

## HOLOQRAFİK KXD-NİN TERMAL YUMŞAQ DİVAR MODELİNDƏ $\pi$ -MEZON-NUKLON – $\Delta$ BARİON QARŞILIQLI TƏSİR SABİTİ

N.Ə. NƏSİBOVA <sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Azərbaycan Respublikası Elm və Təhsil Nazirliyi Fizika İnstitutu

H.Cavid küç., 131, AZ 1073, Bakı, Azərbaycan

<sup>2</sup>Nəzəri Fizika Mərkəzi, Xəzər Universiteti,

41 Məhsəti küçəsi, AZ1096, Bakı, Azərbaycan

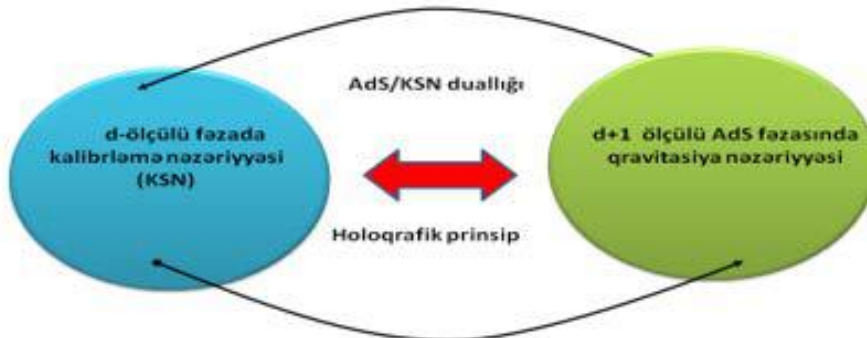
[n.nesibli88@gmail.com](mailto:n.nesibli88@gmail.com)

**Açar sözlər:** AdS/KSN duallığı, yumşaq divar modeli, vek tor mezon, aksial mezon, güclü qarşılıqlı təsir sabiti.

### Giriş

Nəzəri fizika sahəsində aparılan tədqiqatlarda sonlu temperaturda hadronların davranışının öyrənilməsi, həm mezon və barionların fenomenologiyasını, həm də güclü qarşılıqlı təsirlərin təməl prinsiplərini izah edən Kvant Xromodinamikası (KXD) nəzəriyyəsinin başa düşülməsinə böyük töhfə verir [1-19]. Hadronların daxili strukturunu və dinamikasını anlamaq üçün illər ərzində müxtəlif nəzəri modellər hazırlanmışdır. Bu modellər, fərqli fiziki şərtlər və enerji səviyyələrində

hadronların davranışını təsvir etməyə imkan verir [16, 17]. Bu kontekstdə Anti deSitter/Konform Sahə Nəzəriyyəsi (AdS/KSN) [1, 2] duallığına əsaslanan holoqrafik KXD (AdS/KXD) modelləri xüsusilə əhəmiyyətlidir. AdS/KSN uyğunluğu bir-birindən tamamilə fərqlənən  $d$  və  $d+1$  ölçülü iki nəzəriyyə arasında uyğunluq yaradır. Bu nəzəriyyələrdən biri Kalibrəmə Sahə Nəzəriyyəsi (KSN), digəri isə AdS fəzasında yerləşən qravitasiya nəzəriyyəsidir. İki nəzəriyyə arasında uyğunluq şəkil 1-də təsvir olunmuşdur.



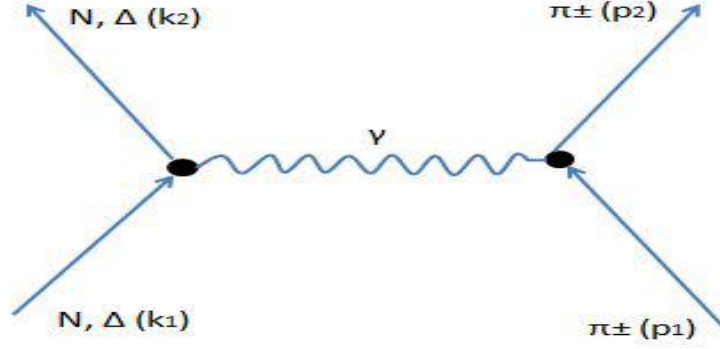
Şəkil 1. AdS/KSN uyğunluğunun təsviri [15]

