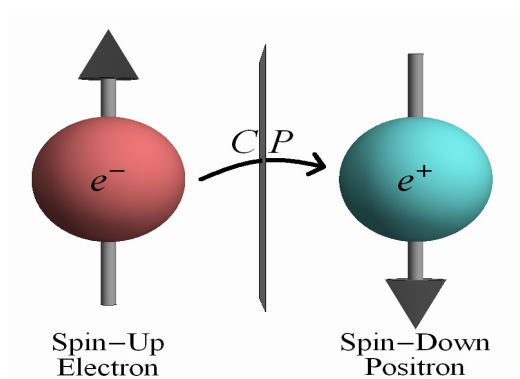


Нарушения фундаментальных симметрий в физике элементарных частиц. Эксперимент Belle (BelleII)

А.С.Кузьмин

ИЯФ СО РАН, ЛИФМ НГУ

Семинар, 23.12.2014



План

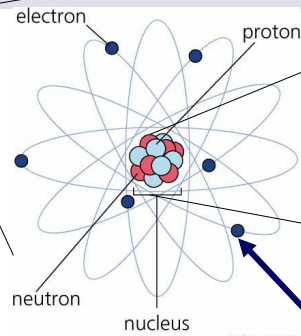
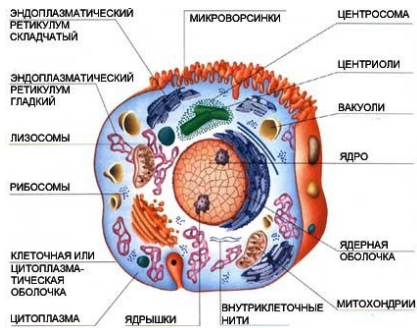
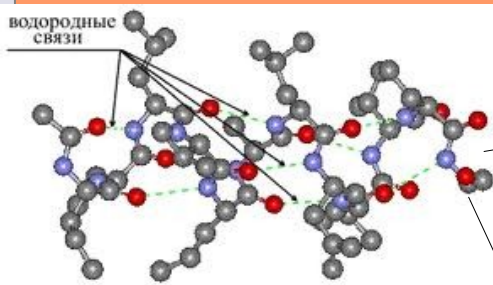
Стандартная модель и элементарные частицы

Симметрии в физике элементарных частиц

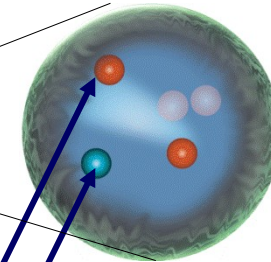
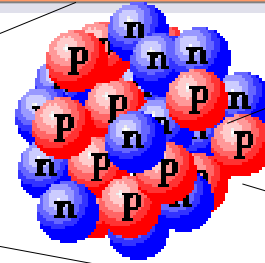
История изучения нарушения симметрии

Изучение элементарных частиц и нарушения симметрии (Belle и Belle II)

Элементарные частицы



Academy Artworks



Материя

электрон
кварки

частицы со спином $\frac{1}{2}$

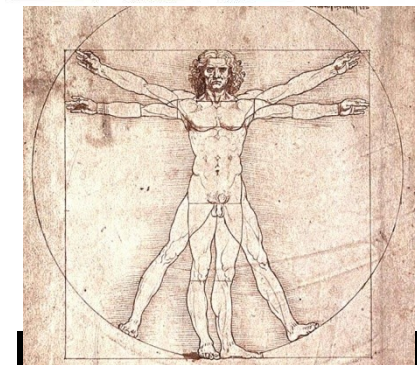
+ силы

(электромагнитная,
сильная, гравитационная,
слабая)

частицы со спином 1 (2)



3 поколения кварков и
лептонов



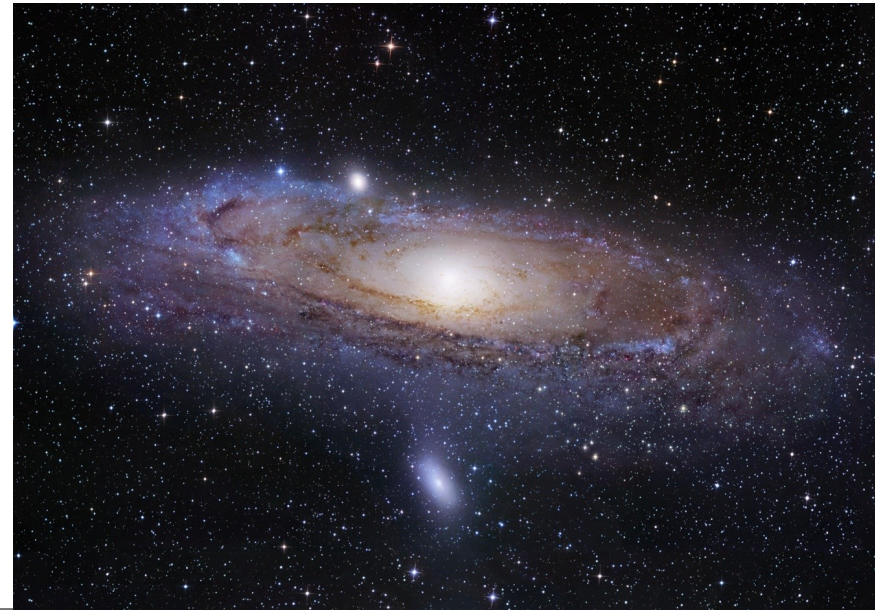
Симметрии

Непрерывные симметрии

Не существует выделенной точки пространства, направления, скорости движения или момента времени.

Каждой симметрии соответствует сохраняющаяся величина (E, P, M) (теорема Нетер)

Законы движения симметричны при трансляции ($x \rightarrow x+a$), но распределение вещества нарушает эту симметрию. Структуры, скорее всего, возникли в результате спонтанного нарушения симметрии в ранней Вселенной.



Симметрии

Дискретные симметрии

"Зеркальное" отображение: **Р-четность**:

$$\vec{R} \rightarrow -\vec{R}, t \rightarrow t, Q \rightarrow Q, \vec{P} \rightarrow -\vec{P}, \vec{M} \rightarrow \vec{M}$$

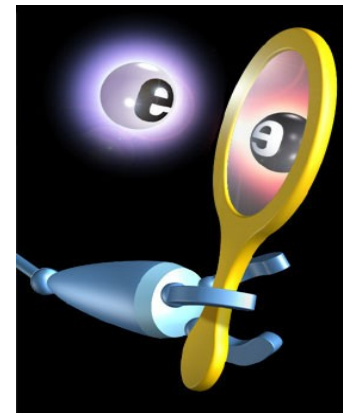
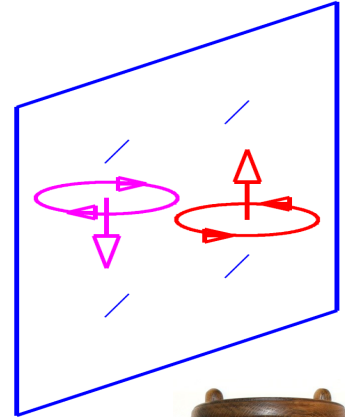
Разворот времени: **Т-четность**:

$$\vec{R} \rightarrow \vec{R}, t \rightarrow -t, Q \rightarrow Q, \vec{P} \rightarrow -\vec{P}, \vec{M} \rightarrow -\vec{M}$$

Зарядовое преобразование: **С-четность**:

$$\vec{R} \rightarrow \vec{R}, t \rightarrow t, Q \rightarrow -Q, \vec{P} \rightarrow \vec{P}, \vec{M} \rightarrow \vec{M}$$

В сильных и электромагнитных
взаимодействиях Р, С и Т сохраняется



Симметрии

Нарушение зеркальной симметрии

Оказывается, и живой мир нарушает зеркальную симметрию

- *Раствор винной кислоты поляризует свет (Луи Пастер, 1848)*
- *Раковины улиток почти всегда закручены по часовой стрелке*

Все аминокислоты L-типа (хотя можно синтезировать R-аминокислоты, и химически они ничем не отличаются от L)

