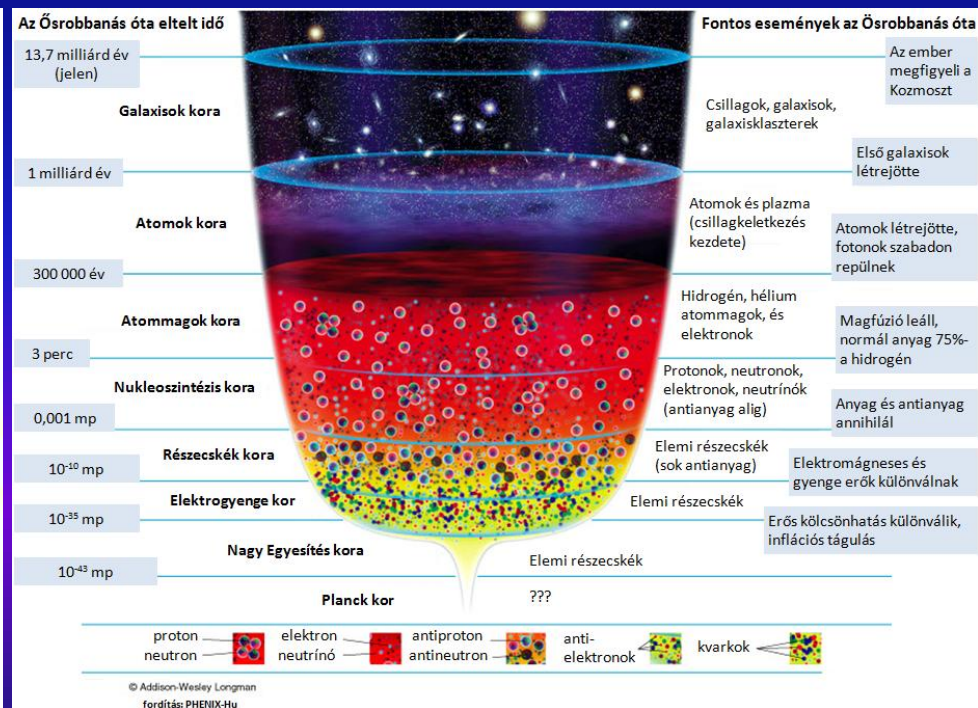
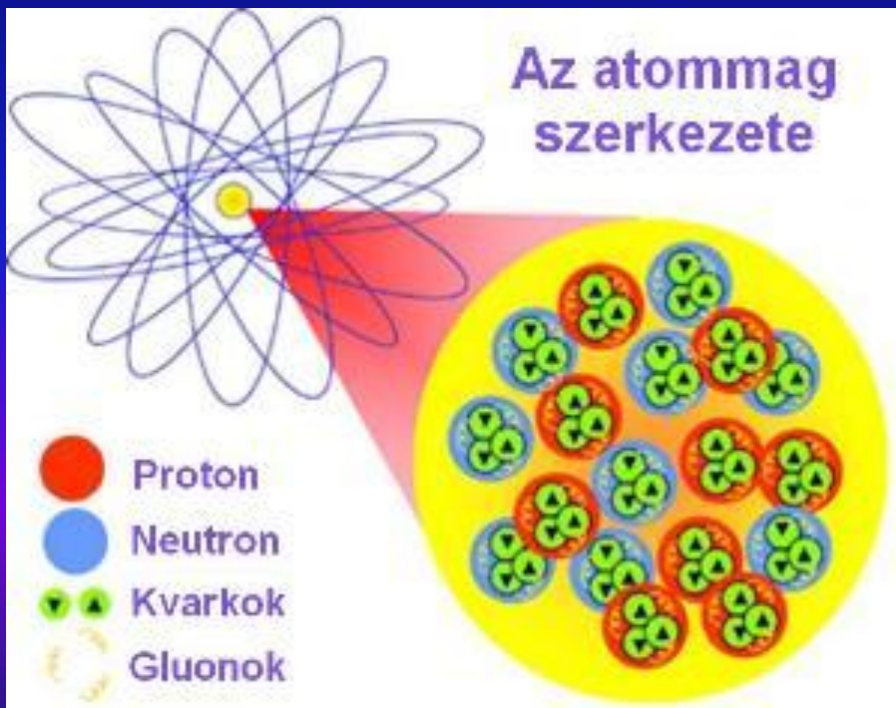


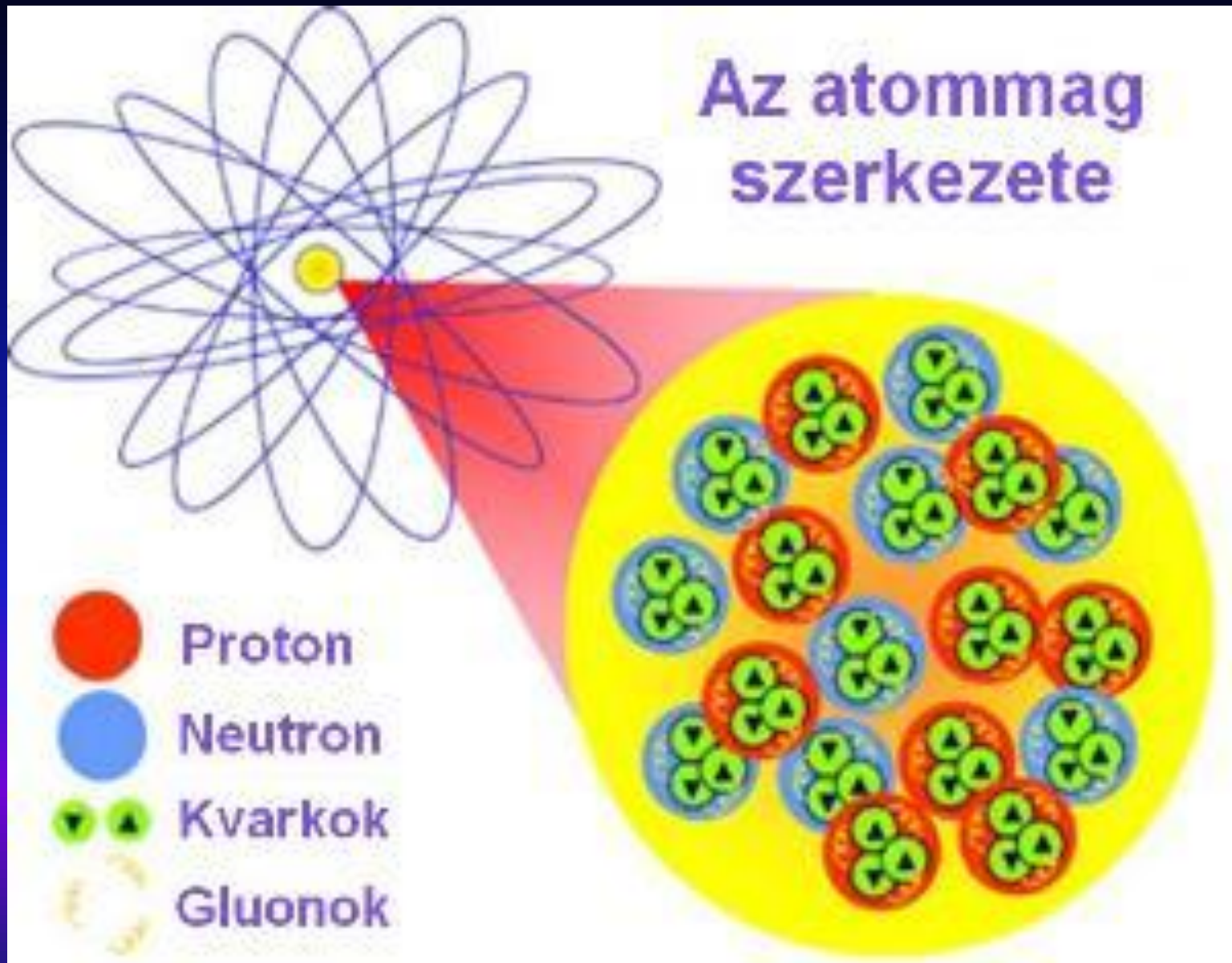
MÉRFÖLDKÖVEK: A KVARKOK FOLYADÉKÁNAK MEGLEPŐ TULAJDONSÁGAI

Csörgő Tamás fizikus, az Európai Akadémia tagja
MATE Műszaki Intézet, Femtoszkópia Lab, KRC Gyöngyös
HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont, Budapest

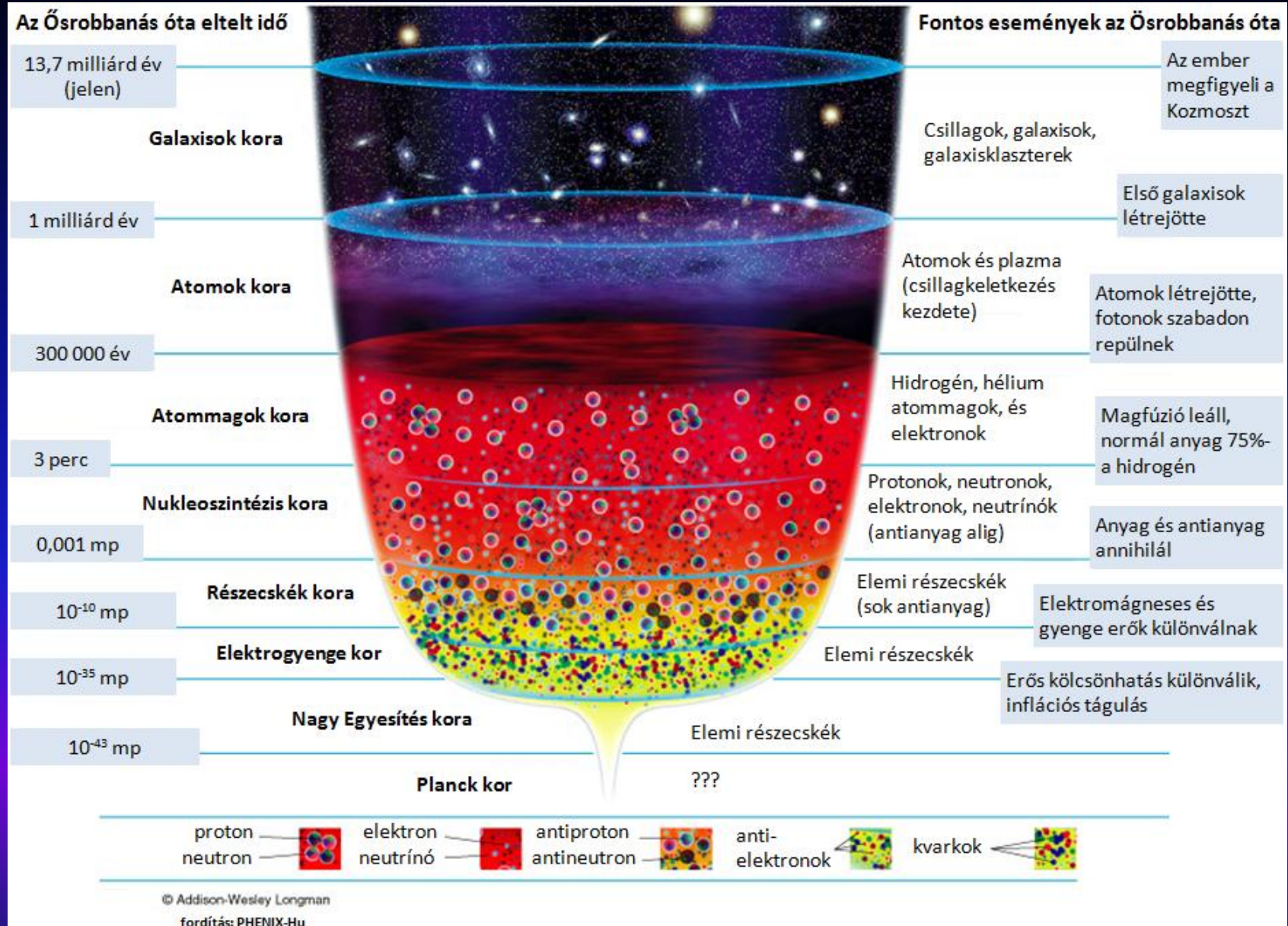
A Nagy Bumm és a sok Kis Bumm: mérföldkövek A PHENIX kísérlet és a tékozló bozon visszatérése



