

Как современные исследования используют идеи прошлого для новых открытий.

В 1943 году немецкий физик Вернер Гейзенберг, отвлекаясь от Второй мировой войны, размышлял о кризисе в квантовой теории. Прогнозы о поведении частиц иногда давали бессмысленные, бесконечные результаты. Эти бесконечности заставляли Гейзенберга сомневаться в том, как квантовая физика изображает реальность, и ожидать, что революционная новая теория в конечном итоге свергнет физику частиц и исправит проблему. Однако даже без такой теории он понял, что прогресс все еще возможен. Ключевым было сосредоточиться на неоспоримых фактах, которые сохранятся независимо от того, какая новая теория может возникнуть в будущем.

Эти факты, по мнению Гейзенберга, заключались в наблюдениях — конкретно, в результатах столкновений частиц. Когда две частицы сталкиваются, они могут претерпеть множество квантовых превращений, прежде чем появятся конечные продукты. Гейзенберг игнорировал загадочные динамические события в середине и вместо этого фиксировал только начальные и конечные частицы. Он собирал возможные исходы в таблицу, называемую матрицей рассеяния, или S-матрицей. Независимо от того, насколько странной окажется окончательная теория физики частиц, она должна предсказывать правильную S-матрицу. Поэтому, изучая правила и закономерности этой матрицы, Гейзенберг гарантировал, что его работа устоит перед испытанием временем.

Концепция S-матрицы была впервые исследована Полом Дираком, а термин был введен Джоном Уилером. Вклад Вернера Гейзенберга заключался в продвижении этой идеи, рассматривая ее не просто как математический инструмент, но как фундаментальную перспективу.

Гейзенберг задавался вопросом: как будет выглядеть процесс рассеяния элементарных частиц, если наблюдать его с конца времен, на границах наблюдаемой Вселенной? Такой взгляд "с асимптотически далекого будущего" позволил по-новому интерпретировать S-матрицу, связав ее с глубинными принципами квантовой теории поля.

Подобная концептуальная точка зрения выходила за рамки простого использования S-матрицы как вычислительного приема. Гейзенберг стремился перевести фокус с описания элементарных процессов на более фундаментальный уровень, охватывающий всю историю Вселенной от Большого взрыва до конечных стадий ее эволюции.

Наглядным примером подхода Гейзенберга может служить бозон Хиггса – последняя обнаруженная фундаментальная элементарная частица. Открытый в 2012 году, бозон Хиггса существует менее одной миллиардной миллиардной секунды, перемещаясь при этом на расстояние менее одной миллионной миллионной метра.

По сравнению с этими мизерными масштабами, частицы, которые на мгновение порождают бозоны Хиггса, существуют несоизмеримо дольше и на гораздо больших расстояниях. Однако S-матрица позволяет взглянуть на эти процессы с асимптотически удаленной перспективы – с самых границ наблюдаемой Вселенной на финальных этапах ее эволюции.

Такой радикально отстраненный взгляд "с конца времен" открывает возможность по-новому интерпретировать квантовые явления. Он позволяет связать сингулярные явления на планковских масштабах с глобальной космологической картиной, охватывающей всю историю мироздания от Большого взрыва и далее.

Этот концептуальный сдвиг, предложенный Гейзенбергом, указывает на потенциал S-матрицы выступать не просто вычислительным инструментом, но фундаментальным принципом, объединяющим квантовую теорию поля с космологией.

Чтобы понять, как работает S-матрица, можно представить бросание кубиков. С одним кубиком есть шесть возможных исходов и вероятность  $1/6$  для каждого из них. С двумя кубиками есть 12 возможных исходов с различными вероятностями. Теперь эти вероятности можно представить в виде таблицы. Эта таблица и есть матрица.

После 1940-х годов физики осознали, что революционный подход Гейзенберга не является необходимым. Они научились более эффективно применять формализм лагранжиана – мощный математический аппарат, позволяющий определять все частицы, которые могут возникать в процессах рассеяния, а также описывать их взаимодействия.

Используя лагранжиан, стало возможным вычислять реальные наблюдаемые величины для любого столкновения элементарных частиц, включая самые кратковременные промежуточные стадии этих процессов. Такое углубленное понимание квантовой теории поля позволило физикам обойти проблему расходимостей и непосредственно моделировать саму суть явлений рассеяния частиц.

Таким образом, вместо радикальной концептуальной перестройки, предложенной Гейзенбергом в рамках S-матричного подхода, физическое сообщество выбрало путь совершенствования существующих вычислительных методов в квантовой теории поля. Хотя идеи Гейзенберга оказались провидческими, их практическая реализация оказалась излишней благодаря развитию более традиционных формализмов.

Однако в 1960-х годах квантовая теория поля вновь поставила физиков в тупик. Эксперименты обнаружили поразительное множество новых частиц, подобных протонам и нейтронам, но с широким разбросом масс и электрических зарядов. Полный лагранжиан должен был учитывать всю эту совокупность "адронных" частиц, однако их огромное количество казалось подавляющим.

Описание столь внушительного спектра адронов в рамках лагранжиана потребовало бы включения чрезвычайно большого числа членов и параметров в уравнения. Это не только затрудняло вычисления, но и ставило под сомнение саму последовательность такого подхода, лишая теорию ее предсказательной силы и элегантности.

Невозможность компактно описать эту "частичное многообразие" адронов продемонстрировала ограниченность существующих формализмов квантовой теории поля. Физикам вновь потребовался концептуальный прорыв, чтобы выйти за рамки затянувшегося кризиса и объяснить загадочную внутреннюю структуру адронов.

Физика вновь стоит на перепутье. Общепризнано, что лагранжиан Стандартной модели не является окончательным. Однако может пройти не одно десятилетие, прежде чем эксперименты дадут результаты, выходящие за рамки объяснительных возможностей современных теорий. Тем не менее, когда это произойдет, представления физиков о мироустройстве претерпят кардинальные изменения. Объединение квантовой механики и гравитации потребует куда более радикальной революции, нежели предыдущие, и никому неведомо, из каких "кирпичиков" будет построена новая реальность. В эти неопределенные времена физики вновь обращаются к единственному постоянному элементу – S-матрице.

Некоторые, как постдок из ЦЕРН Лусия Кордова, расширяют поиски, начатые группой Чу. Используя численные методы, они исследуют пространство жизнеспособных S-матриц. Такое исследование может быть единственным способом понять теории без лагранжианов, которые могут понадобиться для квантовой гравитации.

Другие, как Себастьян Мизера из Института перспективных исследований в Принстоне, видят новый смысл в первоначальной мечте Чу: создание S-матрицы,

отражающей поведение конкретных частиц. Недавно Мизера и другие исследователи сосредоточились на безмассовых частицах, таких как глюоны.

Таким образом, физики смогли полностью сформулировать теории глюонов и других частиц, опираясь исключительно на S-матрицы и избегая использования лагранжианов. Вдохновленные этими недавними успехами, они продолжают поиск более фундаментальных принципов, лежащих в основе всех S-матриц. Подобно Гейзенбергу и Чу, они сосредотачиваются на экспериментальных наблюдениях, стремясь открыть неизменные истины, которые останутся в силе, независимо от формы грядущих теорий.

На перекрестке науки и фантазии — наш канал