

НОБЕЛЕВСКИЕ ЛЕКЦИИ ПО ФИЗИКЕ — 2008

СР-нарушение и смешивание ароматов

М. Кобаяси

(Нобелевская лекция. Стокгольм, 8 декабря 2008 г.)

PACS numbers: 01.30.Bb, 11.30.Er, 12.15.Hh

DOI: 10.3367/UFNr.0179.200912e.1312

Содержание

1. Введение (1312).
 2. Школа Сакаты (1313).
 3. Шестикварковая модель (1314).
 4. Экспериментальные подтверждения на В-фабриках (1315).
 5. Смешивание в лептонном секторе (1316).
- Список литературы (1318).

1. Введение

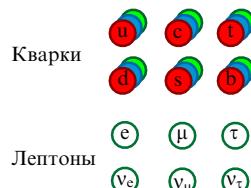
Мы знаем, что обычное вещество состоит из атомов. Атом состоит из атомного ядра и электронов. Атомное ядро состоит из протонов и нейтронов. Протон и нейtron, в свою очередь, состоят из двух типов кварков, *u* и *d*. Поэтому фундаментальными частицами, из которых состоит обычное вещество, являются электрон и два типа кварков, *u* и *d*.

Однако в Стандартной модели (рис. 1), дающей полное описание современных представлений о физике частиц, число типов кварков равно шести. Дополнительные кварки обозначаются как *s*, *c*, *b* и *t*. Причина, по которой мы не обнаруживаем их в обычном веществе, заключается в том, что в обычных условиях эти кварки нестабильны. Подобно кваркам, электрон входит в семейство из шести компонент, называемых лептонами. Среди этих лептонов есть и три типа нейтрино.

Другой важной составляющей Стандартной модели являются фундаментальные взаимодействия. На кварки и лептоны действуют три типа сил. Сильные взаимодействия описываются квантовой хромодинамикой (КХД), а электромагнитные и слабые взаимодействия — теорией Вайнберга — Салама — Глэшоу. Все три типа взаимодействий описываются в рамках специальных теорий поля, называемых калибровочными теориями.

Стандартная модель была создана в 70-х годах прошлого века. Её появление было стимулировано изучением калибровочных теорий. Так, в частности, было показано, что калибровочные теории являются перенормируемыми. Этот факт открыл возможность описывать

Фундаментальные частицы



Фундаментальные взаимодействия

- Сильное взаимодействие КХД
- Электромагнитное взаимодействие Теория
- Слабое взаимодействие Вайнберга — Салама — Глэшоу

Рис. 1. Стандартная модель.

все взаимодействия в рамках квантовой теории поля, избегая трудностей, связанных с расходимостями. До этого такое описание было возможным только для электромагнитного взаимодействия.

Важную роль в создании Стандартной модели сыграло открытие новых ароматов, сделанное в 70-х годах прошлого века. В частности, в 1970-х годах были обнаружены τ -лептон, а также c - и b -кварки. Когда мы с Тосихиде Маскава предложили шестикварковую модель для объяснения СР-нарушения, считалось, что существует только три кварка; кроме того, имелись некоторые намёки на возможное существование четвёртого, но никто не предполагал, что может быть шесть кварков.

В дальнейшем я опишу развитие изучения СР-нарушения, а также кварковых и лептонных ароматов, акцентируя особое внимание на вкладе Японии в эти исследования. Раздел 2 посвящён пионерским работам школы Сакаты, из которых я почерпнул очень многое. Изучение СР-нарушения будет обсуждаться в разделе 3. Я объясню, о чём мы думали и что мы обнаружили в то время. В разделе 4 будет описано последующее развитие наших идей. Экспериментальное подтверждение предложенной модели было получено на ускорителях, называемых В-фабриками. Эти эксперименты будут кратко описаны. Наконец, в разделе 5 я кратко остановлюсь на смешивании ароматов в лептонном секторе, поскольку это явление аналогично смешиванию ароматов в кварковом секторе; кроме того, Япония внесла уникальный и важный вклад в изучение этой области.

М. Кобаяси (M. Kobayashi). High Energy Accelerator Research Organization (KEK), Tsukuba, Japan



Рис. 2. Соити Саката 1911–1970 гг. (Фотография любезно предоставлена библиотекой музея-архива Сакаты.)

2. Школа Сакаты

И Тосихиде Маскава, и я закончили университет Нагои и защитили там диссертации. В то время, когда я начал учиться в аспирантуре, теоретическая группа по физике частиц в университете Нагои уже была известна своими уникальными исследованиями, её руководителем был профессор Соити Саката (рис. 2).

В начале 50-х годов прошлого столетия был обнаружен ряд странных частиц, причём первое указание на их существование появилось в 1947 г. при изучении космических лучей. Согласно современной терминологии странные частицы содержат в качестве составных компонентов s -кварк или его античастицу, \bar{s} -кварк, тогда как несторанные частицы их не содержат. Однако сначала рассмотрим эпоху до появления кварковой модели.

