

# **Mérföldkövek: a kvarkok folyadékának tulajdonságai**

**Csörgő Tamás**

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

**1. rész:**

**Új jelenség**

**Új anyag**

**Hangsebesség**

**Nem gáz: folyadék halmazállapot**

**Kvarkok folyadéka**

**Tökéletes**

**A legforróbb anyag – az sQGP fénye**

**$U_A(1)$  szimmetria:**

**Az átmenet nem állandó hőmérsékleten történik**

# Mérföldkövek – az 1. rész alapja

A KVAROK 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 gyorsítókból zajló nehézion-ütközéseket – a bennük uralkodó óriási energiasűrűség és hőmérséklet miatt – Kis Bummoknak is nevezhetjük.

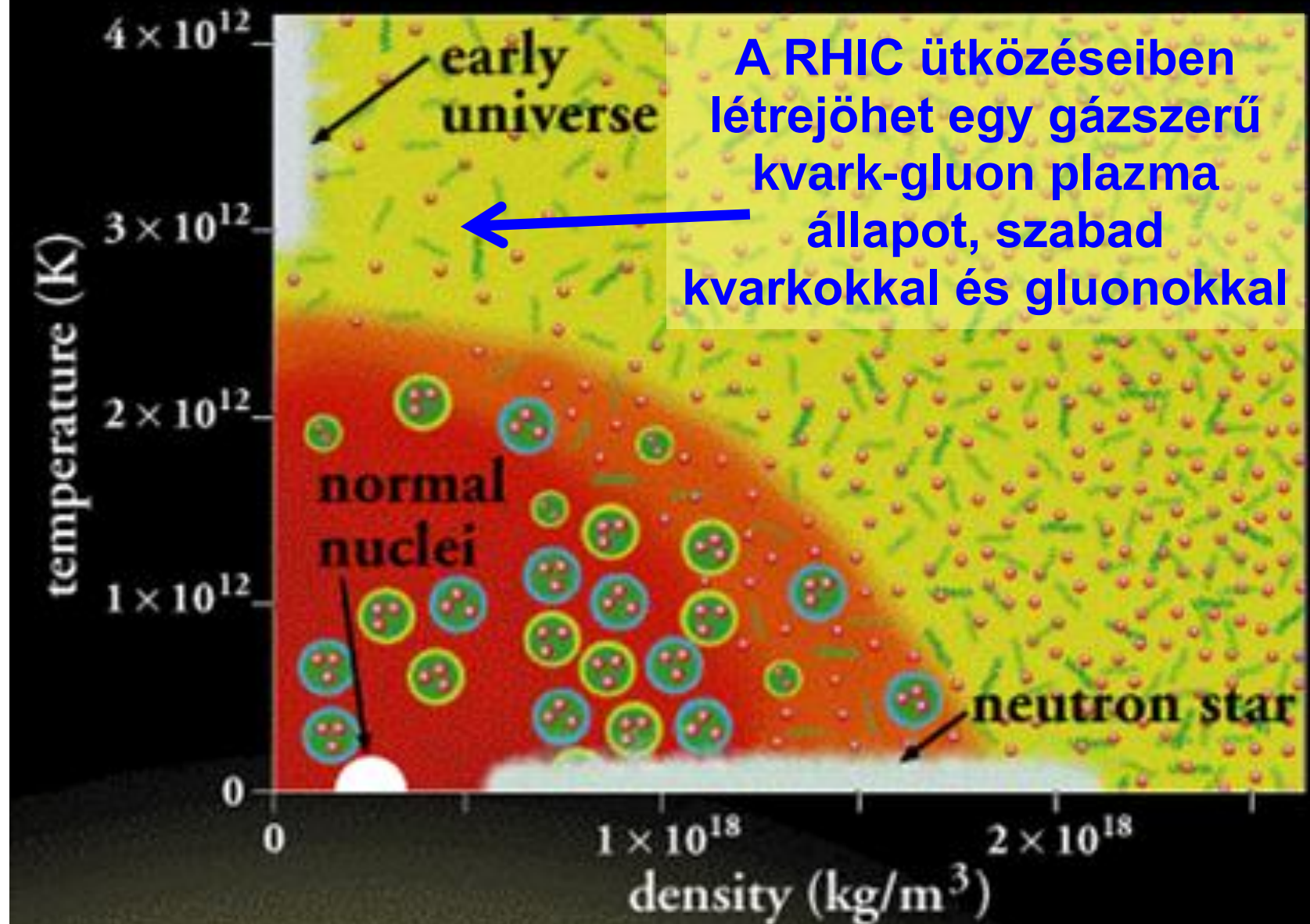
OTKA

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

Élet és Tudomány, 2010 novemberi szám

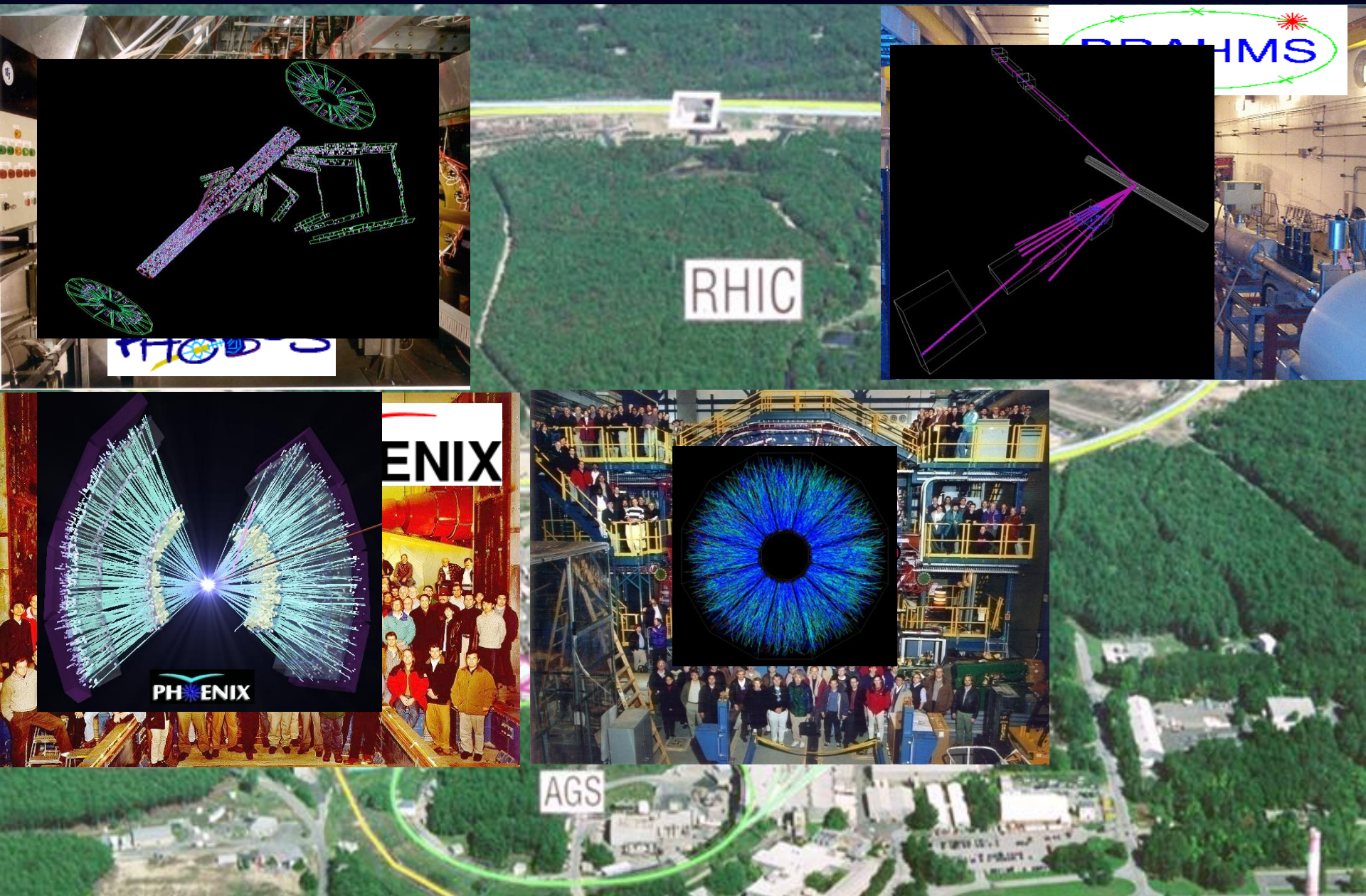
Cs.T: a 2010-es Zimányi Nehézionfizikai Téli Iskola előadása

# Várakozás 2000 körül





# A RHIC gyorsító és a 4 RHIC kísérlet



# **RHIC: Tervek 2000 (és 2010) 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: BRAHMS, PHOBOS**

**Nagy detektorok ~ Nagyberendezések: PHENIX, STAR**

**Komoly összegű beruházásokkal**

**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, 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*

## 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 lehetőség szerint 5-10 év**



# Nyelvezet

## A közösen használt alapvető nukleáris tulajdonságok

**$A, Z \dots$**

## A nehézionfizika specifikus mennyiségei

**$V_2$**  Azimutális anizotrópia - Fourier együttható- “elliptikus folyás”

**$R_{AA}$**  Nukleáris modifikációs faktor, értéke 1 ha nincs magfizikai hatás

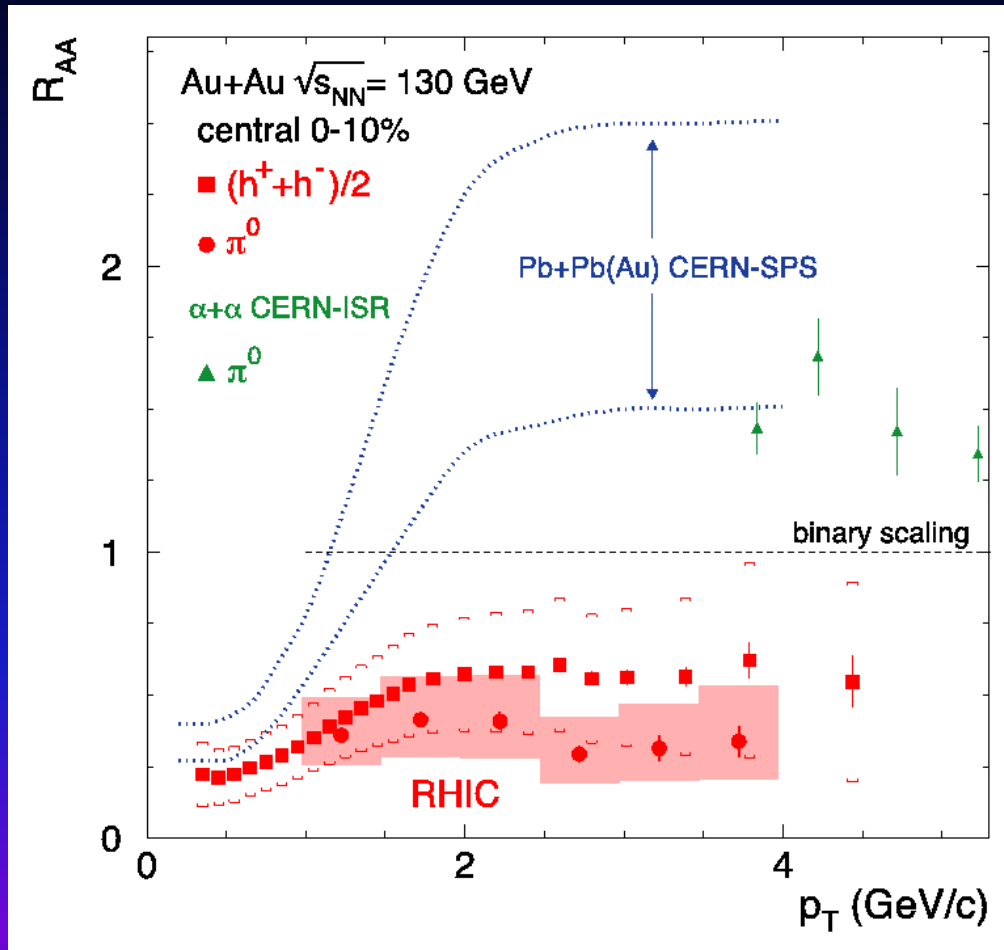
**$T$**  Hőmérséklet ( **$\text{MeV}$** )

**$\mu_B$**  Barion kémiai potenciál ( **$\text{MeV}$** ) ~ ***nettó*** barion sűrűség

**$\eta$**  Viskozitás (  **$\text{MeV}^3$**  ) (  $\hbar = c = 1$  )

**$S$**  Entrópiasűrűség (  **$\text{MeV}^3$**  ) ~ “részecske” sűrűség

# Első mérőöldkő: új jelenség

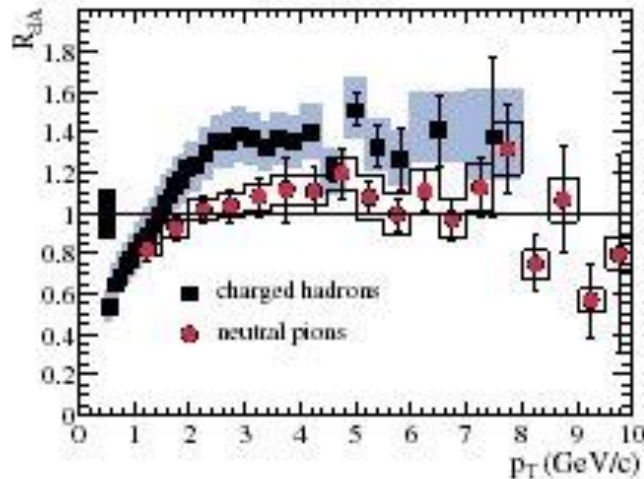


A RHIC-nél a nagy transzverzális impulzusú részecskekeltés jelentős elnyomása az Au+Au ütközésben a PHENIX felfedezése

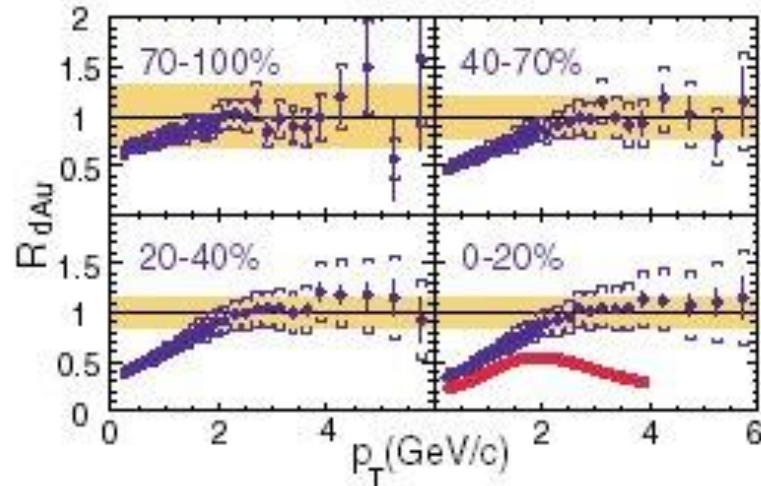


# Második mérőöldkő: az anyag új formája

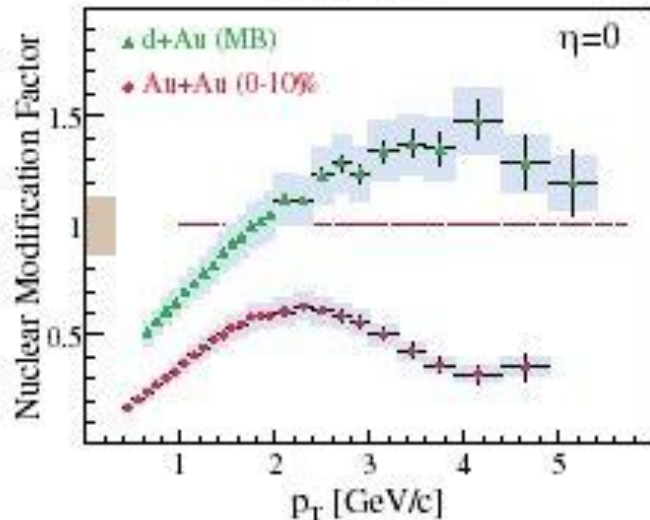
PHENIX



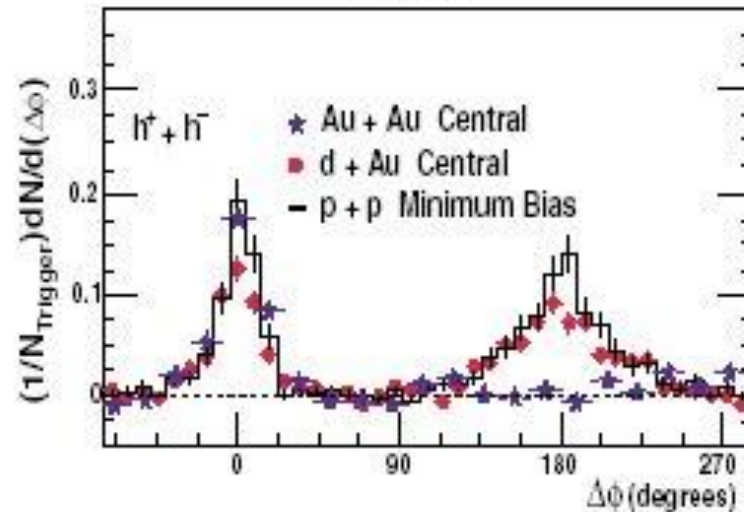
PHOBOS



BRAHMS



STAR

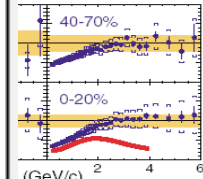


PHYSICAL  
VIEW  
LETTERS

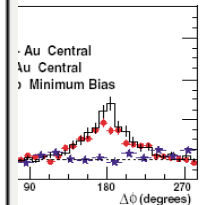
Published week ending  
AUGUST 2003

Volume 91, Number 7

PHOBOS



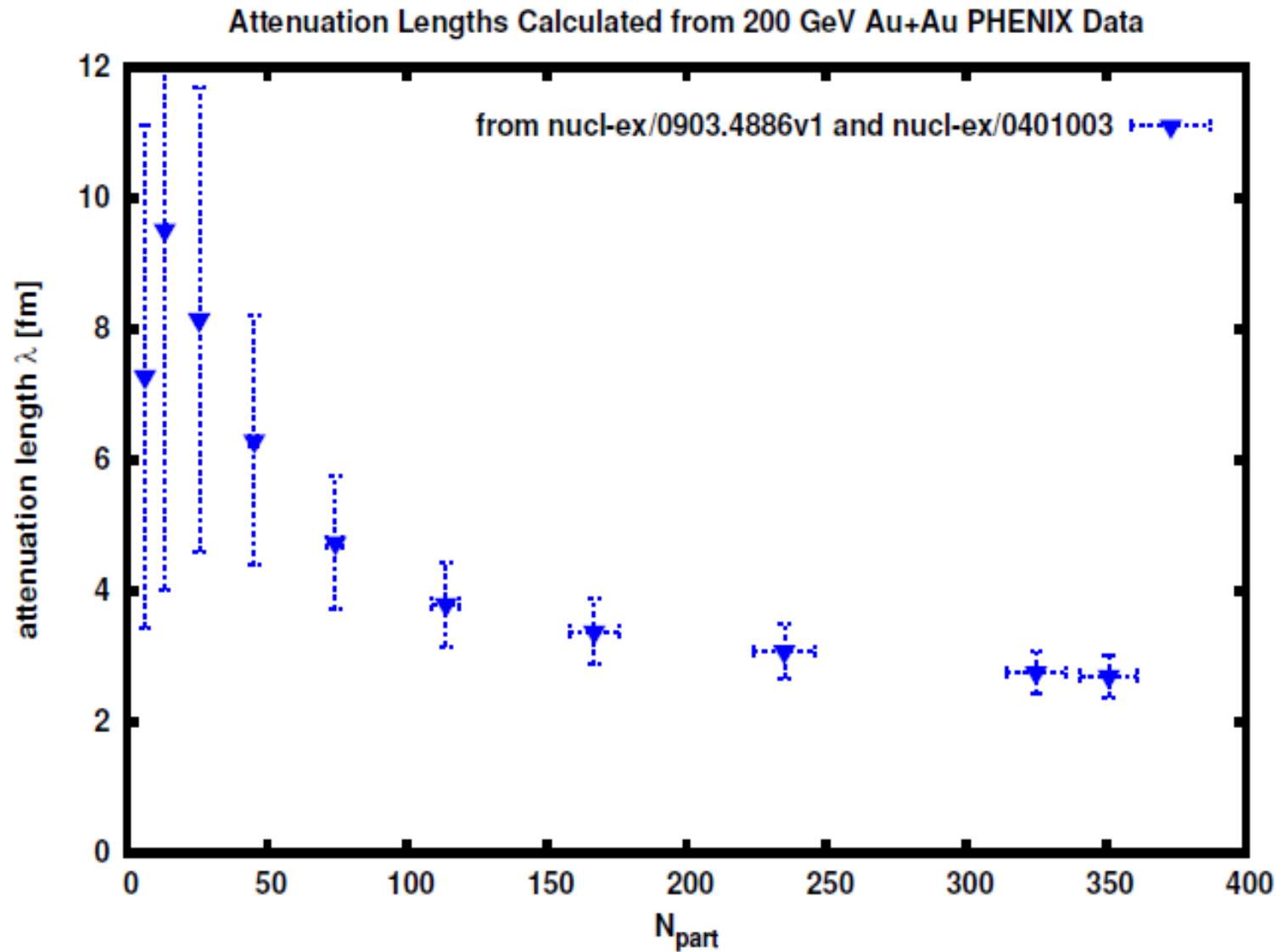
STAR



Preprint Copy  
Use Prohibited Until 2008

American Physical Society

# Az optikai opacitás mérése



# 3. mérföldkő: Nem gáz, hanem folyadék!

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**

[Subscribe to Physics News Update](#)

