

Информационно-коммуникационные технологии

<https://doi.org/10.63377/3005-4966.2-2024-12>

УДК: 539.12

МРНТИ: 29.19.03

Адронизация кварков в кварк-глюонной плазме

*¹Мажит З.С.¹Казахский автомобильно-дорожный институт имени Л.Б. Гончарова, г. Алматы, Казахстан*Автор-корреспондент email: z.work@list.ru**Аннотация**

В данной статье рассматривается динамика кварк-глюонной плазмы (КГП) — состояния вещества, состоящего из кварков, антикварков и глюонов, возникающего при высоких температурах и плотностях. КГП представляет собой фазу материи, в которой кварки и глюоны недерживаются внутри адронов за счет ослабления цветового взаимодействия. Основой описания процессов в КГП служит квантовая хромодинамика (КХД), которая объясняет как конфайнмент (удержание кварков внутри адронов), так и асимптотическую свободу (ослабление взаимодействий при высоких энергиях). В статье применяется метод отображений Пуассона для анализа эволюции состояния КГП через нелинейное уравнение динамики, где динамика описывается оператором эволюции, зависящим от параметра $\bar{\lambda}$, связанного с температурой системы. Проведено численное моделирование, показавшее, что при увеличении $\bar{\lambda}$ до значений, близких к единице, система демонстрирует хаотическую динамику. Это отражает сложный характер фазового перехода из КГП в адронное вещество, сопровождающегося спонтанным нарушением симметрий, в частности киральной. Также обсуждается роль антиэкранирования глюонов и эффектов восстановления масс кварков при высоких температурах. Представленные результаты согласуются с теоретическими предсказаниями КХД и экспериментальными данными глубоко неупругого рассеяния лептонов на нуклонах. Статья демонстрирует важность нелинейных методов динамики и партонной модели адронов для понимания фазовых переходов в сильно взаимодействующем веществе.

Ключевые слова: кварк-глюонная плазма, фазовый переход, конфайнмент, партонная функция распределения, плазма

Поступила:
12 марта 2024
Рецензирование:
26 апреля 2024
Принята в печать:
18 мая 2024

Мажит З.С.**Информация об авторах:**

Магистр естественных наук, старший преподаватель кафедры «История Казахстана, общеобразовательные дисциплины и информационные системы», КазАДИ им. Л.Б.Гончарова, г. Алматы, Республика Казахстан, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9097-1828>. E-mail: z.work@list.ru

Ақпараттық-коммуникациялық технологиялар

<https://doi.org/10.63377/3005-4966.2-2024-12>

ӘОЖ: 539.12

FTAMP: 29.19.03

Кварк-глюондық плазмадағы кварктар адронизациясы***¹Мажит З.С.**¹Л.Б. Гончаров атындағы Қазақ автомобиль-жол институты, Алматы қ, Қазақстан*Автор-корреспондент email: z.work@list.ru**Түйіндеме**

Бұл мақалада кварк-Глюон плазмасының (КГП) динамикасы қарастырылады — жоғары температура мен тығызыңқта пайда болатын кварктардан, антикварктардан және глюондардан тұратын заттың күйі. КГП-түс әрекеттесуін әлсірету арқылы адрондардың ішінде кварктар мен глюондар ұсталмайтын заттың фазасы. КГП-дағы процестерді сипаттаудың негізі кванттық хромодинамика (КХД) болып табылады, ол конфайнментті (адрондардың ішіндегі кварктардың сақталуы) және асимптотикалық еркіндікті (жоғары энергиядағы өзара әрекеттесудің әлсіреуі) түсіндіреді. Мақалада сызықтық емес динамика тендеуі һарқылы КГП күйінің эволюциясын талдау үшін Пуассонды картаға түсіру әдісі қолданылады, мұнда динамиканы жүйенің температурасына байланысты параметрге тәуелді эволюция операторы сипаттайты. Сандық модельдеу жүргізілді, бұл ЖИА бірлікке жақын мәндерге дейін ұлғайған кезде жүйе хаотикалық динамиканы көрсететінін көрсетті. Бұл КГП-дан адрондық затқа фазалық ауысадың күрделі сипаттын көрсетеді, ол симметриялардың, атап айтқанда хиральдың өздігінен бұзылуымен бірге жүреді. Глюондардың антиэкранизациясының рөлі және жоғары температурада кварктардың массасын қалпына келтіру әсерлері де талқыланады. Ұсынылған нәтижелер КХД теориялық болжамдарына және нуклондардағы лептондардың терең серпімді емес шашырауының эксперименттік деректеріне сәйкес келеді. Мақалада жоғары өзара әрекеттесетін заттағы фазалық ауысуларды түсіну үшін адрондардың сызықтық емес динамикалық әдістері мен партондық моделінің маңыздылығы көрсетілген.