Holoqrafik modellər KXD-nin güclü qarşılıqlı təsir rejimini öyrənmək üçün əlverişlidir, çünki onlar həm kiçik, həm də böyük impuls ötürülmə intervalını əhatə edir. AdS/KXD çərçivəsində yumşaq divar modeli hadronların daxili strukturunu, mezon və barionların spektrini və qarşılıqlı təsirlərini, həm vakuumda, həm də isti mühitdə təsvir etməyə imkan verir [11–14]. Mühitin temperaturunun hadronların fiziki kəmiyyətlərinə təsirləri isə yumşaq divar modelinə temperaturdan asılı dilaton sahəsi daxil edilməklə öyrənilir (termal yumşaq divar modeli) [3, 15]. Bu yanaşma, hadron strukturlarının temperaturun təsirindən necə dəyişdiyini, form faktorlardan tutmuş kütləyə, radiusa və mezon-barion qarşılıqlı təsir sabitlərinə qədər bir çox əhəmiyyətli fiziki kəmiyyətləri hesablamaya imkan verir [3-16]. Termal yumşaq divar modeli xüsusilə pion kimi yüngül psevdoskalara diqqət yetirir, çünki pion KXD-də spontan kiral simmetriya pozulmasının pseudo-Qoldstoun zərrəciklərindən biridir və onun xüsusiyyətləri nəzəri modellərin doğruluğunu yoxlamaq üçün idealdir [14]. Pionun form faktoru, kütləsi, yük radiusu,

parton paylanma funksiyası (PPF), qismən ümumi paylanma funksiyası (ÜPF) və pion-barion qarşılıqlı təsir sabitlərinin temperaturdan asılılığı KXD-nin aşağı enerji dinamikasını və hadronların isti mühitdə davranışını öyrənmək üçün vacibdir. Bu biliklər yalnız ağır ion toqquşmaları və nüvə fizikasında deyil, həm də neytron ulduzları və kosmik strukturların formalaşması kimi astrofizik hadisələrdə də tətbiq edilir [14]. Yumşaq divar modelinin əsas üstünlüyü odur ki, o, həm vakuumda, həm də sonlu temperatur mühitində hadronların dinamikasını realistik şəkildə təsvir edə bilir, həmçinin müxtəlif form faktorları və qarşılıqlı təsir sabitlərini hesablayaraq KXD-nin qeyri-perturbativ sahəsini tədqiq etməyə imkan verir.

### Pion-nuklon- $\Delta$ -barion qarşılıqlı təsir sabiti

İndi biz termal yumşaq divar modelində pion-nuklon- $\Delta$ -barion keçid qarşılıqlı təsir sabitinin sonlu temperaturda ifadələrini çıxarıyıq.


 Şəkil 2. Pionun nuklon və  $\Delta$ -barionla virtual foton vasitəsilə qarşılıqlı təsirini göstərən diaqram [14].

Biz pion-nuklon- $\Delta$ -barion qarşılıqlı təsir sabitinin ifadələrini almaq üçün əvvəlcə yumşaq-divar modelində  $AdS$  fəzası daxilindəki  $\Delta$ -barion və nuklon sahələrinin psevdoskalyar sahə ilə qarşılıqlı təsirinə uyğun  $S$  təsirinin ifadəsini aşağıdakı şəkildə yazırıq:

$$S = \int d^4x dr e^{-k_T^2 r^2} \sqrt{g} \mathcal{L}_{\pi N \Delta}(x, r, T). \quad (1)$$

