

ПРИРОДА

№ 11, 2001 г.

А. А. Комар

Регистрация нарушения CP -четности в распадах B^0 -мезонов

© “Природа”

**Использование и распространение этого материала
в коммерческих целях
возможно лишь с разрешения редакции**



Сетевая образовательная библиотека “VIVOS VOCO!”
(грант РФФИ 00-07-90172)

vivovoco.rsl.ru
www.ibmh.msk.su/vivovoco

Регистрация нарушения CP -четности в распадах B^0 -мезонов

А.А.Комар

Экспериментальное наблюдение, о котором идет речь в заголовке, имеет, как будет видно из дальнейшего, исключительно важное значение для понимания свойств одного из трех основных взаимодействий элементарных частиц — слабого взаимодействия. Не случайно давно ожидаемая информация о результатах исследований по распаду нейтральных B -мезонов (выполнявшихся независимо в двух разных ускорительных центрах в США и Японии) была опубликована в одном и том же номере престижного журнала «Physical Review Letters» в статьях, следующих друг за другом. Причем это было сделано дважды: предварительные результаты обеих групп появились в мартовском номере 2001 г., а более полные данные (при увеличении статистики) — в августе [1, 2]. Такое отношение научной общественности лишней раз свидетельствует об исключительном интересе к публикуемому материалу. Чтобы пояснить читателю, чем он был вызван, начнем с небольшого физического и исторического введения.

© А.А.Комар



Астон Антонович Комар, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией электронов высоких энергий Физического института им.П.Н.Лебедева РАН. Область научных интересов — физика элементарных частиц, процессы сильного и слабого взаимодействия, свойства симметрии в физике частиц. Член редколлегии журнала «Природа».

Взаимодействия и дискретные преобразования

При описании взаимодействий элементарных частиц важное значение имеет поведение сил по отношению к двум дискретным преобразованиям: операциям C и P . Первый символ обозначает переход от частицы к античастице (в простейшем случае — зарядовое сопряжение), а второй — переход от исходного пространства к инвертированному (т.е. пространству, где координаты x , y , z заме-

нены на $-x$, $-y$, $-z$), который после поворота на 180° относительно одной из координатных осей приводит к более привычному зеркальному пространству. Из известных взаимодействий элементарных частиц два — сильное и электромагнитное — по отношению к операциям C и P ведут себя предельно просто: они инвариантны по отношению к ним, т.е. не меняются после этих преобразований. Как следствие, C -четность и P -четность элементарных частиц (квантовые числа, которые показывают, изменяет или нет знак волновая

функция системы после проведения соответствующей операции) в порождаемых ими процессах порознь сохраняются. Ситуация в случае слабого взаимодействия выглядит совершенно по-другому: ни C -, ни P -четность в процессах слабого взаимодействия не сохраняются. Для физиков, впервые столкнувшихся с таким поведением в 50-х годах, это было совершенно неожиданно.

После знаменитых опытов Ч.С.Ву с сотрудниками [3] по изучению β -распада поляризованных

ядер ^{60}Co , результаты которых были опубликованы в 1957 г., стало ясно, что в слабых взаимодействиях нарушается P -четность (и следовательно, физические процессы в зеркальном мире протекают по-иному). Данное обстоятельство было затем подтверждено на многих других примерах слабых распадов элементарных частиц. Одновременно выяснилось, что в этих распадах нарушалась и C -четность. Зато CP -четность во всех известных тогда случаях слабых распадов элементарных частиц удивительным образом сохранялась. В конце 50-х годов это послужило основанием для гипотезы, что CP -четность является более фундаментальной характеристикой слабого взаимодействия, и она в слабых распадах сохраняется. Тем более что существует очень общая CPT -теорема, согласно которой все взаимодействия элементарных частиц должны быть инвариантны по отношению к совместной комбинации трех операций: C , P , T (операция T есть операция инверсии времени: $t \rightarrow -t$). Нарушение CP -четности при справедливости CPT -теоремы означало бы T -неинвариантность, т.е. несимметрию слабых процессов при обращении времени. Подобное допущение в те годы казалось крамольным. Однако очень скоро его пришлось сделать.

В 1964 г. Дж.Кристенсон и др. [4] показали: CP -четность на самом деле нарушается в случае распадов нейтральных долгоживущих K^0 -мезонов (K_L). Вопреки быто-

вавшей тогда уверенности в том, что K_L -мезон должен всегда распадаться на три π -мезона, были об-

наружены случаи его распада на два π -мезона, нарушающие CP -

четность. Это нарушение, однако, незначительно: доля таких распадов среди всех других возможных составляет всего ~ 0.0023 . Но, хотя эта доля и очень мала, факт остается фактом: слабые взаимодействия могут нарушать T -инвариантность.

