



A tékozló bozon lehetséges visszatérésének közvetett megfigyelése a **PH**ENIX kísérletben



BGE, Budapest, Hungary

18. Berze TÖK tábor, 2024. július 7. – július 12.

- Ősi-új anyag új formáinak (fázisátmenetek) keresése
- Mérföldkövek a RHIC-nél
- PHENIX adatok: szimmetria helyreállása
- Gyakorlati magyarázat az új jelenségre
- Összefoglalás



7/18/2025

1984: A RHIC gyorsító javaslata

H₂O fázisdiagramja



 H_2O fázisdiagramja. A: szublimációs görbe; B: tenziógörbe; C: olvadáspont-görbe; D: hármaspont; T_c : kritikus hőmérséklet; p_c : kritikus nyomás.

p/atm	<i>Т/</i> К	t/°C
1,0	373,15	100,0
0,006	273,16	0,01
0,032	298,15	25,0
217,5	647,15	374,0

megjegyzés légköri nyomás hármaspont szobahőmérséklet kritikus pont ¹²



Goldstone bosons. Above T_C , hadrons dissolve into quarks and gluons. Above 1p quarks are massless. The indicated trajectories show two avenues for probing the quark-gluon plasma with high energy nucleus-nucleus collisions: by reaching high baryon densities among the hot, compressed fragments of the colliding nuclei, and at very high temperatures in the central rapidity region among thermally produced particles where conditions may approximate those of the early universe. 1989: "Nuclei, as heavy as bulls, through collision Generate new states of matter" /T.D. Lee/





Courtesy of the Tsung Dao (T.D) Lee Library

5

Poem by Prof. T. D. Lee, Nobel Lauerate in Physics

Painting by Li Keran, 1989

Copyright: © 1989 CCAST: **Chinese Center for Advanced Science** and Technology © 2012 Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, China: All Rights Reserved

Special thanks to: UNT Digital Library

New emphasis: on **plural** of state

At least two new states!

1998: ÚJ MÓDSZER

7/18/2025

Effect of Partial U_A(1) Restoration on λ_* Carlo, (⁺0.7 ″±0.7 **PHENIX Phys. Rev. C 97** (2018) 064911: 0.6 NA44 E_{lab} = 200 AGeV (SPS) 0.5 Az ősi-új anyag egyik = 738 MeV S+Pb data sensitive to új formája NEM jön 0.4 létre a CERN SPS in-medium η' modification, 0.3 but gyorsító alacsonyabb energiáin 0.2 **NO EFFECT** – m ֶ́ = 403 MeV 0.1 S. Vance, T. Cs, D. Kharzeev, - mُ/= 176 MeV Phys.Rev.Lett. 81 (1998) 2205-2208 0 0.2 0.3 0.9 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 e-Print: nucl-th/9802074 [nucl-th] m, (GeV)

NA44 S+Pb data + Monte

Várakozás 2000 körül

Nuclear Science

Expansion of the Universe

After the IIg Bang, the subwave expanded and cooled. At about 10⁴ wound, the universe consisted of a step of quarks, gluone, and restrons, and excitons. When the temperature of the Universe, "<u>constant</u>, coded to obsent 10⁴, this have constant into process near directorum, but iter progressed, watter of the process and accross formed description, and librium natical. Still latere, electrons combined with process and does many and the strength of the process and accross formed description. The strength of the process and the second acceleration of the process and accesses formed description of a strength or the progress and below factors and the second acceleration of the process of the strength of the strength or the strength of the str



Radioactivity

Image: Contract of the contract



www.CPEPweb.org



Nuclear Science is the study of the scientists calculate and measure the masses, questions, such as: Why do nucleons stay in What harpeens when nuclei are compressed

universe

3×10



 $\int_{-10^{12}-2}^{3\times10^{12}-10$

 1×10^{12}

00

m

tem

 4×10^{12}



density (kg/m³)

 2×10^{18}

 1×10^{18}

Education Project (CPEP) MS 5086008 LINL Berkeley, CA 94730 USA Support from U.S. Department of Eargy, Emet Orlando Lawrence Berkeley National L

A RHIC gyorsító és négy kísérlete



RHIC mérföldkövei

A RHIC-nél

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

Jellemzői:

Opálos, $R_{AA} \sim 0.2$ Csillapítási hossz ~ 2 fm $C_s = 0.35 \pm 0.05$ Hubble állandó: (2-4) 10²² Hz

Nem CSAK egy, hanem két átmenet!

