



Фазова структура та бозе-конденсація у взаємодіючій системі релятивістських бозонів-антибозонів

Доповідач: Денис Журавель

Подача на конкурс на здобуття премії Президента України
для молодих вчених 2025 року

Конкурс на здобуття премії Президента України для молодих вчених 2025 року



Витяг з положення про премію Президента України для молодих вчених:

- 1) На здобуття премії можуть висуватися наукові роботи, опубліковані у закінченій формі **не менше ніж за рік** до їх висунення.
- 2) Присуджується щороку до сорока премій (із них до двадцяти премій для молодих вчених закладів вищої освіти) **у розмірі 40 тисяч гривень** кожна.
- 3) Роботи, висунуті на здобуття премії, приймаються **Комітетом з Національної премії України імені Бориса Патона** щороку до 1 березня.

Перелік робіт, які подаються на конкурс

- 1) D. Anchishkin, V. Gnatovskyy, D. Zhuravel, V. Karpenko, I. Mishustin, and H. Stöcker, “Canonical ensemble vs. grand canonical ensemble in the description of multicomponent bosonic systems”, *Ukrainian Journal of Physics* 69, 1 (2024), doi: 10.15407/ujpe69.1.3.
- 2) D. Anchishkin, V. Gnatovskyy, D. Zhuravel, V. Karpenko, I. Mishustin, and H. Stoecker, “Phase transitions in the interacting relativistic boson systems”, *Universe* 9, 411 (2023), doi: 10.3390/universe9090411.
- 3) D. Anchishkin, V. Gnatovskyy, D. Zhuravel, and V. Karpenko, “Self-interacting particle-antiparticle system of bosons”, *Phys. Rev. C* 105, 045205 (2022), doi: 10.1103/PhysRevC.105.045205.
- 4) D. Anchishkin, V. Gnatovskyy, D. Zhuravel, and V. Karpenko, “Phase diagram of the selfinteracting particle-antiparticle boson system”, *Journal of Physics and Electronics* 29, 5–14 (2021), doi: 10.15421/332101.
- 5) D. Anchishkin, V. Gnatovskyy, D. Zhuravel, and V. Karpenko, “Relativistic selfinteracting particle-antiparticle system of bosons”, *Journal of Physics and Electronics* 28, 3–18 (2020), doi: 10.15421/332016.
- 6) D. Anchishkin, I. Mishustin, O. Stashko, D. Zhuravel, and H. Stoecker, “Finite-temperature bose-einstein condensation in interacting boson system”, *Ukrainian Journal of Physics* 64, 1118 (2019), doi: 10.15407/ujpe64.12.1118.

2 публікації Q1, 2 публікації Q3, 2 публікації в журналі категорії Б.

Основні результати представленої серії робіт

- I. Розроблено теоретичний підхід для опису термодинамічних властивостей 2-компонентної релятивістської системи бозонів-антибозонів із сильною взаємодією та можливим утворенням Бозе-конденсату. Методи застосовано для дослідження системи піонів-антипіонів із взаємодією, що містить відштовхування і притягання.

Термодинамічна модель
середнього поля

Густина вільної енергії:

$$\phi(n_1, n_2, T) = \phi_1^{(0)}(n_1, T) + \phi_2^{(0)}(n_2, T) + \phi_{\text{int}}(n, T),$$

$$\phi_{\text{int}}(n, t) = -\frac{1}{2}An^2 + \frac{1}{3}Bn^3$$



$$n = \int \frac{d^3k}{(2\pi)^3} [f_{\text{BE}}(E(k, n), \mu_I) + f_{\text{BE}}(E(k, n), -\mu_I)],$$

$$n_I = \int \frac{d^3k}{(2\pi)^3} [f_{\text{BE}}(E(k, n), \mu_I) - f_{\text{BE}}(E(k, n), -\mu_I)].$$

$$E(k, n) = \sqrt{m^2 + k^2} + U(n)$$

$$f_{\text{BE}}(E, \mu) = \left\{ \exp \left[\frac{E - \mu}{T} \right] - 1 \right\}^{-1}$$