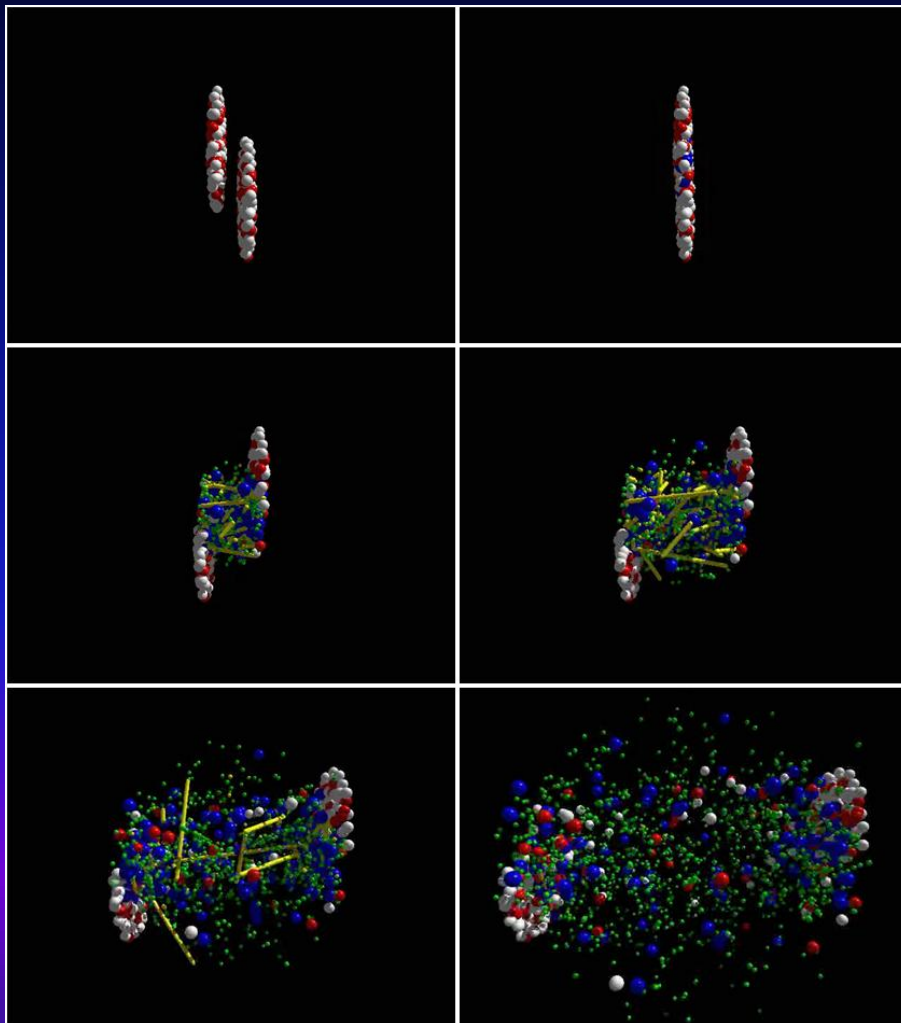
ATOMOK ÉS AZ ATOMMAG SZERKEZETE



VILÁGEGYETEMÜNK ÉS A MAI FIZIKA

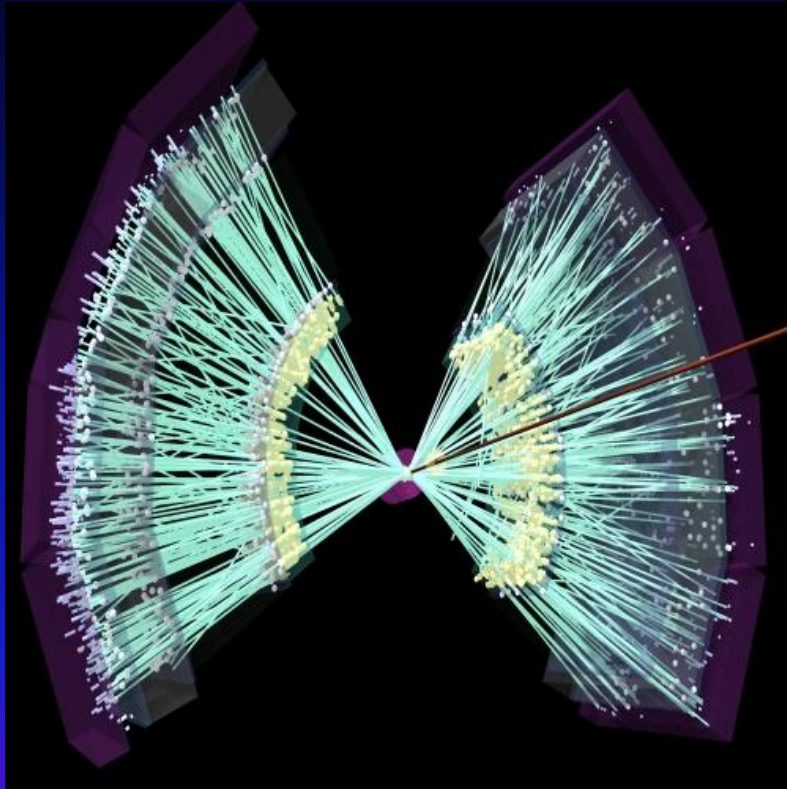


KVARKANYAG - ELMÉLETILEG



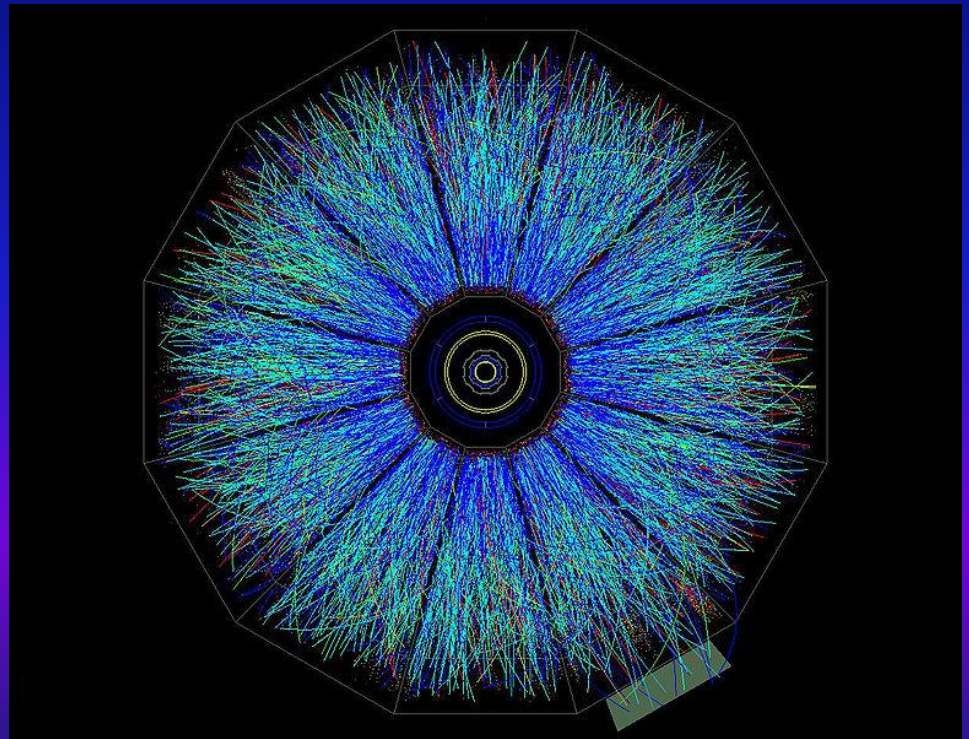
A RHIC Au+Au ütközéseinek elméleti leírása. Nagy energiás nehézion-ütközésekben erősen kölcsönható **kvark-gluon plazma** jön létre, meglepő tulajdonságokkal: a kvarkok tökéletes folyadékának tulajdonságait az USA Relativisztikus Nehézion Ütköztető (RHIC) gyorsítójának kísérletei tárták fel a Brookhaveni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

