

УДК 004.9:53

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ПРИРОДЕ КАК ОСНОВА ДЛЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ В ФИЗИКЕ

Леопольд Викторович Брижанский¹

кандидат технических наук, доцент

kinglion_brig@inbox.ru

Юлия Александровна Брижанская²

учитель физики

Елизавета Леопольдовна Брижанская³

студент

lionbrig@mail.ru

Данила Павлович Козлов¹

студент

thepolarospl@yandex.ru

¹Мичуринский государственный аграрный университет

²МБОУ СОШ №18

г. Мичуринск, Россия

³Московский государственный технический университет

имени Н.Э. Баумана

г. Москва, Россия

Аннотация. Современные открытия в области физики высоких энергий и астрофизики в значительной степени опираются на применение передовых вычислительных методов. В статье рассматриваются четыре фундаментальных взаимодействия — гравитационное, слабое, электромагнитное и сильное — не только с точки зрения их физических свойств и проявлений, но и как основа для создания сложных вычислительных моделей. Рассмотрены ключевые

направления на стыке физики и информационных технологий, включая решеточную квантовую хромодинамику, численное моделирование гравитационных волн, методы Монте-Карло и машинное обучение для анализа данных экспериментов на Большом адронном коллайдере. Показано, что фундаментальные взаимодействия служат полигоном для разработки и апробации новейших вычислительных алгоритмов и технологий, что открывает новые горизонты для междисциплинарных исследований в физике и компьютерных науках [4, 7].

Ключевые слова: фундаментальные взаимодействия, гравитация, электромагнетизм, сильное взаимодействие, слабое взаимодействие, вычислительная физика, компьютерное моделирование, решеточная КХД, машинное обучение, Big Data (Большие данные).

Гравитация: фундаментальная сила, формирующая Вселенную

Гравитация, происходящая от латинского слова "gravitas", означающего "тяжесть", представляет собой универсальное фундаментальное взаимодействие, действующее между всеми материальными объектами во Вселенной. Она играет решающую роль в формировании и структурировании космического пространства на макро- и мегамировом уровнях.

Гравитация стала первым из четырех фундаментальных взаимодействий, подвергнутым научному изучению. В начале XVII века Исаак Ньютон сформулировал свою теорию всемирного тяготения, которая ввела концепцию гравитационной силы как обратно пропорциональной квадрату расстояния между объектами. Эта теория позволила впервые понять фундаментальную роль гравитации в движении небесных тел.

Позже Альберт Эйнштейн разработал общую теорию относительности, которая расширила ньютоновскую теорию и предоставила более точное и всеобъемлющее описание гравитационного взаимодействия. Теория относительности утверждает, что гравитация является искривлением пространства-времени, создаваемым массой и энергией.

Гравитационное взаимодействие заключается во взаимном притяжении тел и определяется законом всемирного тяготения: между двумя точечными телами действует сила притяжения, прямо пропорциональная произведению их масс m и обратно пропорциональна квадрату расстояния r между ними

$$F = G \frac{M_1 \times M_2}{R^2}$$

где G – гравитационная постоянная, $G = 6,6743 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^{-2}$.

Хотя гравитация является одной из главных сил в макромире, в микромире ее влияние становится незначительным. Это связано с тем, что гравитоны имеют слабый перенос энергии по сравнению с другими фундаментальными частицами, такими как фотоны. Таким образом, гравитационные эффекты становятся несущественными на атомном и субатомном уровнях.

В макромире, на уровне звезд, планет и галактик, гравитация играет доминирующую роль в формировании и движении этих объектов. Она отвечает за вращение планет вокруг звезд, движение звезд в галактиках и образование самих галактик.

В мегамире, на уровне скоплений галактик и сверхскоплений, гравитация отвечает за формирование крупномасштабной структуры Вселенной. Она объединяет объекты вместе, образуя громадные космические структуры и определяя эволюцию Вселенной в целом.

В последние десятилетия ученые обнаружили свидетельства существования таинственной темной материи и темной энергии. Считается, что темная материя составляет около 27% всей массы во Вселенной и проявляется только через гравитационное взаимодействие. Темная энергия, с другой стороны, представляет собой неизвестную форму энергии, которая ускоряет расширение Вселенной. Эти открытия расширяют наше понимание гравитации и ее роли в космической эволюции.

В 2015 году ученые впервые напрямую обнаружили гравитационные волны, рябь в пространстве-времени, вызванную крупными гравитационными событиями, такими как слияния черных дыр [1]. Это подтвердило предсказания общей теории относительности и открыло новое окно во Вселенную. Изучение гравитационных волн может дать ценную информацию о самых экстремальных событиях во Вселенной, включая формирование и слияние черных дыр, и углубить наше понимание гравитационного взаимодействия.

