

НОБЕЛЕВСКИЕ ЛЕКЦИИ ПО ФИЗИКЕ — 2008

О чём говорит СР-нарушение

Т. Маскава

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

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

DOI: 10.3367/UFNr.0179.200912f.1319

Я бы хотел поблагодарить Шведскую Королевскую академию наук и Нобелевский комитет за присуждение мне премии, о которой я не мог и мечтать.

Я родился в 1940 г. в семье мебельщика в городе Нагоя в Японии. Мой отец хотел поменять профессию и, работая мебельщиком, заочно обучался на инженера-электрика. Однако он говорил мне, что не может понять, что такое синусы и косинусы, поскольку не получил базового образования. В конце концов он смог организовать маленькую мебельную фабрику, наняв несколько рабочих и работая там сам. Но всё это свела на нет война, эта безрассудная и несчастная война, которую развязала наша страна.

После окончания Второй мировой войны отец выставил перед домом на продажу дверные петли, деревянные шурупы и другую оставшуюся фурнитуру. Распродажа прошла вполне успешно. Получив вкус к торговле, он стал оптовым торговцем сахаром для кондитерских изделий.

Отец все ещё гордился своими знаниями об электричестве, но не мог найти никого подходящего, кому бы он мог их продемонстрировать. Но однажды он нашёл хорошую мишень — своего сына.

В эти бедные послевоенные дни почти ни у кого дома не было ванн, поэтому люди ходили в общественные бани. По пути в баню и на обратном пути отец хвастался своими знаниями: почему работает двигатель трёхфазного тока? почему солнечные и лунные затмения не происходят каждый месяц? Он с гордостью объяснял, что это происходит потому, что плоскости вращения Земли вокруг Солнца и Луны вокруг Земли находятся под углом 5 градусов друг относительно друга.

Это привело к тому, что в школе я был странным учеником. У меня были неважные оценки, но я мог отвечать на вопросы учителя, когда он отклонялся от темы и предмет обсуждения выходил за рамки учебника.

Мои родители не следили пристально за своими детьми и не помогали им в учёбе. Однажды моя мать поняла, что она никогда не видела сына, делающим уроки дома. Поэтому она сказала учителю на родительском собрании: "Пожалуйста, давайте хотя бы иногда

моему сыну домашние задания. А то он совсем не занимается дома". На что учитель ответил: "Ваш сын никогда не делает домашнее задание, несмотря на то, что я даю его каждый день!"

Тот вечер был кошмаром. Мне пришлось выслушать двухчасовую лекцию родителей.

Событие, которое породило во мне сильное желание стать физиком, случилось, когда я уже учился в старших классах. Вообще, я стал учиться в старших классах без особой мотивации. Но однажды, когда я был на первом или на втором году обучения в старшей школе, я наткнулся на газетную статью, в которой говорилось, что профессор Соити Саката из университета Нагои опубликовал революционную теорию [1] о составной модели элементарных частиц, в которой фундаментальными частицами являются протон, нейтрон и Л-гиперон.

Я тогда по-детски наивно думал, что вся наука уже завершилась в XIX веке. Если бы профессор Саката был из Токио, то это событие вряд ли бы меня заинтересовало. Но научные открытия делались прямо в том же городе, где я жил, в Нагое! У меня появилось страстное желание принять участие в таких исследованиях. Однако мой отец хотел, чтобы я занялся вместе с ним семейным бизнесом. Поэтому мне был дан единственный шанс сдать вступительные экзамены в университет, и я не мог провалить их. Я очень усердно работал, чтобы подготовиться к вступительным экзаменам в университет Нагои.

