

Mit, miért és hogyan?

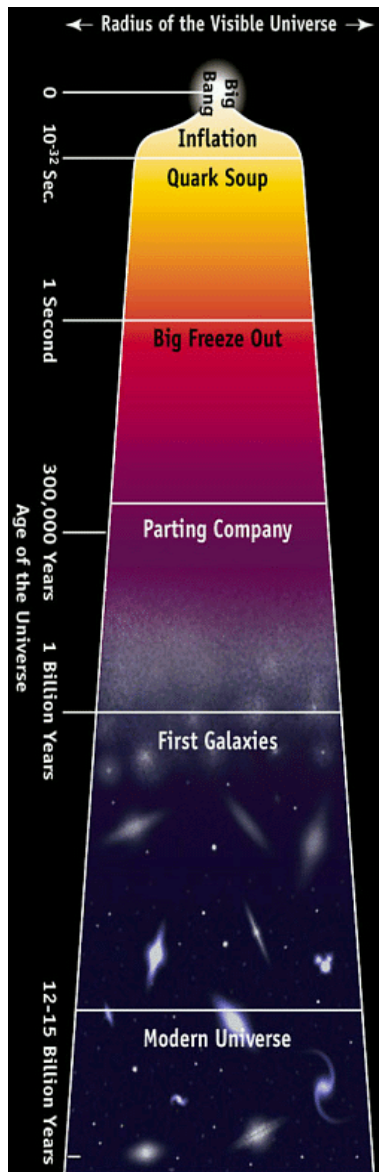
Alap kutatás:

- **Elméleti igény:** az erősen kölcsönható anyag halmazállapotainak vizsgálata a jelenleg elérhető legmagasabb hőmérsékleteken (gyorsító energiákon).
- **Az erősen kölcsönható anyag halmazállapotai.** A 2004-es fizikai Nobel-díj: az erős kölcsönhatás aszimptotikusan szabad -> a kvarkok és gluonok **gáz halmazállapotú**, igen forró kvark-gluon plazmát alkotnak - ez az elméleti **várakozás**.
- **Kísérleti feltételek:** szupravezető mágnesek, nehézionok szemből ütköztetése, pénzügyi elkötelezettség (1 milliárd USD főleg USA és Japán + egész világ vezető országai).

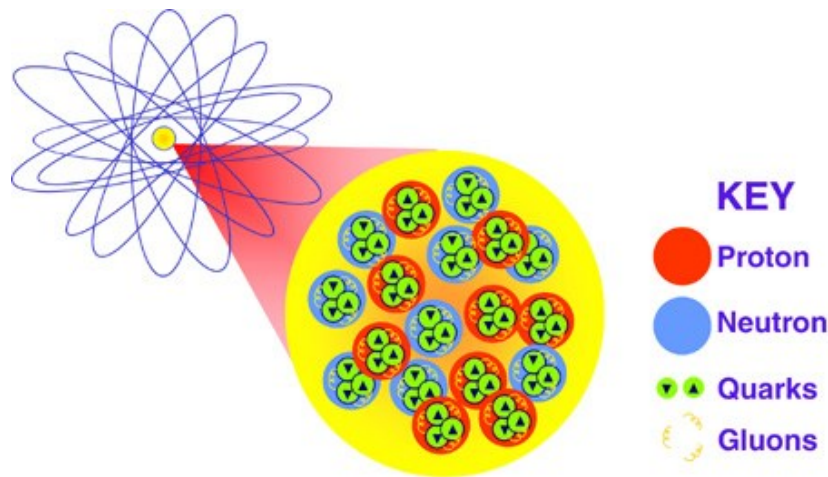
Jelenlegi élvonal 2 nagy gyorsítónál:

- **BNL(Amerika): 2000-től, Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC)**
- **CERN(Európa): 2007-től, Large Hadron Collider (LHC)**

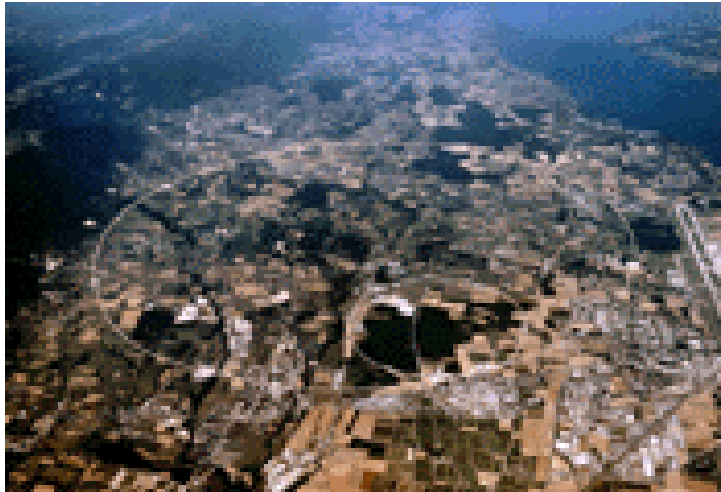
Nagy Bumm és Kis Bumm (2)



- A kvarkok és a gluonok a bezáró szin-terek "börtönéből" kiszabadulhatnak
- Kísérletek folynak a CERN SPS, a Brookhaveni Nemzeti Laboratórium Relativisztikus Nehézion Ütköztető (BNL RHIC, USA) gyorsítóknál 2000-től, 2007-től pedig a CERNi LHC gyorsítónál (Genf, Európa)



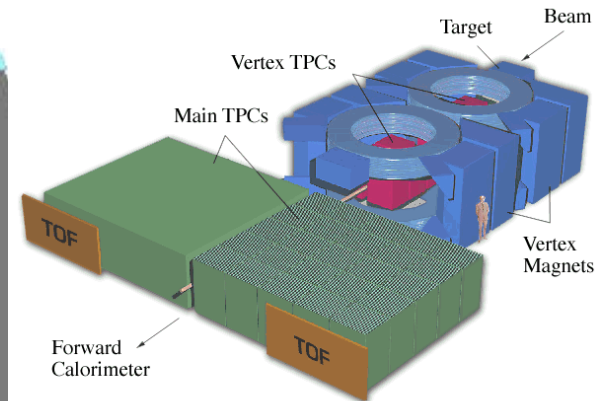
Gyorsítók és kísérletek: CERN



- $Pb+Pb$ @ $E_{lab} = 158 AGeV$ @ CERN SPS
- $h+p$, $p+p$, $p+A$, $A+B$ ütközések
- 7 kísérleti együttműködés: NA44, NA45, NA49, NA50, NA52, NA57, WA98
- KFKI-ELTEs részvétel az NA49 kísérletben: Vesztergombi Gy, Barna D, Csató P, Fodor Z, Gál J, Hegyi S, Jancsó G, Lévai P, Molnár J, Palla G, Siklér F, Szentpétery I, Szilkai J, Veres G, Varga D, Zimányi J.



Hasonlat:
viking kor



A "gyűrűk ura" - a RHIC gyorsító

- **USA, Long Island, Brookhaven:** Brookhaven National Lab (BNL)
- **Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC)**

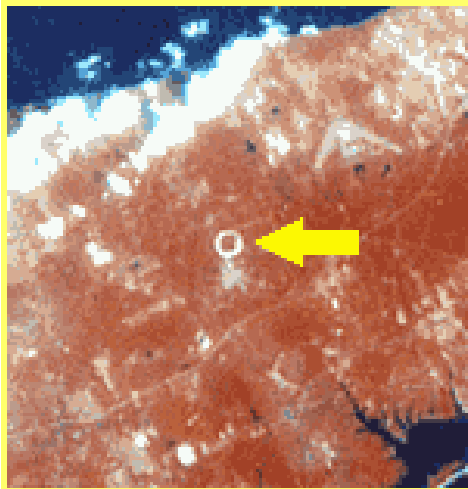


Manhattan,
New York, NY

RHIC



Gyorsítók és kísérletek (2): Brookhaven, RHIC



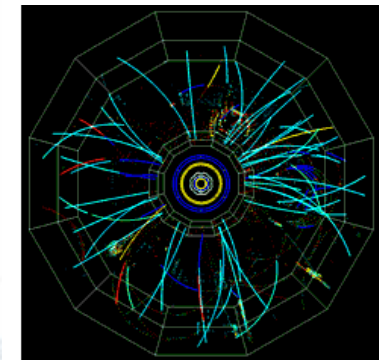
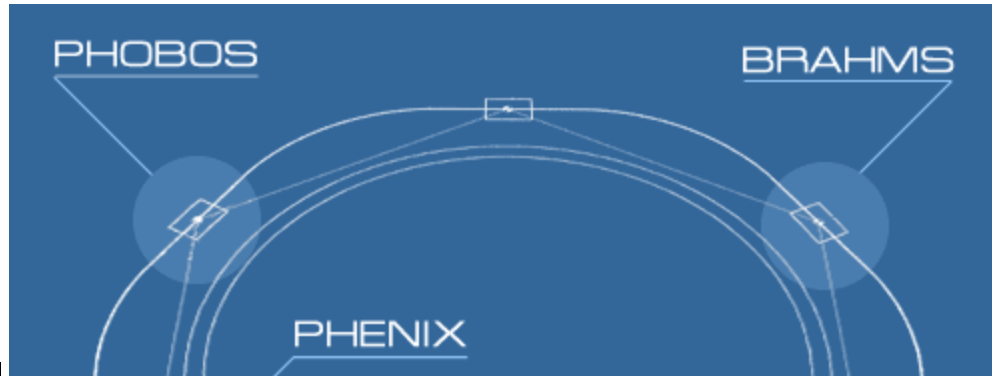
- Au+Au @ $E_{\text{cms}} = 100+100$ AGeV @ run2
- pol. p + pol. p, p+A ütközések
- 4 kísérleti együttműködés: BRAHMS, PHENIX, PHOBOS, STAR
- Magyar részvétel a PHENIX kísérletben:
- KFKI: Csörgő T, Hidas P, Ster A, Zimányi J
- ELTE: Kiss Á, Deák F, Csanád M
- Debrecen: Dávid Gábor, Tarján P, Veszprémi V.



Hasonlat:
Columbus kora



A 4 RHIC kísérlet



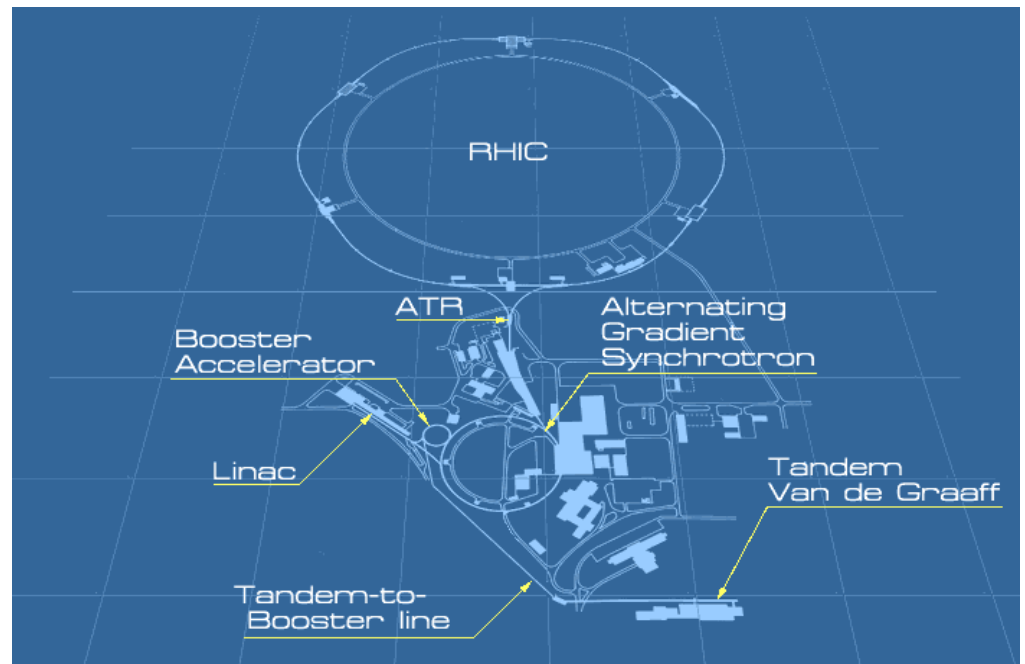
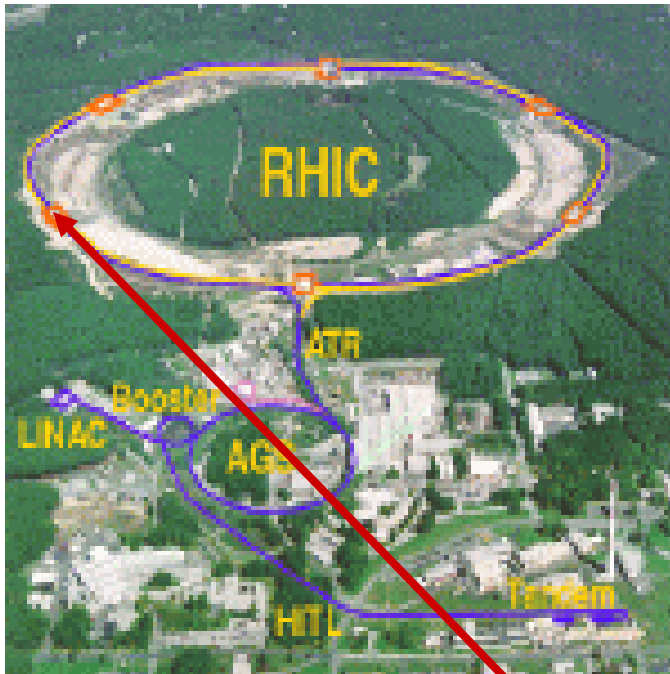
An end view of collision between deuterons and gold ions captured by the STAR detector at Brookhaven.