Некоторое время после открытия нарушения CP -четности обсуждались теоретические схемы, в которых предполагалось наличие особого суперслабого взаимодействия, специфичного для системы нейтральных K -мезонов и связанного с характерным смешиванием K^0 и анти- K^0 (\bar{K}^0). Якобы именно оно могло бы вызывать малое нарушение CP -четности. Постепенно эти идеи были отброшены. Детальные исследования распадов долгоживущих K_L -мезонов на два π -мезона

(заряженных или нейтральных), проведенные в последнее время*, в сопоставлении с соответствующими распадами короткоживущих K^0 -мезонов (K_S) не оставили сомнений: нарушение CP -четности, наблюдаемое при распадах K^0 -мезонов, есть отражение внутренних свойств слабого взаимодействия.

Тем не менее до недавнего времени распады нейтральных K -мезонов были единственным физическим процессом, где регистрировалось нарушение CP -четности. Это вызывало определенную неудовлетворенность — возникал вопрос, может ли оно проявляться в других слабых процессах, причем с большей интенсивностью? Эксперименты, о которых идет речь в настоящей статье, фактически на него ответили. Исследования были подвергнуты процессы, не связанные с распадами K^0 -мезонов — распад B^0 -мезонов, ранее в этом плане не изучавшийся. Анализ полученных данных с несо-

* Особенно следует упомянуть отличающийся высокой точностью эксперимент NA-48 в ЦЕР-Не (данные 2001 г.).

мненностью засвидетельствовал наличие нарушения CP -четности, причем довольно значительное.

Чем хороши B^0 -мезоны?

Появление принципиально нового объекта исследования, B^0 -мезонов, было тесно связано со стремительным развитием физики элементарных частиц, начавшимся в 1974 г. с открытия известной J/ψ -

частицы. Вслед за ней были обнаружены многие не известные ранее физикам достаточно тяжелые и нестабильные частицы, среди них (в самом конце 70-х годов) — и B -мезоны. Новые частицы радикальным образом расширили поле исследований, в том числе и в сфере слабых распадов. Исключительно важно, что в этот период произошел также решительный пересмотр представлений о структуре известных ранее и только что открытых сильновзаимодействующих частиц (адронов).

Стало понятно, что они имеют сложное строение и составлены из небольшого числа относительно простых образований, названных кварками. Именно открытие новых тяжелых адронов (в частности, уже упоминавшихся J/ψ -частиц и Υ -ча-

стиц), состоящих из тяжелых кварков, сделали эту картину предельно очевидной. Те адроны, которые были известны до 70-х годов, легко можно было представить как комбинации из трех относительно легких кварков u , d , s . Для понимания природы J/ψ и Υ -частиц понадоби-

лось ввести еще два кварка — c , b . 90-е годы добавили к ним еще один — шестой кварк t . В силу близости свойств и физических характеристик кварки принято разбивать на три семейства (или поколения): (u, d) , (c, s) , (t, b) .

Введение представления о кварках позволило не только дать простое описание всех адронов, но и посмотреть на слабые взаимодействия адронов как на слабые взаимодействия составля-

ющих их кварков. При таком подходе был немедленно получен важнейший результат относительно природы слабых взаимодействий, который трудно было надеяться получить на другом пути. Было показано, что если в природе существует не менее шести кварков, то слабые взаимодействия обязательно нарушают CP -четность. Это изящное математическое исследование было выполнено японскими теоретиками М.Кобаяши и Т.Маскава в 1973 г. [5] еще до открытия c -, b -кварков и тем более t -кварка. На тот момент они стремились построить теоретическую схему, которая должна была бы автоматически обеспечивать нарушение CP -четности в слабом взаимодействии. Соответствующий анализ привел к числу 6 как минимальному значению для числа кварков, допускающему реализацию такой схемы. В историческом плане это было предсказание, которое через короткое время полностью подтвердилось на практике.

О работе Кобаяши и Маскава немедленно вспомнили, когда были открыты c -кварк (1974) и b -кварк (1977). Но кроме прогноза числа кварковых поколений в этой работе содержалось еще одно очень важное указание. Из предложенного математического описания слабого взаимодействия для трех поколений кварков (известного под названием матрицы Кобаяши—Маскава*) следовал вывод, что нарушения CP -четности будут наиболее заметными, когда в слабый процесс вовлечен кварк третьего поколения, т.е. b -кварк. В этом указании заложено объяснение, почему в описываемом эксперименте рассматривались распады B^0 -мезонов, так как именно B -мезоны содержат в своем составе b -кварк.

По своей кварковой структуре нейтральный B -мезон есть связанная система: $B^0 = (d \bar{b})$, анти- B^0 -мезон $\bar{B}^0 = (\bar{d} b)$. В этом плане они

* Иногда используют более обобщенное название: матрица Кабиббо—Кобаяши—Маскава, поскольку Н.Кабиббо в 1963 г. [6] дал форму описания слабого взаимодействия известных тогда адронов, которая была затем с успехом перенесена на первые два поколения кварков.

