

Super B Factory での物理

研究会「Super KEKBが拓く物理」

2007年11月12日

石野宏和

(東京工業大学)

<http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/2004/07/text/>



Hubble Ultra Deep Field

Hubble Ultra Deep Field: 人類が見た最も深い宇宙の姿

Hubble Ultra Deep Field

長時間の撮像

人類がみた最も深い
宇宙

深宇宙・宇宙発展への
知見

論文数～500

Super B factory (SBF)

大強度ルミノシティ

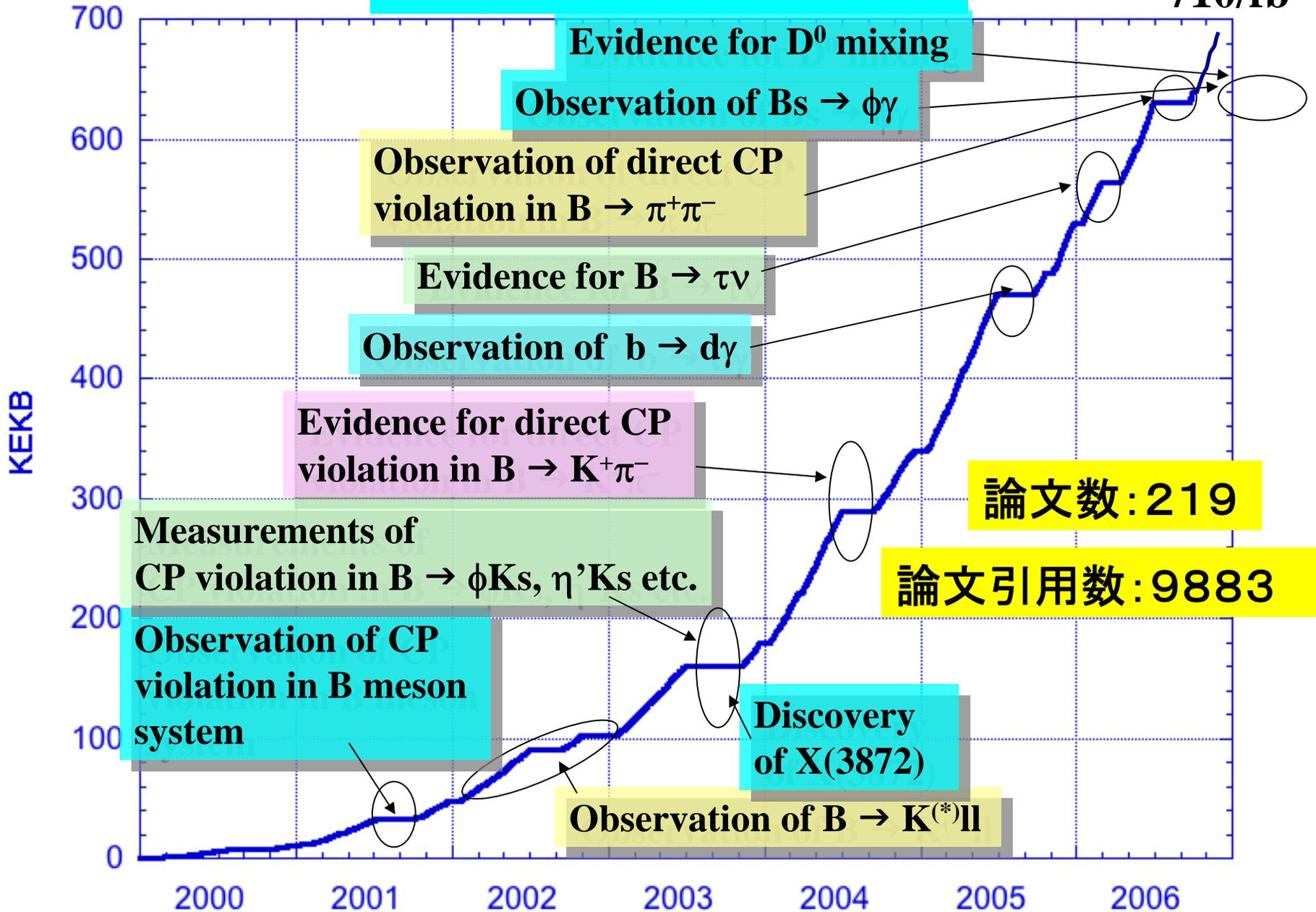
人類が見る最も微細な
(エネルギーの高い)
世界

標準模型を越える物理
への知見

論文数～500
(私の個人的予想)

