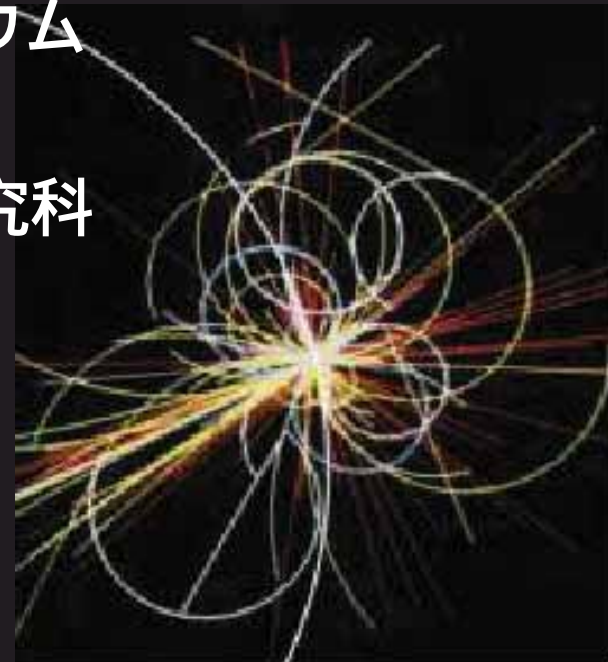


名古屋大学21世紀COEプログラム
「宇宙と物質の起源：宇宙史の物理学的解読」

粒子-反粒子対称性の破れの謎を探る

2004年6月12日
第2回ORIUM-COE シンポジウム

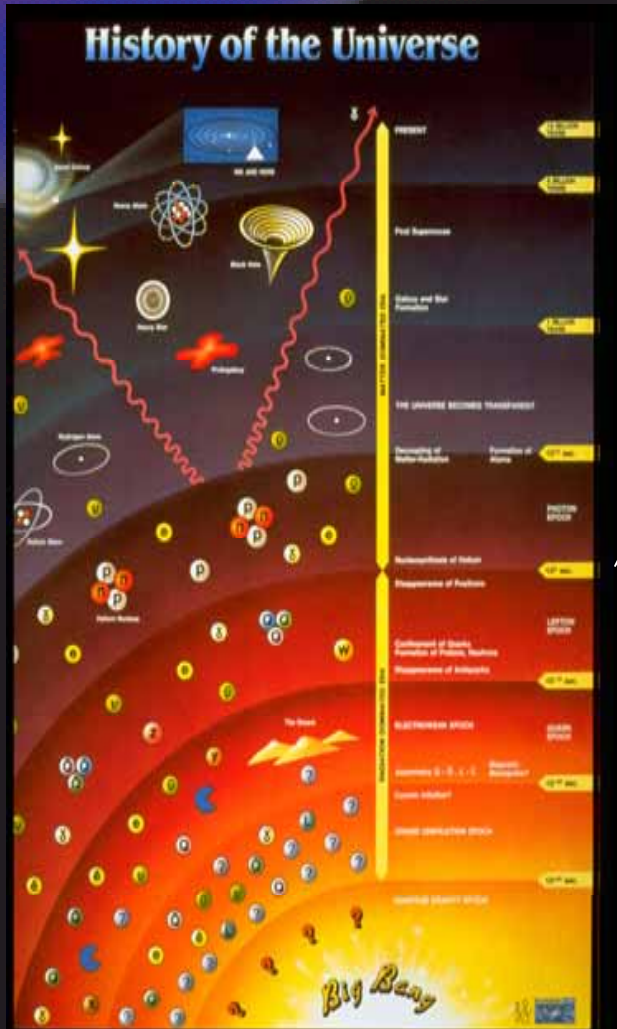
名古屋大学大学院 理学研究科
飯嶋 徹
(素粒子研究チーム)



内容

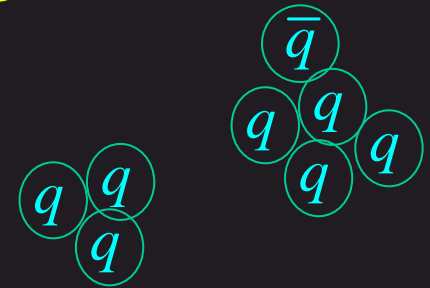
- イントロダクション
- 標準理論におけるCPの破れ
- Bファクトリ
 - 実験の概要
 - 最近の成果
 - 今後の展望
- まとめ

初期宇宙史と素粒子研究



時間 (s) 温度 / E
(K / GeV)

10^{-5} 10^{12} / 0.1



QCD相転移



10^{-10} 10^{15} / 100



電弱理論



10^{-36} 10^{28} / 10^{15}

大統一理論

10^{-44} 10^{32} / 10^{19}

量子重力

反粒子の消滅

$E > 2M(X) \rightarrow$ 対消滅と対生成

$E < 2M(X) \rightarrow$ 対消滅、崩壊

宇宙には物質(粒子)しかない
➡ どこかでバランスが崩れた？

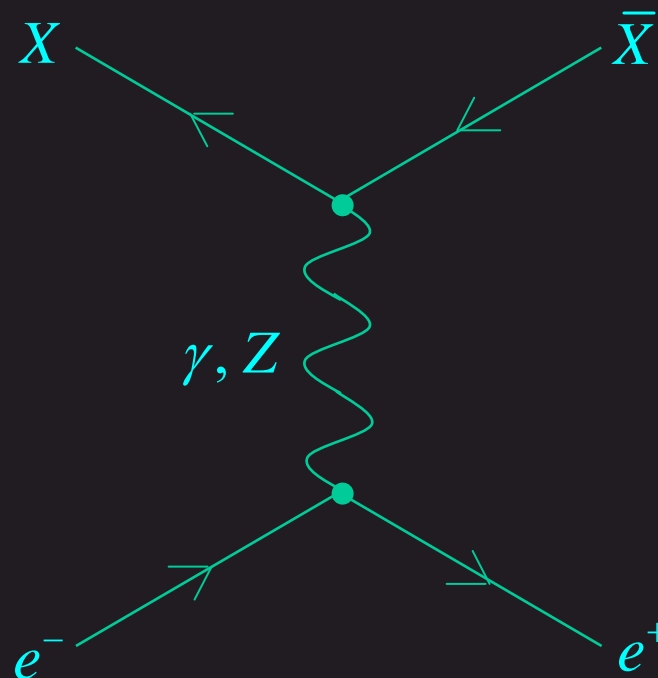
可能なシナリオ

$$X \rightarrow q + e$$

$$\bar{X} \rightarrow \bar{q} + \bar{e}$$

X と \bar{X} の振る舞いの非対称 $\sim 0(10^{-8})$ ➡ 物質優勢の宇宙

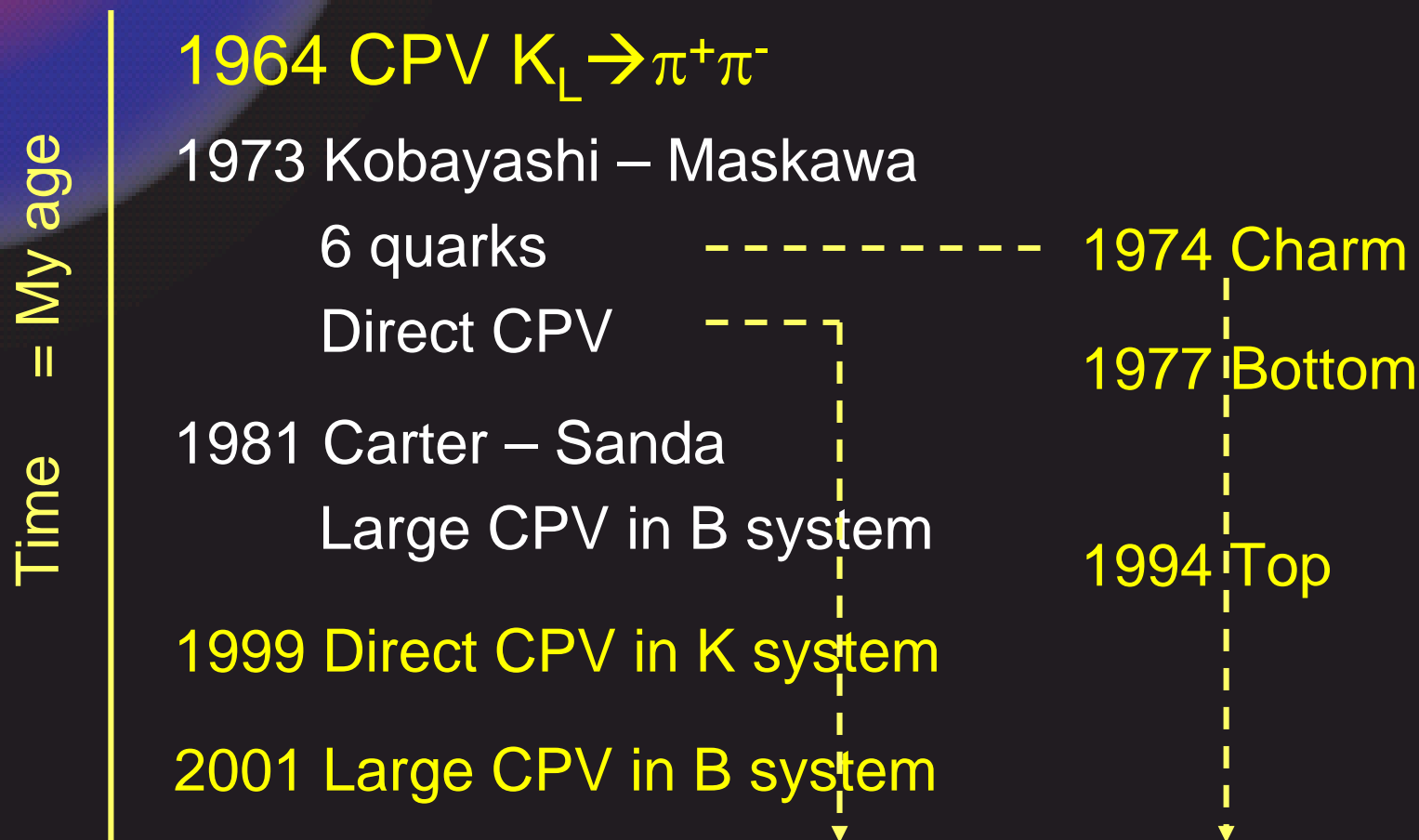
対消滅・対生成反応



粒子と反粒子は対等でない。

素粒子物理でのCPの破れ(歴史)

Predictions and Discoveries



All major predictions of KM now confirmed.
➡ What comes next ?