очень похожи на нейтральные K - и анти- K -мезоны: $K^0 = (d \bar{s})$, $\bar{K}^0 = (\bar{d} s)$. Слабое взаимодействие нарушает квантовые числа, присущие b -кварку («преlestь» от англ. «beauty») и s -кварку («странность» от «strangeness»). Это означает, что через цепочку слабых процессов можно перевести B^0 -мезон в анти- B^0 -мезон и обратно. С точки зрения квантовой механики возникает система из двух состояний, которая описывается матрицей 2×2 , исходно недиа-

гональной, но легко поддающейся диагонализации. При этом образуются два новых состояния B_L и B_H (аналогично K_S и K_L), которые являются линейной комбинацией исходных состояний (происходит так называемое смешивание):

$$|B_{L,H}\rangle = p |B^0\rangle \pm q |\bar{B}^0\rangle,$$

L — light, H — heavy,

$$|K_{S,L}\rangle = p |K^0\rangle \pm q |\bar{K}^0\rangle,$$

S — short, L — long.

Коэффициенты p и q связаны со значениями вероятностей переходов B^0 в анти- B^0 (соответственно K^0 в анти- K^0). Наличие таких переходов несколько изменяет начальные (одинаковые) массовые состояния B^0 -мезонов (расщепляет их). Новые состояния, диагонализующие матрицу взаимодействия, имеют различные массы: $M_H \neq M_L$.

Индексы L и H как раз и отражают небольшое различие в массах этих B -мезонов: $\Delta M = M_H - M_L$ составля-

ет $3.1 \cdot 10^{-4}$ эВ. Это различие, как мы скоро увидим, принципиально важно для описываемого эксперимента. Несовпадение по массе есть и у K_L и K_S ($3.5 \cdot 10^{-6}$ эВ), но разница во временах жизни (в 580 раз!) для них гораздо более характерна. В случае B^0 -мезонов нет оснований говорить об образовании короткоживущего или долгоживущего B^0 -состояния, поскольку времена жизни у B_L и B_H практически совпадают.

Самое главное кроется в том, как ведут себя новые состояния

частиц по отношению к операции CP : если CP -четность нарушается, то они не будут иметь определенного значения этого квантового числа. Для системы K_S и K_L так и происходит, но нарушение мало, как уже говорилось. Поэтому K_S практически на 100% имеет CP -четность +1, в то время как K_L с той же точностью — CP -четность -1. Но K^0 -мезоны образованы из сравнительно легких кварков. Для B^0 -мезонов ожидания другие. Однако практически полная идентичность времен жизни B_H и B_L , существование у них огромного числа каналов распадов делают невозможной постановку эксперимента, сколько-нибудь похожую на прямое изучение распадов K_L и K_S . Здесь уместно завершить наше несколько затянувшееся введение.

Эксперимент: от идеи к воплощению

Остроумная идея эксперимента по проверке сохранения (или несоблюдения) CP -четности, предложенная в 1981 г. [7, 8], состояла в проведении прямого сопоставления вероятностей распада B^0 -мезона и CP -сопряженного ему анти- B^0 -мезона в заданное состояние одной и той же CP -четности. Наличие нарушения CP -четности должно было бы проявиться в различии вероятностей таких распадов. Точнее, в рамках одного эксперимента было намечено сравнить временное поведение распадов B^0 -мезона и \bar{B}^0 -мезона. Но частица, рождающаяся в момент $t=0$ как B^0 -мезон или как \bar{B}^0 -мезон,

$$|B^0(0)\rangle = \frac{1}{2}p [|B_L(0)\rangle + |B_H(0)\rangle],$$

$$|\bar{B}^0(0)\rangle = \frac{1}{2}q [|B_L(0)\rangle - |B_H(0)\rangle],$$

в дальнейшем (за счет смешивания) эволюционирует во времени как суперпозиция B_L и B_H , имеющих разные массы. И в динамике на следующих этапах процесса проступает различие в свойствах B_H

и B_L . К моменту, отличному от $t=0$, $|B_L(t)\rangle = \exp(iM_L t) |B_L(0)\rangle$. Если учесть это обстоятельство, а затем выразить окончательную временную зависимость состояний $|B^0(t)\rangle$ и $|\bar{B}^0(t)\rangle$, то алгебраические преобразования приводят к появлению факторов $\cos(\Delta Mt/2)$ и $\sin(\Delta Mt/2)$. В результате возникает сложное (осцилляционное) поведение состояний $|B^0(t)\rangle$ и $|\bar{B}^0(t)\rangle$ во времени.

Эта осциллирующая картина отражается и во временной эволюции вероятностей распадов B^0 - и \bar{B}^0 -мезонов в состояние с заданной CP -четностью. Обозначим их как $W_-(t)$ и $W_+(t)$. Их временной ход тоже достаточно сложен. Однако ситуация предельно упрощается, если рассмотреть разницу упомянутых вероятностей, отнесенную к их сумме (эту величину принято называть асимметрией A_{CP}):

$$A_{CP} = (W_+ - W_-)/(W_+ + W_-) = -\eta \sin 2\beta \cdot \sin \Delta Mt.$$

A_{CP} как раз та величина, которая должна говорить о наличии или отсутствии (если $A_{CP}=0$) нарушения CP -четности в распадах B^0 -мезо-

нов. Видно, что ее временной ход целиком определяется величиной ΔM . Здесь: η — CP -четность ис-

следуемого канала; t — промежуток времени, прошедший между распадом B^0 в заданный канал и распадом его партнера \bar{B}^0 в тот же канал (или то же самое, но в обратном порядке); β — угол,

который характеризует структуру слабого взаимодействия (имеющий отношение к известной матрице Кабиббо—Кобаяши—Маскава). Угол β , согласно теории, не дол-

жен быть малым, и именно его величину предстояло измерить в эксперименте.