Burada  $x$ - Minkovski koordinatını,  $r$ -isə  $AdS$  fəzasının 5-ci koordinatını ifadə edir və tısbəgə koordinat adlanır [3-15].  $\mathcal{L}_{\pi N \Delta}(x, r, T)$ -hadron qarşılıqlı təsir laqranjiani,  $\sqrt{|g|} = \frac{R^2}{r^2} \equiv e^{2A(r)}$  olmaqla  $AdS$  fəzasının metrikasının determinanını [15],  $R=1$   $AdS$  fəzasının radiusudur. Temperaturdan asılı dilaton sahəsi  $\varphi(r, T)$  aşağıdakı şəkildə verilir:

$$\varphi(r, T) = K_T^2 r^2, \quad (2)$$

$$K_T^2 = (1 + \rho_T) k^2, \quad (3)$$

$$\rho_T = \left( \frac{9\alpha\pi^2}{16} - \frac{N_f^2 - 1}{N_f} \right) \frac{T^2}{12F^2} + - \frac{N_f^2 - 1}{2N_f^2} \left( \frac{T^2}{12F^2} \right)^2. \quad (4)$$

Burada,  $k=0.401$  olmaqla model parametri,  $N_f = 2, 3, 4 \dots$  kvark rayihə parametri,  $F = 0.087 \text{ GeV}$  pion parçalanma sabiti və  $\alpha = 0, 0.1, 0.2 \dots$  olmaqla kiçik qiymətlər alan sərbəst parametrdir.

Sonlu temperaturda nuklon- $\Delta$ -barion keçid cərəyanlarının qarşılıqlı təsir laqranjiani  $T=0$  halına uyğun olaraq aşağıdakı şəkildə yazılır [16]:

$$\mathcal{L}_{\pi N \Delta}^{(0)} = \alpha_1 \left( \bar{\Psi}_1^M(x, r, T) \Gamma^N (F_L)_{MN}(x, r, T) N_1(x, r, T) - \bar{\Psi}_2^M(x, r, T) \Gamma^N (F_R)_{MN}(x, r, T) N_2(x, r, T) \right). \quad (5)$$

Burada,  $\Psi(x, r, T)$ - $\Delta$ -barion,  $N(x, r, T)$  isə nuklon daxil sahələrini təsvir edir. Temperaturdan asılı 5-ölçülü  $N_1(x, r, T)$  və  $N_2(x, r, T)$  spinorları (eyni qayda ilə  $\Delta$ -barionlar üçün  $\Psi_{1,2}(x, r, T)$  və  $\bar{\Psi}_{1,2}(x, r, T)$ ) aşağıdakı

şəkildə Furry çevirməsi vasitəsilə impuls fəzasında temperaturun təsirinin nəzərə alınmadığı hala uyğun olaraq yazılır:

$$\begin{aligned} N_{1,2}(x, r, T) &= N_{1L,2L}(x, r, T) + N_{1R,2R}(x, r, T) = \\ &+ \frac{1}{(2\pi)^4} \int d^4p' e^{-ip'x} [F_{1L,2L}(r, T) u_L(p) F_{1R,2R}(r, T) u_R(p)], \\ \bar{N}_{1,2}(x, r, T) &= \bar{N}_{1L,2L}(x, r, T) + \bar{N}_{1R,2R}(x, r, T) = \\ &+ \frac{1}{(2\pi)^4} \int d^4p' e^{ip'x} [F_{1L,2L}^*(r, T) \bar{u}_L(p') F_{1R,2R}^*(r, T) \bar{u}_R(p')]. \end{aligned} \quad (6)$$

Burada,  $F_{1L,2L}(r, T)$  və  $F_{1R,2R}(r, T)$  nuklonlar üçün ( $f_{1L,2L}(r, T)$  və  $f_{1R,2R}(r, T)$   $\Delta$  barionlar üçün) sonlu temperaturda sol və sağ profil funksiyalardır.  $u_L$  və  $u_R$  isə Dirak matrisləri ilə ifadə olunan uyğun sol və sağ udulma və doqulma operatorıdır.  $p$ -zərrəciyin 4-ölçülü