PHENIX: 12 ország, 57 intézet, 460 fő
STAR: 10 ország, 39 intézet, kb 310 fő
PHOBOS: 3 ország, 8 intézet, 107 fő
BRAHMS: 6 ország, 12 intézet, 52 fő

Hasonlat:
PHENIX ~ Santa Maria
STAR ~ Pinta
PHOBOS ~ Nina
BRAHMS ~ távcső ;)

Kísérletek

- Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) programja:
- polarizált p+p, d+Au, Cu+Cu, Au+Au ütközések, max 100 A GeV



- 4 Kollaboráció: PHENIX, STAR, BRAHMS, PHOBOS

Kísérletek

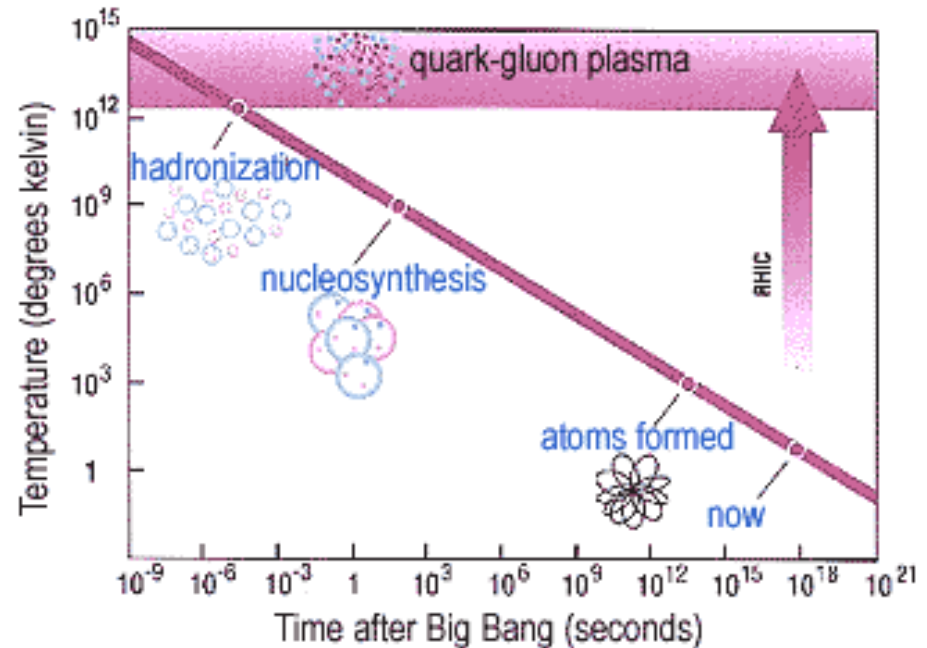
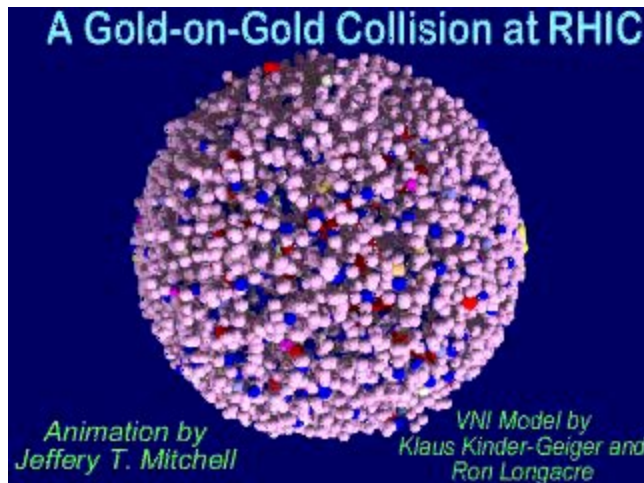
- **Gyorsító adatok:**

körív:	3.8 km
cms energia:	19-200 AGeV
sebesség:	99.995% c
felhasznál:	protonok, deutérium, réz és arany atommagok
nyalábok:	2 szembe nyaláb, mindegyik 120 „csomag”-ban
luminozitás:	$2 \times 10^{26} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Au+Au, 106 ns átfedésekkel)
előállít:	több ezer új részecskét ütközésenként
hőmérséklet:	trillió K
alapanyag:	20 év alatt 1 gramm arany
üzemel:	2000-től

LHC (CERN)	2007-től
körív:	27 km (LEP átalakítva)
energia:	14 ATeV
(korábban:	fix target, SPS: $E_{\text{cms}} \sim 17 \text{ AGeV Pb+Pb}$)

Kísérletek

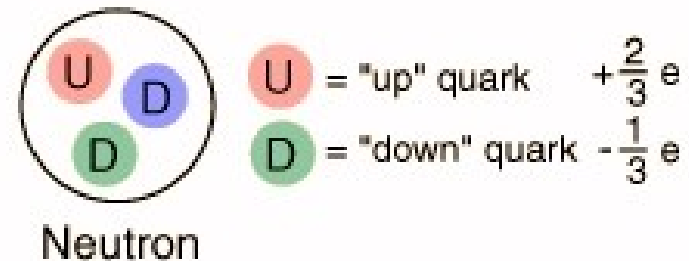
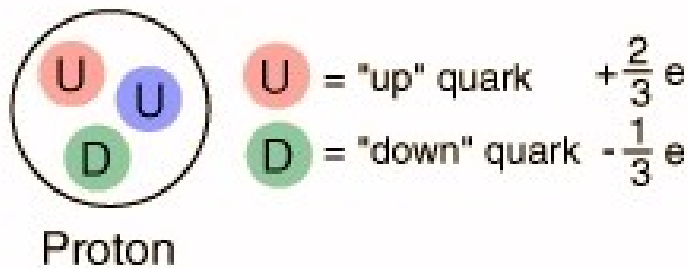
- **A fizika: nukleonok szemből ütköztetése**



- **Cél:** a „Nagy Bumm” utáni néhány mikromásodperc körülményeinek vizsgálata laboratóriumban, a világon legforróbb és legsűrűbb kísérleti minta tanulmányozása.

Elméleti alapok

- **Elméleti keret: Standard Model**
- **Stabil elemi részecskék: elektron, proton, (neutron)**
- **A protonnak és neutronnak (kvark) szerkezete van:**



A kvarkok további, instabil részecskéket alkothatnak
(~ 2000 ismert közülük, élettartamuk: $\sim 10^{-6} - 10^{-23}$ sec)

Barionok: 3 kvark kötött állapotok

Mezonok: kvark-antikvark állapotok

Egzotikum: Pentakvark ?

Elméleti alapok

- 2 alapvető elemi részecske család van: leptonok és kvarkok

	LEPTONOK		KVARKOK	
generáció:	e	ν_e	up	down
	μ^-	ν_μ	charm	strange
	τ^-	ν_τ	top	bottom
töltés(e):	-1	0	+2/3	-1/3
tömeg(MeV):	0.5	0	1.5-4	4-8
	100	0	1150-1350	80-130
	1777	0	174000	4100-4400

A leptonok és a kvarkok anyagszerű részecskék, fermionok

Elméleti alapok

ALAPVETŐ ERŐK

	erősség	hatótávolság (m)	közvetítő
ERŐS (nukleáris)	~ 1 (E)	10^{-15} (\sim proton sugár)	8 gluon
ELEKTROMÁGNESES	1/137	végtelen	1 foton
GYENGE (béta bomlás)	10^{-6}	10^{-18}	3 gyenge bozon
GRAVITÁCIÓS	6×10^{-39}	végtelen	1 graviton

Pl.: neutron bomlás (béta bomlás)



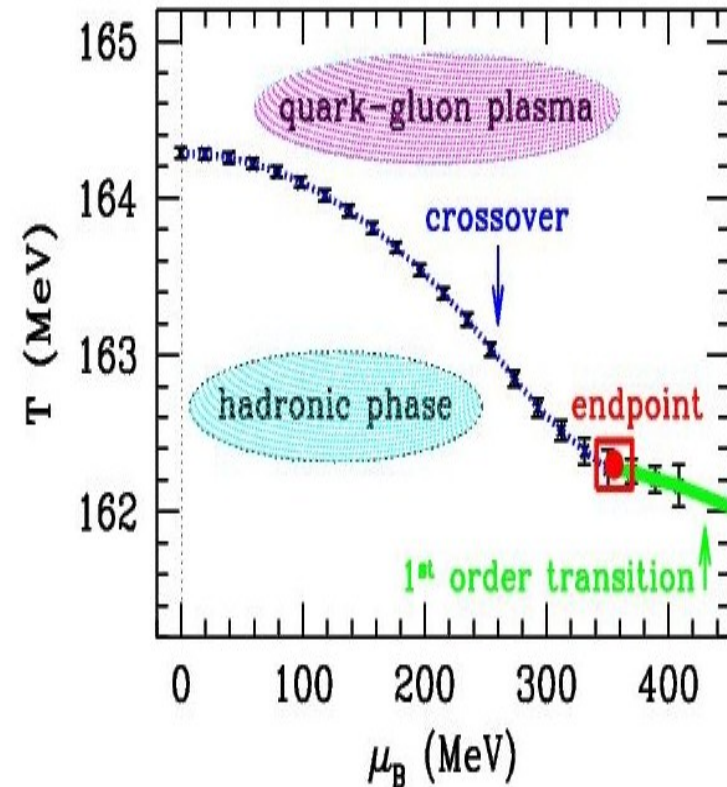
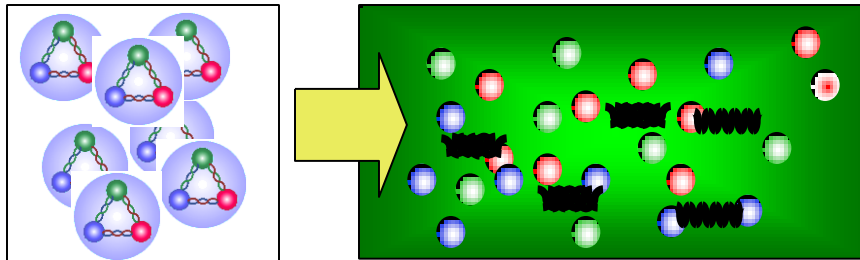
A kölcsönhatást közvetítő részecskék bozonok

A QCD állapotegyenlete, fázisdiagram

Hőmérséklet $> T_c$: Kvark Gluon Plazma. Új halmazállapot(ok?)
Az erős kölcsönhatás aszimptotikusan nagy energiákon szabad
(2004-es Nobel díj, D. J. Gross, H. J. Politzer, F. Wilczek) -> gáz?

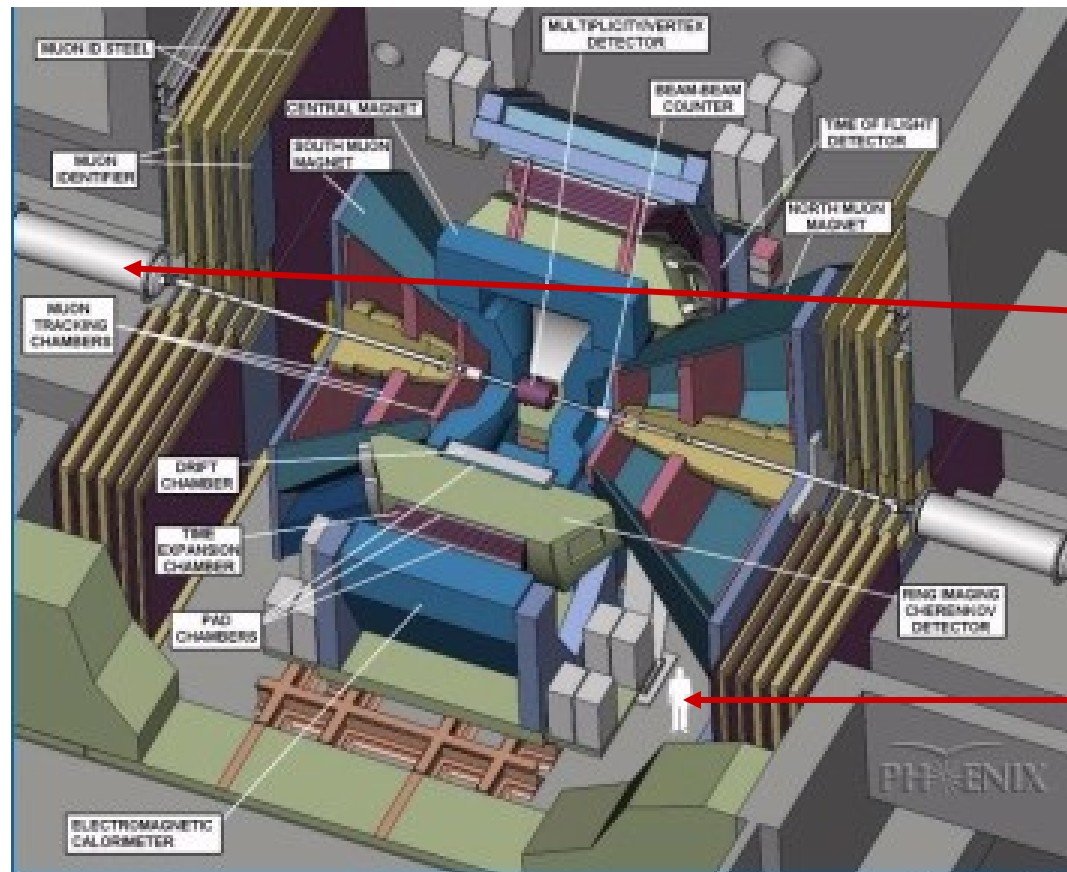
Z. Fodor and S.D. Katz:

