

Физики создали новую «библиотеку» интегралов Фейнмана: вычисления для Большого адронного коллайдера ускорились в тысячу раз



Дата публикации: 17.07.2026

Современная физика элементарных частиц переживает эпоху беспрецедентной точности. Эксперименты на крупнейших ускорителях мира позволяют измерять свойства фундаментальных частиц с невероятной детализацией, однако получение теоретических предсказаний становится все более сложной задачей. Для описания взаимодействий между элементарными частицами ученым приходится выполнять огромное количество математических вычислений, многие из которых требуют колоссальных вычислительных ресурсов. Одной из самых трудоемких задач остаются расчеты интегралов Фейнмана — фундаментальных математических выражений, лежащих в основе квантовой теории поля.

Исследователи из Университета имени Иоганна Гутенберга в Майнце предложили принципиально новый подход к решению этой проблемы. Разработанный ими метод позволяет упорядочивать интегралы Фейнмана не случайным образом, как это делалось ранее, а на основе их внутренних

геометрических свойств. Такой подход существенно упрощает вычисления и способен ускорить выполнение сложных расчетов примерно в тысячу раз. Результаты работы опубликованы сразу в двух ведущих научных журналах — Physical Review Letters и Physical Review D.

Интегралы Фейнмана являются одним из важнейших математических инструментов современной квантовой физики. Они используются для вычисления вероятностей взаимодействия элементарных частиц, рождения новых частиц, распадов нестабильных состояний и множества других процессов, происходящих в микромире. Практически каждый теоретический прогноз, который затем сравнивается с результатами экспериментов на Большом адронном коллайдере или других ускорителях, в той или иной степени основан именно на вычислении этих интегралов.

Свое название они получили в честь выдающегося американского физика Ричарда Фейнмана, лауреата Нобелевской премии, который разработал удобный графический способ описания квантовых процессов. Диаграммы Фейнмана сегодня известны практически каждому физику: они позволяют представить сложнейшие взаимодействия частиц в виде наглядных схем, где линии изображают частицы, а точки пересечения — их взаимодействия. Однако за кажущейся простотой этих диаграмм скрываются чрезвычайно сложные математические выражения.

Чем выше точность вычислений, тем больше интегралов приходится учитывать. Для некоторых современных задач их число может достигать сотен тысяч и даже миллионов. Каждый новый уровень точности многократно увеличивает вычислительную сложность, превращая расчеты в серьезную проблему даже для самых мощных суперкомпьютеров.

До настоящего времени большинство методов обработки интегралов Фейнмана основывалось на алгоритмах линейной алгебры, в которых порядок обработки выбирался практически произвольно. Такой подход работал, но далеко не всегда был эффективным. Во многих случаях вычислительные программы тратили огромное количество времени на промежуточные преобразования, прежде чем получить окончательный результат.

Исследовательская группа профессора Стефана Вайнцирля предложила изменить сам принцип организации вычислений. Вместо случайной последовательности интегралы теперь сортируются в соответствии с их внутренней математической структурой.

Авторы сравнивают новый подход с организацией библиотеки. Если расставлять книги в порядке их поступления, найти нужное произведение

становится непросто. Гораздо логичнее распределить литературу по тематике, жанрам или авторам. Аналогичным образом физики решили "заглянуть внутрь" каждого интеграла, исследовав его геометрические свойства, а затем объединить похожие математические объекты в общую систему.

Такой подход оказался значительно эффективнее традиционных методов. Компьютерные программы получили возможность автоматически преобразовывать чрезвычайно сложные системы уравнений в значительно более простую форму, удобную для дальнейшего решения.

Основой новой технологии стал специально разработанный двухэтапный алгоритм. На первом этапе производится геометрическая классификация интегралов, позволяющая построить оптимальный базис так называемых мастер-интегралов — минимального набора независимых математических выражений, необходимых для описания конкретного физического процесса.

На втором этапе выполняется дополнительное преобразование дифференциальных уравнений, устраняющее наиболее сложные зависимости от параметра регуляризации, который в квантовой теории поля традиционно обозначается греческой буквой эпсилон. Именно этот параметр играет важную роль при устранении математических бесконечностей, возникающих в расчетах взаимодействий элементарных частиц.

В результате исследователям удалось создать универсальную математическую схему, пригодную практически для любого типа интегралов Фейнмана. Это особенно важно, поскольку разнообразие физических процессов чрезвычайно велико, а универсальные методы существенно облегчают проведение новых исследований.

Практическое значение открытия выходит далеко за пределы чистой математики. Большой адронный коллайдер продолжает работать с постоянно возрастающей точностью измерений. Чтобы корректно интерпретировать полученные экспериментальные данные, теоретические расчеты должны быть не менее точными. Даже небольшие расхождения между экспериментом и расчетом могут свидетельствовать либо о наличии ошибок в вычислениях, либо об открытии совершенно новой физики, выходящей за рамки современной Стандартной модели.

Чем быстрее удастся получать теоретические предсказания, тем больше различных сценариев можно проверить. Это значительно ускоряет поиск новых элементарных частиц, исследование темной материи, изучение свойств бозона Хиггса и проверку фундаментальных физических теорий.

Кроме физики высоких энергий, подобные математические методы могут

найти применение и в других областях науки. Сложные многомерные интегралы широко используются в квантовой химии, физике конденсированного состояния, материаловедении, астрофизике и космологии. Поэтому новый алгоритм потенциально способен ускорить расчеты и в этих дисциплинах.

Особенно важно, что предложенный метод основан не на увеличении вычислительной мощности компьютеров, а на более глубоком понимании внутренней структуры самих математических объектов. Такой подход считается одним из наиболее перспективных направлений современной вычислительной математики, поскольку позволяет добиваться значительного роста эффективности без необходимости создания новых суперкомпьютеров.

Авторы исследования считают, что разработанная система станет важным инструментом для физиков всего мира. Новая "библиотека" интегралов Фейнмана позволяет значительно быстрее получать высокоточные теоретические предсказания, необходимые для анализа данных крупнейших научных установок. По мере дальнейшего развития ускорительной физики подобные математические технологии будут играть все более важную роль, помогая ученым глубже понимать фундаментальные законы природы и приближаться к ответам на самые сложные вопросы современной науки.

Ссылка: «Геометрическое руководство по учету интегрального редукции Фейнмана и ε -факторизованных дифференциальных уравнений» DOI: [10.1103/pyt8-d7rt](https://doi.org/10.1103/pyt8-d7rt).