Обнаружение этих волн стало возможным не только благодаря точности физических теорий, но и благодаря применению сложных алгоритмов цифровой фильтрации сигналов, позволяющих выделить чрезвычайно слабые колебания на фоне сейсмических и инструментальных шумов.

Изучение гравитации остаётся одним из самых увлекательных и сложных научных фронтов. Ученые работают над различными направлениями, включая:

- Поиск гравитонов и определение их свойств

- Разработка квантовых теорий гравитации, которые объединяют гравитацию с другими фундаментальными взаимодействиями
- Исследование роли темной материи и темной энергии в гравитационном взаимодействии
- Использование гравитационных волн для изучения ранней Вселенной и самых экстремальных событий

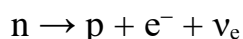
Продолжающееся изучение гравитации имеет решающее значение для нашего понимания Вселенной, ее происхождения и эволюции. По мере того, как мы углубляемся в тайны гравитационного взаимодействия, мы приближаемся к созданию все более полной картины нашего космического дома.

Слабое взаимодействие

Это взаимодействие является наиболее слабым из фундаментальных взаимодействий, экспериментально наблюдаемых в распадах элементарных частиц, где принципиально существенными являются квантовые эффекты.

Характерной особенностью слабого взаимодействия является участие в нем элементарных частиц под названием нейтрино (или антинейтрино). Любое взаимодействие, в котором участвует нейтрино, считается слабым взаимодействием.

Наиболее известным примером слабого взаимодействия является бета-распад нейтрона:



где n - нейтрон, p - протон, e^{-} - электрон и ν_e - электронное антинейтрино.

Современная физика установила, что нейтроны и протоны не являются истинно элементарными частицами. Они состоят из элементарных частиц, называемых кварками. Слабое взаимодействие играет важную роль в превращении нейтронов в протоны и обратно, что приводит к изменению заряда и состава атомных ядер.

Интенсивность слабого взаимодействия характеризуется константой связи Ферми (G_F). Для представления ее в безразмерном виде используется эталонная масса, обычно масса протона (m_p). Таким образом, безразмерная константа связи слабого взаимодействия определяется как:

$$\alpha W = G_F m_p^2 \approx 10^{-5}$$

Из этого видно, что слабое взаимодействие значительно интенсивнее гравитационного взаимодействия, но не так сильно, как сильное взаимодействие.

В отличие от гравитационного взаимодействия, слабое взаимодействие является короткодействующим. Это означает, что оно действует только на очень коротких расстояниях, порядка 10^{-15} м (аттометровый масштаб). Это связано с массивными частицами-переносчиками слабого взаимодействия, называемыми W- и Z-бозонами, которые обладают высокой массой и, следовательно, имеют ограниченный радиус действия.

Механизм Хиггса играет ключевую роль в слабом взаимодействии. Он объясняет, как элементарные частицы получают массу. В соответствии с этим механизмом, существует особое поле, называемое полем Хиггса, которое пронизывает все пространство и взаимодействует с элементарными частицами. Это взаимодействие придает частицам массу. Бозон Хиггса, обнаруженный в 2012 году на Большом адронном коллайдере, является элементарной частицей, связанной с полем Хиггса [6].

Статистический анализ триллионов столкновений, приведших к открытию бозона Хиггса, потребовал создания глобальной распределенной вычислительной сети (GRID), что является выдающимся достижением в области информационных технологий.

Слабое взаимодействие имеет важное значение в различных областях физики и астрофизики. Оно отвечает за такие процессы, как:

- Ядерный распад;
- Фузионные реакции на Солнце и других звездах;
- Нарушение симметрии зарядового сопряжения (CP-нарушение);

- Происхождение нейтринных осцилляций.

Понимание слабого взаимодействия имеет решающее значение для изучения фундаментальных законов природы и процессов, определяющих эволюцию Вселенной.

Электромагнитное взаимодействие: от классики до квантов

Электромагнитное взаимодействие играет фундаментальную роль в нашем мире, охватывая все заряженные тела и элементарные частицы.

Это универсальное явление, проявляющееся во множестве физических процессов. Классическое описание электромагнитного взаимодействия, известное как электродинамика Максвелла, описывает поведение электрических зарядов и полей на макроскопическом уровне.

Электромагнитное взаимодействие, в отличие от гравитационного, является дальнедействующим, то есть сила взаимодействия между заряженными телами не зависит от их скорости и остается значимой даже на больших расстояниях. Проявления электромагнитного взаимодействия легко наблюдаемы в повседневной жизни: притяжение и отталкивание магнитов, искры между заряженными предметами и т.д.