Түйін сөздер: кварк-глюондық плазма, фазалық ауысу, конфайнмент, партондық үлестіру функциясы, плазма

Макала келді:
12 наурыз 2024
Саралтамадан өтті:
26 сәуір 2024
Қабылданды:
18 мамыр 2024

Мажит З.С.**Авторлар туралы ақпарат:**

Жаратылыстану ғылымдарының магистрі, «Қазақстан тарихы, жалпы білім беретін пәндер және ақпараттық жүйелер» кафедрасының аға оқытушысы. Л.Б. Гончаров атындағы Қазақ автомобиль-жол институты, Алматы қ, Қазақстан, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9097-1828>. Email: z.work@list.ru

Information and communication technologies

<https://doi.org/10.63377/3005-4966.2-2024-12>

UDC: 539.12

IRSTI: 29.19.03

Quark hadronization in quark-gluon plasmas***¹Mazhit Z.S.**¹Kazakh Automobile and Road Institute named after L.B. Goncharov, Almaty, Republic of Kazakhstan*Corresponding author email: z.work@list.ru

Received:
12 March 2024
Peer-reviewed:
26 April 2024
Accepted:
18 May 2024

Abstract

This article examines the dynamics of the quark-gluon plasma (QGP), a state of matter consisting of quarks, antiquarks, and gluons that occurs at high temperatures and densities. The QGP is a phase of matter in which quarks and gluons are not trapped inside hadrons due to the weakening of the color interaction. Quantum chromodynamics (QCD) serves as the basis for describing the processes in QGP, which explains both confinement (the confinement of quarks inside hadrons) and asymptotic freedom (the weakening of interactions at high energies). The article uses the Poisson mapping method to analyze the evolution of the QGP state through a nonlinear dynamics equation, where the dynamics is described by an evolution operator depending on the parameter $\bar{\lambda}$ associated with the temperature of the system. Numerical modeling was performed, which showed that when increasing $\bar{\lambda}$ to values close to unity, the system demonstrates chaotic dynamics. This reflects the complex nature of the phase transition from QGP to hadron matter, accompanied by spontaneous symmetry breaking, in particular chiral symmetry. The role of gluon anti-shielding and the effects of quark mass reduction at high temperatures is also discussed. The presented results are consistent with the theoretical predictions of QCD and experimental data on deeply inelastic scattering of leptons by nucleons. The article demonstrates the importance of nonlinear dynamics methods and the parton model of hadrons for understanding phase transitions in strongly interacting matter.

Keywords: quark-gluon plasma, phase transition, confinement, parton distribution function, plasma

Mazhit Z.S.**Information about authors:**

Master of Natural Sciences, Senior lecturer of the Department "History of Kazakhstan, General Education disciplines and Information Systems", Kazakh Automobile and Road Institute named after L.B. Goncharov, Almaty, Kazakhstan, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9097-1828>. E-mail: z.work@list.ru

Введение

Сильные взаимодействия существенны на расстояниях порядка размеров нуклона (10^{-15} м), связывая кварки в адронах, аналогом электрического заряда является цвет. Кварк-глюонная плазма (КГП) состоит из сильно взаимодействующих кварков, антикварков и глюонов. Кварки и глюоны являются фундаментальными частицами, они связаны цветовым взаимодействием [1]. Взаимодействие кварков и антикварков осуществляется обменом глюонами. Глюоны так же, как и кварки, несут цветовой заряд и могут взаимодействовать друг с другом. Сильные взаимодействия между кварками и глюонами ослаблены при увеличении плотности или температуры материи, кварки не будут удерживаться внутри бесцветных нуклонов.