impulsudur [15]. (6) ifadəsindən görünür ki, 5-ölçülü nəzəriyyədə spinorlar, 4-ölçülü sahə operatorları ilə ifadə olunurlar. Spinorların (6), Dirak matrislərini [15] (1) ifadəsində nəzərə alaraq müəyyən hesablamalardan sonra sonlu temperaturda  $\pi$ -mezon-nuklon- $\Delta$  keçidini təsvir edən təsir üçün

$$\begin{aligned} S_{\pi N \Delta}^0(T) &= \int d^4p d^4p' \bar{u} \gamma^\mu u M_\mu(q, T) \int_0^\infty dr e^{-\varphi(r, T)} \left[ \frac{1}{r^2} f_0'(r, T) \right. \\ &\left. * \left( k_1 (F_{1L}^{(n)*}(r, T) f_{1R}^{(m)}(r, T) - F_{2L}^{(n)*}(r, T) f_{2R}^{(m)}(r, T)) \right) \right] \end{aligned} \quad (7)$$

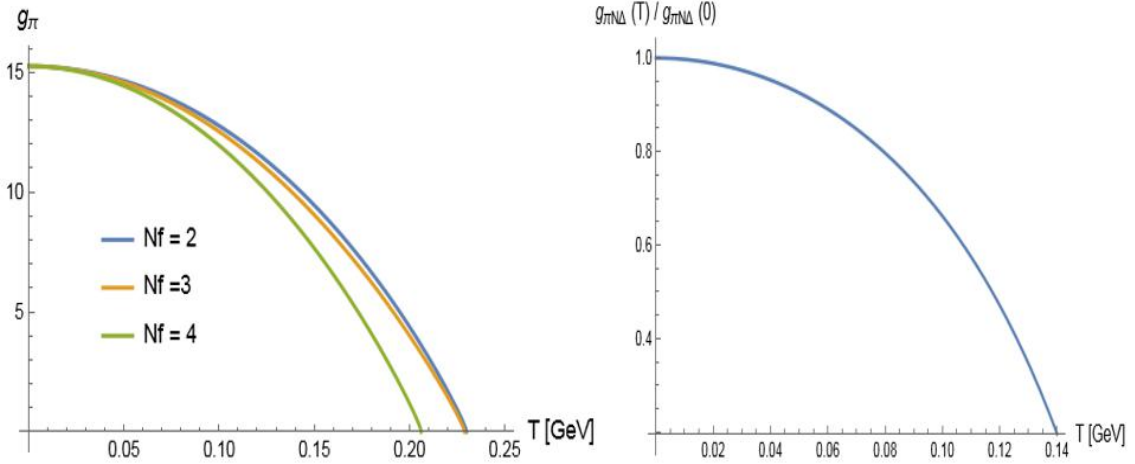
inteqral ifadəsi alınır.  $f_0(r, T)$ -pion profil funksiyasıdır.  $S_{\pi N\Delta}^{(0)}(T)$  təsiri müəyyən hesablamalardan sonra və holoqrafik uyğunluq prinsipinin uyğun bərabərliyində  $Z_{KXD}(T) = e^{S_{\pi N\Delta}^{(0)}(T)} = Z_{AdS}(T)$  şəklində nəzərə alınır. Daha sonra mezon sahəsinin vakuüm qiymətinə görə variasiya alınaraq, sonlu temperaturda  $J_\mu(p', p, T) =$

$g_{\pi N\Delta}(T)\bar{u}(p')\gamma_\mu u(p)$  şəklində nuklon- $\Delta$ -barion cərəyanı tapılır [16]. 4-ölçülü cərəyanın 5-ölçülü cərəyanla müqayisəsindən  $g_{\pi N\Delta}(T)$  qarşılıqlı təsir sabitinin ayrı-ayrı hədləri üçün aşağıdakı şəkildə inteqral ifadələr alınır:

$$g_{\pi N\Delta}^{nm}(T) = \int_0^\infty dr e^{-\varphi(r, T)} \left[ \frac{1}{r^2} f_0'(r, T) \left( k_1 (F_{1L}^{(n)*}(r, T) f_{1R}^{(m)}(r, T) - F_{2L}^{(n)*}(r, T) f_{2R}^{(m)}(r, T)) \right) \right]. \quad (8)$$