$T_c = 164 \pm 2$
(hep-lat/0106002)
hadronok ->
kvark-gluon plazma



A PHENIX kísérlet

- **PHENIX detektor:** kb 3000 tonna súlyú; sokfajta mérésre ad lehetőséget (fotonok, elektronok, müonok, hadronok)



ZDC
nullafoki
kaloriméter
frontálisság
meghatározás
trigger

ZDC: még
emberléptékű
detektor

PHENIX a Phys. Rev. Lett. címlapján

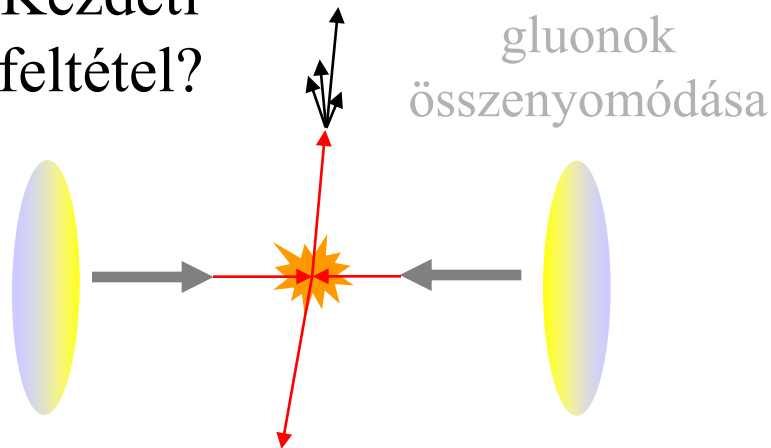


Az első magyar szerző:
Ster Andris diákként
a PHENIX cikken

Au+Au ütközésekben a részecskesugarak elnyelődnek

Mitől csökken a részecsquesugarak energiája?

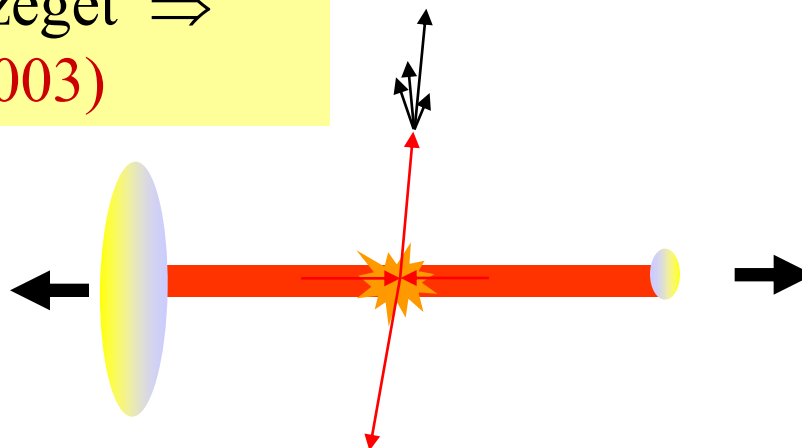
Kezdeti feltétel?



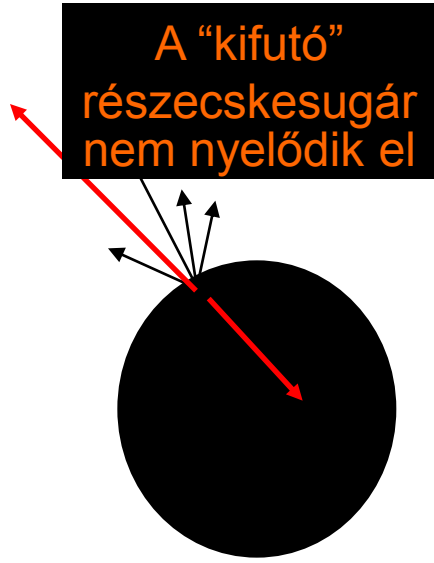
Új anyag?



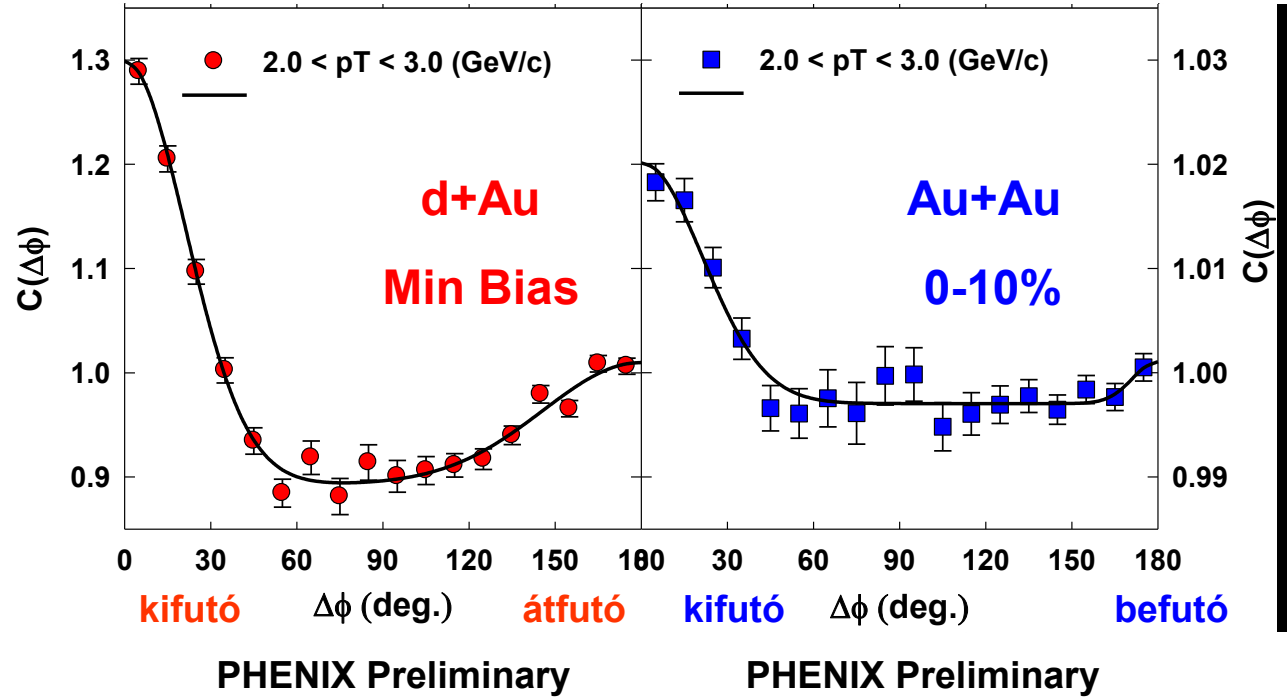
Hogy tegyünk különbséget?
Kapcsoljuk ki a közeget \Rightarrow
d+Au ütközések (2003)



Az elnyelődő "befutó" részecskesugár



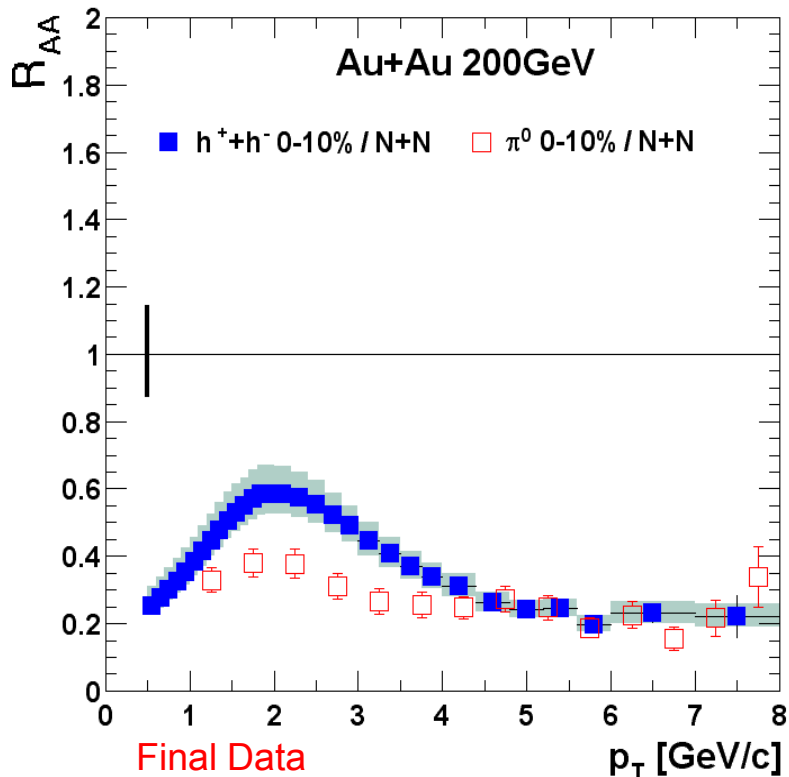
A "befutó" sugár elnyelődik



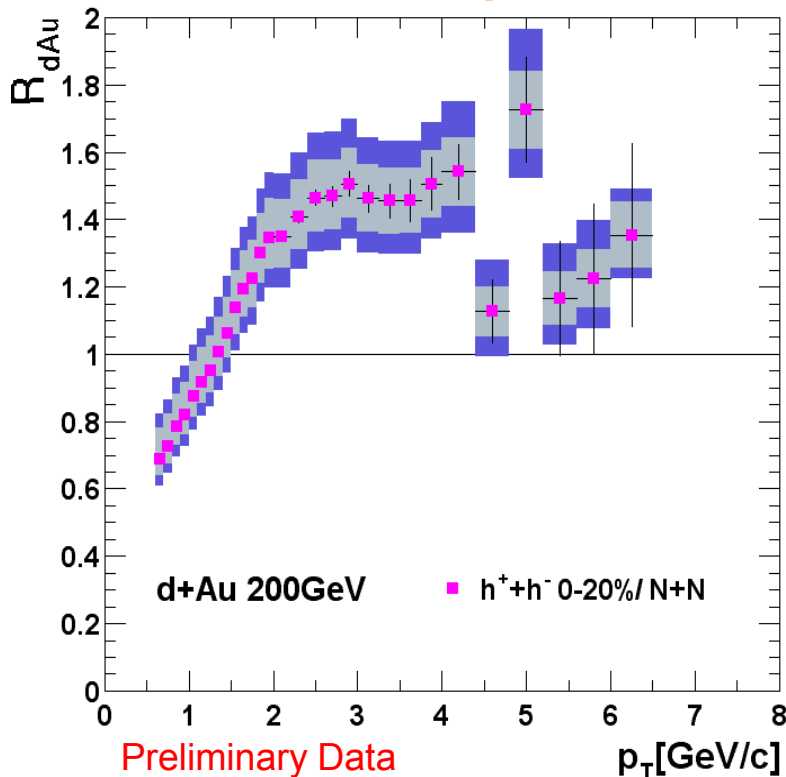
- A "horzsoló" Au+Au a d+Au -hoz hasonló
- A "telitalálat" Au+Au-ban új tulajdonság jelenik meg
- elnyelődik a "befutó" részecskesugár

A frontális Au+Au ütközésekben nyelődik el a legjobban a részecskesugár (PHENIX, PHOBOS)