KVARKANYAG - KÍSÉRLETILEG

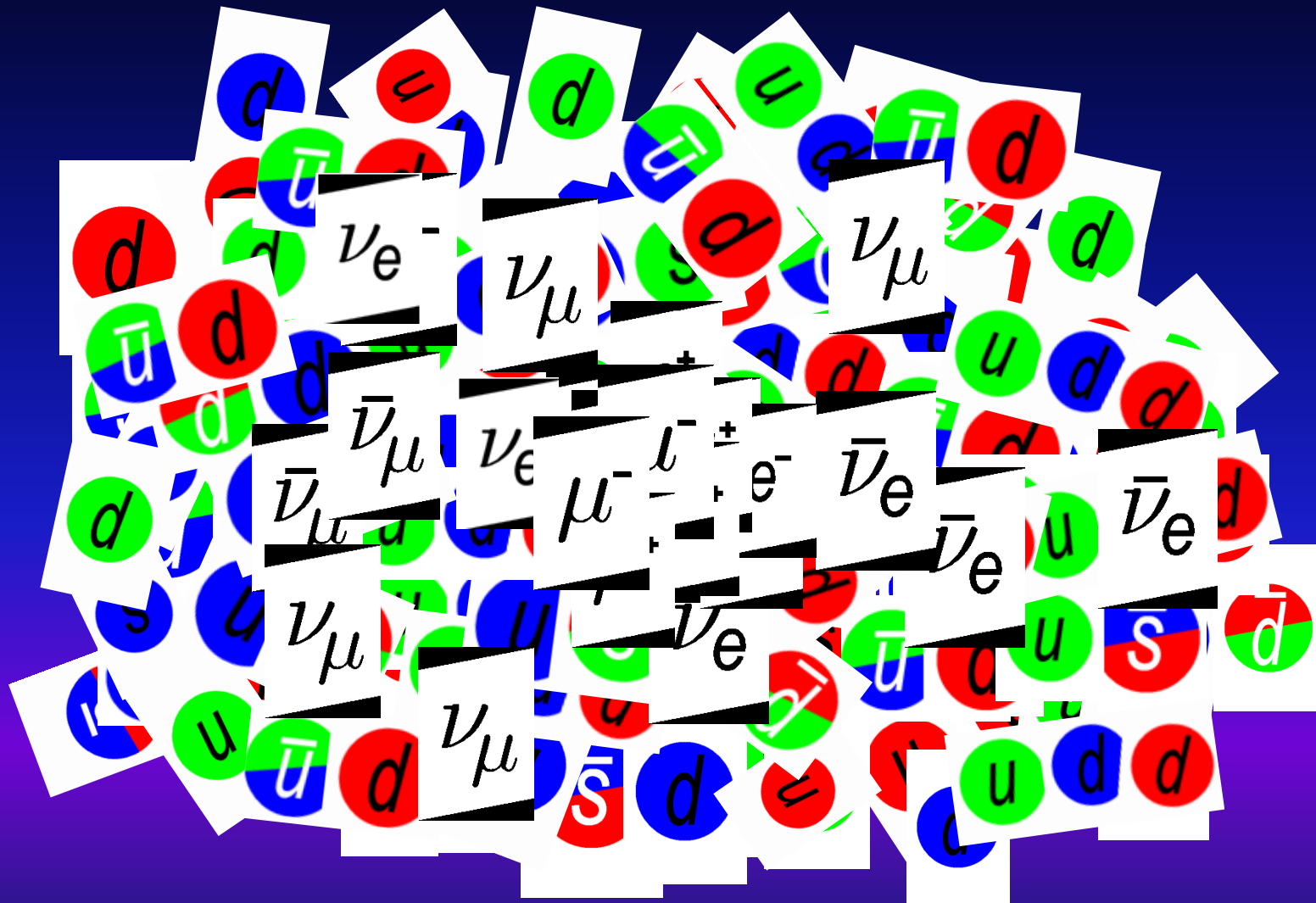


A tökéletes kvarkfolyadék, az sQGP tulajdonságait megerősítette és további részletekkel gazdagította a CERH LHC ALICE, ALTAS és CMS kísérlete.

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 - JÁTÉKOSAN



Kvarkok: színesek. De a színek bezáródnak (~1984)!

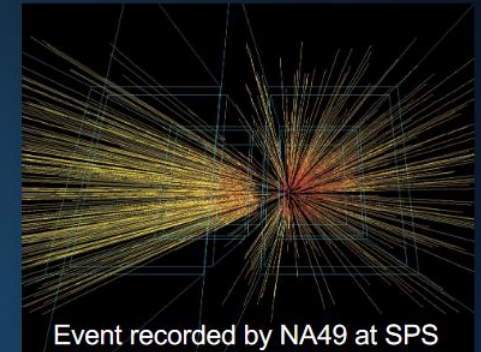
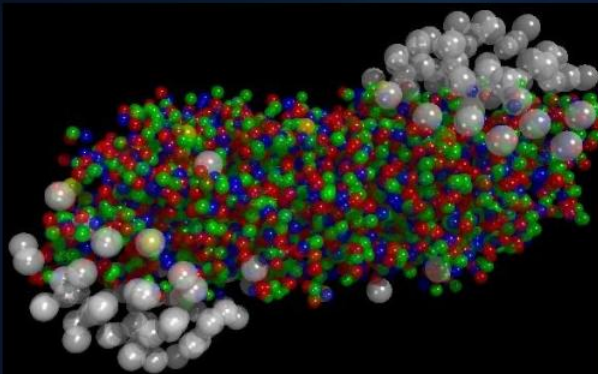
Hadronok: fehérek és közvetlenül mérhetőek.

2000 - QGP felfedezés – a CERN sajtótájékoztatóján?

A NEW STATE OF MATTER, CREATED AT CERN (?)

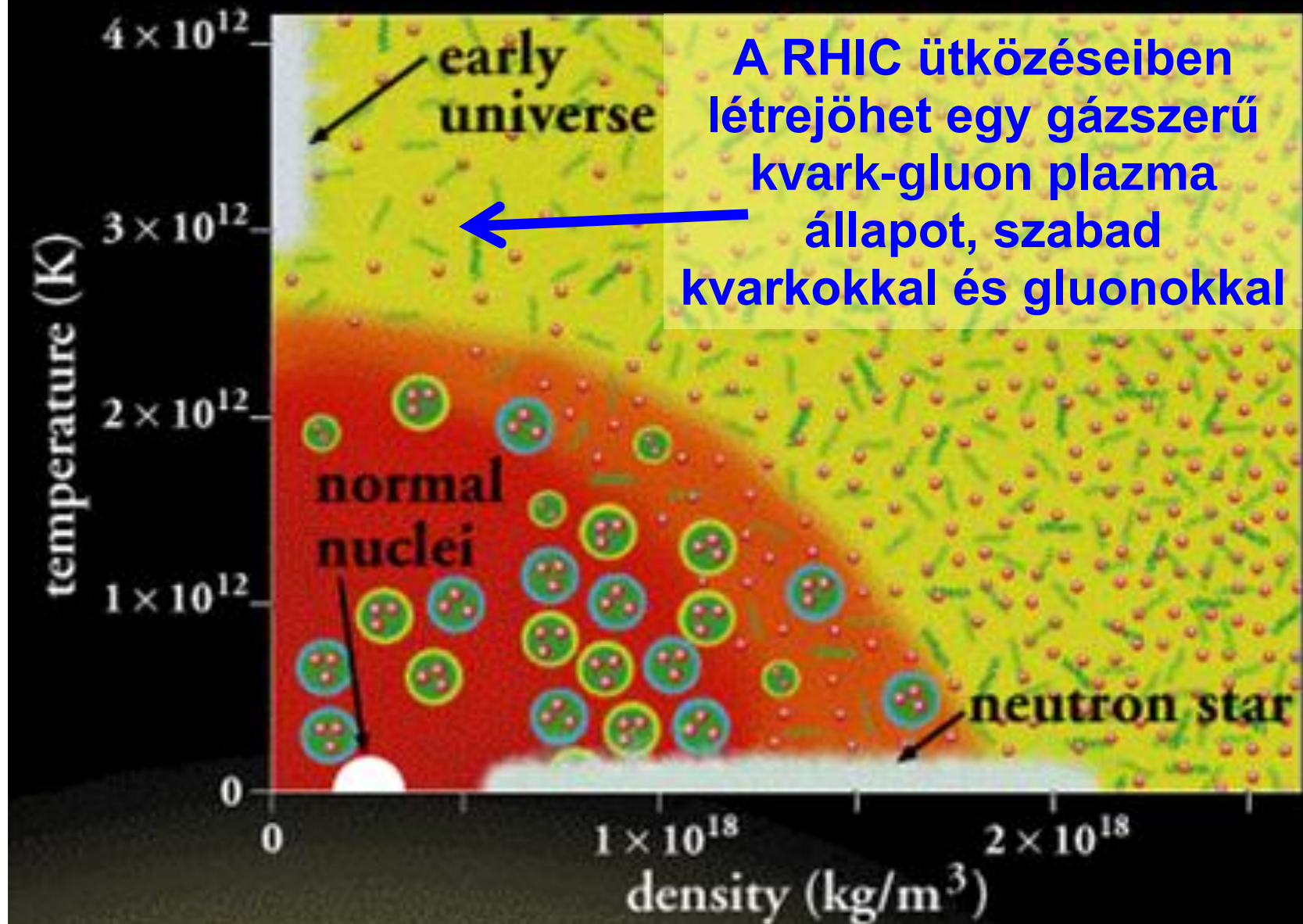
CERN, February 2000: first evidence of a new state of matter, the quark-gluon plasma

- Combined data from the 7 experiments on CERN's HI programme
- Proves an important prediction of the QCD theory. An important step forward in the understanding of the early evolution of the Universe.



Luciano Maiani (CERN DG): "... We now have evidence of a new state of matter where quarks and gluons are not confined. ... There is still an entirely new territory to be explored concerning the physical properties of quark-gluon matter. The challenge now passes to RHIC at BNL and later to the LHC."

Várakozás 2000 körül



2000 – Mekkora is a kvarkok szabad úthossza ??

- A skier (quark?) is confined inside snow patches (hadrons?)

Quark liberation and coalescence at CERN SPS

J. Zimanyi (Budapest, RMKI), T.S. Biro (Budapest, RMKI), T. Csorgo (Budapest, RMKI), P. Levai (Budapest, RMKI)
Published in: *Phys.Lett.B* 472 (2000) 243-246 • e-Print: [hep-ph/9904501](#) [hep-ph]

New form of matter at CERN SPS: Quark matter but not quark gluon plasma

T. Csorgo (Budapest, RMKI) (Jun, 2000)

Published in: *Nucl.Phys.B Proc.Suppl.* 92 (2001) 62-74 • Contribution to: 9th International Workshop on Multiparticle Production: New Frontiers in Soft Physics and Correlations on the Threshold of the New Millenium (Torino 2000), 62-74 • e-Print: [hep-ph/0011339](#) [hep-ph]

can move freely over long distances...

..this way

CERN, 09/11/2016

L. Maiani. How did we get there

In the
for a li
finds e:

$T_{\text{slope}} =$

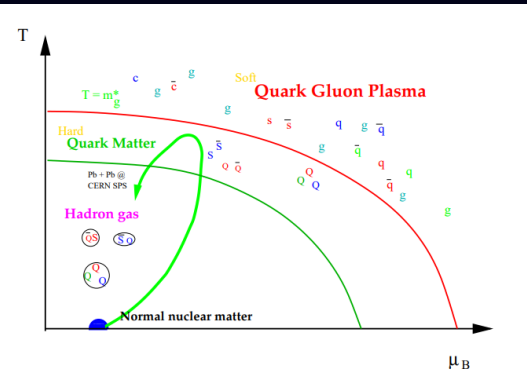


Figure 9. Illustration of the difference between Quark Matter consisting of dressed quarks, strange quarks and Quark Gluon Plasma which contains in a significant amount light and strange (undressed) (anti-)quarks as well as gluons.

does couple to the rest mass:
transverse density profile one

led observed. Figure 3 shows
it; inverse slopes of 300 MeV
interpreted as hadronic tem-
perature between the data from different