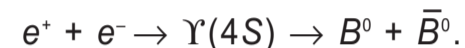
Хотя описанная постановка эксперимента была предложена в 1981 г., вскоре после открытия B^0 -мезонов, прошло еще долгих 20 лет, прежде чем идея воплотилась на практике. Для этого понадобилось заметное улучшение методик регистрации элементарных частиц и построение нового типа ускорительного устройства: асимметричного e^+e^- -коллайдера.

Чтобы реализовать основную идею эксперимента — исследовать одновременно распады B^0 - и \bar{B}^0 -мезонов, — удобнее всего было использовать распад одного из возбужденных состояний Υ -мезона, а именно $\Upsilon(4S)$ -мезона с массой

10.58 ГэВ, испытывающего характерный распад: $\Upsilon(4S) \rightarrow B^0 + \bar{B}^0$.

В этом плане природа пошла нам навстречу. Самый простой путь получить состояние $\Upsilon(4S)$, которое

с точки зрения кварков есть $(b\bar{b})$ -система, — организовать столкновение встречных электронно-позитронных пучков, имеющих суммарную энергию в 10.58 ГэВ, и подобный опыт уже имелся. Процесс протекает следующим образом:



Но до сих пор это были эксперименты с симметричными e^+e^- -коллайдерами, т.е. коллайдерами, в которых энергии сталкивающихся пучков равны. В таком коллайдере образующийся $\Upsilon(4S)$ -

мезон в лабораторной системе будет покоиться (рис.1). А это вызвало бы огромные сложности для последующего наблюдения распадов B^0 - и \bar{B}^0 -мезонов. Обратим внимание на то, что $2M_B = \sim 10.56$ ГэВ, т.е. B^0 -мезоны, образующиеся при распаде $\Upsilon(4S)$, имеют очень малые

импульсы. Отслеживать в этом случае распады B^0 -мезонов, вылетающих из точки рождения $\Upsilon(4S)$

в любые стороны (в пространственном угле 4π), достаточно труд-

но. И уж практически невозможно изучать временной ход распадов. Тем более, что речь идет об очень малых временах. Время жизни B^0 -мезонов равно 1.55 пкс, а характерное время, отвечающее ΔM , —

2.12 пкс. Соответствующие пролетные длины частиц составляют сотни микрон.

Идея использования асимметричного e^+e^- -коллайдера заключается в том, чтобы в условиях неодинаковых энергий сталкивающихся пучков сделать рожденный $\Upsilon(4S)$ -мезон движущимся в лабо-

раторной системе. В асимметричном коллайдере это произойдет автоматически, поскольку при не-