Модель скалярного
поля

Густина Лагранжиану:

$$\mathcal{L}(x) = \partial_\mu \phi^+(x) \partial^\mu \phi(x) - m^2 \phi^+(x) \phi(x) + \mathcal{L}_{\text{int}}(x)$$

$$\mathcal{L}_{\text{int}}(\phi^2(x)) = \frac{a}{4} \phi^4(x) - \frac{b}{6} \phi^6(x)$$



$$\sigma = \int \frac{d^3k}{(2\pi)^3} \frac{1}{2\omega_k(\sigma)} \{ f_{\text{BE}}[\omega_k(\sigma), \mu_I] + f_{\text{BE}}[\omega_k(\sigma), -\mu_I] \},$$

$$n_I = \int \frac{d^3k}{(2\pi)^3} \{ f_{\text{BE}}[\omega_k(\sigma), \mu_I] - f_{\text{BE}}[\omega_k(\sigma), -\mu_I] \}.$$

$$\omega_k(\sigma) = \sqrt{M(\sigma)^2 + k^2}, \quad M^2(\sigma) \equiv m^2 + U(\sigma)$$

$$\sigma(x) = \phi^+(x) \phi(x), \quad f_{\text{BE}}(\omega, \mu_I) = \frac{1}{e^{(\omega - \mu_I)/T} - 1}$$

[6] D. Anchishkin, I. Mishustin, O. Stashko, D. Zhuravel, and H. Stoecker, Ukrainian Journal of Physics 64, 1118 (2019).

[5] D. Anchishkin, V. Gnatovskyy, D. Zhuravel, and V. Karpenko, Journal of Physics and Electronics 28, 3–18 (2020).

[3] D. Anchishkin, V. Gnatovskyy, D. Zhuravel, and V. Karpenko, "Self-interacting particle-antiparticle system of bosons", Phys. Rev. C 105, 045205 (2022).

[2] D. Anchishkin, V. Gnatovskyy, D. Zhuravel, V. Karpenko, I. Mishustin, and H. Stoecker, Universe 9, 411 (2023).

Термодинамічна модель
середнього поля

$$m = 140 \text{ MeV}$$

$$U(n) = -An + Bn^2, \quad E - \mu = 0 \Rightarrow n_{1,2} = \sqrt{\frac{m}{B}} (\kappa \mp \sqrt{\kappa^2 - 1})$$

$$\kappa \equiv \frac{A}{2\sqrt{mB}}$$

Співвідношення між A та B
Параметр B зафіксований

Модель скалярного
поля

$$m = 140 \text{ MeV}$$

$$\omega - \mu_I = 0 \Rightarrow \sigma_{1,2} = \frac{m}{\sqrt{b}} (\kappa \mp \sqrt{\kappa^2 - 1}),$$

$$\kappa = \frac{a}{2m\sqrt{b}}$$

Співвідношення між a та b
Параметр b зафіксований

$\kappa < 1$ - режим слабого притягання

$\kappa = 1$ - режим критичного притягання

$\kappa > 1$ - режим сильного
(надкритичного) притягання

Основні результати представленої серії робіт

- I. Розроблено теоретичний підхід для опису термодинамічних властивостей 2-компонентної релятивістської системи бозонів-антибозонів із сильною взаємодією та можливим утворенням Бозе-конденсату. Методи застосовано для дослідження системи піонів-антипіонів із взаємодією, що містить відштовхування і притягання.
- II. В рамках методу термодинамічної моделі середнього поля та моделі скалярного поля отримано фазову діаграму такої системи в координатах (T, n) при нульовому ізотопічному заряді. Показано, що фазовий перехід в фазу з утворенням Бозе-конденсату можливий лише в режимі сильного притягання. Показано, що фазовий перехід є фазовим переходом першого роду, при якому виділяється прихована теплота. Розрахована температура переходу в фазу Бозе-конденсату.