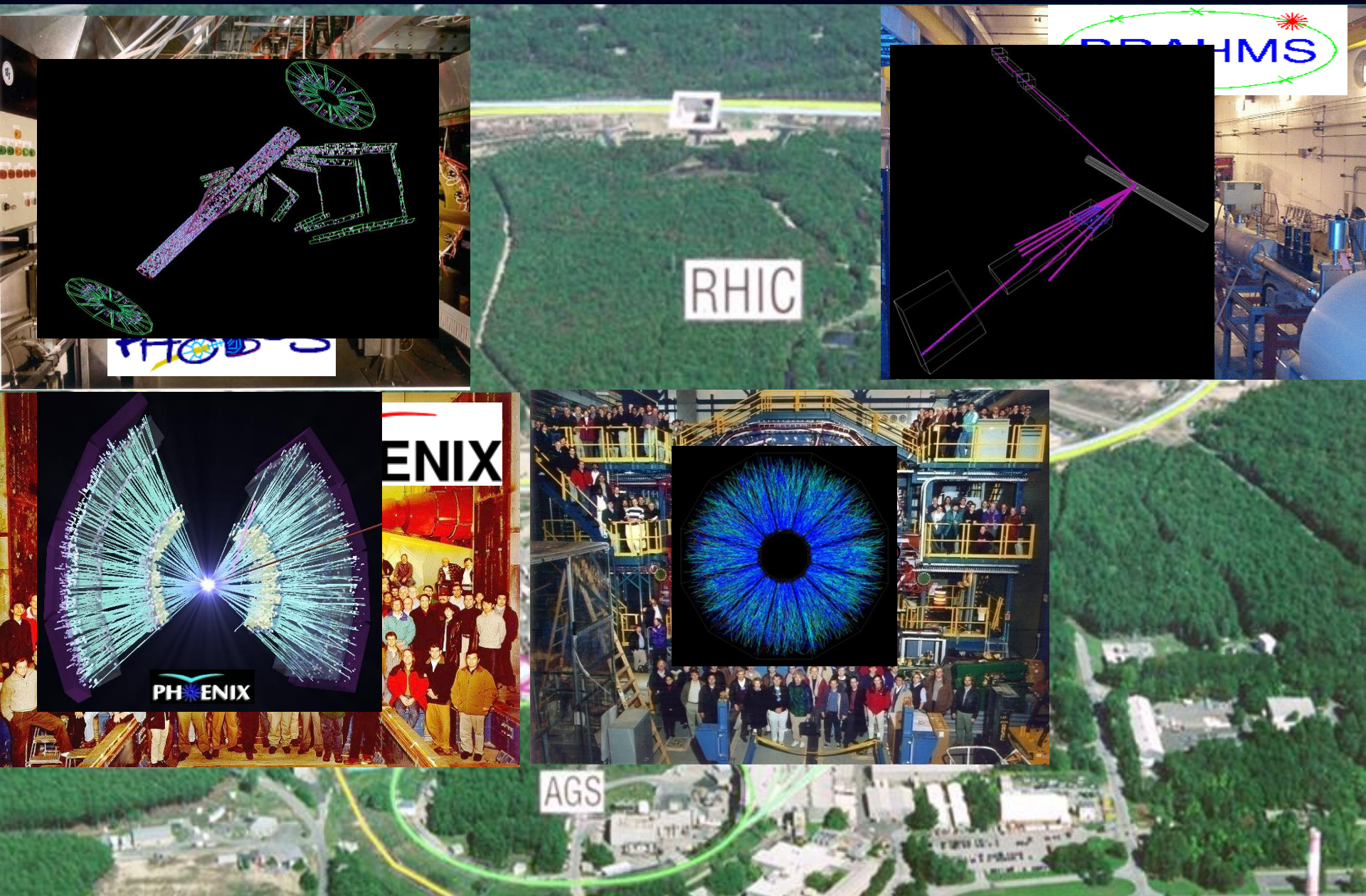
the size of the regions within
the size of the regions within
the size of the regions within
the size of the regions within

16. T. Csörgő, B. Lörstad, Nucl. Phys. A 590 (1995) 465c; Phys. Rev. C 54 (1996) 1390.
17. R. Scheibl and U. Heinz, Phys. Rev. C 59 (1999) 1585.

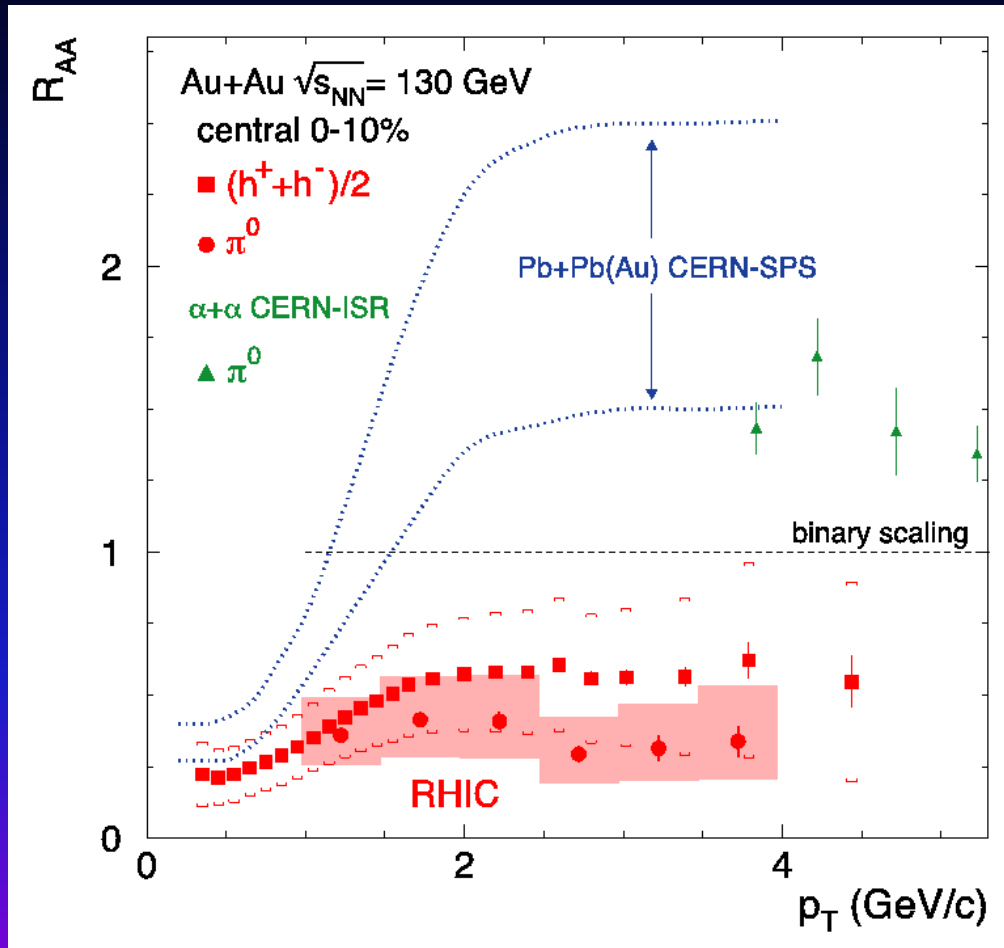
U. W. Heinz: signs of hydro, it is a fluid,
Mean free path tends to zero,

with references to Hungarian (Buda-Lund) results:
Nucl.Phys.A 685 (2001) 414-431, PRC54 (1996) 1390
Proc. NN2000, e-Print: [hep-ph/0009170](#) [hep-ph]

A RHIC gyorsító és a 4 RHIC kísérlet



Első mérföldkő: új jelenség

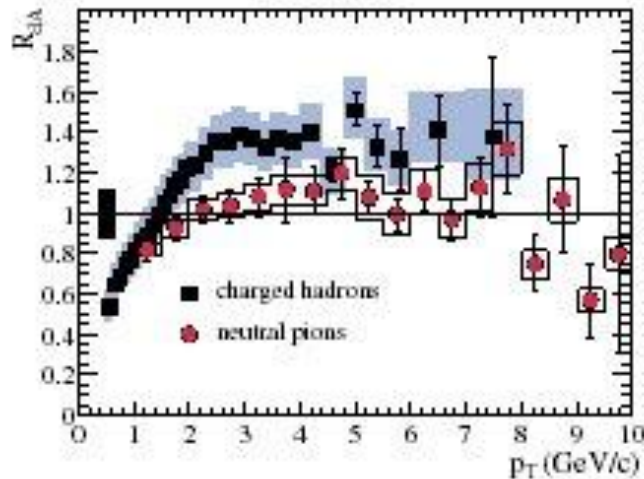


A RHIC-nél a nagy transzverzális impulzusú részecskekeltés jelentős elnyomása az Au+Au ütközésben a PHENIX felfedezése

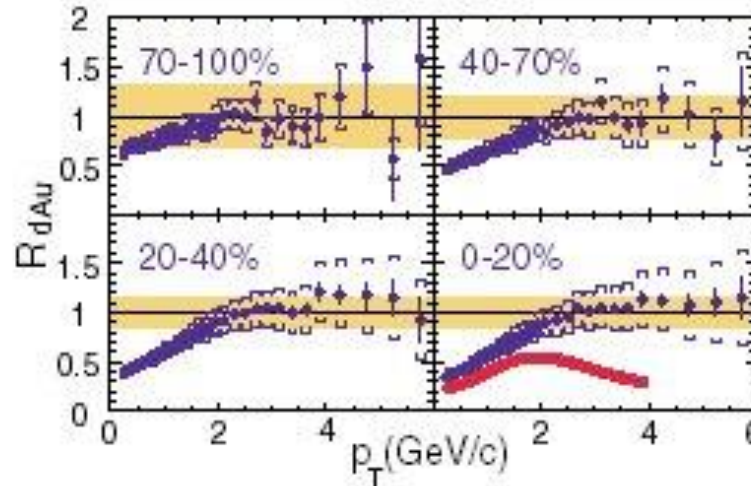
PHENIX (2002), <https://arxiv.org/pdf/nucl-ex/0109003>, 1200+ hivatkozás

2. mérőldkő: új anyag (2003)

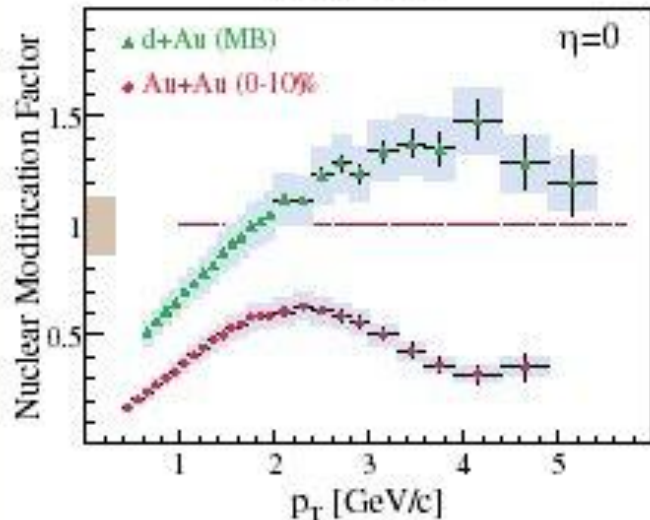
PHENIX



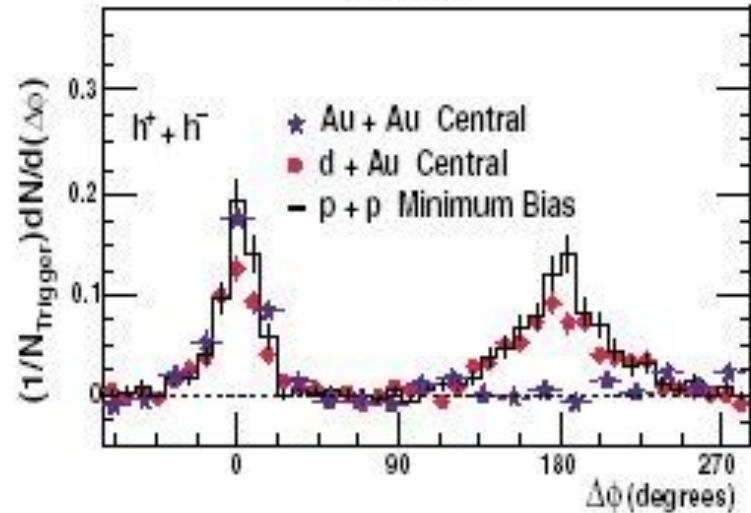
PHOBOS



BRAHMS



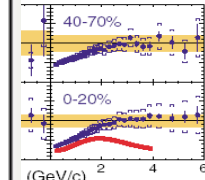
STAR



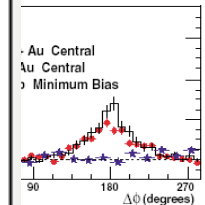
PHYSICAL
VIEW
LETTERS

Published week ending
AUGUST 2003
Volume 91, Number 7

PHOBOS



STAR



Preprint Copy
Use Prohibited Until 2008

American Physical Society

3. mérföldkő: Nem gáz, de folyadék!