В 1956 г. Саката предложил модель [3], известную теперь как модель Сакаты. В этой модели все адроны, как странные, так и несторанные, считаются составными состояниями триплета барионов: протона (p), нейтрона (n) и лямбда-гиперона (Λ). Другими словами, в этой модели три бариона, p , n и Λ , считаются составными компонентами для всех остальных адронов. Впоследствии модель Сакаты была заменена кварковой моделью, в которой вместо p , n и Λ появились кварки u , d и s . Однако основная идея существования фундаментального триплета была заложена именно в модели Сакаты.

Теперь рассмотрим слабые взаимодействия в модели Сакаты. Обычный β -распад в атомных ядрах вызван переходом нейтрона в протон. Подобным образом мы можем рассматривать переход Λ -гиперона в протон. В модели Сакаты все слабые взаимодействия адронов могут быть объяснены этими двумя типами переходов между компонентами фундаментального триплета.

Подобная схема слабых взаимодействий очень похожа на картину этих взаимодействий для лептонов:



Следует отметить, что в то время считалось, что существует только один тип нейтрино. Это сходство слабых

взаимодействий барионов и лептонов было отмечено в работе Гамбы, Маршака и Окубо [4].

В 1960 г. Маки, Накагава, Онуки и Саката [5] развили идею барион-лептонной (или B - L) симметрии далее и предложили так называемую модель Нагои. Они предложили рассматривать триплет барионов p , n и Λ как составленный из гипотетической скалярной частицы B^+ (от англ. B -matter) и нейтрино, электрона или мюона:

$$p = \langle B^+ v \rangle, \quad n = \langle B^+ e \rangle, \quad \Lambda = \langle B^+ \mu \rangle.$$

Хотя композитная картина модели Нагои не привела к значительному прогрессу, некоторые её идеи были развиты довольно интересным образом. В 1962 г. было обнаружено, что существуют нейтрино двух типов, электронное и мюонное. В то время, когда результаты этого открытия в Брукхейвенской национальной лаборатории (BNL) [6] должны были выйти в свет, появились две интересные работы: одна, написанная Маки, Накагавой и Сакатой [7], а другая — Катаямой, Матумото, Танакой и Ямадой [8]. В этих статьях обсуждались возможные модификации модели Нагои для включения в неё двух типов нейтрино.

В поисках возможной связи лептонов и барионов Маки и его коллеги рассматривали массы нейтрино и вывели соотношение, описывающее смешивание нейтринных состояний:

$$v_1 = \cos \theta v_e + \sin \theta v_\mu,$$

$$v_2 = -\sin \theta v_e + \cos \theta v_\mu,$$

где v_1 и v_2 — массовые состояния нейтрино, и предположили, что протон состоит из бозона B^+ и нейтрино v_1 . Хотя последнее предположение и не согласуется с современными экспериментальными данными, замечательно то, что авторы представили правильное описание смешивания лептонных ароматов. Отдавая дань авторам этого вклада, сейчас матрицу лептонного смешивания называют матрицей МНС.

Смешивание лептонных ароматов приводит к явлению, которое называется нейтринными осцилляциями. Много лет спустя нейтринные осцилляции были открыты неожиданным образом. Мы вернёмся к этому вопросу позднее.

Другое важное следствие вышеупомянутого аргумента — это возможное существование четвёртой фундаментальной частицы, связанной с v_2 . Этот вопрос детально обсуждался Катаямой и его коллегами. В то время фундаментальными частицами все ещё считались барионы, но структура слабых взаимодействий, обсуждаемая здесь, соответствует схеме Глэшоу–Илиопулоса–Майани [9].

Интерес к этим работам снова возник в 1971 г., когда Ниу и его коллеги обнаружили новый тип событий в эмульсионных камерах при регистрации космических лучей [10]. Одно из событий, которое они обнаружили, представлено на рис. 3. В этом событии видны изгибы двух треков, что указывает на распад новых частиц, образующихся парами. При некоторых предположениях можно было оценить массу новой частицы как 2–3 ГэВ и время жизни — порядка 10^{-14} с.

Когда на этот результат обратил внимание Судзо Огава, входивший в группу Сакаты, он немедленно высказал предположение, что новая частица может