К счастью, меня приняли. Лекции в университете сильно отличались от уроков в школе и были гораздо более захватывающими. Первое занятие было по математическому анализу. Я узнал об аксиоме Архимеда, которая гласит, что для любых двух положительных чисел ε и δ найдётся целое число N такое, что $N\varepsilon > \delta$. Затем преподаватель продолжил лекцию, объясняя, что такое дедекиндовское сечение. Это был культурный шок. Всё, что я испытал в университете, было свежим и стимулирующим. Каждый раз, когда я начинал изучать новую область, я был полностью увлечён ею и говорил окружающим, что я буду заниматься этим в будущем.

Когда я был уже старшекурсником колледжа, профессор факультета математики спросил меня: "Вы ведь, конечно, собираетесь сдавать вступительные экзамены в аспирантуру на математический факультет?" Когда я ответил: "Нет, я уже подал заявление на физический

Т. Маскава (T. Maskawa). Yukawa Institute for Theoretical Physics (YITP), Kyoto University, and Kyoto Sangyo University, Japan

факультет", — профессор выглядел очень расстроенным, услышав такой неожиданный ответ. Возможно, я говорил ему раньше, что собираюсь заниматься математикой.

Подобные капризы не исчезли, даже когда я стал ходить на курс физики в 1962 г. Например, я считал, что исследования мозга являются важными, и вместе с несколькими друзьями начал посещать факультативный курс лекций по изучению перцептрана*. Однако, когда мне нужно было написать дипломную работу на втором курсе аспирантуры, я уже готовил статью по физике частиц в лаборатории профессора Сакаты.

В этот период были широко распространены вычисления, основанные на дисперсионных соотношениях, следующих из принципа причинности, и в моде была бутстрарная модель, предложенная Дж.Ф. Чу. Однако в лаборатории Сакаты основной была составная модель [1] для элементарных частиц, предложенная профессором Сакатой в 1955 г.

В то время интерес этой лаборатории привлекала симметрия в слабых взаимодействиях между лептонами и барионами, предложенная А. Гамбой, Р.Е. Маршаком и С. Окубо [2] на конференции в Киеве в 1951 г., а именно [3]

$$(v, e, \mu) \leftrightarrow (p, n, \Lambda).$$

Поэтому, когда было открыто мюонное нейтрино ν_μ , большая часть лаборатории Сакаты, естественно, стала изучать квартетные составные модели. И в 1964 г. квартетная составная модель была предложена Зиро Маки [4], доцентом лаборатории.

Хотя в течение этого периода я и не писал статей, я был очарован явлением спонтанного нарушения киральной симметрии после прочтения статей профессора Намбу [5, 6]. Я также интересовался достижениями в алгебре токов и ЧСАТ (частичное сохранение аксиального тока). Расширяя свои познания в этой области, я натолкнулся на такие важные работы, как "Аксиальный ток в бета-распаде" М. Гелл-Мана и М. Леви (1960) [7] и "К вопросу о сохранении четности в слабых взаимодействиях" Т.Д. Ли и С.Н. Янга (1956) [8].

Эти работы явились ключевыми в моих исследованиях по физике частиц и усилили мой интерес к связям между частицами и их слабым взаимодействиям.

Я вычислил, хотя это и не было опубликовано, несколько физических величин в рамках модели Намбу–Йона–Лазинио (НЙЛ) [6]. Так, например, я рассчитал константу распада пиона f_π , но я понимал, что эта константа должна быть достаточно мала, поскольку она количественно характеризует сильные взаимодействия. Я настойчиво пытался выяснить, как константа распада может быть уменьшена подгонкой свободных параметров в модели НЙЛ: константы связи и ультрафиолетового (УФ) обрезания. Я не мог получить определённого ответа, поскольку основной вклад возникал из области импульсов вблизи УФ-обрезания. Однако благодаря этим вычислениям я осознал важность перенормируемости.