Cím  <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](#)

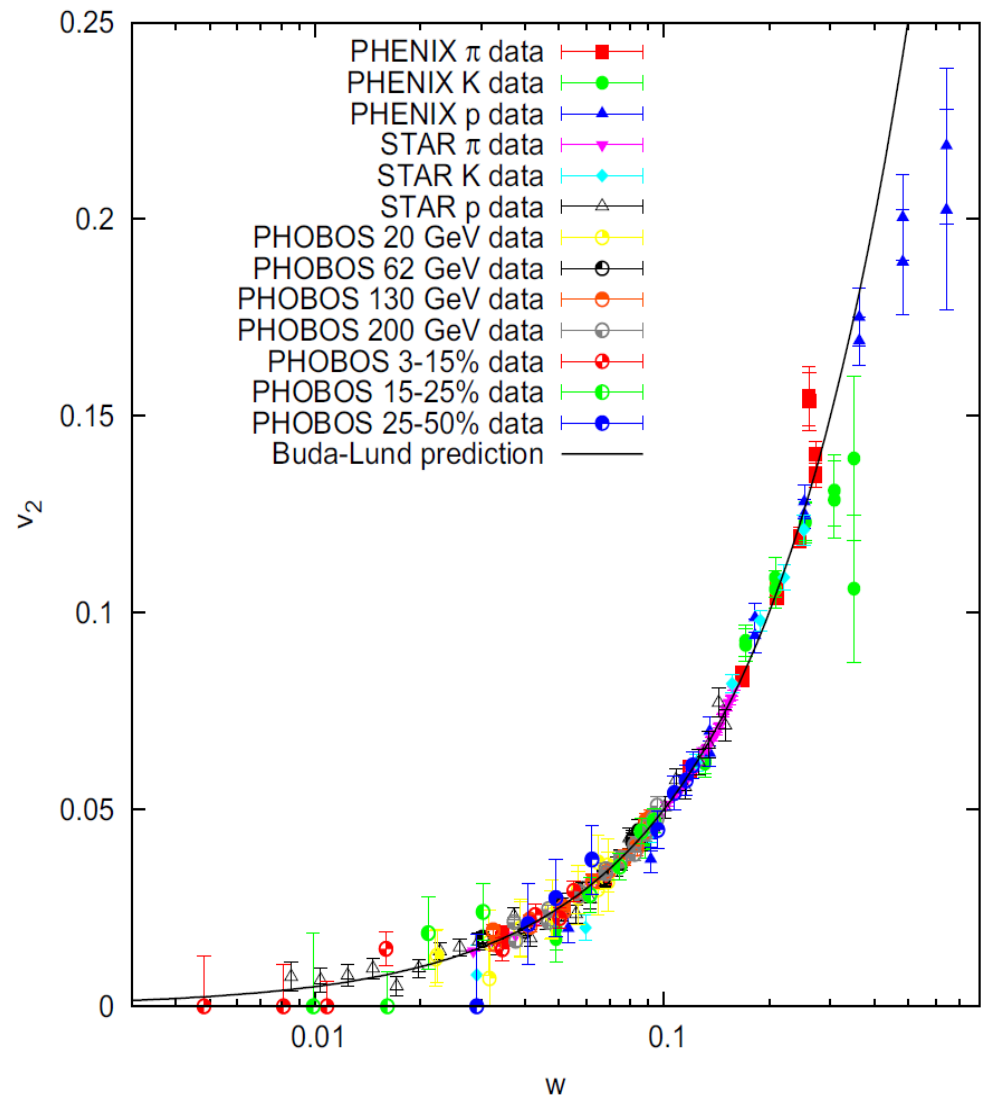
Archives

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

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

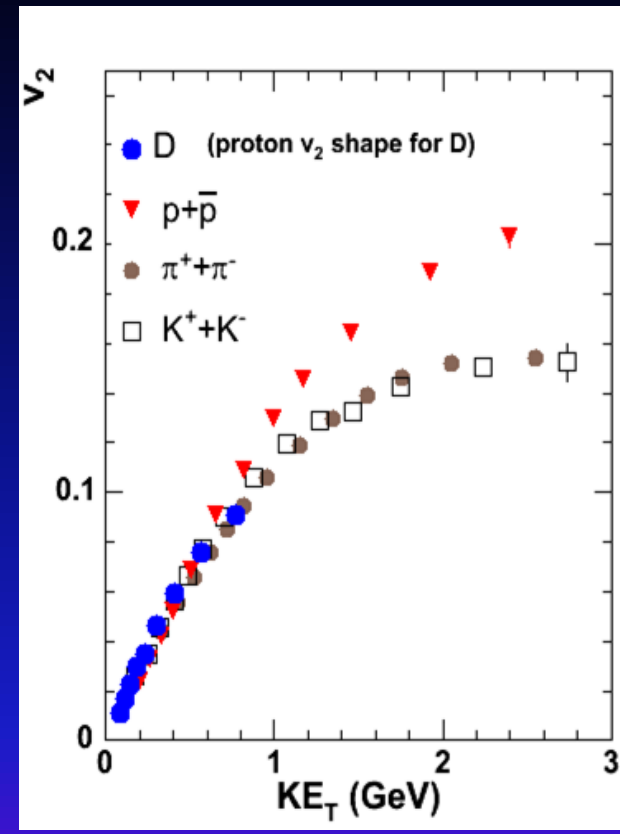
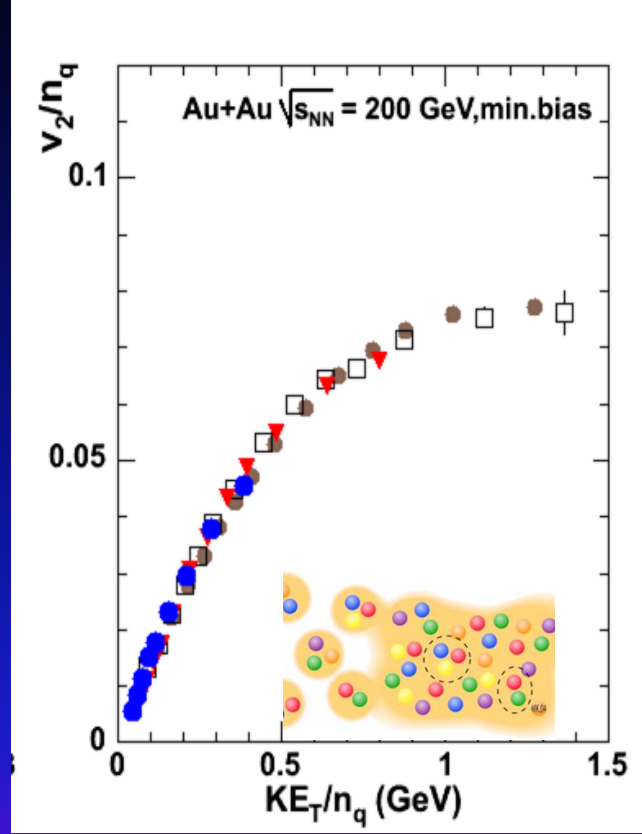
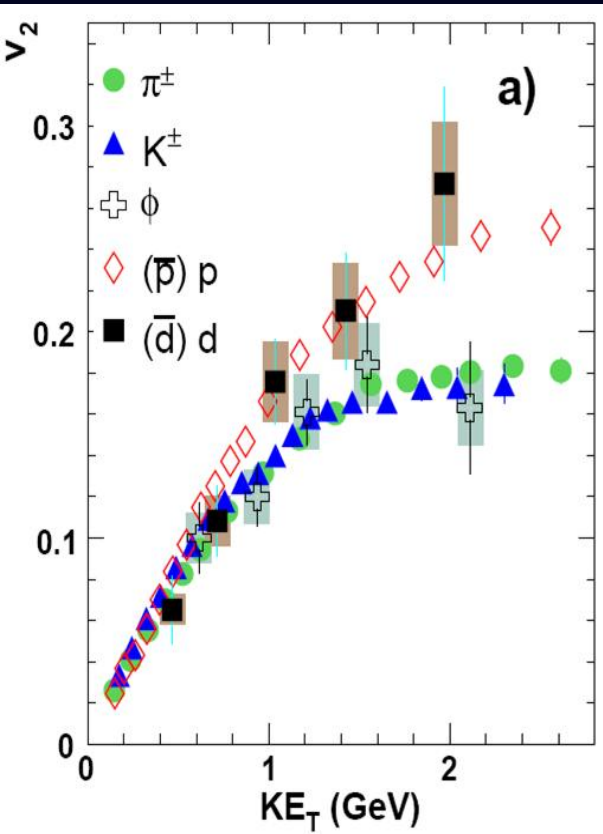
PHENIX: 3700+ hivatkozás ~ 20 év alatt (+BRAHMS, STAR és PHOBOS is hasonló)

A RHIC tökéletes folyadéka



[M. Csanád, T. Cs. et al, Eur. Phys.J.A38:363-368,2008](#)

4. mérőöldkő: A kvarkfolyadék



PHENIX (2007), <https://arxiv.org/pdf/nucl-ex/0608033>, 500+ hivatkozás

A ϕ mezon v_2 értéke követi a többi mezonét

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

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

A D mezon v_2 értéke követi a többi mezonét

Az egy kvarkra jutó folyás egységes: ezért kvarkfolyadék!

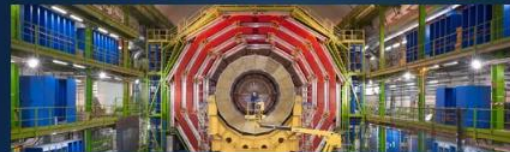
A színek kiszabadulása: az 1980-as évektől várt, 2007-re megfigyelt!

2008 - INDUL AZ LHC, A NAGY HADRONÜTKÖZTETŐ

The Large Hadron Collider era



ATLAS



CMS



ALICE



LHCb

A 10 LHC KÍSÉRLET (2025-IG):

ALICE, ATLAS, CMS, FASER, LHCb, LHCf, MATHUSLA, MILLIQAN, MOEDAL és TOTEM.

5. mérőöldkő: A tökéletesség foka

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

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

Azonban létezik egy (feltételezett) quantum limit:

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

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

Hogy viszonyulnak a "rendes" folyadékok ehhez a limithez?

