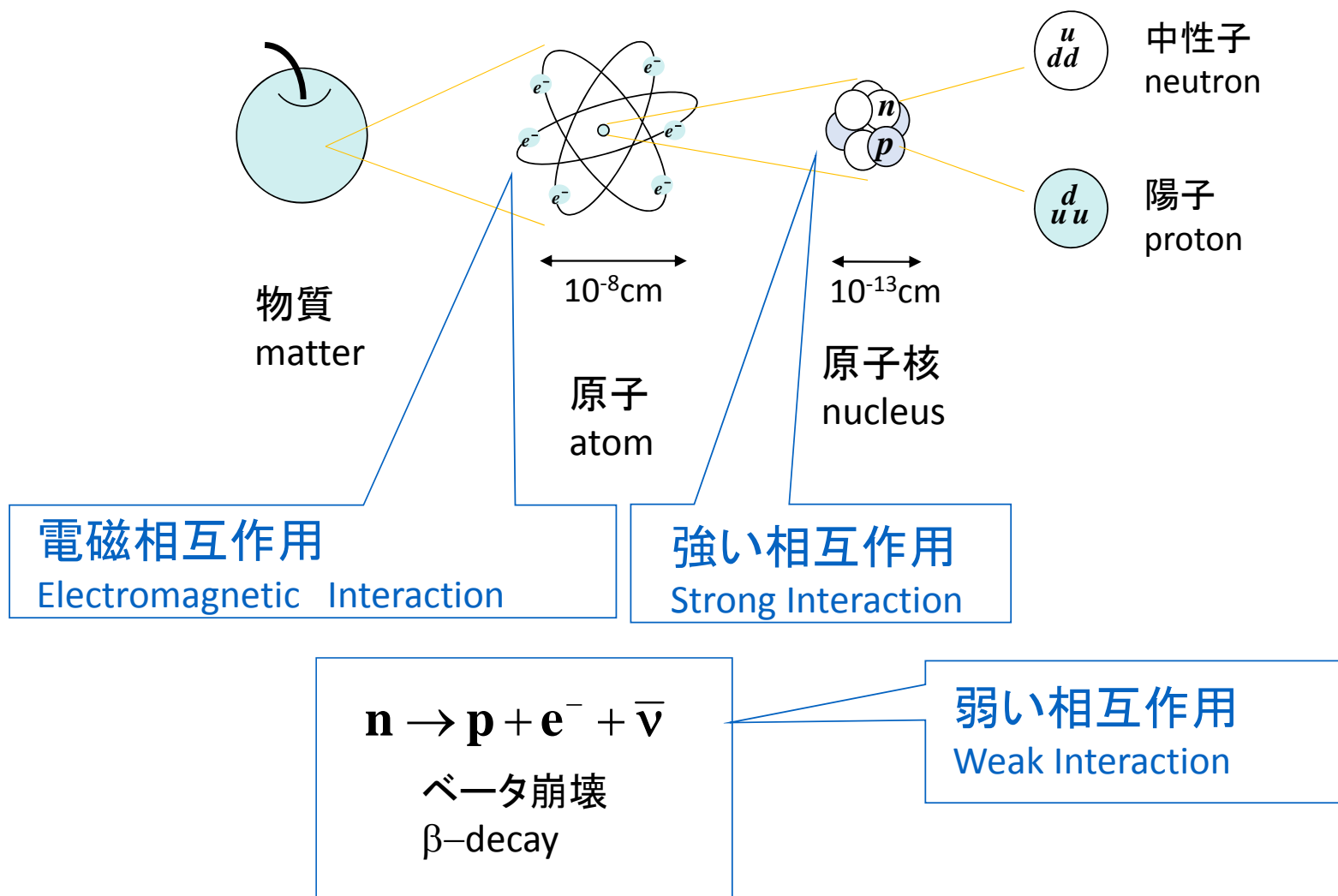


2015/07/09  
城西大学

# 反物質 —素粒子から宇宙まで—

小林 誠

# 物質の構造 (Structure of Matter)



## 反粒子 (Antiparticles)

電子 (electron)  $e^-$   $\Leftrightarrow$  陽電子 (positron)  $e^+$

陽子 (proton)  $p$   $\Leftrightarrow$  反陽子 (antiproton)  $\bar{p}$

中性子 (neutron)  $n$   $\Leftrightarrow$  反中性子 (antineutron)  $\bar{n}$

すべての粒子には対応する反粒子が存在

- 同じ質量
- 電荷の符号は反対

1928 ディラック方程式

1932 陽電子の発見

1955 反陽子の発見

## 对消滅 (pair annihilation)

$$e^{-} + e^{+} \rightarrow \gamma + \gamma$$

$$p + \bar{p} \rightarrow \pi + \pi + \dots$$

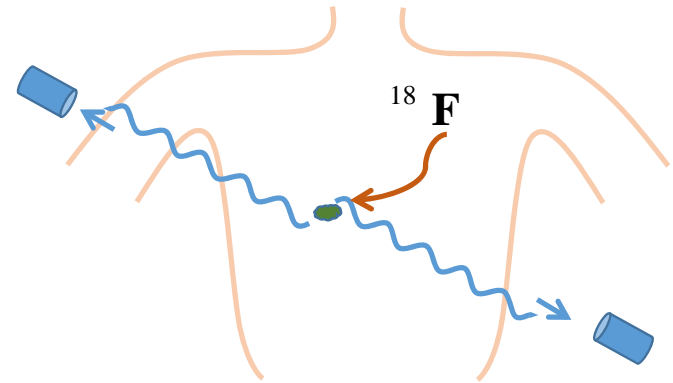
$$E = mc^2$$

## 对生成 (pair creation)

$$\gamma + \gamma \rightarrow e^{+} + e^{-}$$

$$p + p \rightarrow p + p + p + \bar{p}$$

PET



## CP対称性 (CP symmetry)

自然法則が粒子と反粒子に対して本質的に同じ

C : 荷電共役変換 (charge conjugation)

P : パリティ変換〔空間反転〕 (parity transformation [space inversion])

CP : C と P を同時に行う変換

1956 パリティの破れの発見

→ C も同時に破れているが、CP対称

## CPの破れ (CP violation) の発見

1964 クローニン、フィッチ (Cronin, Fitch et al)

