

Даже сегодня мы далеки от полного понимания.

В 2024 году тайны фундаментальных частиц Стандартной модели остаются неразгаданными, несмотря на все усилия, которые прилагают ученые. Но наука не стоит на месте, и поиски ответов продолжаются.

Вопросы, которые всё ещё ждут своего ответа

Согласно Стандартной модели, протон является стабильной частицей и не распадается. Тем не менее, существуют теоретические возможности его распада, которые нарушают важное квантовое число — барионный заряд. Огромные экспериментальные установки, содержащие огромное количество протонов, не зафиксировали их распад, что позволяет утверждать, что срок жизни протона превышает 10^{34} лет, что примерно в септильон раз больше возраста Вселенной. Однако, чтобы объяснить асимметрию материи и антиматерии во Вселенной, необходимо существование взаимодействий, нарушающих барионный заряд. Если удастся доказать, что протон всё-таки распадается, это может открыть новое понимание бариогенеза.

Большинство атомных ядер содержат как протоны, так и нейтроны. Некоторые из них стабильны, а нестабильные распадаются различными путями. Один из возможных процессов — двойной бета-распад, при котором два нейтрона превращаются в два протона, два электрона и два электронных антинейтрино. Если нейтрино являются майорановскими частицами, которые одновременно являются своими антиподами, возможен также безнейтринный двойной бета-распад. Этот процесс никогда не был наблюдаем, но его обнаружение могло бы привести к значительным изменениям в понимании физики нейтрино и выйти за рамки Стандартной модели.

Известные частицы, связанные сильным ядерным взаимодействием, состоят из кварков и/или антикварков. В теории, можно предположить существование глюболов — частиц, состоящих исключительно из глюонов. Эти гипотетические частицы предсказываются уже около 50 лет, но экспериментально не обнаружены. Недавно наблюдение частицы $X(2370)$ с характеристиками, совпадающими с предполагаемыми для легчайшего глюбола, даёт надежду на открытие этой частицы. Если глюболы не существуют, это поставит под сомнение основные положения квантовой хромодинамики.

В природе существует четыре фундаментальных взаимодействия: гравитационное, сильное ядерное, электромагнитное и слабое взаимодействие. Теория электрослабого взаимодействия объединяет электромагнитное и слабое взаимодействия при энергиях

около 100 ГэВ. Остаётся открытым вопрос: могут ли сильное взаимодействие и гравитация объединяться с электрослабым взаимодействием при ещё более высоких энергиях? Если такие объединения существуют, их обнаружение может привести к значительным открытиям за пределами Стандартной модели.

Нарушение симметрии приводит к появлению бозонов Хиггса и фазовому переходу. Обычно этот процесс описывается как второй порядок фазового перехода, но возможен и первый порядок, при котором существует ложный минимум, где частица может "застрять". Это может привести к существованию дополнительного бозона Хиггса и смешению его с известным бозоном Хиггса, что могло бы объяснить асимметрию материи и антиматерии во Вселенной.

Хотя нейтрино первоначально считались безмассовыми, сейчас известно, что они имеют массу и могут превращаться друг в друга. Эксперименты определили разности масс нейтрино, но не их абсолютные значения. Исследования по уточнению массы нейтрино включают эксперименты с распадом трития и космологические измерения.

Хотя все предсказанные Стандартной моделью частицы были обнаружены, остаётся неясным, являются ли они действительно фундаментальными или состоят из более мелких частиц. Этот вопрос можно исследовать только до тех пор, пока позволяют энергии доступных коллайдеров. Для полного ответа нужны эксперименты на более высоких энергиях.

Согласно экспериментам, проведённым на Земле и в космосе, инертная и гравитационная масса равны с точностью до 1 части на 10^{12} . Однако необходимо провести дополнительные исследования, чтобы проверить это равенство для экзотических частиц и в различных условиях.

Хотя много аспектов Вселенной остаются загадочными, и даже несмотря на значительный прогресс, достигнутый в физике, ещё есть множество вопросов, требующих ответов. Возможно, изучение этих вопросов приведёт к следующим великим открытиям в науке и позволит выйти за пределы Стандартной модели.