

Эксперимент BELLE на всех парах продвигается в исследовании CP-нарушения

(Пресс-релиз ускорительного центра КЕК от 20 августа 2004 года)

Источник: Interactions News Wire #53-04 20 August 2004 <http://www.interactions.org>)

Коллаборация BELLE - международная исследовательская группа, работающая на ускорителе KEKB в Научно-исследовательском центре ускорителей высоких энергий КЕК (Япония), - представила новые результаты исследований эффектов CP-нарушения. Сообщение было сделано на 32-ой Международной конференции по физике высоких энергий, которая состоялась на этой неделе в китайской столице Пекине (*Н.Н.: оригинальное сообщение датировано 20 августа 2004 года*).

На ускорителе KEKB в электрон-позитронных столкновениях рождается большое число короткоживущих субатомных частиц, которые называются B -мезонами и \bar{B} -мезонами (\bar{B} -мезон является античастицей для B -мезона). Эти частицы, массы которых несколько больше, чем масса атома гелия, распадаются в течении нескольких триллионных долей секунды (*Н.Н.: то есть примерно за 10^{-12} секунды*) на более легкие и более долгоживущие частицы, которые можно регистрировать в детекторе BELLE.

Изучение большого числа распадов B -мезонов играет решающую роль для понимания поведения материи на наиболее фундаментальном уровне, особенно при изучении причины весьма небольшого различия, которое, как известно, существует в поведении материи и антиматерии и носит название CP-нарушения (*Н.Н.: то есть нарушения комбинированной зарядовой - C - и пространственной - P - четностей*).

С момента начала работы коллайдера KEKB в 1999 году, характеристики ускорителя неуклонно улучшались. Это позволило к настоящему времени зарегистрировать 274 миллиона $B\bar{B}$ -пар, из которых 122 миллиона были получены только за один прошлый год (*Н.Н.: уместно напомнить, что электронные журналы "Русский переплет" и Phys. Web.Ru уже сообщали сетевым читателям о рекордах светимости, достигнутых на ускорителе KEKB [1]*). Ускорители подобного типа называются " B -фабриками", поскольку на них в большом количестве могут рождаться $B\bar{B}$ -пары. Ускоритель KEKB имеет наибольшую светимость из всех когда-либо построенных ускорителей (*Н.Н.: заметим, что строящийся в настоящее время в CERN Большой адронный коллайдер LHC согласно проекту должен почти на порядок перекрыть максимальную светимость ускорителя KEKB; см., например, сравни-*

тельную таблицу характеристик различных ускорителей в послесловии к статье [2]).

Первое ясное свидетельство существования CP-нарушения в системе нейтральных B -мезонов было получено три года назад (*Н.Н.: то есть в 2001 году, когда на B -фабриках было зарегистрировано так называемое косвенное CP-нарушение в системах нейтральных B -мезонов, о чем сжато рассказано ниже и в "Послесловии переводчика") коллаборациями BELLE и BaBar. Коллаборация BaBar работает в SLACe (Stanford Linear Accelerator Center, Калифорния, США). В обоих экспериментах было найдено, что способ распада B -мезона на частицы, которые называются J/ψ - и K^0 -мезонам, отличается от способа распада \bar{B} -мезона на те же самые частицы. Величина CP-нарушения для таких распадов характеризуется параметром, который носит название $\sin(2\phi_1)$ (*Н.Н.: на самом деле, во всем мире, исключая Японию, для этого параметра принято другое обозначение, а именно $\sin(2\beta)$; однако японские физики в знак уважения к своим коллегам М.Кобаяши и Т.Маскава, которые первыми объяснили механизм CP-нарушения, неуклонно придерживаются архаичных обозначений; подробнее об этом можно прочитать в заметке [2]). Этот параметр должен равняться нулю, если CP-нарушение отсутствует. В противном случае он может принимать значения в интервале от $+1$ до -1 , что не противоречит теории, которая описывает всю совокупность полученных в настоящее время экспериментальных данных и носит название Стандартной Модели (СМ).**

Усреднение по данным коллабораций BELLE и BaBar дает для величины $\sin(2\phi_1)$ значение $0,736$ с ошибкой $0,049$, что записывается как $0,736 \pm 0,049$. В настоящее время эта величина рассматривается в качестве одного из фундаментальных параметров Стандартной Модели. Для полного подтверждения изящной теории CP-нарушения в СМ, которая была выдвинута японскими физиками-теоретиками М.Кобаяши и Т.Маскава в 1973 году, было необходимо найти еще один тип асимметрии между частицами и античастицами, который носит название **прямого CP-нарушения**.