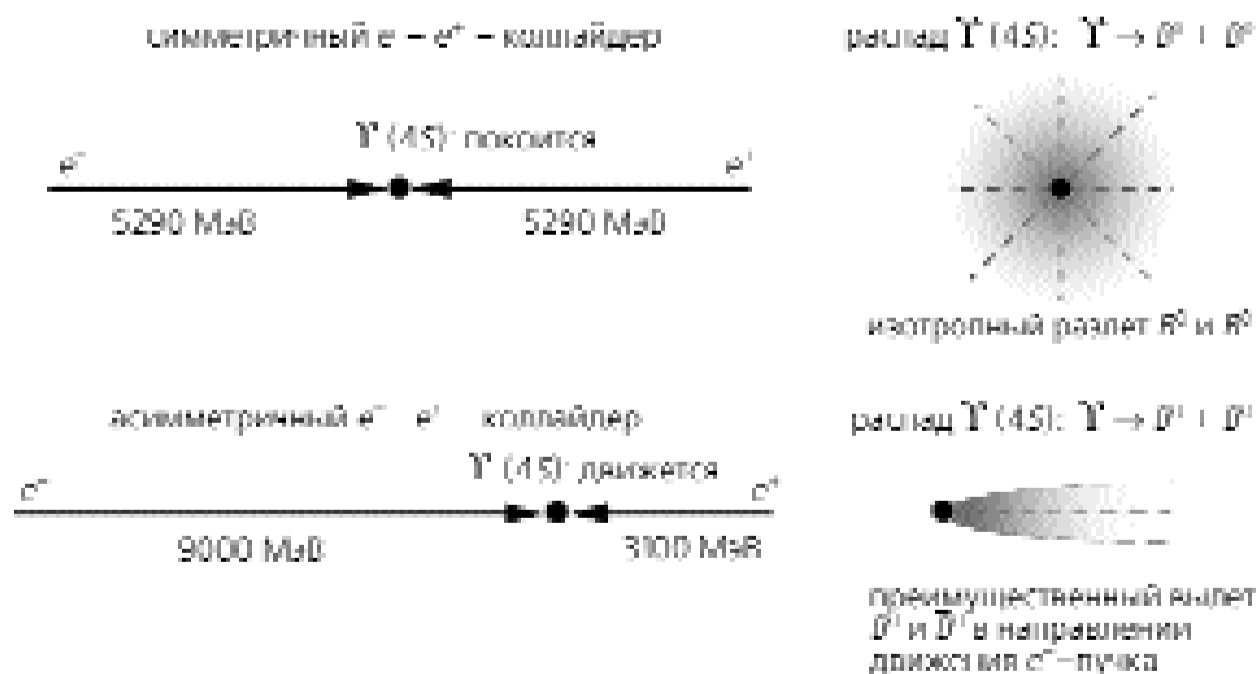
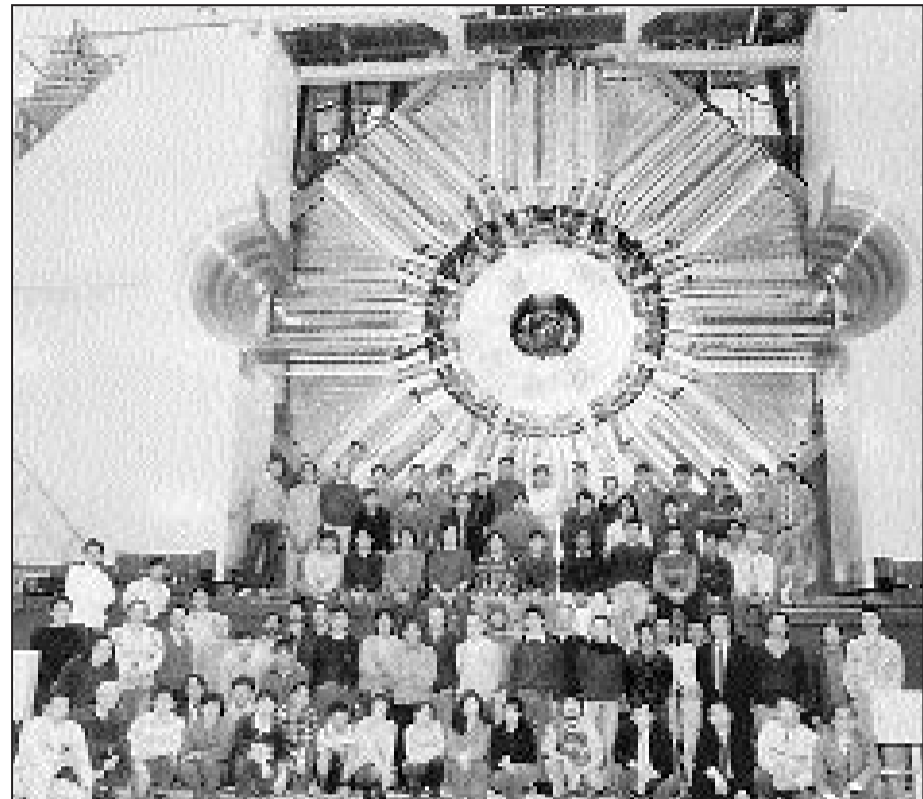


Рис.1. Геометрия образования и разлета частиц в симметричном и асимметричном коллайдерах.

Рис.2. Детектор BELLE на фабрике частиц в лаборатории КЕК (Япония).



равных энергиях в лабораторной системе будет присутствовать некомпенсированный импульс, который и будет передан родившемуся Υ -мезону.

B^0 -мезоны, возникающие при распаде Υ -мезона (если учесть их малый импульс в системе покоя Υ),

в лабораторной системе полетят в направлении пучка с большей энергией, т.е. практически вдоль оси сталкивающихся пучков (рис.1). А это радикально облегчает проблемы, связанные с регистрацией их распада.

Асимметричные коллайдеры были построены в двух ускорительных центрах: PEP II (Станфорд, США) и КЕК (Цукуба, Япония), рис.2. В первом случае были выбраны следующие энергии: e^- — 9 ГэВ, e^+ — 3.1 ГэВ; во втором случае энергии были несколько иными: e^- — 8 ГэВ, e^+ — 3.5 ГэВ. При этом энергия в системе центра масс в обоих коллайдерах соответствовала 10.58 ГэВ. В США экспериментальную установку назвали BABAR (тут налицо явная связь с образованием системы $b\bar{b}$). Международный коллектив, составленный из физиков многих стран мира, насчитывал около 800 человек, в том числе из России (Институт ядерной физики им.Г.И.Будкера,

Новосибирск). В Японии соответствующая установка получила название BELLE, число участников превысило 400. В состав последней коллаборации вошли физики из Новосибирска, а также из Москвы (Институт экспериментальной и теоретической физики). Число участников научных коллективов указано с тем, чтобы читатель мог оценить масштабы человеческих усилий, которые потребовались для подготовки и проведения обсуждаемых экспериментов. Оно демонстрирует также, какое значение физики придавали этим исследованиям. Параметры созданных коллайдеров оказались близкими, прежде всего в том, что касается интенсивности сталкивающихся пучков (точнее, так называемой светимости) и, следовательно, в том, что связано с числом набранных событий, а также по возможностям анализирующей аппаратуры.