[Physics News Graphics](#)

[Physical Review Focus](#)

[Physics News Links](#)

Archives  
[2006](#)  
[2005](#)  
[2004](#)  
[2003](#)

### 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:

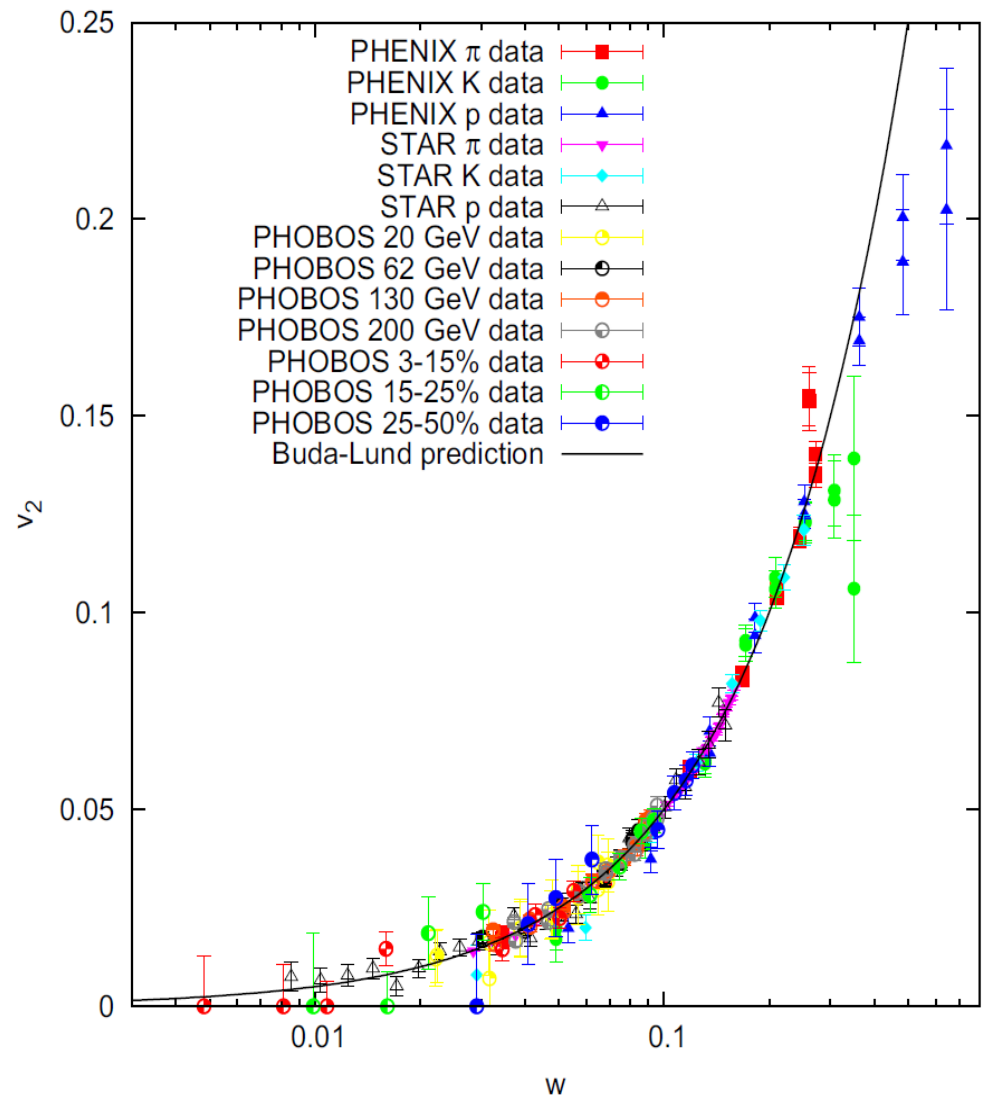
the arrival of the Cassini spacecraft at Saturn and the successful landing of the Huygens probe on the moon Titan ([PNU 716](#));

the development of lasing in silicon ([Nature 17 February](#));

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

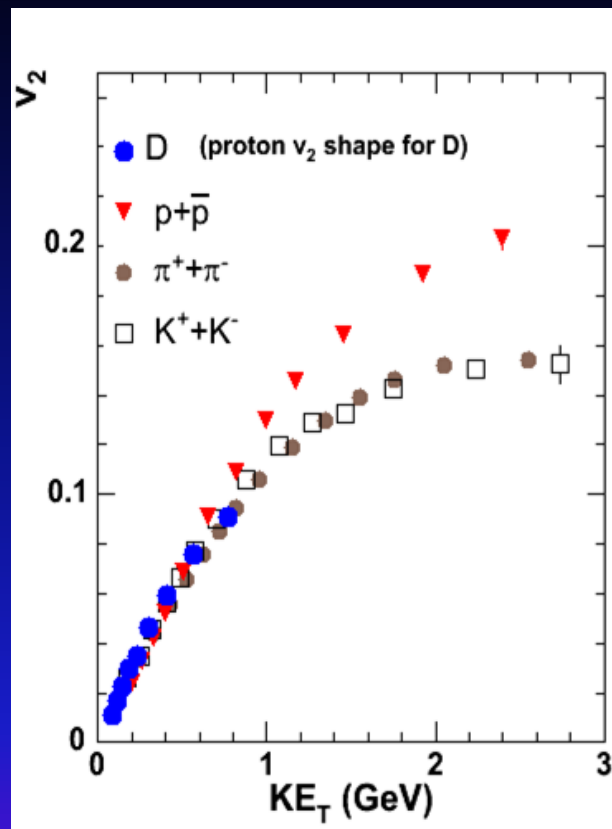
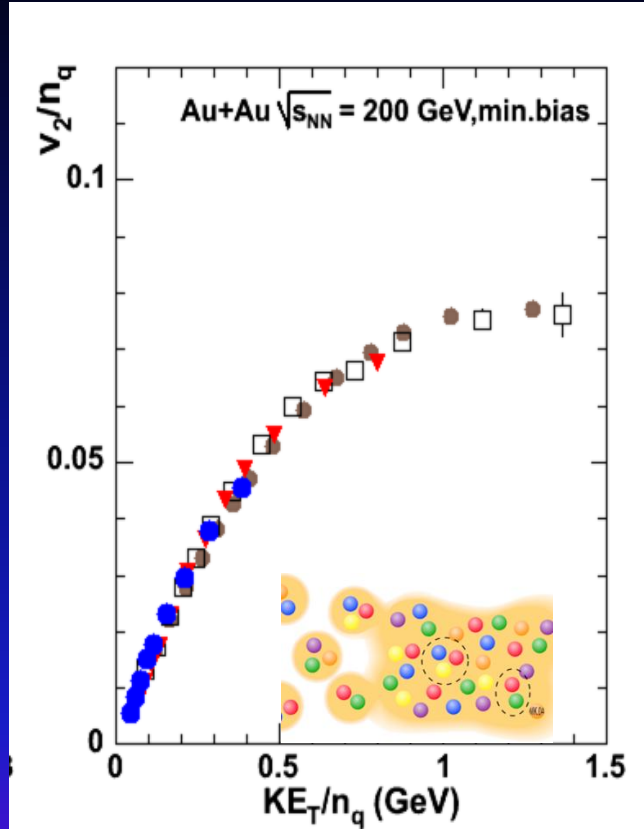
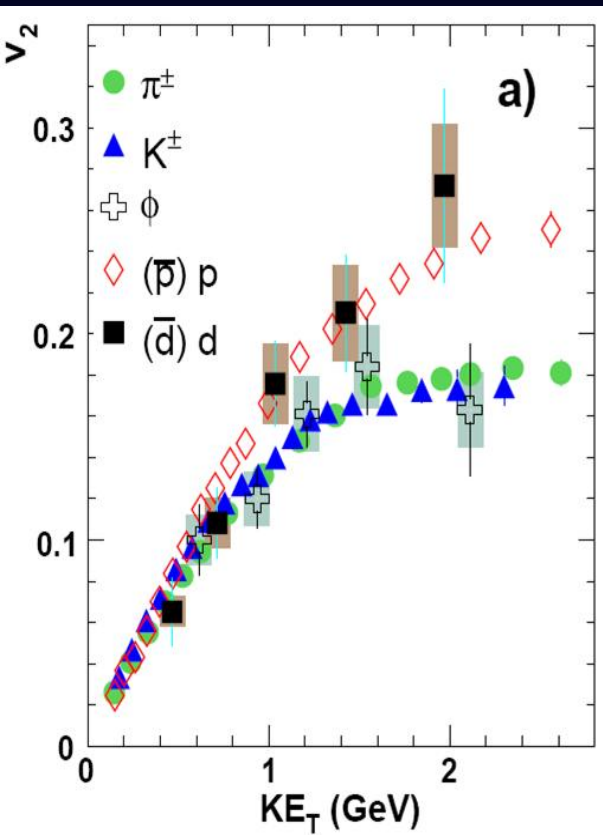
1479 hivatkozás ~ 9 év alatt

# A RHIC tökéletes folyadéka





# Negyedik mérföldkő: A kvarkfolyadék



A  $\phi$  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**

# Mennyire "tökéletes" ? Mérjünk $\eta/s$ -t!

**Nehéz kvarkok diffúziója  $\rightarrow$  viszkozitás  $\sim \eta/s$**

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)

C

H

A

R

M

!

HDRA, 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)

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

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

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

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

# Ötödik Mérföldkő: 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:

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

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

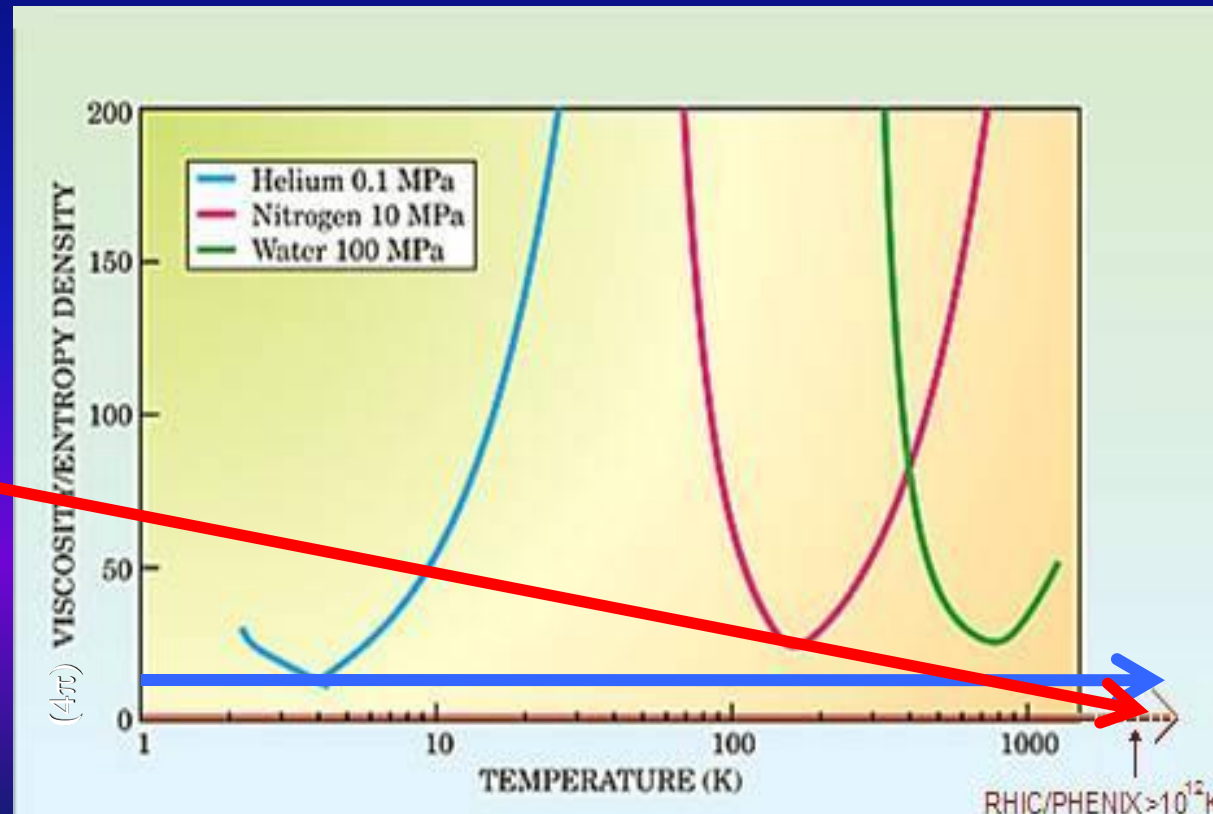
Hogy viszonyulnak a "rendes" folyadékok ehhez a limithez?

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

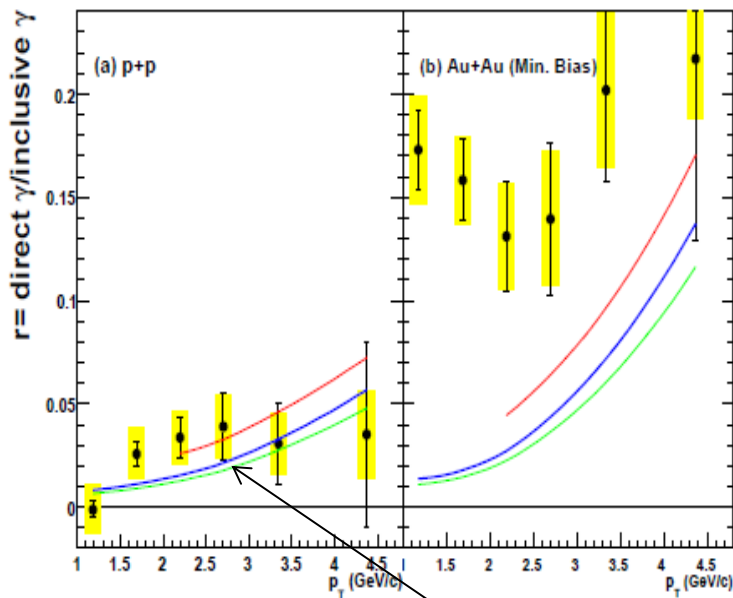
RHIC tökéletes folyadék

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

A legforróbb  
( $T > 4$  Terakelvin)  
és a legtökéletesebb  
bizonyítottan előállított  
folyadék...

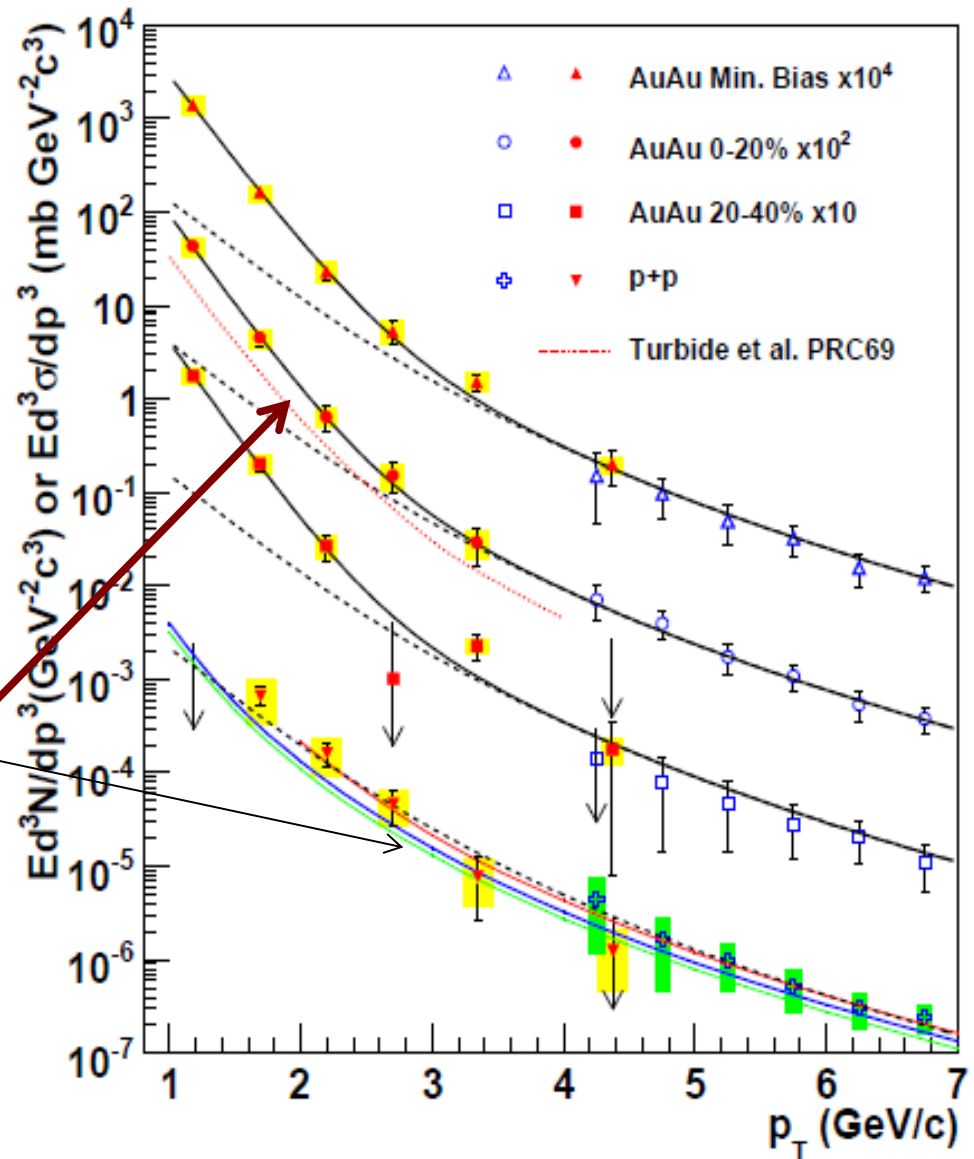


# 6. mérőöldkő: a kvarkfolyadék fénye



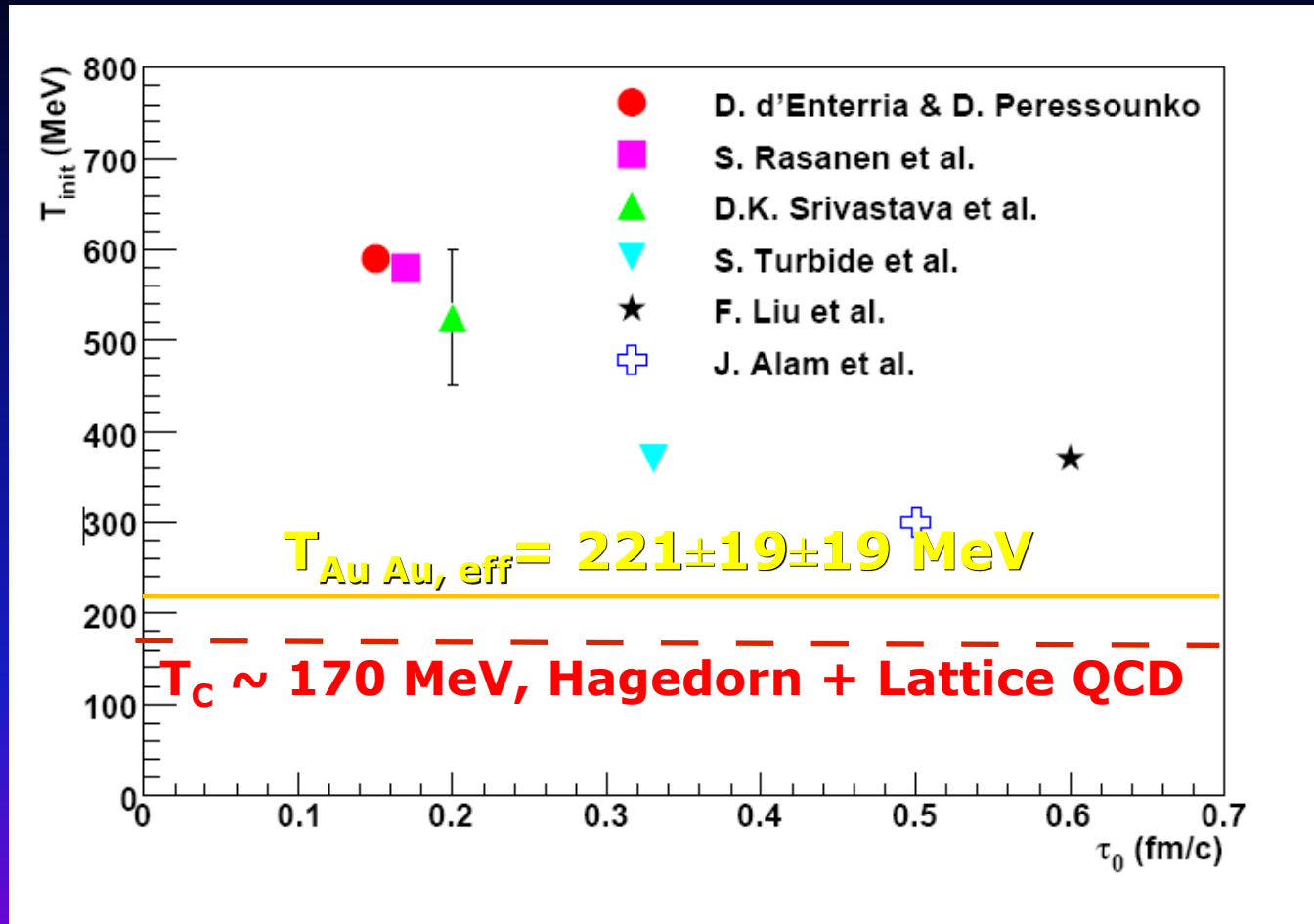
NLO pQCD számítások: p+p OK  
 Au+Au: mértnél kevesebb foton  
 az adatok leírásához kell még:  
 Hidro + direkt fotonok  
 és  $T_{\text{init}} \sim 360 \text{ MeV}$