Прямое CP-нарушение

Первое наблюдение прямого CP-нарушения в системе нейтральных B -мезонов было сделано коллаборацией BELLE в январе 2004 года в распадах B -мезона на два π -мезона. Из 152 миллионов $B\bar{B}$ -пар указанным образом распались 264 \bar{B} -мезона и только 219 B -мезонов, что доказывает реальность прямого CP-нарушения более чем с 99,8% -ой вероятностью.

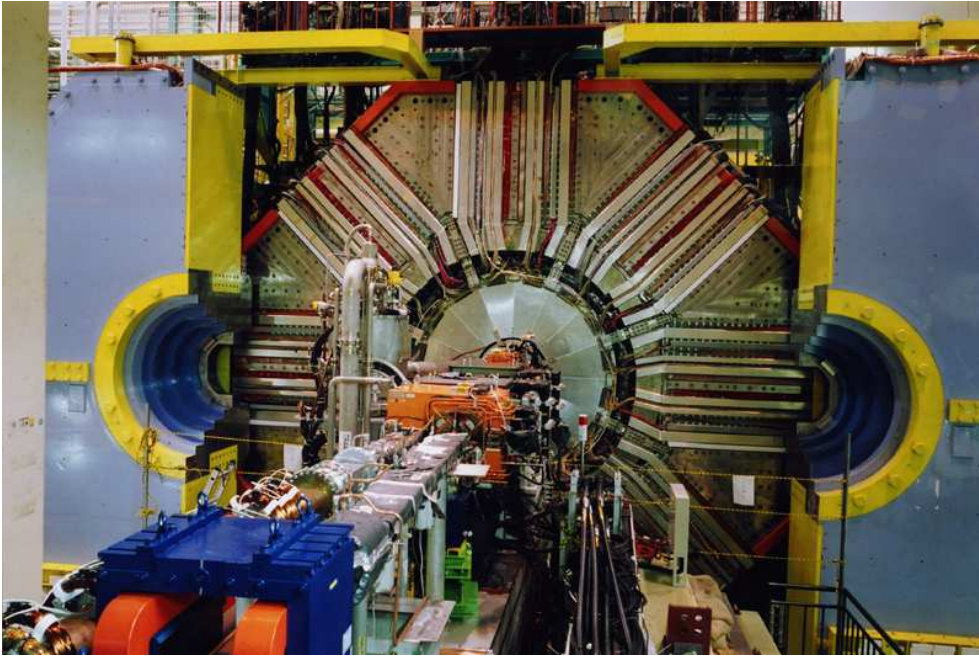


Рис. 1: Общий вид детектора BELLE с торца. На этом плане хорошо виден канал ускорителя КЕКВ.

При измерении величины $\sin(2\phi_1)$, различие между B -мезонами и \bar{B} -мезонами проявляется только при измерении зависимости числа распадов от времени, однако различие исчезает, если суммировать полное число распадов. Это так называемое косвенное CP-нарушение с его характерной зависимостью от времени, которая мешает наблюдению прямого CP-нарушения (Н.Н.: см. формулу (10)).

Наконец недавно коллаборация BELLE обнаружила ясное доказательство существования прямого CP-нарушения в распадах B -мезонов на K - и π -мезоны. Из 274 миллионов $B\bar{B}$ -пар коллаборацией BELLE было найдено 1165 указанных выше распадов B -мезонов и только 974 распада \bar{B} -мезонов, что доказывает существование прямого CP-нарушения на более чем 99,99% -ом уровне достоверности.

Наблюдение коллаборацией BELLE прямого CP-нарушения в $K\pi$ -распадах ожидалось после предшествующего ему наблюдения той же коллаборацией прямого CP-нарушения в $\pi\pi$ -распадах. Поскольку предполагается, что последняя реакция включает в себя как прямое, так и косвенное CP-нарушение, то эта ситуация является несколько более сложной. Собранные вместе результаты по $K\pi$ - и $\pi\pi$ -распадам представляют собой весомое подтверждение теории Кобаяши-Маскава.

