# DOKTORI ÉRTEKEZÉS

## A királis szimmetria szerepe a kvark – hadron fázisátmenetben

Papp Gábor
Ph.D.

Tézisfüzet

MTA Elméleti Fizikai Kutatócsoport
ELTE
Budapest
2000

# 1 Témaválasztás

Napjaink nagyenergiás fizikájának egyik kiemelt kutatási területe a hadronikus anyag – kvarkanyag fázisátalakulás. Az erős kölcsönhatás jellege miatt a kvarkok "kötött" állapotai, a mezonok és a barionok, igen kevéssé hasonlítanak alkotóelemeikre, így ez az átalakulás a szabadsági fokok gyakorlatilag teljes átrendeződésével jár. A kutatást tovább nehezíti, hogy a kvark állapot közvetlen kísérleti megfigyelése nehézségekbe ütközik. Egyfelől a kvarkokat leíró elmélet, a kvantumszíndinamika (QCD) egyik alapja, hogy "szabad" kvark nem figyelhető meg, a természetben csak a kvarkok "színtelen", kötött kombinációival találkozunk. Másfelől, habár az előző feltétel nem zárja ki egy sok kvarkból (és a köztük levő kölcsönhatást hordozó gluonokból) álló állapot, az ún. kvark-gluon plazma (QGP) lehetőségét, ennek egyértelmű azonosítása a CERN SPS-ben folyó kísérleti erőfeszítések ellenére még várat magára. (Remélhetőleg a jelenleg beüzemelés alatt álló brookhaveni RHIC gyorsító, illetve a közeljövőre tervezett CERN LHC gyorsító képes lesz detektálni a QGP-t).

A fázisátmenet elméleti modellezése terén a legteljesebb leírást az ún. rácsszámolások adják. Ezek a QCD euklideszi térben felírt pályaintegráljának statisztikus fizikai analógiája alapján Monte-Carlo módszerrel számolják ki a fizikai mennyiségeknek az állapotösszeggel súlyozott értékét. Annak ellenére, hogy a rácsszámolások igen hatékonyak, és gyakran olyan mennyiségeket is ki lehet "mérni" velük, amikre kísérletileg nem vagyunk képesek, nem igazán fedik fel a fizikai összefüggéseket. További hátrányuk, hogy napjainkban még nem alkalmazhatók véges barionsűrűség mellett. A fázisátmenet egy-egy aspektusának jellemzésére különböző egyszerű, fenomenologikus modelleket használunk, melyeket a rácsszámolások eredményével vetünk össze.

A hadronikus – kvark fázisátmenet tanulmányozása során igen hamar kiderült, hogy valójában három átmenet van: a királis, az $U_A(1)$ (axiális) szimmetria restaurációja és a bezárás. A rácsszámolások (nulla barionsűrűségen) a három átmenetet igen közel találták egymáshoz, és a legújabb, ún. domain wall fermion típusú számolások nem zárják ki annak lehetőségét, hogy ezek az átmenetek ugyanazon a hőmérsékleten történjenek.

# 2 Tudományos célkitűzés

A kutatás fő célja az elméletileg megjósolt hadron – kvark átmenet egyik fázisátalakulásának, a királis átmenetnek részletes elméleti vizsgálata. A jelenség leírásához egy olyan minimálmodellt használok, mely tiszteletben tartja az összes lényeges szimmetriát és elhanyagolja a dinamikát. Ez utóbbiról annyit teszek fel, hogy a gluonok erős csatolása következtében a kvarkok közti kölcsönhatás kaotikus.

További cél az axiális szimmetria helyreállásának, valamint az $U_A(1)$ anomália és a topologia kapcsolatának vizsgálata. Ezzel összefüggésben megvizsgálom a QCD CP sértő $\theta$ szögének szerepét.

# 3 Alkalmazott kutatási módszerek

A kvantumszíndinamika alacsony energiás viselkedését szinte kizárólag a legalacsonyabb energiájú részecske, a királis limeszben tömegtelen pion határozza meg. Ebben a határesetben a dinamika szerepe elhanyagolhatóvá válik, és a kvarkokat véges hőmérsékleten leíró, az euklideszi térben eredetileg négy dimenziós (három folytonos és egy diszkrét) térelmélet egy nulla dimenziós, az eredeti elmélet szimmetriáit megőrző térelméletté redukálódik. A kvarkok közti kölcsönhatást közvetítő gluonok dinamikáját kaotikusnak tételezve fel, ez a nulla dimenziós elmélet véletlen számokkal jellemezhető, a királis szimmetria pedig mátrixba rendezi ezeket a számokat, az eredeti elméletet véletlen mátrix modellé (RMM – Random Matrix Model) egyszerűsítve. Ez az elmélet viszonylag könnyen megoldható, *nem perturbatív* módon.