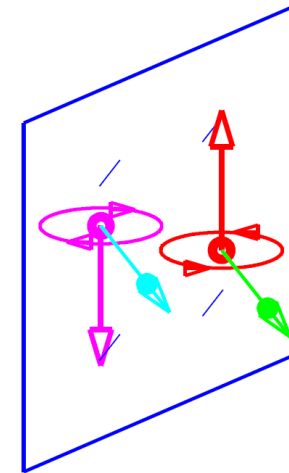
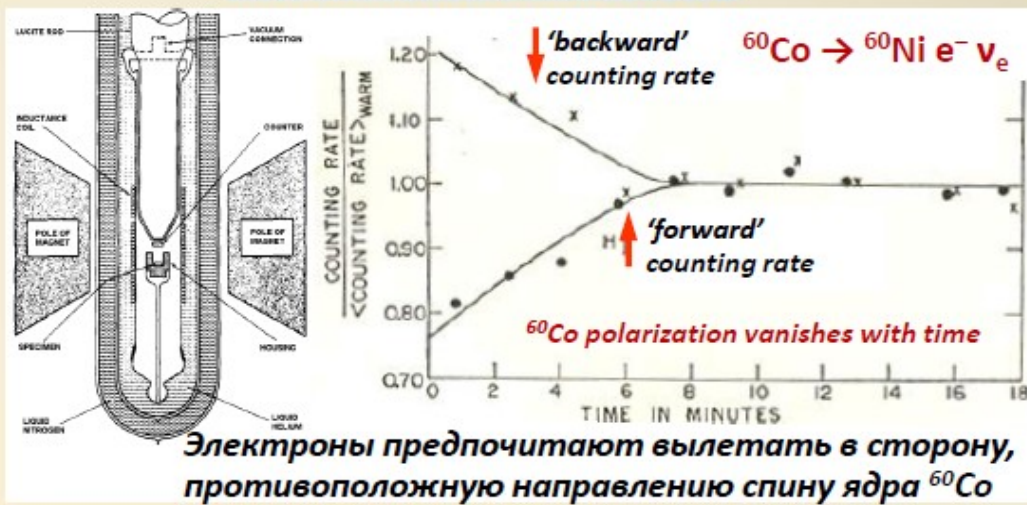
Почему?

Случайное возникновение только одного вида жизни, L-жизнь? Или что-то поучаствовало (или участвует) в формировании жизни?

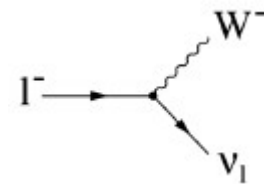
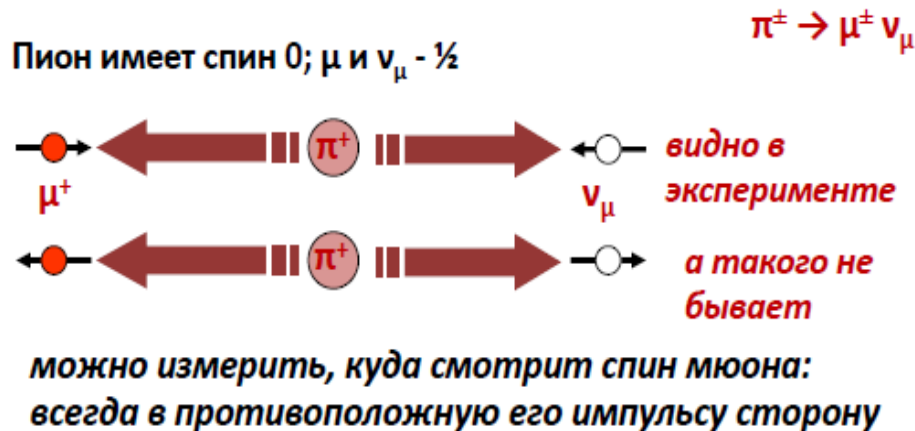


Нарушение Р-четности в слабых взаимодействиях

Эксперимент мадам Бу (1956)



Эксперимент Ледермана (1956)



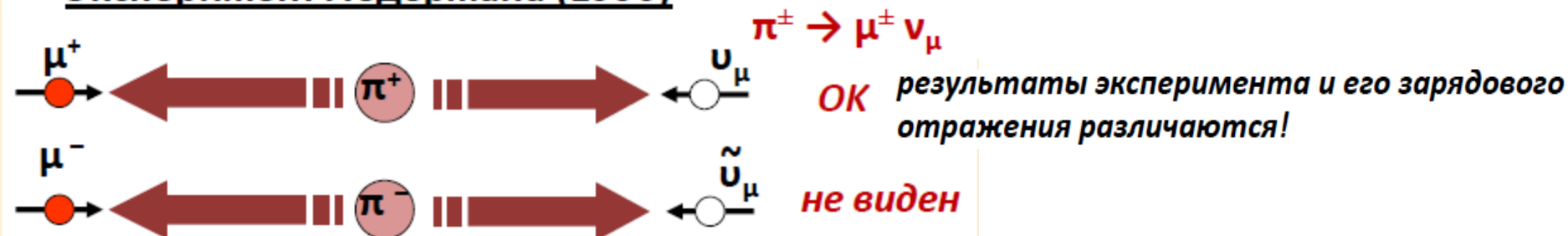
$$L = \frac{g}{\sqrt{2}} \bar{\psi}_L^u \gamma^\mu W_\mu \psi_L^d$$

Четность в слабых распадах нарушена максимально

Нарушение четности в слабых взаимодействиях

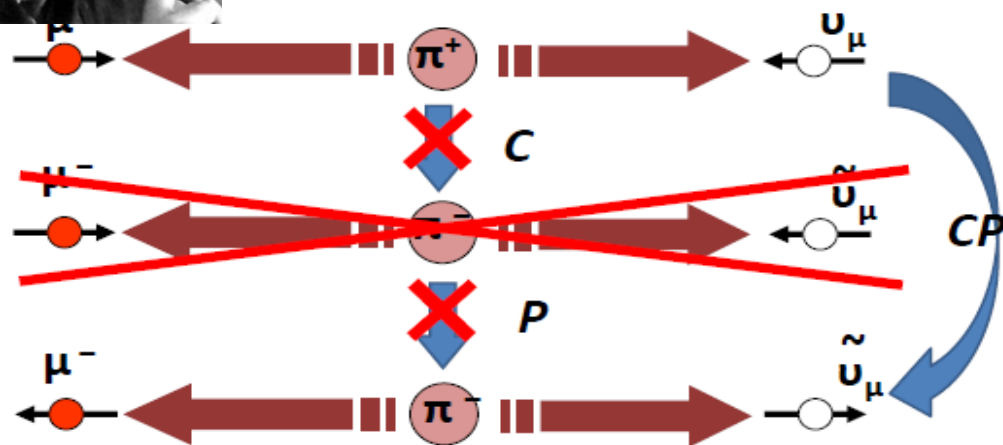
C-симметрия нарушена слабыми взаимодействиями, в точности как P

Эксперимент Ледермана (1956)



Комбинированная CP-симметрия

Л.Д. Ландау предложил комбинированную симметрию как средство восстановить симметрию между материей и антиматерией

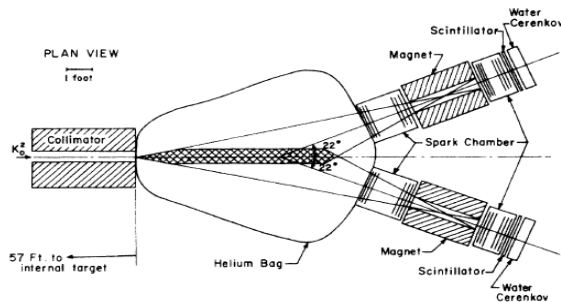


CP сохраняется!

НО...

CP-нарушение

В 1964 году В.Фитч, Д.Кронин, Д.Кристенсон и Р.Терли в распадах нейтральных K обнаружили нарушение CP



$$|K_1\rangle = (|K^0\rangle + |\bar{K}^0\rangle)/\sqrt{2}, \quad CP+$$

$$|K_2\rangle = (|K^0\rangle - |\bar{K}^0\rangle)/\sqrt{2}, \quad CP-$$

$$K_2(CP-) \rightarrow \pi^+\pi^-(CP+)$$

$$(2.0 \pm 0.4) \times 10^{-3}$$

Более 30 лет CP нарушение $\sim 10^{-3}$ наблюдалось лишь в системе нейтральных каонов.

Казалось бы очень мало, но...

это необходимо для существования вселенной

А.Д. Сахаров, 1968



Для существования Вселенной нужно:
нарушение CP симметрии
+ несохранение барионного числа
+ тепловое неравновесие

CP-нарушение

Почему CP нарушается? Как ввести нарушение в теорию?