A. Adare et al. PHENIX Collaboration,  
 arXiv:0804.4168 [nucl-ex]  
 Phys. Rev. Lett. 104:132301 (2010)  
 Phys. Rev. C 81, 034911 (2010)





# 6. mérföldkő: 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:**  $T_{ini} = 300 - 600$  MeV, ha  $\tau_0 = 0.15 - 0.6$  fm/c  
**rács QCD és Hagedorn tömegspektrum:**  $T_c \sim 170$  MeV

# Egzakt hidro → kezdeti energiasűrűség

$$v = \tanh \lambda \eta,$$
$$p = p_0 \left( \frac{\tau_0}{\tau} \right)^{\lambda d \frac{\kappa+1}{\kappa}} \left( \cosh \frac{\eta}{2} \right)^{-(d-1)\phi_\lambda}$$

Új egzakt hidro megoldás család (egy sor - egy megoldás):

| Case | $\lambda$        | $d$              | $\kappa$         | $\phi_\lambda$            |
|------|------------------|------------------|------------------|---------------------------|
| a.)  | 2                | $\in \mathbb{R}$ | $d$              | 0                         |
| b.)  | $\frac{1}{2}$    | $\in \mathbb{R}$ | 1                | $\frac{\kappa+1}{\kappa}$ |
| c.)  | $\frac{3}{2}$    | $\in \mathbb{R}$ | $\frac{4d-1}{3}$ | $\frac{\kappa+1}{\kappa}$ |
| d.)  | 1                | $\in \mathbb{R}$ | $\in \mathbb{R}$ | 0                         |
| e.)  | $\in \mathbb{R}$ | 1                | 1                | 0                         |

Nagy, Cs.T., Csanád: [nucl-th/0605070](#),  
[arXiv:0709.3677v1](#), [arXiv:0805.1562](#)

→ Új d-dimenziós megoldások

↘ d dimenziós, véges  $p=p(\tau,\eta)$   
↗ (Kredit: T. S. Biró)

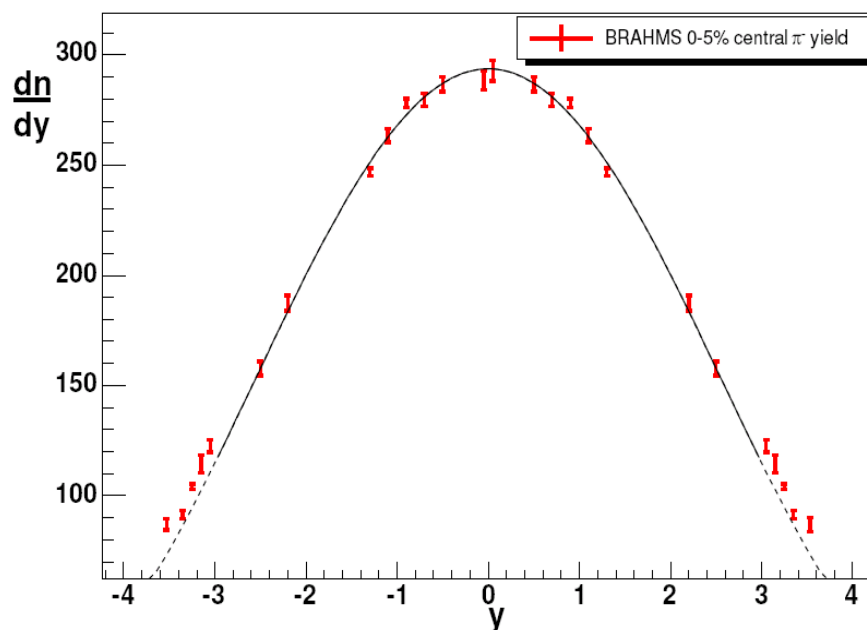
→ **Hwa-Bjorken**, Buda-Lund

→ Speciális EoS, általános profil

Ha  $\kappa = d = 1$ , az általános megoldást is megadtuk  
**tetszőleges** kezdeti feltételre. Ráadásul **STABIL is** !

# BRAHMS rapiditás-eloszlás illesztése

$$\frac{dn}{dy} \approx \left. \frac{dn}{dy} \right|_{y=0} \cosh^{\pm \frac{\alpha}{2} - 1} \left( \frac{y}{\alpha} \right) e^{-\frac{m}{T_f} \left[ \cosh^{\alpha} \left( \frac{y}{\alpha} \right) - 1 \right]},$$



$$\lambda = \frac{\alpha - 1}{\alpha - 2}.$$

|                                      |                           |
|--------------------------------------|---------------------------|
| $\alpha$                             | $7.4 \pm 0.13$            |
| $\left. \frac{dn}{dy} \right _{y=0}$ | $294 \pm 1$               |
| $\chi^2/\text{NDF}$                  | 30.6/14                   |
| CL                                   | 0.6%                      |
| $T_f$ (MeV)                          | 200 (fixed)               |
| $m$ (MeV)                            | 140 (fixed)               |
| $\lambda$                            | $1.18 \pm 0.01$ (derived) |

BRAHMS adatok illesztése egzakt hidro megoldással:  
 T. Cs, M.I. Nagy, M. Csanád, J.Phys.G G35 (2008) 104128,  
 Phys.Lett. B663 (2008) 306-311

# A kezdeti energiasűrűség, $\varepsilon_0$

4 megszorítás:

1)  $\varepsilon_{Bj}$  az állapotegyenlettől független ( $\lambda = 1$  eset)

2)  $c_s^2 = 1$  megoldható minden  $\lambda > 0.5$ -re

**M. I. Nagy, Cs.T., M. Csanád:**

**nucl-th/0605070, arXiv:0709.3677v1,**

**J.Phys.G G35 (2008) 104128,**

**Phys.Lett. B663 (2008) 306,**

**PRC77 (2008) 024908**

$$\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{Bj}} = (2\lambda - 1) \left( \frac{\tau_f}{\tau_0} \right)^{\lambda-1}$$

Ezeket a határesetekben vissza kell kapni.

3)  $c_s^2$  -től az  $\varepsilon(\tau)$  ismert módon függ

4) Numerikus hidro-megoldások

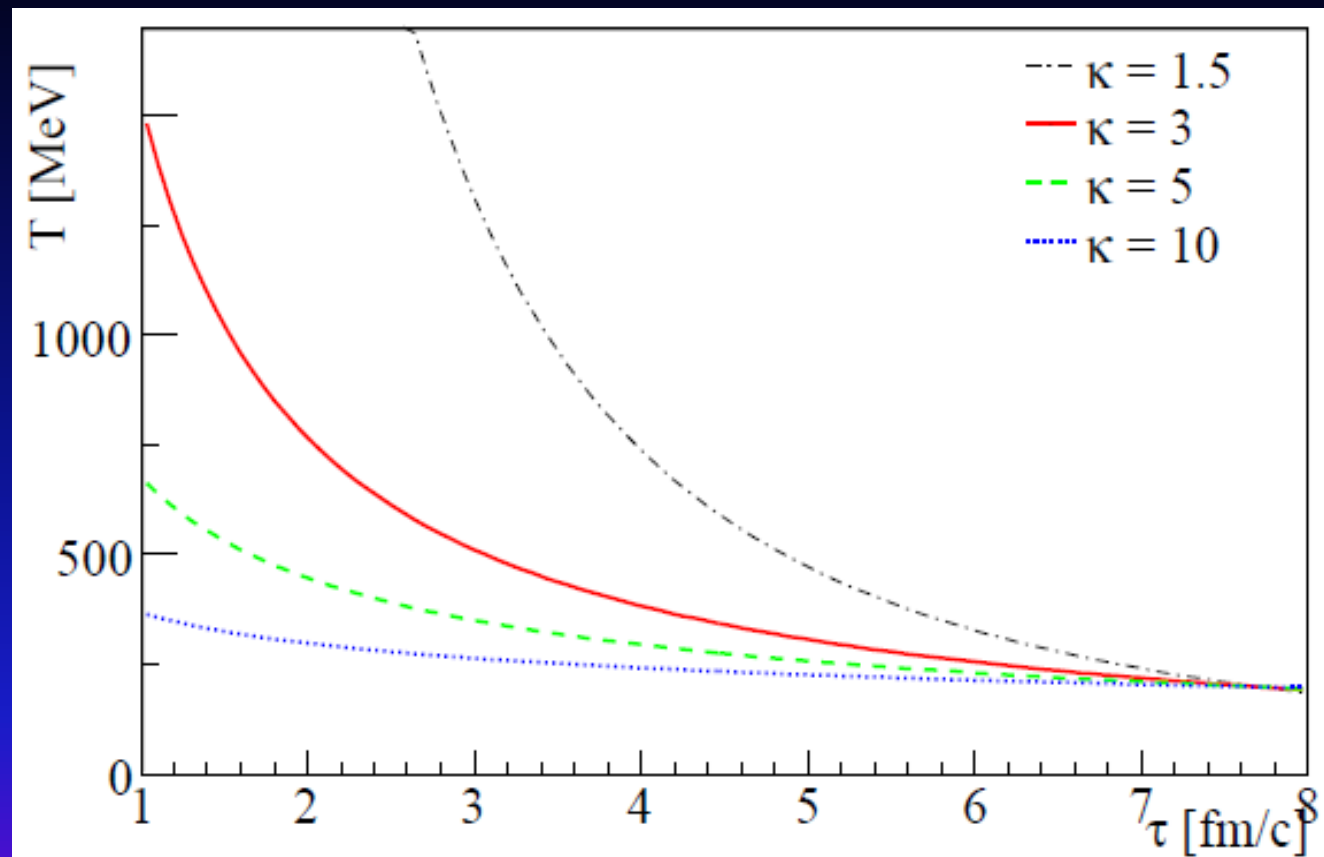
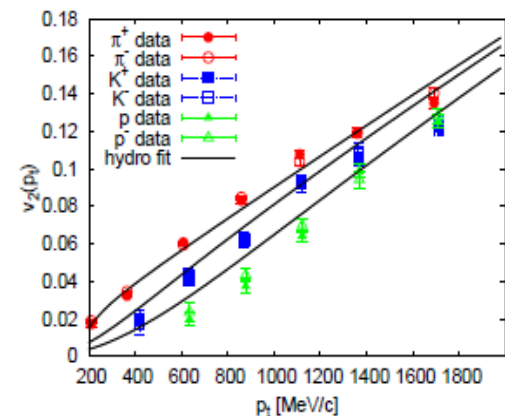
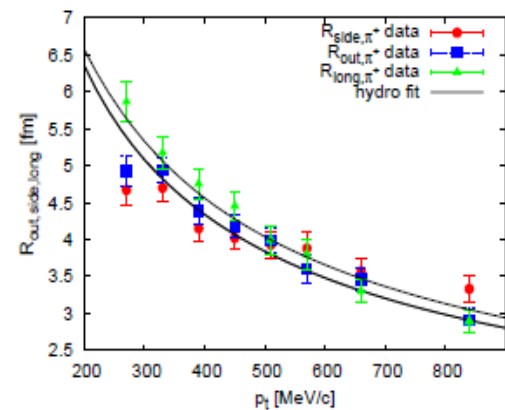
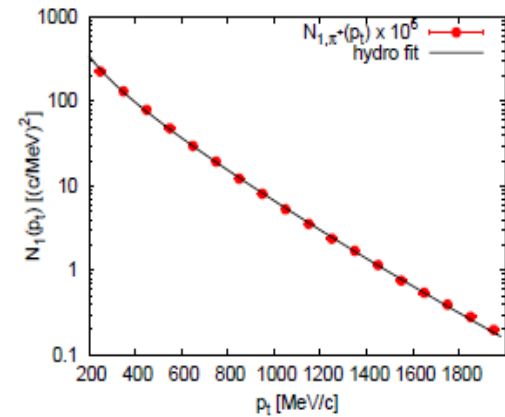
Occam borotvája + 4 megszorítás  $\rightarrow$  javított Bjorken becslés

$$\frac{\varepsilon_{c_s^2}}{\varepsilon_{Bj}} = (2\lambda - 1) \left( \frac{\tau_f}{\tau_0} \right)^{\lambda-1} \left( \frac{\tau_f}{\tau_0} \right)^{(\lambda-1)(1-c_s^2)}$$

Adatokból:  $\lambda = 1.18$ ,  $c_s = 0.35$ ,  $\tau_f/\tau_0 = 10$ , eredmény  $e_{cs}/e_{Bj} = 2.9$

$\varepsilon_0 = 14.5 \text{ GeV/fm}^3$  a 200 GeV, 0-5 % Au+Au RHIC ütközésekben

# Megerősítés: Kezdeti hőmérséklet



**Egzakt hidro megoldás:  $T_{\text{ini}} > 340 \text{ MeV}$  ha  $\tau = 1 \text{ fm}/c$  szimultán illesztése a spektrum +  $v_2$  + HBT adatoknak bármilyen ésszerű EoS esetén, ha  $\kappa = \varepsilon/p < 10$**   
 $\varepsilon \sim T^4$ , so  $\varepsilon/\varepsilon_c = (T/T_c)^4 \rightarrow \varepsilon_{\text{ini}} \sim 16 \text{ GeV}/\text{fm}^3$



# 7. mérőöldkő: az átmenet folytonos

## A RHIC-nél

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

## Jellemzői:

Opálos,  $R_{AA} \sim 0.2$

Csillapítási hossz  $\sim 2$  fm

$C_s = 0.35 \pm 0.05$

$\eta/s \leq$  szuperfolyékony He/5

$T_{init} \geq 300$  MeV

$\epsilon_{init} \geq 15$  GeV/fm<sup>3</sup>

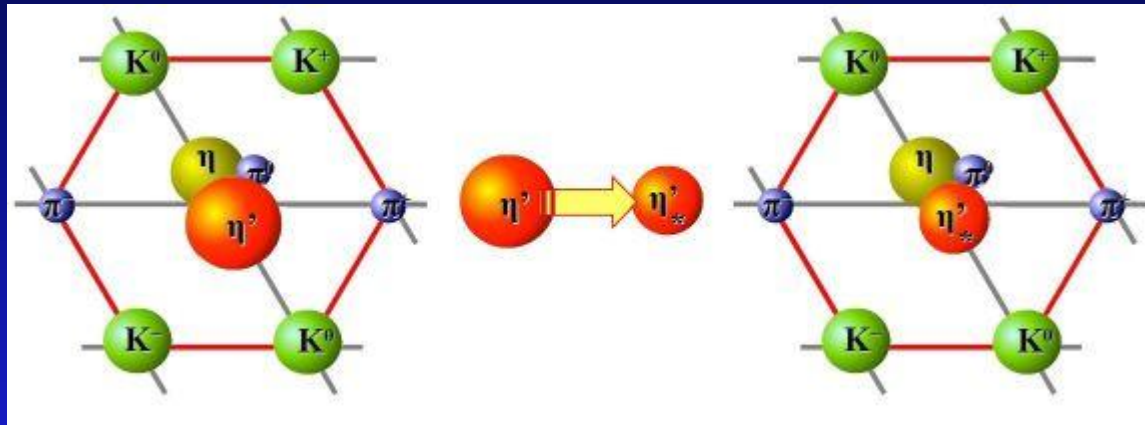
$p_{init} \geq 1.5$  GeV/fm<sup>3</sup>

## Folytonos átmenet!

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

## A RHIC-nél

az  $\eta'$  mezon tömegcsökkenése  
egy elveszett szimmetria helyreáll



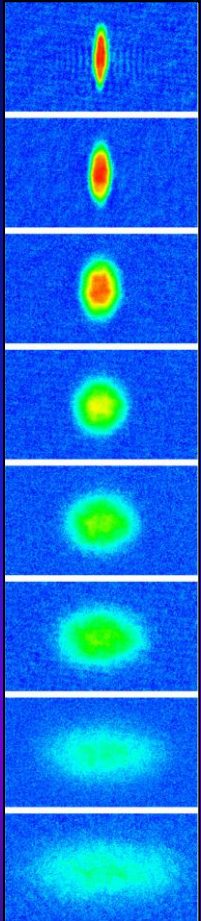
T. Cs, R. Vértési, J. Sziklai  
Phys.Rev.Lett.105:182301,2010

R. Vértési, T. Cs, J. Sziklai  
Nucl.Phys. A830 (2009) 631C-632C  
PRC83 (2011) 054903

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

# Erősen kölcsönható anyagok

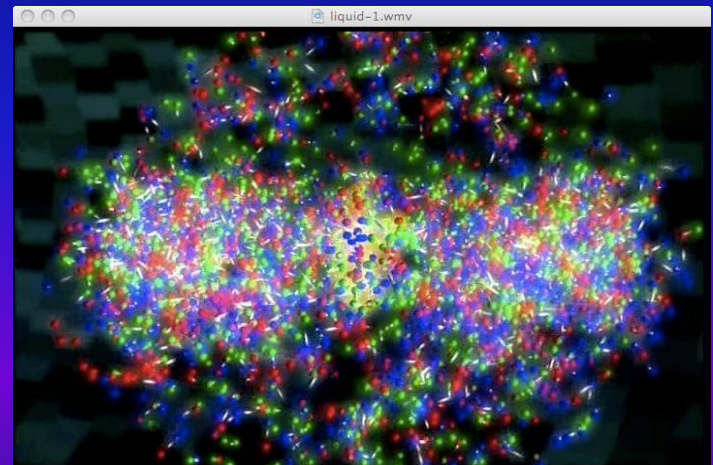
- ❖ Ultra-hideg atomos  ${}^6\text{Li}$  gáz
- ❖ Tökéletesen folyó Kvark-Gluon Plazma (RHIC)
- ❖ Nagy  $T_c$ - Szupravzetők
- ❖ Neutron anyag
- ❖ Fekete lyukak a húrelméletben



Erősen csatolt  ${}^6\text{Li}$  gáz,

$T = 10^{-7} \text{ K}$

J. Thomas et al, Science (2002)



Kvark-gluon plazma,  $T > 4 \times 10^{12} \text{ K}$

➡ Hasonló “Elliptikus” folyási kép ⬅

## **2. rész:**

### **A RHIC energiaváltoztatási program első eredményei**

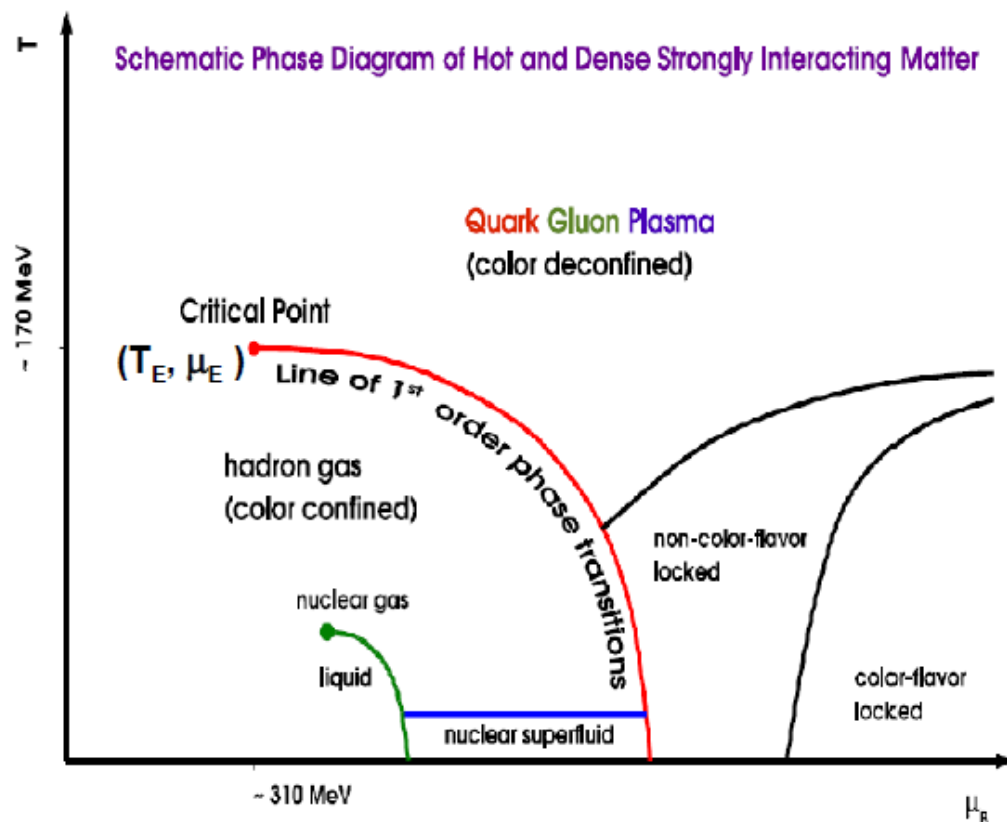
### **A QCD CP kísérleti keresése**

**Kritikus pont, kritikus opaleszcenciával**

**Kritikus exponensek**

**Az ismert új jelenségek első megjelenése**

# A definitív CEP felfedezés feltételei



## 1. Identify:

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

## 2. Locate:

Where is  $(T_E, \mu_E)$ ?  
At what centrality,  $\sqrt{s_{NN}}$ ?  
critical opalescence  
onset of 1<sup>st</sup> 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:

