**За пределами Стандартной модели**

Троицкий Сергей Вадимович

В настоящее время физика элементарных частиц находится на несколько необычном этапе своего развития. С одной стороны, практически все имеющиеся экспериментальные данные хорошо описываются одной теорией - Стандартной моделью элементарных частиц. С другой стороны, имеется много указаний на то, что эта модель лишь приближенная и может быть выведена из более фундаментальной теории, которая объяснила бы достаточно сложную структуру и несколько неестественные (хотя и внутренне непротиворечивые) значения параметров Стандартной модели. Обсуждаются различные варианты расширения Стандартной модели, и выбор между ними должен быть основан на сравнении с экспериментальными данными.

Однако человечество вплотную подошло к технологическому пределу в строительстве ускорителей, которые смогли бы дать информацию о свойствах материи при очень высоких энергиях, где расширенные теории предсказывают новые эффекты. Строительство большого ускорителя LHC в ЦЕРНе займет еще несколько лет, и будет ли когда-нибудь построен еще больший - неизвестно. Теоретики, работающие в области физики элементарных частиц, вряд ли могут рассчитывать в ближайшем будущем на проверку своих моделей на ускорителях.

Поэтому на первый план выходят исследования теорий, которые делают Стандартную модель более изящной, не внося противоречий в уже имеющиеся экспериментальные данные, и дают предсказания для интенсивно развивающихся неускорительных экспериментов, в частности связанных с астрофизическими наблюдениями. Ведь энергии, достигаемые в катаклизмических процессах во Вселенной, намного превышают те, что сможет достичь человечество на ускорителях в обозримом будущем. Именно такие теоретические исследования за пределами Стандартной модели, в частности, на стыке физики элементарных частиц и астрофизики, и составляют сферу моих научных интересов.

Основные вопросы, которые меня интересуют, связаны с экспериментальными фактами, не получающими логичного объяснения в рамках Стандартной модели (СМ).

Характерный масштаб электрослабой теории - одного из основных звеньев СМ - около 100 ГэВ, что меньше характерного масштаба гравитационного взаимодействия в 1017 раз. В Стандартной модели эта разница объясняется простой подстройкой параметров, которая устойчива относительно квантовых поправок в суперсимметричном обобщении СМ. Классические объединенные теории предполагают наличие "калибровочной пустыни" - отсутствие частиц с массами между 1 ТэВ и 1016 ГэВ. В то же время ряд физически интересных теорий предполагает новую физику на промежуточных масштабах - например, для объяснения нейтринных масс с помощью "механизма качелей", решения CP-проблемы в сильных взаимодействиях с помощью механизма Печчеи-Куинн, нарушения суперсимметрии с механизмом калибровочной передачи. Наличие новых полей приводит к большим значениям констант связи при высоких энергиях. Возникает вопрос о возможности построения объединенной теории с сильной связью.

Один из моих результатов последних лет - построение модели такого "сильного объединения". При низких энергиях она описывает суперсимметричную Стандартную модель, а при промежуточных - определенную конформную теорию, причем все частицы СМ являются составными в терминах высокоэнергетической фундаментальной теории. Предстоит выяснить, насколько реалистично такое расширение СМ, рассмотреть другие модели и уделить особое внимание экспериментальным следствиям, в частности для астрофизики высоких энергий.

Один из основных нерешенных вопросов Стандартной модели - происхождение иерархии фермионных масс. Кварки и лептоны группируются в три семейства ("поколения"), причем соответствующие частицы из трех семейств (например, электрон, мюон и тау-лептон) отличаются по массе (тау-лептон тяжелее электрона примерно в 3500 раз), но в остальном имеют одинаковые квантовые числа.

Традиционный подход к объяснению иерархии фермионных масс связан с введением новых квантовых чисел, различающих три поколения. Однако отсутствуют указания на какие-либо различия во взаимодействии частиц трех поколений. Поэтому особо интересными представляются подходы, в которых не требуется введение фундаментальных различий между поколениями.

В 2001 году мы построили и затем исследовали модель, в которой три поколения частиц возникают как три локализованные в четырехмерном пространстве-времени нулевые моды одного поколения фермионов в шестимерной теории. Взаимодействие с хиггсовским полем генерирует иерархическую массовую матрицу, причем число свободных параметров в модели на 4 меньше, чем число независимых параметров описываемой массовой матрицы. Предсказанные таким образом 4 нетривиальных соотношения между массами и углами смешивания выполняются с хорошей точностью.

Построенная нами в 2003 году модель с компактифицированными дополнительными измерениями позволила включить в теорию калибровочные поля. Это дало возможность сделать конкретные предсказания для экспериментов ближайшего будущего - как для ускорителя LHC, так и для неускорительных экспериментов по поиску редких распадов элементарных частиц.

Эксперименты в астрофизике дают уникальную возможность изучить физику элементарных частиц при энергиях, недоступных на ускорителях. Поэтому они очень важны для понимания физики за пределами Стандартной модели. Эта область знания интенсивно развивается, большое количество интересных экспериментальных данных появляется сейчас и ожидается в ближайшие годы.

Изучение новой физики, информация о которой содержится в имеющихся и ожидаемых данных, - одна из важных составляющих моих научных интересов. В частности, в настоящее время интенсивно исследуются космические лучи сверхвысоких энергий - свыше 5\*1019 эВ. Ускорение заряженных частиц до таких энергий может происходить только в экстремальных астрофизических условиях и должно сопровождаться сильным гамма- и нейтринным излучением. Данные гамма- и нейтринной астрономии ставят серьезные ограничения на ускорительные механизмы в рамках СМ. Эта проблема может быть решена с привлечением новой физики за пределами СМ и должна изучаться в непосредственной связи с экспериментальными данными. Только полное понимание ситуации с космическими лучами сверхвысоких энергий позволит извлечь из экспериментальных данных информацию о новой высокоэнергетической физике и проверить разнообразные модели.

В 2002 году мы проанализировали данные основных экспериментов и выявили вероятную идентификацию источников космических лучей сверхвысоких энергий с определенным классом активных ядер галактик. В настоящее время мы активно изучаем эти источники и те физические процессы, что ответственны за ускорение частиц в них. В том же году мы предсказали потоки нейтрино, которые должны сопровождать космическое излучение сверхвысоких энергий в том случае, если справедливы некоторые популярные теории их происхождения. Однако данные нейтринных экспериментов 2003 года позволили сделать вывод, что эти модели несправедливы, поскольку предсказанные потоки не были обнаружены.

В 2003 году мы обнаружили интересный эффект: космические лучи самых высоких энергий "избегают" области Северного полюса неба. Это можно объяснить влиянием геомагнитного поля на формирование атмосферных ливней, вызванных космическими лучами. Если будущие наблюдения подтвердят наши выводы, это будет сильным аргументом в пользу наличия фотонной составляющей в космических частицах экстремальных энергий (в настоящее время предполагается, что эти частицы - протоны).