Двокомпонентна система при $n_I = 0$ [2,6]

Термодинамічна модель
середнього поля

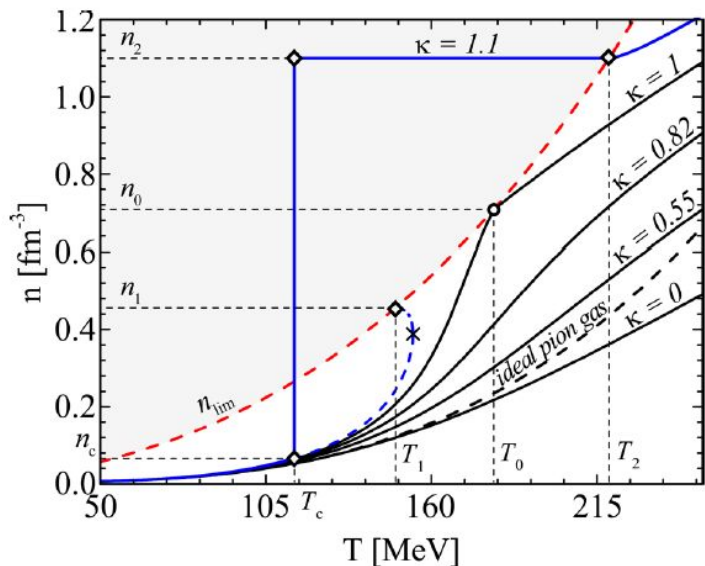


Figure 1. Залежність густин частинок n від температури для взаємодіючого газу $\pi^+\pi^-$ піонів в рамках термодинамічної моделі середнього поля для різних значень κ . Густина ізоспіну вважається сталою, $n_I = 0$.

[6] D. Anchishkin, I. Mishustin, O. Stashko, D. Zhuravel, and H. Stoecker, Ukrainian Journal of Physics 64, 1118 (2019).

Модель скалярного
поля

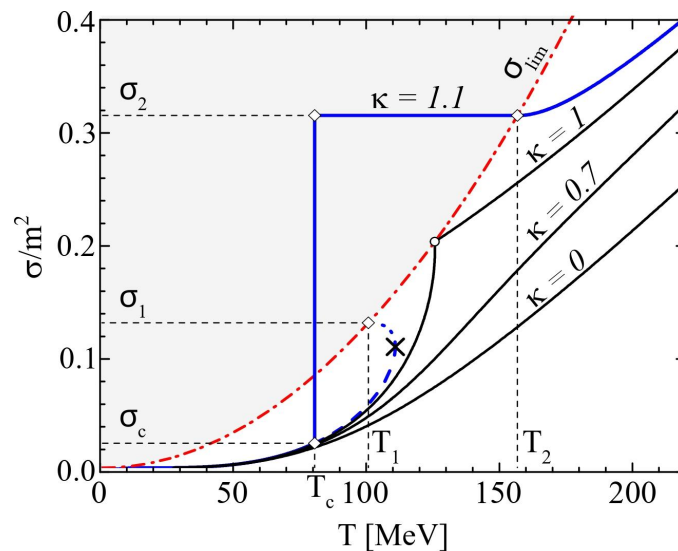


Figure 2. Залежність скалярної густини σ / m^2 від температури для газу $\pi^+\pi^-$ піонів із взаємодією. Густина ізоспіну вважається сталою, $n_I = 0$.

[2] D. Anchishkin, V. Gnatovskyy, D. Zhuravel, V. Karpenko, I. Mishustin, and H. Stoecker, Universe 9, 411 (2023).

Основні результати представленої серії робіт

- I. Розроблено теоретичний підхід для опису термодинамічних властивостей 2-компонентної релятивістської системи бозонів-антибозонів із сильною взаємодією та можливим утворенням Бозе-конденсату. Методи застосовано для дослідження системи піонів-антипіонів із взаємодією, що містить відштовхування і притягання.
- II. В рамках методу термодинамічної моделі середнього поля та моделі скалярного поля отримано фазову діаграму такої системи в координатах (T, n) при нульовому ізотопічному заряді. Показано, що фазовий перехід в фазу з утворенням Бозе-конденсату можливий лише в режимі сильного притягання. Показано, що фазовий перехід є фазовим переходом першого роду, при якому виділяється прихована теплота. Розрахована температура переходу в фазу Бозе-конденсату.
- III. Отримано фазову діаграму такої системи в координатах (T, n) при не нульовому ізотопічному заряді. Показано, що фазовий перехід в фазу з утворенням Бозе-конденсату виникає при будь-яких значеннях параметра притягання. Показано, що структура фазових переходів залежить від цього параметра і поділяється на різні типи. При слабкому притяганні утворюється один або більше фазових переходів другого роду. При сильному притяганні також виникає фазовий перехід першого роду з утворенням прихованої теплоти.