Belleの主な結果

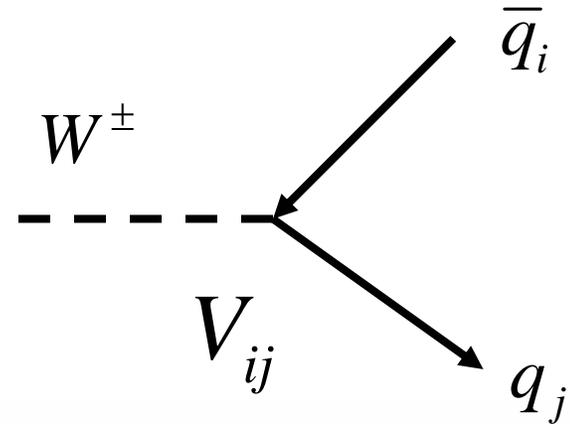
710/fb



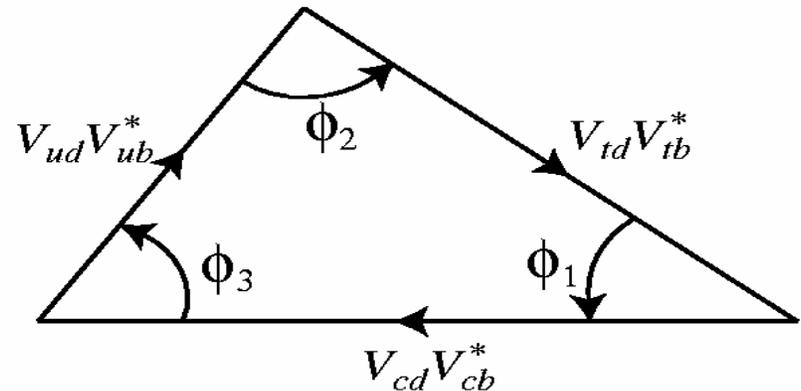
Bファクトリーでのフレーバー物理

Cabibbo-Kobayashi-Maskawa行列

