# Введение

Нейтрино являются достаточно особенными для науки частицами, которые снова и снова приводили к неожиданным и невероятным открытиям, ряд из которых отмечен Нобелевскими премиями. Нейтрино были теоретически введены в 1930 году Паули для сохранения сохранения энергии-импульса и их первое экспериментальное обнаружение состоялось в 1956 году группой Рейнеса и Коуэна в Саванне. Позже оказалось, что существует три аромата нейтрино, что снова стало важным открытием. Затем были зарегистрированы осцилляции солнечных нейтрино по пути их распространения к Земле, что является квантовомеханическим эффектом, обычно проявляющимся лишь в атомных масштабах. Было обнаружено, что нейтрино имеют очень маленькую массу, что до сих пор является единственным значимым свидетельством существования физики элементарных частиц за пределами Стандартной модели и дает важные указания на то, как устроена Вселенная. Есть множество других областей, где уже признано, что нейтрино играют важную роль, но есть очень серьезные поводы полагать, что в будущем могут появиться еще более удивительные результаты.

Нейтрино — это безмассовые частицы в Стандартной модели. Прямое расширение СМ для введения масс нейтрино, аналогичных массам заряженных лептонов, заключается в добавлении правых (синглетных) нейтринных полей; в этом случае взаимодействия Юкавы будут свидетельствовать о наличии дираковских масс нейтрино после нарушения электрослабой симметрии. Однако это предположение не считается неудовлетворительным сообществом теории нейтрино по двум причинам: а) не объясняет, почему абсолютная шкала массы нейтрино по крайней мере в миллион раз меньше, чем массы других фермионов СМ, и б) симметрии СМ не запрещают другие, так называемые Массовые члены Майораны для недавно введенных правых полей нейтрино. Эти массы не ограничены сверху средним значением вакуума Хиггса и, следовательно, должны принимать много большие значения, чем масса t-кварка. Принимая во внимание массовые члены Майораны, мы получим эффективные массы легких майорановских нейтрино в абсолютной шкале масс нейтрино mν ≃ m2D/MR; здесь mD и MR ≳ 1014 ГэВ величины электрослабого нарушения симметрии и тяжелых майорановских нейтрино соотвественно. Этот механизм установлен как механизм качелей типа I; это интересно, так как дает описание малости массы нейтрино, имеет потенциальную связь с лептогенезом и может даже подразумевать отношение к шкале, объединяющей электрослабое и сильное взаимодействия. Тогда массы легких нейтрино появляются как собственные значения массовой матрицы Майорана, а матрица Понтекорво-Маки-Накагава-Саката (далее ПМНС) U получается из относительного вращения полей левых заряженных лептонов и нейтрино (с которыми связан заряженный ток).

Вспомним, что абсолютные массы нейтрино появляются в теории как собственные состояния матрицы эффективных масс легких нейтрино. Хотя эксперименты с нейтринными осцилляциями способны измерять расщепление квадрата массы среди них и даже упорядочение масс, они не могут дать абсолютную шкалу масс нейтрино. Осцилляции нейтрино дают нижнюю оценку суммы масс нейтрино 0,06 эВ и 0,10 эВ для нормального и обратного порядков соответственно, в то время как текущие верхние границы, полученные различными методами, меньше 1 эВ. Если сумма масс нейтрино близка к нижней границе, мы говорим об иерархической схеме, где масса легкого нейтрино ближе к нулю по сравнению с расщеплениями масс. Если она близка к верхней границе, то речь уже идет о вырожденных массах нейтрино, поскольку расщепления |∆m2|≪m2 малы по сравнению с массами. Порядок масс нейтрино и масштаб шкалы являются важными параметрами для теоретических моделей, потому что устройство аромата в лагранжиане, описывающем массу нейтрино будет сильно различаться в нормальном иерархическом, обратном иерархическом и вырожденном случаях.