Возможные проявления "новой физики"

Если СМ является теорией, которая правильно описывает свойства элементарных частиц, то помимо распада $B^0 \rightarrow J/\psi K^0$, должны существовать другие распады нейтральных B -мезонов, в которых можно найти эффекты СР-нарушения и измерить величину $\sin(2\phi_1)$. Особенно интересен с этой точки зрения распад B^0 -мезона на ϕ и K^0 -мезоны. Предполагается, что этот распад идет за счет так называемых "квантовых флуктуаций", в которых b -кварк внутри B -мезона в течении короткого промежутка времени переходит в t -кварк и W -бозон. Возможно, что t -кварк и/или W -бозон могут переходить в новые частицы, которые еще экспериментально не наблюдались и не входят в схему Стандартной Модели. Их скрытое присутствие может проявиться в аномальном значении величины $\sin(2\phi_1)$.

Летом 2003 года коллаборация BELLE сообщила, что величина $\sin(2\phi_1)$, найденная в распаде $B^0 \rightarrow \phi K^0$, значительно отличается от хорошо определенного значения 0,736, полученного в распаде $B^0 \rightarrow J/\psi K^0$. Этот результат, основанный на наблюдении 68 распадов $B^0 \rightarrow \phi K^0$, вызвал огромный интерес среди физиков, занимающихся элементарными частицами. Поэтому все с нетерпением ждали проверки найденного эффекта на большей статистике.

Продолжение исследований требовало гораздо большей статистики, и экспериментаторы на всех парах двигались к решению этой задачи, которая в последнее время является одним из самых серьезных противоречий между экспериментом и предсказаниям Стандартной Модели. Среди 274 миллионов событий с участием B -мезонов сотрудниками коллаборации BELLE были отобраны 175 ϕK^0 -распадов. Дополнительно были проанализированы пять других каналов, которые, как предполагается, ведут себя аналогично каналу $B^0 \rightarrow \phi K^0$. После обобщения всех результатов обработки экспериментальных данных, величина $\sin(2\phi_1)$ оказалась равной $0,43 \pm 0,11$, что с 99% вероятностью является отклонением от предсказаний СМ.

Несомненно, что одной из наиболее важных проблем в физике высоких энергий остается дальнейшее уточнение результатов для двухчастичных адронных распадов B -мезонов.

Поиск новой физики

Открытие в 2003 году коллаборацией BELLE загадочного резонанса $X(3872)$ впоследствии было подтверждено результатами трех других экспериментов (*Н.Н.: по поводу обнаружения $X(3872)$ сетевым читателям можно рекомендовать заметку [3]; в настоящее время резонанс $X(3872)$ обнаружен на установках BELLE, BaBar, CDF и D0; две последние работают на коллайдере Tevatron, FNAL, США*). Специфические свойства нового резонанса продолжают вызывать множество предположений и спекуляций относительно его природы. Поэтому в настоящее время коллаборация BELLE работает над улучшением своих экспериментальных результатов, чтобы понять внутреннюю структуру резонанса $X(3872)$.

Открытие $X(3872)$ со всей очевидностью показало, что ускоритель КЕКВ может служить мощным инструментом для поиска новых частиц. Совсем недавно коллаборация BELLE нашла убедительное доказательство существования еще одной новой частицы, которая названа $X(3940)$. Эта частица рождается вместе с J/ψ -мезоном в электрон-позитронных столкновениях. В настоящее время свойства новой частицы активно изучаются.

Перевод Н.Никитина

Послесловие переводчика

Если представленный выше пресс-релиз японского ускорительного центра КЕК нельзя назвать сенсационным, то весьма многообещающим его назвать можно. И хотя обнаружение прямого CP -нарушения в системах нейтральных B -мезонов является более сильным аргументом в пользу SM , чем против нее, но два других открытия, при условии, что они подтвердятся, могут завершить более чем тридцатилетнюю эру господства Стандартной Модели в физике частиц и открыть новую, не известную пока эру.

Поскольку пресс-релиз ускорительного центра КЕК рассчитан на специалистов в области физики элементарных частиц, то необходимо написать комментарии относительно всех его разделов, чтобы сделать текст понятным для студентов, аспирантов и преподавателей ВУЗов. Любителям науки, обладающим меньшей теоретической подготовкой, придется приложить дополнительные усилия и заполнить многочисленные пропуски в изложении путем самообразования.

Начнем с обнаружения прямого CP -нарушения в системах нейтральных B -мезонов. Для

начального ознакомления с проблемой сетевым читателям рекомендуются соответствующие главы из учебников [4], в которых подробно разобран во многом аналогичный случай CP-нарушения в системах нейтральных K -мезонов. Дальнейшее изложение в значительной мере будет основываться на замечательной, но не переведенной на русский язык книге [5].