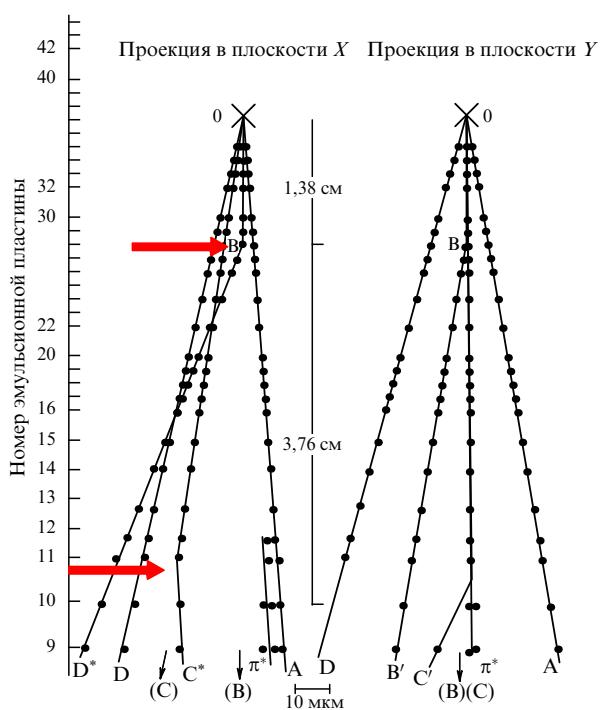


Рис. 3. Событие в космических лучах [10].

быть связана с четвёртым элементом, предсказываемым расширениями модели Сакаты [11]. К тому времени модель Сакаты уже была заменена кварковой моделью, поэтому то, что он имел в виду, означало, что новые частицы являются очарованными частицами, по современной терминологии. Следуя этому предположению несколько японских групп, включая ту, в которую входил я, начали исследовать четырёхкварковую модель [12]. В то время я был аспирантом университета Нагои.

До сих пор я рассматривал уникальную деятельность школы Сакаты. Я подробно остановился на четырёхкварковой модели. Однако это не означает, что шестикварковая модель, предложенная нами, является простым обобщением четырёхкварковой модели. Для меня важно было показать атмосферу, существовавшую в отделе физики частиц в университете Нагои. Хотя большая часть работы, которую мы рассмотрели выше, была сделана Сакатой и его группой ещё до того, как я стал аспирантом, однако и в моё время там всё ещё царила атмосфера, возникшая в результате этой работы. Я научился важности понимания целой картины, что необходимо для работы такого рода.

3. Шестикварковая модель

В 1971 г. была доказана перенормируемость неабелевых калибровочных теорий [1]. Это дало возможность описывать слабые взаимодействия самосогласованным образом, и теория Вайнберга – Салама – Глэшоу [13] стала привлекать всеобщее внимание. В 1972 г. я получил степень доктора философии в университете Нагои и перешёл в университет Киото. Тогда я начал работу над проблемой СР-нарушения.

СР-нарушение впервые было обнаружено в 1964 г. Кронином, Фитчем и др. [14] в распаде нейтральных

каонов. Существование СР-нарушения означает отсутствие симметрии между частицами и античастицами. Открытие СР-нарушения говорит о существовании значительного различия между частицами и античастицами.

Мы считали, что если калибровочные теории могут самосогласованно описывать взаимодействие частиц, то СР-нарушающие взаимодействия также могут описываться в рамках этих теорий. Было достаточно ясно, как подходить к решению этой проблемы. Мы просто исследовали условия, при которых перенормируемая калибровочная теория приводит к СР-нарушению. То, что мы получили, можно суммировать следующим образом [2].

В то время считалось, что существуют только три типа кварков, однако трёхкварковая модель имела изъяны с точки зрения калибровочной теории. Поэтому предпочтительной представлялась четырёхкварковая модель с механизмом ГИМ (Глэшоу, Илиополоус, Маини). Однако невозможно включить СР-нарушение в модель с механизмом ГИМ. Мы обнаружили, что, даже если ослабить условия для компенсации ГИМ, невозможно построить реалистичную модель СР-нарушения с четырьмя кварками. Это означает, что кроме четвёртого кварка должны существовать некоторые неизвестные частицы. Я считал, что это был довольно сильный и важный вывод, следующий из наших аргументов.

Затем мы рассмотрели несколько возможных механизмов СР-нарушения, вводя новые частицы. Мы предложили шестикварковую модель как один из таких возможных механизмов.

Ниже мы обсудим смешивание кварковых ароматов в деталях, чтобы понять, почему недостаточно четырёх кварков, а необходимы шесть кварков для того, чтобы получить СР-нарушение.

В рамках калибровочной теории смешивание ароматов возникает из-за несовпадения калибровочных состояний и состояний частиц. Калибровочная симметрия объединяет некоторое число частиц в группу, называемую мультиплетом. Однако каждый член мультиплета не обязательно принадлежит единственному типу частиц, иногда он представляет собой линейную суперпозицию частиц. Смешивание ароматов является не чем иным, как такой суперпозицией. В рассматриваемом случае калибровочной группой теории Вайнберга – Салама – Глэшоу является группа SU(2), а мультиплет представляет собой дублет относительно этой группы.

Предполагая, что четыре кварка объединяются в два дублета группы SU(2), мы можем представить их в общем виде следующим образом:

$$\begin{pmatrix} u \\ d' \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} c \\ s' \end{pmatrix},$$

где d' и s' — суперпозиции настоящих кварковых состояний d и s , что можно записать в матричном виде как

$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} \\ V_{cd} & V_{cs} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \end{pmatrix},$$

где матрица, описывающая смешивание, должна быть матрицей, которая в математике называется унитарной.