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

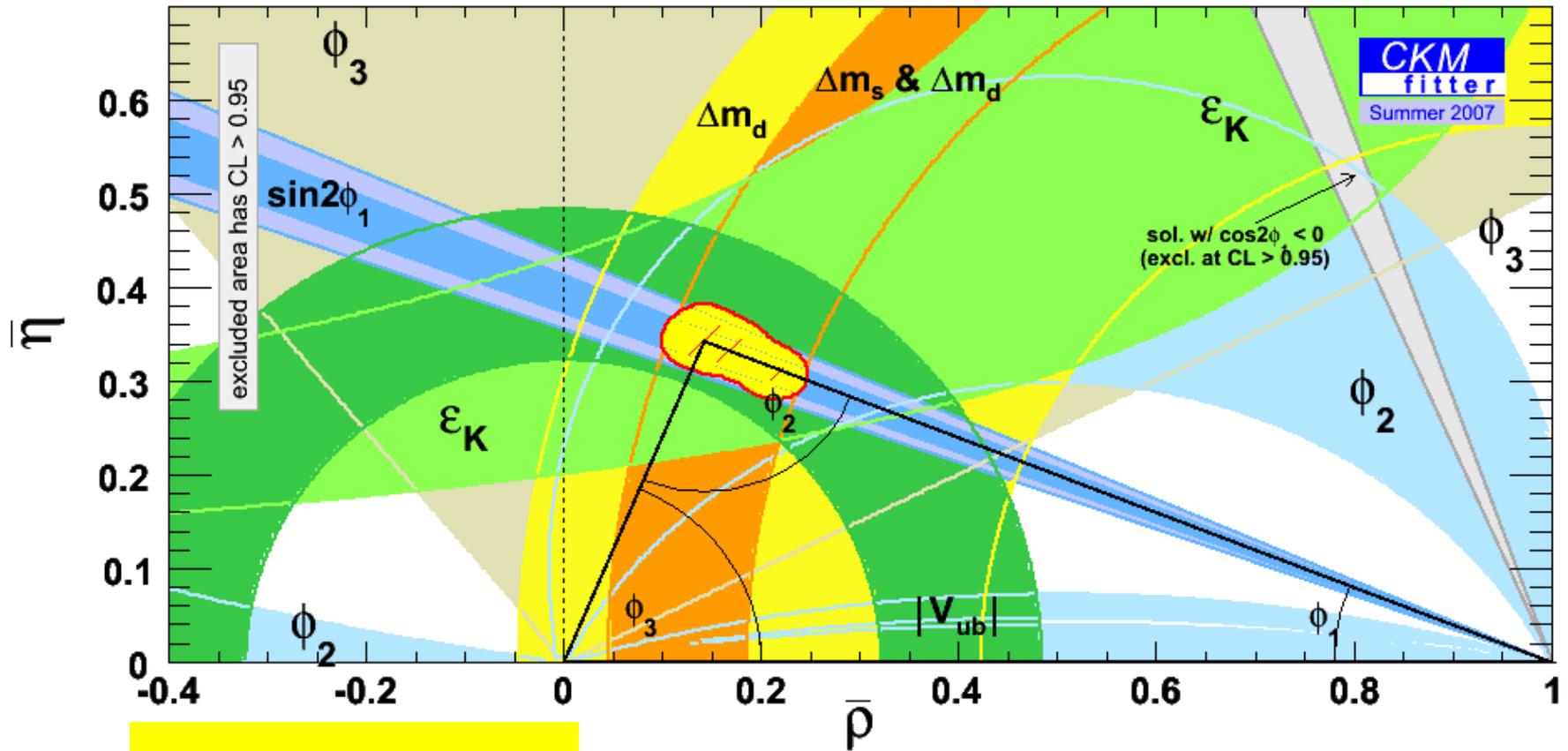


- フレーバーを破る相互作用の大きさと位相の測定
- 標準模型を越える新物理粒子との相互作用の探索



ユニタリー三角形

ユニタリー三角形の測定 (2007)