В настоящее время предполагается, что в рамках СМ существуют кварки шести сортов (иначе, ароматов). Три кварка u , c и t , называемые "верхними", имеют заряд $2/3$ заряда позитрона (а не электрона!) и могут переходить с излучением заряженного W^+ -бозона (виртуального или, как в случае t -кварка, реального) в три нижних кварка d , s и b , заряды которых равны, соответственно, по $1/3$ заряда электрона. На языке гамильтониана СМ такой переход записывается в виде:

$$\frac{g}{2\sqrt{2}} \bar{q}_i \gamma_\mu (1 - \gamma_5) V_{ij}^{CKM} q_j W_\mu^+ + h.c., \quad (1)$$

где $q_i = \{u, c, t\}$, $q_j = \{d, s, b\}$ - кварковые поля, W_μ^\pm - поле W^\pm -бозонов, $h.c.$ - обозначает эрмитовски сопряженное слагаемое, а V_{ij}^{CKM} -матрица Кобаяши-Маскава (или, как это принято в англоязычной литературе, матрица (С)Кабиббо-(К)Кобаяши-(М)Маскава - СКМ-матрица). Матрица имеет следующий вид

$$V_{ij}^{CKM} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Элементы СКМ-матрицы, вообще говоря, комплексные числа, квадраты модулей которых характеризуют интенсивности переходов "верхних" кварков в "нижние" и наоборот. То есть в выражении (2) имеется $2 \times 3 \times 3 = 18$ действительных параметров. Однако не все они являются независимыми. В силу закона сохранения вероятности, СКМ-матрица должна удовлетворять условию унитарности $V^{CKM} (V^{CKM})^\dagger = (V^{CKM})^\dagger V^{CKM} = I$, где I - единичная 3×3 матрица. Значек \dagger обозначает операцию эрмитового сопряжения. Покомпонентно можно записать:

$$\sum_k V_{ik} V_{jk}^* = \sum_k V_{ki}^* V_{kj} = \delta_{ij}, \quad (3)$$

что уменьшает количество независимых действительных параметров до девяти. Из них пять - это нефизические фазы, которые могут быть исключены из рассмотрения переопределением фаз кварковых полей. Оставшиеся четыре параметра - три угла смешивания и фаза -

задают следующую стандартную параметризацию СКМ-матрицы, восходящую к классической работе Кобаяши и Маскава:

$$V_{ij}^{CKM} = \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta_{13}} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{13}s_{23}e^{i\delta_{13}} & c_{12}s_{23} - s_{12}s_{13}s_{23}e^{i\delta_{13}} & c_{13}s_{23} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}s_{13}c_{23}e^{i\delta_{13}} & -c_{12}s_{23} - s_{12}s_{13}c_{23}e^{i\delta_{13}} & c_{13}c_{23} \end{pmatrix}, \quad (4)$$

где $c_{ij} = \cos \theta_{ij}$, $s_{ij} = \sin \theta_{ij}$, $c_{ij} > 0$, $s_{ij} > 0$, $0 \leq \theta_{ij} \leq \pi/2$ и $0 \leq \delta_{13} \leq 2\pi$. Параметризация (4) имеет ясный физический смысл вращения в трехмерном пространстве ароматов при помощи углов Эйлера θ_{12} , θ_{13} и θ_{23} . Наличие фазы δ_{13} в СКМ-матрице приводит в рамках СМ к эффектам СР-нарушения как в распадах нейтральных K -мезонов, так и в распадах нейтральных B -мезонов. В различных расширениях СМ может возникать несколько матриц смешивания типа СКМ-матрицы и, следовательно, несколько фазовых множителей. Каждый из них должен вносить свой вклад в эффекты СР-нарушения.

Помимо параметризации (4) не менее часто используется параметризация Вольфенштейна. Она получается из (4) заменами $s_{12} = \lambda$, $s_{23} = A\lambda^2$, $s_{13} \sin \delta_{13} = A\lambda^3 \eta$ и $s_{13} \cos \delta_{13} = A\lambda^3 \rho$:

$$V_{ij}^{CKM} = \begin{pmatrix} 1 - \frac{\lambda^2}{2} & \lambda & A\lambda^3(\rho - i\eta + \frac{i}{2}\eta\lambda^2) \\ -\lambda & 1 - \frac{\lambda^2}{2} - i\eta A^2 \lambda^4 & A\lambda^2(1 + i\eta\lambda^2) \\ A\lambda^3(1 - \rho - i\eta) & -A\lambda^2 & 1 \end{pmatrix}. \quad (5)$$

При вычислениях отброшены все слагаемые порядка $O(\lambda^3)$ для действительных частей и $O(\lambda^4)$ для мнимых. Поскольку $\lambda \ll 1$ и $A \sim 1$, то параметризация (5) дает хорошее представление об интенсивности СР-нарушения в различных распадах.