Au + Au

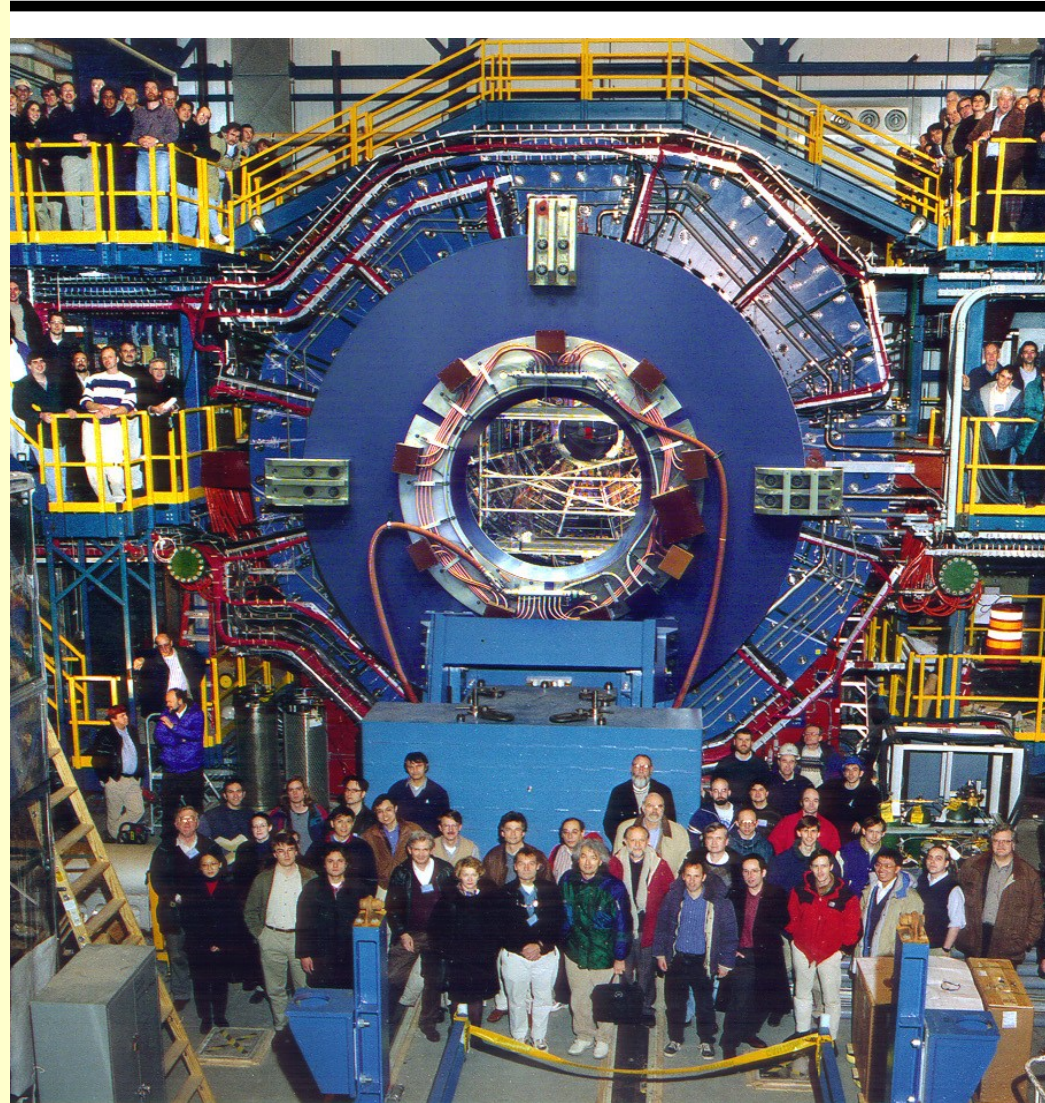


d + Au ellenpróba



- Au+Au és d+Au ellenpróba eredménye: Drámai különbség és ellentétes függés az ütközés frontálisságától
- A részecskesugarak elnyelődése a frontális Au + Au ütközésekben a legerősebb, a keletkező **új anyag** miatt lép

A STAR kísérlet a RHICnél



Brazil:
Universidade de Sao Paulo

China:
IHEP – Beijing
IMP - Lanzou
IPP – Wuhan
USTC
SINR – Shanghai
Tsinghua University

Great Britain:
University of Birmingham

France:
IReS Strasbourg
SUBATECH - Nantes

Germany:
MPI – Munich
University of Frankfurt

India:
IOP - Bhubaneswar
VECC - Calcutta
Panjab University
University of Rajasthan
Jammu University
IIT - Bombay
VECC – Kolkata

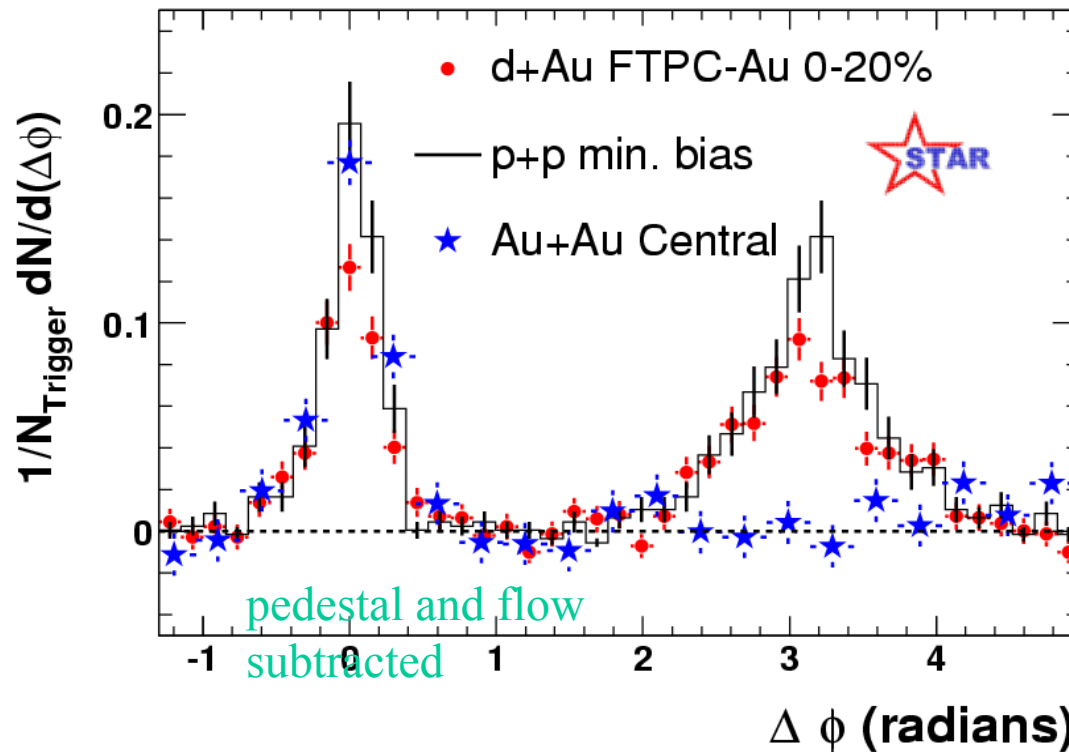
Poland:
Warsaw University of Tech.

Russia:
MEPHI - Moscow
LPP/LHE JINR - Dubna
IHEP - Protvino

U.S. Laboratories:
Argonne
Berkeley
Brookhaven

U.S. Universities:
UC Berkeley
UC Davis
UC Los Angeles
Carnegie Mellon
Creighton University
Indiana University
Kent State University
Michigan State University
City College of New York
Ohio State University
Penn. State University
Purdue University
Rice University
Texas A&M
UT Austin
U. of Washington
Wayne State University
Yale University

STAR: Szögeloszlások és kifizető-befutó sugárpárok

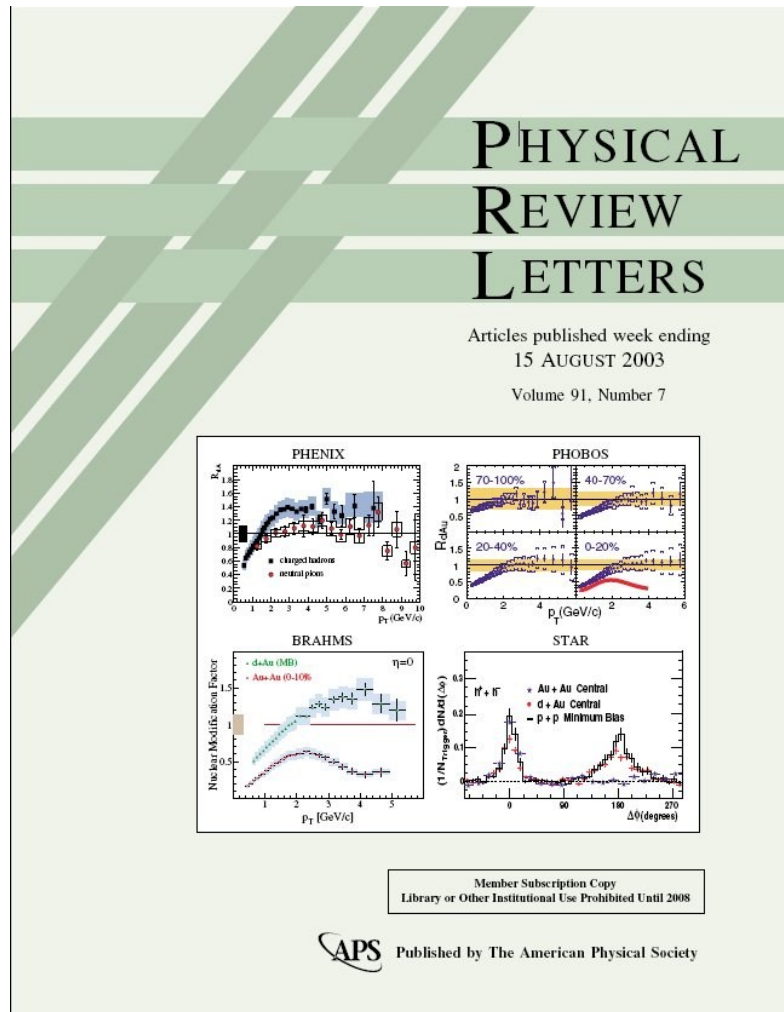


“Kifizető” irány: p+p, d+Au, Au+Au hasonlóan viselkedik

“Befutó” irány: Au+Au ütközésben elnyelődés, p+p és d+Au - nincs ez

A befutó részecskesugarak elnyelődése a frontális Au+Au ütközésekben létrejövő új anyagon

4 RHIC kísérlet a Phys. Rev. Lett. címlapján

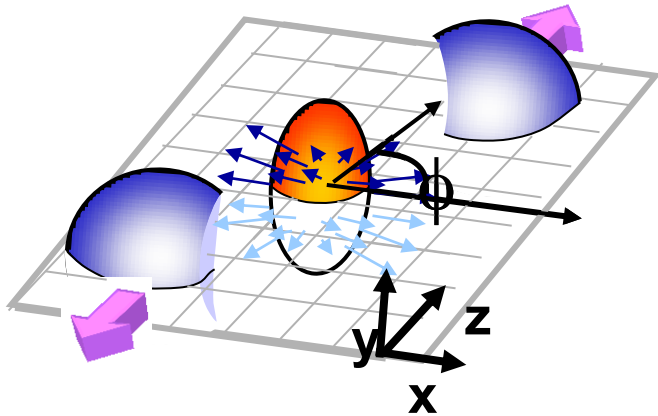


Már a teljes
PHENIX-Magyarország
együttműködés:
10 magyar
a PHENIX szerzői listán

d+Au ütközésekben a részecsquesugarak elnyelődése eltűnik,
tehát ÚJ ANYAG jött létre az Au+Au ütközésekben

Eredmények

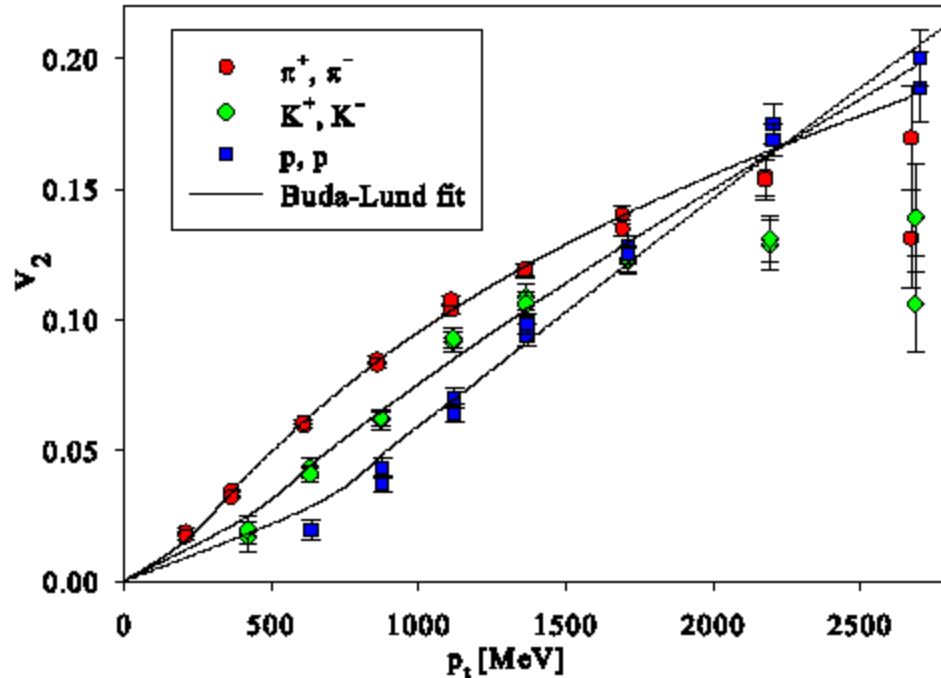
V_2 - elliptikus folyás



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

Kollektív mozgás
(hidrodinamika) jele.

Az adatok hidrodinamikai képben értelmezhetőek
a 2000 MeV alatti p_T tartományban.