$$\mathbf{K}_L \rightarrow \pi^+ + \pi^-$$

$$|\mathbf{K}_L\rangle = \mathbf{p} |\mathbf{K}^0\rangle + \mathbf{q} |\bar{\mathbf{K}}^0\rangle$$

$$|\mathbf{p}| \neq |\mathbf{q}| \Rightarrow \mathbf{CP\ violation}$$

## クォーク模型 (Quark Model)

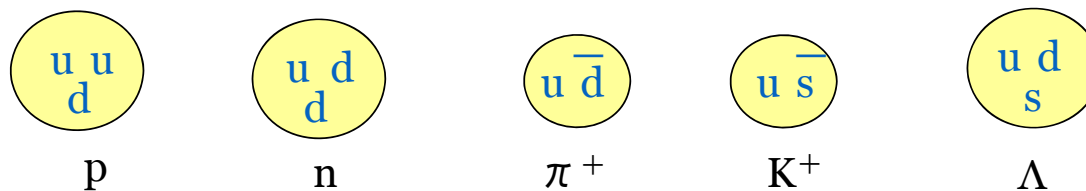
陽子 p      中性子 n      パイ粒子  $\pi^+ \pi^- \pi^0$   
K粒子  $K^+ K^- K^0 \bar{K}^0$   
ラムダ粒子  $\Lambda$       シグマ粒子  $\Sigma^+ \Sigma^- \Sigma^0$

ハドロン (hadron): 強い相互作用をする粒子

1964 ゲルマン (Gell-Mann)

クォーク u d s

$2/3e$   $-1/3e$   $-1/3e$



1905 特殊相対性理論  
1925 量子力学



場の量子論 (quantum field theory)

相互作用の効果の計算を進めると



発散の困難

1947 朝永・シュヴィンガー・ファインマン (Tomonaga-Schwinger-Feynman)

電磁相互作用の繰り込み理論 (renormalization theory)



発散を回避する計算手法

強い相互作用や弱い相互作用にはそのまま適用できない

相互作用の種類

- 強い相互作用
- 電磁相互作用
- 弱い相互作用



1971 トフーフト 一般化されたゲージ理論の繰り込み理論

→ ワインバーグ・サラム・グラシヨー理論  
電磁相互作用、弱い相互作用を統一的に記述

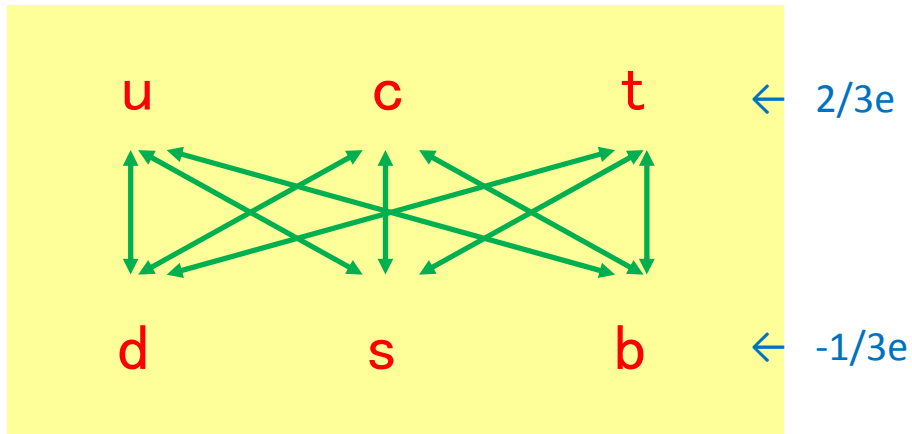
1973 小林, 益川

CP の破れをいかにこの枠組みで説明するか

分かったこと

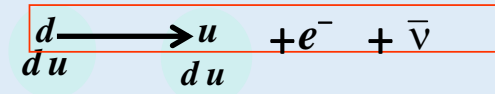
- 3 ~ 4 種のクォークの最小の系では不可能
- 未知の粒子が存在する
- 一つの可能性として 6 クォーク模型