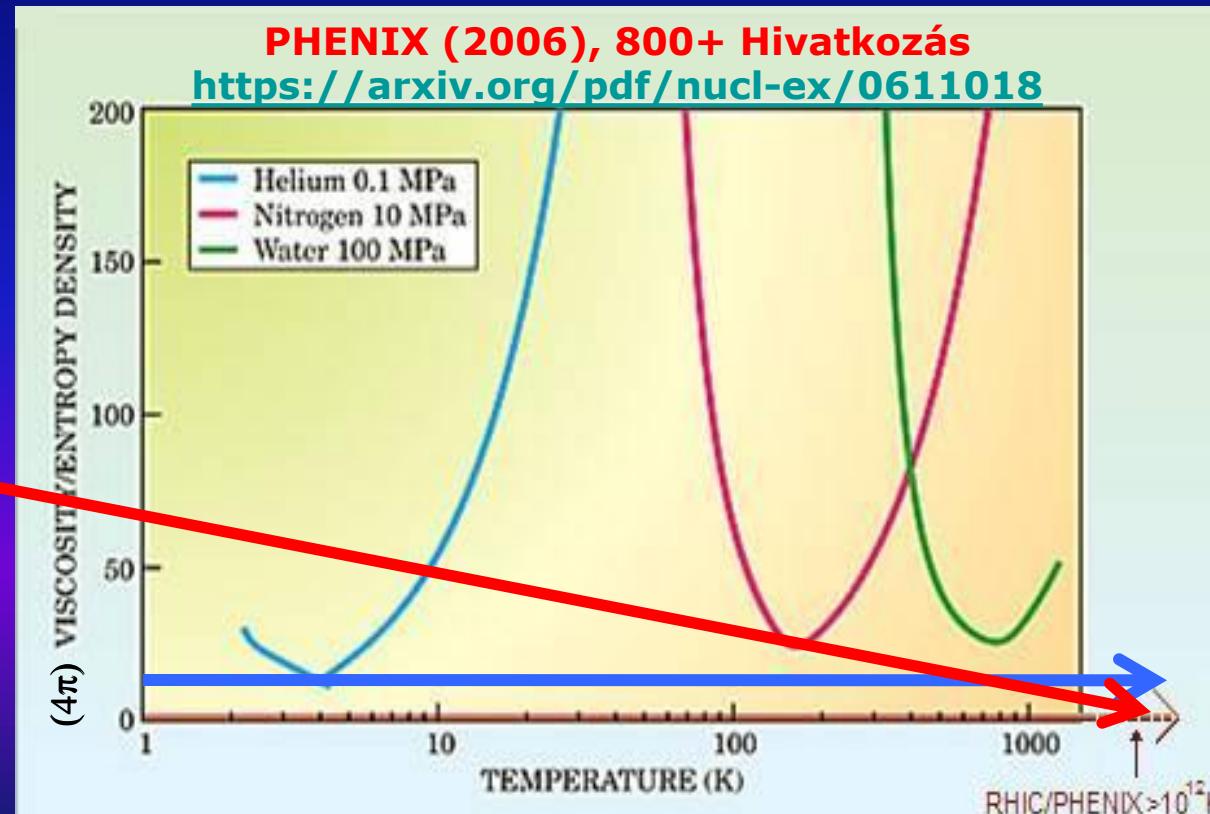
$(4\pi) \eta/s > 10$!

RHIC tökéletes folyadék

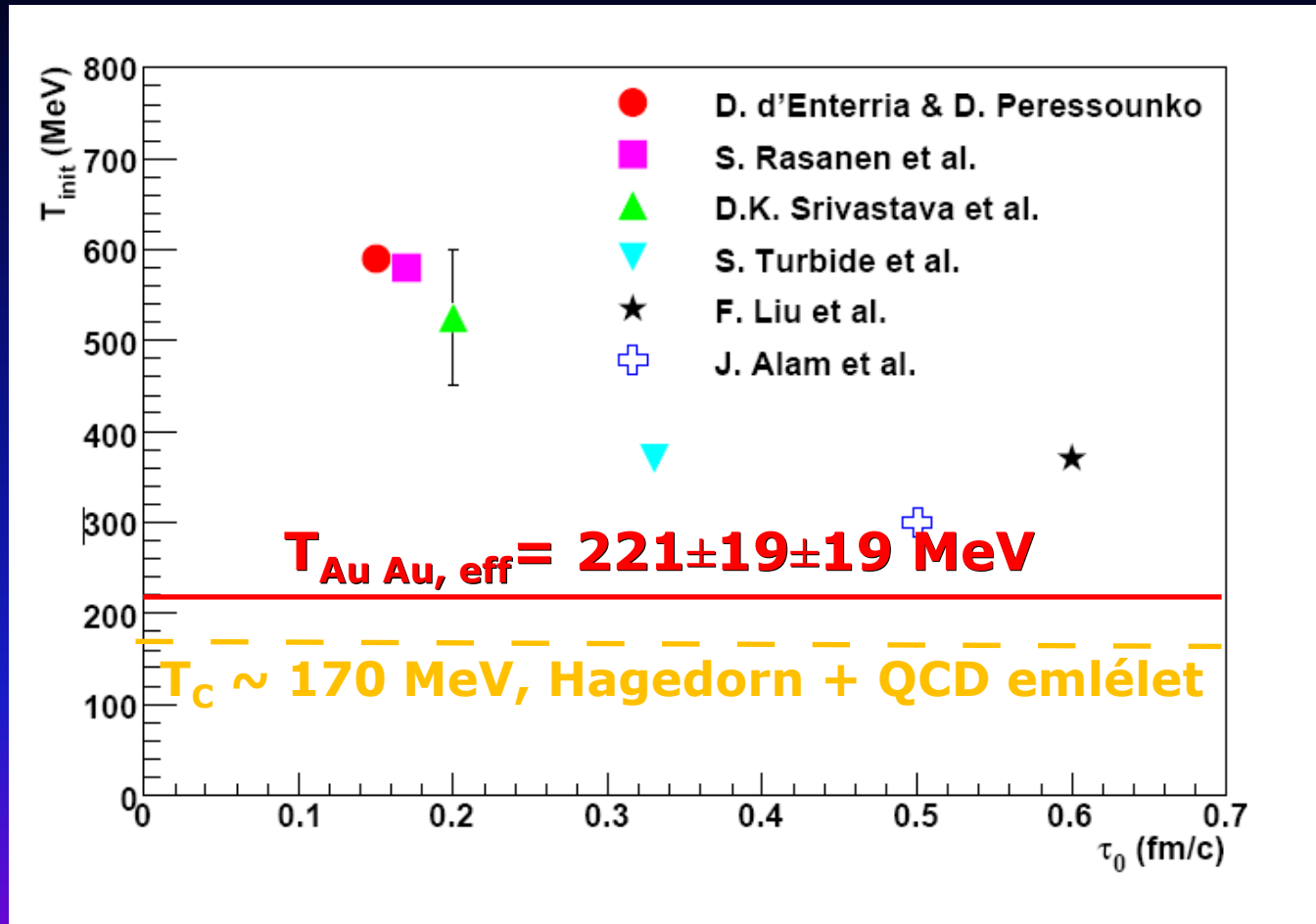
$4/3 < (4\pi) \eta/s < 2 < 10$

A kvarkfolyadék bizonyítottan tökéletes ...

De milyen forró?



6. mérőöldkő: a kezdeti hőmérséklet



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

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

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

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

7. mérföldkő: van másik átmenet is!

A RHIC-nél

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

Jellemzői:

Opálos, $R_{AA} \sim 0.2$

Csillapítási hossz ~ 2 fm

$C_s = 0.35 \pm 0.05$

Hubble állandó: $(2-4) \cdot 10^{22}$ Hz

$\eta/s \leq$ szuperfolyékony He/5

$T_{init} \geq 300$ MeV

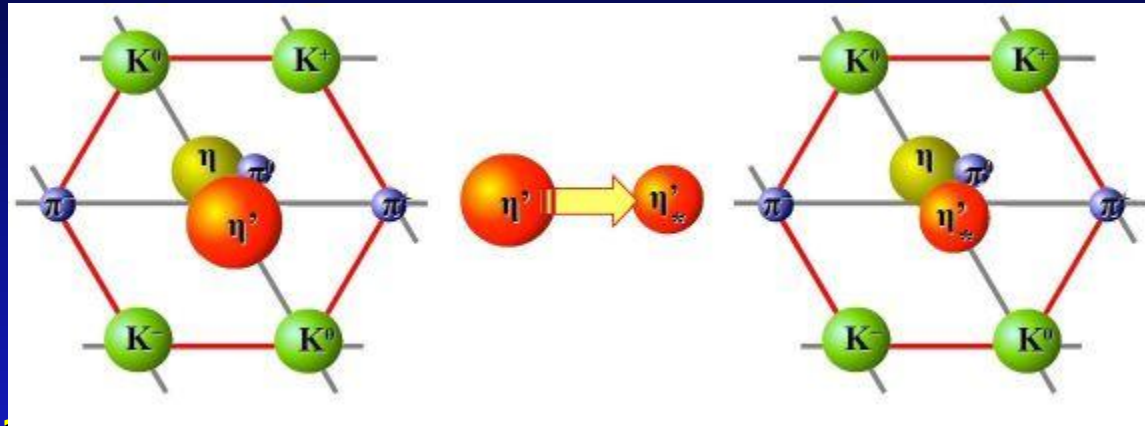
$\varepsilon_{init} \geq 15$ GeV/fm³

$p_{init} \geq 1.5$ GeV/fm³

Nem egy,
hanem két átmenet!

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

RHIC-nél hadronanyagban
az η' mezon tömegcsökkenése
egy elveszett szimmetria helyreáll



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

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

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

Mérföldkövek – az előadás alapja

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

OTKA

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

Élet és Tudomány 2010 év 49 szám 1542. oldal,

Cs.T. Zimányi 2010 Nehézionfizikai Téli Iskola előadása

MI IS TÖRTÉNT 2010 ÓTA ?

HIGGS BOZON A BERZETÖKBEN



NYELVEZET

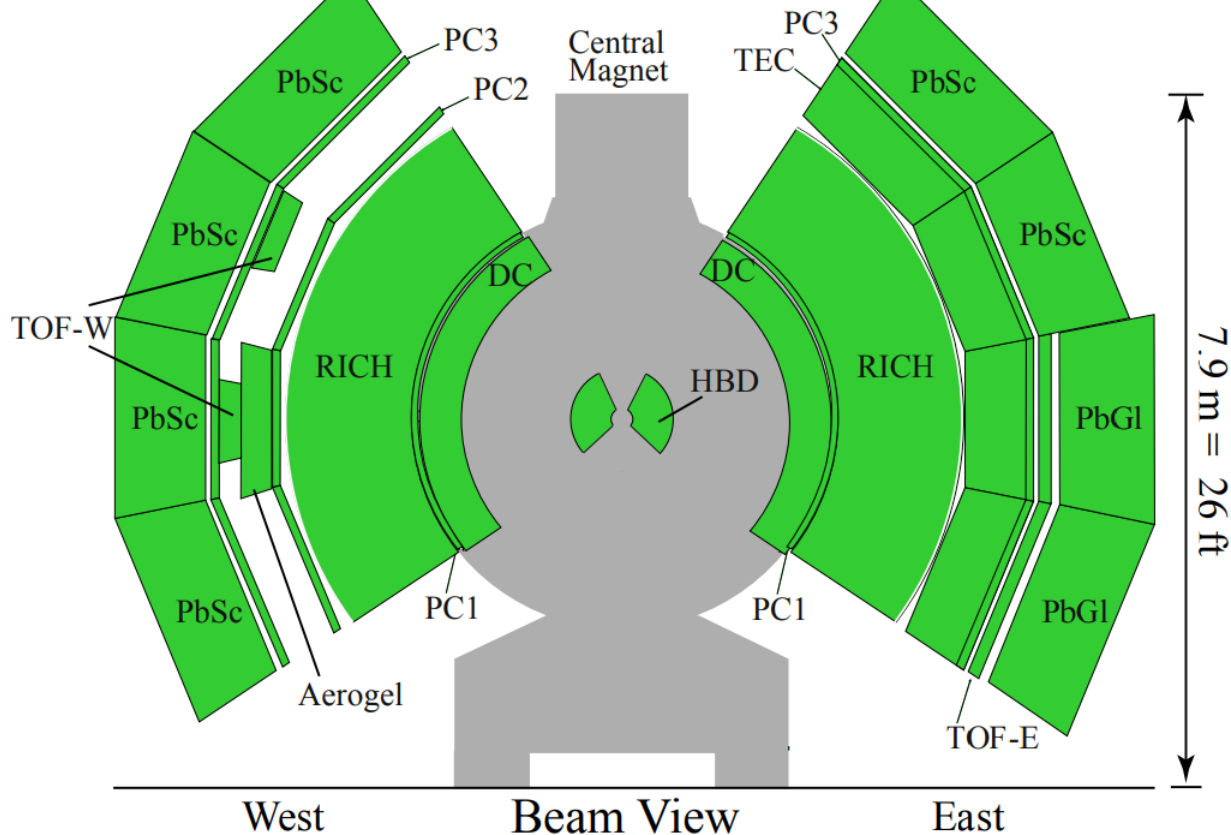
**BOZON: sokan lehetnek
pontosan azonos állapotban.
Pl: foton, Higgs, pion stb**