1<sup>st</sup> order (strong)

2<sup>nd</sup> order (Critical Point, CP)

Cross-over

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

Type of phase transition:

its correlation signature:

Strong 1<sup>st</sup> order QCD phase transition:  
(Pratt, Bertsch, Rischke, Gyulassy)

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

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

non-Gaussian shape  
 $\alpha(\text{Lévy})$  decreases to 0.5

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

hadrons appear from  
a region with  $T > T_c$

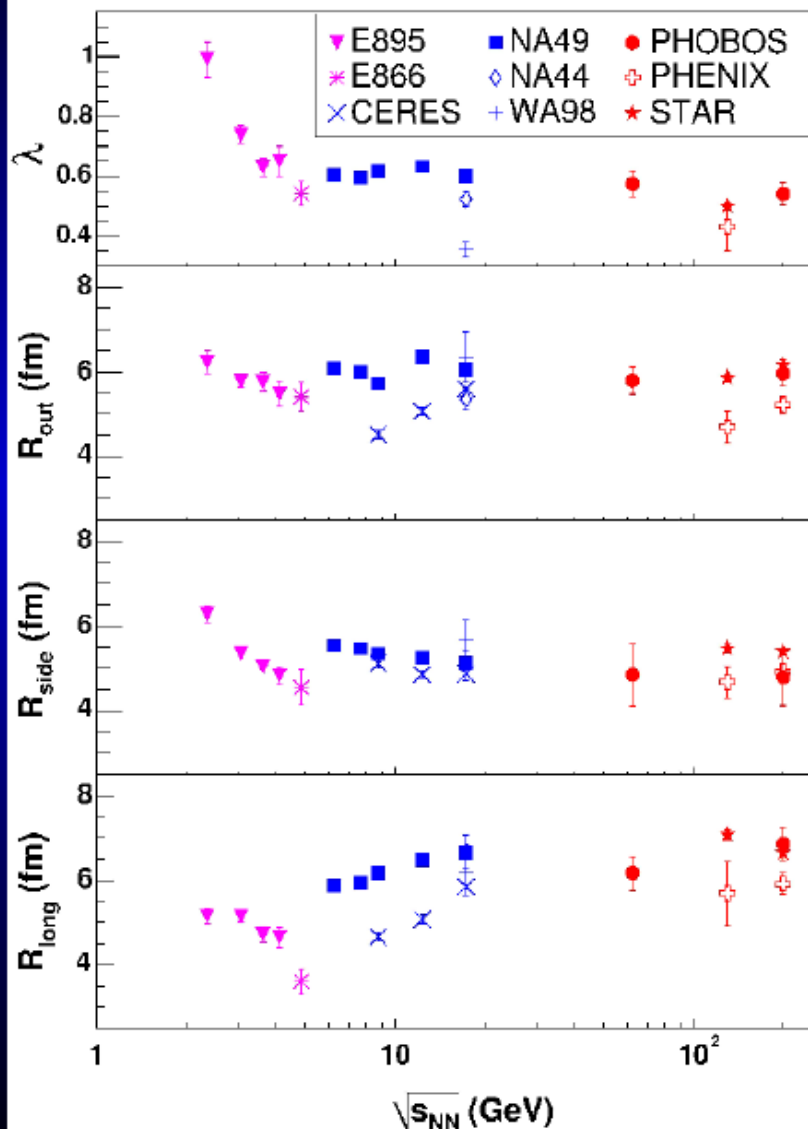
Supercooled QGP (scQGP)  $\rightarrow$  hadrons:  
(T. Cs, L.P. Csernai)

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



# 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

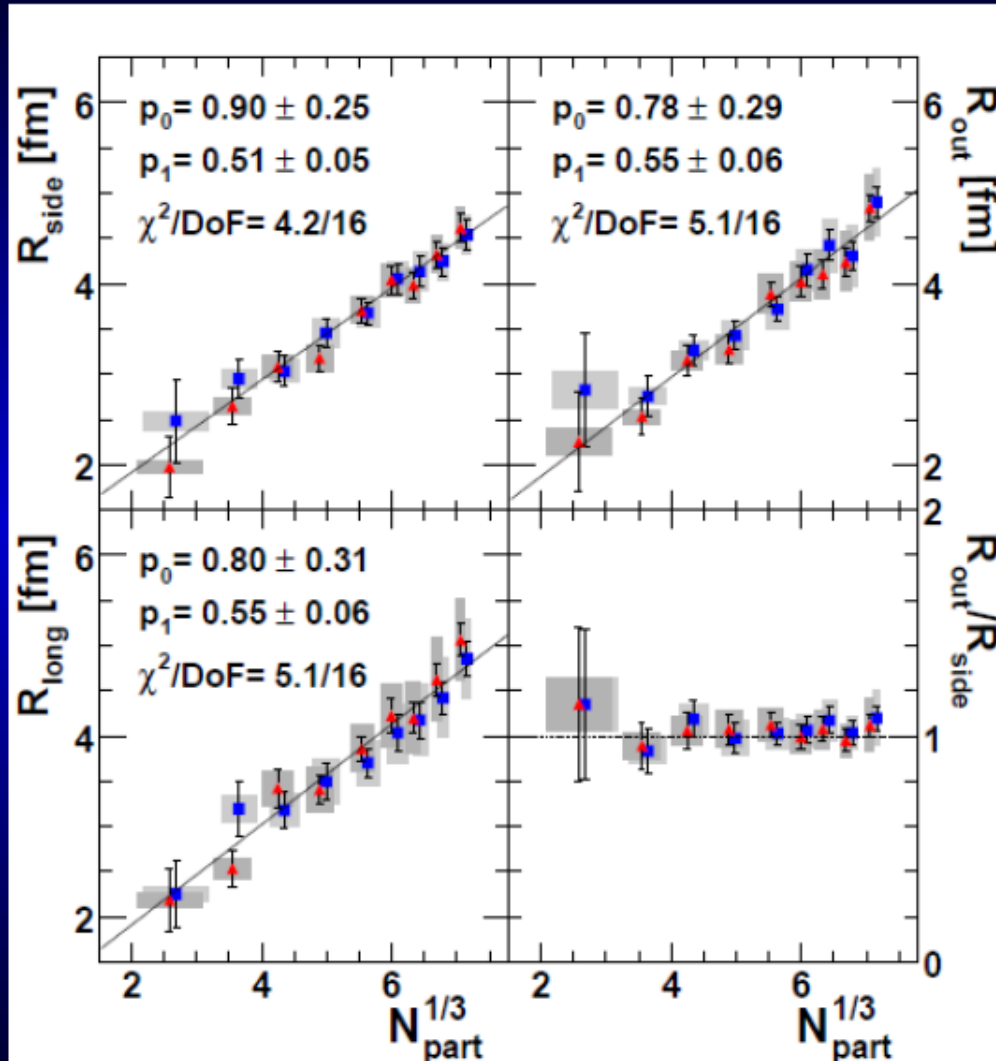
For a second order PT:

check excitation function of  
non-Gaussian parameter  $\alpha$

New analysis /  
new data are needed

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

# Multiplicitás skálázás: HBT sugarak



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

These data extend  $R_{out} \sim R_{side}$   
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  $\alpha$

New analysis and/or  
new data are needed

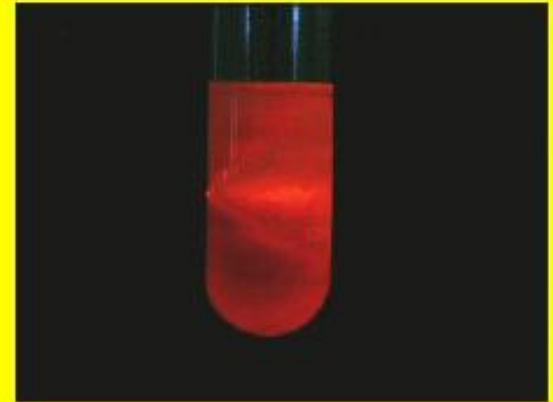
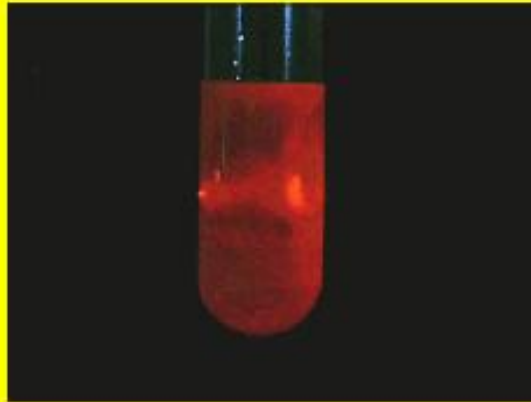
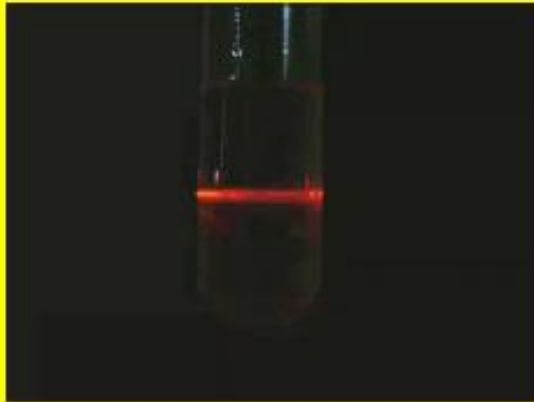
# Kritikus Opaleszcencia

**Critical Opalescence: a laboratory method to observe a 2<sup>nd</sup> order PT**

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

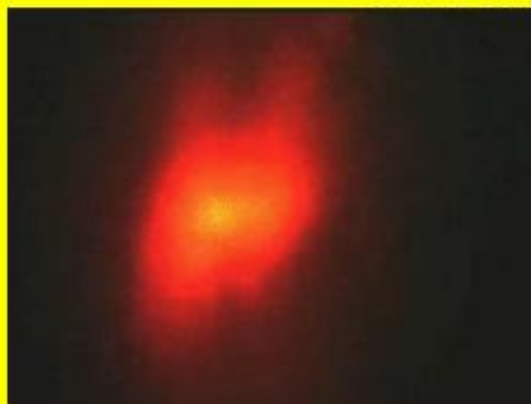
**side view:**

<http://www.msm.cam.ac.uk/doitpoms/tlplib/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!

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


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

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

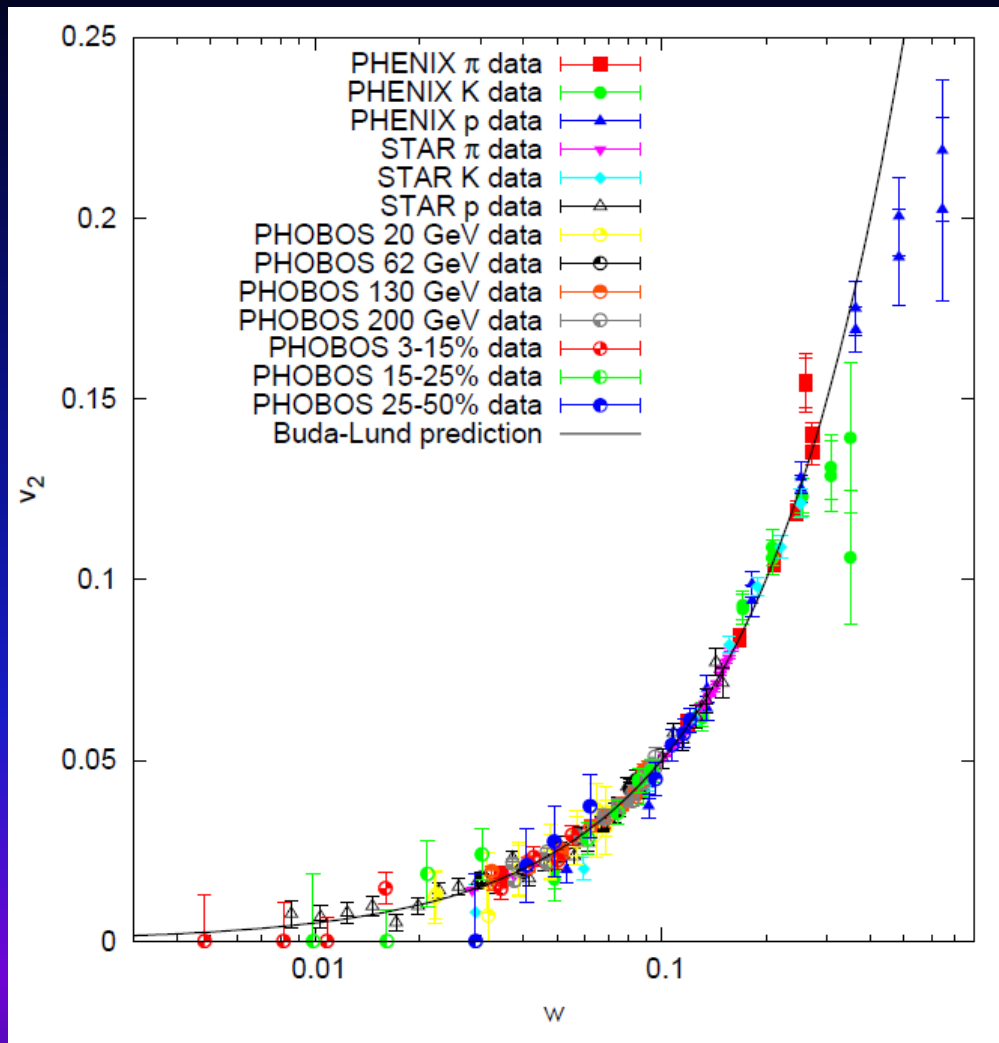
$$R_{AA} = \frac{I(\text{transmitted})}{I(\text{generated})} = \frac{I(\text{measured})}{I(\text{expected})}$$

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

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


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

# Tökéletes folyadék skálaviselkedése



Based on CERN SPS data, from 1994-:

hydro is proposed to explain the observed scaling behaviour:  
spektra,  $v_2$ , HBT

2005-,  
based on RHIC data:

Hydro is the relevant picture

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



# RHIC BES, nem-azonosított v2

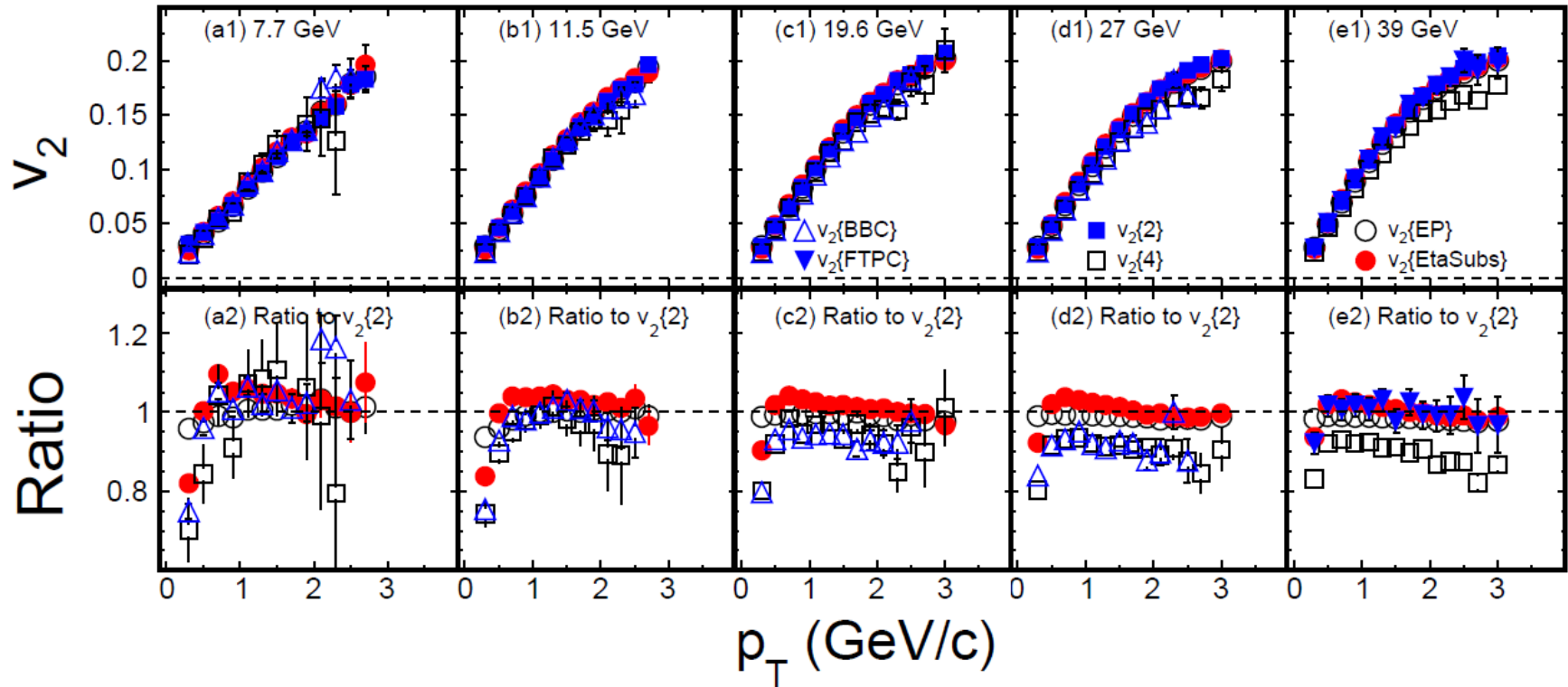
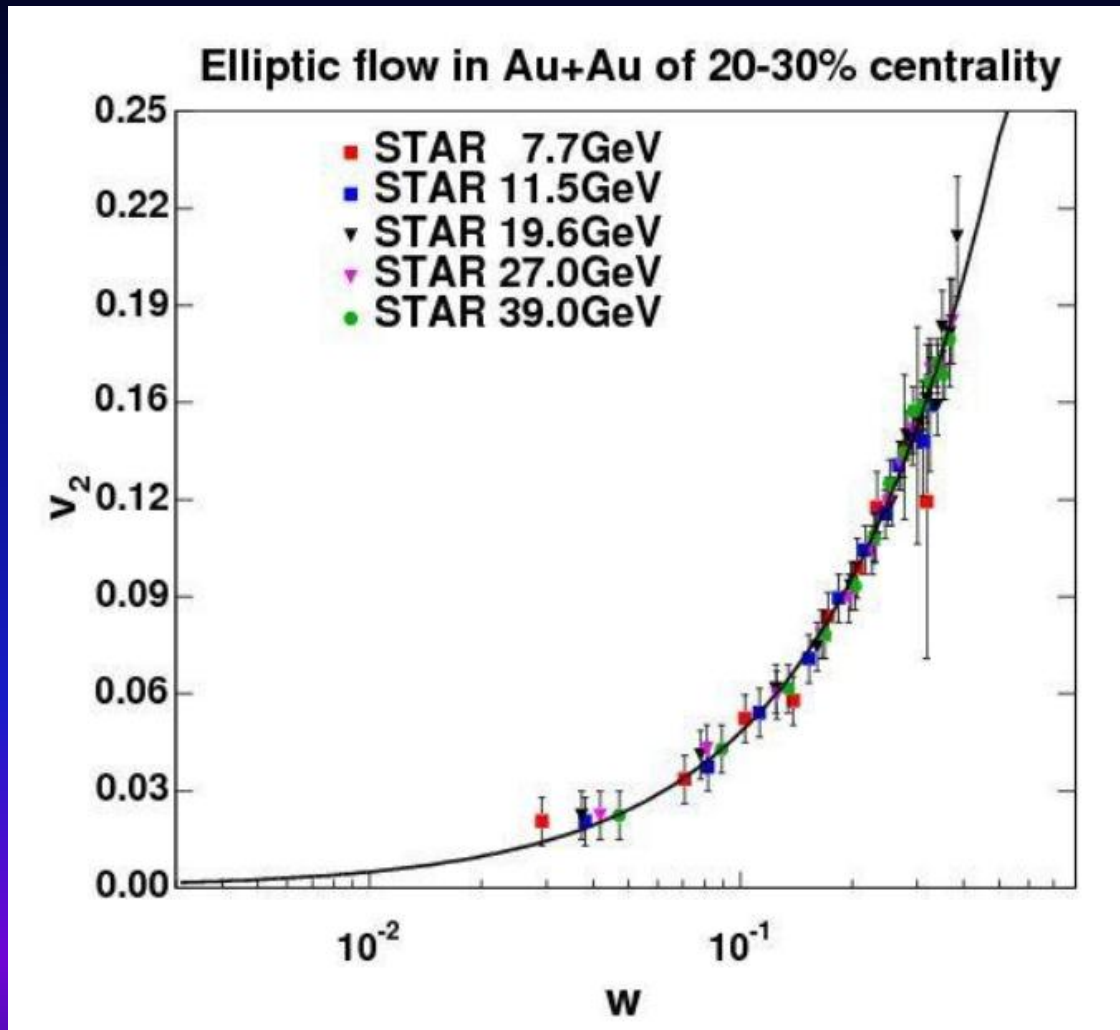


