

Лаборатория информационных технологий им. М. Г. Мещерякова

В совместной работе сотрудников ОИЯИ и МГУ им. М. В. Ломоносова представлены эффективные численно-аналитические методы представления функции Вигнера квазиплотности вероятностей, полученные в рамках единого рассмотрения классических и квантовых систем в обобщенном фазовом пространстве. Функция Вигнера используется в таких областях, как квантовые вычисления, квантовая томография, квантовая связь и криптография. Предложена аппроксимация Власова–Моэля для векторного поля потока ускорений, которая при интегрировании по пространству скоростей естественным образом приводит к классическим уравнениям движения механики сплошных сред. С использованием базиса собственных функций гармонического осциллятора в явном виде были получены матричные элементы оператора Вейля, необходимые для представления функции Вигнера. На их основе построен эффективный численный алгоритм, позволяющий находить функцию Вигнера и средние (по фазовому пространству) характеристики квантовых систем, потенциал которых допускает полиномиальное приближение. Разработанный численный алгоритм позволяет на порядки сократить количество

вычислительных операций и имеет параллельную реализацию на архитектуре графических процессоров GPU. Работа выполнена при поддержке междисциплинарной научно-образовательной школы Московского университета «Фотонные и квантовые технологии. Цифровая медицина».

Пережелкин Е.Е. и др. Эффективный численный алгоритм построения функции Вигнера квантовой системы с полиномиальным потенциалом в фазовом пространстве // ЭЧАЯ. 2021. Т. 52, № 3. С. 784–856.

Представлен сравнительный анализ эффективности численных расчетов статических магнитных полей методом конечных элементов [1] в среде COMSOL Multiphysics® [2] в терминах как векторного, так и полного скалярного потенциалов магнитостатики для моделирования магнитных систем ускорителей. Такое моделирование, как правило, требует большого числа конечных элементов, необходимых для корректной аппроксимации сложной геометрии магнита, учета нелинейной намагниченности составляющих его материалов и достижения требуемой точности вычислений. Соответственно, увеличиваются и затраты вычислительных ресурсов компьютера (память, время), а значит, возникает потребность в их минимизации. С этой целью анализируются две различные формулировки

Meshcheryakov Laboratory of Information Technologies

Effective numerical and analytical methods for representing the Wigner function of the probability quasidensity, obtained within a unified consideration of classical and quantum systems in a generalized phase space, were illustrated in the joint work of specialists from JINR and Moscow State University. The Wigner function is used in such areas as quantum computing, quantum tomography, quantum communication and cryptography. The Vlasov–Moyal approximation for the vector field of the acceleration flux, which naturally leads to the classical equations of motion of continuum mechanics when integrated over the space of velocities, was proposed. Using the basis of the eigenfunctions of a harmonic oscillator, matrix elements of the Weil operator, which are necessary for representing the Wigner function, were obtained in an explicit form. An effective numerical algorithm was constructed on their basis. It allows finding the Wigner function and average (over the phase space) characteristics of quantum systems, the potential of which admits a polynomial approximation. The developed algorithm makes it possi-

ble to reduce the number of computational operations by orders of magnitude and has a parallel implementation on the graphics processing unit (GPU) architecture. The study was supported by the Interdisciplinary Scientific and Educational School of Moscow State University “Photonic and Quantum Technologies. Digital Medicine”.

Perepelkin E. E. et al. Effective Numerical Algorithm for Constructing the Wigner Function of a Quantum System with a Polynomial Potential in the Phase Space // Part. Nucl. 2021. V. 52, No. 3. P. 784–856 (in Russian).

Finite-element simulations of magnetostatic fields in terms of magnetic vector and total scalar potentials were performed and compared for modeling accelerator magnets [1]. Such modeling is usually confronted by the complexities of geometries, the nonlinearities of materials and high-quality magnetic field requirements. Attaining a sufficient accuracy of simulations at affordable computational costs is therefore a tedious task that can be facilitated by an appropriate choice of unknown variables describing magnetostatic fields. The simulations are carried out using a single software package, COMSOL Multiphysics® [2], where both potential formulations are

магнитостатики в терминах векторного и полного скалярного потенциалов.

В настоящее время обе формулировки полностью реализованы в пакете COMSOL Multiphysics®. Для формулировки с векторным магнитным потенциалом в рамках метода конечных элементов использовались векторные пробные функции, реализация которых является достаточно эффективной для моделирования магнитных систем ускорителей. Однако определение векторного потенциала во всей области решения задачи, включая протяженные участки, свободные от токов, существенно увеличивает число степеней свободы и связанные с ним затраты вычислительных ресурсов. В качестве альтернативы используется формулировка с полным скалярным потенциалом, для однозначности определения которого достаточно сделать разрезы трехмерной области задачи, заключенной между токонесущими элементами, и задать скачок потенциала на поверхности каждого разреза. В рамках метода конечных элементов узлы на таких поверхностях дублируются, а соответствующие значения потенциала отличаются на величину, равную току, ограничивающему поверхность. Для иллюстрации численных расчетов использовалась модель дипольного магнита [3], предназначенного для формирования магнитного поля в

изохронном циклотроне SC200. Эффективность обоих методов анализируется в терминах стандартных параметров метода конечных элементов с учетом затрат вычислительных ресурсов. В частности, показано, что использование скалярного потенциала, по сравнению с его векторным аналогом, значительно уменьшает число степеней свободы, затраты компьютерной памяти и времени при относительно одинаковой погрешности вычислений.