RHIC-nél FEHÉR hadronanyagban

az η' mezon tömege jelentősen lecsökken,

egy elveszett szimmetria helyreáll



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

R. Vértesi, T. Cs, J. Sziklai Nucl.Phys. A830 (2009) 631C-632C Phys. Rev. C83 (2011) 054903

Korábban közölt STAR és PHENIX adatok újra-elemzése!

RHIC mérföldkövei

A KVARKOK FOLYADÉKÁNAK MEGLEPŐ TULAJDONSÁGAI MÉRFÖLDKÖVEK

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

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

Élet és Tudomány 2010 év 49 szám 1542. oldal

7/18/2025

Cs.T. Zimányi 2010 Nehézionfizikai Téli Iskola előadása

2008: Az LHC, a Nagy Hadronütköztető

The Large Hadron Collider era

7/18/202



A 10 LHC KÍSÉRLET (2025-IG): ALICE, ATLAS, CMS, FASER, LHCb, LHCf, MATHUSLA, MILLIQAN, MOEDAL és TOTEM. A 2025-ös ÁTTÖRÉSI DÍJ NYERTESEI: A NÉGY NAGY LHC KÍSÉRLET, AZ ALICE, ATLAS, CMS, LHCb.



BOZON: sokan lehetnek pontosan azonos állapotban. Például: foton, Higgs-bozon, pion, kaon ...

FERMION: csak egyedül lehet pontosan azonos állapotban. Például: elektron, pozitron, proton, neutron

PHENIX Run History

Mára már a múlté

16 évnyi sikeres működés, 9 különböző ütköztetett részecsketípus és 9 különböző ütközési energia mellett.



A PHENIX ugyan már nem végez aktív adatgyűjtést, de az adatelemzés továbbra is zajlik, elsősorban a legújabb adatkészletekre koncentrálva.

Ütközés	Mérés éve	
Au+Au	2001, 2002, 2004, 2007, 2008, <mark>2010</mark> , 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	

Muon Arms

- Rapidity coverage: 1.2<|y|<2.2
- Muon Tracking followed by Muon Identifier
 - Stainless steel and copper absorbers for hadron rejection
- BBC measures collision vertex along beam axis





Central Arms

- Rapidity coverage: |y|<0.35
- Charged particle tracks and momentum pad and drift chambers
- Ring Imaging Cherenkov detector for pion rejection
- Energy / momentum matching of charged particles using EMCal clusters

U_A(1) szimmetria helyreállása



7/18/202 PHENIX adatok + Monte Carlo szimulációk, PHENIX Phys. Rev. C 97 (2018) 064911: 0-30 % Au+Au @ 200 GeV Levy Bose-Einstein érzékeny módszer az η' módosulására

2024 karácsonya



EDITORS' SUGGESTION

<u>Centrality dependence of Lévy-stable two-pion Bose-Einstein</u> <u>correlations in $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV Au + Au collisions</u>

20 DECEMBER, 2024

Color deconfinement and chiral-symmetry restoration have long been predicted by QCD theory. Color deconfinement in the form of a nearly perfect fluid of quarks was reported by all four RHIC experiments in 2005. Now, the PHENIX Collaboration details two-pion Lévy-stable Bose-Einstein correlation data in Au+Au collisions at the top RHIC energy. They report a significant reduction of the mass of the η' meson in hot and dense hadronic, color-confining matter. This implies a second transition in QCD by the return of the so-called prodigal Goldstone boson—a specific kind of partial chiral-symmetry restoration—and calls for further, challenging experimental studies, aiming at direct measurements of identified η' spectra in high-energy heavy-ion collisions.

N. J. Abdulameer *et al.* (PHENIX Collaboration) Phys. Rev. C **110**, 064909 (2024)

Az ELTE, a HUN-REN Wigner Kutatóközpont és a MATE Femtoszkópiai 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: <u>https://journals.aps.org/prc/abstract/10.1103/PhysRevC.110.064909</u>. A PRC szerkesztői ajánlása pedig ezen az oldalon tekinthető meg: <u>https://journals.aps.org/prc/</u>

2024: "This implies a second transition in QCD..."