В то время некоторые учёные в мире занимались исследованием эффектов высших порядков в слабых

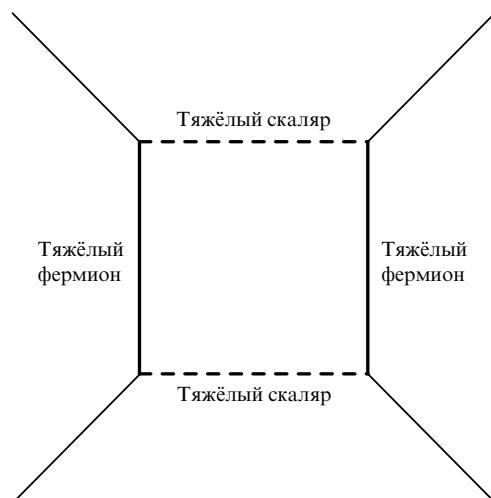


Рис. Диаграмма "квадратик".

взаимодействиях, хотя эти исследования не привлекали большого внимания. Если слабые взаимодействия описываются четырёхфермионным токовым взаимодействием, то старшие порядки расходятся. Поэтому авторы этих работ заменили четырёхфермионное взаимодействие диаграммой, изображённой на рисунке, в которой в промежуточном состоянии распространяются тяжёлые скалярные бозоны и тяжёлые фермионы. Это изменение уменьшает обычное четырёхфермионное взаимодействие в пределе тяжёлых масс скаляров и фермионов. Хотя такая модификация и не приводит к удовлетворительной модели, тем не менее введение обмена скалярными бозонами даёт возможность сделать слабые взаимодействия перенормируемыми. Я также обращал внимание на работы, в которых упорно изучались эффекты старших порядков в ток-токовых взаимодействиях.

Наша лаборатория была подписана только на один журнал по физике, и очень многие сотрудники хотели почитать последний выпуск. Для того чтобы частично решить эту проблему, в лаборатории Сакаты был организован журнальный клуб, члены которого по очереди читали новый выпуск и делали доклады. Когда в первый раз пришла моя очередь, в журнале была статья Фитча и Кронина [9], в которой сообщалось о наблюдении СР-нарушения. Она произвела на меня большое впечатление и у меня возник вопрос: в чём причина? Однако я не имел никакого понятия, как подойти к этой проблеме, и её решение отложилось на восемь лет.

Во второй половине 1960-х годов, мои интересы в основном сосредоточились на киральной симметрии и киральной динамике. В частности, тогда я обнаружил, что в модели Намбу–Йона–Лазинио константа распада пиона мала по сравнению с типичным масштабом, характеризующим сильные взаимодействия, и квадрат массы пиона является величиной первого порядка малости по параметрам, характеризующим нарушение киральной симметрии. Я всё ещё тогда не написал ни одной статьи по этой теме. Я рассматривал свои вычисления как этюды для физика, по аналогии с этюдами, которые делает художник, изменяя положения объектов или композицию.

* Перцепtron (англ. perceptron от лат. *perceptio* — восприятие) — математическая модель восприятия информации мозгом, предложенная Ф. Розенблаттом в 1957 г. (Примеч. ред.)

Идея спонтанного нарушения киральной симметрии в работе Намбу и Йона-Лазинио была очень привлекательной, однако в действительности безмассовых сильновзаимодействующих частиц не было обнаружено. Поэтому многие физики стали искать способы избежать следствия теоремы Намбу–Голдстоуна (НГ) [11, 12]. Среди них был и Хиггс. Причина появления намбуголдстоуновских безмассовых бозонов состоит в том, что в аксиальном токе существует только два формфактора, пропорциональных $\gamma_5 p_\mu$ и $\gamma_\mu \gamma_5$, и условие сохранения аксиального тока приводит к наличию безмассового полюса в одном из двух формфакторов. Это как раз то, что утверждает теорема Намбу–Голдстоуна. Затем появились работы Хиггса [10], в которых после вычислений в кулоновской калибровке (которая не является лоренц-инвариантной) было показано, что возможно появление ещё одного формфактора; тем самым оказалось возможным обойти теорему Намбу–Голдстоуна.