Квантовая теория позволила глубже понять природу электромагнитного взаимодействия. Переносчиком этого взаимодействия является элементарная частица, называемая фотоном. Фотон - безмассовый бозон со спином 1, который передает взаимодействие между заряженными частицами. Взаимодействие между двумя зарядами в квантовой теории изображается как испускание и поглощение фотонов этими зарядами.

Важным понятием в электромагнитной теории является безразмерная константа связи, характеризующая силу взаимодействия. Она обозначается как α (константа тонкой структуры) и определяется через фундаментальные физические постоянные: заряд электрона (e), постоянную Планка (\hbar) и скорость света (c). Константа α равна $e^2/\hbar c$ и составляет около 1/137. Это значение

значительно выше констант гравитационного и слабого взаимодействий, указывая на сравнительно большую силу электромагнитного взаимодействия.

Развитие физики во второй половине XX века привело к открытию глубокой взаимосвязи между электромагнитным и слабым взаимодействиями. В 1967 году Шельдон Глэшоу, Стивен Вайнберг и Абдус Салам предложили теорию электрослабых взаимодействий, которая объединила эти два фундаментальных взаимодействия в рамках единой структуры. Теория Вайнберга-Салама-Глэшоу позволила объяснить широкий спектр явлений в мире элементарных частиц и стала одним из краеугольных камней Стандартной модели физики.

Дальнейшие исследования в области элементарных частиц позволили расширить наше понимание электромагнитных взаимодействий. В частности, была открыта унификация электромагнитного и слабого взаимодействий, а также других сил, таких как сильное взаимодействие. В рамках Стандартной модели эти силы рассматриваются как проявления единого фундаментального взаимодействия, называемого Великим объединением.

Поиск подтверждения Великого объединения и дальнейшее изучение электромагнитного взаимодействия остаются одними из основных направлений современной физики. Исследования ведутся на высокоэнергетических ускорителях элементарных частиц, таких как Большой адронный коллайдер в ЦЕРНе. Понимание электромагнитного взаимодействия играет ключевую роль в развитии различных технологий, таких как электроника, оптика и коммуникационные системы. Оно имеет фундаментальное значение для описания широкого круга явлений в природе, от поведения элементарных частиц до поведения макроскопических тел.

Сильное взаимодействие

Сильное взаимодействие ответственно за устойчивость атомных ядер. Поскольку атомные ядра большинства химических элементов стабильны, то ясно, что взаимодействие, которое удерживает их от распада, должно быть

достаточно сильным. Хорошо известно, что ядра состоят из протонов и нейтронов. Чтобы положительно заряженные протоны не разлетелись в разные стороны, необходимо наличие сил притяжения между ними, превосходящих силы электростатического отталкивания. Именно сильное взаимодействие является ответственным за эти силы притяжения.

Характерной чертой сильного взаимодействия является его зарядовая независимость. Ядерные силы притяжения между протонами, между нейтронами и между протоном и нейтроном по существу одинаковы. Отсюда следует, что с точки зрения сильных взаимодействий протон и нейтрон неотличимы и для них используется единый термин *нуклон*, то есть частица ядра.

Характерный масштаб сильного взаимодействия можно проиллюстрировать рассмотрев два покоящихся нуклона. Теория приводит к потенциальной энергии их взаимодействия в виде потенциала Юкавы

$$V(r) = -g^2 \frac{e^{-r/r_0}}{r},$$

где величина $r_0 \approx 10^{-13}$ см и совпадает по порядку величины с характерным размером ядра, g - константа связи сильного взаимодействия. Это соотношение показывает, что сильное взаимодействие является короткодействующим и по существу полностью сосредоточено на расстояниях, не превышающих характерного размера ядра. При $r > r_0$ оно практически исчезает. Известным макроскопическим проявлением сильного взаимодействия служит эффект α -радиоактивности. Следует, однако, иметь в виду, что потенциал Юкавы не является универсальным свойством сильного взаимодействия и не связан с его фундаментальными аспектами.

В настоящее время существует квантовая теория сильного взаимодействия, получившая название квантовой хромодинамики [5]. Согласно этой теории, переносчиками сильного взаимодействия являются элементарные частицы - глюоны. По современным представлениям частицы, участвующие в сильном взаимодействии и называемые адронами, состоят из элементарных частиц - кварков.