Следующая проблема состоит в определении условия для возникновения СР-нарушения. В квантовой теории

поля СР-нарушение связано с наличием комплексных констант связи. Точнее, СР-нарушение возникает, если в элементах матрицы смешивания присутствуют неустранимые комплексные числа. В общем случае элементы унитарной матрицы являются комплексными числами, но некоторые из них можно сделать действительными подстройкой фазы состояния частицы, которая не влияет на физические результаты. В этом случае комплексные числа называются устранимыми, в противном случае — неустранимыми. Поэтому одно из условий существования СР-нарушения состоит в том, что в матрице смешивания имеются комплексные элементы, которые не могут быть устранины подстройкой фаз состояний частиц.

В четырёхкварковой модели подстроочные множители описываются двумя диагональными матрицами, элементами которых являются просто фазовые множители. Легко видеть, что эти матрицы всегда могут быть выбраны так, что унитарная 2×2 -матрица может быть преобразована в действительную матрицу:

$$\begin{pmatrix} \exp(i\phi_u) & 0 \\ 0 & \exp(i\phi_c) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} \\ V_{cd} & V_{cs} \end{pmatrix} \times \\ \times \begin{pmatrix} \exp(-i\phi_d) & 0 \\ 0 & \exp(-i\phi_s) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}.$$

Следовательно, в этом случае мы не можем получить СР-нарушения.

Как этот аргумент изменяется для шестикварковой модели? В этом случае мы можем выразить смешивание ароматов следующим образом:

$$\begin{pmatrix} u \\ d' \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} c \\ s' \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} t \\ b' \end{pmatrix}, \\ \begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}.$$

На этот раз матрица смешивания представляет собой унитарную 3×3 -матрицу. Однако теперь мы не можем устранить все фазовые множители в матричных элементах подбором фаз кварковых состояний. Самое большее, что можно сделать, — это подобрать фазы так, чтобы представить матрицу в стандартном виде — как зависящую от четырёх параметров. Наиболее популярная параметризация матрицы смешивания имеет вид

$V =$

$$= \begin{pmatrix} c_{12}c_{23} & s_{12}c_{13} & s_{13}\exp(-i\delta) \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}\exp(i\delta) & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13}\exp(i\delta) & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13}\exp(i\delta) & -c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}s_{13}\exp(i\delta) & c_{23}s_{13} \end{pmatrix},$$

где $c_{ij} = \cos \theta_{ij}$ и $s_{ij} = \sin \theta_{ij}$, $i, j = 1, 2, 3$. Заметим, что если $\delta \neq 0$, то матричные элементы содержат мнимую часть, поэтому СР-симметрия нарушается.

Принимая во внимание иерархию истинных значений параметров, часто для феноменологического анализа используют следующую параметризацию:

$$V \approx \begin{pmatrix} 1 - \frac{\lambda^2}{2} & \lambda & A\lambda^3(\rho - i\eta) \\ -\lambda & 1 - \frac{\lambda^2}{2} & A\lambda^2 \\ A\lambda^3(1 - \rho - i\eta) & -A\lambda^2 & 1 \end{pmatrix} + \mathcal{O}(\lambda^4).$$

В этой параметризации, если η отлична от нуля, СР-симметрия в системе нарушается.

Мы считали, что этот механизм СР-нарушения является очень интересным и элегантным, но других оснований для выделения шестикварковой модели из других возможных, у нас не было. Модель не являлась какой-то особенной, поскольку ясно, что если в системе имеется достаточно много частиц, то СР-симметрию нарушить несложно. Однако последующие экспериментальные результаты поставили шестикварковую модель на особое место.

В 1974 г. была открыта J/ψ -частица [15], и оказалось, что она является связанным состоянием четвёртого с-кварка и его античастицы. Это открытие имело большое значение для физики частиц, однако оно не повлияло на статус шестикварковой модели.

В 1975 г. был обнаружен τ -лептон [16]. Это открытие имело значительное влияние на нашу модель: τ -лептон оказался пятым среди лептонов. И хотя это был лептон, его открытие позволило также предположить существование третьего поколения в кварковом секторе. Именно тогда научное сообщество стало обращать внимание на нашу модель. Наиболее ранние работы, в которых обсуждалась шестикварковая модель, — это [17, 18].

В 1977 г. был открыт Υ -мезон [19], который оказался связанным состоянием пятого кварка b и антикварка \bar{b} . Последний кварк, t , был открыт только в 1995 г. [20], но ещё до этого открытия шестикварковая модель уже считалась стандартной.

Тем временем было получено указание, что можно ожидать большой СР-асимметрии в системе В-мезонов [21]. Это открыло возможности для проверки этой модели на В-фабриках. В-мезон представляет собой мезон, содержащий b - или \bar{b} -кварк как конституентный, а В-фабрика — это ускоритель, предназначенный для получения большого количества В-мезонов, как и положено фабрике.