Двокомпонентна система при $n_I = 0.1 \text{ fm}^{-3}$ [2,3,5]

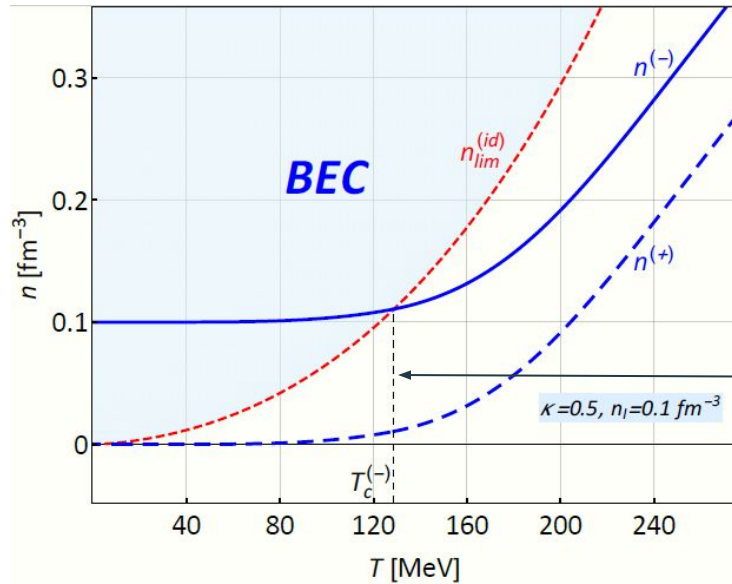


Figure 2. Залежність густин $n^{(+)}$, $n^{(-)}$ від температури для взаємодіючого газу $\pi^+\pi^-$ піонів в рамках термодинамічної моделі середнього поля. Густина ізоспіну вважається сталою, $n_I = 0.1 \text{ fm}^{-3}$, параметр взаємодії $\kappa = 0.5$.

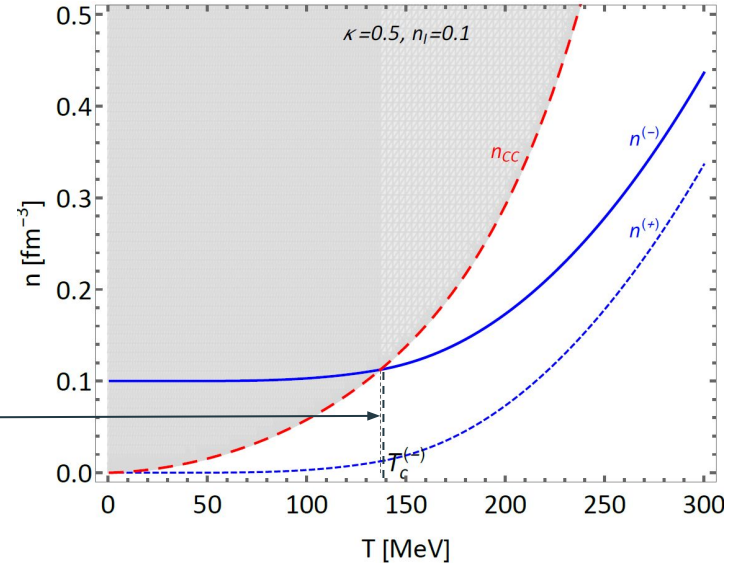


Figure 14. Залежність густин частинок $n^{(+)}$, $n^{(-)}$ від температури для ідеального газу $\pi^+\pi^-$ піонів в рамках підходу скалярного поля. Густина ізоспіну вважається сталою, $n_I = 0.1 \text{ fm}^{-3}$, параметр взаємодії $\kappa = 0.5$.