## クォークが6種の時



### 中性子のβ崩壊

中性子  $\rightarrow$  陽子 + 電子 + 反ニュートリノ



混合行列 (CKM行列)

$$V_{\text{CKM}} = \begin{bmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{bmatrix}$$

$V_{\text{CKM}}$  はユニタリ行列

$V$  は複素数、その大きさが各遷移の強さを表す

## B ファクトリー

$$e^{-} + e^{+} \rightarrow B_d + \bar{B}_d$$

- ・電子・陽電子衝突型加速器
- ・B中間子を工場のように大量に作る
- ・電子と陽電子のエネルギーが異なる非対称型

### B中間子



## KEK(つくば)とSLAC(米国)に建設

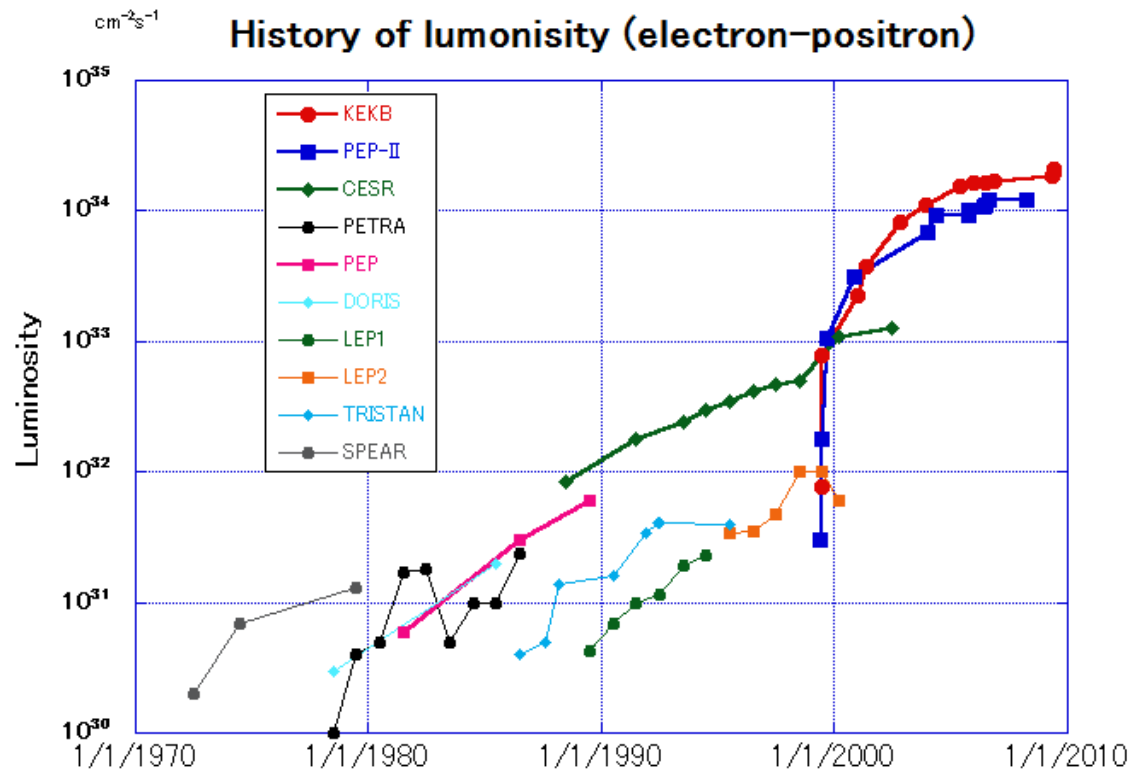
- 1994 建設開始
- 1999 実験開始
- 2001 実験的検証に成功





KEKB  $L = 2.1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$

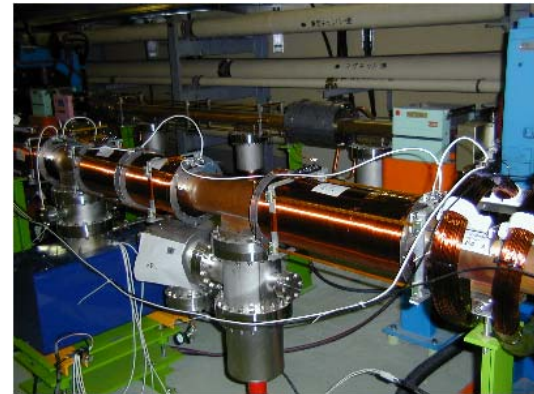
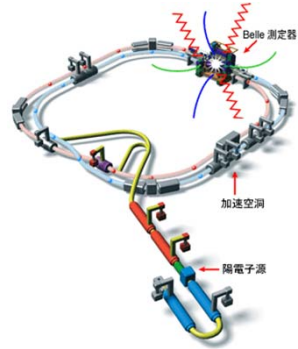
PEP-II  $L = 1.2 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$