**FERMION: csak egyedül lehet
pontosan azonos állapotban.
Pl: elektron, pozitron, proton, neutron stb.**

A PHENIX DETEKTOR - 2010

2010

PHENIX Detector



PHENIX Nehézion
Összefoglaló előadás
Novák Tamás. at
ICNFP'24

Central Arm detektorok

DC: Drift Chamber

PC1 – PC3: PAD Chamber

PbSc: EM Cal

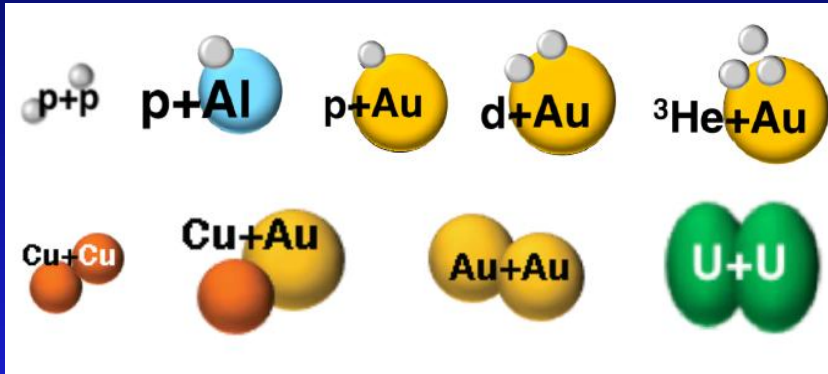
PbGl: EM Cal

HBD: Hadron Blind Det
(half magnetic field in CM)

Nem fért rá:
BBC, ZDC: centralitás

PHENIX DETEKTOR @ RHIC – MÁRA MÁR A MÚLTÉ

16 év adatfelvétel: **változatosság**.
9 ütközési típus és 9 energia.
Geometria és energia változtatás.

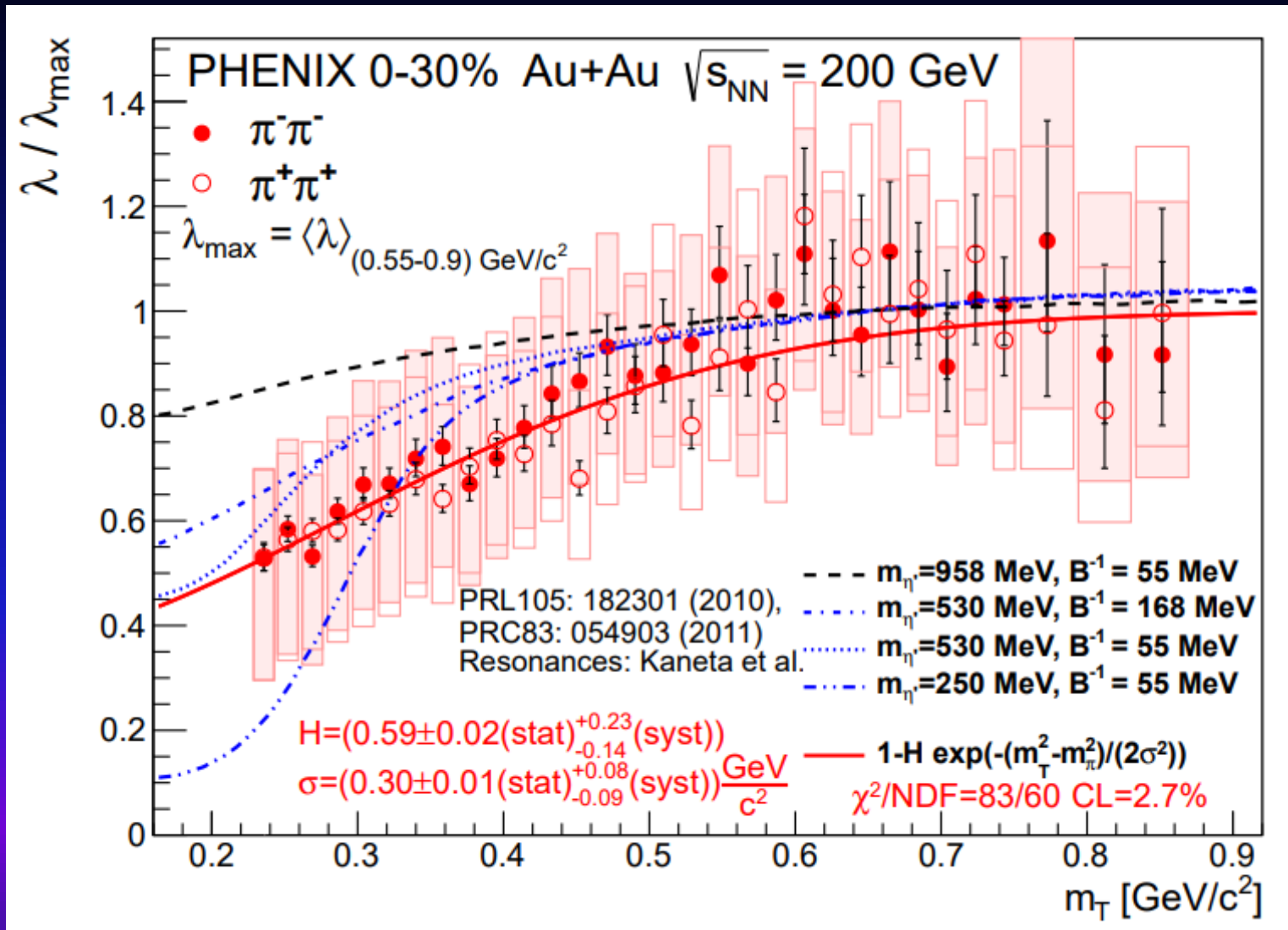


PHENIX befejezte az adatgyűjtést.
De az adatok elemzése folytatódik.

PHENIX: nagy **felfedezési potenciál**.

Ütközés	Mérés éve
Au+Au	2001, 2002, 2004, 2007, 2008, 2010 , 2011, 2014, 2016
d+Au	2003, 2008, 2016
Cu+Cu	2005
U+U	2012
Cu+Au	2012
^3He+Au	2014
$p+Au$	2015
$p+Al$	2015

U_A(1) SZIMMETRIA HELYREÁLLÁSA: KI LEHET-E KAPCSOLNI? Függ-e az ütközések frontálisságától?

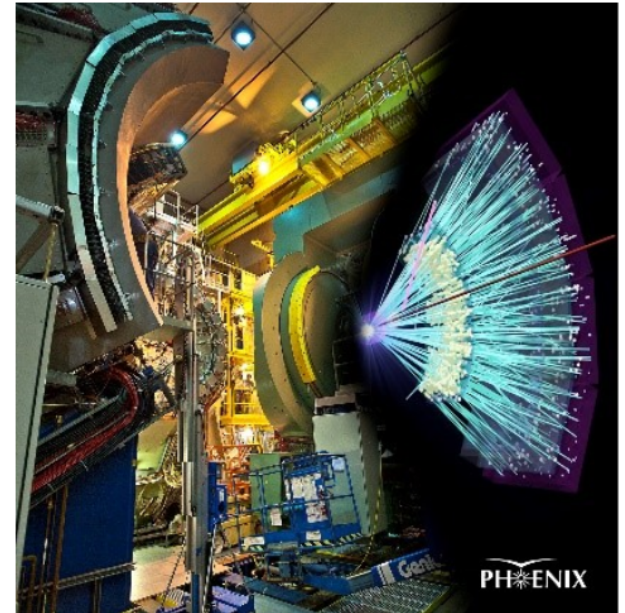


2024 KARÁCSONYA

A tékozló bozon visszatér

Magyar kutatók a PHENIX nevű nagy nemzetközi kísérletben megfigyelték, hogy egy különleges részecske, az éta-vessző mezon szokatlanul nagy tömege forró és sűrű hadronanyagban lecsökken, hasonlóná válik részecskecsaládja tagjainak tömegéhez: egy régóta keresett szimmetria helyreáll.

A nagyenergiás részecskegyorsítóknál – Szuper Protonsinkrotron (SPS), Relativisztikus Nehézion-ütköztető (RHIC) és Nagy Hadronütköztető (LHC) – végzett kísérleteknek az utóbbi 10-15 évben gyűjtött adatai arra utalnak, hogy ultrarelativisztikus nehézion-ütközések során, a Kis Bummokban az atommagok anyaga megolvad, és egy közel tökéletes kvarkfolyadék alakul ki. Ez az ember által mesterségesen előállított legforróbb anyag. A Nagy Bumm, azaz az Ősrobbanás utáni első néhány milliomod másodpercben ilyen anyag töltötte ki az egész Világegyetemet. Ez a forró kvarkleves a Kis Bummokban és a Nagy Bummban is kitágul, emiatt lehűl, felveszi hétköznapiabb, ma ismert formáját.