В течение двух с небольшим лет (1999—2001) коллективы, соревнуясь друг с другом, сумели на каждой из установок зафиксировать рождение около $3 \cdot 10^7$ пар B^0 и \bar{B}^0 от распада $\Upsilon(4S)$. После скрупулезного анализа из всех процессов распада B^0 и \bar{B}^0 -мезонов было отобрано несколько сотен событий, которые могли быть надежно отнесены к распадам, отвечающим

каналам с заданной CP -четностью конечного состояния. Такими характерными каналами служили:

для $\eta = -1$

$$B^0 (\bar{B}^0) \rightarrow J/\psi + K_S,$$

$$B^0 (\bar{B}^0) \rightarrow \psi(2S) + K_S,$$

$$B^0 (\bar{B}^0) \rightarrow \chi_{c1} + K_S;$$

для $\eta = +1$

$$B^0 (\bar{B}^0) \rightarrow J/\psi + K_L.$$

Две из возможных цепочек распада изображены на рис.3.

детектор BABAR д е т е к т о р BELLE			
$\eta = -1$	$\eta = +1$	$\eta = -1$	$\eta = +1$
530	273	747	569

Число идентифицированных распадов в каналы с фиксированной η :

Тип B^0 -мезона, распадающегося первым (B^0 или \bar{B}^0), определялся по знаку заряда лептона или K -мезона, которые были среди продуктов распада: $B^0 \rightarrow l^+, K^+$;

$$\bar{B}^0 \rightarrow l^-, K^-.$$

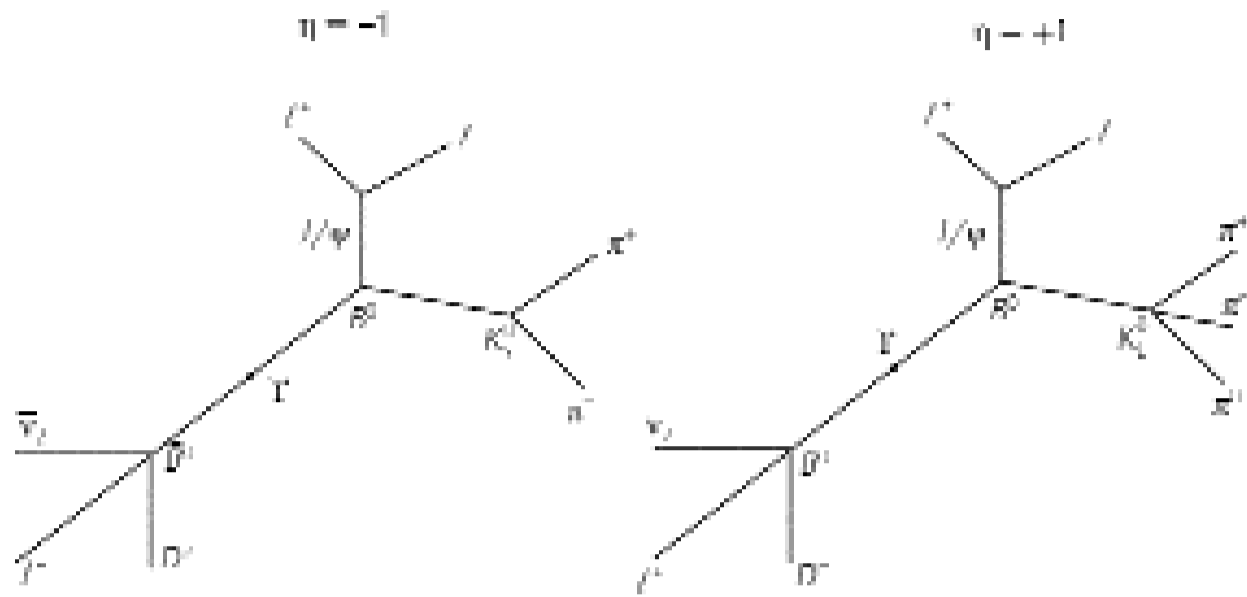


Рис.3. Возможные цепочки распада B^0 - и \bar{B}^0 -мезонов (изображены в системе отсчета, связанной с центром масс); l — лептон (e, μ).