“新しい現象”か？

電子衝突時

「標準理論」外の現象か

大型加速器で観測

「Bファクトリー」と呼ばれる大型加速器で宇宙誕生時のなぞを探る実験を続けている文部科学省高エネルギー加速器研究機構（KEK、茨城県つくば市）などの研究グループが、すべての物理現象の基礎となる「標準理論」では説明できない現象を見つけた可能性が出てきた。未知の粒子の存在も想定される。同グループが12日、米シカゴ近郊で開かれた国際学会で発表した。もっとも確度を高める必要があるが、30年間、揺らぐことのない標準理論を覆す第一歩となるかもしれない。

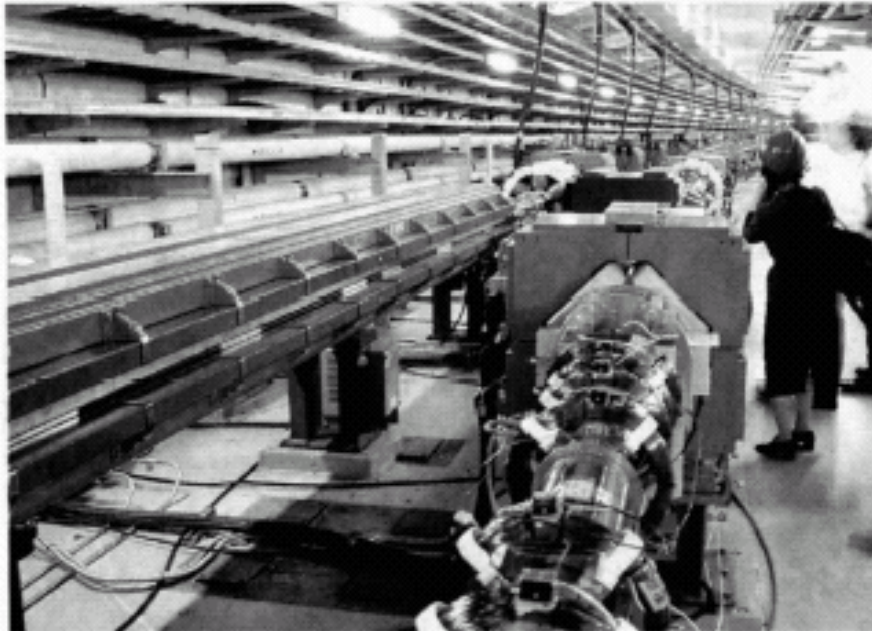
「Bファクトリー」では、光速近くまで加速した電子と陽電子を衝突させてB中間子と反B中間子をつくり、1兆分の1秒という瞬時に両中間子が崩壊する過程を観測している。今度、B中間子が「クォーク」と「Kショート粒子」に壊れる崩壊過程を分析した結果、宇宙誕生のときとなる「CP対称性の破れ」の量が、標準理論で導かれる量と大きく違っていた。統計的にみて「最低限、9%の確率で導く」との結果が出た。物理学では最低でも99.99%の確率でないと確実と見えない。Bファ

クトリーでは今後、実験を繰り返す。実験共同責任者の山内正則（KEK）教授は「標準理論を超える仮説『超対称性理論』が想定する未知の粒子が関与していることも考えられる」と話す。研究グループは01年に、別の崩壊過程で「CP対称性の破れ」の存在を確認。これは小林誠・KEK美浜電子線加速器研究

機構（KEK、茨城県つくば市）などの研究グループが、すべての物理現象の基礎となる「標準理論」では説明できない現象を見つけた可能性が出てきた。未知の粒子の存在も想定される。同グループが12日、米シカゴ近郊で開かれた国際学会で発表した。もっとも確度を高める必要があるが、30年間、揺らぐことのない標準理論を覆す第一歩となるかもしれない。

キーワード
標準理論 基本粒子 クォークと、電子やニュートリノなどの軽粒子で、すべての物質ができていると考える物理理論。小林・益川理論はクォークと軽粒子がそれぞれ8種類ずつ存在するという説で、標準理論の重要な部分を構成する。

CP対称性の破れ 宇宙誕生時には、マイナスの電子とプラスの陽電子のようになり、電子と陽電子が同量生じたと考え、両者は出合えば消滅する。しかし、粒子が生き残り、現在宇宙にある物質はすべて粒子でできている。「CP対称性の破れ」によってその理由が説明できる。



大型加速器「Bファクトリー」の1周約3kmのトンネル内。電子の周回リング（左）と陽電子の周回リング（右）が並んでいる。茨城県つくば市の文部科学省高エネルギー加速器研究機構。

所長と益川敏英・京都大名誉教授が73年に予言した現象で、小林・益川理論の正しさが証明された。この時点では標準理論との矛盾はなかった。データ蓄積待つ Bファクトリーでの実験を提唱した三田一郎・名古屋大教授（素粒子理論の話、米スタンフォード線形加速器センター）も同じ実験をしている。の現象を説明する理論の検討を始めた。

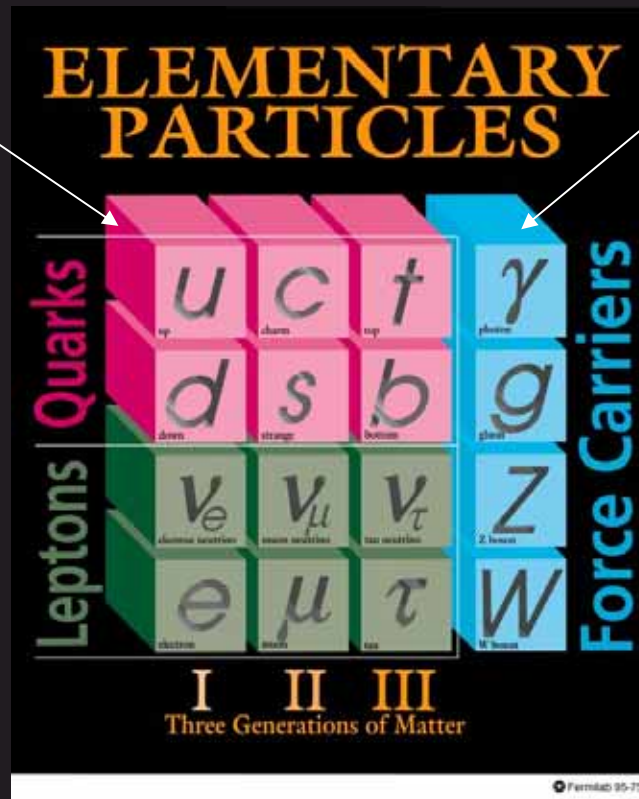
現在の素粒子標準理論

物質構成粒子
(フェルミオン)

クォーク

レプトン

3世代構造



力を媒介する粒子
(ボゾン)

電磁相互作用

強い相互作用

弱い相互作用

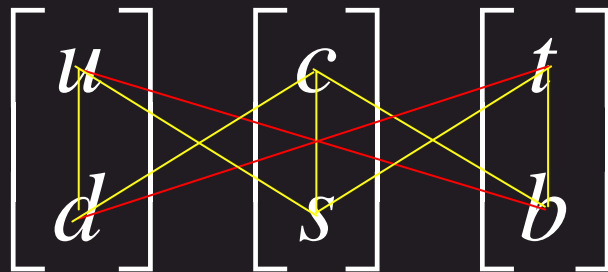
反粒子の存在

$$q \Leftrightarrow \bar{q}, \quad e^- \Leftrightarrow e^+, \quad \nu_e \Leftrightarrow \bar{\nu}_e, \quad \dots$$

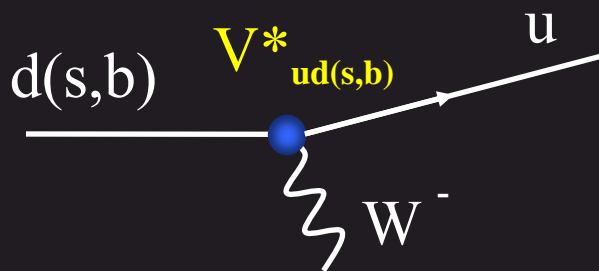
小林-益川モデル

- 3世代6種類のクォークがあれば、弱い相互作用でCPは破れる。
- 小林-益川行列：
 - 弱い相互作用ではクォークは仮想Wを出して、他のクォークに変化
 - 3X3ユニタリー行列には、3つの回転角と一つの複素位相が含まれる

↳ CPV



$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}$$



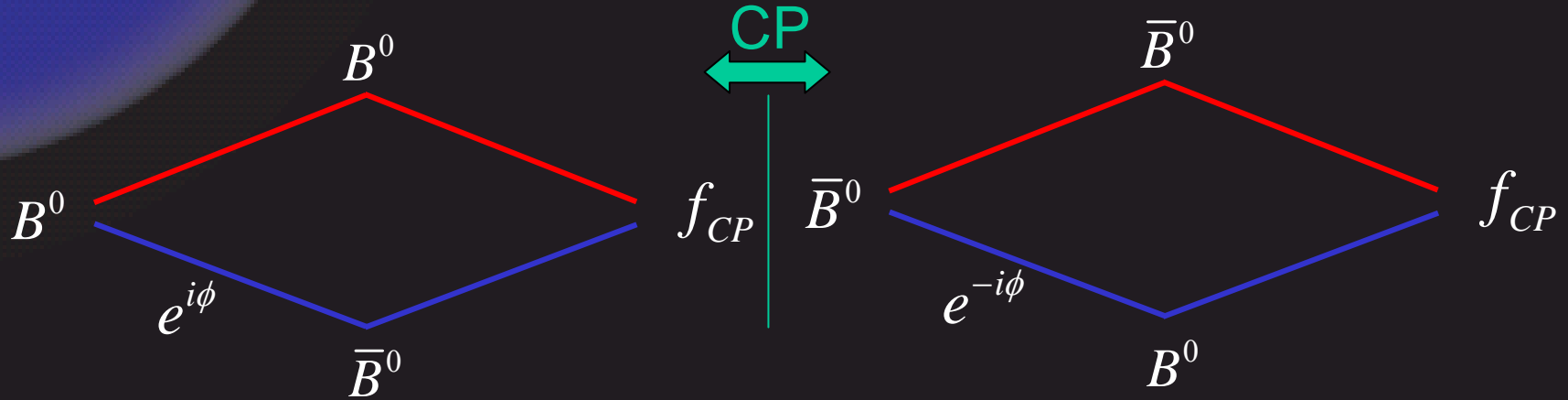
弱い相互作用の
固有状態

小林・益川
(KM)行列

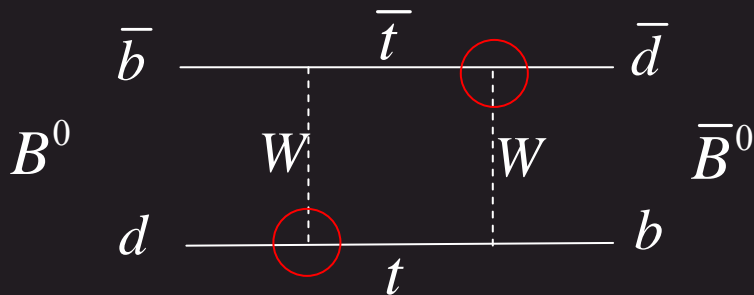
質量の固有状態

B崩壊でのCP対称性の破れ

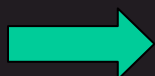
- (初期状態が) B^0 と \bar{B}^0 で異なる量子干渉を示す。



$B^0 \leftrightarrow \bar{B}^0$ 振動



$B^0 \rightarrow f_{CP}$

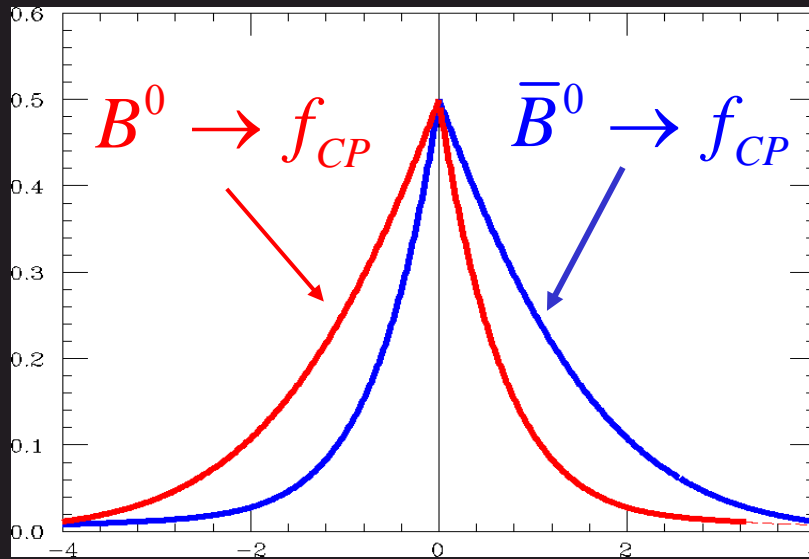


時間に依存するCP対称性の破れ

時間に依存したCPの破れ

$$A(t) \equiv \frac{\Gamma(\bar{B}_d^0 \rightarrow f_{CP}) - \Gamma(B_d^0 \rightarrow f_{CP})}{\Gamma(\bar{B}_d^0 \rightarrow f_{CP}) + \Gamma(B_d^0 \rightarrow f_{CP})} = -\xi_f \sin 2\phi_1 \sin \Delta mt$$

↑
事象数



崩壊時間

CPの測定

- 非対称エネルギー e^+e^- 衝突 Y(4S) $B-\bar{B}$ 対生成
- 荷電レプトン・K中間子の電荷によるBフレーバーの決定

▶ $t=0$: time of the Btag decay.