EDITORS' SUGGESTION <u>Centrality dependence of Lévy-stable two-pion Bose-Einstein</u> <u>correlations in $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV Au + Au <u>collisions</u></u>

20 DECEMBER, 2024

Color deconfinement and chiral-symmetry restoration have long been predicted by QCD theory. Color deconfinement in the form of a nearly perfect fluid of quarks was reported by all four RHIC experiments in 2005. Now, the PHENIX Collaboration details two-pion Lévy-stable Bose-Einstein correlation data in Au+Au collisions at the top RHIC energy. They report a significant reduction of the mass of the η' meson in hot and dense hadronic, color-confining matter. This implies a second transition in QCD by the return of the so-called prodigal Goldstone boson—a specific kind of partial chiral-symmetry restoration—and calls for further, challenging experimental studies, aiming at direct measurements of identified η' spectra in high-energy heavy-ion collisions.

N. J. Abdulameer *et al.* (PHENIX Collaboration) Phys. Rev. C **110**, 064909 (2024)



2024 karácsonya



2024 karácsonya



Az ábra az u, d és s kvarkokból felépülő 9 könnyű, erősen kölcsönható részecskét, azaz a 9 pszeudoskalár mezont jelképezi. A golyócskák méretei a tömegeikkel arányosak. A bal oldali ábra ezen szubatomi részecskéknek 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 pszeudoskalár 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 <u>arXiv: 1102.2110</u> 1. sz. ábrája és a PHENIX kollaboráció 2024 decemberében megjelent részletes cikke: Phys. Rev. C 110, 064909 (2024).

PHENIX: gyakorlati alkalmazás



Közvetlen megfigyelés



7/18/2025

PHENIX: közvetett megfigyelés



Alacsony energia: csemetekert

Téridőkép, ha az ütközési energia nem elég magas



Elég nagy energia: magról vetett

Téridőkép, ha az ütközési energia elég magas



Elméleti értelmezés: a PHENIX mérés válogat!



Elméleti értelmezés: a PHENIX mérés válogat!



In-medium mass of η' is determined with the help of Levy Bose-Einstein correlation measurements and Monte-Carlo simulations to be similar to the vacuum mass of η in each centrality class: indirectly, return of the prodigal Goldstone boson η' Centrality dependent selection power, successful: KHM, KLMW, PW: $m^*(\eta') \sim m(\eta)$

MAGYAR KUTATÓK, WOLF GYÖRGY SIKERE IS!

Köszönet a támogatóinknak

Kutatásainkat közvetlenül az

- Amerikai Magyar Fulbright Alapítvány,
- Eötvös Loránd Tudományegyetem,
- Hungarian American Enterprise Scholarship Fund (HAESF),
- HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont,
- Magyar Agrár és Élettudományi Egyetem (MATE) Kutatási Kiválósági Programok (KKP és KKPCs),

28

- Magyar Tudományos Akadémia (MTA) Bolyai János kutatási ösztöndíj,
- MTA National Science Foundation (NSF, USA),
- Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal (NKFIH),
- NKFIH "OTKA" kutatási témapályázatok,
- NKFIH EFOP (Emberi Erőforrás Fejlesztési Operatív Program),
- NKFIH TKP (Tématerületi Kiválósági Program),
- Országos Kutatási Alapprogramok (OTKA)

pályázatai, valamint a PHENIX kísérlet működését finanszírozó Energiaügyi Minisztérium: USA Department of Energy (DOE), a japán KEK és RIKEN, valamint az amerikai – japán RIKEN – BNL Kutatási Központ, továbbá számos nemzetközi tudományfinanszírozó szervezet támogatta. A PHENIX kísérletet támogató valamennyi szervezet felsorolását lásd <u>a cikk végén</u>, illetve az alábbi honlapon: <u>https://www.bnl.gov/rhic/funding.php</u>.

A PHENIX kísérlet cikkét 5 földrész 15 országának 76 kutatóhelyéről 402 kutató jegyezte, köztük öt magyar intézmény fizikusai:

- Debreceni Egyetem, Debrecen,
- Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest,
- HUN-REN ATOMKI, Debrecen,
- HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont, Budapest,
- MATE Műszaki Intézet, Femtoszkópia Laboratórium, Gyöngyös.

Köszönet a magyar kutatóknak!