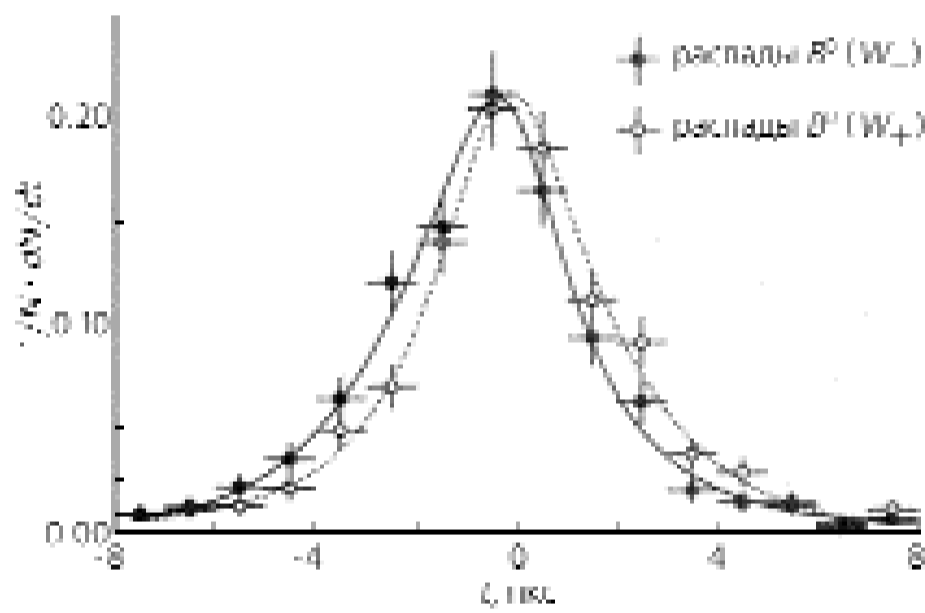


Рис.4. Временные распределения событий распадов B^0 -мезонов (черные точки) и \bar{B}^0 -мезонов (светлые точки) в состоянии с заданной CP -четностью $\eta = -1$. Кривые — результаты теоретического расчета при значении $\sin 2\beta = 0.99$, обеспечивающем наилучшее согласие с экспериментальными данными.

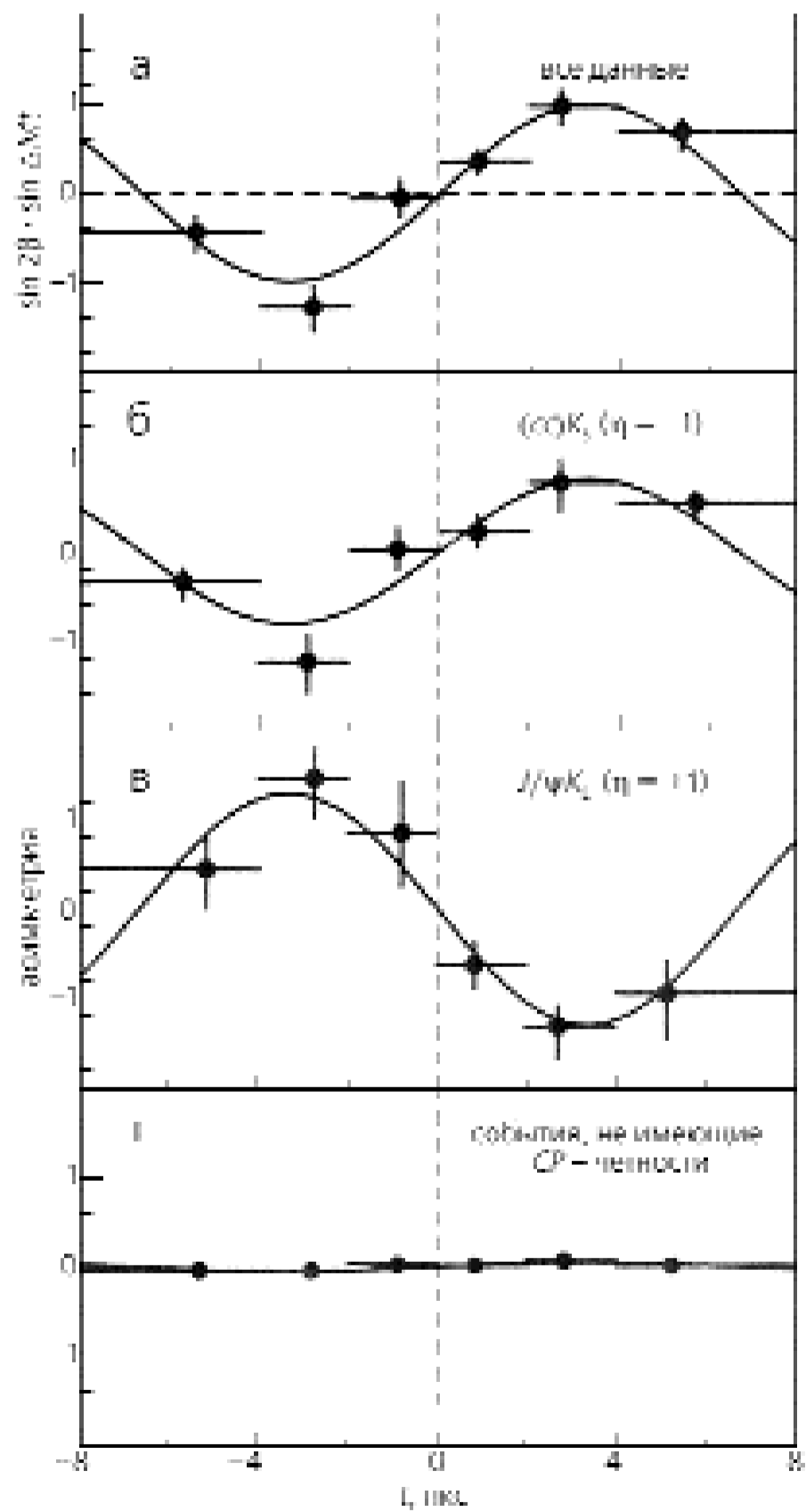


Рис.5. Временной ход асимметрии при распаде в состоянии с заданной CP -четностью: все данные — а; с $\eta = -1$ (cc, K_s) — б; с $\eta = +1$ ($J/\psi, K_s$) — в; не имеющие заданной CP -четности — г.