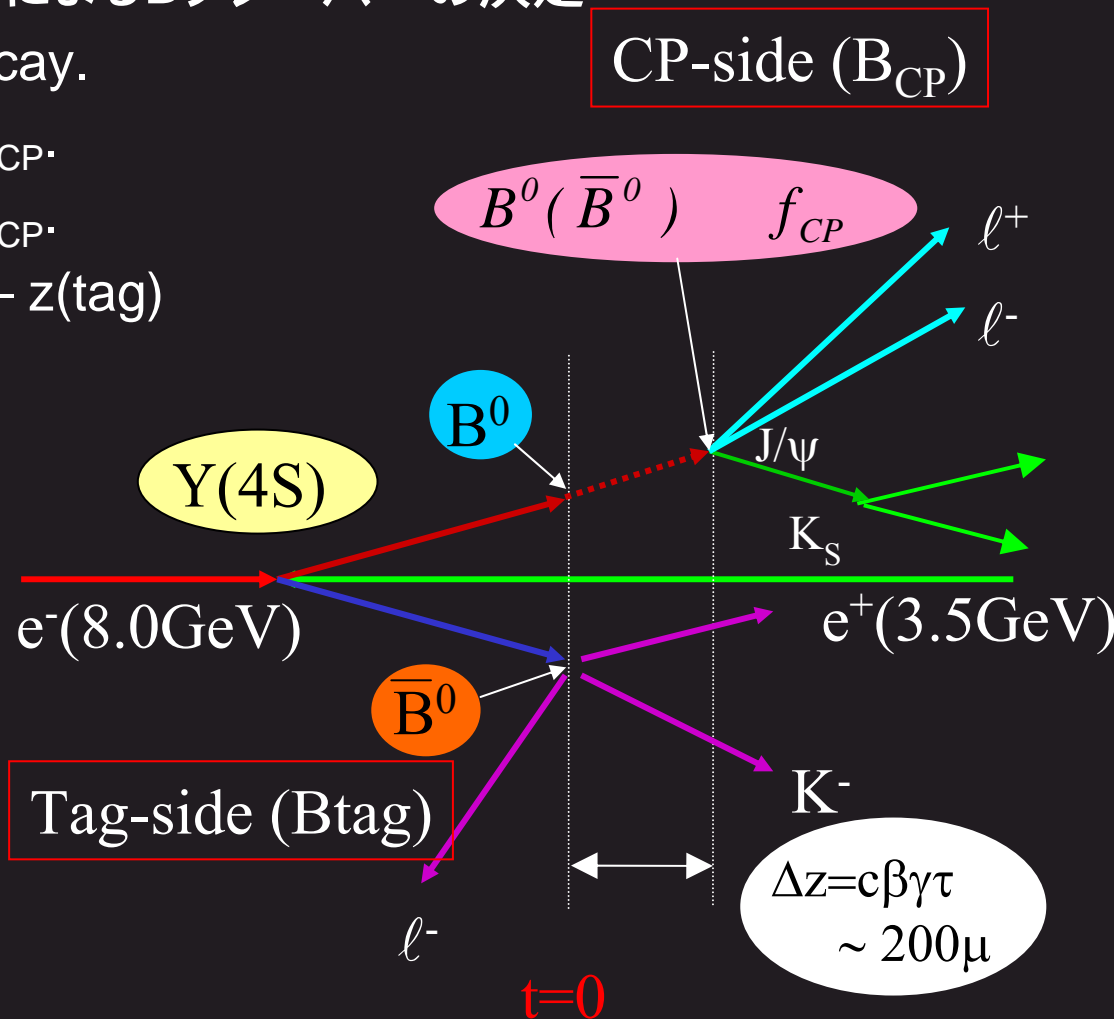
▶ If Btag= B^0 $B^0(t=0)$ f_{CP} .

If Btag= \bar{B}^0 $\bar{B}^0(t=0)$ f_{CP} .

- B崩壊点の測定 $\Delta z = z(cp) - z(tag)$

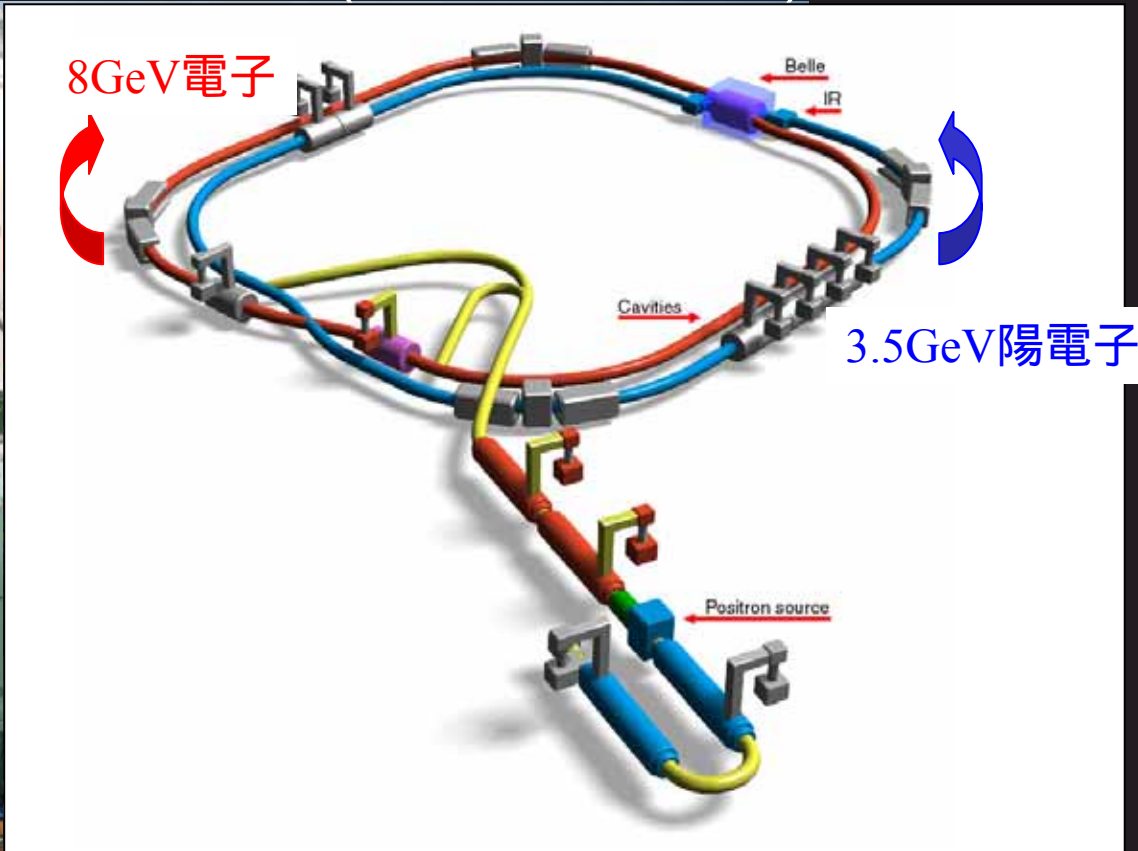
崩壊時間 (Δt)

- $A_{CP}(t)$ の測定



KEK B ファクトリー

高エネルギー加速器研究機構 (茨城県つくば市)

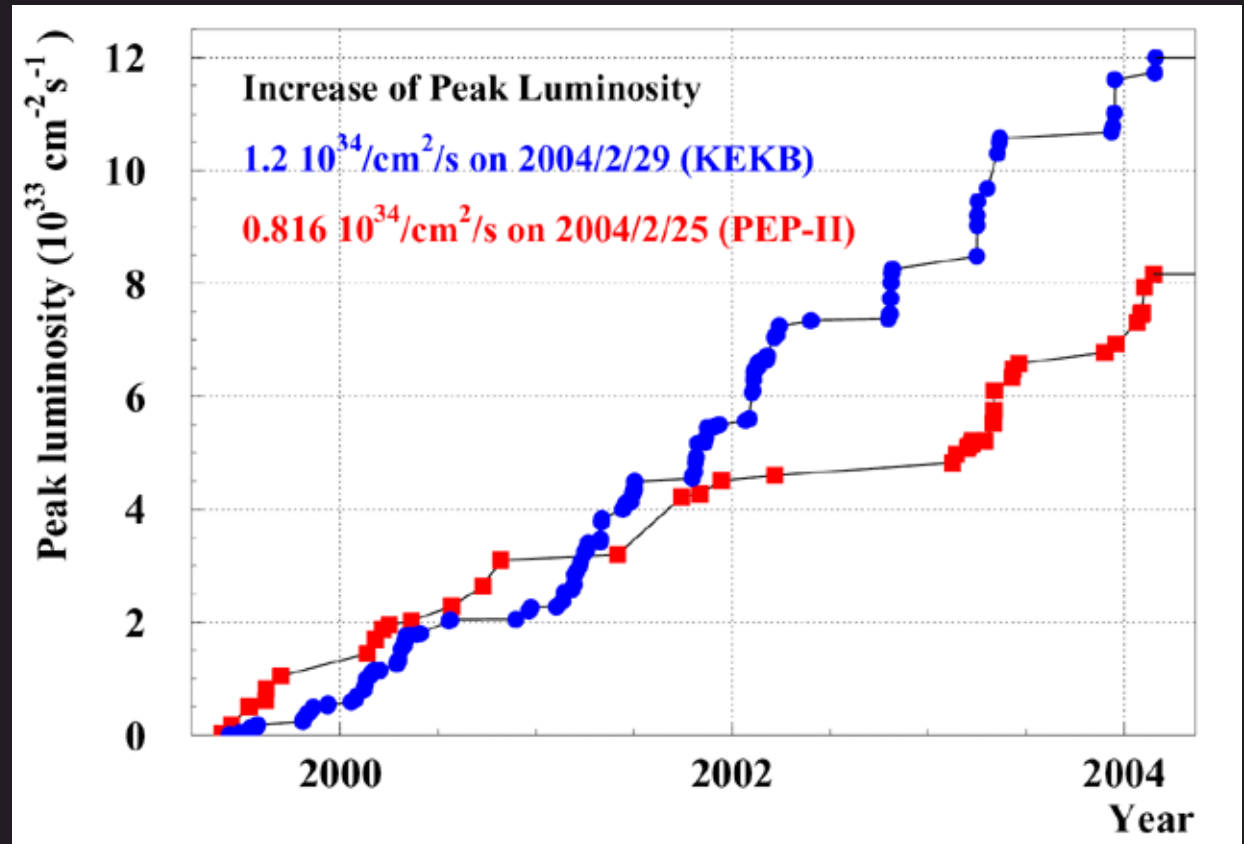


スタンフォードでも同様の加速器 (PEP-II) が稼動中

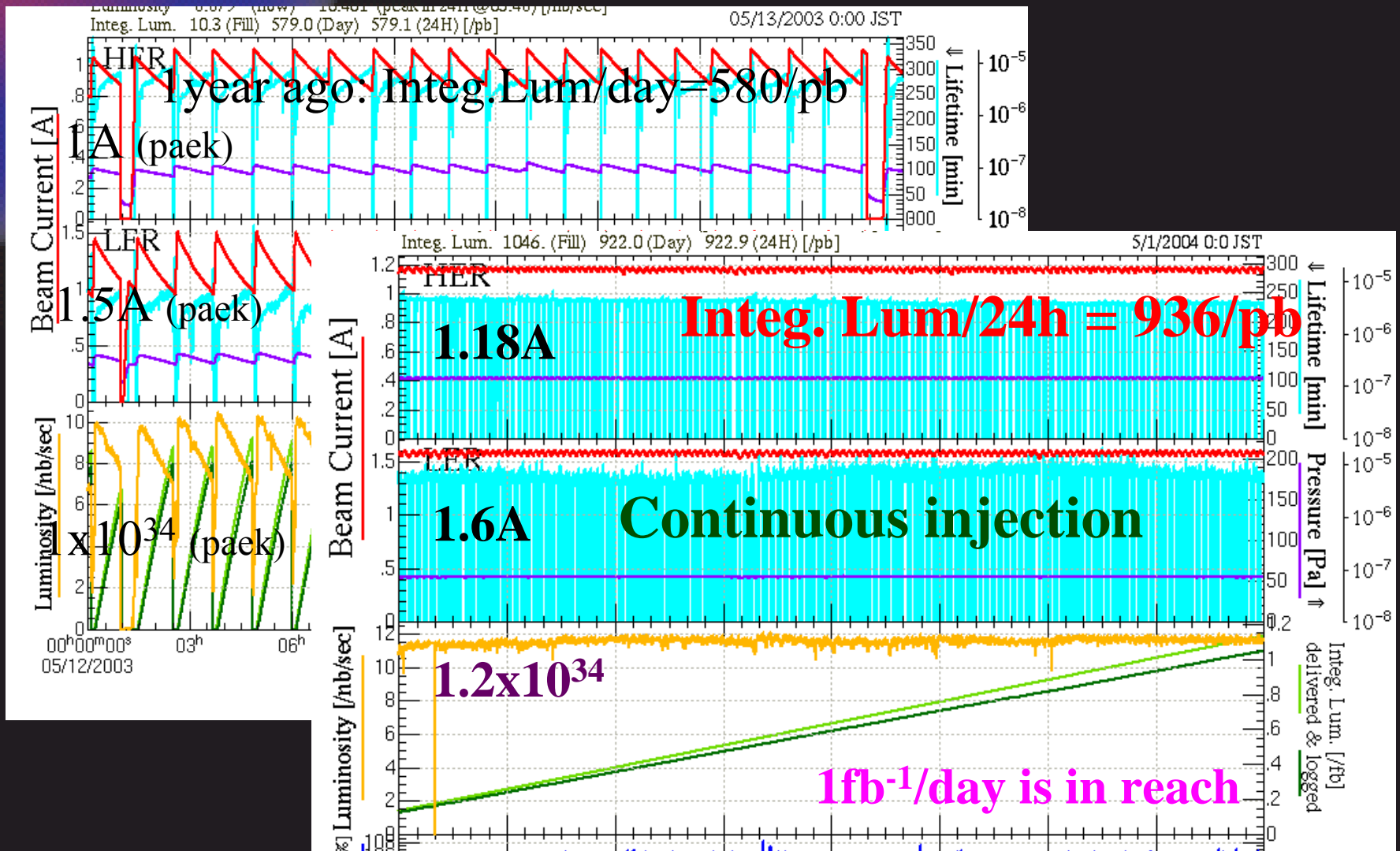
KEKB加速器の性能

- ピーク luminositiy = $13.9 \times 10^{33} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$
➡ $N(\text{BB}) = 1.5 \times 10^8 / \text{year}$