FIG. 5: (Color online) The  $v_2$  as a function of  $p_T$  for 20–30% central Au + Au collisions at midrapidity for  $\sqrt{s_{NN}} = 7.7$  GeV (a1), 11.5 GeV (b1), 19.6 GeV (c1), 27 GeV (d1) and 39 GeV (e1). The top panels show  $v_2$  vs.  $p_T$  using various methods as labeled in the figure and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

BES = Beam Energy Scan. Data from STAR, nucl-ex/1206.5528

# 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 (?)

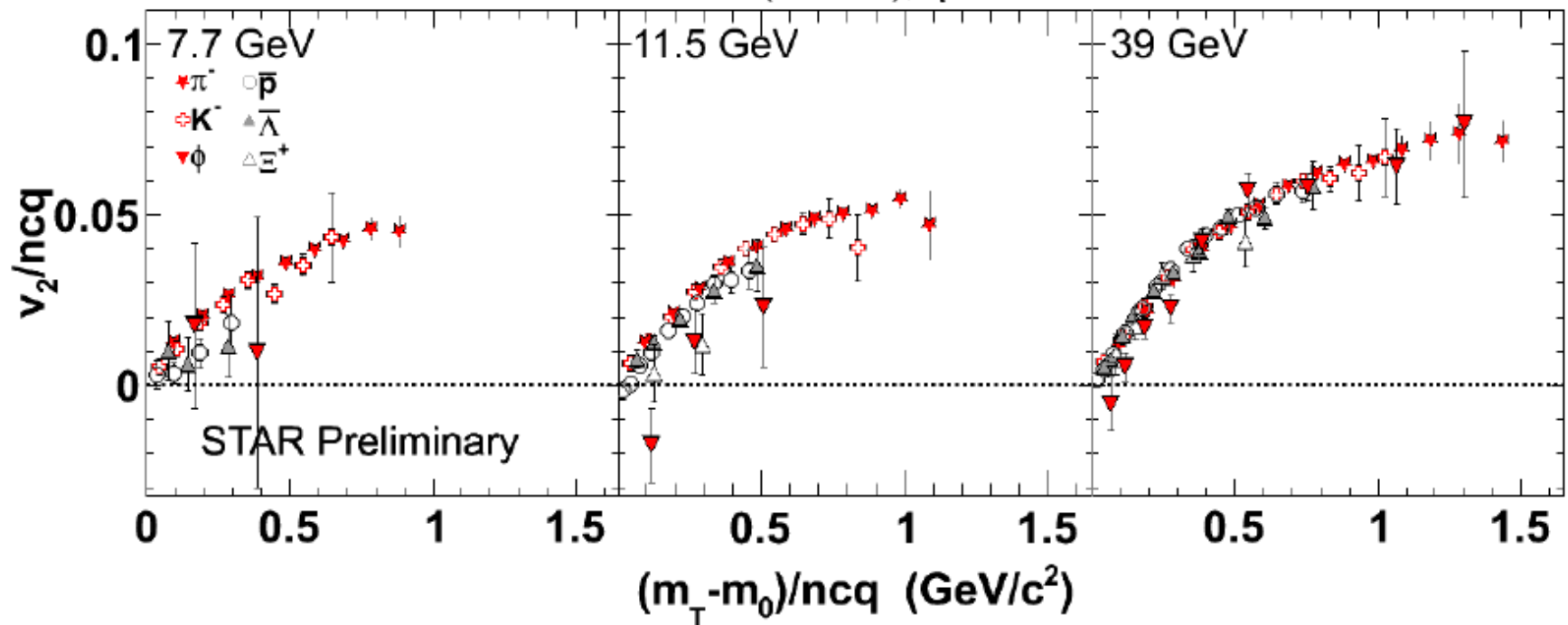
What about  
identified particle  
 $v_2$ ?

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 $v_2$

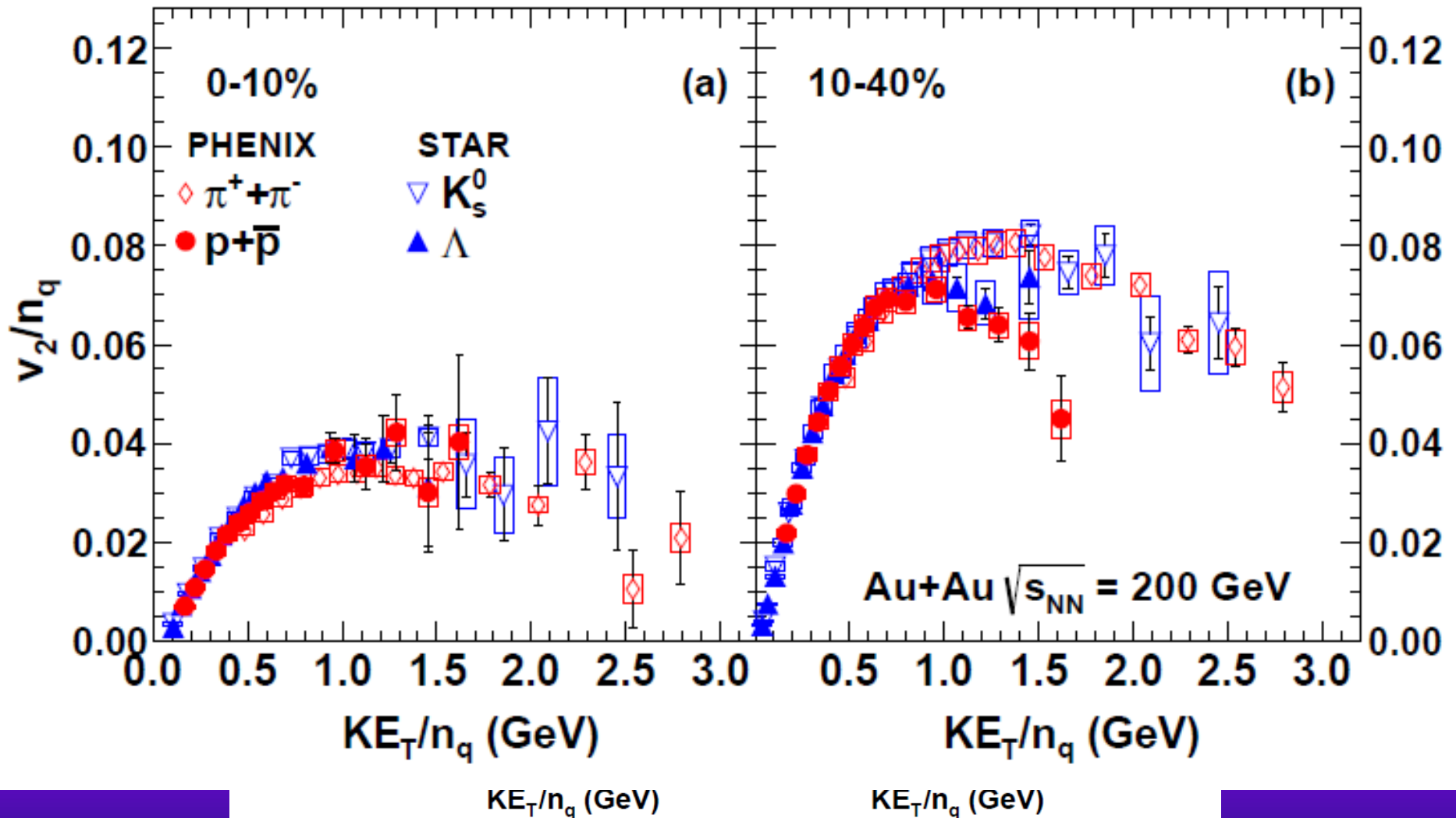
STAR CPOD 2011/QM2011

Au+Au (0-80%),  $\eta$ -sub EP



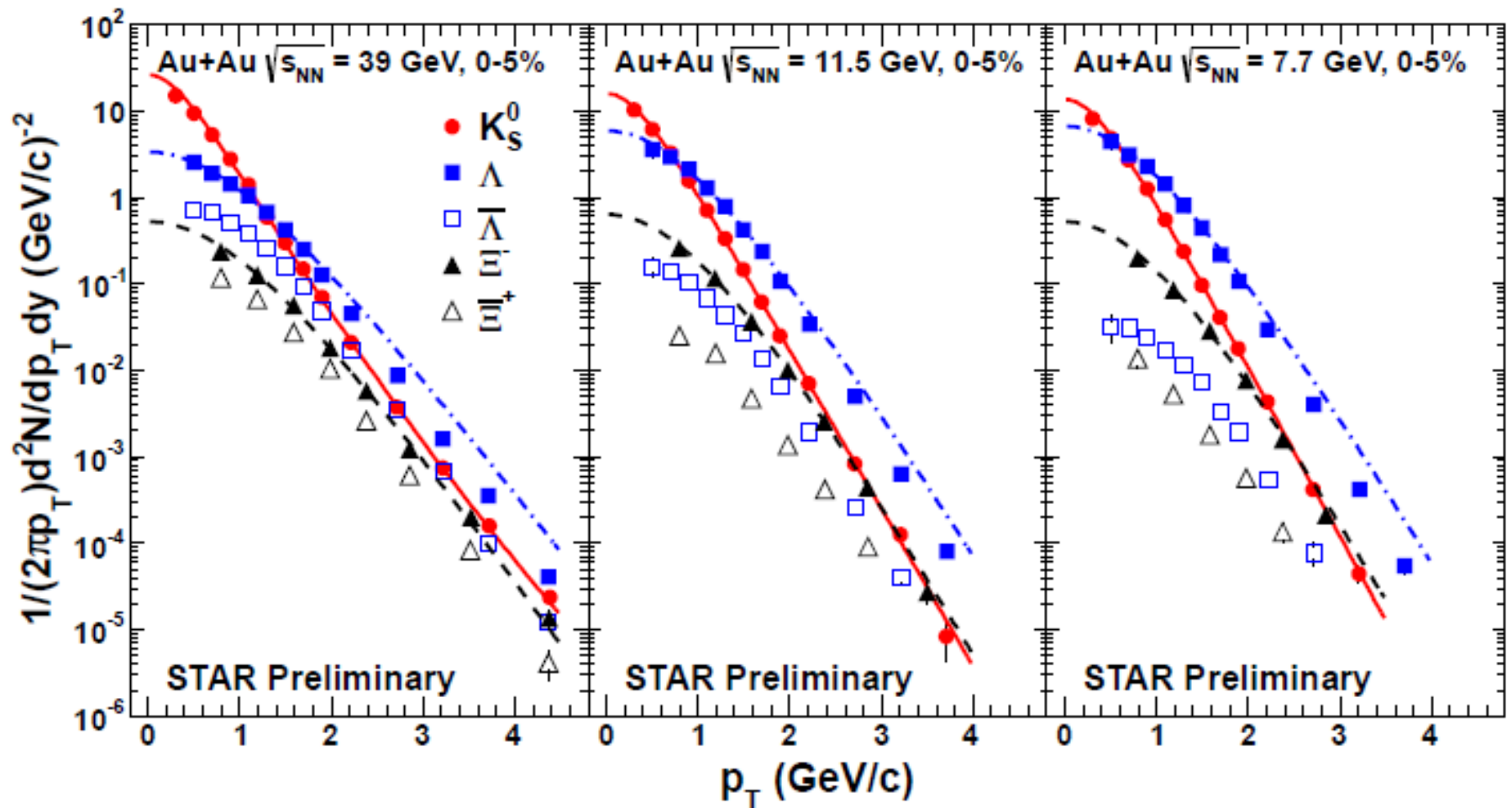
- Number-of-Constituent Quark scaling holds at 39 GeV, looks different at 7.7 and 11.5 GeV compared to particles
- $\phi$ -mesons show different trend, but no statistics at high  $m_T$

# A $v_2 n_q$ skálázása 200 GeV-en



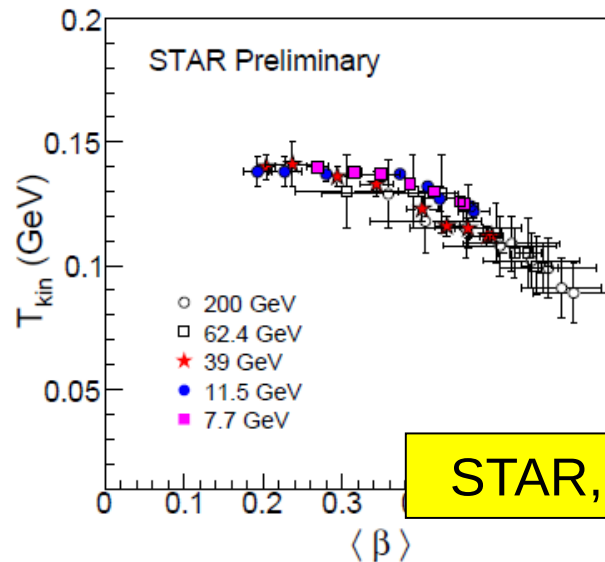
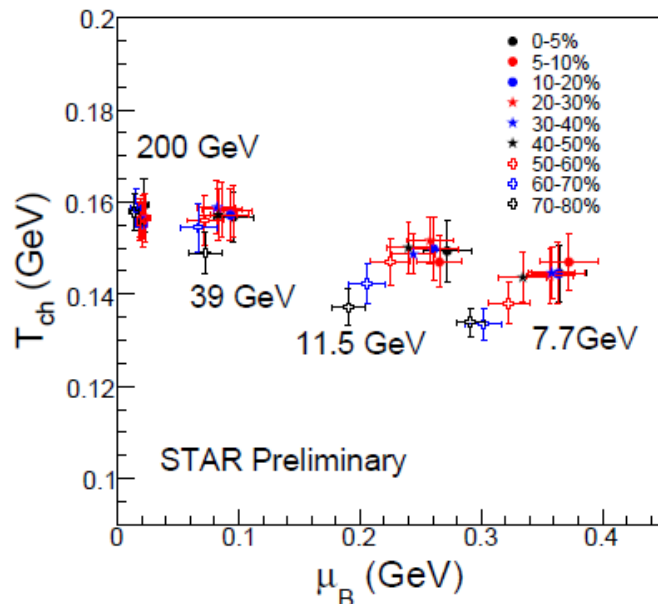
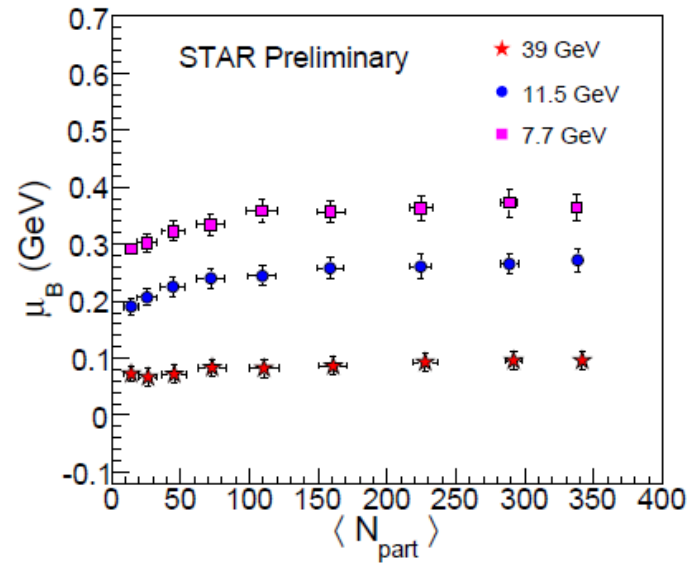
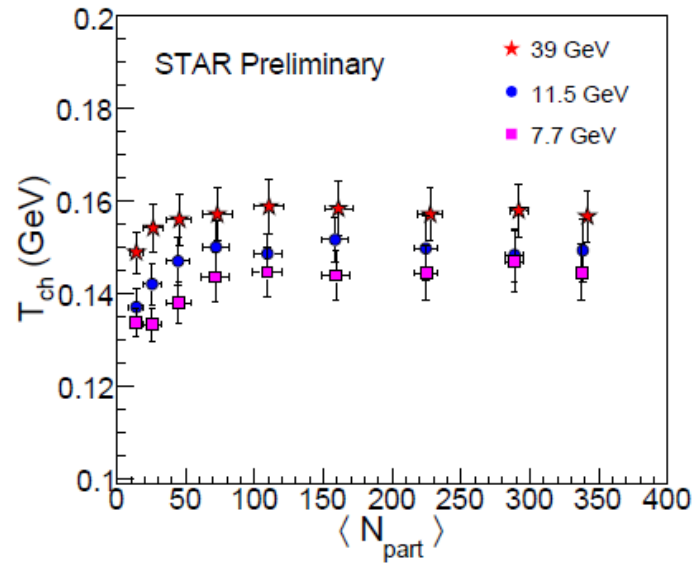
PHENIX Au+Au 200 GeV, nucl-ex/1203.2644: scaling violations from 10% up  
Radial flow effect?

# RHIC BES, azonosított r. spektrum



STAR, nucl-ex/1203.5183 : spectra look like hydro /BL

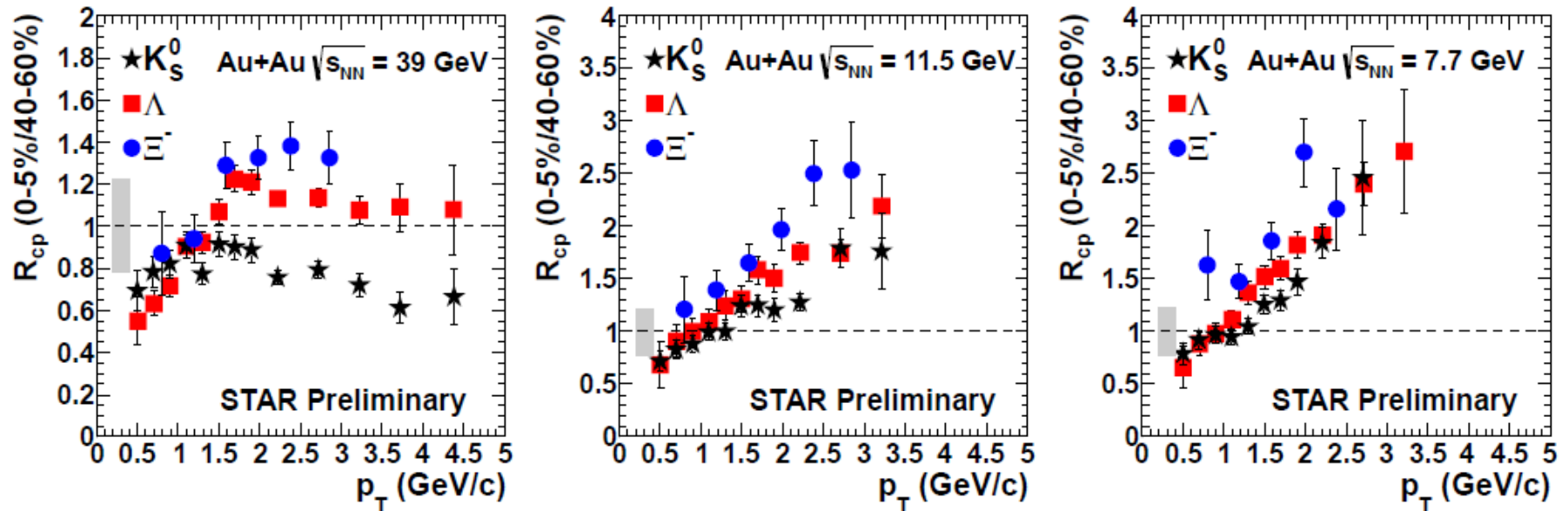
# RHIC BES + centralitás, kifagyás



STAR, nucl-ex/1201.4203



# RHIC BES, azonosított részecske $R_{cp}$



STAR, nucl-ex/1203.5182 :  $R_{cp}$  sets on at  $\sim 39$  GeV

Is this an sQGP or a radial flow effect?

## 2. rész összefoglalása

Tökéletes folyadék  $\neq$  sQGP

Univerzális  $v_2$  skálázás  $\neq$   $v_2$  nq skálázás

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

RAA  $< 1$  és  $v_2$  nq skálázása  
Ugyanannál a  $\sqrt{s}$ -nél kezdődik-e?