Кварки представляют собой фермионы со спином $1/2$ и ненулевой массой. Наиболее удивительным свойством кварков является их дробный электрический заряд. Кварки формируются в три пары (три поколения дублетов), обозначаемые следующим образом:

$$\begin{array}{ccc} u & c & t \\ d & s & b \end{array}$$

Каждый тип кварка принято называть ароматом, так что существуют шесть кварковых ароматов. При этом u -, c -, t -кварки имеют электрический заряд $2/3|e|$, а d -, s -, b -кварки - электрический заряд $-1/3|e|$, где e - заряд электрона. Кроме того, существуют три кварка данного аромата. Они отличаются квантовым числом, называемым цветом и принимающим три значения: желтый, синий, красный. Каждому кварку соответствует антикварк, имеющий по отношению к данному кварку противоположный электрический заряд и так называемый антицвет: антижелтый, антисиний, антикрасный. Принимая во внимание число ароматов и цветов, мы видим, что всего существуют 36 кварков и антикварков.

Кварки взаимодействуют друг с другом посредством обмена восьмью глюонами, которые представляют собой безмассовые бозоны со спином 1. В процессе взаимодействия цвета кварков могут изменяться. При этом сильное взаимодействие условно изображается следующим образом (рисунок 1):

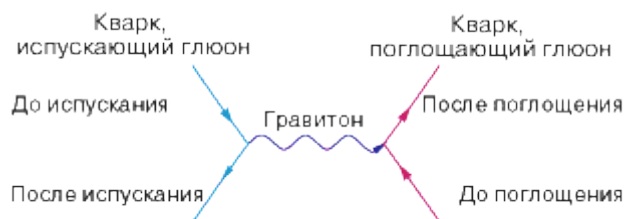


Рисунок 1 – Сильное взаимодействие.

Кварк, входящий в состав адрона, испускает глюон, в силу чего состояние движения адрона изменяется. Этот глюон поглощается кварком, входящим в состав другого адрона, и меняет состояние его движения. В результате возникает взаимодействие адронов друг на друга.

Природа устроена так, что взаимодействие кварков всегда ведет к образованию бесцветных связанных состояний, которые как раз и являются

адронами. Например, протон и нейтрон составлены из трех кварков: $p = uud$, $n = udd$. Пион π^- составлен из кварка u и антикварка \bar{d} : $\pi^- = u\bar{d}$. Отличительная черта кварк-кваркового взаимодействия через глюоны состоит в том, что с уменьшением расстояния между кварками их взаимодействие ослабляется. Это явление получило название асимптотической свободы и ведет к тому, что внутри адронов кварки можно рассматривать как свободные частицы. Асимптотическая свобода естественным образом вытекает из квантовой хромодинамики. Имеются экспериментальные и теоретические указания на то, что с ростом расстояния взаимодействие между кварками должно возрасти, в силу чего кваркам энергетически выгодно находиться внутри адрона. Это означает, что мы можем наблюдать только бесцветные объекты - адроны. Одиночные кварки и глюоны, обладающие цветом, не могут существовать в свободном состоянии. Явление удержания элементарных частиц, обладающих цветом, внутри адронов получило название конфайнмента. Для объяснения конфайнмента предлагались различные модели, однако последовательное описание, вытекающее из первых принципов теории, до сих пор не построено. С качественной точки зрения трудности связаны с тем, что, обладая цветом, глюоны взаимодействуют со всеми цветными объектами, в том числе и друг с другом.

По этой причине квантовая хромодинамика является существенно нелинейной теорией и приближенные методы исследования, принятые в квантовой электродинамике и электрослабой теории, оказываются не вполне адекватными в теории сильных взаимодействий.

Вычислительные модели на основе фундаментальных взаимодействий

Понимание фундаментальных взаимодействий является не только задачей теоретической физики, но и основой для создания сложных вычислительных моделей и алгоритмов, что представляет непосредственный интерес для информатики и вычислительной техники. Без точных численных методов и мощных вычислительных систем современные экспериментальные данные в области физики высоких энергий и астрофизики были бы неинтерпретируемы.

• **Квантовая хромодинамика (КХД) на решетке.** Это одно из самых требовательных к вычислительным ресурсам направлений в мире. Для моделирования сильного взаимодействия между кварками и глюонами пространство-время дискретизируется в виде решетки. Расчеты на таких решетках [2] требуют использования самых мощных суперкомпьютеров мира и позволяют предсказывать массы адронов, изучать свойства кварк-глюонной плазмы — состояния вещества, в котором пребывала ранняя Вселенная.

• **Моделирование гравитационных волн.** Общая теория относительности Эйнштейна описывает гравитацию через нелинейные уравнения, решения для которых в аналитическом виде находятся лишь для простейших случаев. Столкновения черных дыр и нейтронных звезд моделируются численно на суперкомпьютерах. Созданные банки шаблонов (template banks) этих сигналов используются для их поиска в шумных данных детекторов LIGO и Virgo [1] с помощью методов корреляционного анализа и машинного обучения.