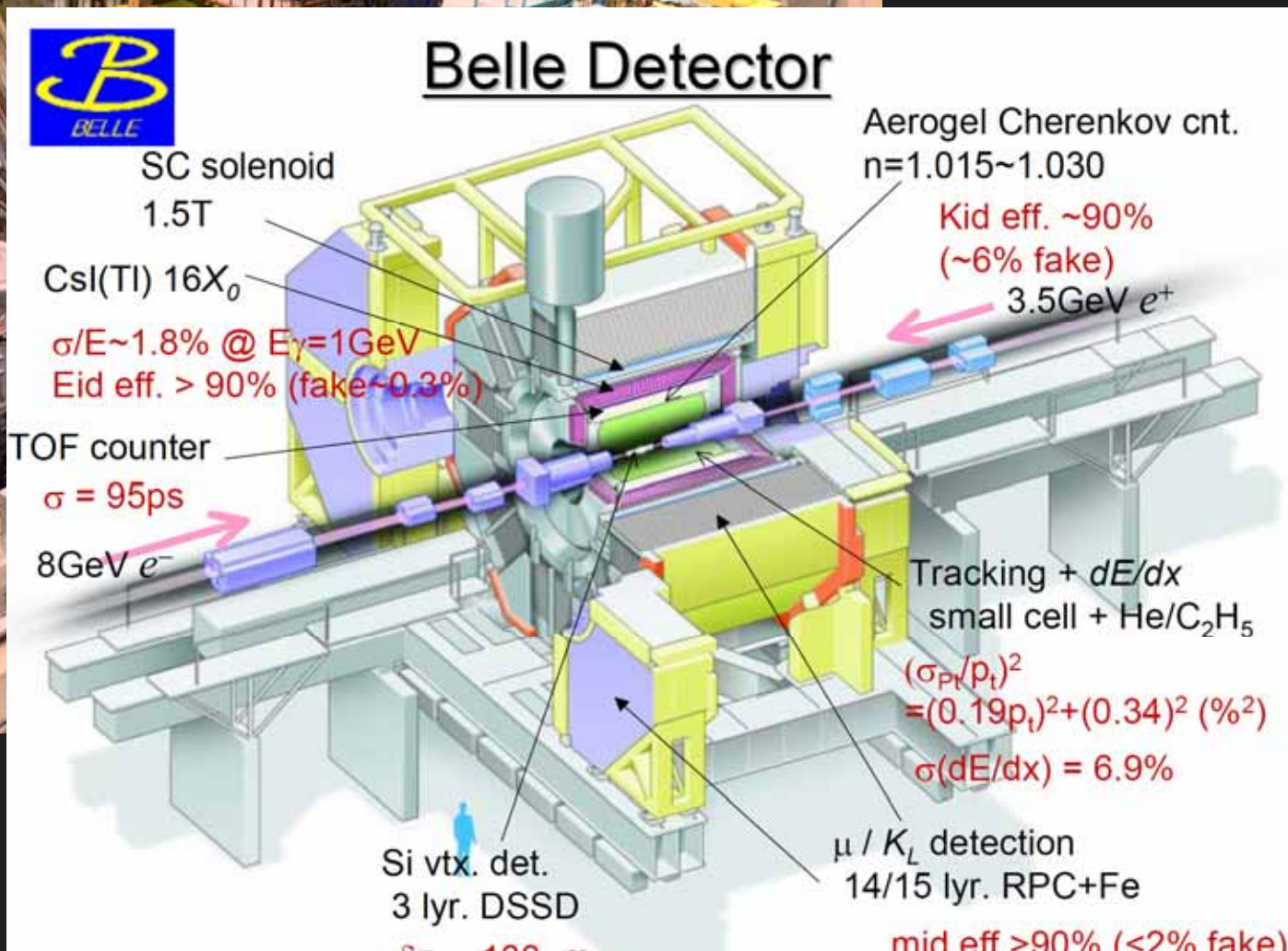
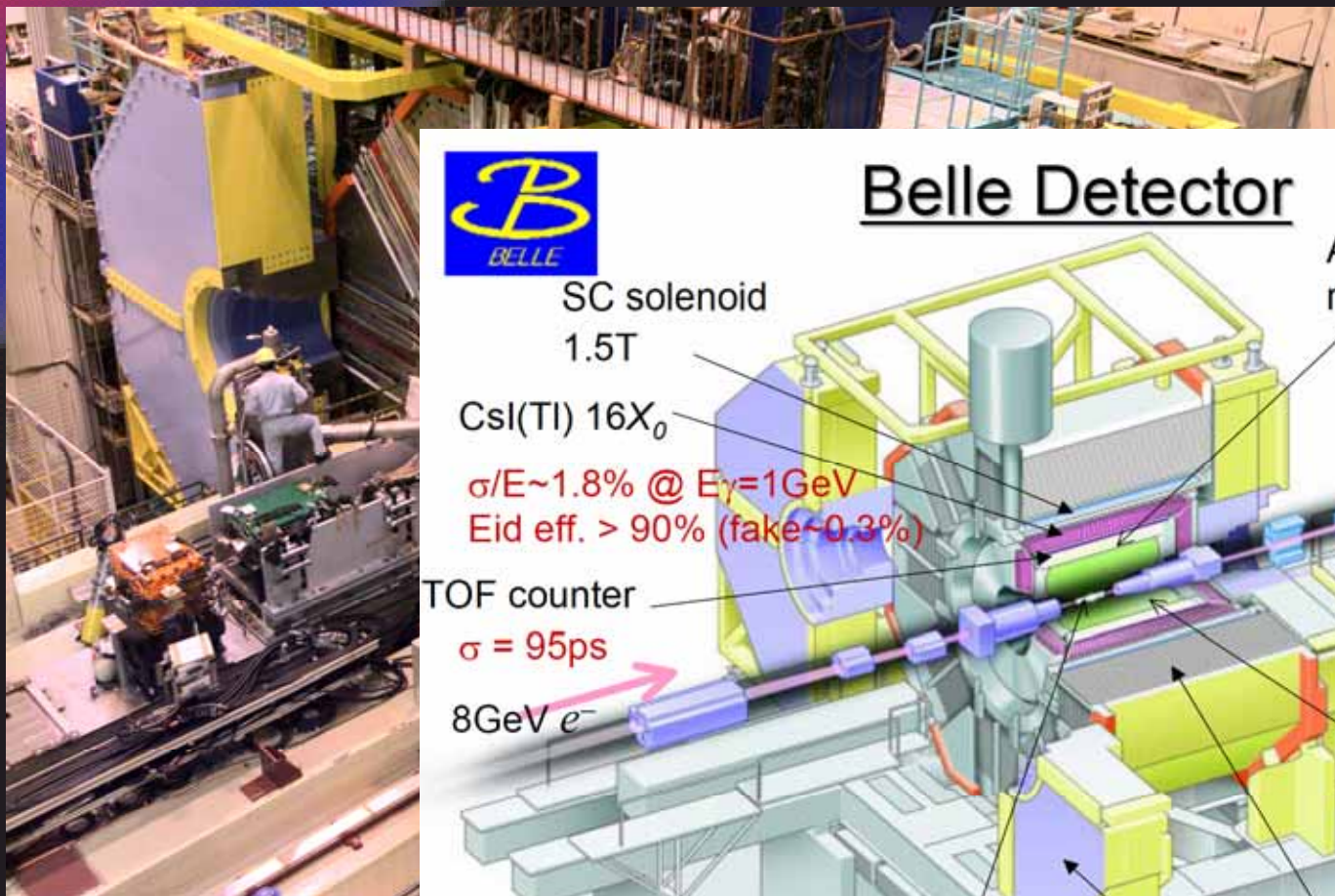
PEP-II との比較