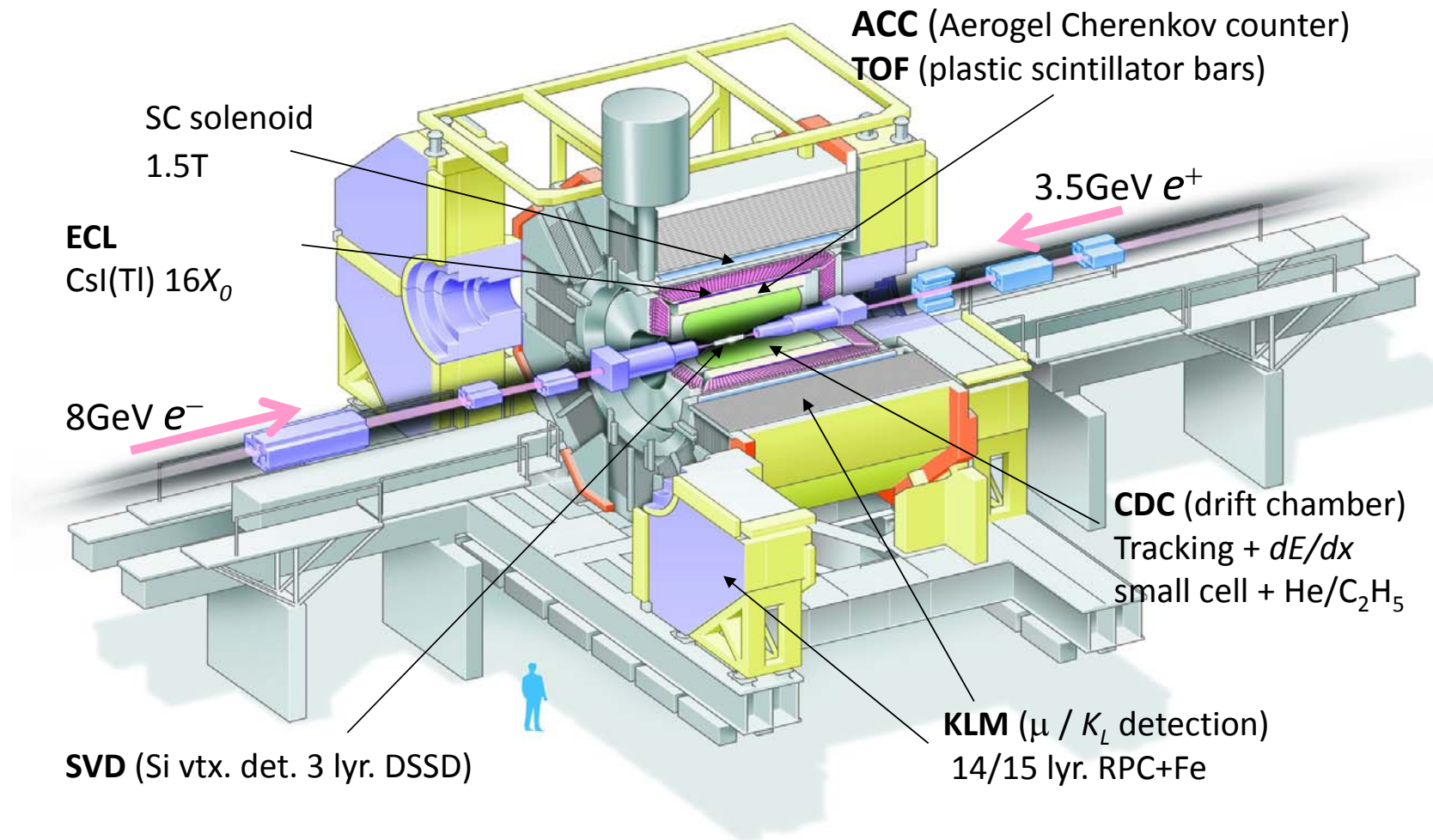
Super-KEKB

X 40 luminosity

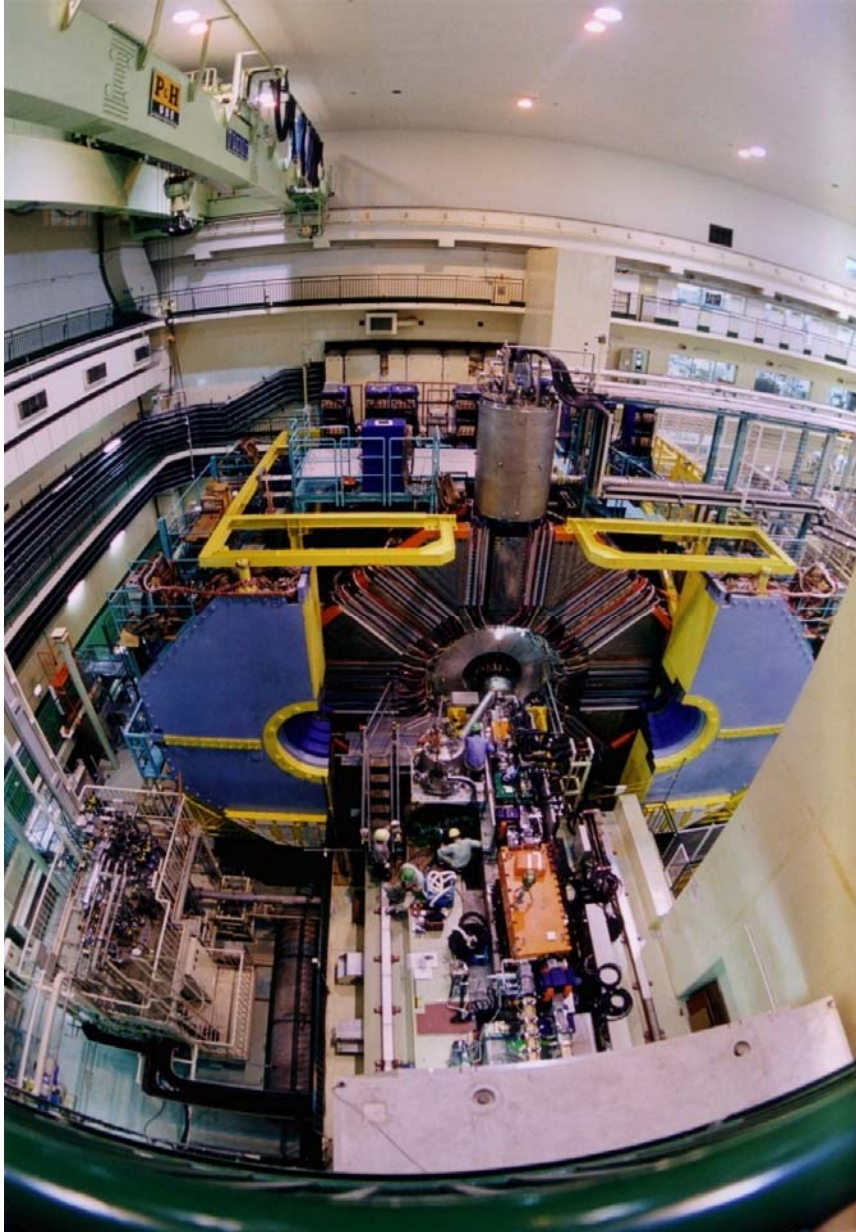