1. *Chervyakov A.* Finite-Element Modelling of Magnetic Fields for Superconducting Magnets with Magnetic Vector and Total Scalar Potentials Using COMSOL Multiphysics® // Intern. J. Eng. Syst. Model. Simulat. 2021. V.4. P. 1–17; doi: 10.1504/IJESMS.2021.10039001.

2. COMSOL Multiphysics®. AC/DC Module User's Guide. COMSOL AB. Stockholm, 2018.

3. *Karamysheva G. et al.* Magnetic System for SC200 Superconducting Cyclotron for Proton Therapy // Proc. of the 23rd Intern. Conf. on Cyclotrons and Their Applications. Zurich, 2016. P. 353–355.

Текущие и будущие эксперименты по физике высоких энергий сосредоточены на наблюдаемых, которые чувствительны к фазовому переходу кварк-глюонной плазмы. Наблюдаемые, указывающие на немонотонное и неожиданное (с теоретической точки зрения)

implemented. In this package, the magnetic vector potential formulation represents a standard and highly efficient tool for modeling accelerator magnets. However, the use of the vector potential for the whole problem domain, including the extended current-free regions, substantially increases the total number of degrees of freedom and the associated computational costs. Alternatively, the total scalar potential formulation is now also available for computations with this software after introducing cut surfaces assigned with potential jumps for the uniqueness of its definition. In the finite-element method (FEM), the nodes of such surfaces are duplicated, and the corresponding potential values differ by a magnitude equal to the current bounding the surface. The numerical performance of both methods was illustrated by the model example of a superconducting dipole magnet [3] recently developed for operation in the SC200 isochronous cyclotron. The calculation results were analyzed in terms of the relevant FEM parameters, accounting for the computational performance, as well as the computational costs. In particular, it was shown that the use of the scalar potential as compared to its vector counterpart substantially reduces the number of degrees

of freedom, the usage of computer memory and the computational time for a similar relative error.

1. *Chervyakov A.* Finite-Element Modelling of Magnetic Fields for Superconducting Magnets with Magnetic Vector and Total Scalar Potentials Using COMSOL Multiphysics® // Intern. J. Eng. Syst. Model. Simulat. 2021. V.4. P. 1–17; doi: 10.1504/IJESMS.2021.10039001.

2. COMSOL Multiphysics®. AC/DC Module User's Guide. COMSOL AB. Stockholm, 2018.

3. *Karamysheva G. et al.* Magnetic System for SC200 Superconducting Cyclotron for Proton Therapy // Proc. of the 23rd Intern. Conf. on Cyclotrons and Their Applications. Zurich, 2016. P. 353–355.

Current and future high-energy physics experiments focus on observables sensitive to the phase transition of a quark–gluon plasma. Observables that indicate the non-monotonic and unexpected (from a theoretical point of view) behavior of emitted particles are especially important. Thus, studying the formation of strange particles in heavy ion collisions is a promising task, since they can serve a good diagnostic tool for investigating the properties of nuclear matter under extreme conditions.

поведение испускаемых частиц, особенно важны. Таким образом, изучение образования странных частиц в столкновениях тяжелых ионов является многообещающей задачей, поскольку они могут служить хорошим диагностическим инструментом для исследования свойств ядерной материи в экстремальных условиях.

В работе, описывающей структуру адронов в рамках сильнокоррелированной кварковой модели, показано, как свойства мезонов и барионов могут меняться в плотной ядерной среде. Также показано, что в такой среде нуклоны преобразуются в дельта-изобары, гипероны и их возбужденные состояния, а мезоны рождаются преимущественно через векторные резонансы. Кроме того, свойства векторных мезонов, состоящих из легких кварков, меняются кардинально: ширина распада увеличивается, а значение массы уменьшается. Подобные модификации в ядерной среде, особенно в диапазоне энергий мегасайенс-проекта NICA, могут приводить к таким наблюдаемым эффектам, как усиление странности, «эффект рога» и усиление дилептонных инвариантных спектров масс в диапазоне 0,2–0,7 ГэВ.

Musulmanbekov G. Hadron Modifications in a Dense Baryonic Matter // Phys. Part. Nucl. Lett. 2021.V. 18, No. 5. P54

In the paper, describing the structure of hadrons within the Strongly Correlated Quark Model (SCQM), it was shown how the properties of mesons and baryons can be modified in a dense nuclear medium. It was also demonstrated that under such conditions nucleons are converted into delta isobars, hyperons and their excitations, and mesons are produced predominantly via vector resonances. Moreover, the properties of vector mesons, consisting of light quarks, change drastically. The decay width increases, and the mass value decreases. In-medium modifications, especially in the energy range of the NICA megascience project, can result in such observed effects as the enhancement of strangeness, “horn effect”, and enhancement of dilepton invariant mass spectra at 0.2–0.7 GeV.

Musulmanbekov G. Hadron Modifications in a Dense Baryonic Matter // Phys. Part. Nucl. Lett. 2021. V. 18, No. 5. P. 548–558.