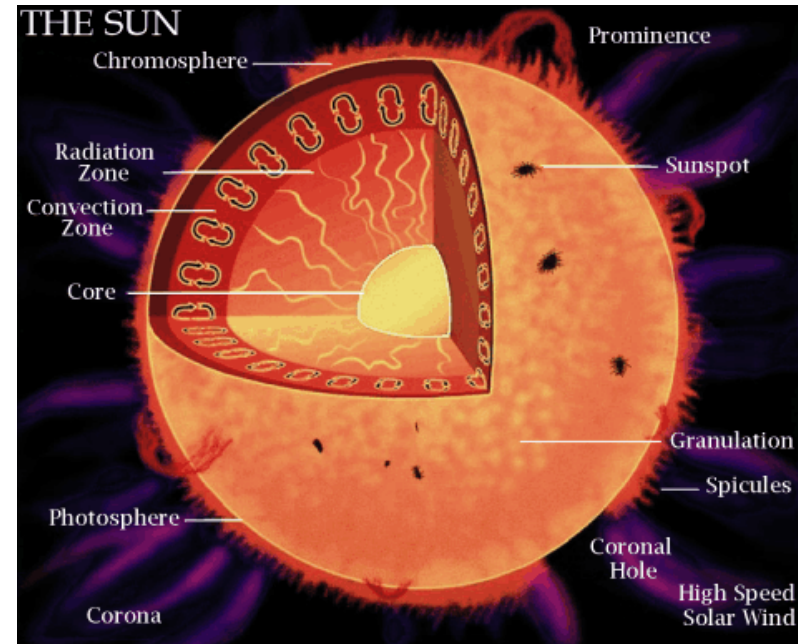
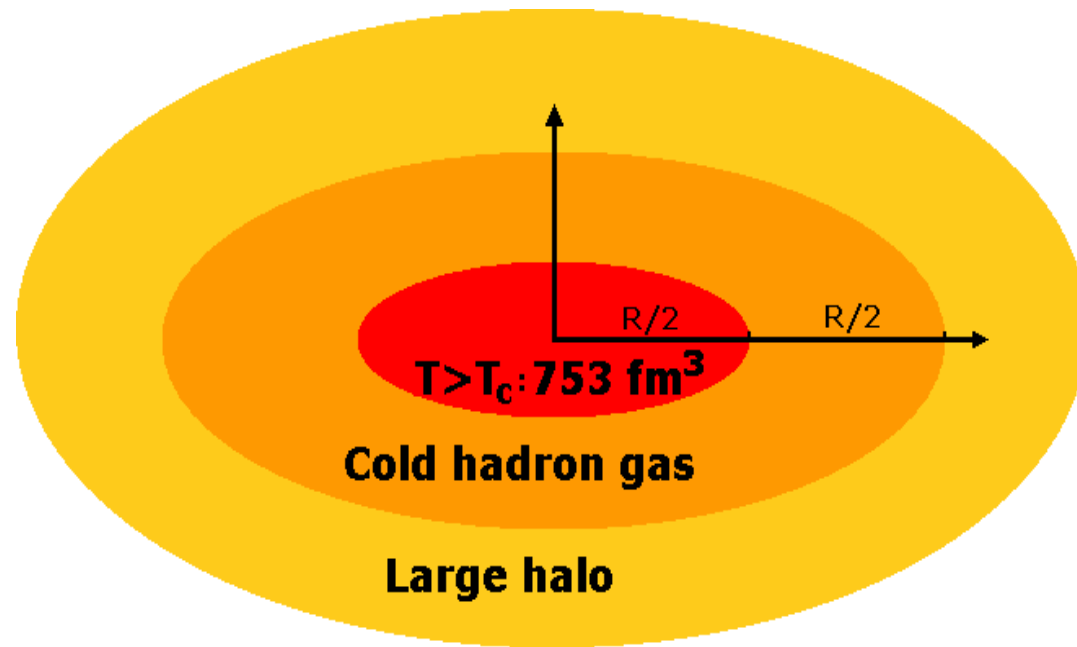


M. Csanád, T. Csörgő, A. Ster et al. <http://arXiv.org/abs/nucl-th/0512078>

Analógia

RHIC tűzgömb \Leftrightarrow Nap

- Core \Leftrightarrow Sun
- Halo \Leftrightarrow Solar wind
- $T_{0,RHIC} \sim 210 \text{ MeV}$ \Leftrightarrow $T_{0,SUN} \sim 16 \text{ million K}$
- $T_{\text{surface},RHIC} \sim 100 \text{ MeV}$ \Leftrightarrow $T_{\text{surface},SUN} \sim 6000 \text{ K}$



Tökéletes folyadékok hidrodinamikája

- **A nemrelativisztikus hidrodinamika alapegyenletei:**

$$\begin{aligned}\partial_t n + \nabla \cdot (n\mathbf{v}) &= 0, \\ \partial_t \mathbf{v} + (\mathbf{v} \cdot \nabla)\mathbf{v} &= -(\nabla p)/(mn), \\ \partial_t \epsilon + \nabla \cdot (\epsilon\mathbf{v}) &= -p\nabla \cdot \mathbf{v},\end{aligned}$$

- **Nem zárt, állapotegyenlet kell még:**

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

- **Tökéletes folyadék: definíciók**

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:

Zimányi-Bondorf-Garpman profil:

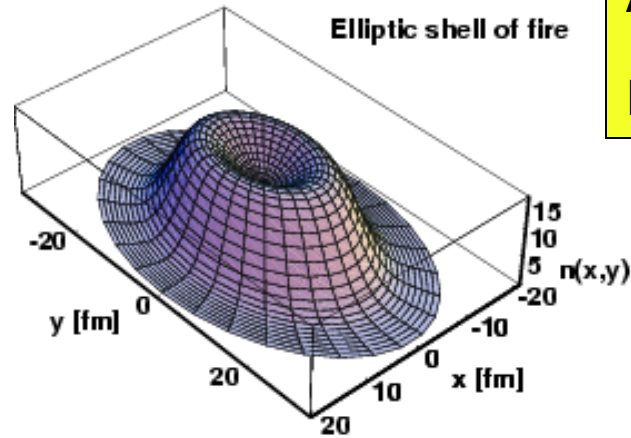
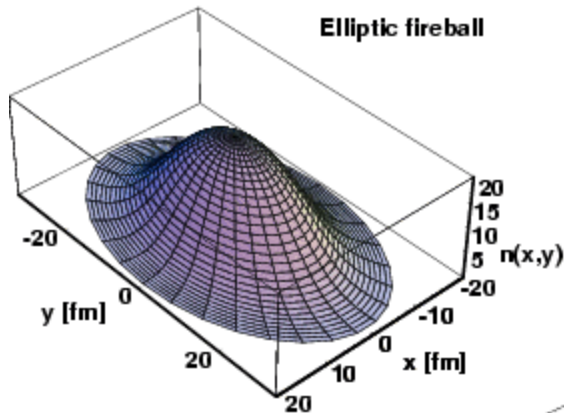
$$\mathcal{T}(s) = \frac{1}{1 + bs}$$

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

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

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

A hidrodinamika egzakt integráljai



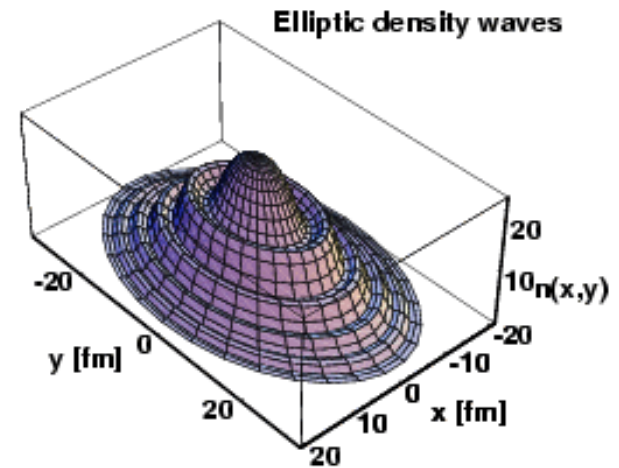
A sűrűség profilokra példák

- Tűzgömb
- Tűzgyűrű
- Egymásba ágyazott tűzgyűrűk

A hidrodinamika egzakt integráljai

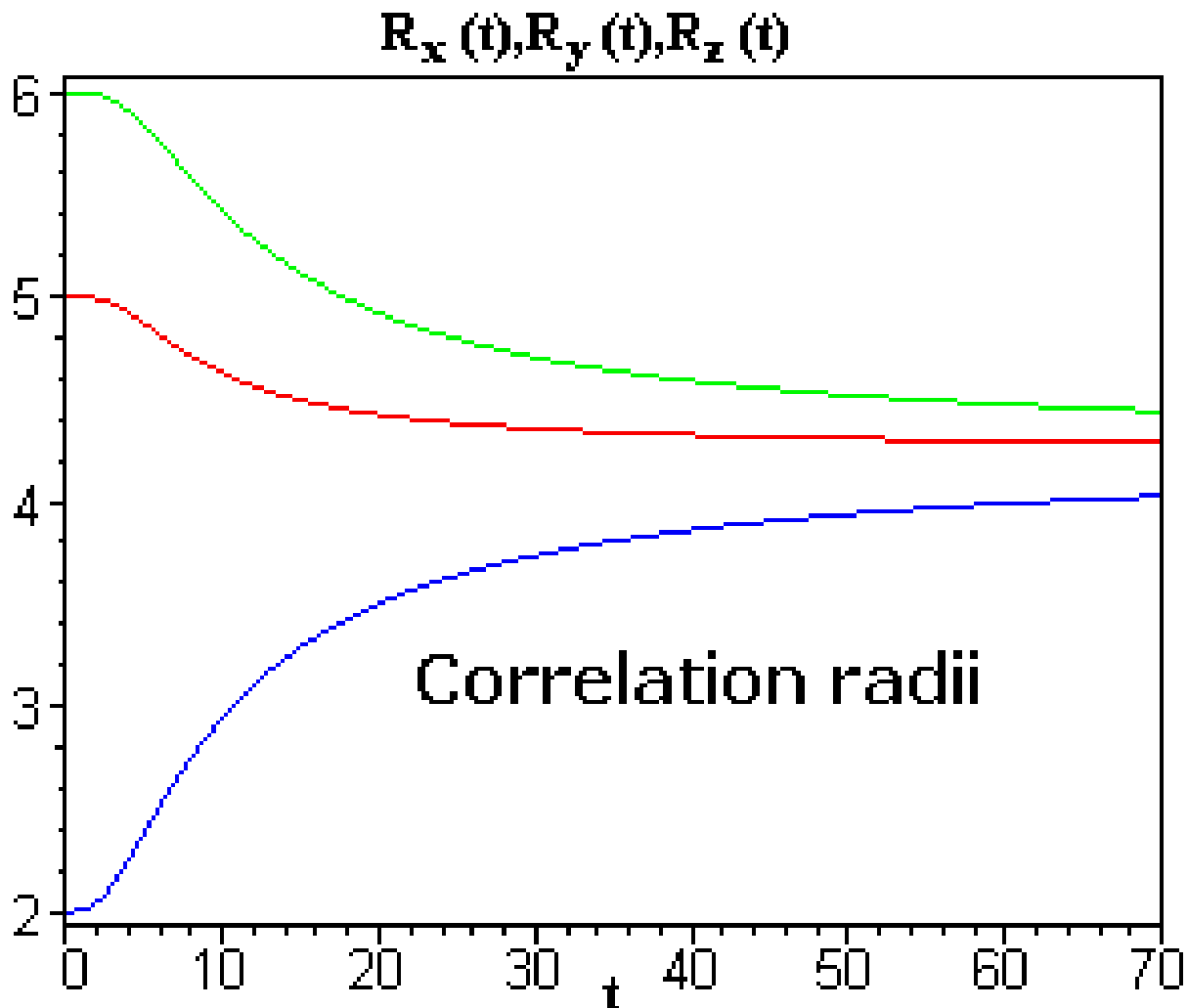
Nincs numerikus viszkozitás

A főtengelek (X, Y, Z) időfejlődése klasszikus potenciálmozgást követ. Kifagyás - hidro vége - megfigyelés. Az időfejlődésre vonatkozó info elveszik! "No go" tétel - megszorítás a kezdeti feltételekre. További info szükséges (erősen nem kölcsönható részecskék) .