• **Монте-Карло-моделирование в физике частиц.** При проектировании детекторов Большого адронного коллайдера (БАК) и анализе результатов столкновений активно применяются статистические методы, в первую очередь — методы Монте-Карло. Миллиарды виртуальных столкновений генерируются случайным образом для того, чтобы отделить искомые редкие события (например, рождение бозона Хиггса) от фоновых процессов. Эффективность этих алгоритмов напрямую определяет скорость получения научных результатов.

• **Машинное обучение для классификации событий.** Огромные объемы данных, генерируемые экспериментальными установками (петабайты в год), делают невозможным их ручной анализ. Алгоритмы машинного обучения, в частности, глубокие нейронные сети, обучаются распознавать специфические "следы" (траектории, энергетические кластеры) определенных частиц, значительно ускоряя и автоматизируя процесс обработки экспериментальных данных [3].

Таким образом, фундаментальные взаимодействия служат не только объектом изучения, но и полигоном для разработки и апробации передовых вычислительных технологий, которые, в свою очередь, становятся ключом к новым физическим открытиям.

В заключение, элементарные частицы и фундаментальные взаимодействия образуют фундамент современной физики. Их изучение тесно переплетено с развитием информатики и вычислительной техники, открывая перед учеными новые горизонты в понимании законов природы и строения Вселенной через создание сложных вычислительных моделей и алгоритмов анализа данных. Постоянно развивающееся поле физики элементарных частиц обещает раскрыть еще более глубокую взаимосвязь между материей, энергией, фундаментальными силами и вычислительными технологиями [2-3, 7].

Список литературы:

1. Abbott B. P. et al. (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration) Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger // *Physical Review Letters*. 2016. Vol. 116. 061102.
2. Gattringer C., Lang C. B. Quantum Chromodynamics on the Lattice // *Lecture Notes in Physics*. Springer. 2010. Vol. 788.
3. Guest D., Cranmer K., Whiteson D. Deep Learning and Its Application to LHC Physics // *Annual Review of Nuclear and Particle Science*. 2018. Vol. 68. P. 161–181.
4. Бухбиндер, И. Л. Фундаментальные взаимодействия // *Соросовский образовательный журнал*. 1997. Т. 3. № 5. С. 66-73. EDN VTDOCF.
5. Грибов В. Н. Квантовая хромодинамика // *Успехи физических наук*. 1978. Т. 126, вып. 1. С. 107–129.
6. Окунь Л. Б. Лептоны и кварки. М.: Едиториал УРСС, 2005. 352 с.

7. Петрухина И. А., Френкель Е. Н. Фундаментальные взаимодействия в макромире // X Международная студенческая научная конференция Студенческий научный форум // Science Forum. 2018.

UDC 004.9:53

**FUNDAMENTAL INTERACTIONS IN NATURE AS A BASIS FOR
COMPUTATIONAL MODELS IN PHYSICS**

Leopold V. Brizhansky¹

candidate of technical sciences, associate professor

kinglion_brig@inbox.ru

Yulia Al. Brizhanskaya²

physics teacher

Elizaveta L. Brizhanskaya³

student

lionbrig@mail.ru

Danila P. Kozlov¹

student

thepolarospl@yandex.ru

¹Michurinsk State Agrarian University

²Secondary School No. 18

Michurinsk, Russia

³Bauman Moscow State Technical University

Moscow, Russia

Annotation. Modern discoveries in the field of high-energy physics and astrophysics rely heavily on the use of advanced computational methods. The article examines four fundamental interactions — gravitational, weak, electromagnetic, and

strong — not only in terms of their physical properties and manifestations, but also as a basis for creating complex computational models. Key areas at the intersection of physics and information technology are considered, including lattice quantum chromodynamics, numerical simulation of gravitational waves, Monte Carlo methods, and machine learning for analyzing experimental data at the Large Hadron Collider. It is shown that fundamental interactions serve as a testing ground for the development and testing of the latest computational algorithms and technologies, which opens up new horizons for interdisciplinary research in physics and computer science [4, 7].

Keywords: fundamental interactions, gravity, electromagnetism, strong interaction, weak interaction, computational physics, computer modeling, lattice QCD, machine learning, Big Data.

Статья поступила в редакцию 24.10.2025; одобрена после рецензирования 20.12.2025; принята к публикации 29.12.2025.

The article was submitted 24.10.2025; approved after reviewing 20.12.2025; accepted for publication 29.12.2025.