Механизм введения нарушения CP был предложен Кабаяши и Маскава в 1973 году



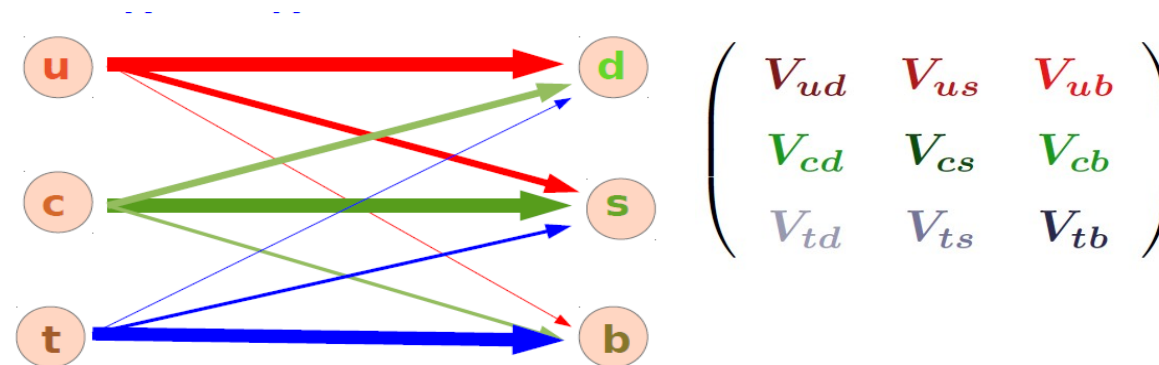
Это возможно при наличии трех поколений кварков

В электромагнитных и сильных взаимодействиях тип (аромат) кварков не меняется.

Заряженные токи слабых взаимодействий переводят верхние кварки в нижние и наоборот.

В основном переходы происходят между кварками одного поколения, но есть небольшая вероятность переходов в другие поколения, которая описывается матрицей смешивания.

Для 2-х поколений смешивание было введено Н.Кабибо. В 1973 году Кабаяши и Маскава обнаружили, что для случая 3-х поколений коэффициенты могут содержать комплексную константу, которая даст нарушение CP.



$$\begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix}$$

Унитарная матрица описывается
 N^2 реальными параметрами.
2N-1 фаз волновых функций кварков
(1 общая фаза)

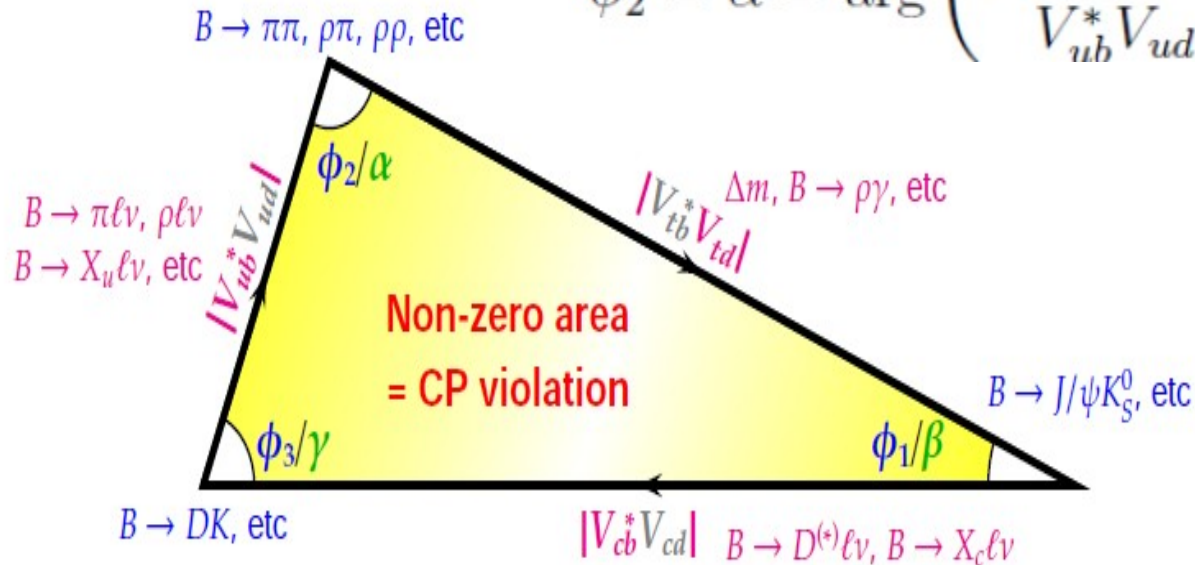
$$N^2 - 2N + 1 = (N-1)^2$$

для N=3 ->
4 параметра 3 угла и одна фаза

CP-нарушение

$$V_{ud}V_{ub}^* + V_{cd}V_{cb}^* + V_{td}V_{tb}^* = 0$$

$$\phi_2 = \alpha = \arg \left(-\frac{V_{tb}^* V_{td}}{V_{ub}^* V_{ud}} \right)$$



$$\phi_3 = \gamma = \arg \left(-\frac{V_{ub}^* V_{ud}}{V_{cb}^* V_{cd}} \right)$$

$$\phi_1 = \beta = \arg \left(-\frac{V_{cb}^* V_{cd}}{V_{tb}^* V_{td}} \right)$$

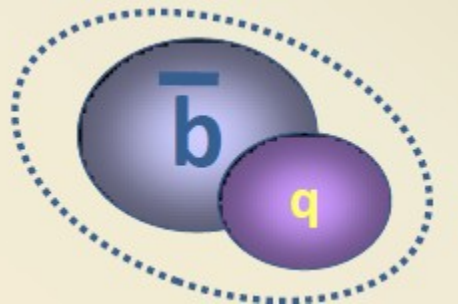
Модель предсказывает большое CP-нарушение в распадах b-кварка

Для проверки предсказания требовался эксперимент с B-мезонами.

KEKB

- Что такое В-мезоны?

- $B^0 = d \bar{b}$
- $B^+ = u \bar{b}$
- время жизни $1.5 \times 10^{-12} \text{ s}$
- $e^+e^- \rightarrow \Upsilon(4S) \rightarrow B \bar{B}$



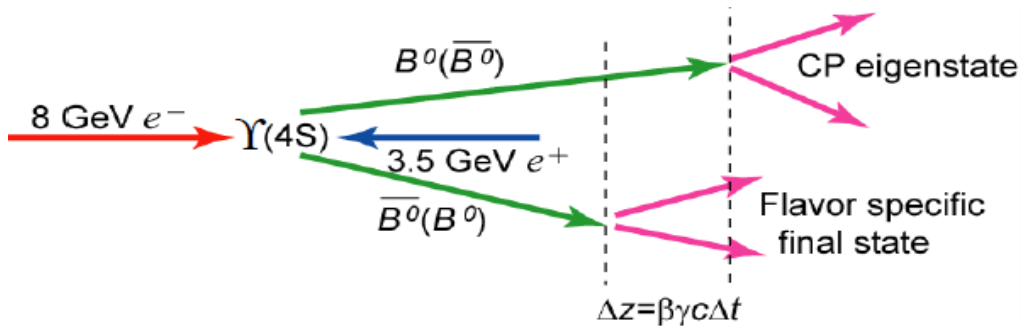
В 1994 году в КЕК началось сооружение коллайдера КЕКВ

8 ГэВ e^- 3.5 ГэВ e^+

Надо было решить много проблем

-светимость $10^{34} \text{ см}^{-2}\text{s}^{-1}$ (~100 раз выше чем у существующих на тот момент)