# Belle Detector

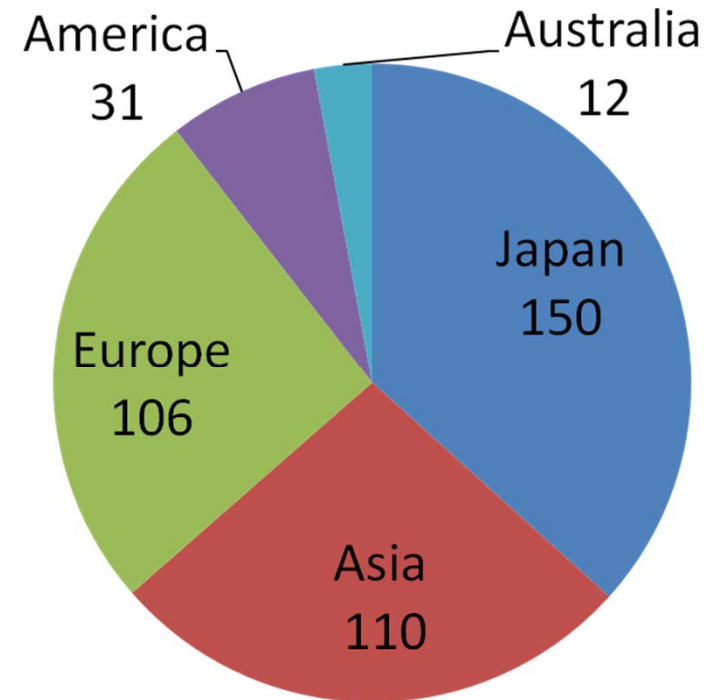




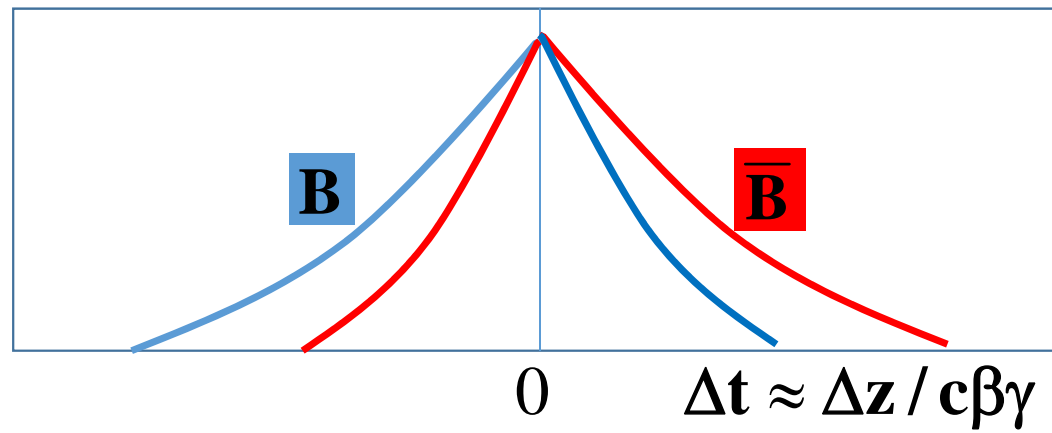