Именно в этой работе было показано, что согласно механизму Хиггса не только исчезает безмассовый НГ-бозон, но и калибровочные бозоны приобретают массу. Я не мог воспринять логику Хиггса. Вскоре, к счастью, в работе Кибла [13] была дана лоренц-ковариантная формулировка механизма, в которой я смог разобраться. Вскоре появилась электрослабая теория С. Вайнберга [14] и А. Салама [15]; кроме того, в работе Фаддеева и Попова [16] были прояснены правила Фейнмана для теории Янга–Миллса.

В связи с моим интересом к четырёх夸ковой модели и вычислениям поправок высших порядков в слабых взаимодействиях, я обратил внимание на статью ГИМ (Глэшоу, Илиопулос и Майани) [17], появившуюся в 1969 г., и указал на неё некоторым моим коллегам. Эта работа снова напомнила мне о четырёх夸ковой модели, хотя все выпускники лаборатории Сакаты уже знали о ней.

В этот период появилась одна статья, на которую мы ссылались в нашей с М. Кобаяси работе о СР-нарушении [20] следующим образом: "З. Маки и Т. Маскава, RITP-146" [18]. Она была написана незадолго до нашей работы о СР-нарушении, и имела название "Симметрии адронов и калибровочная теория слабых и электромагнитных взаимодействий". Эта статья мало известна, так как я никогда не объявлял, что она была опубликована в журнале *Progress of Theoretical Physics* **49** 1007 (1973). Если сильное взаимодействие выбирает определённое направление в четырёх夸ковой модели, то тогда его интерференция со слабым взаимодействием могла бы легко вызвать СР-нарушение. После 1974 г. стало известно, что сильные взаимодействия описываются КХД (квантовой хромодинамикой) и нет никакого выделенного направления, отличного от того, которое определяется массами夸ков, возникающими в результате взаимодействия с полем Хиггса. Однако это не было известно в 1972 г., поэтому нам был нужен подобный анализ сильных взаимодействий, проведённый в вышеупомянутой статье.

Когда появилась электрослабая теория, я интуитивно почувствовал, что пришло время вернуться к проблеме СР-нарушения. После окончания аспирантуры я в течение трёх лет был доцентом в университете Нагои, а затем в 1970 г. перешёл в университет Киото. Двумя годами позднее, в 1972 г., Кобаяси также пришёл в Киото на должность доцента.

В Японии есть серия традиционных праздников в начале мая, которая называется Золотая неделя. После окончания Золотой недели мы с Кобаяси начали новую совместную работу. У нас снова появилась благоприятная возможность работать вместе в одной лаборатории. Я чувствовал, как было сказано выше, что пришло время для решения проблемы СР-нарушения, и предложил эту задачу в качестве темы для нашей совместной работы. Кобаяси раньше в Нагое занимался очень близкими вопросами.

Мы начали изучать СР-нарушение, опираясь на квартетную кварковую модель и объединённую электрослабую теорию. Сначала мы должны были определить, как левые и правые компоненты четырёх夸ков преобразуются по отношению к группе электрослабой симметрии $SU(2) \times U(1)$:

- A) $4 = 2 + 2$;
- B) $4 = 2 + 1 + 1$;
- C) $4 = 1 + 1 + 1 + 1$.

Имеются эти три возможных случая для каждой из левых и правых компонент, поэтому мы должны были рассмотреть девять вариантов. Во всех вариантах, кроме (A, B), в котором для левых夸ков реализуется случай A, а для правых — B, видно, что СР-нарушение невозможно, если принять во внимание произвол в выборе фаз полей夸ков. Исключение составляет случай (A B).

Я подумал, что, по-видимому, это должно быть решением нашей проблемы, поскольку остальные случаи не подходят, и спросил Кобаяси, согласен ли он. Кобаяси наклонил голову немного набок и ответил: "Я изучу это детально вечером". Возможно, он уже знал результат, но ответил так из предосторожности. На следующий день он мне сказал: "Этот случай не подходит, поскольку из него следует неправильный знак для отношения g_V/g_A , что противоречит экспериментам".