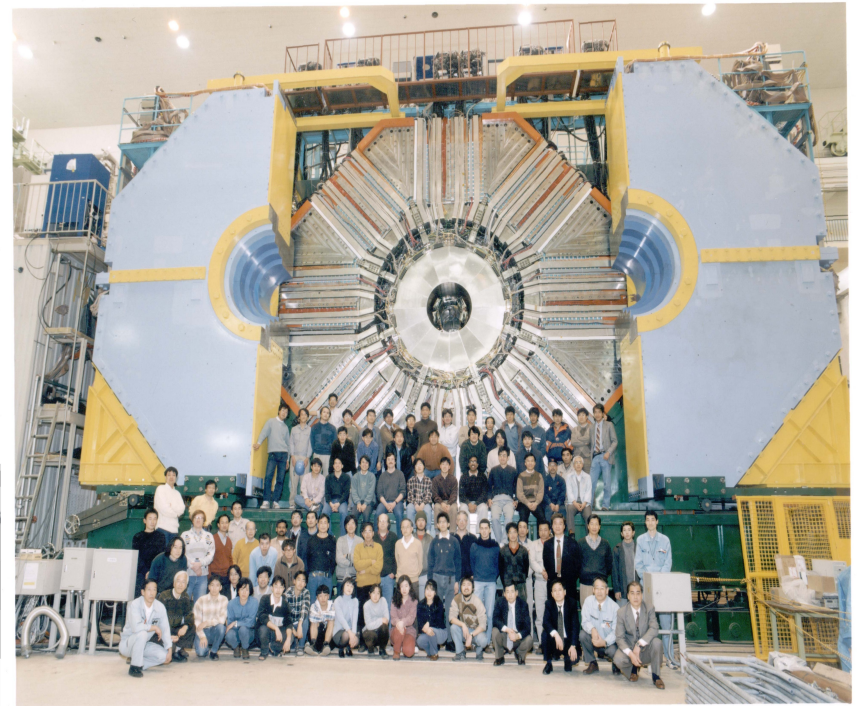
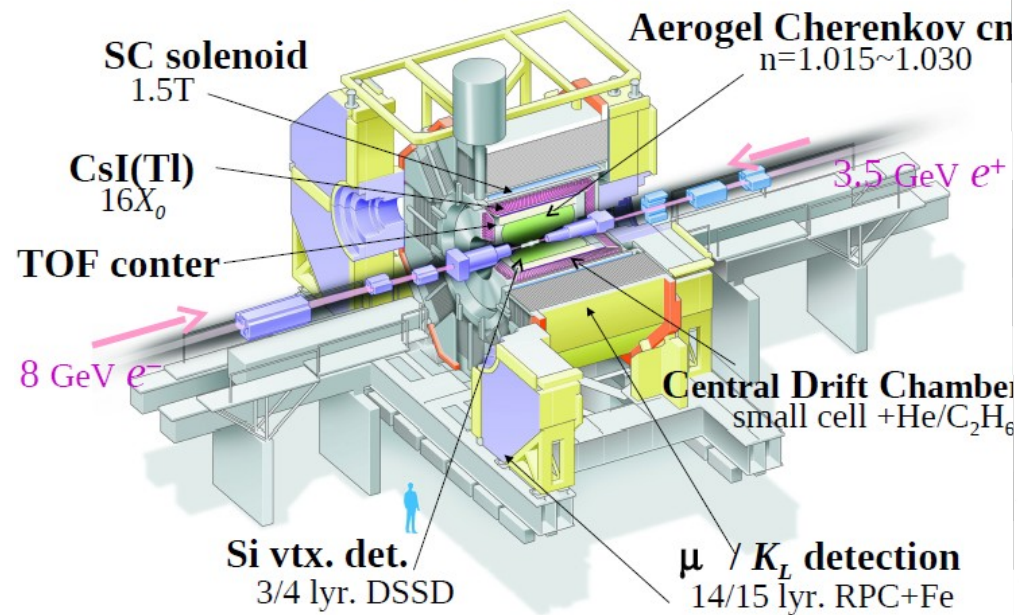
-сделать ассиметричными столкновения



Belle

Для проведения эксперимента в 1995 году был разработан проект и началось сооружение детектора Belle. Детектор был готов в 1999 году.

Belle Detector



Одновременно в СЛАК шел запуск детектора BaBar



The *Belle* Collaboration

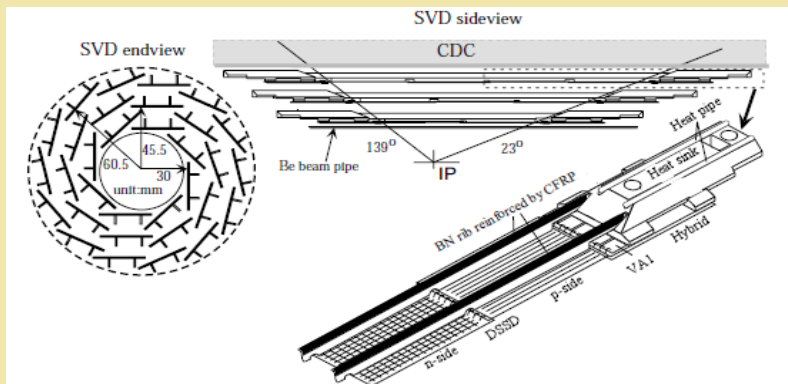


15 countries, 64 institutes, ~400 collaborators

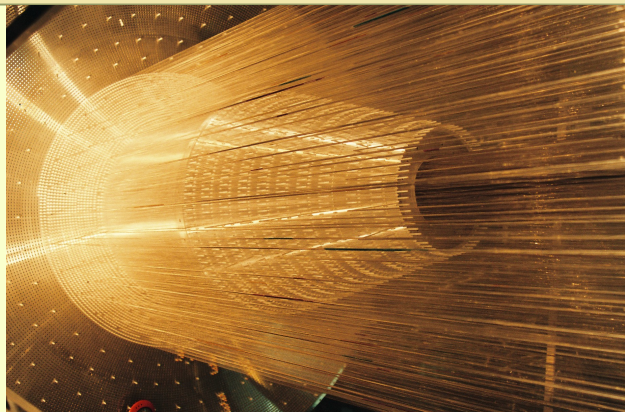
(as of Aug. 2011)

Трековая система

Вершинный детектор

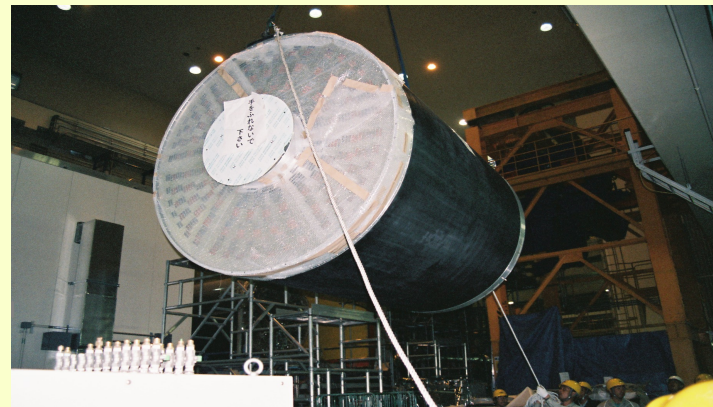
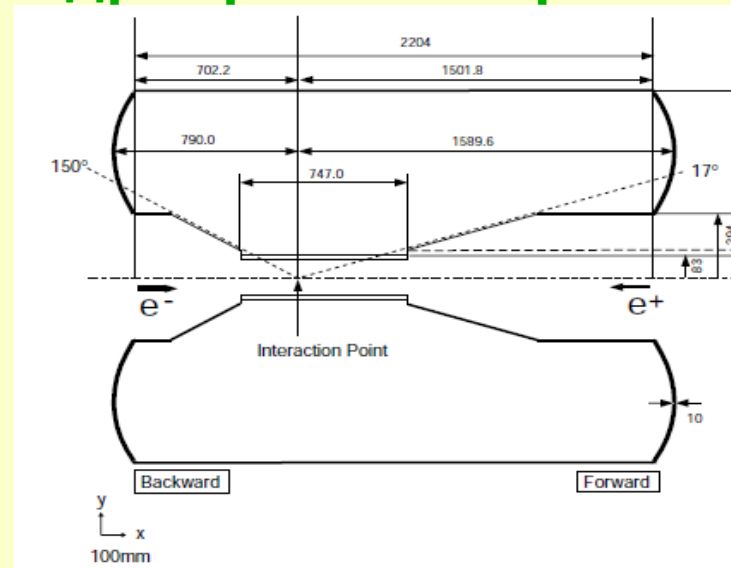


- 3(4) слоя Двухкоординатных кремниевых детекторов (DSSD)
- точность восстановления вершины 30-50μm



-около 10 тысяч сигнальных проволочек
В магнитном поле 1.5 Тесла.

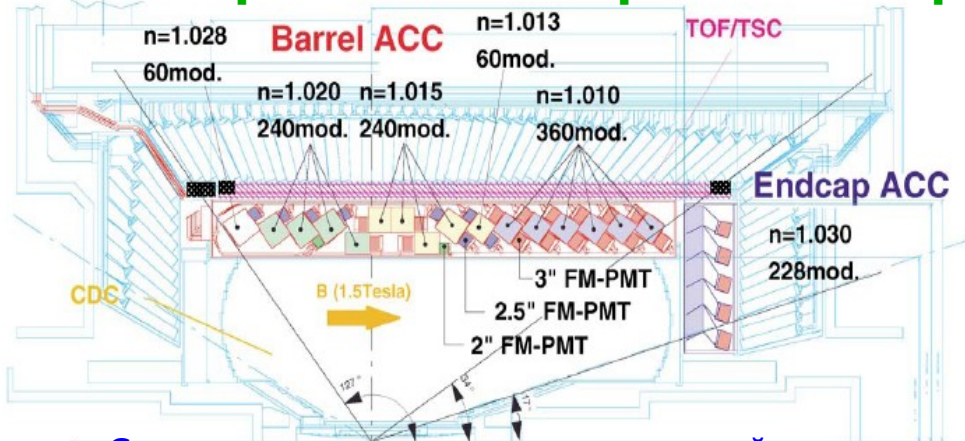
Дрейфовая камера



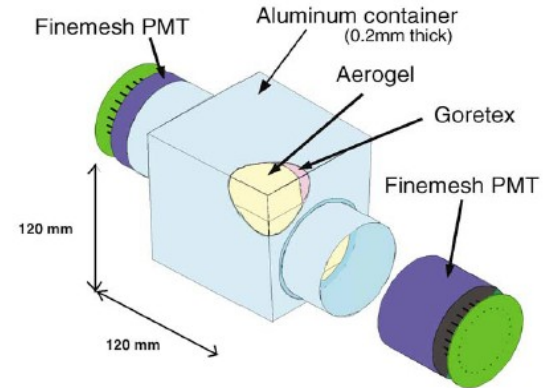
$$\left(\frac{\sigma_{p_t}}{p_t}\right)^2 = (0.0019p_t)^2 + 0.0034^2$$