Условие унитарности СКМ-матрицы (3) ведет к целому ряду соотношений между ее элементами. Наибольший интерес с точки зрения экспериментальной проверки представляет следующее равенство:

$$0 = \sum_{k=u,c,t} V_{kb}^* V_{kd} = V_{ub}^* V_{ud} + V_{cb}^* V_{cd} + V_{tb}^* V_{td}. \quad (6)$$

Каждое из трех произведений $V_{kb}^* V_{kd}$ является комплексным числом. Следовательно оно задает длину и направление вектора на комплексной плоскости. То, что сумма произведений $V_{kb}^* V_{kd}$ равна нулю означает, что соответствующие им вектора образуют треугольник, который носит название **треугольника унитарности**. Согласно параметризации (5) можно

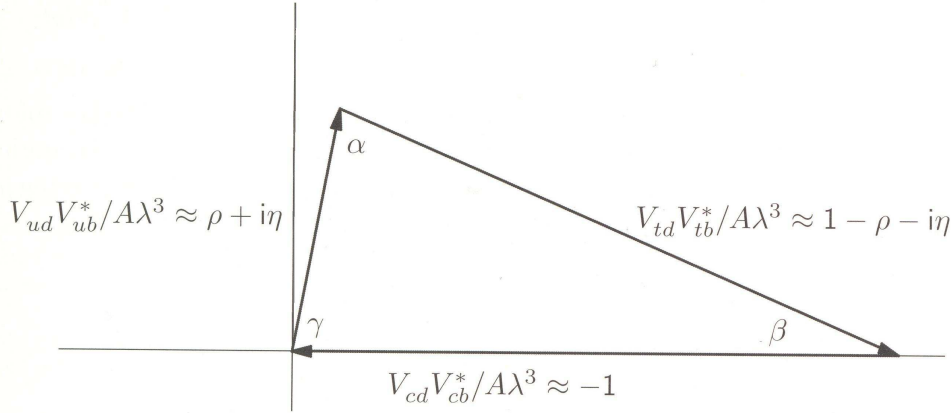


Рис. 2: Треугольник унитарности для соотношения (6) на комплексной плоскости параметров (ρ, η) . Рисунок взят из книги [6].

записать, что $V_{cb}^* V_{cd} = -A\lambda^3 - i\lambda^5\eta \approx -A\lambda^3$, то есть с хорошей степенью точности является действительным числом. С той же степенью точности $V_{ud} \approx 1$. На комплексной плоскости (ρ, η) определим следующие вектора:

$$\frac{V_{cb}^* V_{cd}}{A\lambda^3} \approx -1; \quad \frac{V_{ub}^* V_{ud}}{A\lambda^3} \approx \rho + i\eta; \quad \frac{V_{tb}^* V_{td}}{A\lambda^3} \approx 1 - \rho - i\eta. \quad (7)$$

Тогда треугольник унитарности как графическая иллюстрация соотношений (6) и (7) представлен на рисунке 2. На этом же рисунке дано определение углов α , β и γ .

Из теории комплексных чисел хорошо известно, что если заданы два комплексных числа $z_1 = r_1 e^{i\phi_1}$ и $z_2 = r_2 e^{i\phi_2}$ с модулями r_1, r_2 и аргументами ϕ_1, ϕ_2 , то аргумент частного равен $Arg(z_1/z_2) = \phi_1 - \phi_2$. Тогда из рисунка 2 очевидно, что:

$$\beta = Arg\left(-\frac{V_{cb}^* V_{cd}}{V_{tb}^* V_{td}}\right). \quad (8)$$

Теперь кратко опишем стратегии поиска косвенного и прямого СР-нарушений в распадах нейтральных B -мезонов. Рассмотрим B_d^0 -мезон (иное обозначение: B^0 -мезон) с кварковым составом $d\bar{b}$ и \bar{B}_d^0 -мезон (\bar{B}^0 -мезон) с кварковым составом $b\bar{d}$ соответственно. Какими характеристиками они обладают? Во-первых, **ароматом**, т.е. эти нейтральные мезоны содержат в своем составе b или \bar{b} -кварк. Аромат B -мезонов можно найти, например, в полулептонных распадах по знаку лептона, поскольку $B_d^0 \rightarrow D^- \ell^+ \nu_\ell$, а $\bar{B}_d^0 \rightarrow D^+ \ell^- \bar{\nu}_\ell$. Таким образом, положительно заряженный лептон несет экспериментаторам информацию о том, что распался

B_d^0 -мезон, а отрицательный, что \bar{B}_d^0 -мезон.