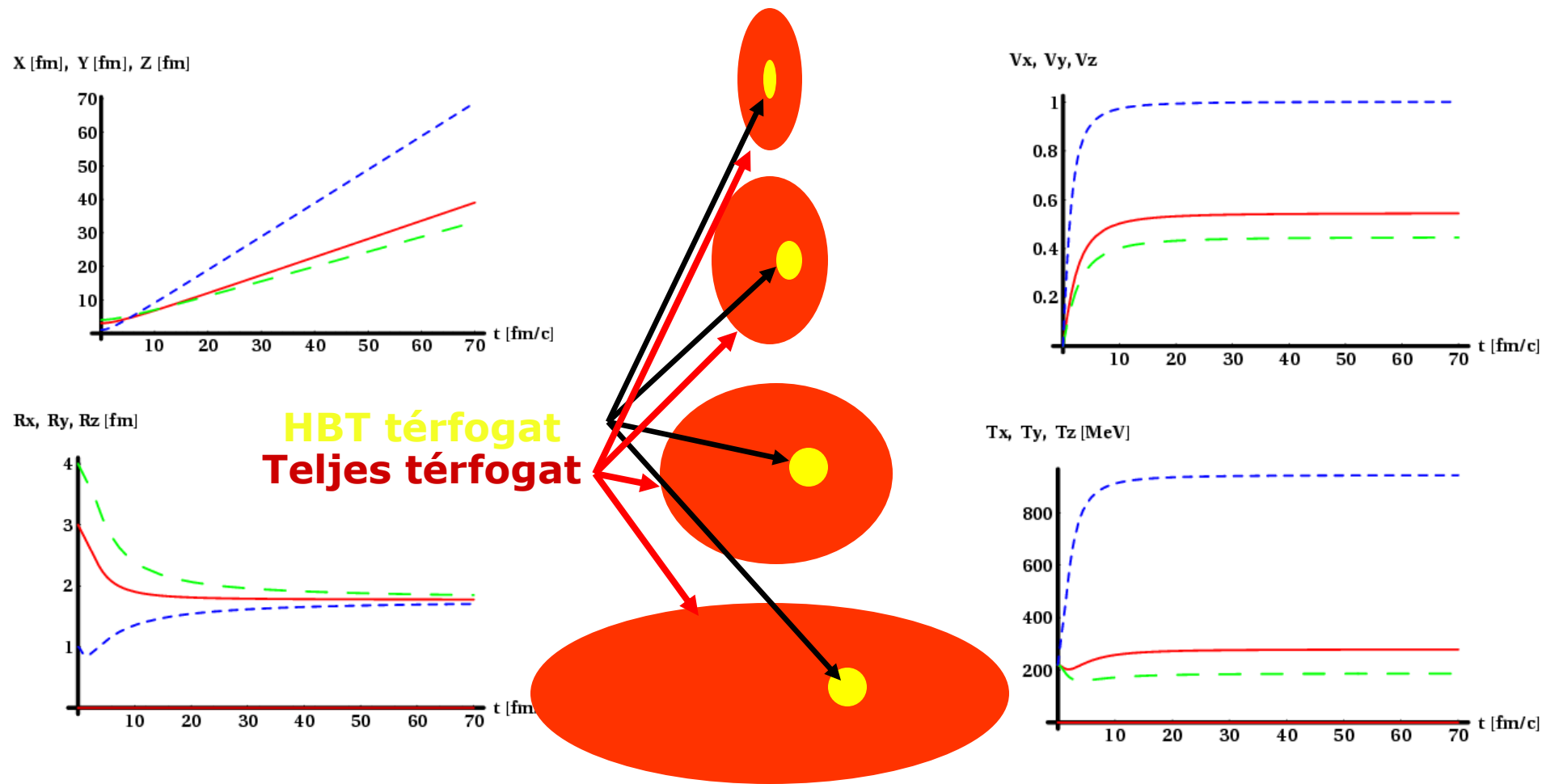


Példák az egzakt megoldásokra

- A hidro megoldások numerikus időfejlődése:

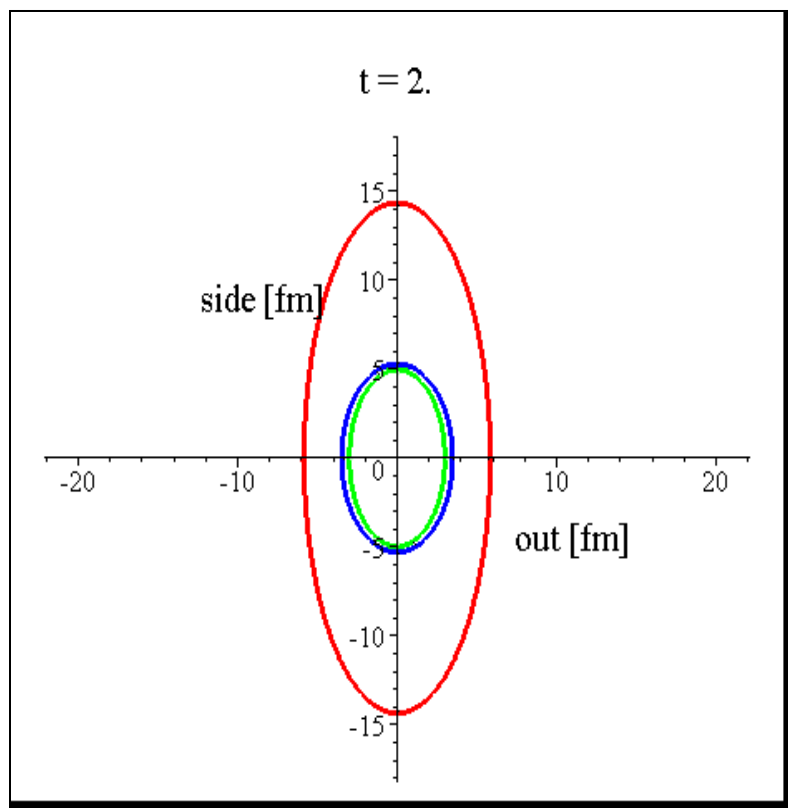


A "HBT rejtély" megoldása



A geometriai méretek tágulnak. A tágulási sebességek konstansokhoz tartanak.
 Az R_x, R_y, R_z "HBT sugarak" irányfüggetlen konstansokhoz tartanak.
 Az effektív hőmérsékletek irányfüggetlen konstansokhoz tartanak.
 Általános tulajdonság, a kezdőfeltételektől független - szépséges egzakt eredmény.

Geometriai & termikus & HBT sugarak



— Geometrical radii
— Thermal radii
— HBT radii

3d analitikus hidrodinamika:

egzakt időfejlődés

geometriai méretek (fugacitás $\sim \text{const}$)

termikus méretek (sebesség $\sim \text{const}$)

HBT méretek ($f(x,p)$ eloszlás $\sim \text{const}$)

HBT a geometriai és a termikus skálák között a kisebbik által dominált

nucl-th/9408022, hep-ph/9409327

hep-ph/9509213, hep-ph/9503494

HBT sugarak időfüggetlen állandóhoz tartanak

HBT térfogat gömbszerű lesz

HBT sugarak \rightarrow termikus méretek, időfüggetlen

állandók

hep-ph/0108067, nucl-th/0206051

Csanád Máté animációi

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

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

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

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

Relativisztikus Tökéletes Folyadékok

- Rel. hidrodinamika:**

$$\begin{aligned} \partial_\mu (n u^\mu) &= 0 \\ \partial_\mu T^{\mu\nu} &= 0 \end{aligned}$$

$$T^{\mu\nu} = (\varepsilon + p) u^\mu u^\nu - p g^{\mu\nu}$$

- Az egzakt megoldások új családja: nucl-th/0306004**

$$\begin{aligned} u^\mu &= \frac{x^\mu}{\tau} \\ n(t, \mathbf{r}) &= n_0 \left(\frac{\tau_0}{\tau} \right)^3 \mathcal{V}(s) \\ p(t, \mathbf{r}) &= p_0 \left(\frac{\tau_0}{\tau} \right)^{3+3/\kappa} \\ T(t, \mathbf{r}) &= T_0 \left(\frac{\tau_0}{\tau} \right)^{3/\kappa} \frac{1}{\mathcal{V}(s)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} u_\nu u^\mu \partial_\mu p + (\varepsilon + p) u^\mu \partial_\mu u_\nu - \partial_\nu p &= 0, \\ u^\mu \partial_\mu T + \frac{1}{\kappa} T \partial_\mu u^\mu &= 0. \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} \varepsilon &= mn + \kappa p, \\ p &= nT. \end{aligned}$$

- Bjorken megoldásának két hiányosságát korrigálja:**

- Véges rapiditás eloszlást jósol, transzverz folyást is tartalmaz

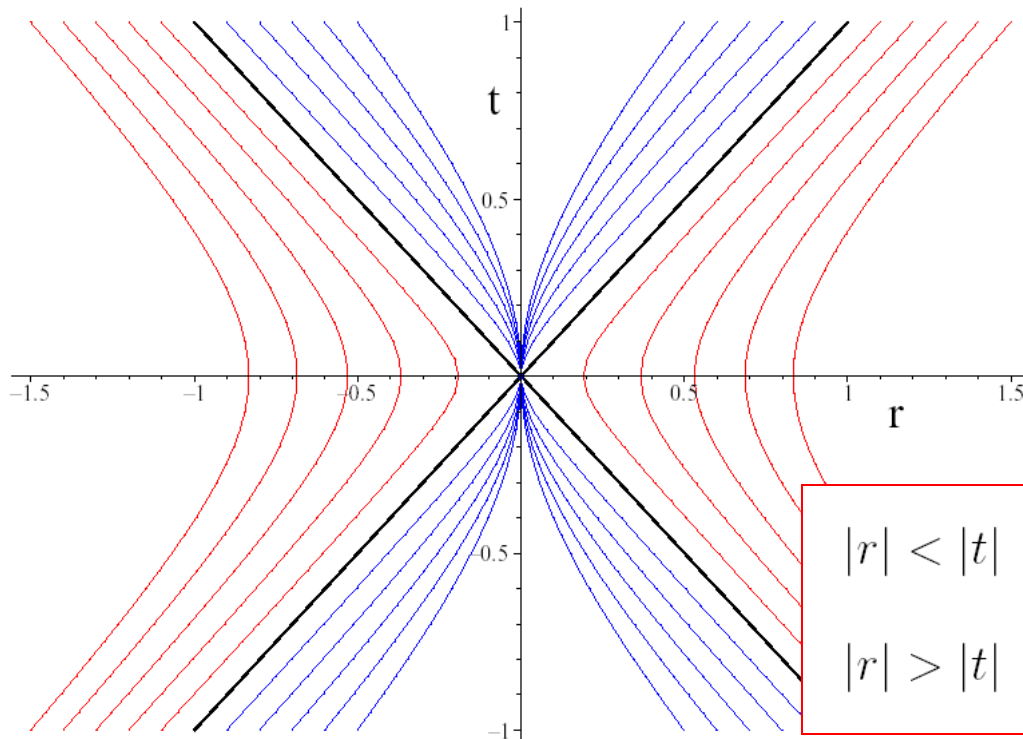
- **Hubble folyás \Rightarrow gyorsulás hiánya.**

$$u^\mu \partial_\mu u_\nu = 0$$

- **Gyorsuló, új, egzakt rel. hidro megoldások: nucl-th/0605070**

A Relativisztikus Tökéletes Folyadék

- **Az egzakt megoldások új családja:**
 - T. Cs, M. I. Nagy, M. Csanád: nucl-th/0605070
- **A Bjorken megoldás két hiányosságát korigálja:**
 - Véges rapiditás eloszlást jósol, Landau megoldásához hasonlóan
 - Relativisztikus gyorsuló szakaszt ír le
 - **1+1 és 1+3 dimenziós gömbszimmetrikus megoldások**



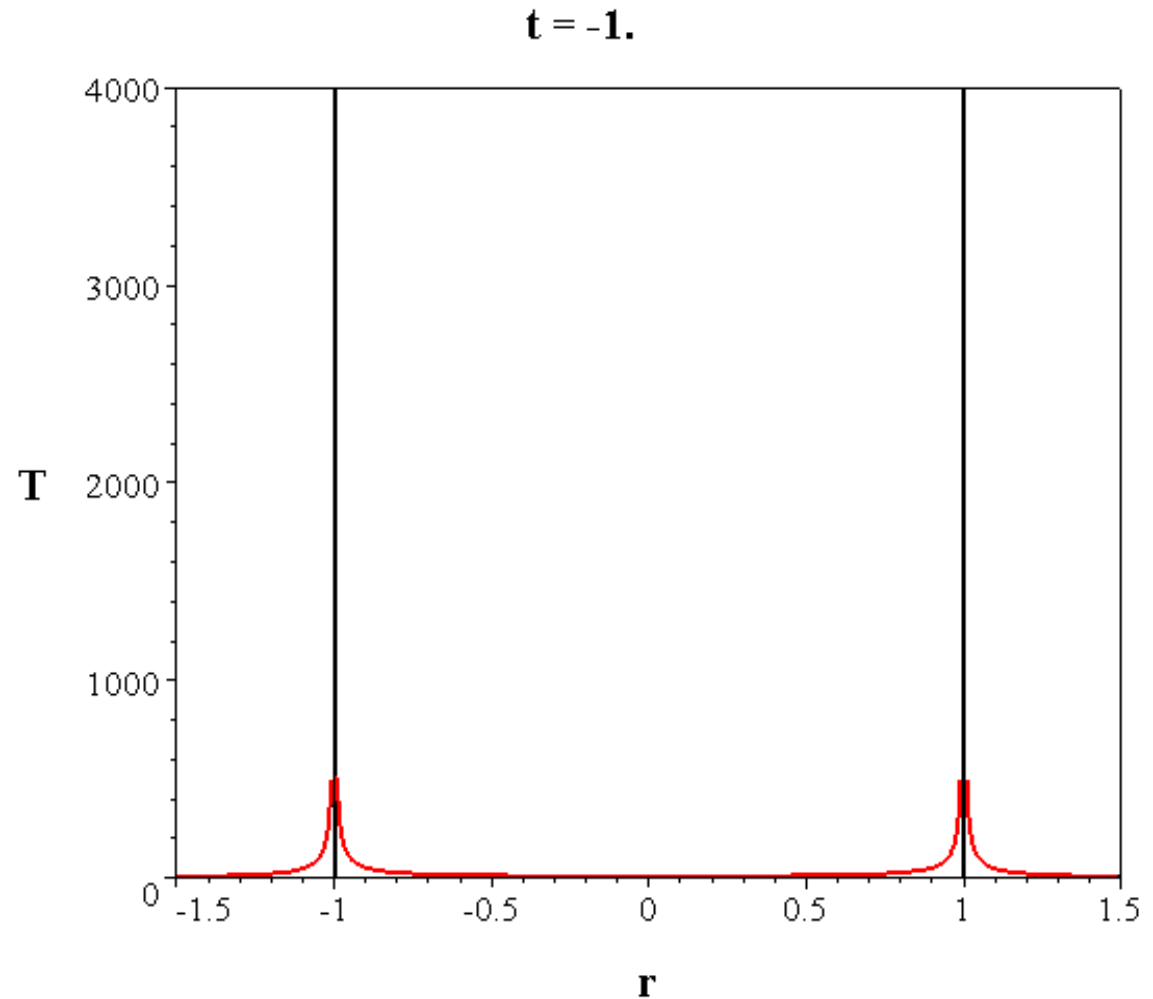
$$v = \tanh \lambda \eta,$$
$$n = n_0 \left(\frac{\tau_0}{\tau} \right)^\lambda \nu(s),$$
$$T = T_0 \left(\frac{\tau_0}{\tau} \right)^\lambda \frac{1}{\nu(s)}.$$

$$\frac{ds}{dt} = 0.$$

$$|r| < |t| : s(\tau, \eta) = \left(\frac{\tau_0}{\tau} \right)^{\lambda-1} \sinh((\lambda-1)\eta),$$
$$|r| > |t| : s(\tau, \eta) = \left(\frac{\tau_0}{\tau} \right)^{\lambda-1} \cosh((\lambda-1)\eta).$$