Цветовое взаимодействие кварков и глюонов описывает квантовая хромодинамика (КХД) [2]. Партонная модель адронов включает конфайнмент (удержание частиц внутри адрона) и асимптотическую свободу. Доказательством партонной модели адронов и КХД как теории сильных взаимодействий явились эксперименты по глубоко неупругому рассеянию лептонов на нуклонах [3], в которых была измерена структурная функция нуклона. Другим основанием партонной модели адронов является бъёркеновский скейлинг, несмотря на то, что он соблюдается лишь приблизительно [4].

Адронный газ представляет собой газ бесцветных (нейтральных с точки зрения цветового взаимодействия) мезонов и барионов. В спектре наблюдаемых адронов и в их взаимодействиях при низких энергиях киральная симметрия не реализуется: киральная симметрия спонтанно нарушена. При высоких энергиях/температурах КГП кирально симметрична.

Взаимодействие между кварками происходит посредством векторного глюонного поля. Киральная симметрия связана с сохранением векторного и аксиального полей.

Предполагают, что деконфайнмент сопровождается восстановлением (реконструкцией) масс составляющих до их токовых значений, которые частицы (кварки) имеют в лагранжиане КХД. Достижение деконфайнмента есть основной признак образования КГП. Реконструкцию масс кварков до токовых значений называют частичным восстановлением киральной симметрии (Partial Restoration of Chiral Symmetry). При остывании КГП нарушается киральная симметрия, и происходит динамическое образование масс кварков.

КГП остывает вследствие гидродинамического расширения, и имеет место фазовый переход от кварковых и глюонных степеней свободы к горячему газу сильно взаимодействующих адронов. Иными словами, при более низких температурах (энергиях) кварки и глюоны замыкаются в бесцветные адроны. Дальнейшее расширение приводит к газу адронов. Эта стадия называется адронизацией КГП.

В КХД показано, что интенсивность цветового взаимодействия кварков растет с увеличением расстояния между ними и уменьшается при их сближении. С падением интенсивности взаимодействия при сближении кварков связана асимптотическая свобода. Внутри адронов кварки можно рассматривать как свободные частицы. Кварковые и глюонные плотности не сохраняются в результате квантовых флюктуаций. Таким образом, КХД является существенно нелинейной теорией, приближенные методы исследования, принятые в квантовой теории поля оказываются не вполне адекватными для описания сильных взаимодействий [2]. КХД является более сложной квантовой теорией поля с уникальными свойствами при сравнении с квантовой электродинамикой. Доказательством этого является деконфайнмент и асимптотическая свобода кварков при их сближении, когда среднее расстояние между кварками меньше 1 фм.

Численные оценки показывают, что переход в состояние кварк-глюонной плазмы происходит как фазовый переход первого рода при температуре, отвечающей кинетической энергии адронов ~ 200 МэВ [1]. При температурах $T > 150$ МэВ и плотностях $\rho \gtrsim 5-10 \rho_0$,

здесь ρ_0 – плотность ядерной материи, существует КГП, при этом константа сильного цветового взаимодействия $\alpha_s \ll 1$ [5].

Для поля Янга-Миллса в процессе фазового превращения кварков в адроны и обратного фазового перехода характерно спонтанное нарушение симметрии: нарушение киральной симметрии и нарушение симметрии из-за приобретения кварками физической массы [6].

Киральная эффективная теория (КЭТ) состоит в предположении, что вакуум КХД заполнен глюонным и кварковым (киральным) конденсатами. Кварк-антикварковый конденсат представляет собой определённую когерентную суперпозицию состояний с различной киральностью. С повышением давления (плотности) ядерное вещество проходит два фазовых перехода. При уменьшении давления и повышении температуры имеет место деконфайнмент цвета вследствие разрушения глюонного конденсата и восстановление киральной симметрии, образование КГП.

Известно, что в теории сильных взаимодействий (квантовой хромодинамике) использование метода ренормгруппы К.Г. Вильсона (РГ) позволило в 1970-х гг. описать асимптотическую свободу – убывание взаимодействия при больших переданных импульсах или на малых расстояниях [7, 8].