Во-вторых, нейтральная частица может характеризоваться определенной CP -четностью.

Для нейтральных B -мезонов состояния с определенным ароматом и CP -четностью не совпадают, поскольку $CP |B_d^0\rangle = -|\bar{B}_d^0\rangle$ и $CP |\bar{B}_d^0\rangle = -|B_d^0\rangle$ (используются соглашения, принятые в [5]; подробнее о различных вариантах соглашений при определении C -сопряжения можно узнать из книги Л.Б.Окуня [4], стр. 77). Непосредственной проверкой можно убедиться, что линейные комбинации

$$|B_1\rangle = \frac{|B_d^0\rangle - |\bar{B}_d^0\rangle}{\sqrt{2}}, \quad |B_2\rangle = \frac{|B_d^0\rangle + |\bar{B}_d^0\rangle}{\sqrt{2}}$$

обладают положительной и отрицательной CP -четностями соответственно. Эти состояния могут распадаться на системы, обладающие определенной CP -четностью. Среди таких двухчастичных адронных систем в конечном состоянии чаще всего рассматриваются $J/\psi K_S^0$, $\psi' K_S^0$, $\rho^0 K_S^0$, ϕK_S^0 , $\chi_{c1} K_S^0$, $\eta_c K_S^0$ ($CP = -1$) и $\pi^+\pi^-$, $J/\psi K_L^0$ ($CP = +1$). Такие системы как $\pi^+\pi^-\pi^0$ или $J/\psi K^{*0}$ могут иметь различную четность в зависимости от относительного углового момента. Символами K_S^0 и K_L^0 обозначаются короткоживущий и долгоживущий K -мезоны соответственно.

Помимо аромата и CP -четности нейтральные B -мезоны характеризуются определенной **массой и временем жизни** (состояния, диагонализующие гамильтониан взаимодействия). Как и в случае K -мезонов, для B -мезонов эти состояния не совпадают ни с состояниями определенного аромата, ни с состояниями определенной CP -четности, но являются их линейными комбинациями

$$|B_l\rangle = p|B_d^0\rangle + q|\bar{B}_d^0\rangle = \frac{1}{\sqrt{1+|\tilde{\epsilon}|^2}} (|B_2\rangle + \tilde{\epsilon}|B_1\rangle),$$

$$|B_h\rangle = p|B_d^0\rangle - q|\bar{B}_d^0\rangle = \frac{1}{\sqrt{1+|\tilde{\epsilon}|^2}} (|B_1\rangle + \tilde{\epsilon}|B_2\rangle).$$

Параметр $\tilde{\epsilon}$ связан непосредственно с отношением q/p , которое равно

$$\frac{q}{p} = \frac{1 - \tilde{\epsilon}}{1 + \tilde{\epsilon}} = \frac{V_{td}V_{tb}^*}{V_{td}^*V_{tb}} = e^{-2i\beta}. \quad (9)$$

При написании последнего равенства в цепочке (9) было использовано определение (8) и тот факт, что с хорошей точностью $V_{cb}^*V_{cd}$ является действительным числом. Напомним, что в публикациях коллаборации BELLE вместо β используется обозначение ϕ_1 .

Состояние $|B_h\rangle$ ("heavy component") аналогично по построению состоянию $|K_S^0\rangle$, а состояние $|B_l\rangle$ ("less heavy component") аналогично состоянию $|K_L^0\rangle$. Но имеется важное отличие от случая странных мезонов: времена жизни состояний $|B_h\rangle$ и $|B_l\rangle$ практически равны. Это совершенно не похоже на ситуацию с нейтральными K -мезонами. Такое отличие является прямым следствием того, что массы B -мезонов много больше масс их продуктов распадов по основным каналам, в то время как массы нейтрального K -мезона и системы трех пионов сравнимы. То есть для B -мезонов в ширине распада отсутствует подавление по фазовому объему, которое определяет "долгость" и "короткость" времен жизни нейтральных K -мезонов. Масса B_h чуть больше массы B_l . Поэтому первый получил название "тяжелой компоненты", а второй "чуть менее тяжелой компоненты".