Режим сильного притягання в рамках підходу середнього поля^[1,2]

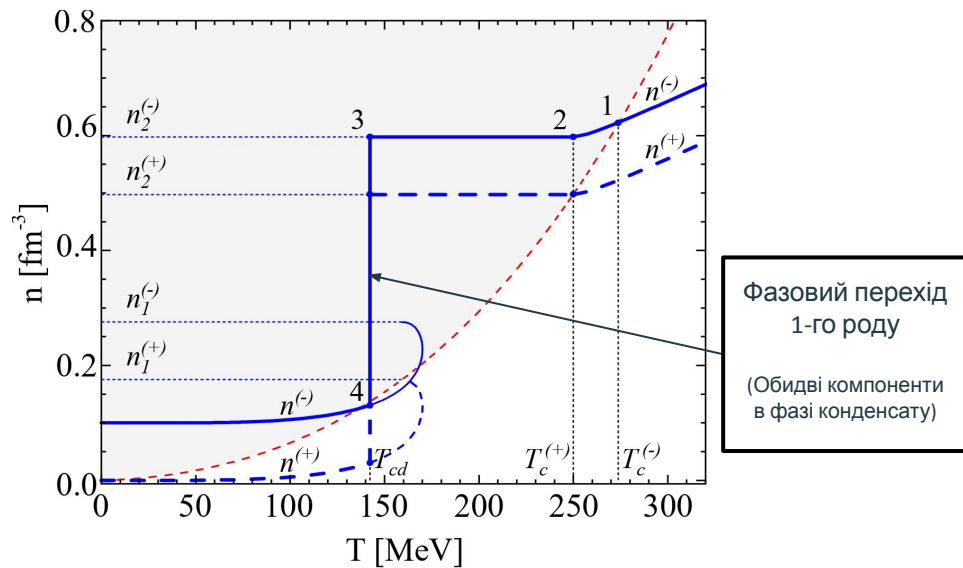


Figure 3. Залежність густин $n^{(+)}$, $n^{(-)}$ від температури для взаємодіючого газу $\pi^+\pi^-$ піонів. Параметр взаємодії $\kappa = 1.1$.

$$n_1 = \sqrt{\frac{m}{B}} (\kappa - \sqrt{\kappa^2 - 1}), \quad n_2 = \sqrt{\frac{m}{B}} (\kappa + \sqrt{\kappa^2 - 1}),$$

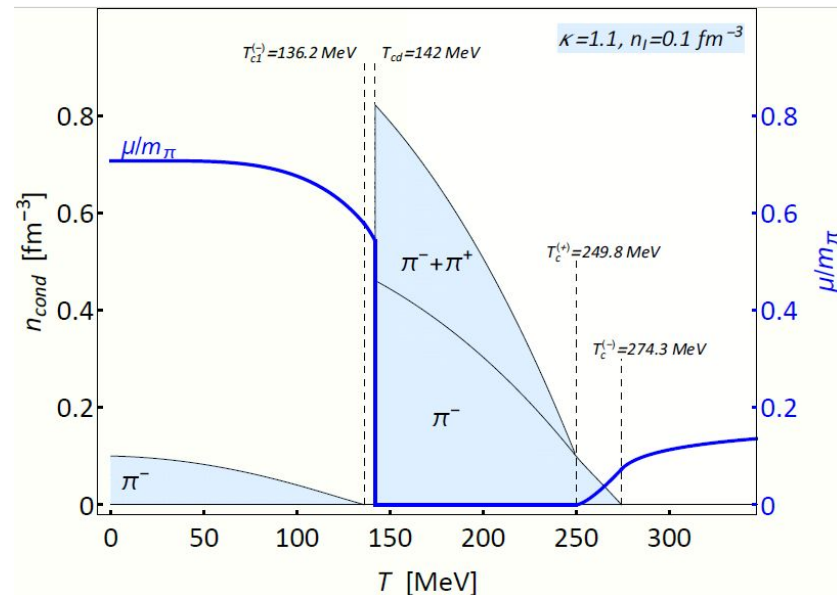


Figure 4. Залежність густини конденсату n_{cond} та хімічного потенціалу від температури. Параметр взаємодії $\kappa = 1.1$.