$$\phi_1 = (22 \pm 1)^\circ$$

$$\phi_2 = (88^{+6}_{-5})^\circ$$

$$\phi_3 = (77 \pm 30)^\circ$$

$$\phi_1 + \phi_2 + \phi_3 = (187 \pm 30)^\circ$$

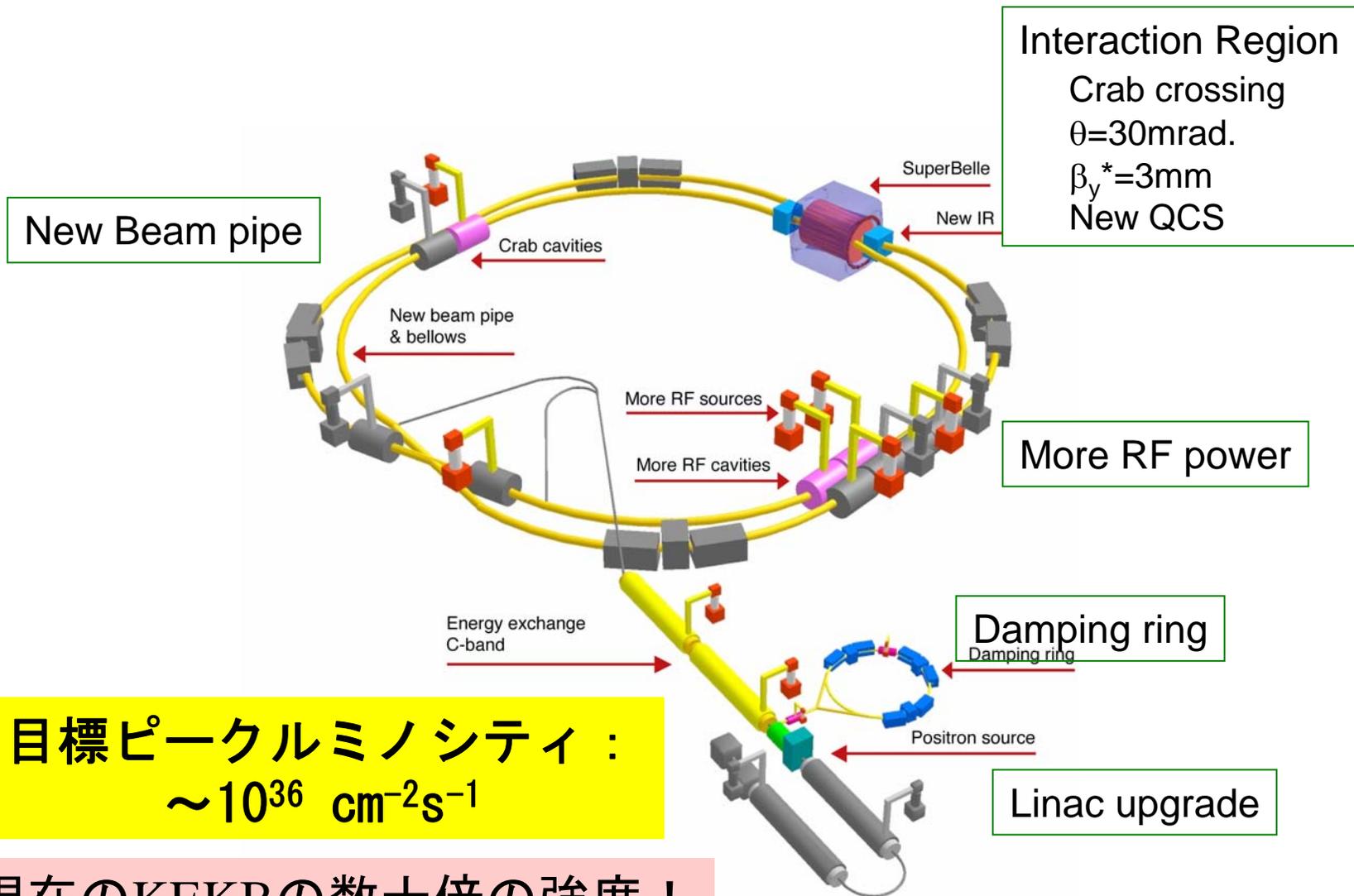
Super B Factory (SBF) の意義

- Bファクトリーの成果
 - CKM行列が10%の精度で検証された。
- 今後2010年代の課題
 - 標準模型を越える新物理の探索
- どのように新物理を探すか？
 - エネルギーフロンティア (LHC)
 - ルミノシティフロンティア (SBF)
- SBFでの新物理探索
 - 新物理の効果は10%のオーダーで出現
 - 1%のオーダーの超精密測定が必要

SBF の物理とその関連



Super KEKB とは



Interaction Region
Crab crossing
 $\theta=30\text{mrad}$.
 $\beta_y^*=3\text{mm}$
New QCS