Ренормгруппа – это группа преобразований параметров при изменении масштаба системы, в которой есть инвариантный набор величин. Отклик системы на изменение масштаба описывается дифференциальным уравнением РГ. Динамика фазового перехода описывается посредством степенной асимптотики для функции, описывающей процесс. Физические величины, характеризующие термодинамику и кинетику вещества в окрестности критической температуры T_c , степенным образом зависят от температуры. Метод РГ позволяет определить критические индексы [9]. Критические индексы – это показатели в степенных зависимостях термодинамических величин от параметра порядка.

Методы

Для описания динамики процессов, происходящих в кварк-глюонной плазме (КГП), применялись следующие методы:

- метод отображений Пуассона
- нелинейная теория динамических систем
- нормировка структурной функции
- пертурбативные методы квантовой хромодинамики (КХД).

Конфайнмент (confinement) и деконфайнмент (deconfinement) представляют собой два состояния кварков. Конфайнмент – связанное состояние кварков в адронах. Радиус конфайнмента ~ 1 фм. Деконфайнмент (освобождение цвета) – распад адронов на составляющие, свободное состояние кварков и глюонов.

Кварки слабо взаимодействуют на малых масштабах (высоких энергиях), что позволяет проводить пертурбативные расчеты для изучения КГП при высоких энергиях. С другой стороны, при низких энергиях взаимодействия становятся сильными, что приводит к заключению кварков и глюонов внутри адронов. В общем случае изменение физической константы связи при изменении масштаба можно качественно понимать как взаимодействия между виртуальными частицами и полями [10].

КХД имеет дело с виртуальными парами кварк-антикварк, которые стремятся экранировать цветовой заряд (так же, как электроны и ионы экранируют электростатический потенциал в электромагнитной плазме). Однако глюоны, несущие цветные заряды, экранируют цветовой заряд по-другому. Цветовые поля имеют тенденцию ослабевать из-за экранирования кварков, тогда как они имеют тенденцию усиливаться из-за экранирования глюонов (иногда это называют антиэкранированием). Подойдя ближе к кваркам по мере уменьшения масштаба длины (или увеличения разрешения эксперимента), можно обнаружить, что преоб-

ладает антиэкранирующий эффект глюонов, а интенсивность цветового поля ослабевает, что позволяет проводить пертурбативные вычисления.

Точечная подобность взаимодействия адронов означает, что кварки с относительно малой вероятностью одеты в "шубу" из виртуальных частиц, при больших передачах импульса это обуславливает бъёркеновский скейлинг [4].

В дальнейшем исследуются процессы, происходящие в кварк-глюонной плазме. КГП представляет собой идеальный газ кварков, антикварков и глюонов. Состояние вещества определяется температурой (энергией) и химическим потенциалом. Описание КГП основывается на использовании нелинейной теории динамических систем [11]. Динамика системы определяется посредством параметра эволюции λ , $0 < \lambda < 1$. Параметр λ зависит от температуры, при увеличении температуры λ растет [11, 12].

Макропараметры адронного вещества – плотность, температура (энергия), химический потенциал [13].

Введем бъёркеновскую переменную (долю импульса частицы в лабораторной системе отсчета) $x = \frac{Q^2}{2M\nu}$. Здесь M – масса нуклона, $\nu = E - E'$, E и E' – энергии до и после рассеяния, Q^2 – квадрат переданного импульса.

Оператором эволюции является экспериментально измеряемая структурная функция нуклона $F_2(x)$, связанная с импульсным распределением кварков и глюонов. Состояние квантовой системы задается бъёркеновской переменной доли импульса x_i и параметром эволюции λ .

Структурная функция нуклона $F_2(Q^2, \nu)$ определяется в фазовом пространстве из нелинейного уравнения динамики рассматриваемой системы в виде

$$|x_{i+1}\rangle = \lambda F_2(x_i)|x_i\rangle \quad (1)$$

при выполнении условия нормировки $\int_0^1 F_2(x_i)dx = 1$.

Для решения уравнения (1) применяется метод отображений Пуассона [11, 13].