Система идентификации частиц

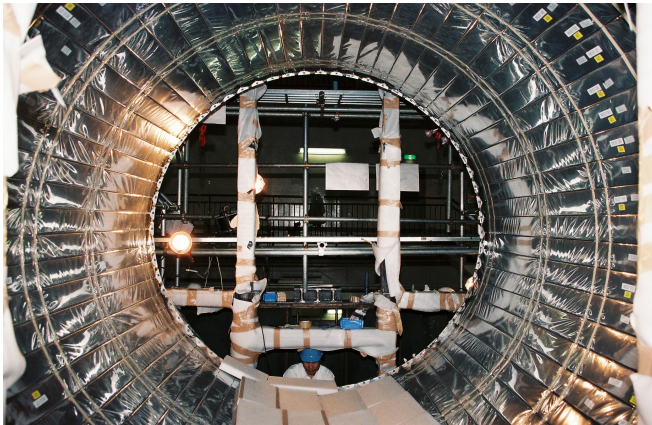
Аэрогелевые пороговые черенковские счетчики



Сигнал когда скорость заряженной частицы превышает скорость света в среде

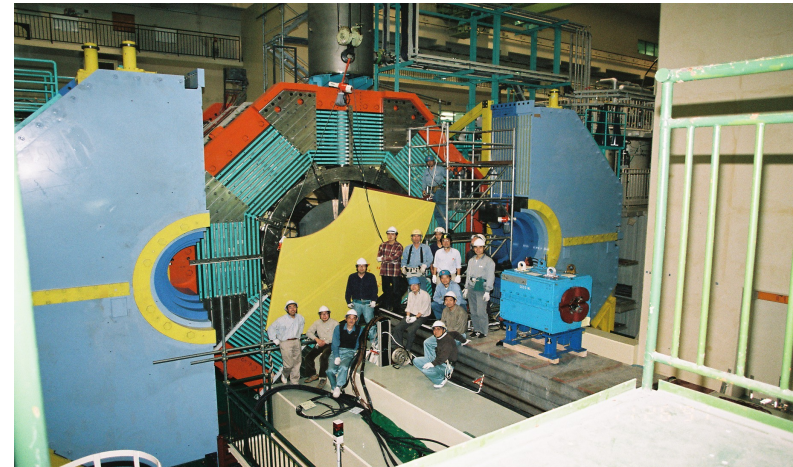


Времяпролетные счетчики



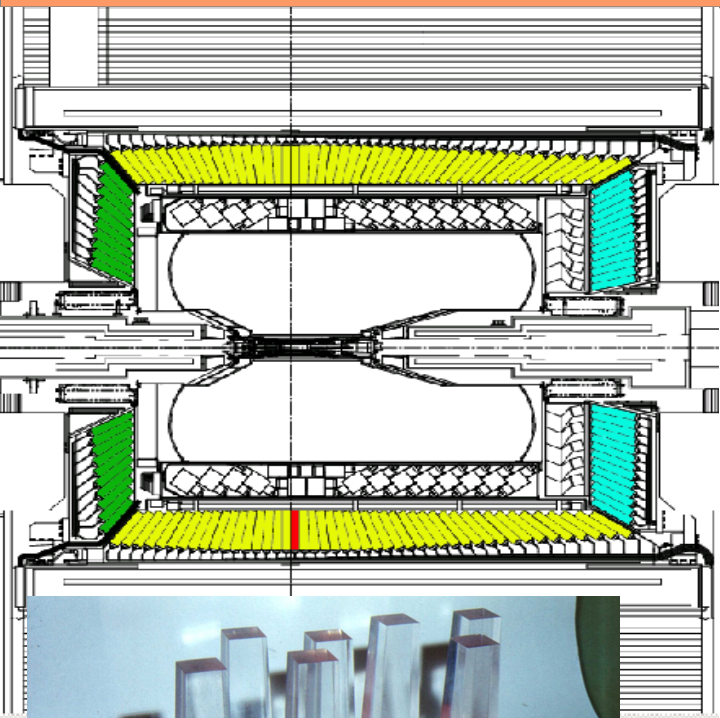
Точность измерения времени 90 пс

Пробежная система

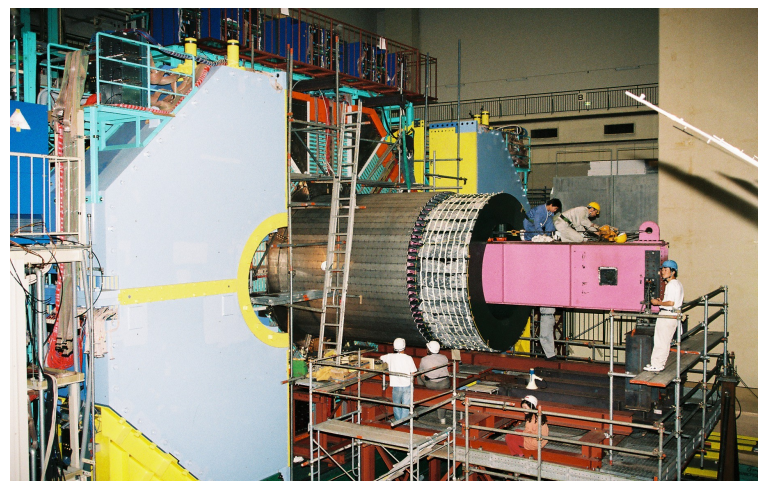
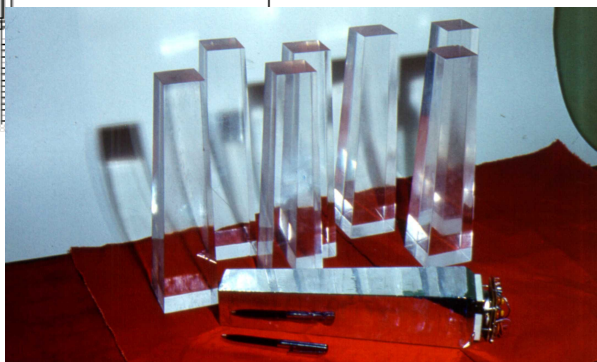


Регистрация μ и K_L

Калориметр



- Кристаллы CsI(Tl) 30x(5-8)x(5-8) см
- Регистрация света п/п фотодиоды (2x1 см)x2
- Световыход 5000 ф.э./МэВ
- 8736 счетчиков (40 тон CsI(Tl))
- Энергетическое разрешение 1.4% для 1 ГэВ



Российская команда работала в группе электромагнитного калориметра с 1994 года, как на этапе разработки, так и на этапе изготовления

Более 6 тыс. счетчиков CsI(Tl) были изготовлены в ИЯФ в Новосибирске. Команда инженеров электронщиков принимала участие в разработке электроники калориметра.