4. Экспериментальные подтверждения на В-фабриках

Для того чтобы проверить шестикварковую модель экспериментально, были построены две В-фабрики: KEKB в KEK (Япония) и PEP-II в SLAC (США). В-фабрики являются необычными ускорителями. На них сталкиваются электроны и позитроны с разными энергиями, так что образуются движущиеся В-мезоны. Обе экспериментальные группы, Belle (KEKB) и BaBar (PEP-II), представляют собой большие международные коллаборации, организованные с участием многих стран.

Проекты В-фабрик были поддержаны, и эксперименты на них начались примерно в одно и то же время. PEP-II/BaBar прекратила работу в этом году, тогда как KEKB/Belle продолжает набирать статистику (рис. 4). На них была достигнута рекордно высокая светимость: более $10^{34} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Светимость является ключевым параметром, характеризующим работу ускорителя.

Один из наиболее типичных методов измерения СР-нарушения на В-фабриках показан на рис. 5. Шестикварковая модель предсказывает довольно большую асимметрию в распределении времени распада для В- и анти-В-мезонов, например, в распаде $B(\bar{B}) \rightarrow J/\psi + K_S$. Благодаря тому, что В-мезоны образуются в движении, мы можем измерить распределение времени распада В-ме-

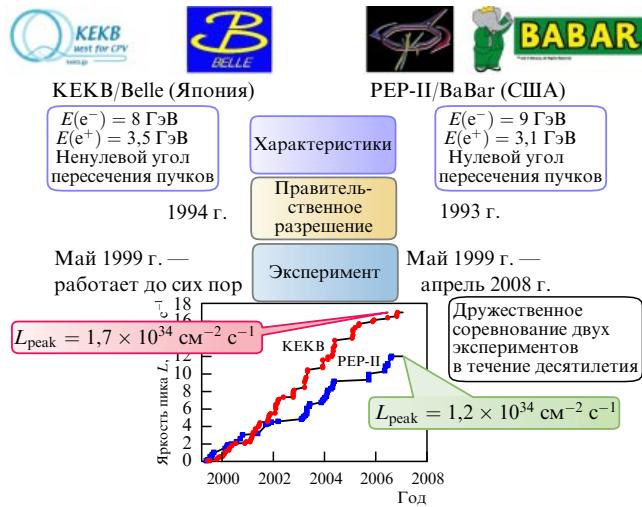


Рис. 4. KEKB/Belle и PEP-II/BaBar.

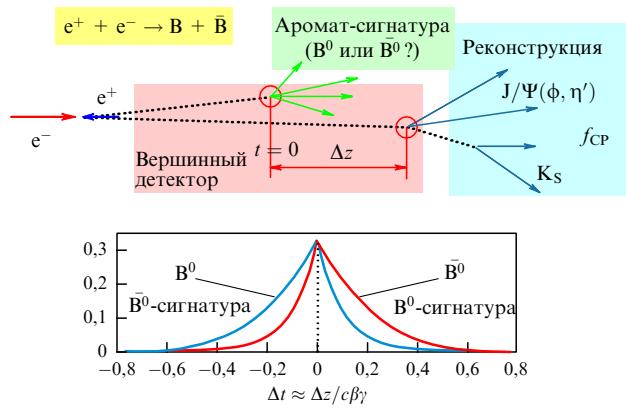


Рис. 5. Стандартный метод измерений СР-нарушения в распадах B-мезонов.

зонов и их античастиц, измеряя положение точки их распада. Однако это требует измерения точки распада с точностью 10 мкм, для чего используется сложный прибор — вершинный детектор.

Наиболее важные результаты этих экспериментов представлены на рис. 6 [22]. Закрашенные окружности и конусы показывают экспериментальные ограничения на параметры смешивания ρ и η . Все эти ограничения перекрываются в узкой области, окрашенной в красный цвет*. Это означает, что шестиварковая модель в состоянии объяснить рассматриваемые результаты, если выбрать параметры ρ и η в этой области.

На основе результатов, полученных на В-фабриках, современный статус СР-нарушения можно описать следующим образом:

- Результаты В-фабрик показывают, что кварковое смешивание в шестиварковой модели является доминирующим источником наблюдаемого СР-нарушения.

- Результаты В-фабрик, однако, оставляют разрешённой небольшую область для дополнительного источника СР-нарушения, обусловленного новой физикой, выходящей за рамки Стандартной модели.

* В электронной версии Нобелевской лекции рисунки даны в цветном изображении (см. сайт www.ufn.ru).