Результаты

Фазовый переход КГП в систему кварков и глюонов можно связать с уменьшением величины параметра эволюции λ .

Сравнение результатов при небольшом отличии начальных приближений для двух отображений уравнения (1): $x_0=0.6$, $y_0=0.60001$ демонстрирует хаотическую динамику системы (рис. 1 и 2).

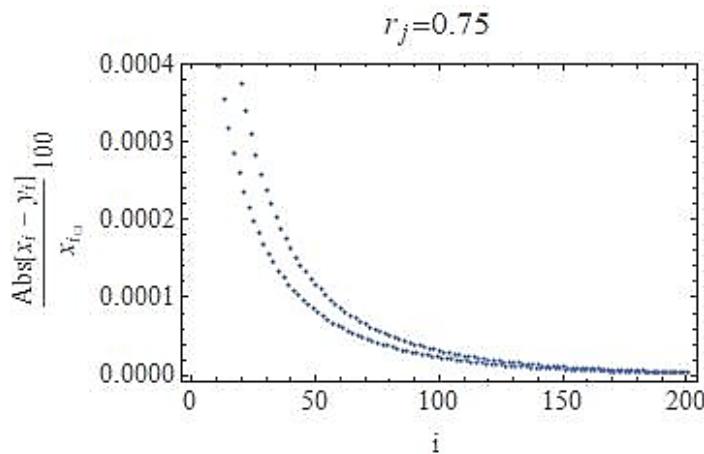


Рисунок 1. Решение уравнения (1), параметр эволюции $\lambda=0,75$ [материал автора]

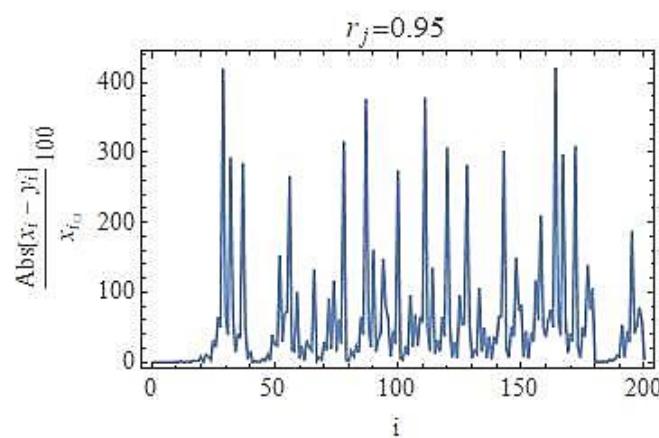


Рисунок 2. Решение уравнения (1), параметр эволюции $\lambda=0,95$ [материал автора]

На рисунках по оси абсцисс указаны номера итераций, по оси ординат – относительные отклонения. Рисунок 1 соответствует величине параметра роста (эволюции) 0,75, рисунок 2 – параметру роста, равному 0,95. С увеличением числа итераций растет расхождение значений для указанных близких начальных приближений. В системе возникает хаотическая динамика.

Таким образом, возникновение КГП соответствует параметру эволюции, близкому к 1.

Численные результаты показаны на рисунке 3. Здесь x представляет собой партонные распределения, массив; λ – параметр эволюции. $N_r=500$ – число точек разбиения. Число итераций – 1000.

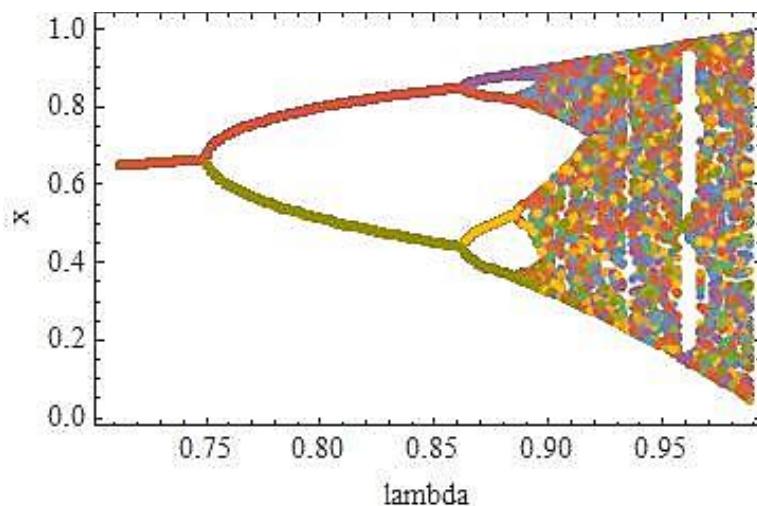


Рисунок 3. Нелинейная эволюция кварк-глюонной системы в зависимости от параметра эволюции [материал автора]