[2] D. Anchishkin, V. Gnatovskyy, D. Zhuravel, V. Karpenko, I. Mishustin, and H. Stoecker, Universe 9, 411 (2023).
 [1] D. Anchishkin, V. Gnatovskyy, D. Zhuravel, V. Karpenko, I. Mishustin, and H. Stöcker, Ukrainian Journal of Physics 69, 1 (2024).

Основні результати представленої серії робіт

- I. Розроблено теоретичний підхід для опису термодинамічних властивостей 2-компонентної релятивістської системи бозонів-антибозонів із сильною взаємодією та можливим утворенням Бозе-конденсату. Методи застосовано для дослідження системи піонів-антипіонів із взаємодією, що містить відштовхування і притягання.
- II. В рамках методу термодинамічної моделі середнього поля та моделі скалярного поля отримано фазову діаграму такої системи в координатах (T, n) при нульовому ізотопічному заряді. Показано, що фазовий перехід в фазу з утворенням Бозе-конденсату можливий лише в режимі сильного притягання. Показано, що фазовий перехід є фазовим переходом першого роду, при якому виділяється прихована теплота. Розрахована температура переходу в фазу Бозе-конденсату.
- III. Отримано фазову діаграму такої системи в координатах (T, n) при не нульовому ізотопічному заряді. Показано, що фазовий перехід в фазу з утворенням Бозе-конденсату виникає при будь-яких значеннях параметра притягання. Показано, що структура фазових переходів залежить від цього параметра і поділяється на різні типи. При слабкому притяганні утворюється один або більше фазових переходів другого роду. При сильному притяганні також виникає фазовий перехід першого роду з утворенням прихованої теплоти.
- IV. Показано, що великий канонічний Ансамбль не може бути застосований для опису двокомпонентної бозонної системи у фазі Бозе-конденсату, оскільки на хімічний потенціал накладаються умови і він не може слугувати вільним параметром.

Двокомпонентна система при сталому n_I ^[1]

Обидві компоненти, частинки і античастинки, знаходяться у фазі конденсату



На систему накладаються умови

$$m + U(n) - \mu_I = 0$$

$$m + U(n) + \mu_I = 0$$



Хімічний потенціал визначений і не може слугувати вільною змінною

$$\begin{cases} \mu_I = 0, \\ U(n) + m = 0. \end{cases}$$

Ідеальний двокомпонентний релятивістський газ бозонних частинок-античастинок із збереженням ізоспіну n_I



$$m - \mu_I = 0$$

$$m + \mu_I = 0$$



У релятивістському бозонному ідеальному газі частинок і античастинок із збереженням ізоспіновим зарядом n_I лише одна компонента системи може переходити у фазу Бозе-конденсату.

Основні результати представленої серії робіт

- I. Розроблено теоретичний підхід для опису термодинамічних властивостей 2-компонентної релятивістської системи бозонів-антибозонів із сильною взаємодією та можливим утворенням Бозе-конденсату. Методи застосовано для дослідження системи піонів-антипіонів із взаємодією, що містить відштовхування і притягання.
- II. В рамках методу термодинамічної моделі середнього поля та моделі скалярного поля отримано фазову діаграму такої системи в координатах (T, n) при нульовому ізотопічному заряді. Показано, що фазовий перехід в фазу з утворенням Бозе-конденсату можливий лише в режимі сильного притягання. Показано, що фазовий перехід є фазовим переходом першого роду, при якому виділяється прихована теплота. Розрахована температура переходу в фазу Бозе-конденсату.
- III. Отримано фазову діаграму такої системи в координатах (T, n) при не нульовому ізотопічному заряді. Показано, що фазовий перехід в фазу з утворенням Бозе-конденсату виникає при будь-яких значеннях параметра притягання. Показано, що структура фазових переходів залежить від цього параметра і поділяється на різні типи. При слабкому притяганні утворюється один або більше фазових переходів другого роду. При сильному притяганні також виникає фазовий перехід першого роду з утворенням прихованої теплоти.
- IV. Показано, що великий канонічний Ансамбль не може бути застосований для опису двокомпонентної бозонної системи у фазі Бозе-конденсату, оскільки на хімічний потенціал накладаються умови і він не може слугувати вільним параметром.

Дякую за увагу!