A külső paraméterek, mint a tömeg, hőmérséklet, kémiai potenciál, a CP sértés szöge, az előbb említett véletlen mátrix mellé egy determinisztikus mátrixot határoz meg. Ezáltal végeredményben egy determinisztikus és egy véletlen mátrix összegének sajátérték-egyenletét kell megoldani az energiaszintek és a korrelációs függvények meghatározásához.

A kutatás során ennek a véletlen mátrix modellnek a tulajdonságait vizsgáltam, a kapott eredményeket pedig az ismert rácsszámolásokkal hasonlítottam össze illetve – ahol nem állt rendelkezésre ilyen eredmény – jóslatokat adtam meg.

A véletlen mátrix modell csak az igen alacsony energiájú gerjesztések leírására alkalmas. Alkalmazhatósági határának megállapításához túl kell lépni e modellen. Az alacsonyenergiás viselkedés leírásának természetes kiterjesztését a diffúzió elmélete adja meg, melynek határesete visszaadja a véletlen mátrix modellt.

Az alacsonyenergiás tulajdonságok vizsgálatának egy másik, *nem perturbatív* módja a renormalizációs flow egyenletek. Az eljárás lehetőséget ad arra, hogy egy modell adott impulzusskálán ismert paraméterei alapján kiszámoljuk ezen paraméterek értékét más, például "alacsony" (nulla) impulzusskálán. Ezzel párhuzamosan a módszer megadja, hogy melyek egy effektív elmélet releváns, illetve irreleváns operátorai.

# 4 Az új tudományos eredmények

1. Megmutattam, hogy az RMM minőségileg jó leírását adja a fázisátalakulásnak [A1, A2, A3, A4, B1, B2].

2. Megmutattam, hogy a "quenched" (dinamikai fermionok nélküli) rácsszámolások véges kémiai potenciálon nem a QCD-t oldják meg [A5, A6, B3].

3. Sikeresen megmagyaráztam az $U_A(1)$ anomáliát, és a QCD $\theta$ szögfüggést az RMM segítségével [A7, A8, B2, B4, B5]. A véletlen mátrix modell a királis és az axiál szimmetria helyreállását ugyanarra a hőmérsékletre jósolja [B6].

4. Megmutattam, hogy az RMM fázisszerkezet [B2] minőségileg igen hasonló az NJL (átlagtér) modellhez [A9, A10]. A kvark-kvark kölcsönhatással kiterjesztett NJL modell keretében megvizsgáltam az ún. "színszupravezetés" megjelenését [A10].

5. Az RMM mikroszkopikus határesetének ismeretében megadtam a kvark kondenzátum viselkedését különböző tömegű dinamikai (sea) és próba (valence) kvarkok esetére, és a kapott formulát összehasonlítottam a rácsszámolások eredményével [A11, A12].

6. Megmutattam, hogy a QCD infravörös spektruma leírható diffúziós egyenletek segítségével és ezen egyenletek alacsony energiás határértéke megadja az RMM-et [A13, A14, A15, A16, B7, A17, B8].

7. Az átlagtér modellen túlmutató kritikus exponensek vizsgálatát végeztem el renormalizáiós flow egyenletek megoldásával a lineáris $\sigma$ modellben [A18, A19].

8. Az RMM QCD alkalmazások során kifejlesztett módszereket sikeresen használtam a fizika más területein is. Biofizikai és fizikai kémiai alkalmazásként kiszámoltam a fehérje háttérben levő hosszú láncmolekulák spektrumát és az állapotok bomlási idejét [A20, A21, A22, A23, A24]. Káoszelméleti vonatkozásként megadtam a sokcsatornás kaotikus szórás spektrumának és korrelációs függvényének egyszerű levezetését végtelen sok csatorna esetén [A25, A26, B9]. Az RMM módszert használva szilárdtestfizikai területen megadtam a lokalizáció – delokalizáció átmenet minőségi leírását külső mágneses térbe helyezett szupravezető esetére [A27, A26, A28, B9].