Продemonстрируем два достаточно выразительных графика, взятых из работы коллаборации BELLE. (Сходные графики присутствуют и в работе другой коллаборации).

На первом (рис.4) представлен временной ход вероятностей W_+ и W_- для распадов B^0 - и \bar{B}^0 -мезонов в состояние с заданной CP -четностью. Точность измерений достаточно высока, чтобы уже здесь увидеть различие кривых. Это различие становится совершенно очевидным при вычитании W_+ и W_- и представлении асимметрии A_{CP} (рис.5), которая очевидным образом имеет осциллирующий характер. Напомним, что амплитуда осцилляций A_{CP} прямо характеризует величину нарушения CP -четности.

По данным коллаборации BELLE:

$$\sin 2\beta = 0.99 \pm 0.14(\text{stat}) \pm 0.06(\text{syst}).$$

По данным коллаборации BABAR:

$$\sin 2\beta = 0.59 \pm 0.14(\text{stat}) \pm 0.05(\text{syst}).$$

И хотя имеется некоторое расхождение между результатами двух экспериментов (на уровне двух-трех статистических ошибок), в главном их выводы совпадают: CP -четность в слабом взаимодействии (в процессах, связанных с участием b -кварка,) нарушена практически максимальным обра-

зом. Самые последние данные указанных коллабораций (CERN Courier, 2002, May. P.6)

BELLE:

$$\sin 2\beta = 0.82 \pm 0.12(\text{stat}) \pm 0.05(\text{syst}),$$

BABAR:

$$\sin 2\beta = 0.75 \pm 0.09(\text{stat}) \pm 0.04(\text{syst})$$

демонстрируют еще большую степень согласия между экспериментами.

Тем самым подтверждается предсказание, высказанное в работе Кобаяши—Маскава, что нарушение CP -четности должно быть достаточно заметно выражено в распадах мезонов, содержащих b -кварки. Более общий вывод, и в этом состоит главное значение проведенного эксперимента, состоит в доказательстве фундаментального факта: нарушение CP -четности есть действительно характерное свойство слабого взаимодействия.

Новые горизонты

Таким образом, можно считать надежно установленным существование в микромире взаимодействия, нарушающего t -обратимость. Фактически нам открылась совершенно новая грань знаний о мире, о времени и о пространстве. Все физические следствия этого еще предстоит прояснить.

На одно очень важное обстоятельство еще в 1967 г. обратил внимание А.Д.Сахаров [9], обдумывая первые факты по нарушению CP -четности (и следовательно, T -инвариантности) в распадах K_L . Оказывается, если одновременно справедливы два предположения: о нарушении барионного числа и о нарушении CP -четности в неравновесных системах (системах с нарушением детального баланса), то в процессах, разыгрывавшихся в ранней Вселенной, могло происходить преимущественное накопление барионов, т.е. возникла барионная асимметрия. Это произошло бы при естественном исходном допущении, что в момент Большого взрыва число барионов и антибарионов было одинаковым. С точки зрения наблюдательной астрономии существование барионной асимметрии материи можно считать достаточно хорошо установленным фактом по крайней мере для нашей Галактики и ее ближайшего галактического окружения. Данному факту на сегодня нет сколько-нибудь разумных объяснений, за исключением гипотезы, высказанной Сахаровым. Удивительным образом в этой гипотезе сошлись уже доказанная возможность существования T -неинвариантных процессов и предполагаемое нарушение барионного числа, обнаружить которое усиленно пытаются в последние годы. Возможно, наличие T -неинвариантных процессов в приро-

Литература

1. BABAR Collaboration. *Aubert B. et al. // Phys. Rev. Lett.* 2001. V.87. 091801.
2. BELLE Collaboration. *Abe K. et al. // Phys. Rev. Lett.* 2001. V.87. 091802.
3. *Wu C.S., Ambler E., Hayward R.W. et al. // Phys. Rev.* 1957. V.105. P.1413.
4. *Christenson J.H., Cronin J.W., Fitch V.L., Turlay R. // Phys. Rev. Lett.* 1964. V.13. P.138.
5. *Kobayashi M., Maskawa T. // Prog. Theor. Phys.* 1973. V.49. P.652.
6. *Cabibbo N. // Phys. Rev. Lett.* 1963. V.10. P.531.
7. *Carter A.B., Sanda A.I. // Phys.Rev.* 1981. V. D23. P.1567.
8. *Bigi I.I., Sanda A.I. // Nucl. Phys.* 1981. V.B193. P.85.
9. *Сахаров А.Д. // Письма в ЖЭТФ.* 1967. Т.5. С.32.