QCD CEP:

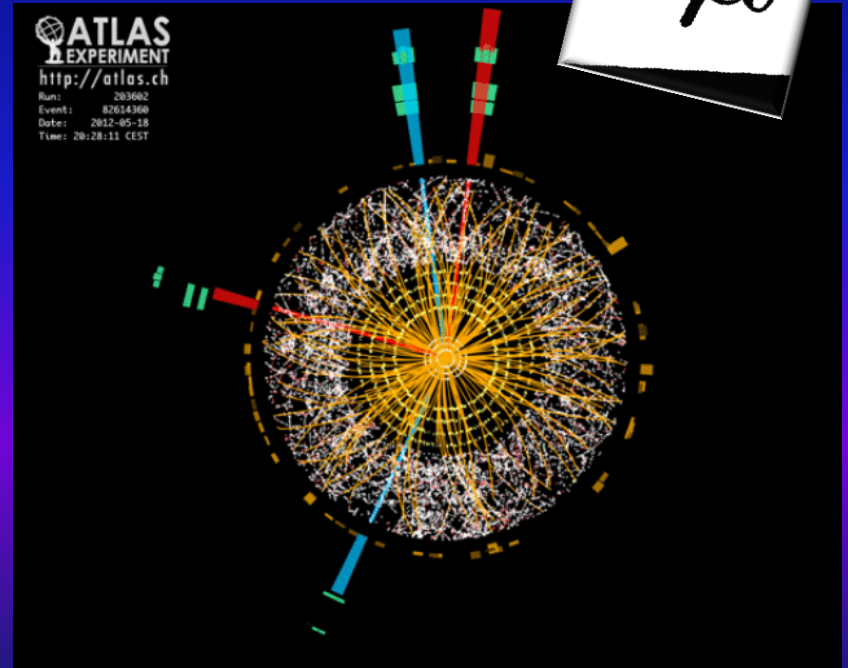
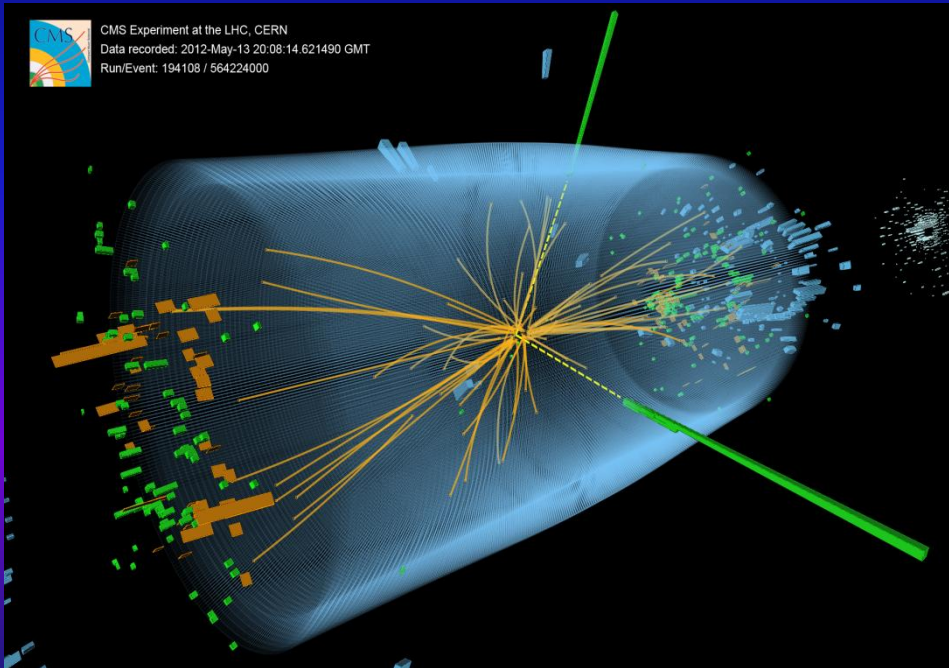
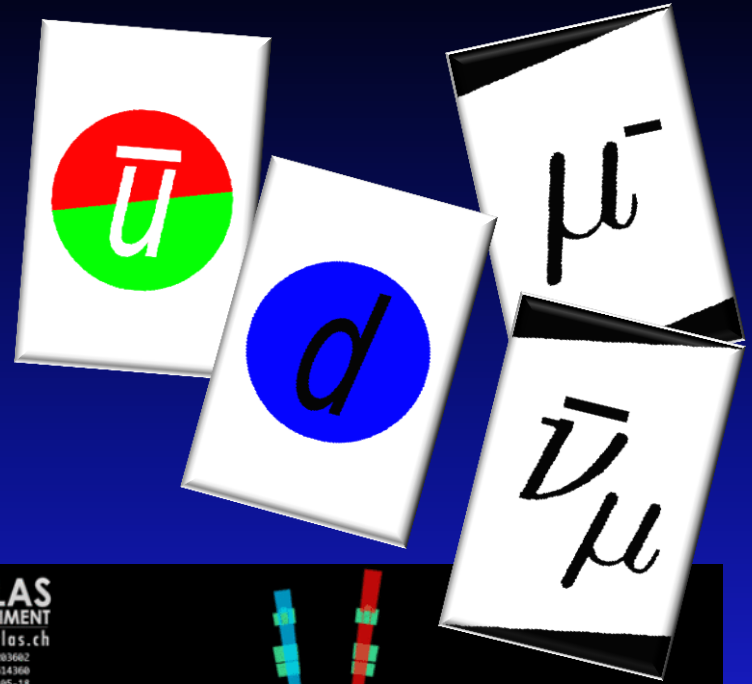
Kísérleti kutatás megkezdődött  
**Energiavesztés /egységnyi hossz**

Keressünk:

**Kritikus opaleszcenciát**  
**Kritikus exponenseket**

# 3. rész:

## HOGYAN CSINÁLJUNK JÁTÉKBÓL HIGGS BOZONT?



# ELEMI RÉSZECSKÉK

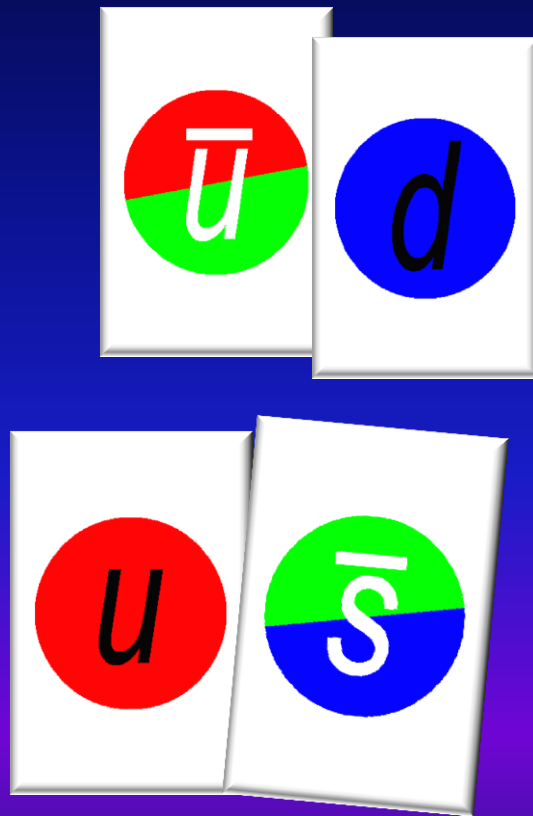
# - JÁTÉKOSAN

|                                                         |                                                       |                                                                 |                                                                                |
|---------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| Fermions                                                |                                                       |                                                                 |                                                                                |
| Quarks                                                  | $2\frac{1}{2}$<br>$\frac{2}{3}$<br>$\frac{1}{2}$<br>  | 1.27 GeV<br>$\frac{2}{3}$<br>$\frac{1}{2}$<br><b>c</b><br>charm | 171.2 GeV<br>$\frac{2}{3}$<br>$\frac{1}{2}$<br><b>t</b><br>top                 |
|                                                         | $4\frac{1}{2}$<br>$-\frac{1}{3}$<br>$\frac{1}{2}$<br> |                                                                 | 4.2 GeV<br>$-\frac{1}{3}$<br>$\frac{1}{2}$<br><b>b</b><br>bottom               |
|                                                         | $0\frac{1}{2}$<br>$0$<br>$\frac{1}{2}$<br>            | $0\frac{1}{2}$<br>$0$<br>$\frac{1}{2}$<br>                      | $0\frac{1}{2}$<br>$0$<br>$\frac{1}{2}$<br><b>ν<sub>τ</sub></b><br>tau neutrino |
| Leptons                                                 | $0\frac{1}{2}$<br>$0$<br>$\frac{1}{2}$<br>            | $0\frac{1}{2}$<br>$0$<br>$\frac{1}{2}$<br>                      | $0\frac{1}{2}$<br>$0$<br>$\frac{1}{2}$<br><b>τ</b><br>tau                      |
| Bosons (Forces)                                         |                                                       |                                                                 |                                                                                |
| $0$<br>$0$<br>$1$<br><b>γ</b><br>photon                 |                                                       |                                                                 |                                                                                |
| $0$<br>$0$<br>$1$<br><b>g</b><br>gluon                  |                                                       |                                                                 |                                                                                |
| $0$<br>$0$<br>$1$<br><b>Z</b><br>weak force             |                                                       |                                                                 |                                                                                |
| $0$<br>$0$<br>$1$<br><b>W<sup>±</sup></b><br>weak force |                                                       |                                                                 |                                                                                |

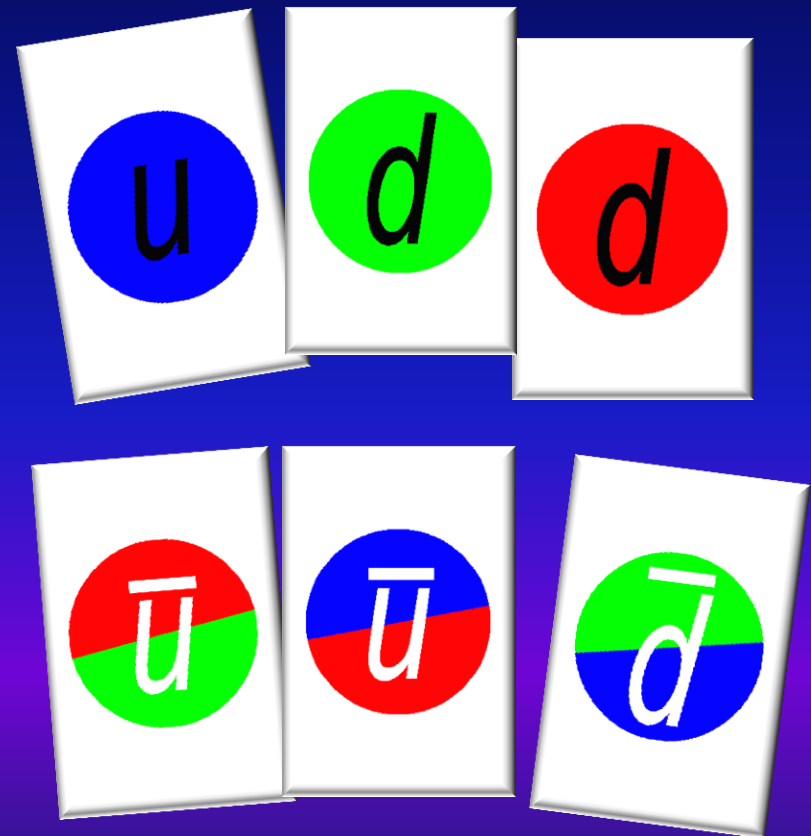


# SU(3) SZÍN ÉS OPTIKAI SZÍN

Mezonok



(Anti)Barionok



# RÉSZECSKÉS KÁRTYAJÁTÉK

**66 kártyalap, 6 játék:**

**Első 4 játék: e-könyvként, majd  
könyvszettként, kártyalapokkal**

<http://www.lulu.com/>

„Meet the Scientist” [nyitóelőadás és bemutató](#), magánkiadás

- ANTI
- Detektáljunk!
- Kvarkanyag
- Kozmikus záporok

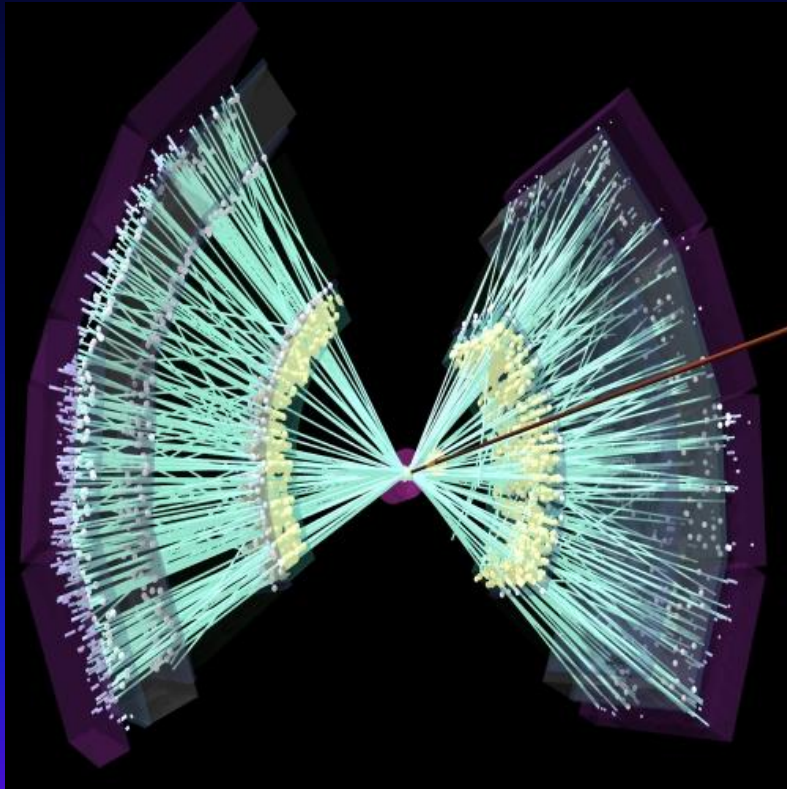
**Két új: Zimányi Nehézionfizikai  
Téli Iskola, 2012 december**

- Kvarkanyag Memória
- Játékból Higgs bozont!



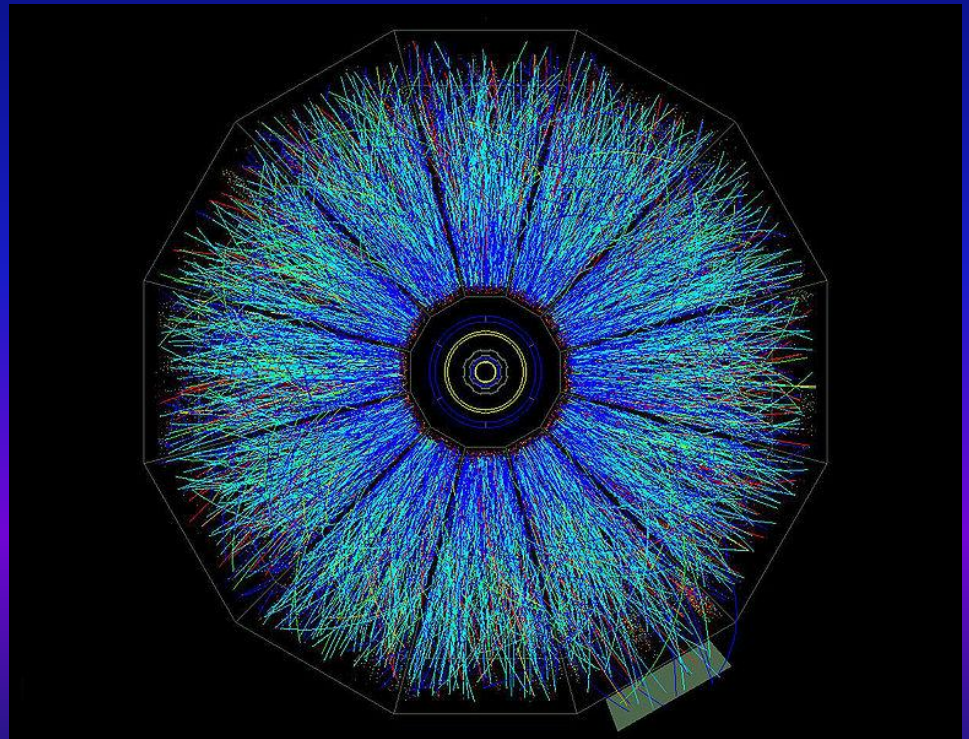


# KVARKANYAG - KÍSÉRLETILEG

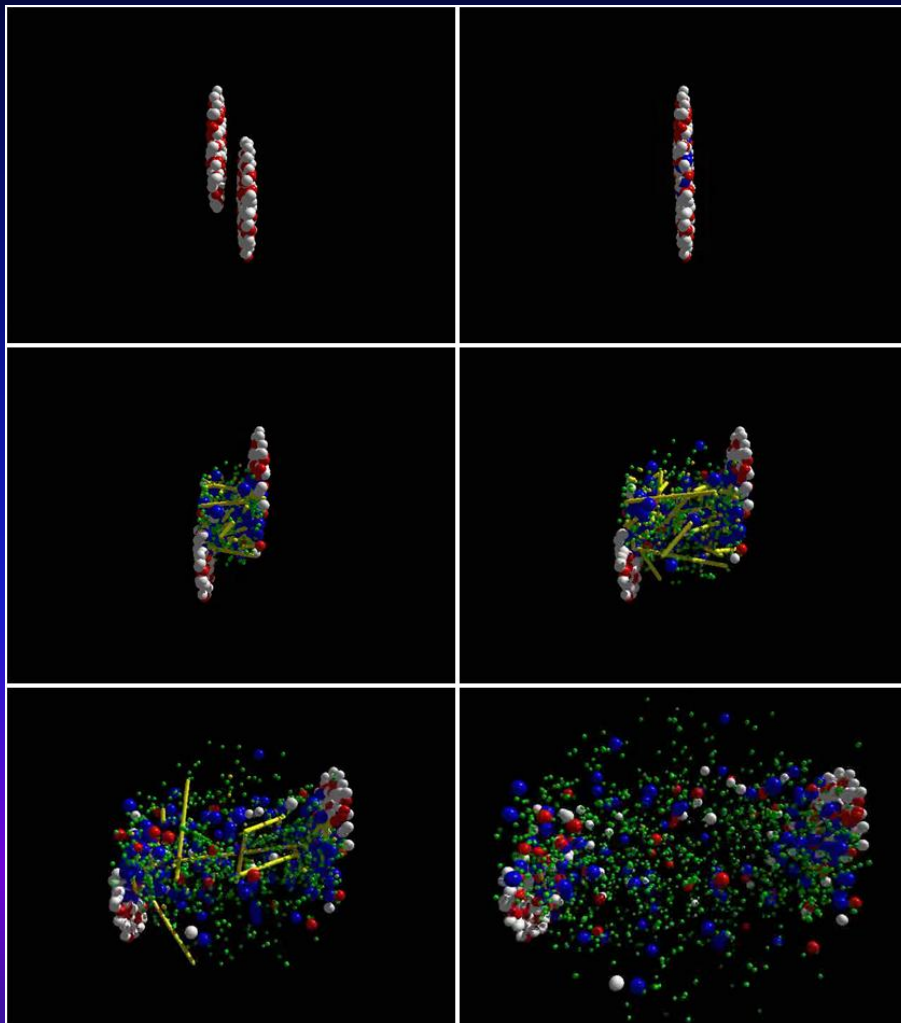


A tökéletes kvarkfolyadék, az sQGP tulajdonságait megerősítette és további részletekkel gazdagította a CERH LHC ALICE, ALTAS és CMS kísérlete.

A kvarkok tökéletes folyadékát, angol rövidítésével az sQGP-t az USA Brookhaveni Nemzeti Laboratóriumában a PHENIX és a STAR kísérletben fedezték fel a RHIC (Relativistic Heavy Ion Collider) gyorsítóban.