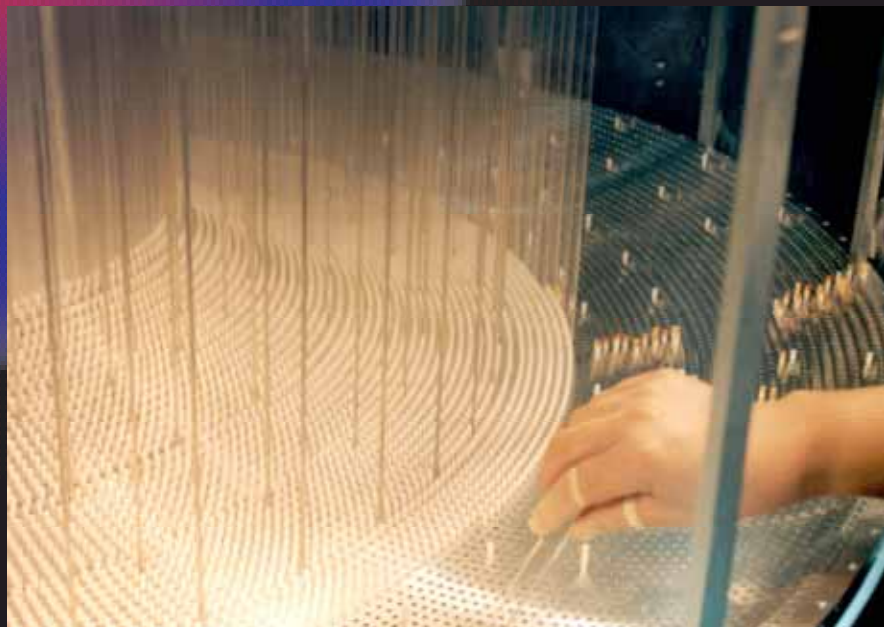
連続入射による性能改善



Belle測定器



中央飛跡検出器



B中間子崩壊の観測

BELLE

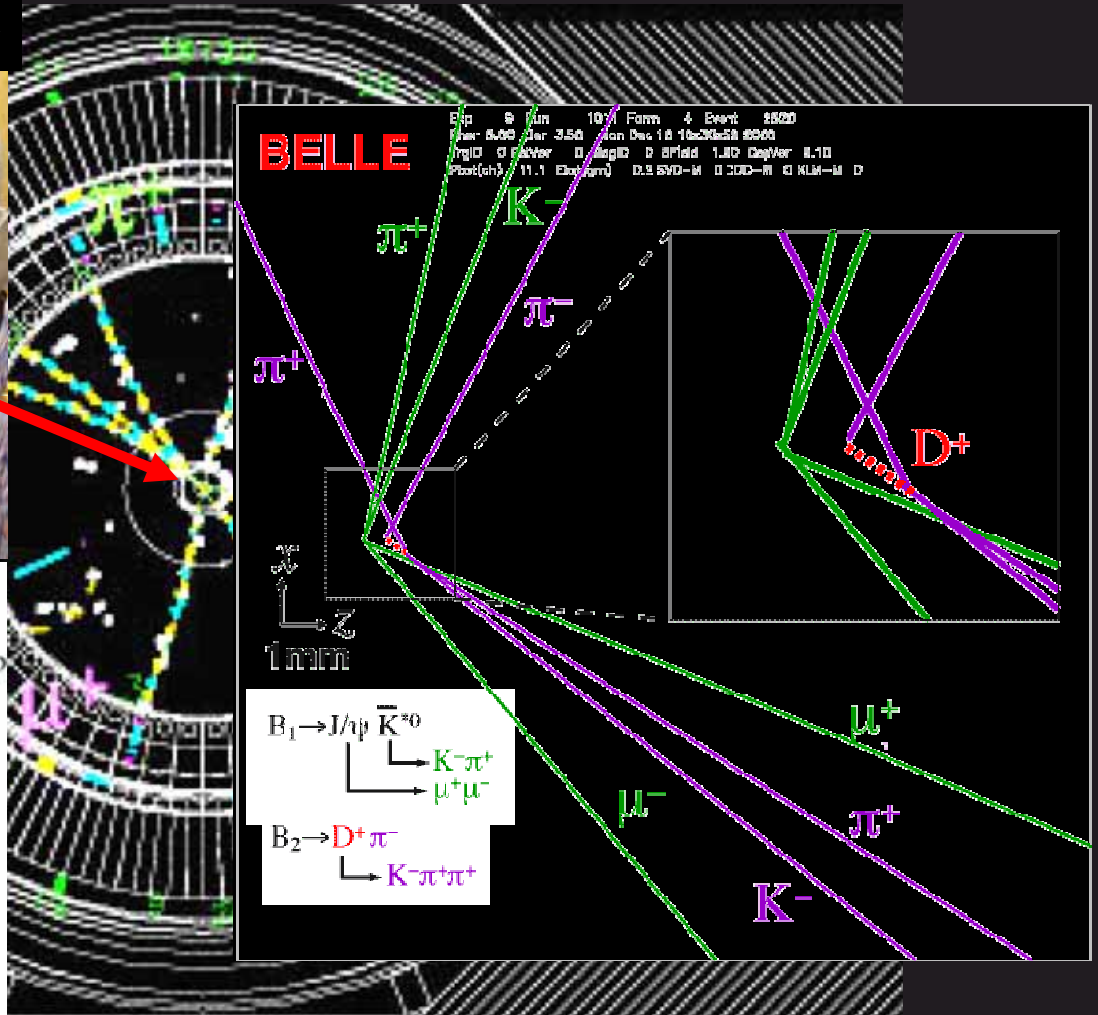
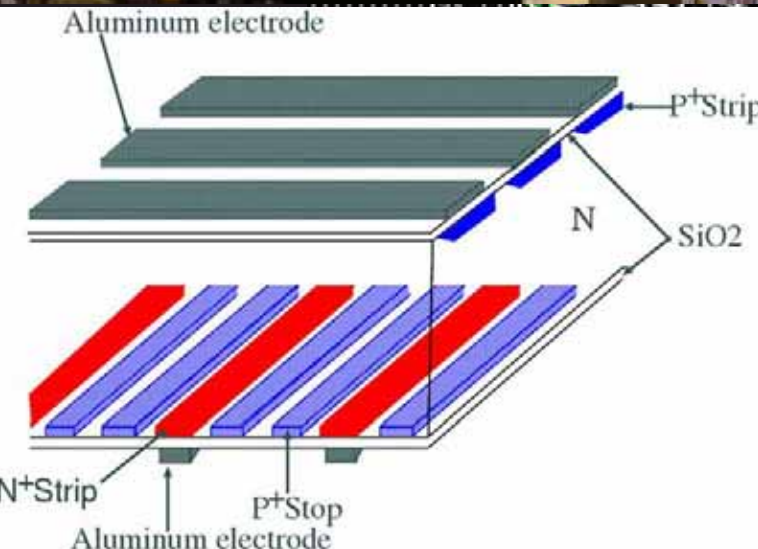
Exp 9 Run 1011 Farm 4 Event 2820
Eher 8.00 Eler 3.50 Mon Dec 18 10z36z59 2000
TrgID 0 DetVer 0 MagID 0 BField 1.50 DspVer 5.10
Prot(ch) 11.1 Etot(gh) 0.2 SVD-M 0 CDC-M 1 KLM-M 0



20 cm

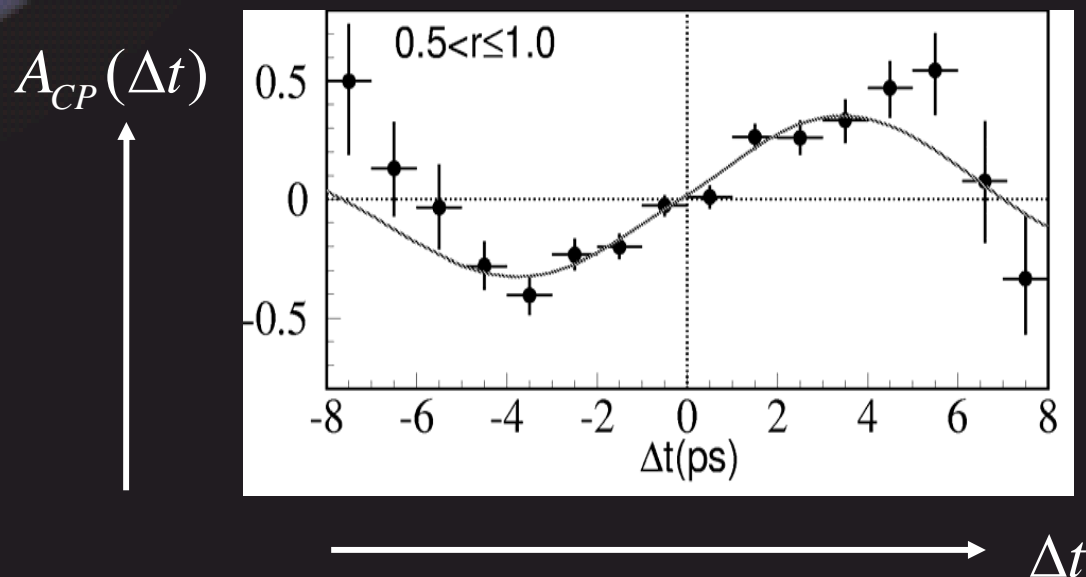
B中間子崩壊点再構成

シリコンバーテックス検出器



CP非対称度

$$A_{CP}(\Delta t) = \frac{\Gamma(\bar{B}^0 \rightarrow f_{CP}) - \Gamma(B^0 \rightarrow f_{CP})}{\Gamma(\bar{B}^0 \rightarrow f_{CP}) + \Gamma(B^0 \rightarrow f_{CP})} = -\xi_f \sin 2\phi_1 \sin \Delta m \Delta t$$



2003夏の結果 $\sin 2\phi_1 = 0.731 \pm 0.057 \pm 0.028$

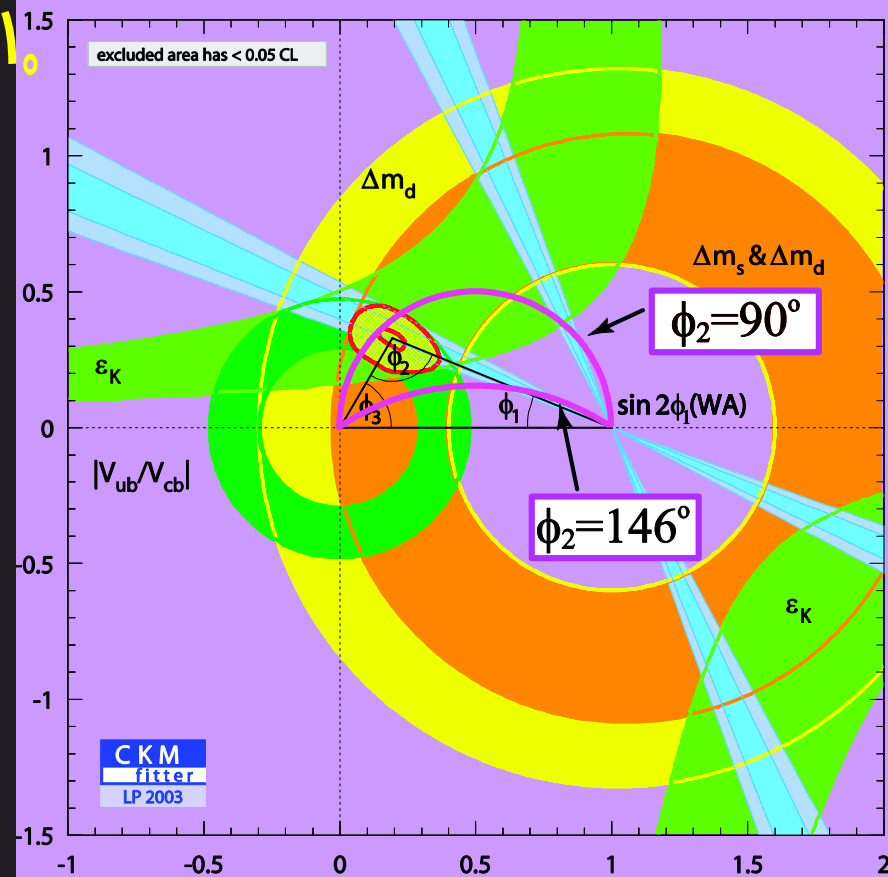
既に精密測定

観測の意義

- 初めてK中間子系以外で観測。
- 大きな破れ: CPはapproximate symmetryですらない(K中間子では本来大きな小林益川位相の効果が小さく見えただけ)

粒子と反粒子は対等でない。

- 小林益川理論の予想と一致
より厳密なテストへ。



深まる謎

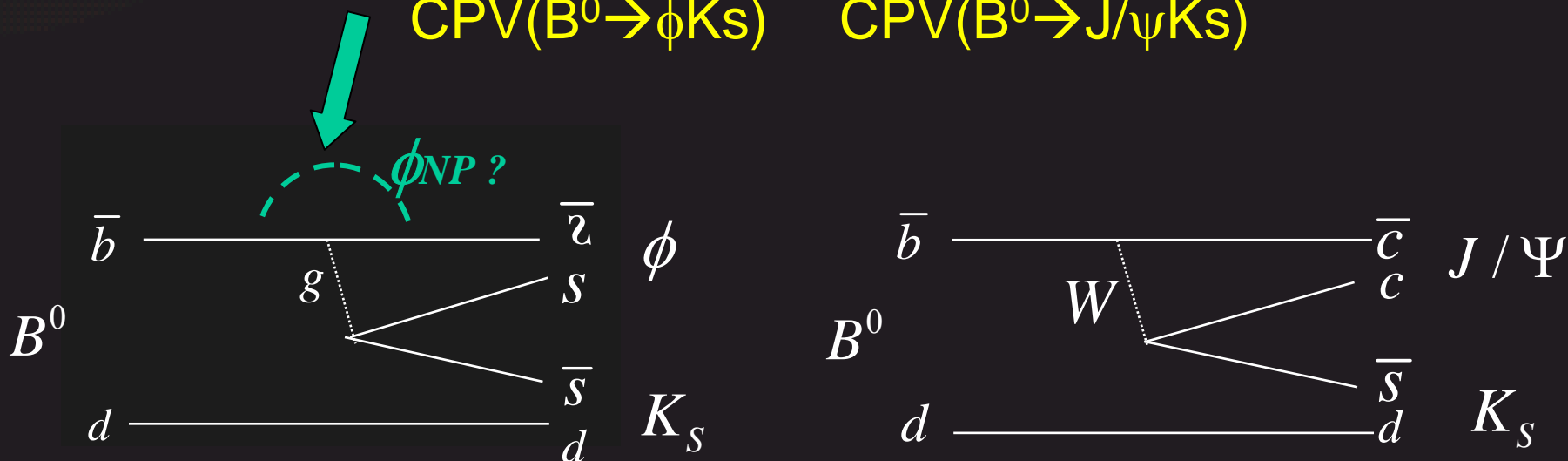
- 素粒子の“標準模型”(小林益川理論を含む)では、物質優勢宇宙の生成が説明できない。
 - CPの破れは持っているが、“足りない”。
 - CPの破れの素は他にもあるかもしれない(標準模型を超える模型だと多くの場合、CPの破れの素は複数ある)
 - バリオン数非保存。
- 複素数? → ヒッグズ?
- 標準理論のパラメーターは、実験で決めないといけない(不満)。