Наблюдение CP-нарушения

Система В-антиВ мезонов в распадах $\Upsilon(4S)$ рождается в когерентном состоянии

В(антиВ) не имеют определенной массы

Массовые состояния определенные комбинации В-антиВ

$$|B_L\rangle = p|B^0\rangle + q|\bar{B}^0\rangle, \quad m_L$$

$$|B_H\rangle = p|B^0\rangle - q|\bar{B}^0\rangle, \quad m_H$$

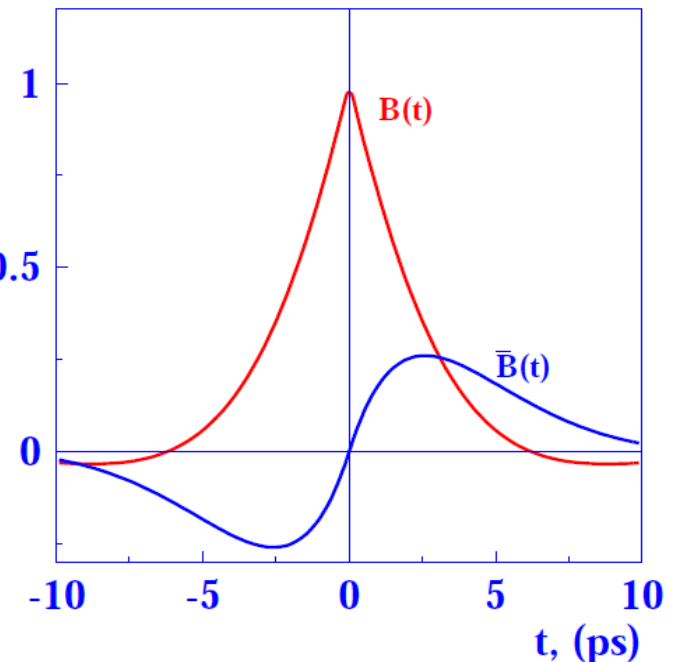
$$\Delta m = 0.507 \pm 0.004 \text{ ps}^{-1}$$

$$\tau = 1/\Gamma = 1.519 \pm 0.007 \text{ ps}$$

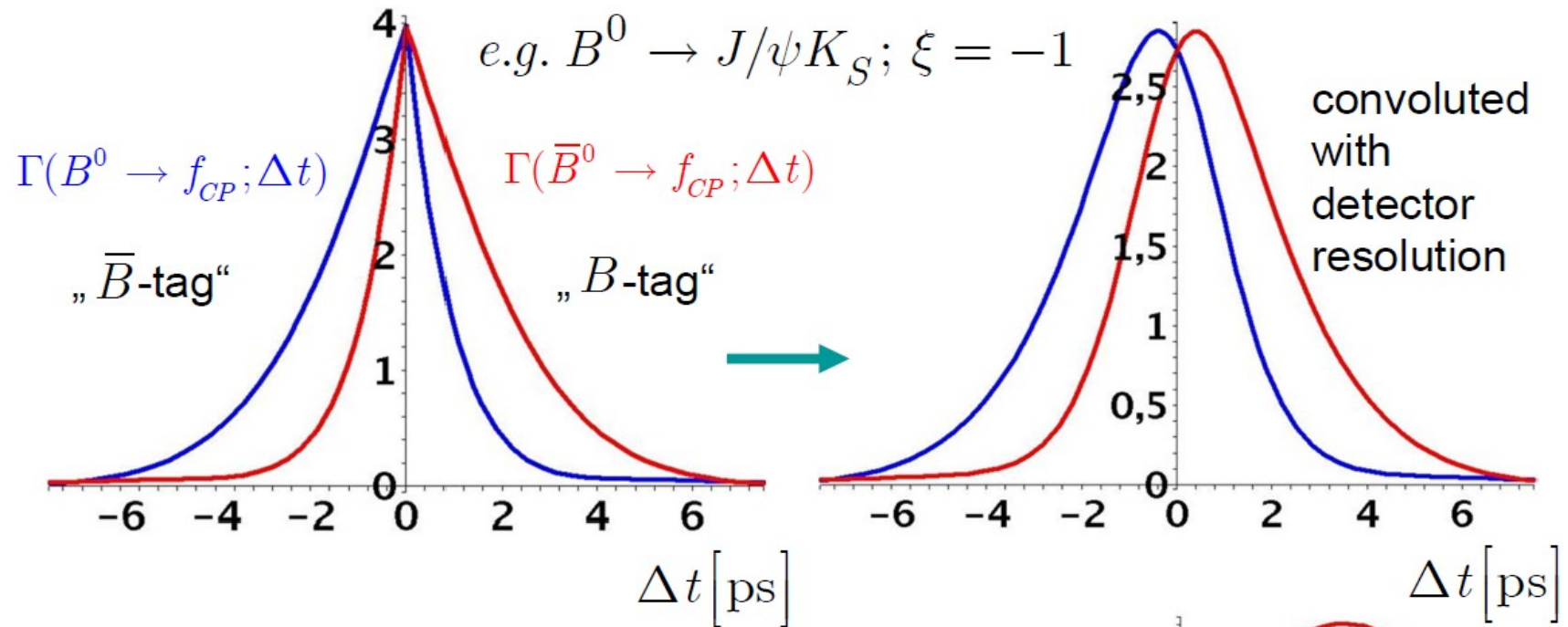
$$|B(t)\rangle = (|B^0\rangle \cos(\Delta m t/2) + q/p|\bar{B}^0\rangle \sin(\Delta m t/2))e^{-\Gamma t/2}e^{-i\Delta E t/2}$$

$$|\bar{B}(t)\rangle = (p/q|B^0\rangle \sin(\Delta m t/2) + |\bar{B}^0\rangle \cos(\Delta m t/2))e^{-\Gamma t/2}e^{i\Delta E t/2}$$

Если В и антиВ распадаются в одно и тоже конечное состояние — мы наблюдаем интерференцию



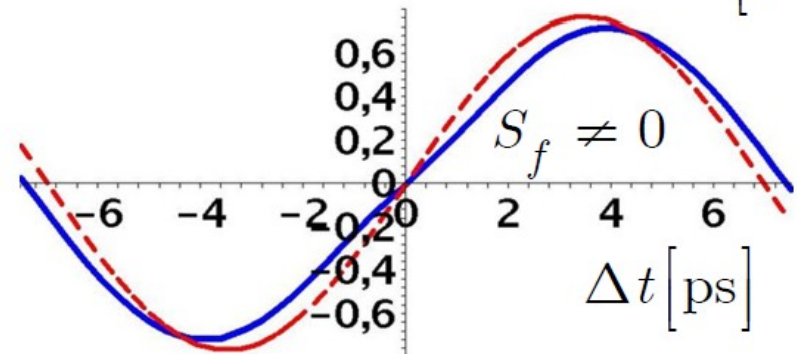
Наблюдение CP-нарушения



$$\mathcal{A}_{CP}(\Delta t) = \frac{N(\bar{B}^0, \Delta t) - N(B^0, \Delta t)}{N(\bar{B}^0, \Delta t) + N(B^0, \Delta t)}$$