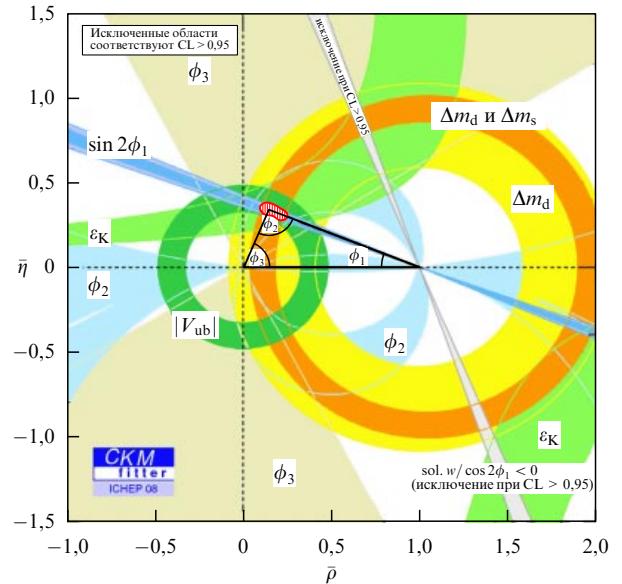


Рис. 6. Результаты, полученные на В-фабриках [23].

- Преобладание материи над antimатерией во Вселенной, по-видимому, обусловлено дополнительными источниками СР-нарушения, поскольку СР-нарушение в шестиварковой модели слишком мало для того, чтобы объяснить это преобладание.

Существует предположение, что последнее может быть связано со смешиванием в лептонном секторе, которое аналогично смешиванию в кварковом секторе. В исследование лептонного смешивания особенно важный вклад был сделан Японией; мы обсудим это в следующем разделе.

5. Смешивание в лептонном секторе

Одним из наиболее важных достижений явилось открытие нейтринных осцилляций на установке Super-Kamiokande, которая представляет собой большой детектор в виде резервуара с водой, построенный в руднике Камиока в центральной Японии [24].

В этом эксперименте наблюдались нейтрино, образующиеся в космических лучах в атмосфере Земли. Поскольку нейтрино проходят сквозь Землю, они могут приходить в детектор и снизу. Нейтринные осцилляции приводят к изменению типа нейтрино во время его движения. Поэтому нейтрино, летящие снизу, т.е. с противоположной стороны Земли, успевают испытать осцилляции, и число событий для нейтрино определённого типа будет меньше, чем для нейтрино, летящих сверху.

На рисунке 7 представлены результаты этих наблюдений. Красными точками показаны ожидаемые значения в случае отсутствия осцилляций, а крестиками — экспериментальные данные. Этот результат показывает очевидный дефицит наблюдаемого числа нейтрино и полностью согласуется с картиной нейтринных осцилляций.

Это крупное открытие было сделано под руководством Йоджи Тоцуки (рис. 8). К глубокому сожалению, он скончался в июле прошлого года.

Впоследствии нейтринные осцилляции были подтверждены в двух экспериментах, в которых использовался искусственно приготовленный пучок нейтрино.

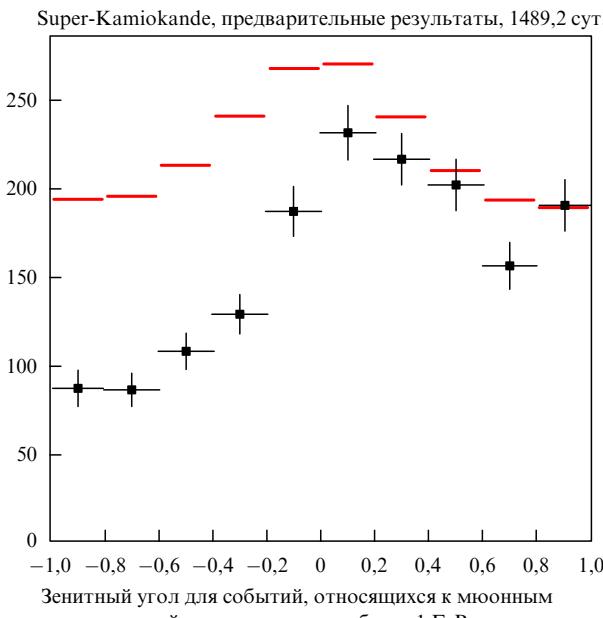


Рис. 7. Результаты наблюдений атмосферных нейтрино [J. Raaf, *Neutrino 2008*].

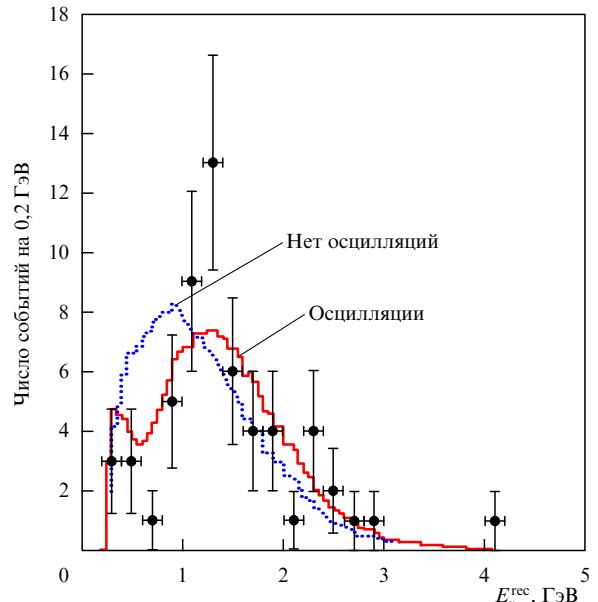


Рис. 9. Результаты эксперимента K2K [25].