より高いエネルギーを見るべし。
Next target = O(TeV)
Higgs, SUSY

b→s ペンギン崩壊でのCPの破れ

- ペンギン崩壊はループダイアグラムを含む。
重い新粒子が中間状態に飛ぶ可能性(不確定性関係)
- 標準理論では $CPV(B^0 \rightarrow \phi K_S) = CPV(B^0 \rightarrow J/\psi K_S)$
- 新粒子により余分な位相が入ると
 $CPV(B^0 \rightarrow \phi K_S) \neq CPV(B^0 \rightarrow J/\psi K_S)$

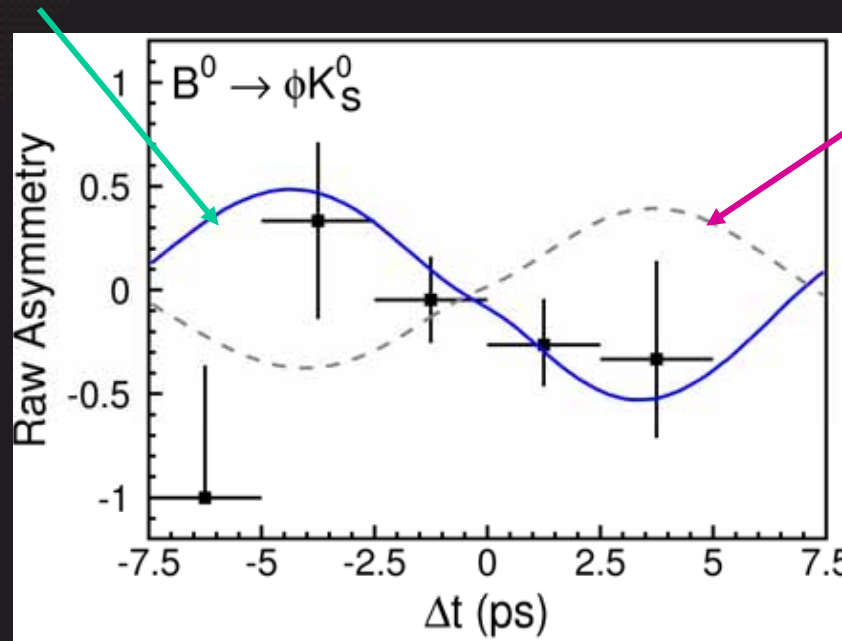


$$A_{CP}(t) = \sin 2(\phi_1 + \phi_{NP}) \times \sin(\Delta m_d t)$$

どうなった？

稀崩壊モードでのCPの破れ

$B^0(\bar{B}^0) \rightarrow \phi K_S^0$ 崩壊におけるCP非対称度

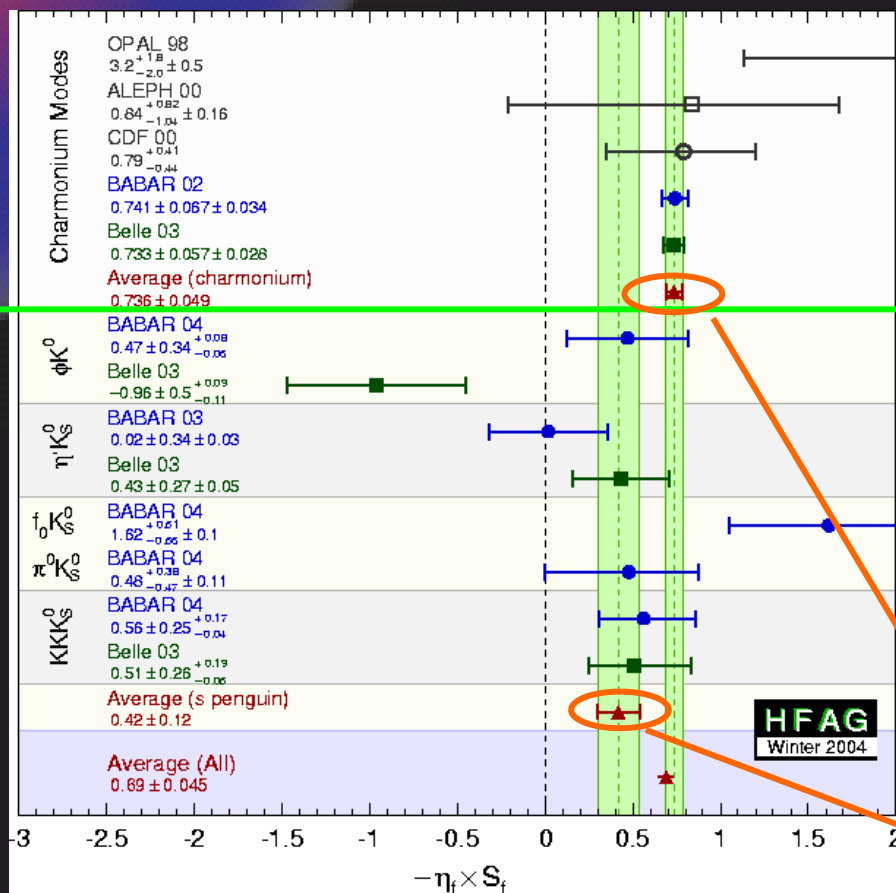


$B^0(\bar{B}^0) \rightarrow J/\psi K^0$

2003夏の結果 $\sin 2\phi_1 = -0.96 \pm 0.5^{+0.08}_{-0.05}$

$B^0(\bar{B}^0) \rightarrow J/\psi K^0$ の結果からのズレの統計的有為度は約 3σ

B崩壊でのCP非対称性測定の実況



$$B^0(\bar{B}^0) \rightarrow J/\psi K^0$$

$$B^0(\bar{B}^0) \rightarrow \phi K_S^0$$

その他の $b \rightarrow s$ ペンギン崩壊

世界平均

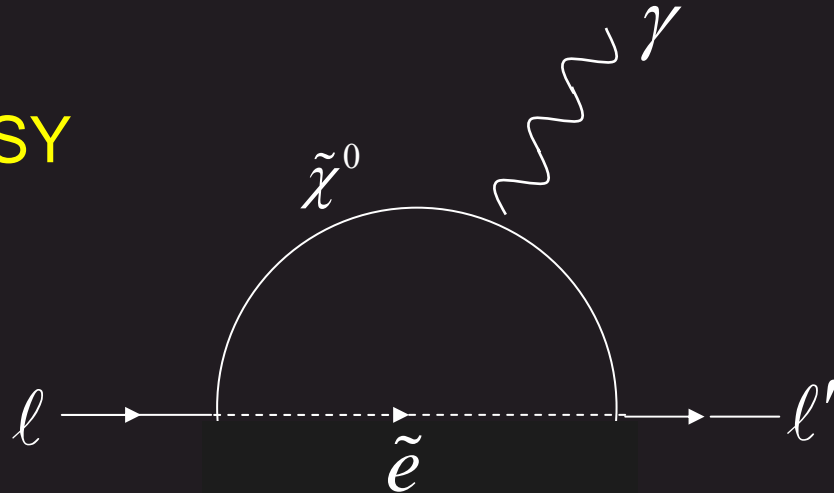
今夏に統計を約2倍にした結果を得る予定。

どうなるか？

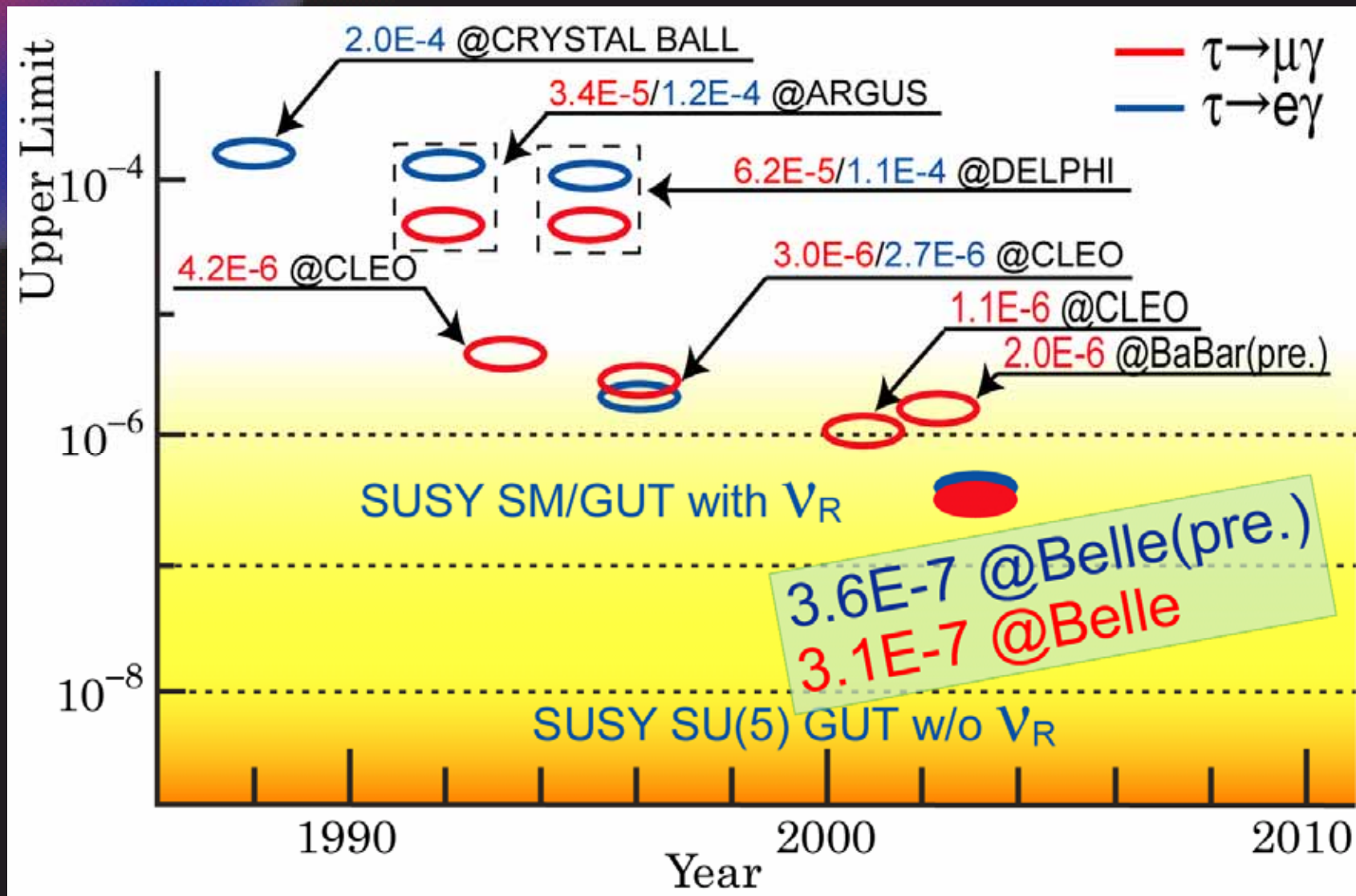
タウ崩壊における新粒子探索

- Bファクトリーでは τ もBとほぼ同数できる。
- レプトン数保存則を破る崩壊を今までにない感度で探索可能。
 - 標準理論では起こりえない。
 - 質量が重い τ は新粒子への結合が強い。
 - 見つければ直ちに新しい物理の証拠となる。