$$= A_f \cos \Delta M \Delta t + S_f \sin \Delta M \Delta t$$

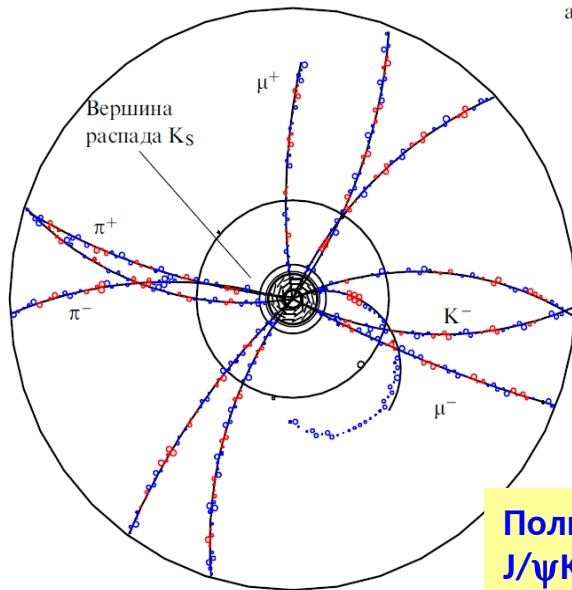
No direct CP violation: $A_f = 0$



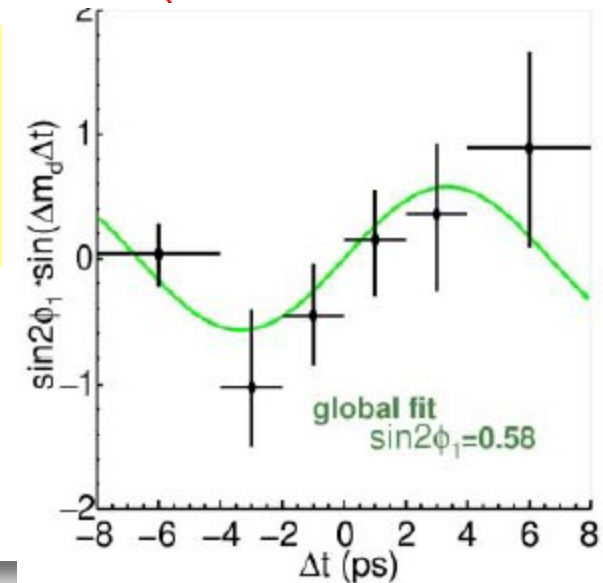
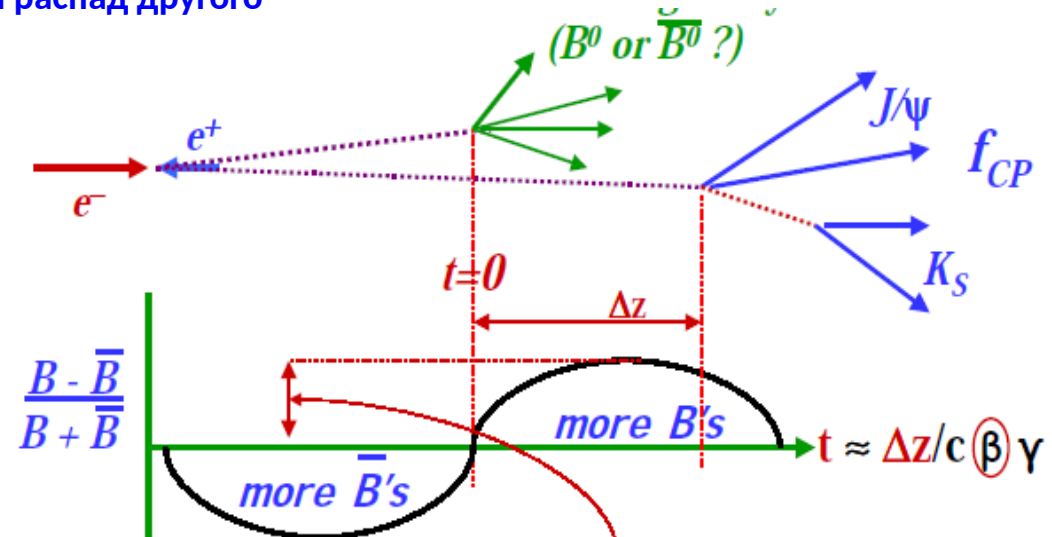
Наблюдение CP-нарушения

ϕ_1 / β from $B \rightarrow J/\psi K_S^0$

Рождается пара В анти-В. Регистрируем и определяем тип одного и смотрим распад другого



Полные вероятности распада В и антиВ в $J/\psi K_S^0$ одинаковы, но наблюдается разная зависимость от времени



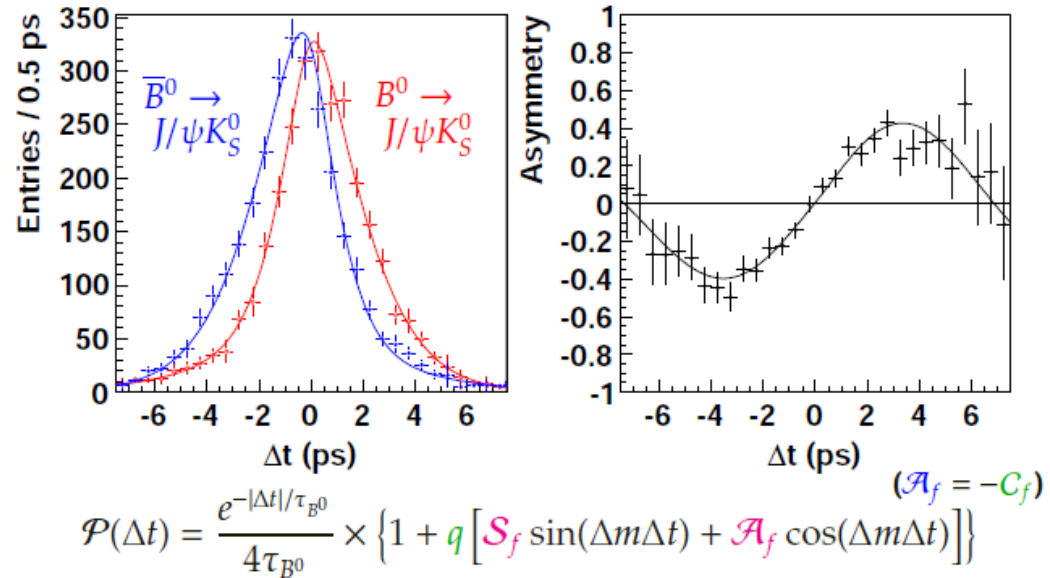
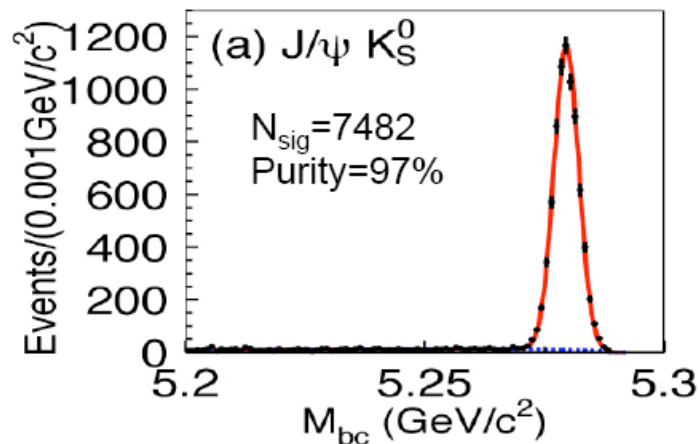
Первый результат по наблюдению CP-нарушения в распадах В был получен в 2001 году на наборе данных в 100 млн. пар В-антиВ-мезонов

Наблюдение CP-нарушения

Ситуация измерением CP-нарушения на сегодняшний день

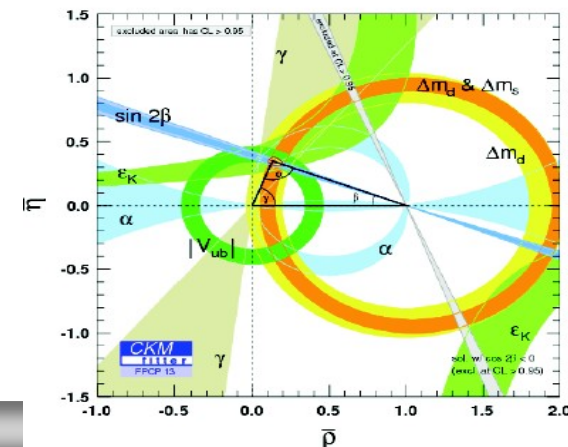
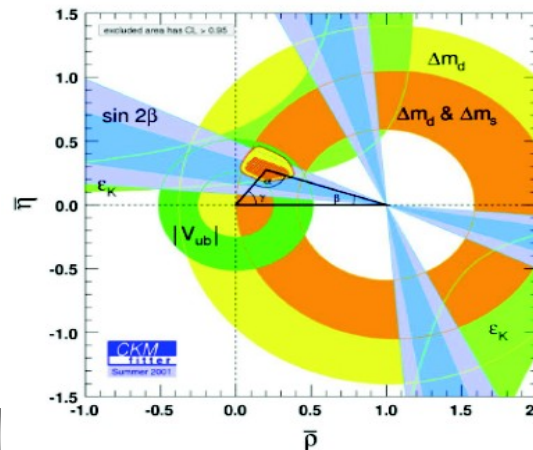
$$\phi_1 / \beta \text{ from } B \rightarrow J/\psi K_S^0$$

Belle 772 M $\bar{B}\bar{B}$ PRL 108, 171802 (2012)