New Beam pipe

More RF power

Damping ring

目標ピークルミノシティ：
 $\sim 10^{36} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

現在のKEKBの数十倍の強度！

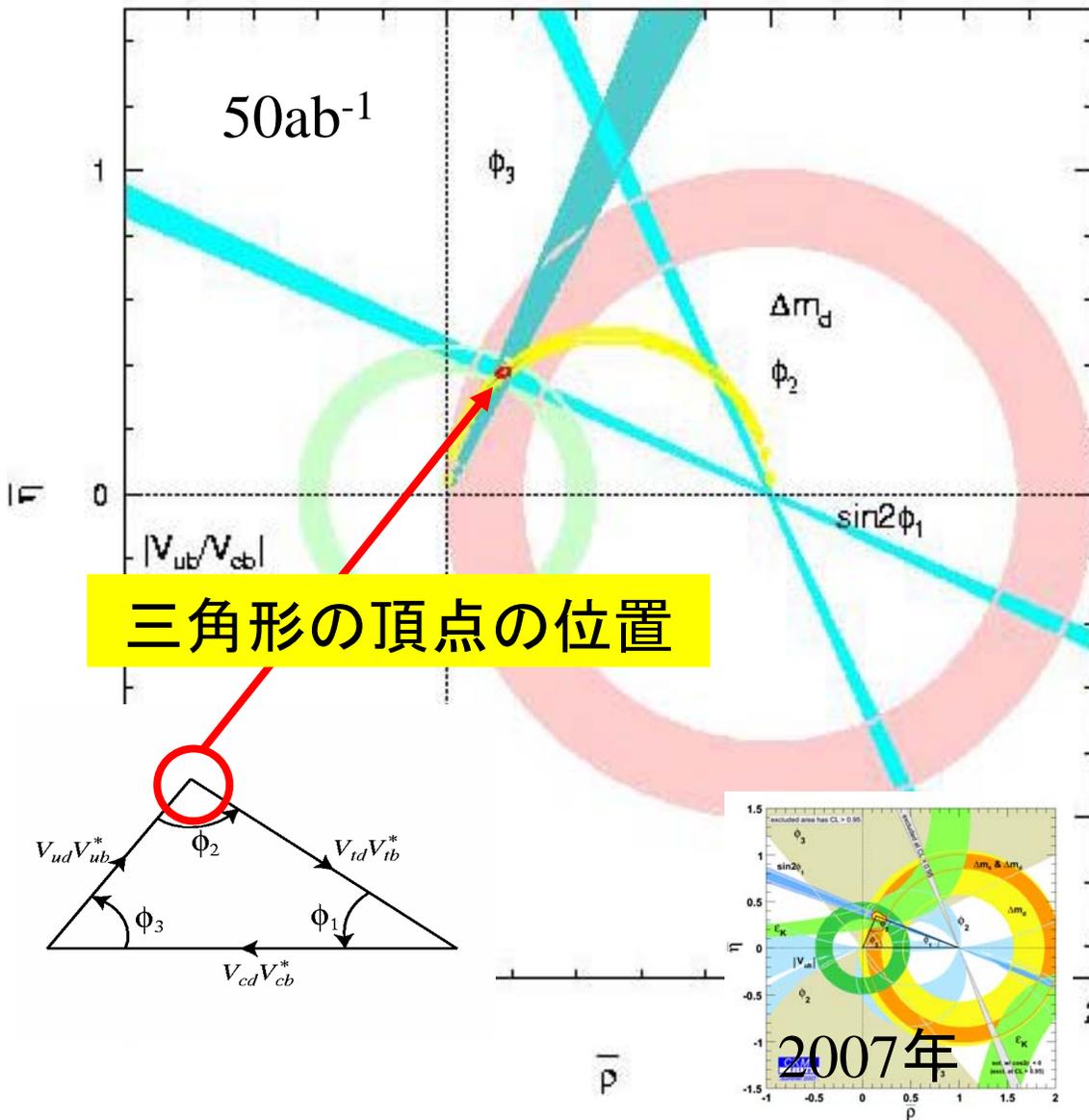
Super KEKB

- 2007年にクラブ空洞稼動開始
- 2009-2012年にアップグレードのためにシャットダウン
- 最終目標積分輝度 50 ab^{-1}
 - B factory の50 倍
 - 500億個のB中間子
 - charm / τ 粒子も同程度生成
 - 系統誤差・理論的不定性が誤差の限度になるデータ量
- 第3世代クォークとレプトンのスーパーフレーバー工場