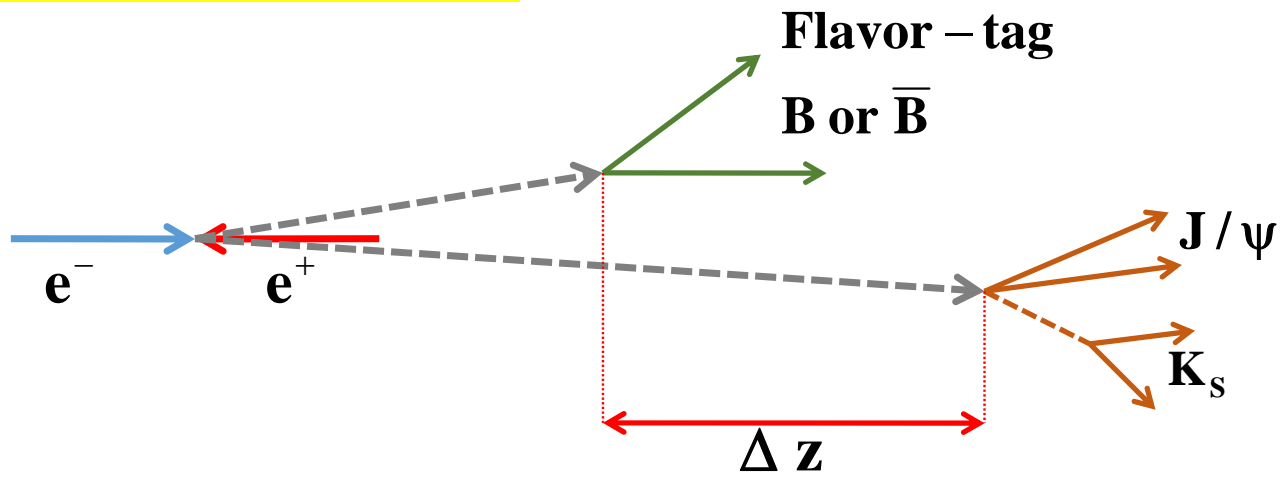
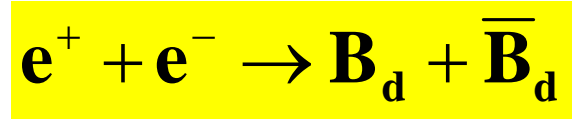