В это время я был главным секретарём в профсоюзе университета Киото. И в это время возникла большая проблема, связанная с сокращениями секретарей на нашем факультете естественных наук. Я не мог сконцентрироваться на научных исследованиях и всё время думал об этих сокращениях, поскольку секретари действительно поддерживали наших молодых исследователей. Я обсуждал научные проблемы с Кобаяси утром, а в профсоюзе работал после обеда. Возвращаясь домой вечером, я ужинал с семьёй, и мы обсуждали события дня. И после этого, принимая ванну, я мог размышлять о моих исследованиях. Вот так я жил в эти дни.

После того, как Кобаяси исключил случай (A, B), мы начали искать другое решение, пытаясь объяснить, как могло бы возникнуть СР-нарушение в четырёх夸ковой модели. Мы серьёзно работали примерно в течение месяца. Однажды, когда я принимал ванну, мне пришла в голову мысль: не существует приемлемой модели, способной объяснить СР-нарушение в четырёх夸ковой модели, если мы придерживаемся перенормируемой теории слабых взаимодействий. Поэтому я решил написать статью, изложив отрицательный результат о том, что СР-нарушение нельзя объяснить в четырёх夸ковой модели в рамках перенормируемой электрослабой теории.

Решив закончить эту работу написанием такой слабой статьи и продумывая оправдания, я выбрался из ванной. Возможно, это освободило меня от привязки к четырёх夸ковой модели. Неожиданно я понял, что всё,

что мы придумали, должно хорошо работать в шестикварковой модели. Из наших предыдущих многочисленных вычислений было понятно, что комплексная фаза в этом случае должна сохраняться.

В рамках объединённой теории электрослабых взаимодействий существует скалярное поле, называемое полем Хиггса. Когда оно приобретает ненулевое вакуумное среднее, поля кварков становятся массивными. Если мы перепишем кварковые поля как поля, обладающие определёнными массами, то операторы заряженного тока будут содержать некоторую унитарную матрицу U . Если в элементах матрицы U появляется комплексная фаза, то возникает СР-нарушение.

Это объяснение может дать неправильное представление, что комплексная фаза всегда приводит к СР-нарушению. На самом деле, поскольку поля кварков комплексные, у нас есть свобода выбора их фаз, $q_i \rightarrow \exp(i\alpha_i) q_i$. Ясно, что физические величины не зависят от подобного переопределения фаз, но матричные элементы матрицы U при этом изменяются. Напомним, что заряженный ток имеет следующую структуру: комплексно сопряжённое поле верхних кварков \bar{u}_i умножается на поля нижних кварков d_j , помноженные на элементы матрицы U_{ij} , т.е. $\bar{u}_i U_{ij} d_j$. Здесь i, j изменяются от 1 до N , где N — число поколений кварков.

Таким образом, изменение фаз $2N$ кварковых полей

$$u_i \rightarrow \exp(i\alpha_i) u_i, \quad d_j \rightarrow \exp(i\beta_j) d_j, \quad (1)$$

приводит к изменению фаз матричных элементов

$$U_{ij} \rightarrow \exp[-(\alpha_i - \beta_j)] U_{ij}. \quad (2)$$

Поэтому из $2N$ фаз для $2N$ полей кварков $2N - 1$ степеней свободы можно использовать для изменения фаз матрицы U , поскольку одна фаза, одинаковая для всех полей кварков, не изменяет матрицы U .

Унитарная матрица U размером $N \times N$, которая появляется в заряженном токе, когда поля кварков, дублеты относительно $SU(2) \times U(1)$, переписываются в терминах полей, которые являются массивными состояниями, в общем случае имеет $N(N+1)/2$ степеней свободы для комплексных фаз. Если мы учтём свободу в выборе фаз полей кварков, то останется

$$\frac{N(N+1)}{2} - (2N - 1) = \frac{(N-1)(N-2)}{2}$$

физических комплексных фаз в матрице U .