## A tézispontokhoz tartozó, referált folyóiratban megjelent cikkek:


[**A1**] M. A. Nowak, G. Papp and I. Zahed :
*QCD-Inspired Spectra from Blue's Functions*
Physics Letters **B389** (1996) 137.

[**A2**] M. A. Nowak, G. Papp and I. Zahed :
*Lattice QCD Spectra at Finite Temperature: a Random Matrix Approach*
Physics Letters **B389** (1996) 341.

[**A3**] G. Papp :
*QCD Spectra and Random Matrix Models*
APH Heavy Ion Physics **5** (1997) 255.

[**A4**] R. A. Janik, M. A. Nowak, G. Papp and I. Zahed :
*Various Shades of Blue's Functions*
Acta Physica Polonica **B28** (1997) 2949.

[**A5**] R. A. Janik, M. A. Nowak, G. Papp and I. Zahed :
*Chiral Symmetry in Matter*
Acta Phys. Polonica B27 (1996) 3271.

[**A6**] R. A. Janik, M. A. Nowak, G. Papp and I. Zahed :
*Macroscopic Universality: Why Quenched QCD in Matter is Subtle?*
Physical Review Letters **77** (1996) 4876.

[**A7**] R. A. Janik, M. A. Nowak, G. Papp and I. Zahed :
*The $U(1)$ Problem in Chiral Random Matrix Models*
Nuclear Physics **B498** (1997) 313.

[**A8**] R. A. Janik, M. A. Nowak, G. Papp and I. Zahed :
*Theta Vacuum: A Matrix Model*
hep-ph/9901390; submitted to Acta Phys. Pol.

[**A9**] R. A. Janik, M. A. Nowak, G. Papp and I. Zahed :
*A Four-Fermi Model in 0+1 Dimensions in Matter*
Nuclear Physics **A642** (1998) 191.

[**A10**] T. M. Schwarz, S. P. Klevansky and G. Papp :
*The phase diagram and bulk thermodynamical quantities in the NJL model at*

*finite temperature and density*
Physical Review **C60** (1999) 055205.

[**A11**] R. A. Janik, M. A. Nowak, G. Papp and I. Zahed :
*Critical Scaling at Zero Virtuality in QCD*
Physics Letters **B446** (1999) 9.

[**A12**] R. A. Janik, M. A. Nowak, G. Papp and I. Zahed :
*Chiral Random Matrix Models in QCD*
Acta Physica Polonica **B29** (1998) 3957.

[**A13**] R. A. Janik, M. A. Nowak, G. Papp and I. Zahed :
*Chiral Disorder in QCD*
Physical Review Letters **81** (1998) 264.

[**A14**] R. A. Janik, M. A. Nowak, G. Papp and I. Zahed :
*Chiral Disorder and QCD at Finite Chemical Potential*
Physics Letters **B440** (1998) 123.

[**A15**] R. A. Janik, M. A. Nowak, G. Papp and I. Zahed :
*Chiral Disorder and QCD Phase Transitions*
Physics Letters **B442** (1998) 300.

[**A16**] R. A. Janik, M. A. Nowak, G. Papp and I. Zahed :
*Chiral Disorder and Diffusion of Light Quarks in the QCD Vacuum*
Acta Phys. Polonica **B29** (1998) 3215.

[**A17**] R. A. Janik, M. A. Nowak, G. Papp and I. Zahed :
*Two-Color QCD and Aharonov-Bohm Fluxes*
hep-ph/9807499.

[**A18**] J. Meyer, G. Papp, H.-J. Pirner and T. Kunihiro :
*Renormalization Group Flow Equation at Finite Density*
Physical Review **C** (2000) in press; `nucl-th/9908019`.

[**A19**] G. Papp, B.-J. Schaefer, H.-J. Pirner and J. Wambach :
*On the Convergence of the Expansion of Renormalization Group Flow Equation*
Physical Review **D** (2000) in press; `hep-ph/9909246`.

[**A20**] E. Gudowska-Nowak, G. Papp and J. Brickmann :
*Two-level system with noise: Blue's function approach.*
Chemical Physics **220** (1997) 125.