## Belle Members

15 Countries and Regions  
62 Institution  
409 Members

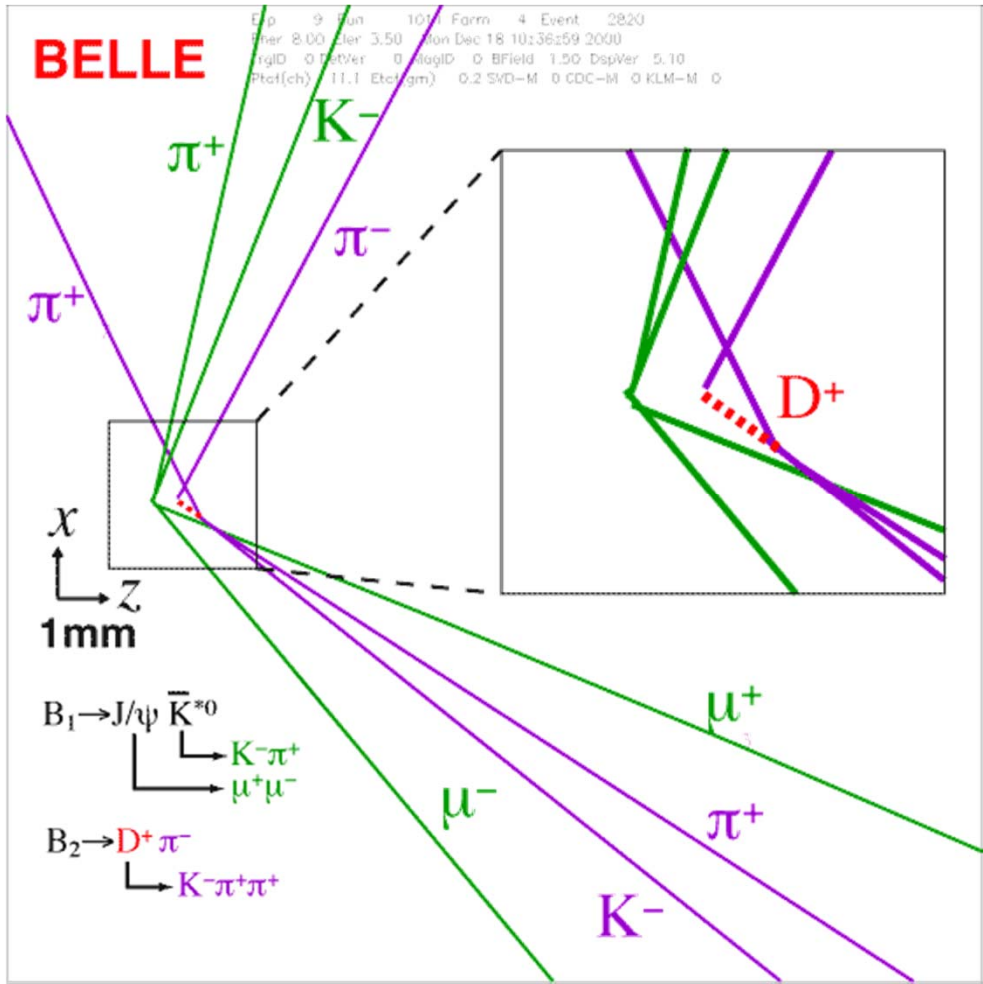


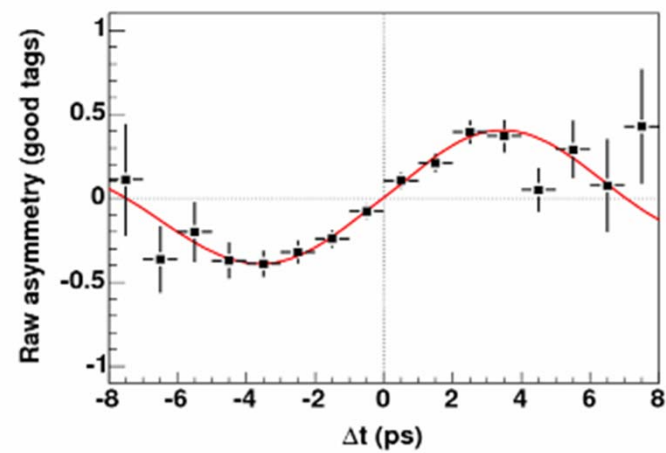
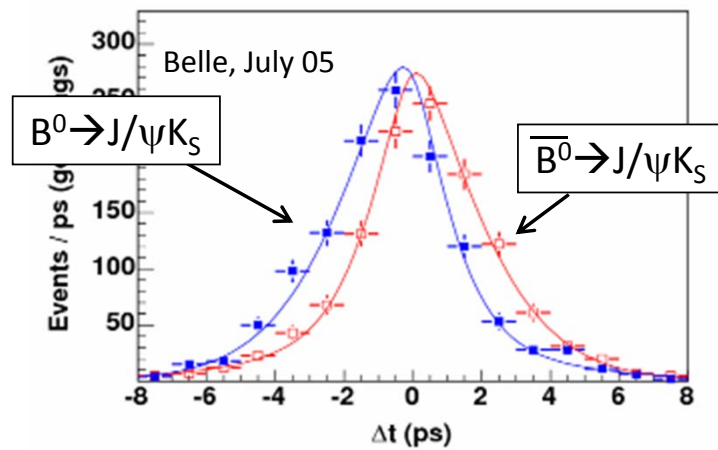