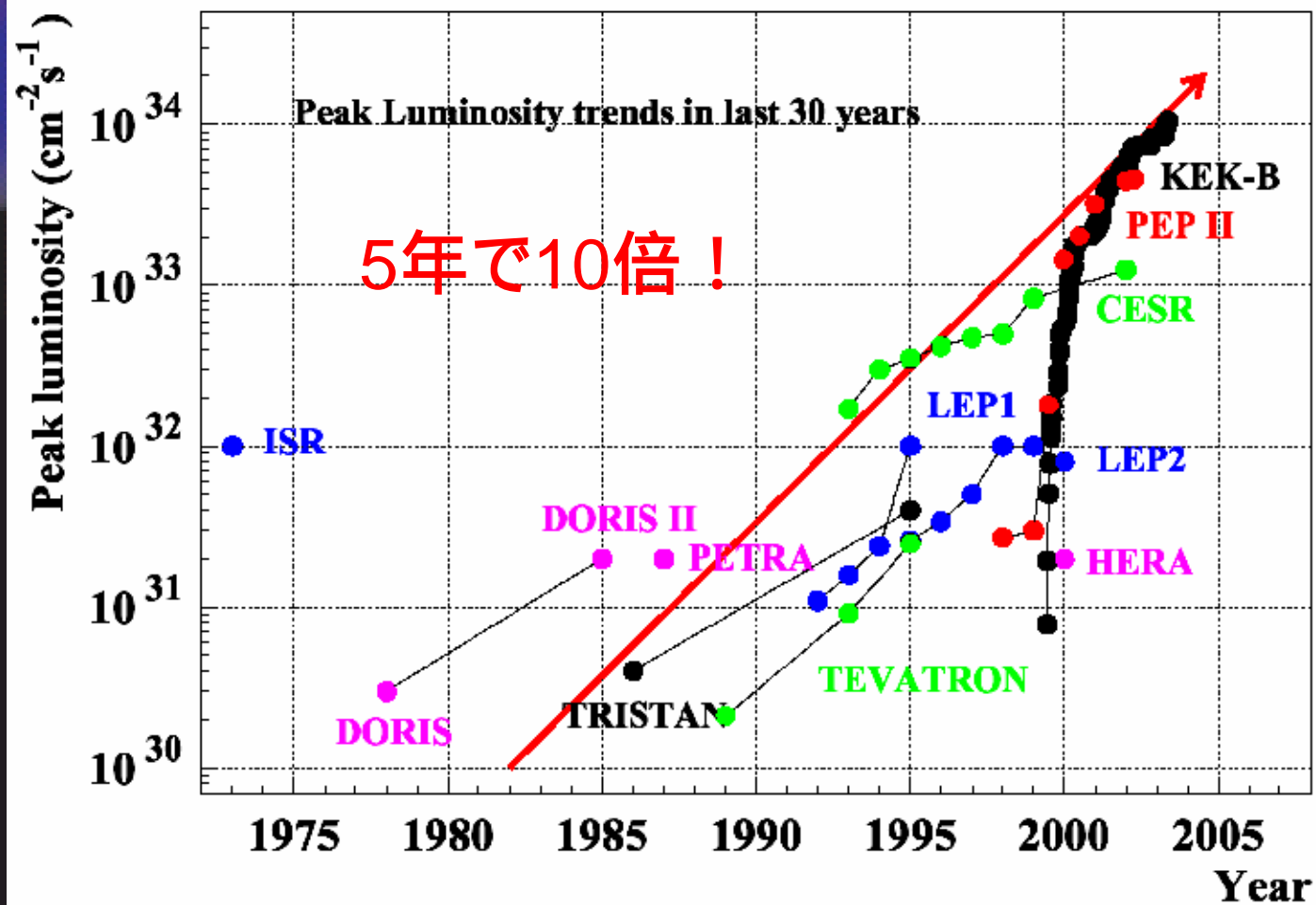
$l \rightarrow l' \gamma$ in SUSY



$\tau \rightarrow \mu\gamma$ / $\tau \rightarrow e\gamma$ 崩壊の探索



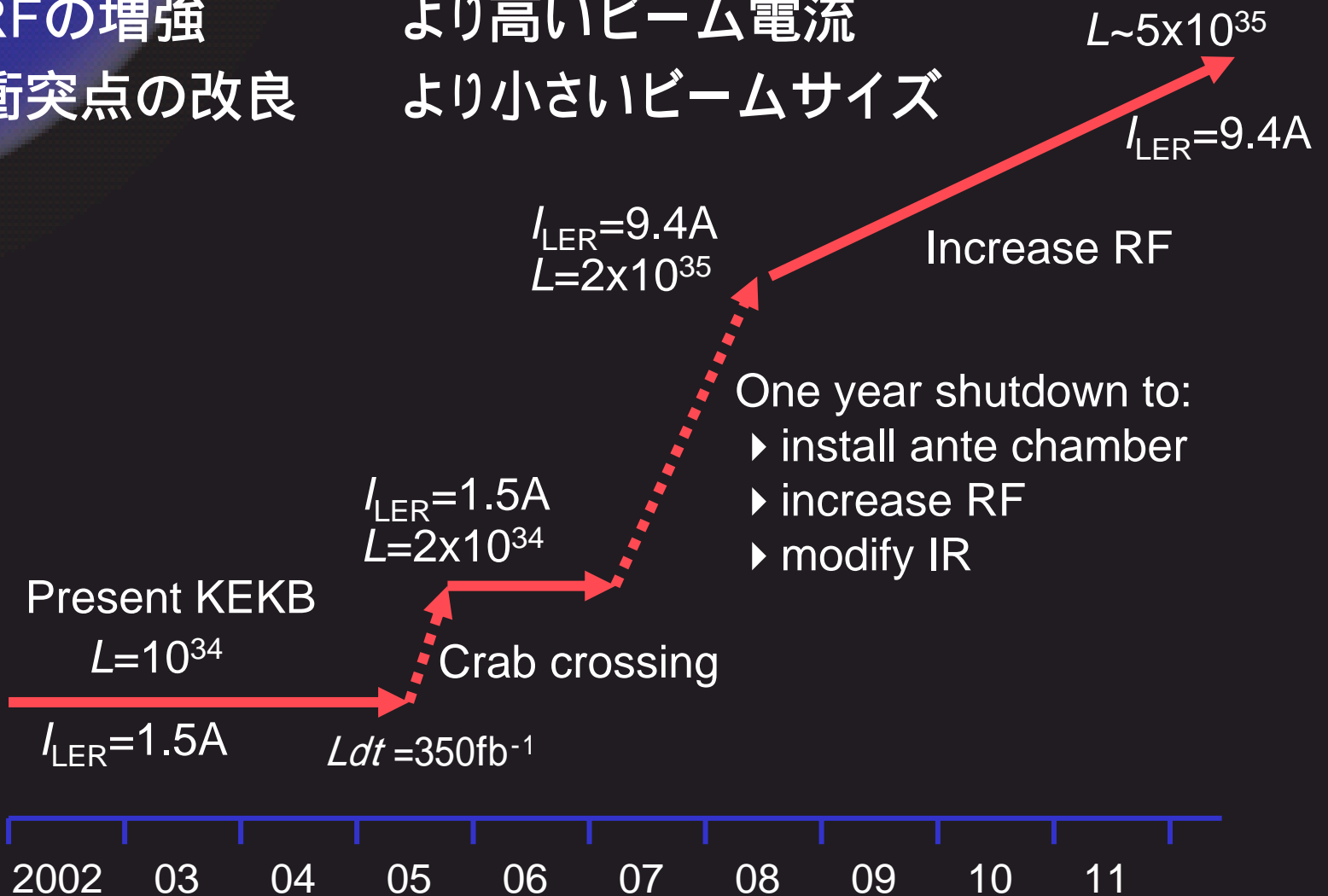
加速器ルミノシティの変遷



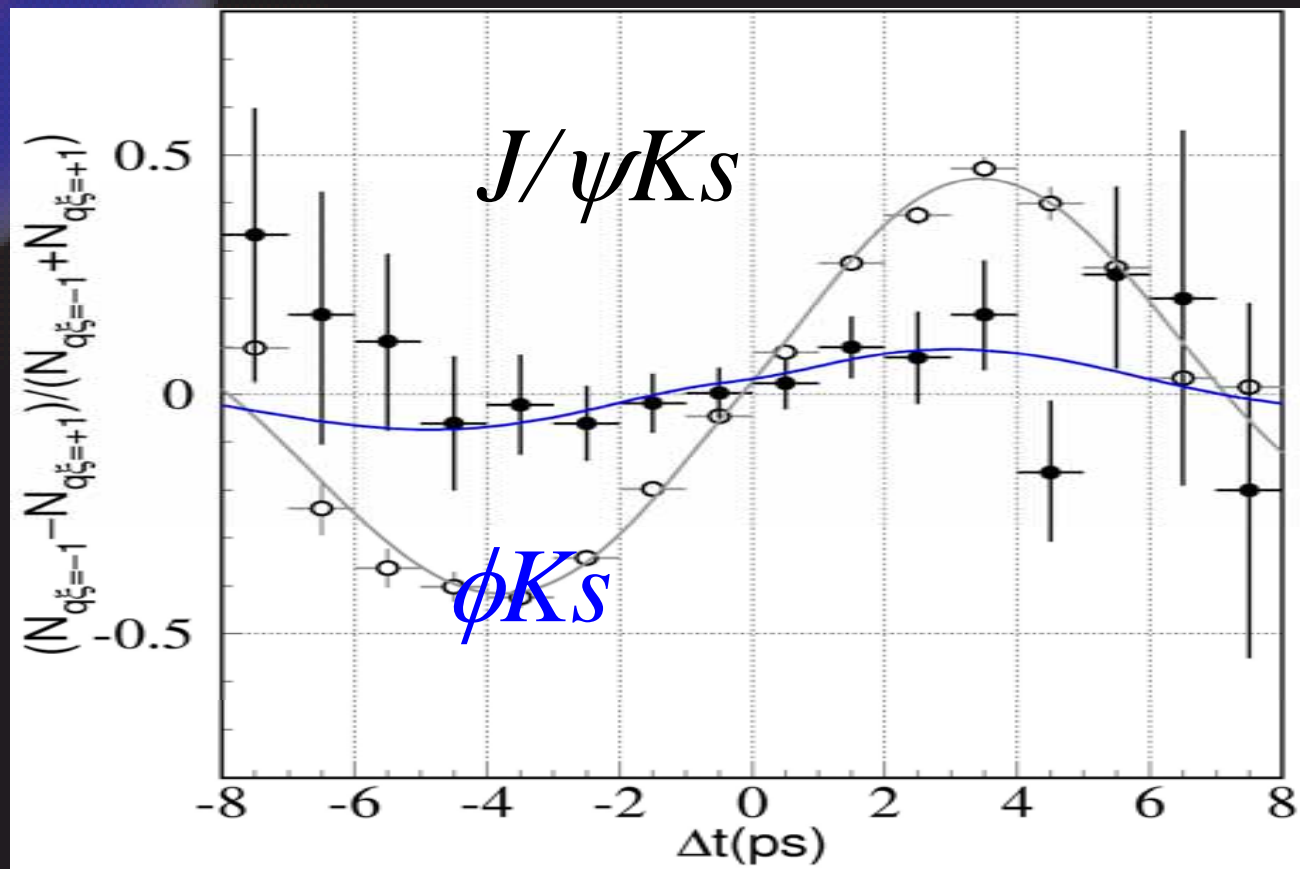
Super B Factory

目標ルミノシティ = $5 \times 10^{35} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