Обсуждение

Численные расчёты динамики кварк-глюонной плазмы (КГП) на основе метода отображений Пуассона показали чувствительность системы к начальному состоянию и наличие хаотических режимов. При высоких температурах ($\lambda \rightarrow 1$) наблюдается хаотическая динамика, связанная с нелинейностью квантовой хромодинамики (КХД).

Фазовый переход КГП в адроны сопровождается спонтанным нарушением симметрий, в том числе киральной, и образованием устойчивых кластеров (аттракторов). Это согласует-

ся с предсказаниями КХД о деконфайнменте и асимптотической свободе при высоких энергиях. Результаты подтверждают применимость партонной модели адронов и соответствуют данным глубоко неупругого рассеяния.

Таким образом, моделирование КГП позволило выявить ключевые динамические особенности фазового перехода и объяснить образование адронов в условиях высоких энергий.

Выводы

Кварк-глюонная плазма возникает при достаточно высокой энергии ядерных и адронных столкновений около 200 МэВ на частицу в пределе роста множественности вторичных адронов, что имеет место с ростом энергии столкновений.

В расширяющейся кварк-глюонной плазме имеет место фазовый переход кварк-глюонной плазмы в адроны. Адронизация плазмы связана со спонтанным нарушением симметрии вакуумных состояний – конденсатов и происходит за счёт нелинейной динамики формирования устойчивых по Пуассону кварк-глюонных структур.

Спонтанное возникновение хаотической динамики ответственно за термализацию кварк-глюонной среды. Компьютерное численное решение показывает, что на первом этапе фазового перехода первого рода из плазмы в адроны процесс осуществляется через смешанную фазу кварков и устойчивых кластеров.

Существуют также адроноподобные структуры. Квантовые когерентные эффекты возникают в результате сильных партонных корреляций в области непертурбативного удержания. В результате кварки и глюоны сливаются в стабильные структуры – атTRACTоры с последующим их распадом на адроны.

Конфликт интересов. Корреспондент автор заявляет, что конфликта интересов нет.

Ссылка на данную статью: Мажит З.С. Адронизация кварков в кварк-глюонной плазме // Вестник Казахского автомобильно-дорожного института = Bulletin of Kazakh Automobile and Road Institute = Kazakh avtomobil-zhol institutynyn Khabarshysy. 2024;2(6):118-126. <https://doi.org/10.63377/3005-4966.2-2024-12>

Cite this article as: Mazhit Z.S. Adronizaciya kvarkov v kvark-glyuonnoj plazme [Quark hadronization in quark-gluon plasmas]. Vestnik Kazahskogo avtomobil'no-dorozhnogoinstituta= Bulletin of Kazakh Automobile and Road Institute = Kazakh avtomobil-zhol institutynyn Khabarshysy. 2024;2(6): 118-126. (In Rus.). <https://doi.org/10.63377/3005-4966.2-2024-12>

Литература

- [1] Хелзен Ф., Мартин А. Кварки и лептоны: Введение в физику частиц. Москва: Мир, 1987.
- [2] Feynman R.P. Feynman lectures on the strong interactions. <https://arxiv.org/abs/2006.08594> (дата обращения: 14.03.2024).
- [3] Розенталь И.Л., Снигирёв А.М. Гидродинамическая интерпретация взаимодействия частиц высоких энергий и космических γ -всплесков. Физика элементарных частиц и атомного ядра. 2003; 34(1):142–183.
- [4] Bjorken J.D. Highly relativistic nucleus-nucleus collisions: The central rapidity region. Physical Review D. 1983;27(1):140–151.
- [5] Салеев В.А. Кварк-глюонная плазма – новое состояние вещества. Соросовский образовательный журнал. 2000;6(5):64–70.
- [6] Goldfain E. Non-equilibrium dynamics as source of asymmetries in high energy physics. Electronic Journal of Theoretical Physics. 2010;7(24):219–234.
- [7] Вильсон К.Дж.Р. Ренормализационная группа и критические явления. Успехи физических наук. 1983;141(2):193–217.
- [8] Eyink G.L., Bandak D. Renormalization group approach to spontaneous stochasticity. Physical Review Research. 2020;2:043161.