Как в K , так и в B -мезонах имеются две возможности реализации эффектов CP -нарушения. Во первых, это **косвенное CP -нарушение** за счет малой примеси компоненты одной четности на фоне доминирования компоненты противоположной четности. Например, в B_l -мезоне основным является вклад CP -нечетной компоненты, а примесь CP -четной компоненты определяется комплексным параметром $\tilde{\epsilon}$. Косвенное CP -нарушение в распадах нейтральных каонов было найдено в 1964 году Кронином, Кристенсенем, Фитчем и Терлеем (Нобелевская премия по физике за 1980 год). Ими было зарегистрировано несколько событий, в которых долгоживущий K_L^0 -мезон распадался на $\pi^+\pi^-$ -пару (за подробностями описания эксперимента отсылаю интересующихся читателей к руководствам [4] и [7]). Косвенное CP -нарушение для нейтральных B -мезонов удалось обнаружить только в 2001 году на B -фабриках BaBar и BELLE при изучении распада $B_d^0(\bar{B}_d^0) \rightarrow J/\psi K_S^0$. На кварковом уровне за этот распад отвечают переходы $b \rightarrow c\bar{c}s$ и $\bar{b} \rightarrow c\bar{c}\bar{s}$, что на адронном уровне приводит к процессам $B_d^0 \rightarrow J/\psi K^0$ и $\bar{B}_d^0 \rightarrow J/\psi \bar{K}^0$. Поскольку K^0 и \bar{K}^0 являются линейными комбинациями K_L^0 и K_S^0 , а долгоживущие каоны практически не регистрируются в детекторах BaBar и BELLE, то в конечном состоянии вместо K^0 и \bar{K}^0 автоматически оказывается K_S^0 . Наиболее простой путь регистрации косвенного CP -нарушения, это получение величины $\sin(2\beta)$ из асимметрии

$$A_{CP}(t) = \frac{\Gamma(B_d^0(t) \rightarrow J/\psi K_S^0) - \Gamma(\bar{B}_d^0(t) \rightarrow J/\psi K_S^0)}{\Gamma(B_d^0(t) \rightarrow J/\psi K_S^0) + \Gamma(\bar{B}_d^0(t) \rightarrow J/\psi K_S^0)} = -\sin(2\beta) \sin(\Delta m_B t), \quad (10)$$

где Δm_B - разность масс B_h и B_l состояний. На диаграммном языке косвенное CP -нарушение описывается осцилляциями нейтральных мезоннов и может быть вычислено достаточно точно.

Кроме того, в природе может реализоваться (и реализуется таки!) **прямое CP -нарушение** за счет CP -несохраняющего взаимодействия в электрослабом гамильтониане (1). В этом случае ненулевой, например, может быть амплитуда перехода B_2 (CP -нечетного состояния) в $\pi^+\pi^-$ (CP -четную систему). Для нейтральных каонов эффект прямого CP -нарушения примерно на три порядка меньше эффекта косвенного нарушения. А потому он был окончательно обнаружен только в 1999 году (через 25 лет после открытия косвенного CP -нарушения!) коллаборацией NA48 (CERN). Для B -мезонов ситуация менее драматична. Поэтому уже в 2003 году было найдено, а в 2004 году окончательно подтверждено существование прямого CP -нарушения в распадах нейтральных B -мезонов. Явное экспериментальное доказательство прямого CP -нарушения может быть получено, например, в распадах $B_d^0 \rightarrow K^+\pi^-$ и $\bar{B}_d^0 \rightarrow K^-\pi^+$. Если электрослабый гамильтониан инвариантен относительно CP -сопряжения, то асимметрия

$$A_{CP}(K^+\pi^-) = \frac{N_{\bar{B}_d^0 \rightarrow K^-\pi^+} - N_{B_d^0 \rightarrow K^+\pi^-}}{N_{\bar{B}_d^0 \rightarrow K^-\pi^+} + N_{B_d^0 \rightarrow K^+\pi^-}} \quad (11)$$

равна нулю, где N_{\dots} - полное число распадов, зарегистрированных по данному каналу. В эксперименте на установке BELLE было найдено, что $A_{CP}(K^+\pi^-) = -0,101 \pm 0,025(stat) \pm 0,005(syst)$. Коллаборация BaBar на статистике в 227 миллионов $B\bar{B}$ -пар сообщила, что $A_{CP}(K^+\pi^-) = -0,133 \pm 0,030(stat) \pm 0,009(syst)$. В пределах ошибок оба результата хорошо согласуются. Эффекты, связанные с осцилляциями нейтральных B -мезонов также вносят вклад в (11). Однако можно показать, что этот вклад более высокого порядка малости по эффектам CP -нарушения, поэтому в (11) им можно пренебречь. Результаты работы установок BaBar и BELLE неоспоримо доказывают существование прямого CP -нарушения в B -системах. Кроме того, на установке BELLE получено ненулевое значение для асимметрии $A_{CP}(\pi^+\pi^-)$. На диаграммном уровне прямому CP -нарушению отвечает интерференция вкладов глюонного "пингвина" (о "пингвинных" диаграммах см. в недавней заметке [8]) и древесного процесса.