- RFの増強 より高いビーム電流
- 衝突点の改良 より小さいビームサイズ



スーパーBファクトリでは



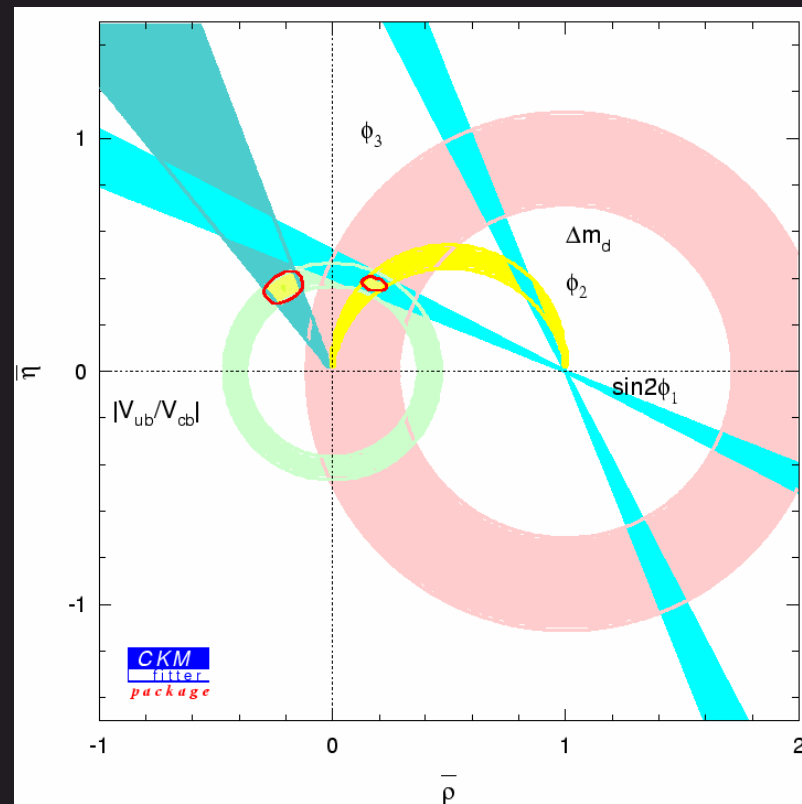
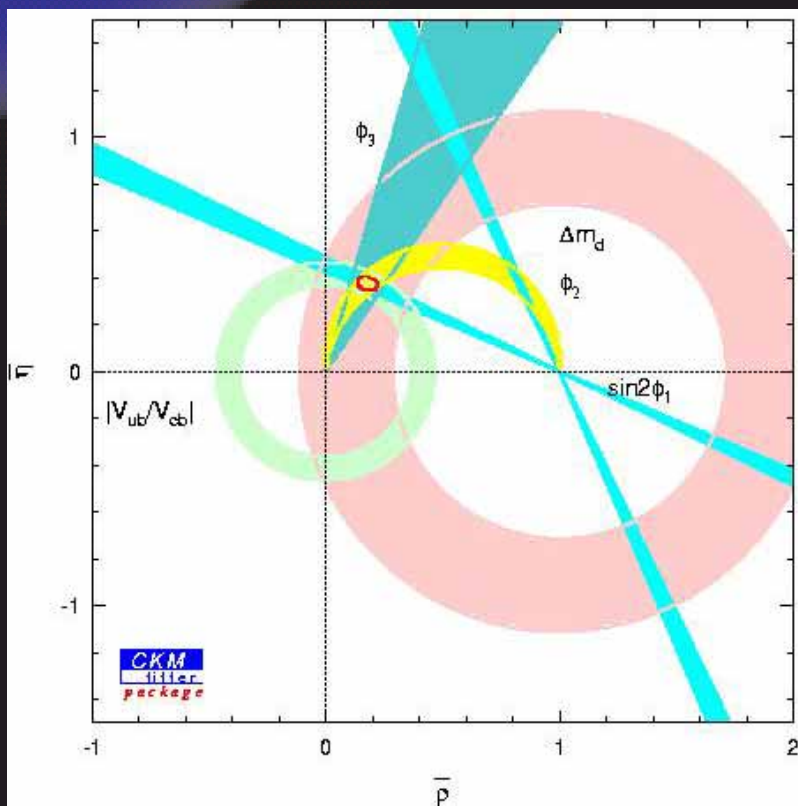
もし真の値が、現在(昨年8月)のBelleとBaBarの平均値のままで、 5 ab^{-1} のデータがあると、 ϕK_s モードだけで 6.2σ の有意な差が観測できる

CKM ユニタリティ三角形は閉じるか？

Yes!

5 ab⁻¹

No!

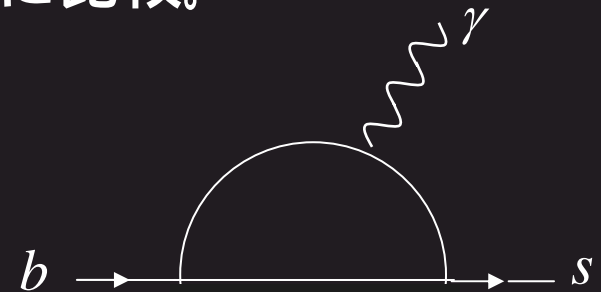


高輝度Bファクトリーで目指すもの

- CP対称性の破れの測定

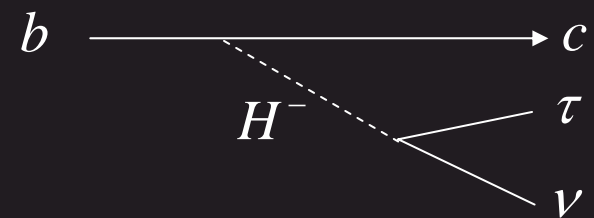
色々な崩壊に現れるCPの破れを精密に比較。

- 標準理論の厳密な検証
- 新しい物理の探索
- 新しい物理のフレーバー構造



- B中間子の稀崩壊探索

- FCNC 崩壊 $b \rightarrow sll, sv\bar{\nu}$ etc.
- タウ崩壊 $b \rightarrow c\tau\nu, \tau\nu$ etc.



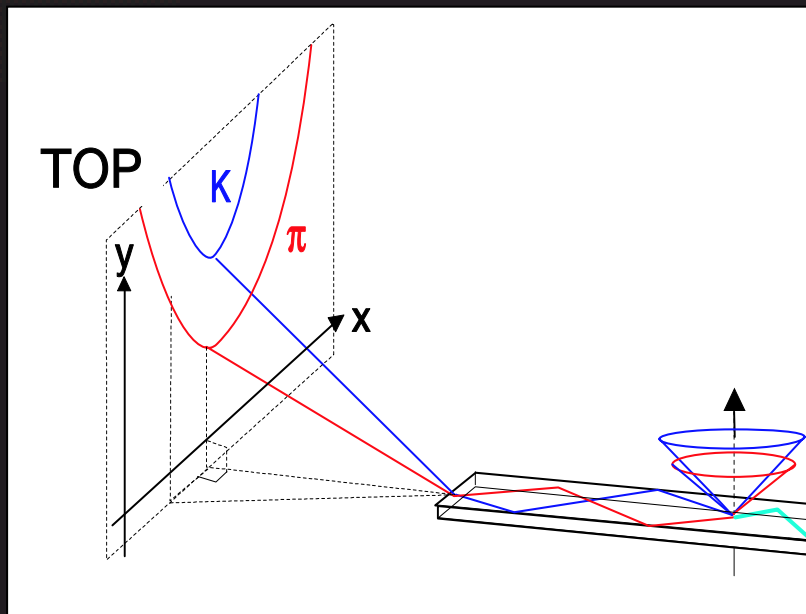
- タウの稀崩壊探索

- LFV

ループ効果を使った
高エネルギー粒子の探索

TOPカウンター

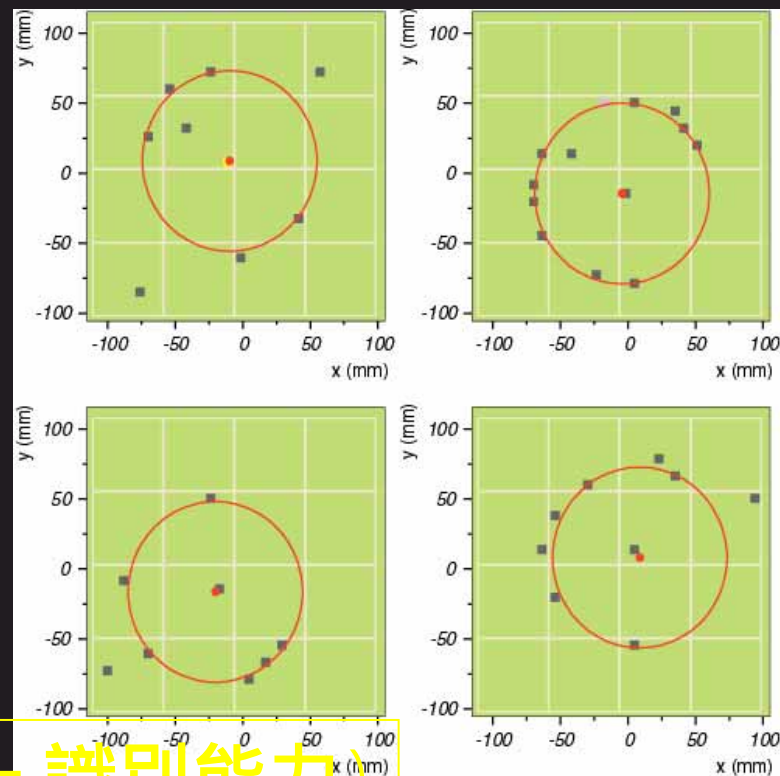
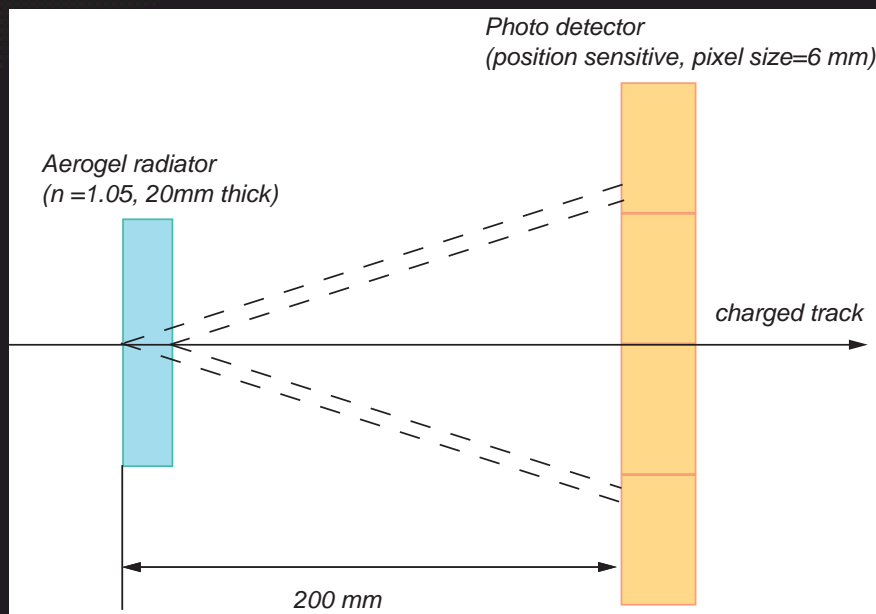
- 石英バーで発生するチェレンコフ光の全反射を利用した K/π 識別用検出器。
- 各チェレンコフ光子の伝播時間 (Time-Of-Propagation) を 50ps 程度の時間分解能で測定する。



独自のアイデア。究極の時間検出を目指す。

エアロジェルRICH

- シリカエアロジェル($n=1.05$)を輻射体とするリングイメージング型チェレンコフ検出器。
- 高透過率ゲルの製作に成功。



原理性能を確認 (4s 以上の K/π 識別能力)

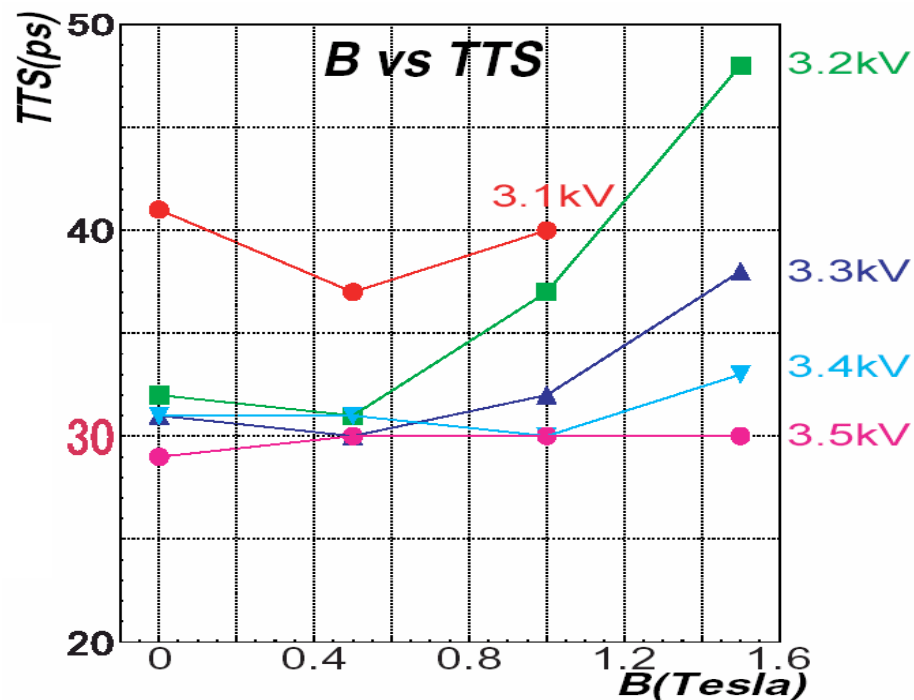
新しい光検出器の開発

粒子識別装置のための要求性能

- 高時間分解能 (<50ps)
- 磁場耐性 (1.5テスラ)
- 位置分解能 (~5mm)
- 高い有効面積率

MCPを電子増幅に用いた
新型PMTを開発。

強磁場中での基本性能を確認
ゲイン > 10^6 、時間制度 = 30ps(σ)



まとめ