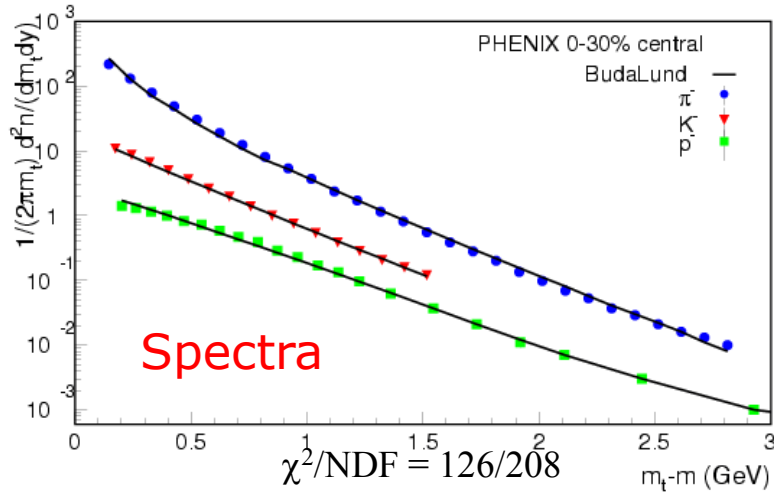
Az új egzakt megoldások családja

nucl-th/0605070
dimenziófüggetlen
 $\lambda = 2$
1+1 d
fénykúpon belül
és fénykúpon
kívül is
A+A ütközésekre
hasonlít

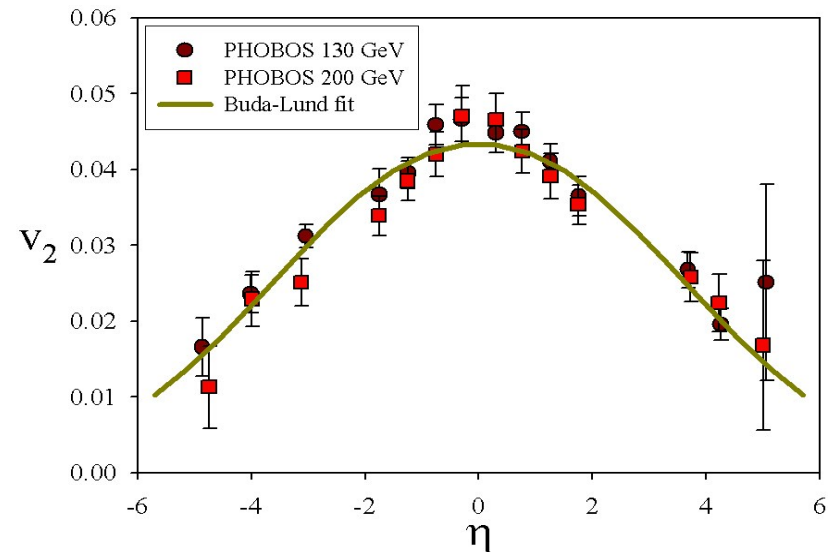
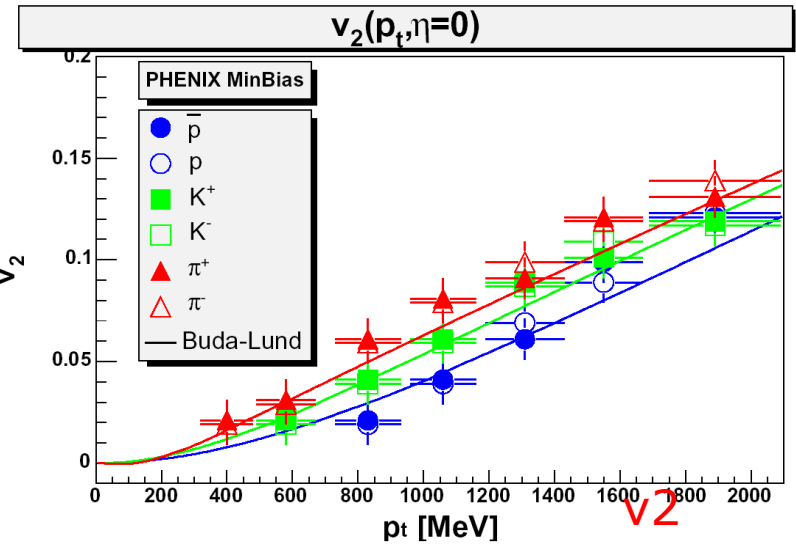
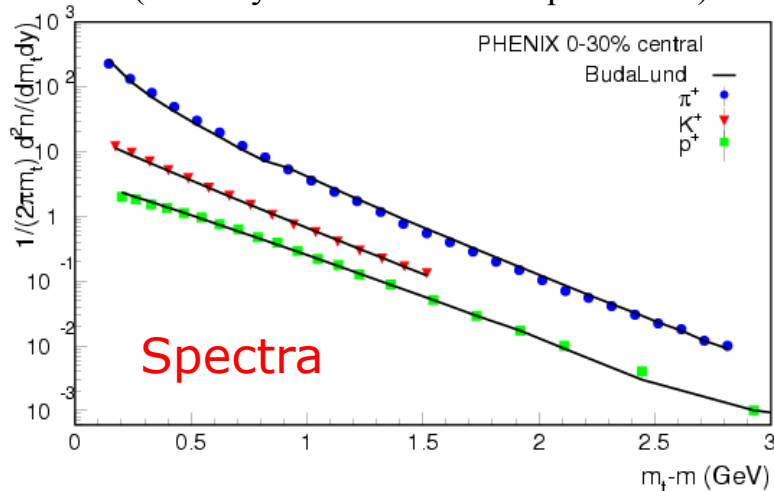


Elméleti eredmények

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



(stat + syst errors added in quadrature)

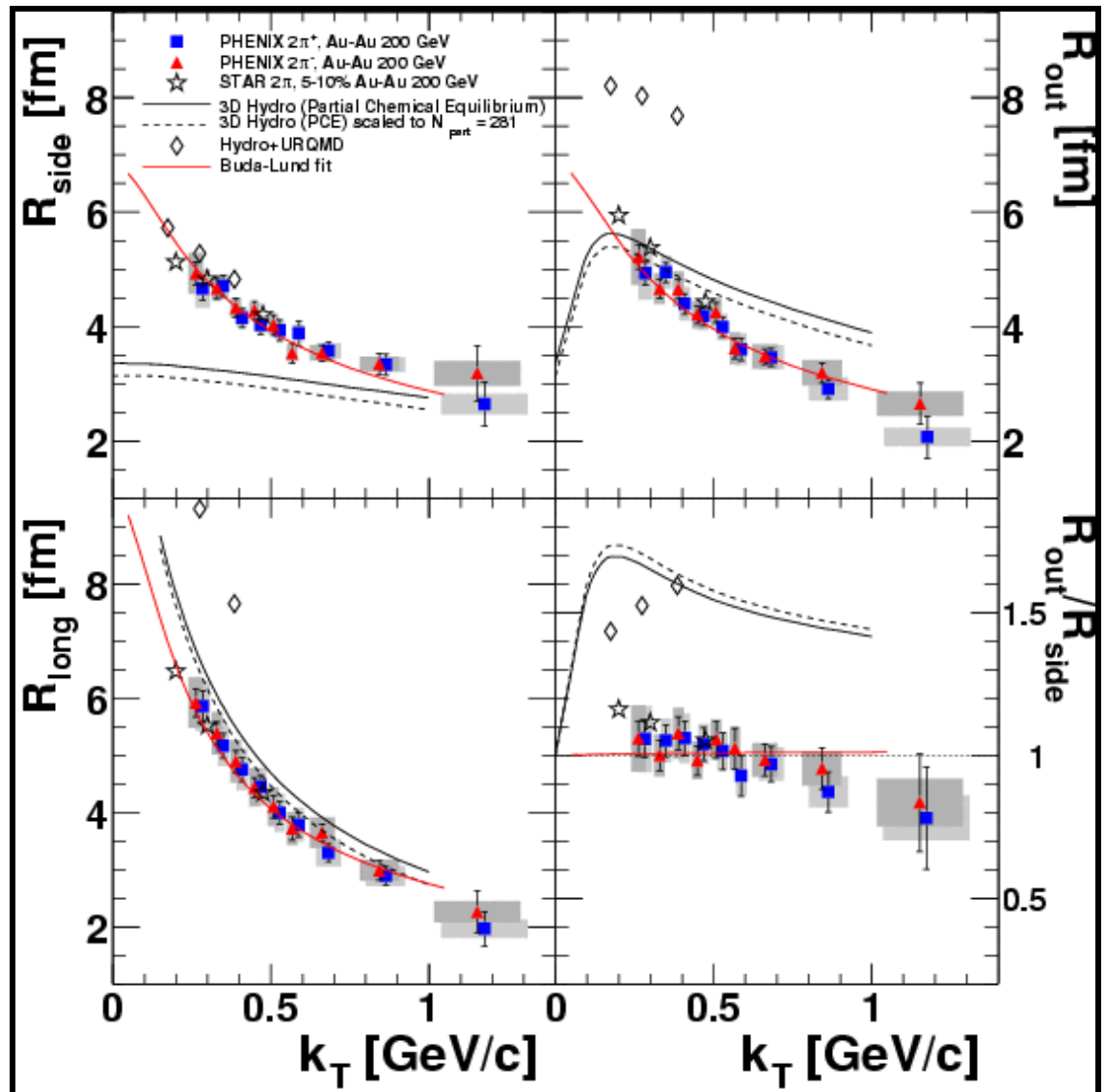


T. Csörgő, A. Ster et al, nucl-th/0311102, nucl-th/0207016, nucl-th/0403074

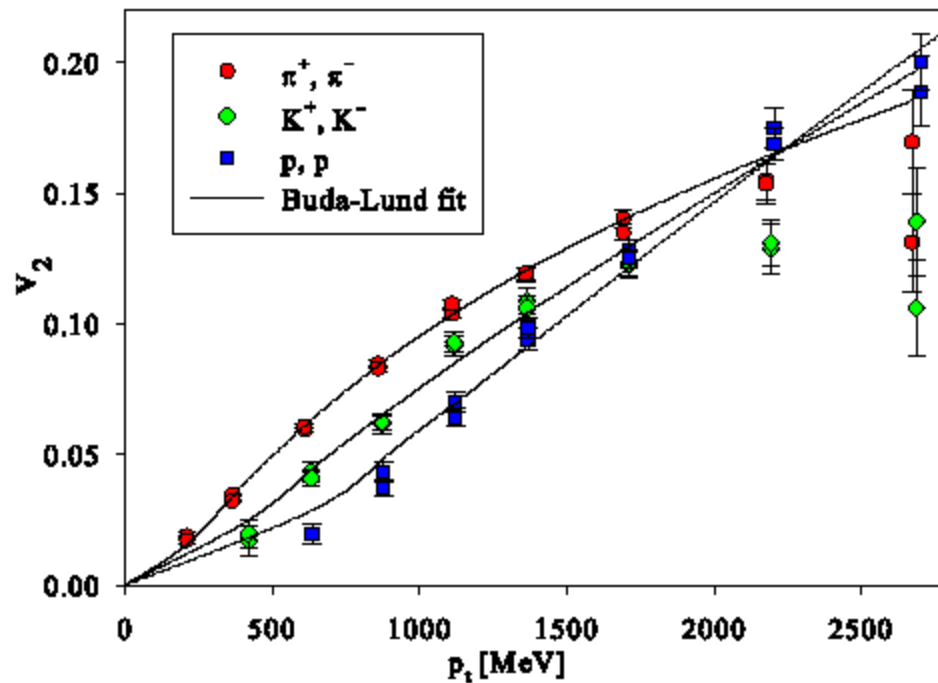
Elméleti eredmények

Buda-Lund hydro:

- a HBT sugarak skálaviselkedése értelmezhető
- hirtelen hadronizációt jelez
- ezt a jelenséget több mint 50 modell képtelen volt leírni
- nagy szelektivitás