В заключении скажем несколько слов о "новой физике", намеки на существование которой получили экспериментаторы из BELLE. Распад $B_d^0 \rightarrow \phi K_S^0$ на кварковом уровне описывается переходом $\bar{b} \rightarrow \bar{s}s s$ и идет только за счет "пингвинных" диаграмм. Экспериментальная процедура поиска $\sin(2\beta)$ в этом распаде аналогична подробно описанной выше процедуре поиска $\sin(2\beta)$ в распаде $B_d^0 \rightarrow J/\psi K_S^0$. Разночтения в результатах могут быть вызваны не только вкладом "новой физики", но не выявленными пока погрешностями в методике

эксперимента и в теоретических расчетах (система $ss\bar{s}$ как и система $sc\bar{c}$ таит в себе целый ряд методических тонкостей, связанных с корректным учетом непертурбативных вкладов от сильных взаимодействий). Что касается состояния $X(3872)$ и особенно состояния $X(3940)$, то тут надо дождаться большей статистики. На первый взгляд, пик $X(3940)$ похож на многие другие "многообещающие" пики, которые за десять лет своей работы в области физики высоких энергий я повидал от экспериментаторов CERNa, DESY и FNALa. Ни один из них впоследствии не был подтвержден на большей статистике.

Контрольные вопросы и задачи

В заключении сетевым читателям предлагается несколько контрольных вопросов и задач, которые должны улучшить их понимание эффектов CP -нарушения.

- 1) Нарисуйте фейнмановские диаграммы, отвечающие распадам $B_d^0 \rightarrow J/\psi K_S^0$, $B_d^0 \rightarrow \phi K_S^0$, $B_d^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ и $B_d^0 \rightarrow K^+\pi^-$. Нарисуйте диаграммы для аналогичных распадов \bar{B}_d^0 -мезонов.
- 2) Почему не наблюдают CP -нарушение в системах нейтральных D -мезонов?
- 3) Нарисуйте треугольник унитарности для $V_{ud}^*V_{td} + V_{us}^*V_{ts} + V_{ub}^*V_{tb} = 0$. Есть ли в этом треугольнике хоть один угол, равный любому из углов треугольника унитарности рисунка 2 ?
- 4) Получите формулу (10).
- 5) Покажите, что асимметрия (11) равна нулю, если в электрослабом гамильтониане отсутствует CP -нарушающее слагаемое.
- 6) Исходя из рисунка 2, дайте определения для углов α и γ через элементы СКМ-матрицы.
- 7*) В каких распадах можно измерить величины углов α и γ ?
- 8*) Предположим, что в мире выполняется точное равенство масс $m_d = m_s = m_b$. Не проводя детальных вычислений найдите, чему в таком мире равны ширины распадов: $t \rightarrow cW^+W^-$, $t \rightarrow c\gamma$ и $t \rightarrow cl^+\ell^-$? Что поменяется, если c -кварк заменить на u ?

Список литературы

- [1] "В-фабрика КЕКВ и установка Belle бьют рекорды интегральной светимости", <http://phys.web.ru/db/msg/1185933/> , <http://www.pereplet.ru/nikitin/31.html#31>
- [2] Г.Фрейзер, "Физическая В-ология", <http://phys.web.ru/db/msg/1185441/>
- [3] Н.Никитин, "Ее звали Икс", <http://phys.web.ru/db/msg/1188491/>
- [4] Л.Б.Окунь, "Лептоны и кварки", М. "Наука", 1990; Ю.Комминс, Ф.Буксбаум, "Слабые взаимодействия лептонов и кварков", М. "Энергоатомиздат", 1987.
- [5] Q.Но-Kim, P.Хуан-Yem, "Elementary Particles and Their Interactions", "Springer", 1998.
- [6] "CP Violation in Particle, Nuclear and Astrophysics", Ed. by M.Beyer, "Springer", 2002.
- [7] К.Н.Мухин, "Экспериментальная ядерная физика", кн.2, М. "Энергоатомиздат", 1993.
- [8] Н.Никитин, "Один из десяти миллиардов против Стандартной Модели", <http://phys.web.ru/db/msg/1188931/>