Burada  $f_0(r) = \sqrt{2} K_T^2 r^3$  əsas hal üçün  $\pi$ -mezonun profil funksiyası [14],  $nm$  indeksləri başlanğıc və son barionların halını göstərir. Sonlu temperaturda əsas halda olan sol barion profil funksiyaları Lager polinomları ilə  $f_{1L, 2L}^{(m)}(r, T) = F_{1L, 2L}^{(n)*}(r, T) = \sqrt{2} K_T^3 r^2 e^{-\frac{\varphi(r, T)}{2}}$  və  $f_{1R, 2R}^{(m)}(r, T) = F_{1R, 2R}^{(n)*}(r, T) = \sqrt{2} K_T^2 r^2 e^{-\frac{\varphi(r, T)}{2}} L_1^2(K_T^2 r^2)$

ifadələrinə malikdir. Biz əsas hala baxdığımızdan  $m=n=0$ . (8) ifadəsini  $r$ -ə görə inteqralladıqdan sonra alınan qarşılıqlı təsir sabitinin temperaturdan asılılığı kvark rayihə parametri olan  $N_f$ -in müxtəlif qiymətlərində şəkil 3-dəki kimi tapılmışdır.



Şəkil 3. Pion-nuklon- $\Delta$ -barion və normallaşmış pion-nuklon- $\Delta$ -barion  $g_{\pi N\Delta}(T)$  qarşılıqlı təsir sabitinin temperaturdan asılılığı

### Nəticə

Biz temperaturdan asılı pion – $\Delta$ -barion qarşılıqlı təsir sabiti üçün nəzəri ifadəni hesabladıq. Gözlənilmədiyi kimi, biz bu sabitin ədədi qiymətinin temperatur artdıqca azaldığını və hadronların kvark-qlüon plazmasına faza keçidi etdiyi konfaynment-dekonfaynment temperaturuna yaxın temperaturda yoxa çıxdığını tapırıq. Həmçinin, kvark rayihə sayının artması ilə kritik temperaturun qiyməti azalır.  $N_f$ -in azalması, kvarkların təmin etdiyi fermionik ekranlaşdırmanı zəiflədir, bu isə aşağı enerjilərdə qarşılıqlı təsir sabitini gücləndirir və faza keçidi üçün lazım olan kritik temperatur yüksəlir. Bu nəticələr digər modellər və təcrübə müşahidələrlə (hər ikisi asimptotik olaraq AdS-dir) AdS/KXD duallığı araşdırıla bilər ki, KXD maddəsinin yüksək dolaşılığa malik topoloji fazalarına uyğun gəlir.

yaxşı müqayisə olunur. AdS/KXD-nin termal yumşaq-divar modelinin maraqlı bir ümumiləşdirməsi, qara dəlik əvəzinə, AdS fəzasında bir holoqrafik neytron ulduzunu nəzərdən keçirmək olardı. Bu cür holoqrafik kompozitlər AdS/KSN-nin ümumi kontekstində araşdırılmışdır [17]. AdS fəzasındakı belə bir ulduza daxili fəzada holoqrafik uyğun anlayış güclü qarşılıqlı təsirdə olan sonlu-temperaturlu kvant mayesi olardı. Bundan əlavə, belə bir neytron ulduzunun qara dəliyə çevrilməsi, sərhəddəki KXD-də faza keçidi vasitəsilə kiral simmetriyanın pozulmasına gətirib çıxaran mexanizm holoqrafik dual olardı. Eyni şəkildə, Taub-NUT-AdS-dəki qara halqaların [18] və ya parçalanmış AdS həndəsələrinin [19]