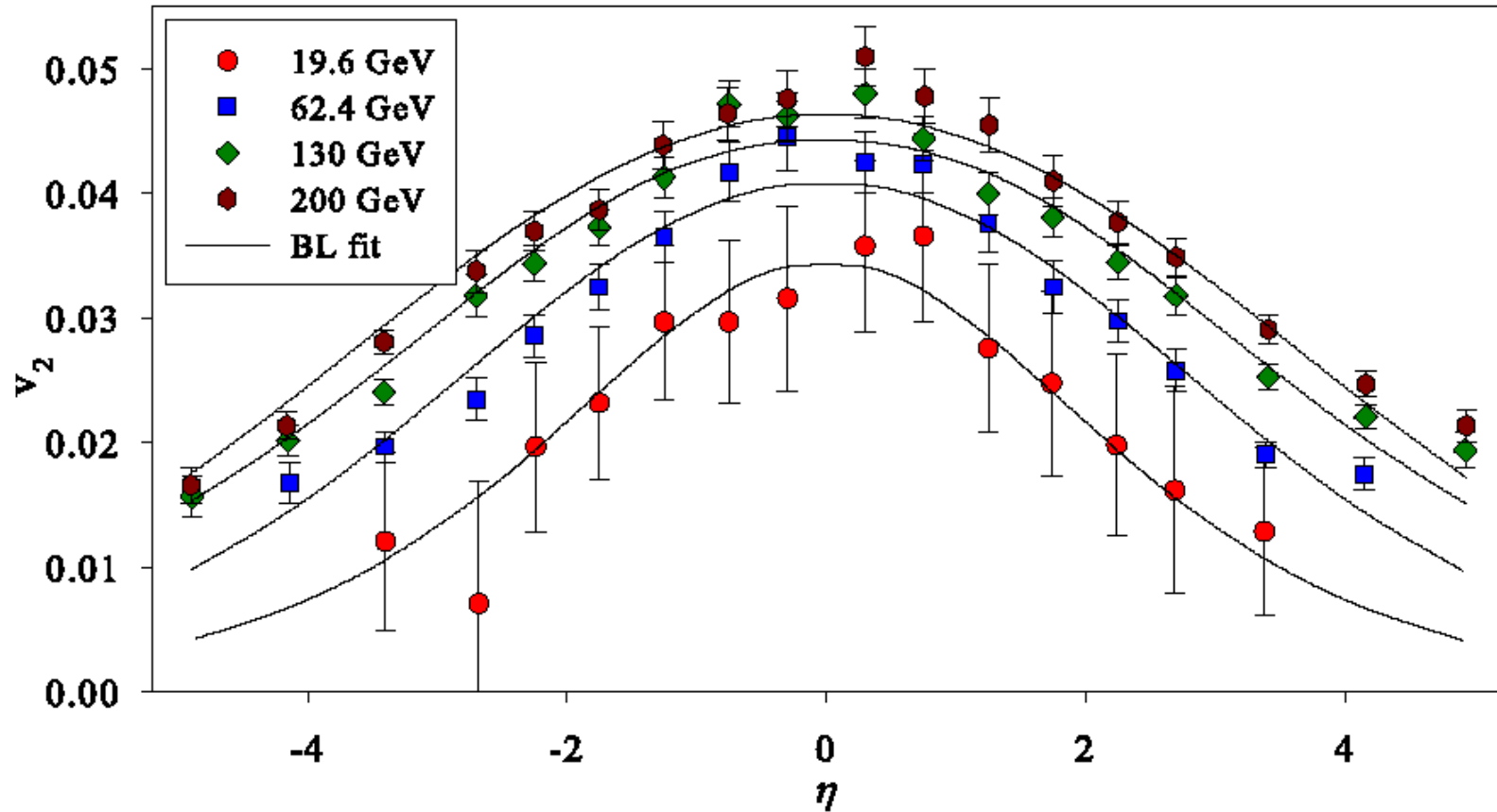


Elliptikus folyás, PHENIX



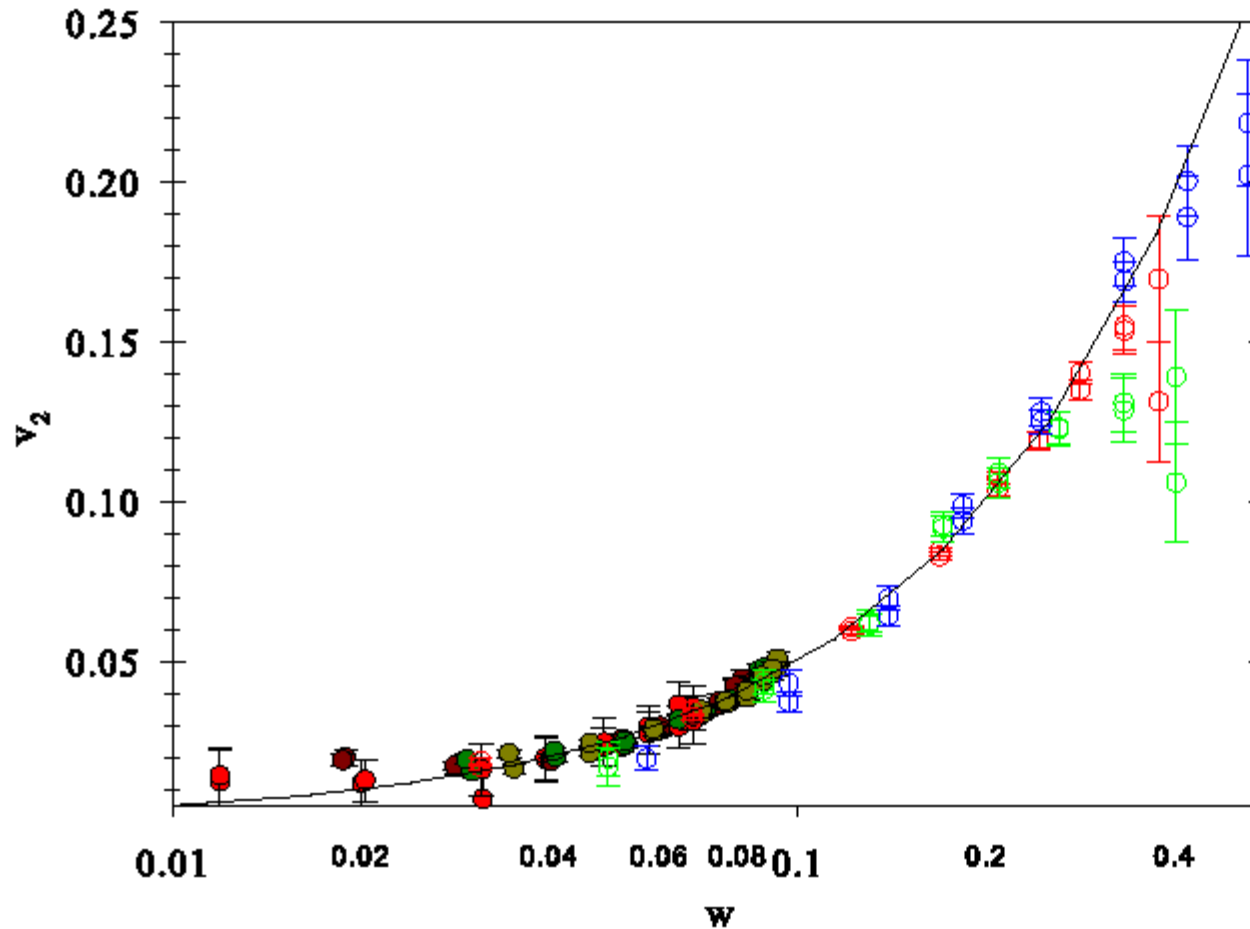
M. Csanád, T. Csörgő, A. Ster et al. nucl-th/0512078

Elliptikus folyás, PHOBOS adatok



M. Csanád et al. nucl-th/0512078

Univerzális v_2 skálázás jóslata 2003ban!

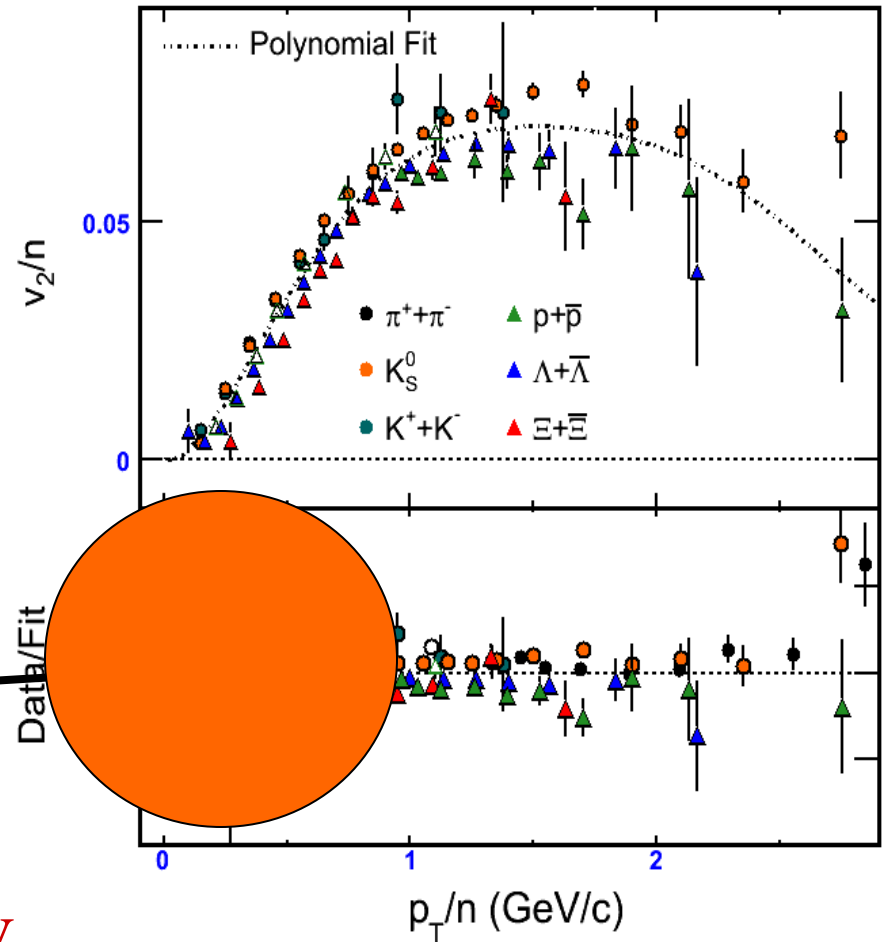
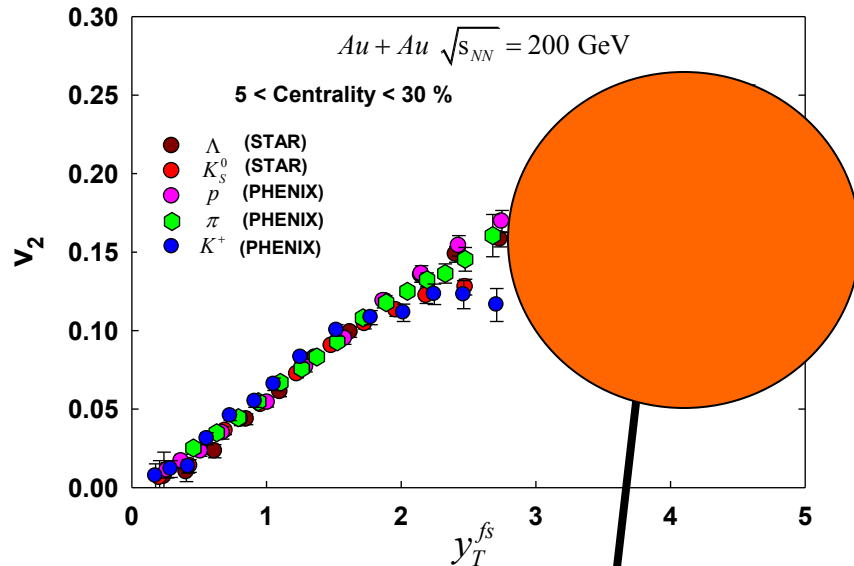


- $v_2(\eta)$ 19.2 GeV
- $v_2(\eta)$ 62.4 GeV
- $v_2(\eta)$ 130 GeV
- $v_2(\eta)$ 200 GeV
- $v_2(p_T)$ π , 200 GeV
- $v_2(p_T)$ K, 200 GeV
- $v_2(p_T)$ p, 200 GeV
- Buda-Lund prediction

PHENIX és PHOBOS
 adatok egybeesnek,
 és rajta vannak az
 elméletileg
MEGJÓSOLT
 Univerzális skálagörbén
 amit a tökéletes folyadék
 kép alapján kaptunk.

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

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!!

R. Lacey and M. Oldenburg
 Proc. QM 2005

Eredmények - konkluzió

A fenti eredmények alapvetően támasztják alá
a **tökéletes folyadék halmazállapot**
létrehozását a RHIC Au+Au ütközéseiben.

Az egyik legújabb eredmény (2006 febr 21):



**Lehetőségek: elméleti élvonalbeli kutatás
kísérleti élvonalbeli kutatás (PHENIX+)**

csorgo@sunserv.kfki.hu

<http://www.kfki.hu/~csorgo/>