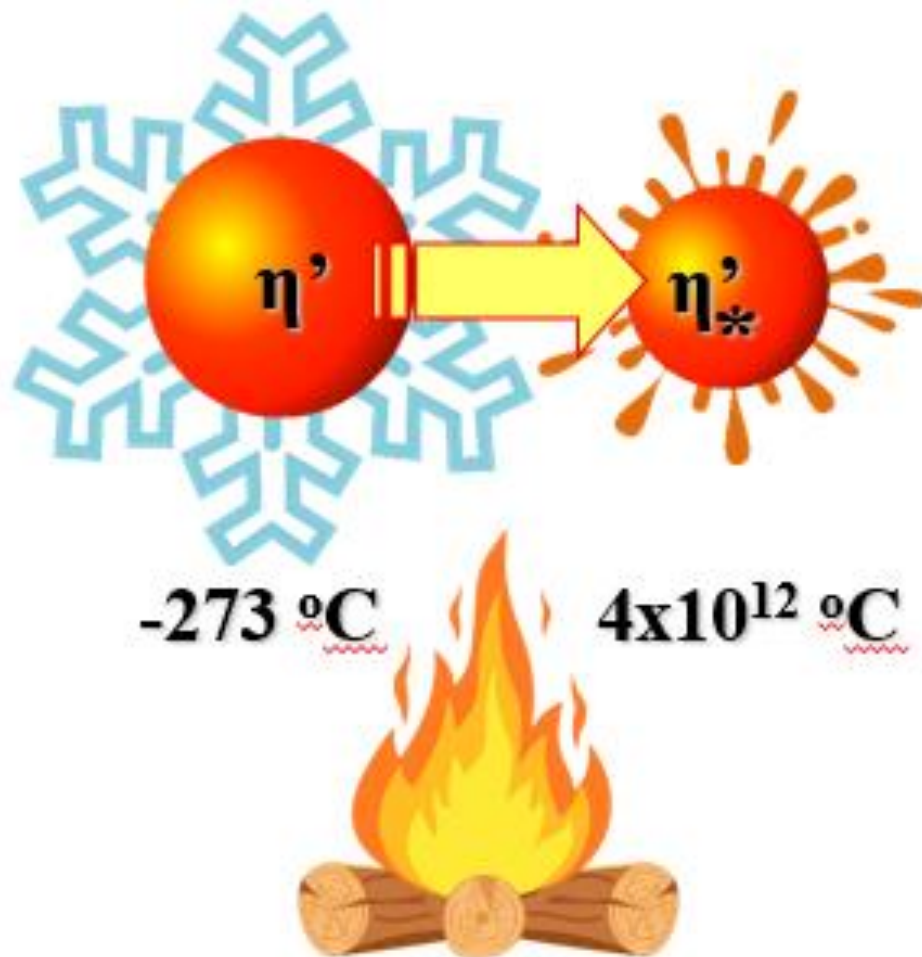


Az ELTE, a HUN-REN Wigner Kutatóközpont és a MATE Femtoszópiái Tudásközpont kutatói által közösen előkészített, a RHIC gyorsító PHENIX kísérlete által jegyzett cikket az Amerikai Fizikai Társulat (APS) Physical Review C folyóirata közölte, és fontosságát jelezve szerkesztői kiemelésben részesítette.

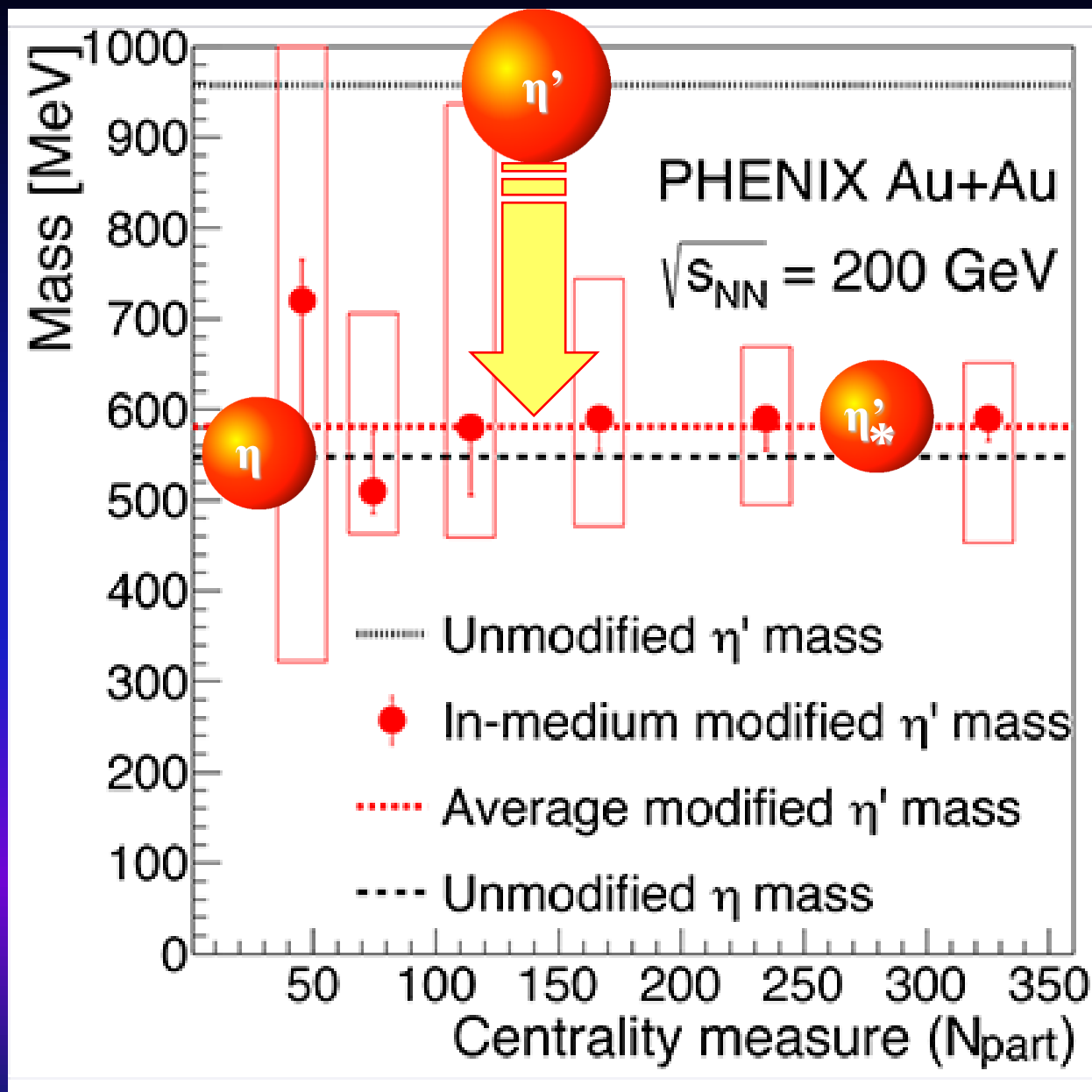
A teljes szakcikk itt olvasható: <https://journals.aps.org/prc/abstract/10.1103/PhysRevC.110.064909> .

A PRC szerkesztői ajánlása pedig ezen az oldalon tekinthető meg: <https://journals.aps.org/prc/>

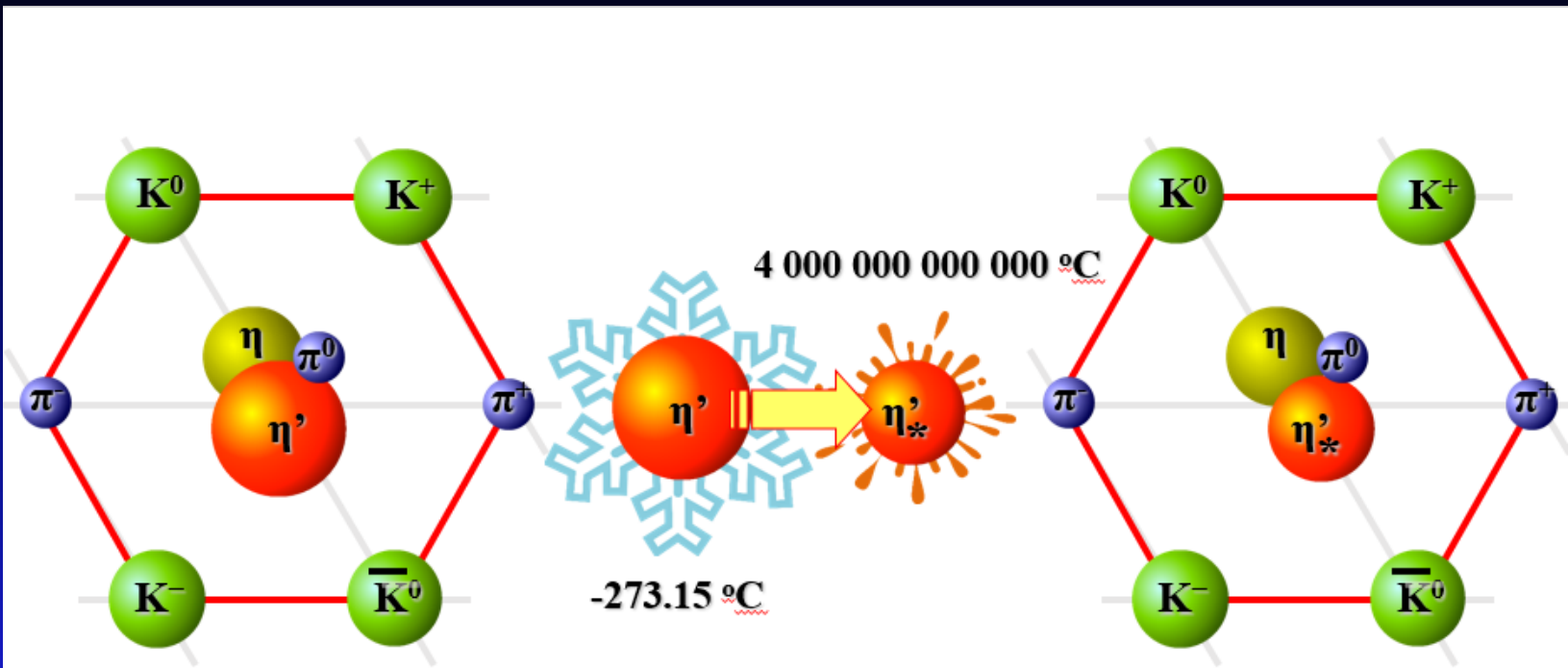
2024 KARÁCSONYA



2024 KARÁCSONYA



PHENIX: 2024 KARÁCSONYI AJÁNDÉK



Az ábra az u, d és s kvarkokból felépülő 9 könnyű, erősen kölcsönható részecskét, azaz a 9 pseudoskalár mezont jelképezi. A golyócskák méretei a tömegeikkel arányosak. A bal oldali ábra ezen szubatomi részecskének a korábbi reakciókban, nagyon hideg környezetben mért tömegeit jelképezi. Megfigyelhetjük rajta, hogy az η' jelű részecske kiugróan nagy tömegű. A tűz a RHIC gyorsító arany-arany ütközéseiben kialakuló rendkívül magas, közel $4\,000\,000\,000\,000$ Celsius fokos hőmérsékletre hevítést jelképezi. Ezen a hőmérsékleten az η' környezete felhevül, megolvad, és közben az η' mezonok tömege közel 40 %-kal lecsökken. A módosult η'_* tömege ezen a hőmérsékleten az η és a többi pseudoskalár mezon tömegéhez hasonlóvá válik: a tékozló η' mezon visszatér családja körébe. Ahogyan a jobb oldali ábra mutatja, ekkor az η'_* mezon túlsúlya eltűnik és egy keresett részecskefizikai szimmetria helyreáll. Az ábra alapja az [arXiv: 1102.2110](https://arxiv.org/abs/1102.2110) 1. sz. ábrája és a PHENIX kollaboráció 2024 decemberében megjelent részletes cikke: [Phys. Rev. C 110, 064909 \(2024\)](https://arxiv.org/abs/2406.14909).

ÖSSZEFOGLALÁS

2010- 2024: A TÉKOZLÓ BOZON VISSZATÉRT
RÉSZECSKEFIZIKAI CSALÁDJA KÖRÉBE!

A FIZIKAI VÁKUUM MEGOLVASZTÁSA (folyt. köv.)