- [1] *J. Maldacena*. “The large- $N$  limit of superconformal field theories and supergravity”, International journal of theoretical physics, 38(4), 1113-1133, 1999.
- [2] *Makoto Natsuume*. “AdS/CFT Duality User Guide”, Lect. Notes Phys. 903 (Springer, 2015).
- [3] *N.Ə. Nəşibova*. Sonlu temperaturda həyəcanlanmış mezonun formfaktoru / - Bakı: Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyasının Xəbərləri, Fizika-Texnika və Riyaziyyat Elmləri Seriyası, 2021. №1, s.117-120.
- [4] *N.Ə.Nəşibova*. Sonlu temperaturda həyəcanlanmış vektor mezon və barionların minimal qarşılıqlı təsir sabiti/ Bakı: Azərbaycan Fizika Jurnalı, 2021. №1, s.47.
- [5] *N.Ə. Nəşibova*. Sonlu temperaturda  $\rho/a_1$ -mezonun həyəcanlanmış halda olan barionlarla minimal qarşılıqlı təsir sabiti, Bakı: Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyasının Xəbərləri, Fizika-Texnika və Riyaziyyat Elmləri Seriyası, 2021, №3, s.68-72.
- [6] *N.Ə. Nəşibova*. Sonlu temperaturda  $\omega$  mezon-nuklon minimal qarşılıqlı təsir sabiti  $g_{\omega NN}(T)$  / - Bakı: - Azərbaycan Fizika Jurnalı, 2021, №3, s.34.
- [7] *N.Ə. Nəşibova*. Sonlu temperaturda  $a_1$ -aksial mezonun həyəcanlanmış halda olan  $\Delta$  barionlarla  $g_{a_1\Delta\Delta}(T)$  minimal qarşılıqlı təsir sabiti. Bakı: - Azərbaycan Fizika Jurnalı, 2021. №2, s.36-39.
- [8] *Sh. Mamedov*. Axial-vector form factor of nucleons at finite temperature from the AdS/QCD soft-wall model. *Sh. Mamedov, N.Nasibova*. International Journal Modern Physics A, Singapore: 2023. 38, №24, p. 2350131.
- [9] *Sh. Mamedov*. Temperature dependence of  $\rho$  meson-nucleon coupling constant from the AdS/QCD soft-wall model, *Sh. Mamedov, N. Nasibova* . Physical Review D, College Park: 2021. 104, p. 036010.
- [10] *N. Nasibova*. Form factor of excited baryon at finite temperature. Baku: Journal of Radiation Researches, 2021. 8, №1, p. 36-41.
- [11] *N. Nasibova*. Meson-delta and meson-nucleon-delta transition coupling constants in the soft-wall model of holographic QCD at finite temperature, Letters in High Energy Physics, 2022, 326, p. 31526.
- [12] *N.A. Nasibova*. Temperature Dependence of  $\omega$  Meson-nucleon Coupling Constant from the AdS/QCD Soft-wall Model, International journal Formal Science, 2021, 573,p. 20210913.
- [13] *N. Nasibova*, “Isospin Symmetry of  $\omega$  Meson at Finite Temperature in the Soft-Wall Model of Holographic QCD” Few-Body Syst. 66, (2025).
- [14] *N. Nasibova and X. D. Arsiwalla*. “Pion Phenomenology from the Thermal Soft-Wall Model of Holographic QCD”, , (2025). <https://doi.org/10.48550/arXiv.2505.23455>
- [15] *N.Ə. Nəşibova*. “Sonlu temperaturda adron qarşılıqlı təsirlərinin holografik kvant xromodinamikasında tədqiqi”, dissertasiya işi, Bakı, 2024.
- [16] *H.C. Ahn, D.K. Hong, C. Park and S. Siwach*. “Spin 3/2 baryons and form factors in AdS/QCD”, Phys. Rev. D 80, 054001, 2009.
- [17] *C.R. Argüelles, T. Canavesi, M. D’az and N.E. Grandi*, “Thermodynamic instabilities in holographic neutron stars at finite temperature”, Class. Quantum Grav. 37, 205002, 2020.
- [18] *X.D. Arsiwalla*. “Entropy functions with 5d chern-simons terms”, Journal of High Energy Physics, 059, 2009.
- [19] *X.D. Arsiwalla*. “More rings to rule them all: fragmentation,  $4D \leftrightarrow 5D$  and split-spectral flows”, Journal of High Energy Physics, 066 2008.