Это число обнуляется при $N = 1$ и $N = 2$, что соответствует двух- и четырёхкварковым случаям соответственно и объясняет, почему в этих случаях отсутствуют комплексные фазы в матрице U и почему нет СР-

нарушения для двух- и четырёхкварковых моделей. Однако, если рассмотреть случай $N = 3$ -поколений, т.е. шестикварковую модель, то это число равно единице и поэтому впервые СР-нарушение оказывается возможным!

Таким образом мы завершили свою работу. Стало понятным происхождение СР-нарушения, по крайней мере, частично.

Однако проверка этой теории заняла довольно длительное время: 30 лет при значительных усилиях многих экспериментаторов. Я бы хотел здесь поблагодарить всех, кто поддерживал этот великий проект человечества.

Перевёл с английского С.В. Демидов

Список литературы

1. Sakata S "On a composite model for the new particles" *Prog. Theor. Phys.* **16** 686 (1956)
2. Gamba A, Marshak R E, Okubo S "On a symmetry in weak interactions" *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **45** 881 (1959)
3. Maki Z, Nakagawa M, Ohnuki Y, Sakata S "A unified model for elementary particles" *Prog. Theor. Phys.* **23** 1174 (1960)
4. Maki Z "The 'fourth' baryon, Sakata model and modified $B-L$ symmetry. I" *Prog. Theor. Phys.* **31** 331 (1964)
5. Nambu Y "Quasi-particles and gauge invariance in the theory of superconductivity" *Phys. Rev.* **117** 648 (1960)
6. Nambu Y, Jona-Lasinio G "Dynamical model of elementary particles based on an analogy with superconductivity" *Phys. Rev.* **122** 345 (1961); *Phys. Rev.* **124** 246 (1961)
7. Gell-Mann M, Lévy M "The axial vector current in beta decay" *Nuovo Cimento* **16** 705 (1960)
8. Lee T D, Yang C N "Question of parity conservation in weak interactions" *Phys. Rev.* **104** 254 (1956)
9. Christenson J H, Cronin J W, Fitch V L, Turlay R "Evidence for the 2π decay of the K^0_2 meson" *Phys. Rev. Lett.* **13** 138 (1964)
10. Higgs P W "Broken symmetries, massless particles and gauge fields" *Phys. Lett.* **12** 132 (1964); "Spontaneous symmetry breakdown without massless bosons" *Phys. Rev.* **145** 1156 (1966)
11. Goldstone J "Field theories with 'superconductor' solutions" *Nuovo Cimento* **19** 154 (1961)
12. Goldstone J, Salam A, Weinberg S "Broken symmetries" *Phys. Rev.* **127** 965 (1962)
13. Kibble T W B "Symmetry breaking in non-Abelian gauge theories" *Phys. Rev.* **155** 1554 (1967)
14. Weinberg S "A model of leptons" *Phys. Rev. Lett.* **19** 1264 (1967)
15. Salam A "Weak and electromagnetic interactions", in *Elementary Particle Theory: Proc. of the Nobel Symp., 1968, Lerum, Sweden* Vol. 2 (Ed. N Svartholm) (Stockholm: Amquist & Wiksell, 1968) p. 367
16. Faddeev L D, Popov V N "Feynman diagrams for the Yang–Mills field" *Phys. Lett. B* **25** 29 (1967)
17. Glashow S L, Iliopoulos J, Maiani L "Weak interactions with lepton–hadron symmetry" *Phys. Rev. D* **2** 1285 (1970)
18. Maki Z, Maskawa T "Hadron symmetries and gauge theory of weak and electromagnetic interactions" *Prog. Theor. Phys.* **49** 1007 (1973)
19. Kobayashi M, Maskawa T "CP-violation in the renormalizable theory of weak interaction" *Prog. Theor. Phys.* **49** 652 (1973)