Рис. 8. Йоджи Тоцуга, 1942–2008 (Фотография любезно предоставлена лабораторией KEK).

Один из этих экспериментов — эксперимент K2K [25]. В этом эксперименте нейтрино образовывались на протонном синхротроне в лаборатории KEK и регистрировались в детекторе Super-Kamiokande. Зарегистрированный спектр нейтрино изображён на рис. 9. Видна явная осцилляционная картина.

Другой эксперимент — эксперимент KamLAND [26]. Вместо воды в детекторе KamLAND, также расположенным в руднике Камиока, использовался жидкий сцинтил-

лятор. В эксперименте наблюдались нейтрино, образующиеся в находящихся неподалеку ядерных реакторах. Результаты эксперимента показывают хорошее согласие с осцилляционной картиной (рис. 10).

Выше мы рассмотрели прошлые и настоящие эксперименты; экспериментом ближайшего будущего является эксперимент T2K. Нейтрино будут образовываться на недавно построенном ускорителе J-PARK, находящемся в Токай, в 60 км к северо-востоку от KEK, и регистрироваться установкой Super-Kamiokande. Расстояние до детектора будет приблизительно таким же, как в эксперименте K2K, но интенсивности будет значительно выше. Эксперимент T2K проводится с целью обнаружить ν_e , что будет свидетельствовать о существовании осцилляций ν_μ в ν_e . Это наблюдение имеет большую важность для определения возможной величины СР-нарушения в лептонном секторе, что может помочь объяснить преобладание материи над антиматерией.

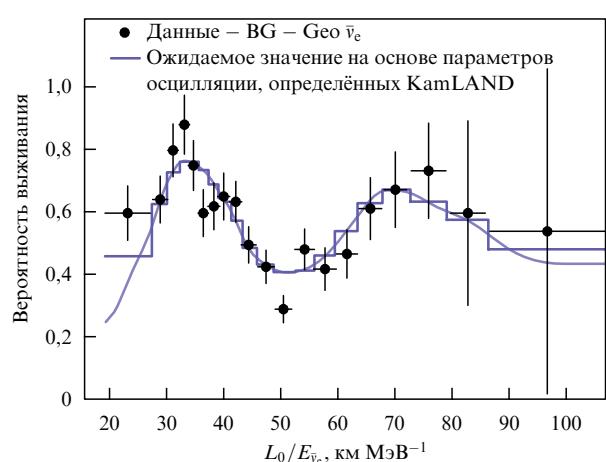


Рис. 10. Результаты эксперимента KamLAND [26].

В целом, я считаю, что Япония внесла важный вклад в развитие физики ароматов. Он включает в себя и ранние исследования группы Сакаты по адронным и лептонным ароматам, и экспериментальное изучение системы В-мезонов на В-фабрике в KEK, и наблюдение нейтринных осцилляций на установках Super-Kamiokande и KamLAND. Я счастлив, что был свидетелем многих этих открытий. В частности, незабываема работа с моими коллегами на В-фабриках. И прежде всего я счастлив, что смог внести вклад в эти открытия вместе с доктором Москвой.