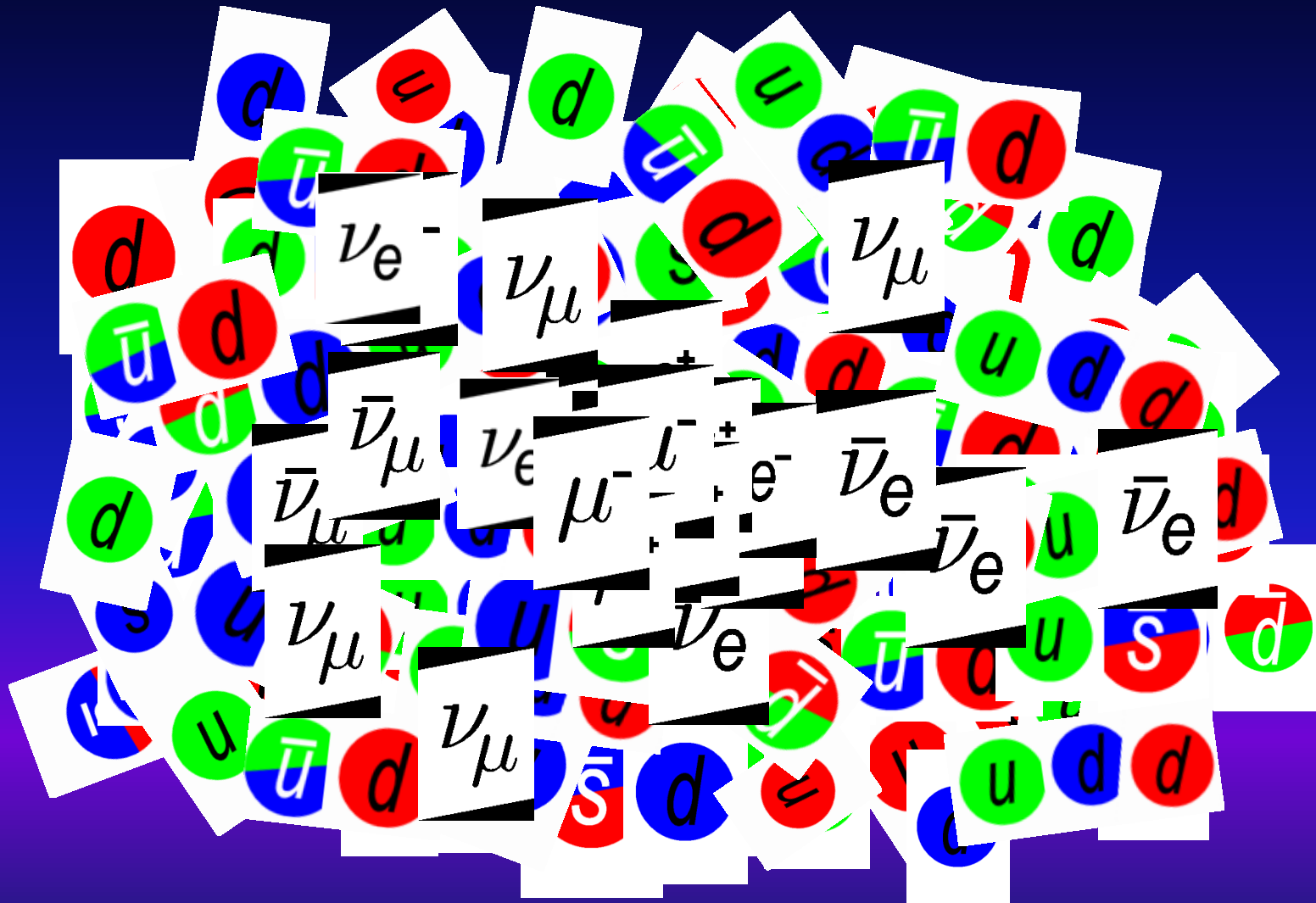


# KVARKANYAG - ELMÉLETILEG



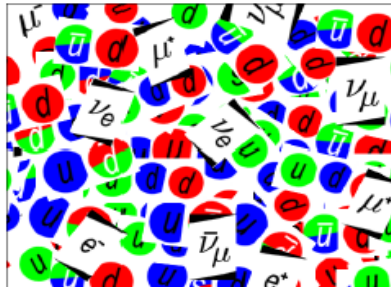
A RHIC Au+Au ütközéseinek elméleti leírása. Nagy energiás nehézion-ütközésekben erősen kölcsönható **kvark-gluon plazma** jön létre, meglepő tulajdonságokkal: a kvarkok tökéletes folyadékának tulajdonságait az USA Relativisztikus Nehézion Ütköztető (RHIC) gyorsítójának kísérletei tárták fel a Brookhaveni Nemzeti Laboratóriumban. Az eredményeket megerősítették, és további részletekkel gazdagították a CERN LHC ALICE, ATLAS és CMS kísérletei.

# KVARKANYAG - JÁTÉKOSAN



# RÉSZECSKÉS KÁRTYAJÁTÉK

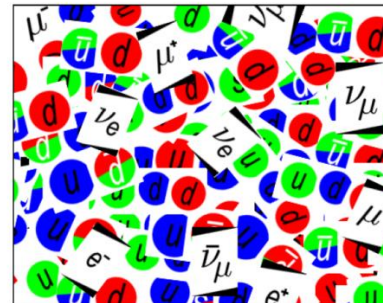
ELEMI RÉSZECSKÉK JÁTÉKOSAN



Csörgő Judit  
Török Csaba  
Csörgő Tamás

# QUARK MATTER CARD GAME

ELEMENTARY PARTICLES ON YOUR OWN



Judit Csörgő  
Csaba Török  
Tamás Csörgő



# NEMZETKÖZI FIGYELEM, NÉHÁNY PÉLDA

## SUBATOMIC SHUFFLE

Prefer particle physics to poker? Pick up a deck of the Quark Matter Card both. Instead of kings and queens, the cards feature quarks (up, down, and trons, and their neutrinos; and antiparticles for all.

Hungarian high school students Csaba Török and Judit Csörgő, daughter of father, Tamás, a physicist at the KFKI Research Institute for Particle Budapest. The simplest game is "Anti," in which players quickly identify combinations, bearing in mind a quantum-mechanical property called color of the card. It's an abstract concept, but "even children who cannot Tamás says. For adult players, he recommends "Quark Matter," which piled to represent the quark-gluon plasmas physicists cook up at Brookha



2011.01.04.

Quark Matter at RHIC: It's in the Cards

## @brookhavenToday Story Archives

### Quark Matter at RHIC: It's in the Cards

#### Students and RHIC physicist develop quark-gluon plasma card game

By Karen McNulty Walsh | January 4, 2011

Happy New Year! Like the sprays of confetti and streamers exploding in Times Square at midnight on December 31, millions of subatomic particles will soon be streaming from heavy ion collisions at RHIC, Brookhaven Lab's Relativistic Heavy Ion Collider.

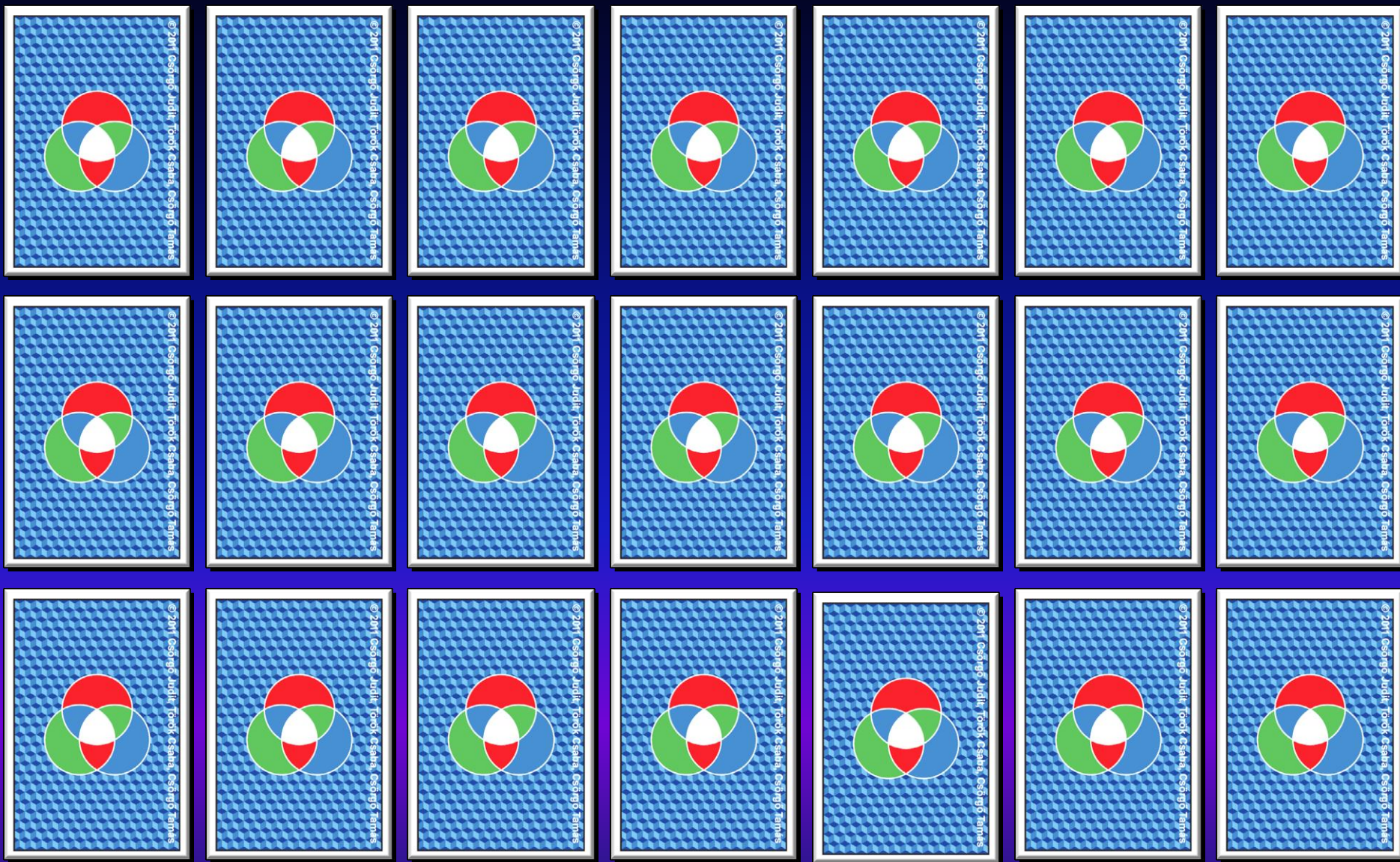
Linking subatomic particles with New Year's Eve celebrations may not be so strange: Two years ago, a group of Hungarian secondary school students rang in the New Year while playing with particles, literally. The group, which included Judit Csörgő, daughter of RHIC/PHENIX collaborator Tamás Csörgő, and her friend Csaba Török, were at a New Year's celebration, playing with the first edition of a set of cards invented by Csaba as an entertaining way to learn about subatomic particles and their interactions. The game, more formally developed and tested by the students with mentoring help from Tamás, won an honorable mention in a 2010 Hungarian competition for junior innovators. It is now available for purchase as an e-book, with cards included, on Lulu, currently with Hungarian directions. An English version is in the works.



RHIC/PHENIX collaborator Tamás Csörgő, Csaba Török and Judit Csörgő with their card game at the exhibition in the "Palace of Wonders" after the ceremony of the 19th Hungarian National Contest for Junior Innovators and Scientist (Budapest, Hungary, June 10, 2010).

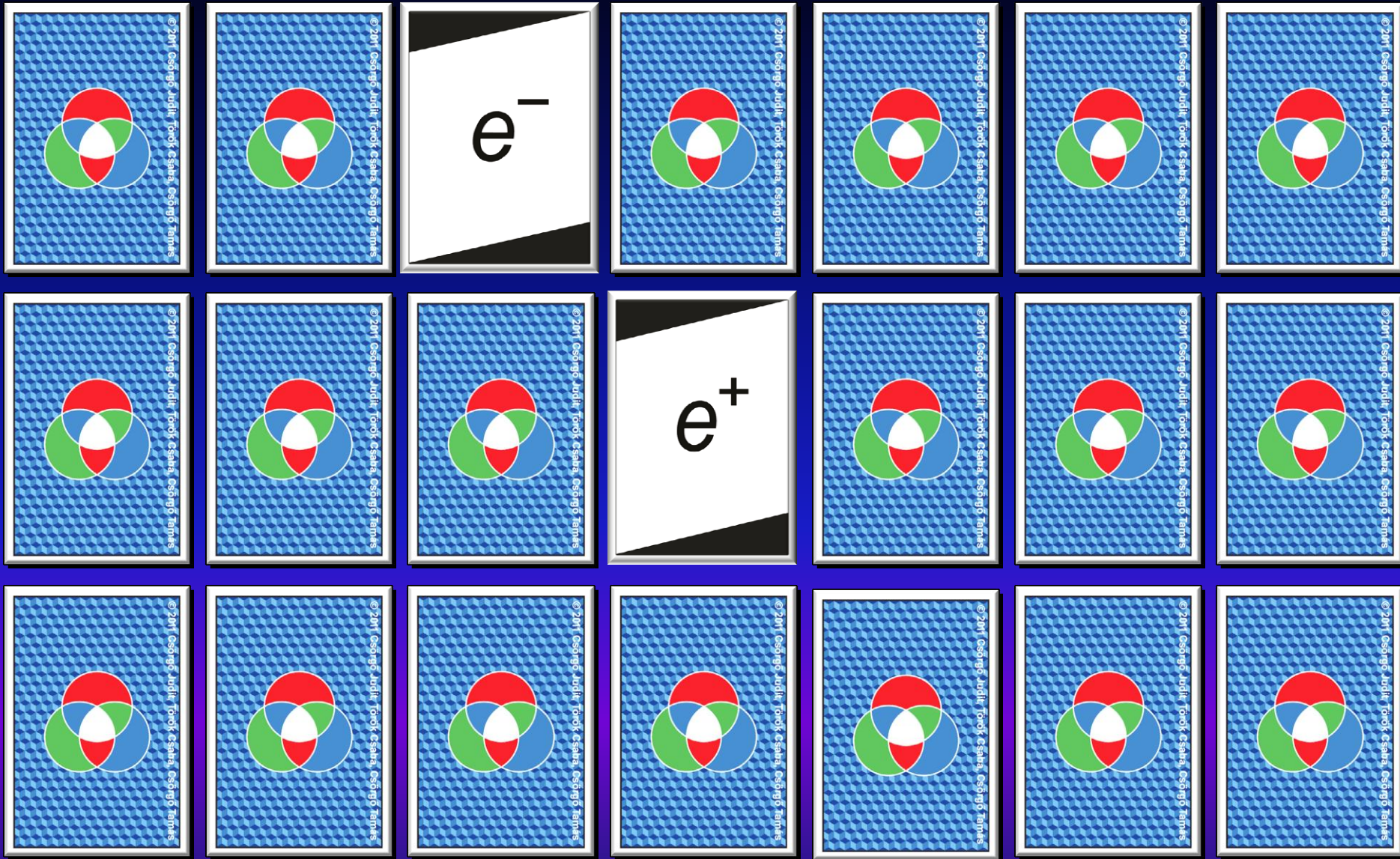
ncemag.org **SCIENCE** VOL 331 14 JANUARY 2011  
Published by AAAS