EPS 2001

FPCP2013



$$\phi_1 = (21.4 \pm 0.8)^\circ$$

$$\phi_2 / \alpha = (88.7^{+4.6}_{-4.2})^\circ$$

$$\phi_3 / \gamma = (66 \pm 12)^\circ$$

Нобелевская премия по физике 2008



Кобаяши, Маскава, Намбу



Основные результаты Belle

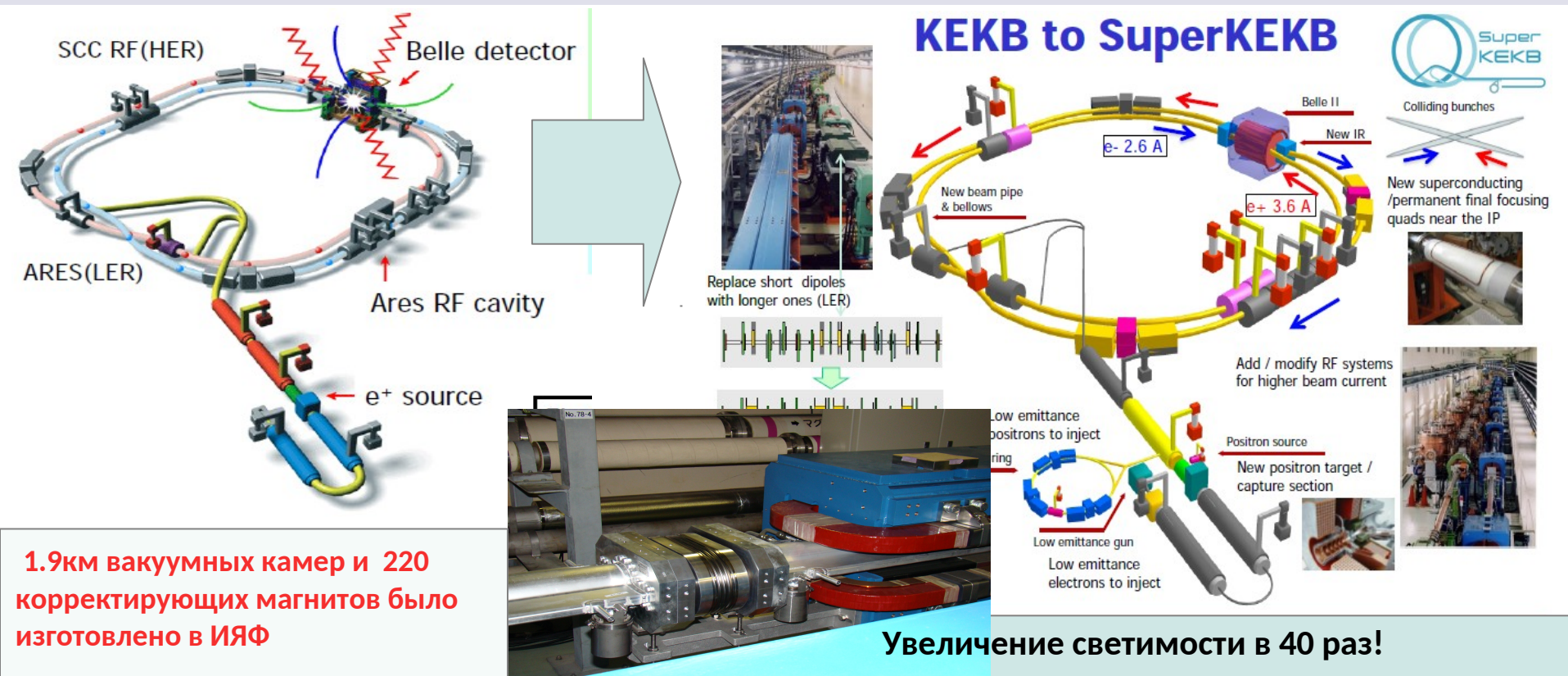
- **Первое наблюдение нарушения CP в распадах B-мезонов.**
- **Измерение параметров СКМ матрицы и углов треугольника унитарности.**
- **Наблюдение смешивания D-мезонов.**
- **Открытие новых адронов. Более 20 новых частиц было открыто на Belle (включая экзотические состояния $Y(3872)$, четырехкварковые состояния чармония и боттомония).**
- **Измерение редких мод распада B, D-мезонов и τ -лептона.**
- **Поиск новой физики за пределами стандартной модели.**

Более 380 публикаций

N	Title	Year	Cites
1	X(3872)	2003	816
2	Large CPV	2001	668
3	$B \rightarrow X_s \gamma$	2001	392
4	CP in $B^0 \bar{B}^0$	2002	366
5	Y(3945)	2005	314
6	D^0 mixing	2007	305
7	$B \rightarrow \tau \nu$	2006	291
8	$2(\bar{c})$	2002	282
9	$b \rightarrow s \gamma$	2004	277
10	Z(4430)	2008	264
11	D_{sJ}	2006	263
12	D^{**}	2004	256

Citations	50-99	100-249	250-500	>500	Total
Papers	89	48	10	2	149

Модернизация КЕКВ



Энергия: 3.5 ГэВ (e^+) 8 ГэВ (e^-)
Ток: 1.6 А 1.2 А
Угол пересечения/2: 11 мрад
Светимость: $2.1 \times 10^{34} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$

Энергия: 4 ГэВ (e^+) 7 ГэВ (e^-)
Ток: 3.6 А 2.6 А
Угол пересечения/2: 41 мрад
Светимость: $8 \times 10^{35} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$

Belle II

Основная задача Belle II -- поиск проявления новой физики за счет проведения прецизионных измерений

Необходимо больше данных, детектор с улучшенными характеристиками, способный работать в условиях больших фоновых загрузок и хорошая команда квалифицированных физиков

Начало набора экспериментальных данных 2016 год



Более 600 участников

Belle II

Новая пробегная система на основе
сцинтилляционных пластин в торцах и внутренних
слоях цилиндрической части

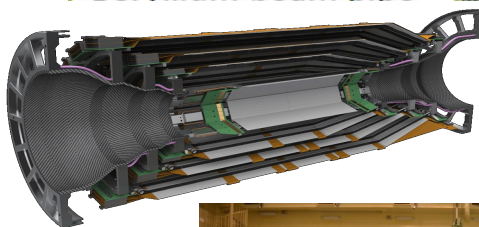
ИТЭФ

Новая электроника калориметра с анализом формы
сигнала и определением Амплитуды и времени.

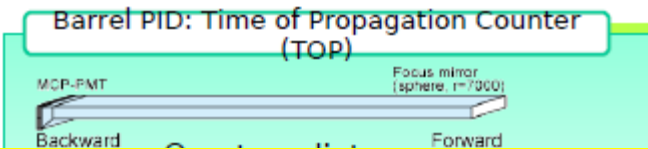
2-я очередь замена торцевых счетчиков на чистый CsI

ИЯФ(СОРАН)

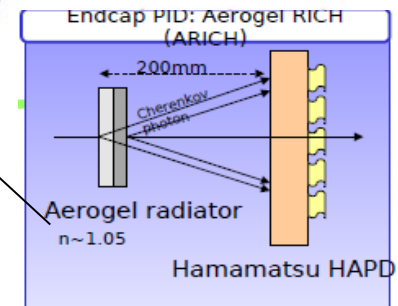
Вершинный детектор
2+4 слоя п/п счетчиков



Новая дрейфовая камера
(больше предыдущей)



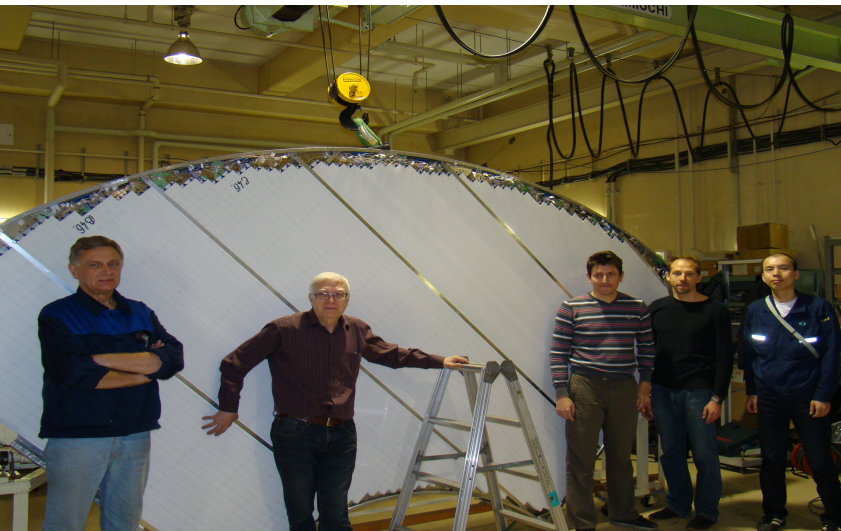
Система идентификации:
Кварцевые пластины с регистрацией
координаты и времени фотонов



Аэрогельные счетчики с регистрацией
колец черенковского излучения

Belle II

Работы на пробежной системе



Работы на калориметре



Заключение

- Фундаментальные симметрии играют очень важную роль в физике
- Эксперимент Belle позволил обнаружить нарушение комбинированной CP симметрии в системе, отличной от системы K-мезонов, и измерить параметры этого нарушения
- Эксперимент Belle II на порядок улучшит точность измерения параметров CP и, возможно, позволит наблюдать явления за пределами стандартной модели

СПАСИБО!

КЕК

1971 Основана Национальная лаборатория по физике высоких энергий(КЕК).

-1976-2009 Протонный синхротрон PS (12 ГэВ).

-1986-1995 Электрон-позитронный коллайдер TRISTAN (30 ГэВ).

-1997 КЕК Исследовательская организация ускорителей высоких энергий

-1999-2010 В-фабрика КЕКВ и эксперимент Belle

-1999-2005 Эксперимент по изучению осцилляций нейтрино K2K

-2006 Открыт новый кампус JPARC-центр с протонным ускорителем 30 ГэВ

-2010- Эксперимент по изучению осцилляций нейтрино T2K

-2016- Супер КЕКВ и эксперимент BelleII