Перевёл с английского С.В. Демидов

Список литературы

1. 't Hooft G "Renormalizable Lagrangians for massive Yang–Mills fields" *Nucl. Phys. B* **35** 167 (1971); 't Hooft G, Veltman M "Regularization and renormalization of gauge fields" *Nucl. Phys. B* **44** 189 (1972)
2. Kobayashi M, Maskawa T "CP-violation in the renormalizable theory of weak interaction" *Prog. Theor. Phys.* **49** 652 (1973)
3. Sakata S "On a composite model for the new particles" *Prog. Theor. Phys.* **16** 686 (1956)
4. Gamba A, Marshak R E, Okubo S "On a symmetry in weak interactions" *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **45** 881 (1959)
5. Maki Z, Nakagawa M, Ohnuki Y, Sakata S "A unified model for elementary particles" *Prog. Theor. Phys.* **23** 1174 (1960).
6. Danby G et al. "Observation of high-energy neutrino reactions and the existence of two kinds of neutrinos" *Phys. Rev. Lett.* **9** 36 (1962)
7. Maki Z, Nakagawa M, Sakata S "Remarks on the unified model of elementary particles" *Prog. Theor. Phys.* **28** 870 (1962)
8. Katayama Y, Matumoto K, Tanaka S, Yamada E "Possible unified models of elementary particles with two neutrinos" *Prog. Theor. Phys.* **28** 675 (1962)
9. Glashow S L, Iliopoulos J, Maiani L "Weak interactions with lepton-hadron symmetry" *Phys. Rev. D* **2** 1285 (1970)
10. Niu K, Mikumo E, Maeda Y "A possible decay in flight of a new type particle" *Prog. Theor. Phys.* **46** 1644 (1971)
11. Ogawa S, private communication.
12. Hayashi T, Kawai E, Matsuda M, Ogawa S, Shige-Eda S "A possible interpretation of the new event in the cosmic ray experiment" *Prog. Theor. Phys.* **47** 280 (1972); Kobayashi M, Nakagawa M, Nitto H "Quartet models based on fundamental particles with fractional charge" *Prog. Theor. Phys.* **47** 982 (1972); Maki Z, Maskawa T, Umemura I "Quartet scheme of hadrons in chiral $U(4) \times U(4)$ " *Prog. Theor. Phys.* **47** 1682 (1972); Kondo H, Maki Z, Maskawa T "A note on the leptonic decays of charmed mesons" *Prog. Theor. Phys.* **47** 1060 (1972)
13. Weinberg S "A model of leptons" *Phys. Rev. Lett.* **19** 1264 (1967); Salam A "Weak and Electromagnetic Interactions", originally printed in *Elementary Particle Theory: Proc. of the Nobel Symp.*, 1968, Lerum, Sweden (Ed. N Svartholm) (Stockholm: Almquist & Wiksell, 1968) pp. 367–377; Glashow S L "Partial-symmetries of weak interactions" *Nucl. Phys.* **22** 579 (1961)
14. Christenson J H, Cronin J W, Fitch V L, Turlay R "Evidence for the 2π decay of the K_2^0 meson" *Phys. Rev. Lett.* **13** 138 (1964)
15. Aubert J J et al. (E598 Collab.) "Experimental observation of a heavy particle J " *Phys. Rev. Lett.* **33** 1404 (1974); Augustin J-E et al. (SLAC-SP-017 Collab.) "Discovery of a narrow resonance in e^+e^- annihilation" *Phys. Rev. Lett.* **33** 1406 (1974)
16. Perl M L et al. "Evidence for anomalous lepton production in e^+e^- annihilation" *Phys. Rev. Lett.* **35** 1489 (1975)
17. Pakvasa S, Sugawara H "CP violation in the six quark model" *Phys. Rev. D* **14** 305 (1976)
18. Ellis J R, Gaillard M K, Nanopoulos D V "Left-handed currents and CP violation" *Nucl. Phys. B* **109** 213 (1976)
19. Herb S W et al. "Observation of a dimuon resonance at 9.5 GeV in 400-GeV proton – nucleus collisions" *Phys. Rev. Lett.* **39** 252 (1977)
20. Abe F et al. (CDF Collab.) "Observation of top quark production in $p\bar{p}$ collisions with Collider Detector at Fermilab" *Phys. Rev. Lett.* **74** 2626 (1995); hep-ex/9503002; Abachi S et al. (D0 Collab.) "Observation of the top quark" *Phys. Rev. Lett.* **74** 2632 (1995); hep-ex/9503003
21. Carter A B, Sanda A I "CP violation in B-meson decays" *Phys. Rev. D* **23** 1567 (1981); Bigi I I, Sanda A I "Notes on the observability of CP violations in B decays" *Nucl. Phys. B* **193** 85 (1981)
22. Aubert B et al. (BABAR Collab.) "Measurement of the CP asymmetry amplitude $\sin 2\beta$ with B^0 mesons" *Phys. Rev. Lett.* **89** 201802 (2002); hep-ex/0207042; Abe K et al. (Belle Collab.) "Improved measurement of mixing-induced CP violation in the neutral B meson system" *Phys. Rev. D* **66** 071102 (2002); hep-ex/0208025
23. Charles J et al. (CKMfitter Group) "CP violation and the CKM matrix: assessing the impact of the asymmetric B factories" *Eur. Phys. J. C* **41** 1 (2005); hep-ph/0406184
24. Fukuda Y et al. (Super-Kamiokande Collab.) "Evidence for oscillation of atmospheric neutrinos" *Phys. Rev. Lett.* **81** 1562 (1998); hep-ex/9807003
25. Ahn M H et al. (K2K Collab.) "Indications of neutrino oscillation in a 250 km long-baseline experiment" *Phys. Rev. Lett.* **90** 041801 (2003); hep-ex/0212007; Ahn M H et al. (K2K Collab.) "Measurement of neutrino oscillation by the K2K experiment" *Phys. Rev. D* **74** 072003 (2006); hep-ex/0606032
26. Eguchi K et al. (KamLAND Collab.) "First results from KamLAND: Evidence for reactor antineutrino disappearance" *Phys. Rev. Lett.* **90** 021802 (2003); hep-ex/0212021; Araki T et al. (KamLAND Collab.) "Measurement of neutrino oscillation with KamLAND: Evidence of spectral distortion" *Phys. Rev. Lett.* **94** 081801 (2005); hep-ex/0406035