# A KVARKANYAG MEMÓRIÁJA

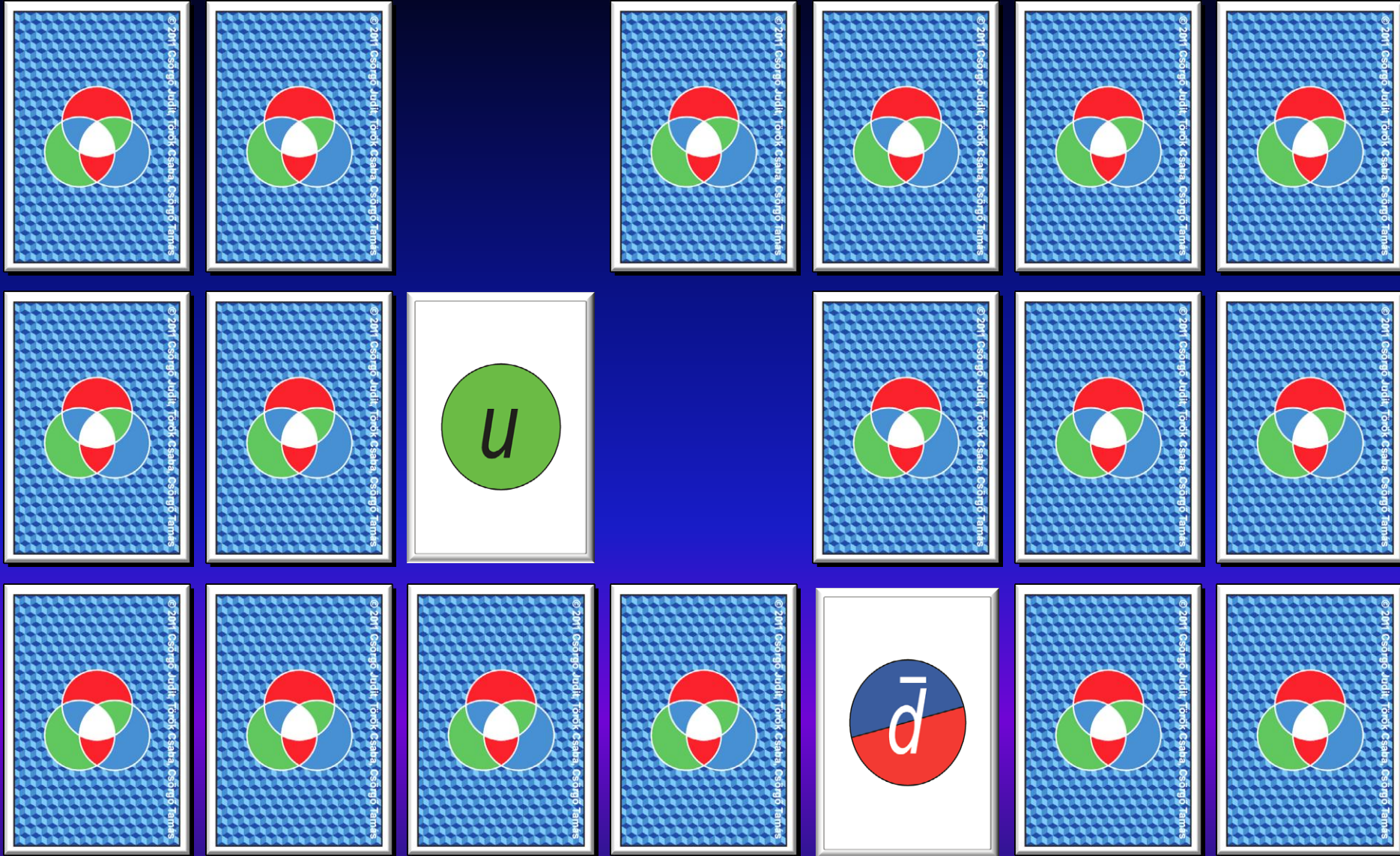




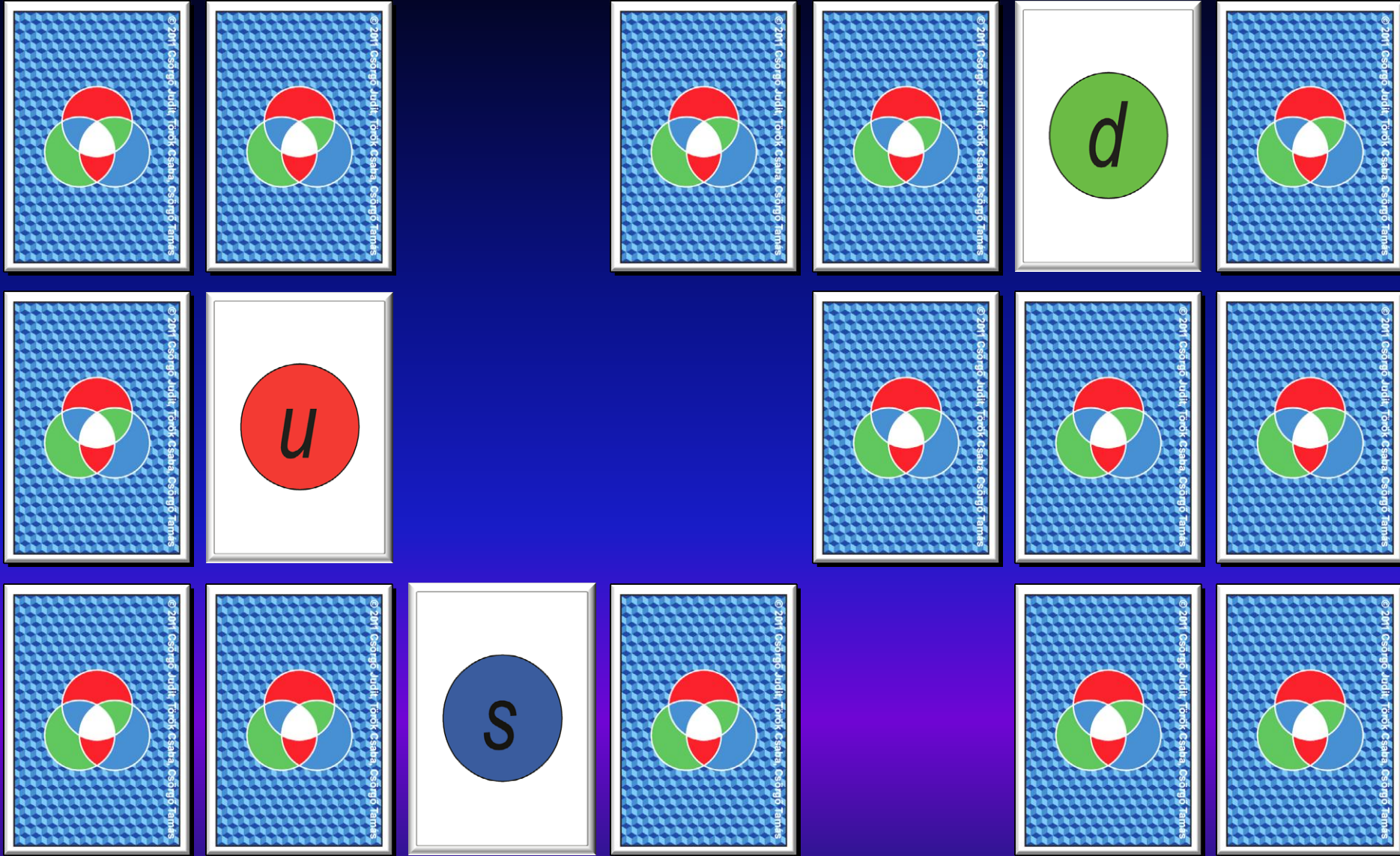
# A KVARKANYAG MEMÓRIÁJA - LEPTONPÁR



# A KVARKANYAG MEMÓRIÁJA - EGY MEZON

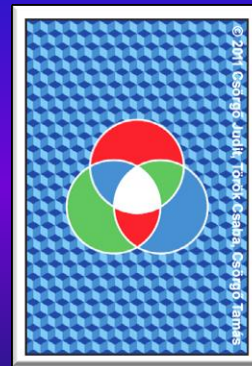
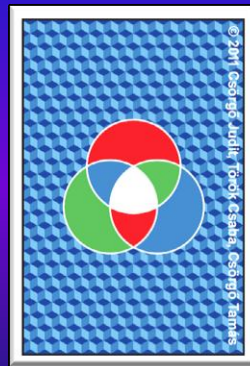
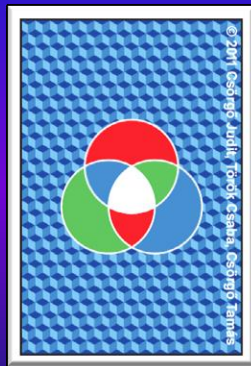
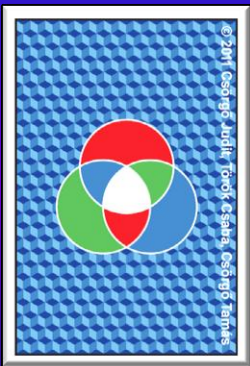
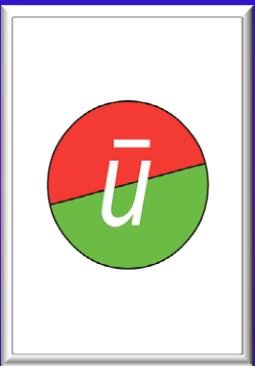
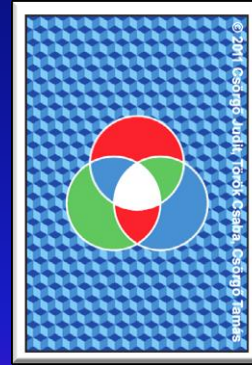
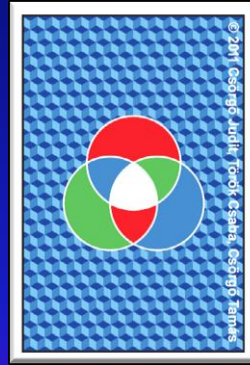
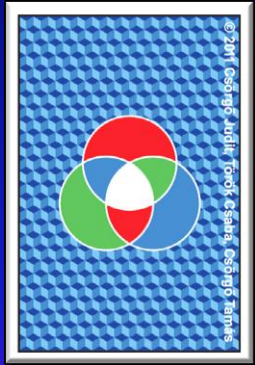
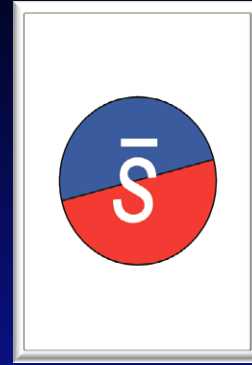
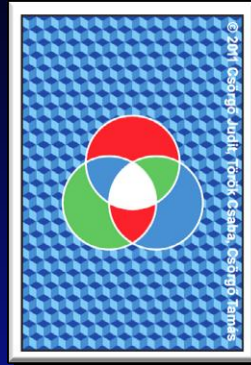
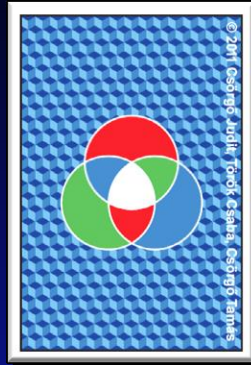
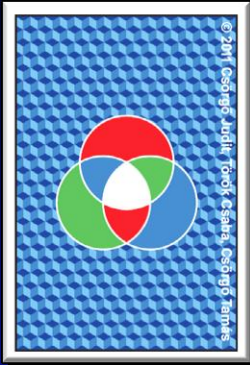
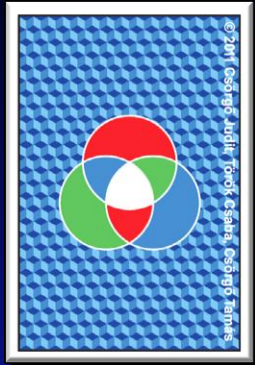


# A KVARKANYAG MEMÓRIÁJA - EGY BARION

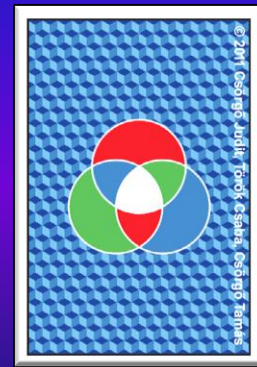
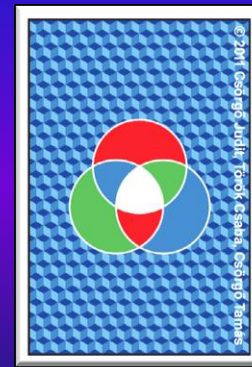
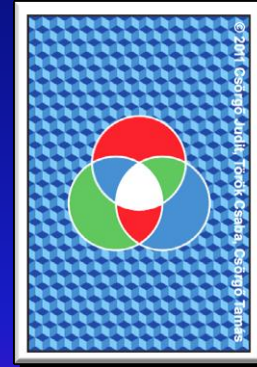
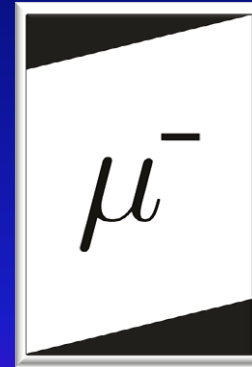
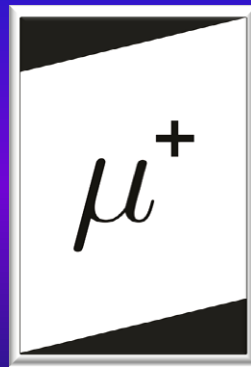
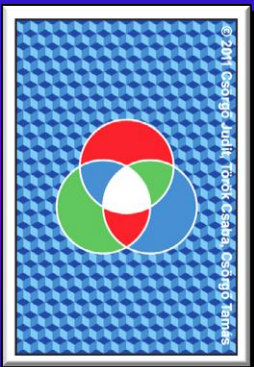
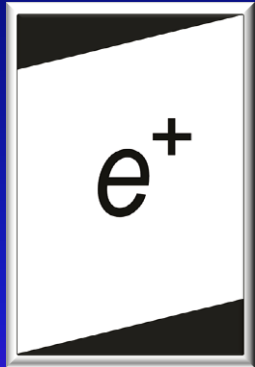
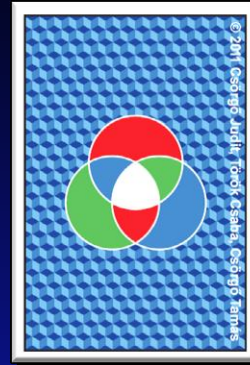
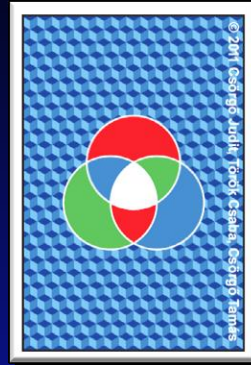
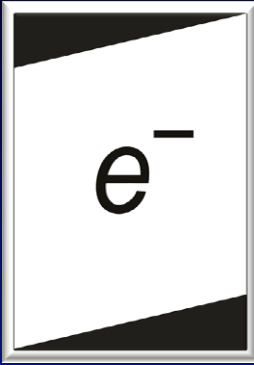
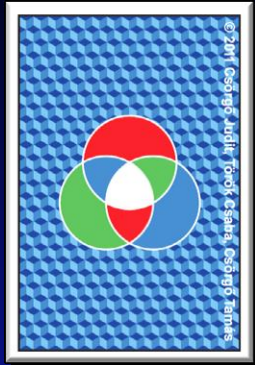




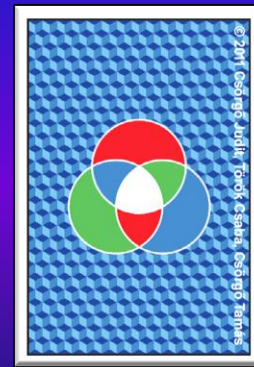
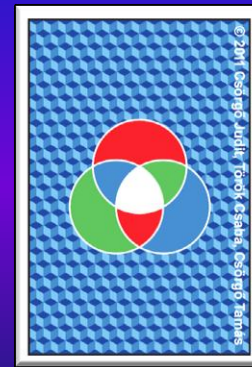
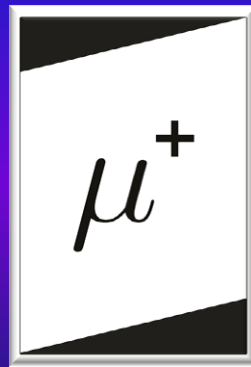
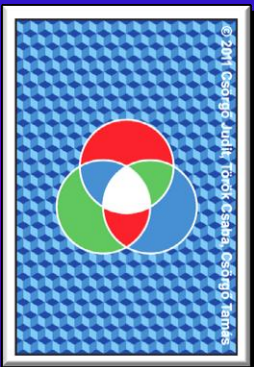
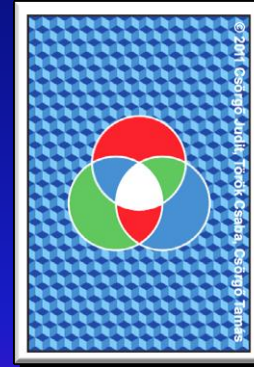
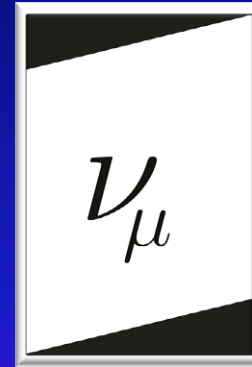
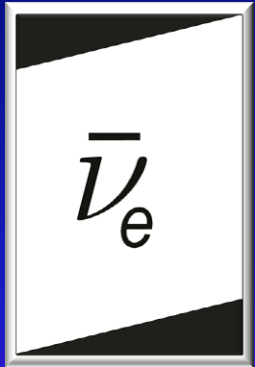
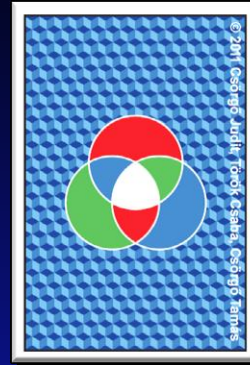
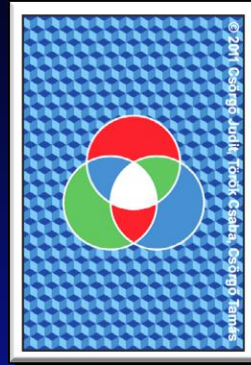
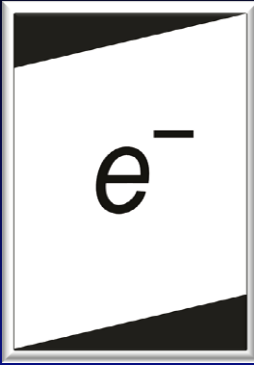
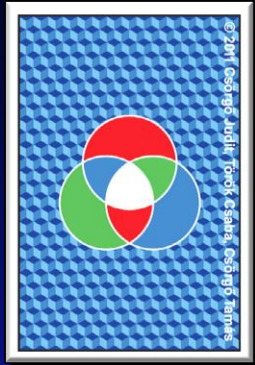
# A KVARKANYAG MEMÓRIÁJA - ANTIBARION



# JÁTÉKOS HIGGS-BOZONT: $H^0 \rightarrow Z^0 Z^0 \rightarrow \ell^+ \ell^- \ell^+ \ell^-$



# JÁTÉKOS HIGGS BOZONT: $H^0 \rightarrow W^+W^- \rightarrow \ell^+\nu \ell \nu$





## ÖSSZEFOGLALÁS – 3. rész

## E-könyv, először magyar nyelven

## 2. magyar és angol kiadás ...

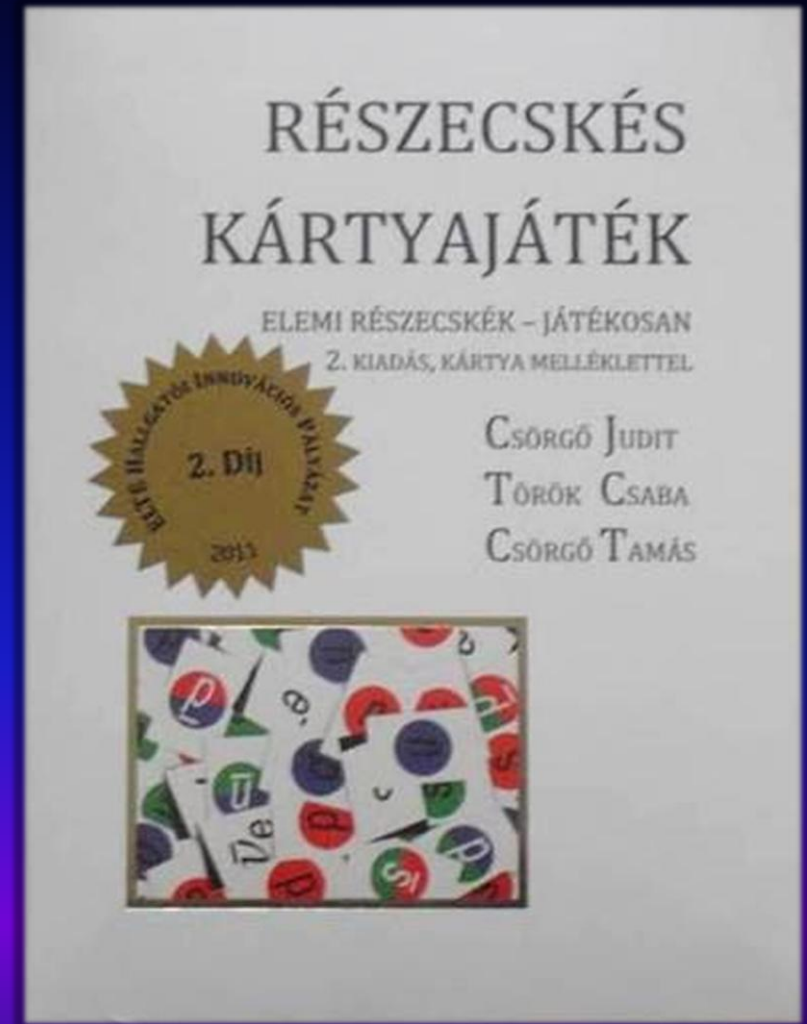
## Most hozzáadva 2 új játék:

- ## 1) Kvarkanyag Memóriája

- ## 2) Játékból Higgs-bozont?

<http://zimanyischool.kfki.hu/12/>

# Köszönöm a figyelmet!



# Köszönet: BNL, CERN, DOE, Fulbright, HAESF, MTA, NSF, OTKA, PHENIX-Hu, TOTEM-Hu ...!

Universidade de São Paulo, Instituto de Física, Caixa Postal 66318, São Paulo CEP05315-970, Brazil

Institute of Physics, Academia Sinica, Taipei 11529, Taiwan

China Institute of Atomic Energy (CIAE), Beijing, People's Republic of China

Peking University, Beijing, People's Republic of China

Charles University, Ovocnytrh 5, Praha 1, 116 36, Prague, Czech Republic

Czech Technical University, Zikova 4, 166 36 Prague 6, Czech Republic

Institute of Physics, Academy of Sciences of the Czech Republic, Na Slovance 2,  
182 21 Prague 8, Czech Republic

Helsinki Institute of Physics and University of Jyväskylä, P.O.Box 35, FI-00014 Jyväskylä, Finland

Deppia, CEA Saclay, F-91191, Gif-sur-Yvette, France

Laboratoire Leprince-Ringuet, Ecole Polytechnique, CNRS-IN2P3, Route de Saclay,  
F-91128, Palaiseau, France

Laboratoire de Physique Corpusculaire (LPC), Université Blaise Pascal, CNRS-IN2P3,  
Clermont-Fd, 63177 Aubiere Cedex, France

IPN-Orsay, Université Paris Sud, CNRS-IN2P3, BP1, F-91406, Orsay, France

SUBATECH (Ecole des Mines de Nantes, CNRS-IN2P3, Université de Nantes)  
BP 20722 - 44307, Nantes, France

Institut für Kernphysik, University of Münster, D-48149 Münster, Germany

Debrecen University, H-4010 Debrecen, Egyetem tér 1, Hungary  
ELTE, Eötvös Loránd University, H - 1117 Budapest, Pázmány P. s. 1/A, Hungary

KFKI Research Institute for Particle and Nuclear Physics of the Hungarian Academy of Sciences (MTA KFKI RMK),  
H-1525 Budapest 114, P.O.Box 49, Budapest, Hungary

Department of Physics, Banarus Hindu University, Varanasi 221005, India

Bhabha Atomic Research Centre, Bombay 400 085, India

Weizmann Institute, Rehovot 76100, Israel

Center for Nuclear Study, Graduate School of Science, University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo,  
Tokyo 113-0033, Japan

Hiroshima University, Kagamiyama, Higashi-Hiroshima 739-8526, Japan

KEK, High Energy Accelerator Research Organization, Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan

Kyoto University, Kyoto 606-8502, Japan

Nagasaki Institute of Applied Science, Nagasaki-shi, Nagasaki 851-0193, Japan

RIKEN, The Institute of Physical and Chemical Research, Wako, Saitama 351-0198, Japan

Physics Department, Rikkyo University, 3-34-1 Nishi-Ikebukuro, Toshima, Tokyo 171-8501, Japan

Department of Physics, Tokyo Institute of Technology, Oh-okayama, Meguro, Tokyo 152-8551, Japan

Institute of Physics, University of Tsukuba, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan

Chonbuk National University, Jeonju, Korea

Ewha Womens University, Seoul 120-750, Korea

Hanyang University, Seoul 133-792, Korea

KAERI, Cyclotron Application Laboratory, Seoul, South Korea

Korea University, Seoul, 136-701, Korea

Myongji University, Yongin, Kyonggido 449-728, Korea

Department of Physics and Astronomy, Seoul National University, Seoul, South Korea

Yonsei University, IPAP, Seoul 120-749, Korea

IHEP Protvino, State Research Center of Russian Federation, Institute for High Energy Physics,  
Protvino, 142281, Russia

Joint Institute for Nuclear Research, 141980 Dubna, Moscow Region, Russia

Russian Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

PNPI, Petersburg Nuclear Physics Institute, Gatchina, Leningrad region, 188300, Russia

Saint Petersburg State Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University, Vorob'evy Gory,  
Moscow 119992, Russia

Department of Physics, Lund University, Box 118, SE-221 00 Lund, Sweden

PHENIX

14 Countries; 71 Institutions



Figure 1: PHENIX 2010-2011

Source: PHENIX 2010-2011

Abilene Christian University, Abilene, TX 79699, U.S.

Baruch College, CUNY, New York City, NY 10010-5518, U.S.

Collider-Accelerator Department, Brookhaven National Laboratory, Upton, NY 11973-5000, U.S.

Physics Department, Brookhaven National Laboratory, Upton, NY 11973-5000, U.S.

University of California - Riverside, Riverside, CA 92521, U.S.

University of Colorado, Boulder, CO 80309, U.S.

Columbia University, New York, NY 10027 and Nevis Laboratories, Irvington, NY 10533, U.S.

Florida Institute of Technology, Melbourne, FL 32901, U.S.

Florida State University, Tallahassee, FL 32306, U.S.

Georgia State University, Atlanta, GA 30303, U.S.

University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL 61801, U.S.

Iowa State University, Ames, IA 50011, U.S.

Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA 94550, U.S.

Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM 87545, U.S.

University of Maryland, College Park, MD 20742, U.S.

Department of Physics, University of Massachusetts, Amherst, MA 01003-9337, U.S.

Morgan State University, Baltimore, MD 21251, U.S.

Muhlenberg College, Allentown, PA 18104-5586, U.S.

University of New Mexico, Albuquerque, NM 87131, U.S.

New Mexico State University, Las Cruces, NM 88003, U.S.

Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN 37831, U.S.

Department of Physics and Astronomy, Ohio University, Athens, OH 45701, U.S.

RIKEN BNL Research Center, Brookhaven National Laboratory, Upton, NY 11973-5000, U.S.

Chemistry Department, Stony Brook University, SUNY, Stony Brook, NY 11794-3400, U.S.

Department of Physics and Astronomy, Stony Brook University, SUNY, Stony Brook, NY 11794, U.S.

University of Tennessee, Knoxville, TN 37996, U.S.

Vanderbilt University, Nashville, TN 37235, U.S.