A PHENIX-es cikket az alábbi magyar kutatók készítették elő:

- Lökös Sándor (a szerkesztő bizottság elnöke, PhD, tudományos munkatárs, MATE Műszaki Intézet Femtoszkópia Laboratórium, Gyöngyös)
- Csanád Máté (az MTA Doktora, egyetemi tanár, Eötvös Loránd Tudományegyetem Fizikai Intézet, Atomfizikai Tanszék, Budapest)
- Csörgő Tamás (az Európai Akadémia tagja, kutatóprofesszor, MATE Műszaki Intézet Femtoszkópia Lab, Gyöngyös, és HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont, Budapest)
- Kasza Gábor (PhD, tudományos segédmunkatárs, MATE Műszaki Intézet Femtoszkópia Lab, Gyöngyös, és tudományos munkatárs HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont, Budapest)
- Wesley James Metzger (PhD, címzetes egyetemi tanár, MATE Műszaki Intézet Femtoszkópia Lab, Gyöngyös)

30

- Nagy Márton (PhD, habilitált egyetemi docens, Eötvös Loránd Tudományegyetem Fizikai Intézet, Atomfizikai Tanszék, Budapest)
- Kincses Dániel (PhD, posztdoktori kutató, Eötvös Loránd Tudományegyetem Fizikai Intézet, Atomfizikai Tanszék, Budapest)
- Novák Tamás (PhD, habilitált egyetemi docens, MATE Műszaki Intézet Femtoszkópia Lab, Gyöngyös)
- Ster András (ny. fizikus, HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont, Budapest)

A PHENIX kísérlet eredményeit magyar kutatók (Csörgő Tamás, Lökös Sándor) mutathatták be a PHENIX kísérlet nevében rangos nemzetközi konferenciákon, 2024 során, és a megjelenés után a 2025 áprilisi <u>59</u>. Rencontres de Moriond: QCD 2025 konferencián. Eredményünket a konferencia <u>kísérleti összefoglaló előadásában</u> is kiemelték.



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



The HBT-effect in Femtoscopy

- R. Hanbury Brown, R.Q.Twiss observed Sirius with radio telescopes
- R. Hanbury Brown and R. Q. Twiss 1956 Nature 178
 - Intensity correlations as a function of detector distance
 - Measuring size of point-like sources
- Goldhaber et al: applicable in high energy physics: (for identical pions)
- G. Goldhaber et al 1959 Phys.Rev.Lett. 3 181
 - Momentum correlation C(q) is related to the source S(x): $C(q) \cong 1 + |\widetilde{S}(q)|^2$, where $\widetilde{S}(q)$ is Fourier transform of S(q).









Example Correlation Function

- Fit with calculation based on Lévy distribution
- Physical parameters: R, α , λ measured versus pair m_{T}
- *R*: homogeneity length, dynamics, sizes
- α: shape, criticality, anomalous diffusion
- λ: particle creation mechanisms, in-medium mass modification

Lévy works well



2018: LÉVY SHAPE OF BOSE-Einstein correlations



PHENIX Phys. Rev. C 97 (2018) 064911: 0-30 % Au+Au @ 200 GeV Lévy-stable 2-pion Bose-Einstein CF Good CL, both for (a): (--) and for (b): (++) pairs

\textbf{M}_{T} and centrality dependence of lévy λ



M_T DEPENDENCE OF LÉVY λ/ λ_{max}



2024: "This implies a second transition in QCD..."

EDITORS' SUGGESTION <u>Centrality dependence of Lévy-stable two-pion Bose-Einstein</u> <u>correlations in $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV Au + Au collisions</u>

20 DECEMBER, 2024

Color deconfinement and chiral-symmetry restoration have long been predicted by QCD theory. Color deconfinement in the form of a nearly perfect fluid of quarks was reported by all four RHIC experiments in 2005. Now, the PHENIX Collaboration details two-pion Lévy-stable Bose-Einstein correlation data in Au+Au collisions at the top RHIC energy. They report a significant reduction of the mass of the η' meson in hot and dense hadronic, color-confining matter. This implies a second transition in QCD by the return of the so-called prodigal Goldstone boson—a specific kind of partial chiral-symmetry restoration—and calls for further, challenging experimental studies, aiming at direct measurements of identified η' spectra in high-energy heavy-ion collisions.

N. J. Abdulameer *et al.* (PHENIX Collaboration) Phys. Rev. C **110**, 064909 (2024)

Köszönöm a figyelmet!