[**A21**] E. Gudowska-Nowak, G. Papp and J. Brickmann :
*Bridged-assisted Electron Transfer. Random Matrix Theory Approach*
Chemical Physics **223** (1998) 247.

[**A22**] E. Gudowska-Nowak, G. Papp and J. Brickmann :
*Disorder Effects in Dimerized Bridged Molecular Systems*
Journal of Physical Chemistry **A102** (1998) 9554.

[**A23**] E. Gudowska-Nowak, G. Papp and J. Brickmann :
*Characteristics of Quantum Open Systems: Free Random Variables Approach*
Acta Physica Polonica **B29** (1998) 1803.

[**A24**] E. Gudowska-Nowak, J. Brickmann and G. Papp :
*Disorder Effects in Bridged Molecular Systems. Random Matrix Theory Approach.*
Cellular & Molecular Biology Letters **4** (1999) 19.

[**A25**] R. A. Janik, M. A. Nowak, G. Papp, J. Wambach and I. Zahed :
*Nonhermitean Random Matrix Models : a Free Random Variable Approach*
Physical Review **E55** (1997) 4100.

[**A26**] R. A. Janik, W. Nörenberg, M. A. Nowak, G. Papp and I. Zahed :
*Correlations of Eigenvectors for Non-Hermitian Random-Matrix Models*
Physical Review **E60** (1999) 2699.

[**A27**] R. A. Janik, M. A. Nowak, G. Papp and I. Zahed :
*Nonhermitian Random Matrix Models*
Nuclear Physics **B501** (1997) 603.

[**A28**] R. A. Janik, M. A. Nowak, G. Papp and I. Zahed :
*Localization Transition from Free Random Variables*
Acta Phys. Polonica **B30** (1999) 45.

## A tézispontokhoz tartozó egyéb publikációk:


[**B1**] R. A. Janik, M. A. Nowak, G. Papp and I. Zahed :
*Chiral Disorder and the QCD Dirac Spectrum*
Progress of Theoretical Physics Supplement **131** (1998) 471.

[**B2**] R. A. Janik, M. A. Nowak, G. Papp and I. Zahed :
*Random Matrices and Chiral Symmetry in QCD*
in Proc. of "Hadrons in Dense Matter", Seoul, 1997, World Scientific; `hep-ph/9806370`.

[**B3**] R. A. Janik, M. A. Nowak, G. Papp and I. Zahed :
*New Developments in Non-Hermitian Random Matrix Models*
in New Developments in Quantum Field Theory, ed. by P.H. Damgaard and J. Jurkiewicz, NATO ASI Series B: Physics Vol. **366**, p.297, Plenum Press, New York (1998); `hep-ph/9708418`.

[**B4**] R. A. Janik, M. A. Nowak, G. Papp and I. Zahed :
*Resolution of UA(1) Problem in Chiral Random Matrix Models*
XXVth Hirschegg Workshop, 1997, p79.

[**B5**] R. A. Janik, M. A. Nowak, G. Papp and I. Zahed :
*Theta Vacuum in a Random Matrix Model*
Workshop "Understanding Deconfinement in QCD", ECT*, Trento, 1-13/March, 1999; `hep-ph/9905306`.

[**B6**] R. A. Janik, M. A. Nowak, G. Papp and I. Zahed :
*U(1) Problem at Finite Temperature*
Proceedings of the Light-Cone Workshop "New Directions in QCD", June 1999, Kyungju, Korea; hep-lat/9911024.

[**B7**] R. A. Janik, M. A. Nowak, G. Papp and I. Zahed :
*Chiral Disorder and Diffusion in The QCD Vacuum*
Rencontres de Moriond 1999 (QCD and High Energy Hadronic Interactions), Les Arcs, France, March 20-27, 1999; `hep-ph/9905274`.

[**B8**] R. A. Janik, M. A. Nowak, G. Papp and I. Zahed :
*Chiral Disorder in Two-Color QCD with Abelian External Fluxes*
Proceedings of the LATTICE99 Conference; `hep-lat/9909060`.

[**B9**] R. A. Janik, M. A. Nowak, G. Papp and I. Zahed :
*Green's Functions in Non-hermitian Random Matrix Models*
Workshop "Dynamics of Complex Systems" May 1999, Dresden, Germany; `cond-mat/9909085`.