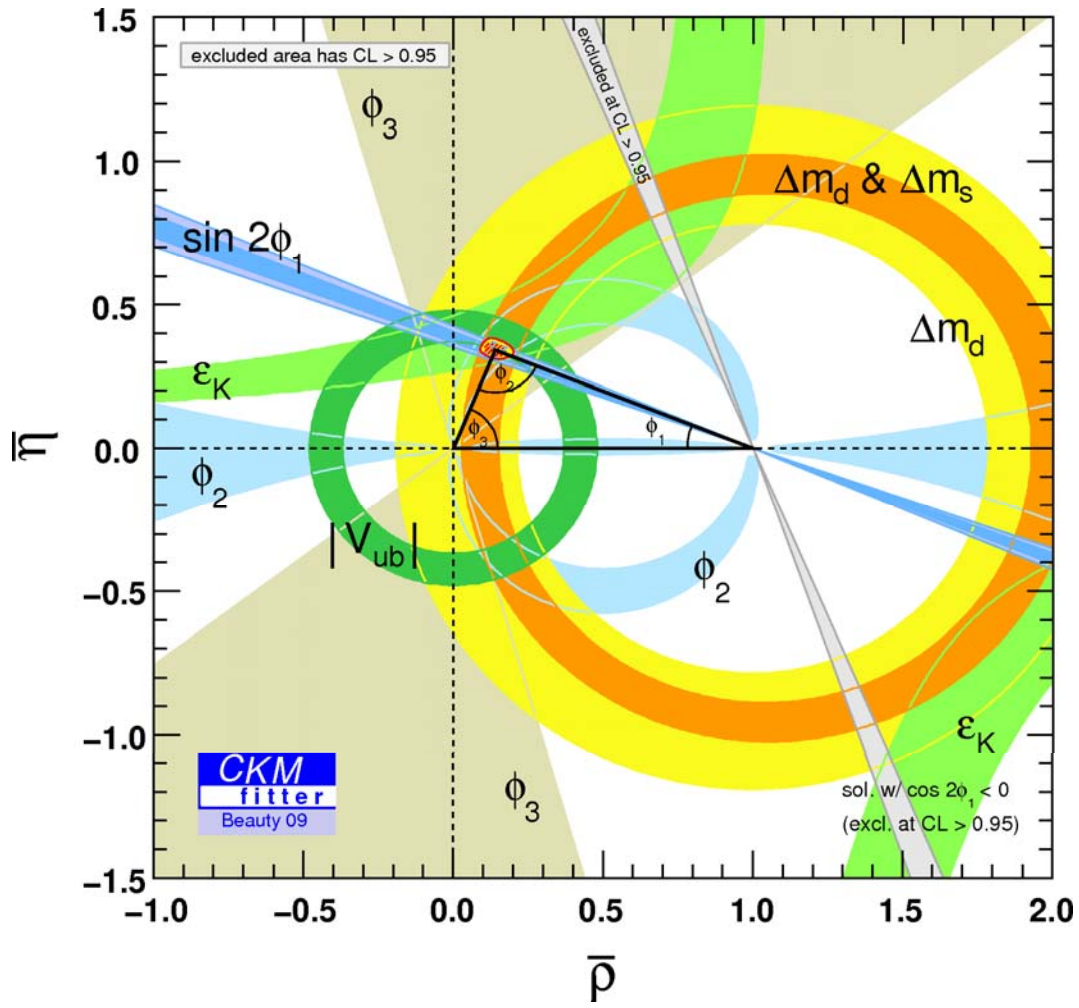
**BELLE**

Exp 9 Run 101 Form 4 Event 2820  
Thr 8.00 Clr 3.50 Mon Dec 18 10:36:59 2000  
TrigID 0 DetVer 0 LogID 0 BField 1.50 DspVer 5.10  
Ptof(ch) 11.1 Etcl(gm) 0.2 SVD-M 0 CDC-M 0 KLM-M 0





Belleグループ提供



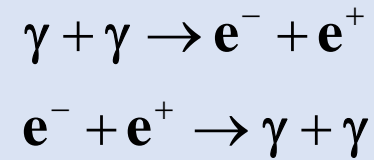
[CKMfitter Group \(J. Charles \*et al.\*\)](#),  
[Eur. Phys. J. C41, 1-131 \(2005\) \[hep-ph/0406184\]](#),  
 updated results and plots available at: <http://ckmfitter.in2p3.fr>

# ビッグバンシナリオ

宇宙は高温・高密度の状態から膨張して今の姿になった

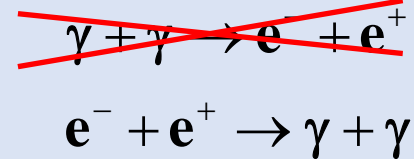
すべての粒子と反粒子が共存

$$\langle E \rangle \gg mc^2$$



粒子・反粒子の対消滅が進む

$$\langle E \rangle < mc^2$$



取り残された粒子で物質が構成された

なぜ粒子と反粒子の数に差が生じた？

→ 粒子と反粒子に本質的な違い

← CPの破れ

6クォーク模型のCPの破れでは宇宙の問題を説明できない

→ 未知のCPの破れのメカニズムが存在する

➤ 超対称理論？

LHC, Super-KEKB

➤ 軽粒子の系でのCPの破れ？

ニュートリノ振動実験 (T2K, ...)

## CP対称性の破れの現状

- 標準模型はK中間子とB中間子のCP対称性の破れを説明する
- しかし標準模型は宇宙の物質優位の問題を説明できない  
未知のCP対称性の破れのメカニズムの存在を意味する