- [9] Яковлев В.М., Яковлев М.А., Штеренберг А.М. Феноменологическое описание фазовых переходов и критических явлений. Самара: Изд-во СГТУ. 2008, 166.
- [10] Поляков А.М. Гипотеза подобия в сильных взаимодействиях. I. Множественное образование адронов при аннигиляции e^+e^- . ЖЭТФ. 1970; 59(2):542–552.
- [11] Темиралиев А.Т., Данлыбаева А.К. Формирование структур в нелинейной кварк-глюонной эволюции. Известия НАН РК. Серия физико-математическая. 2014; 2:106–111.
- [12] Батунин А.В. Фрактальный анализ и универсальность Фейгенбаума в физике адронов. УФН. 1995; 165(6):645–660.
- [13] Temiraliev A.T., Mazhit Z. An investigation of nuclear matter in extreme conditions. Журнал прикладной и экспериментальной общей и специальной физики. 2021; 23(3-4):34–37. <https://peos.kaznu.kz/> (дата обращения: 14.03.2024).

References

- [1] Khelsen F., Martin A.K. Quarks and Leptons: Introduction to Particle Physics. Moscow: Mir; 1987. (In Russ.)
- [2] Feynman R.P. Feynman lectures on the strong interactions. arXiv:2006.08594 [hep-ph], 2020. Available from: <https://arxiv.org/abs/2006.08594>. Accessed March 14, 2024.
- [3] Rozental I.L., Snigiryov A.M. Hydrodynamic interpretation of high-energy particle interactions and cosmic gamma bursts. Physics of Elementary Particles and Atomic Nucleus. 2003; 34(1):142–183. (In Russ.)
- [4] Bjorken J.D. Highly relativistic nucleus-nucleus collisions: The central rapidity region. Phys Rev D. 1983;27(1):140–151. doi:10.1103/PhysRevD.27.140.
- [5] Saleev V.A. Quark-gluon plasma – a new state of matter. Soros Educational Journal. 2000;6(5):64–70. (In Russ.)
- [6] Goldfain E. Non-equilibrium dynamics as source of asymmetries in high energy physics. Electronic Journal of Theoretical Physics. 2010;7(24):219–234.
- [7] Wilson K.G. Renormalization group and critical phenomena. Physics-Uspekhi. 1983;141(2):193–217. (In Russ.)
- [8] Eyink G.L., Bandak D. Renormalization group approach to spontaneous stochasticity. Phys Rev Res. 2020;2:043161. doi:10.1103/PhysRevResearch.2.043161
- [9] Yakovlev V.M., Yakovlev M.A., Shterenberg A.M. Phenomenological description of phase transitions and critical phenomena. Samara: Samara State Technical University; 2008. 166 p. (In Russ.)
- [10] Polyakov A.M. Hypothesis of similarity in strong interactions. I. Multiple hadron production in e^+e^- annihilation. Journal of Experimental and Theoretical Physics. 1970; 59(2):542–552. (In Russ.)
- [11] Temiraliev A.T., Danlybaeva A.K. Formation of structures in nonlinear quark-gluon evolution. Bulletin of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Physical-mathematical series. 2014; 2:106–111. (In Russ.)
- [12] Batunin A.V. Fractal analysis and universality of Feigenbaum in hadron physics. Physics-Uspekhi. 1995; 165(6):645–660. (In Russ.)
- [13] Temiraliev A.T., Mazhit Z. An investigation of nuclear matter in extreme conditions. Journal of Applied and Experimental General and Special Physics. 2021; 23(3-4):34–37. Available from: <https://peos.kaznu.kz/>. Accessed March 14, 2024. (In Russ.)