

Рецензия на дипломную работу студента 5  
курса физического факультета ИГУ  
*Ли Вячеслава Александровича*  
**“Нейтринные осцилляции в рамках  
квантовой теории поля”**

2 июня 2008 г.

Дипломная работа В. А. Ли посвящена новому направлению в теории нейтринных осцилляций, основанному на методах квантовой теории поля (КТП). Основная идея этого направления заключается в том, что вакуумные осцилляции нейтрино можно свести к интерференции макроскопических фейнмановских амплитуд (диаграмм), описывающих процесс, идущий с несохранением электронного, мюонного или тау-лептонного числа. Термин “макроскопическая амплитуда” означает здесь, что пространственно-временной интервал между вершинами диаграммы может быть сколь угодно велик (например, равен расстоянию между Землей и Солнцем), а промежуточными состояниями в таких диаграммах являются массивные нейтрино. Это, конечно, совершенно необычная для КТП постановка задачи, вызывающая невольное чувство протеста у теоретика, привыкшего вычислять эффективные сечения процессов взаимодействия элементарных частиц. Однако, ни формально, ни фактически макроскопические диаграммы не запрещены основными принципами КТП.

Гораздо менее очевидной является другая идея, без которой вся теоретико-полевая трактовка нейтринных осцилляций рассыпается в прах, связана с описанием “in” и “out” состояний с помощью волновых пакетов. Этот прием, строго говоря, противоречит стандартной теории  $S$ -матрицы, в которой “in” и “out” состояния считаются фокковскими векторами с определенными значениями 4-импульсов, т.е., по существу, плоскими волнами. Однако, общепринятость или, другими словами, привычность стандартного  $S$ -матричного подхода на самом деле не эквивалентна его физической непротиворечивости. В самом деле, может ли какая-нибудь *нестабильная* частица (скажем, пион) находиться в состоянии с определенным значением 4-импульса? Конечно нет. Это запекается ее конечной (пусть даже малой) шириной. Более того, она вообще не существует “на минус-бесконечности” (читай, – на расстоянии много большем длины ее распада), т.к. попросту распалась бы, не достигнув области взаимодействия. Стабильная но составная частица (например, протон) тоже не может иметь точного значения 4-импульса, просто потому, что она локализована в конечном объеме. Таким образом, как раз постулаты стандартной теории  $S$ -матрицы являются физически плохо обоснованными или, если угодно, имеющими ограниченную область применимости. Фактически, они строго применимы лишь в старой доброй квантовой электродинамике, гарантирующей стабильность и точечность электронов и фотонов. Экстраполяция же метода  $S$ -матрицы на процессы с участием внешних нестабильных и/или составных частиц являются смелым, хотя и необычайно продуктивным приближением.

Разумеется, в рецензируемой работе не делаются попытки развить строгую теорию  $S$ -матрицы с волновыми пакетами. Решение подобной зада-

чи могло бы стать предметом кандидатской или докторской диссертации. Задача дипломника более скромна и утилитарна: попытаться воспризвести основные результаты стандартной квантовомеханической теории нейтринных осцилляций в рамках  $S$ -матричного подхода КТП, в котором волновые пакеты введены чисто *феноменологически*. Даже это “упражнение” оказывается технически довольно сложным и требующим профессионального владения аппаратом КТП. С поставленной задачей дипломник справился блестяще. Он не только получил ожидаемый квантовомеханический результат, но и выжные поправки к нему, которые приводят к весьма далеко идущим выводам. В частности, оказалось, что на достаточно больших (по сравнению с длинами осцилляций) расстояниях между источником и детектором, осцилляции “затухают”, т.е. вероятности выживания нейтрино становятся равными единице, а вероятности переходов – нулю. При этом точная “расшифровка” этого эффекта оказывается существенно разной для случая вакуумных осцилляций и осцилляций, идущих в веществе.

В. А. Ли получил общие дисперсионные соотношения для виртуальных нейтрино в движущемся веществе и вычислил соответствующие вклады в фазы осцилляций и в эффективную матрицу смешивания. К сожалению, эти результаты пока не доведены до числа, но, очевидно, что это лишь вопрос времени, т.к. основные “идеологические” и технические проблемы решены, по крайней мере для среды постоянной плотности. Полное решение задачи представляет несомненный интерес для нейтринной астрофизики и космологии, т.к. должно привести к ряду вполне наблюдаемых эффектов, в принципе измеримых на будущих “КМЗ” детекторах мюонов и нейтрино. Надеюсь, эти результаты заинтересуют и экспериментаторов, работающих на Байкальском нейтринном телескопе.

Одно из любопытных приложений развиваемого подхода, кратко изложенное в дипломной работе, связано с потенциальной возможностью детектирования реликтовых нейтрино (РН). В. А. Ли проделал аккуратный расчет скорости счета РН в гипотетическом нейтронном детекторе с учетом масс и смешивания нейтрино. Грубый пересчет на более реалистичный детектор, содержащий  $\sim 100$  г. чистого трития предсказывает (в рамках стандартных космологических оценок плотности РН в современную эпоху) вполне измеримую величину скорости счета. Самое интересное, что эта величина ощутимо зависит от углов смешивания и иерархии масс нейтрино. Этот результат был доложен В. А. Ли на недавней коференции молодых ученых в Дубне и очень заинтересовал слушателей. Очень жаль, что В. А. Ли и его научные руководители не успели вовремя опубликовать эту работу раньше “конкурентов” и видимо потеряли приоритет. Однако, их результат имеет существенно более

сильное теоретическое обоснование, по сравнению с результатами недавних публикаций, так что “поезд еще не ушел”. Разумеется, практическая реализация подобного эксперимента очень и очень проблематична и работа здесь только начинается, причем пока только теоретиками. Хочется надеяться, что рано или поздно она заинтересует и экспериментаторов.

Дипломная работа содержит много методически интересных результатов, например, изящное строгое решение уравнения Дайсона для нейтринной “функции Грина” в движущейся среде (кавычки связаны с тем, что на самом деле эта функция представляет собой  $4N \times 4N$  матрицу), к сожалению, изложенное слишком фрагментарно.

К недостаткам работы следует отнести некоторую небрежность изложения (включая многочисленные литературные и даже грамматические огрехи, а так же опечатки в формулах) и некоторую незавершенность в рассмотрении ряда вопросов. Но все эти замечания не существенны на фоне очень высокого уровня самой работы и важности полученных в ней результатов.

Считаю, что дипломная работа В. А. Ли безусловно заслуживает *отличной* оценки, а дипломник – рекомендации в аспирантуру ОИЯИ для продолжения работы в данном перспективном направлении.

доктор ф.-м. наук,  
начальник сектора ЛТФ ОИЯИ  
О. В. Теряев

2 июня 2008