A stylized illustration of a mountain range with a prominent peak in the center, rendered in shades of green and yellow against a blue gradient sky. The text is overlaid on the mountain.

CKM行列**超**精密測定

SBFのユニタリー三角形



三角形の頂点の位置

1%のオーダーでの
三角形の角度・辺の
長さの超精密測定



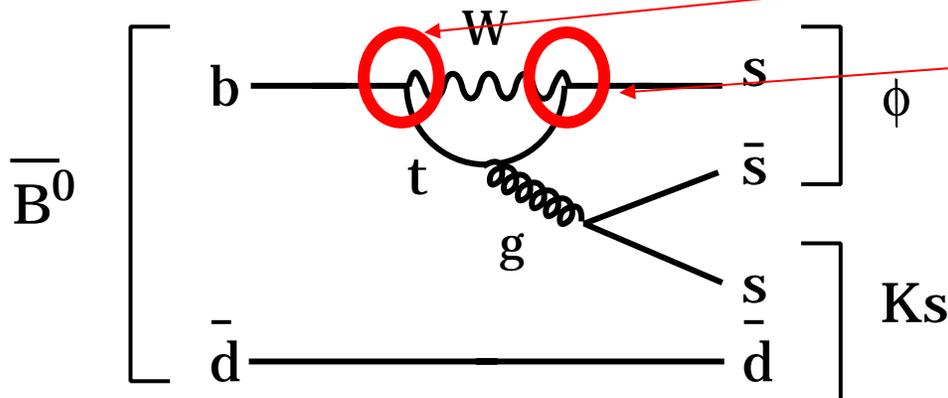
標準模型超精密検証と
新物理現象発見への
足がかり



新しいCPの破れ測定

新しいCPの破れ

標準模型での崩壊の仕方

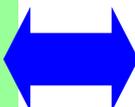


SBFは相互作用の大きさ・位相を超精密に測定

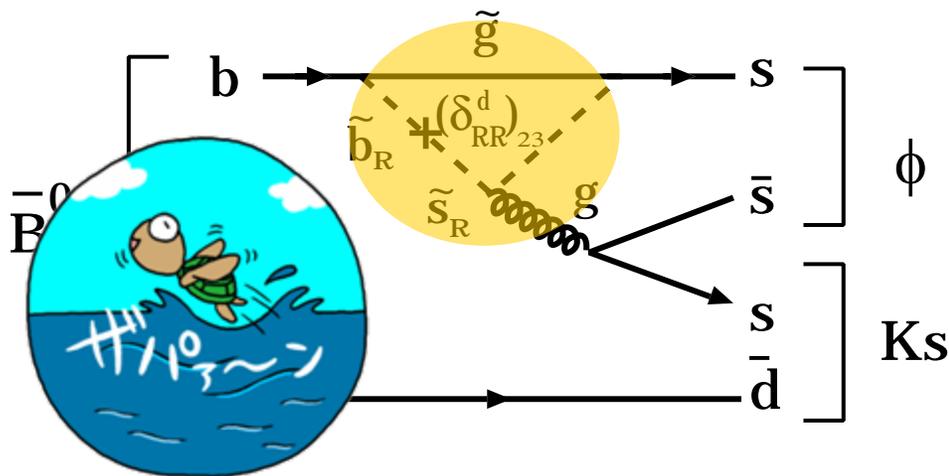


標準模型での
CPの破れ方を
正確に予言

測定
結果



新しいタイプの崩壊の仕方

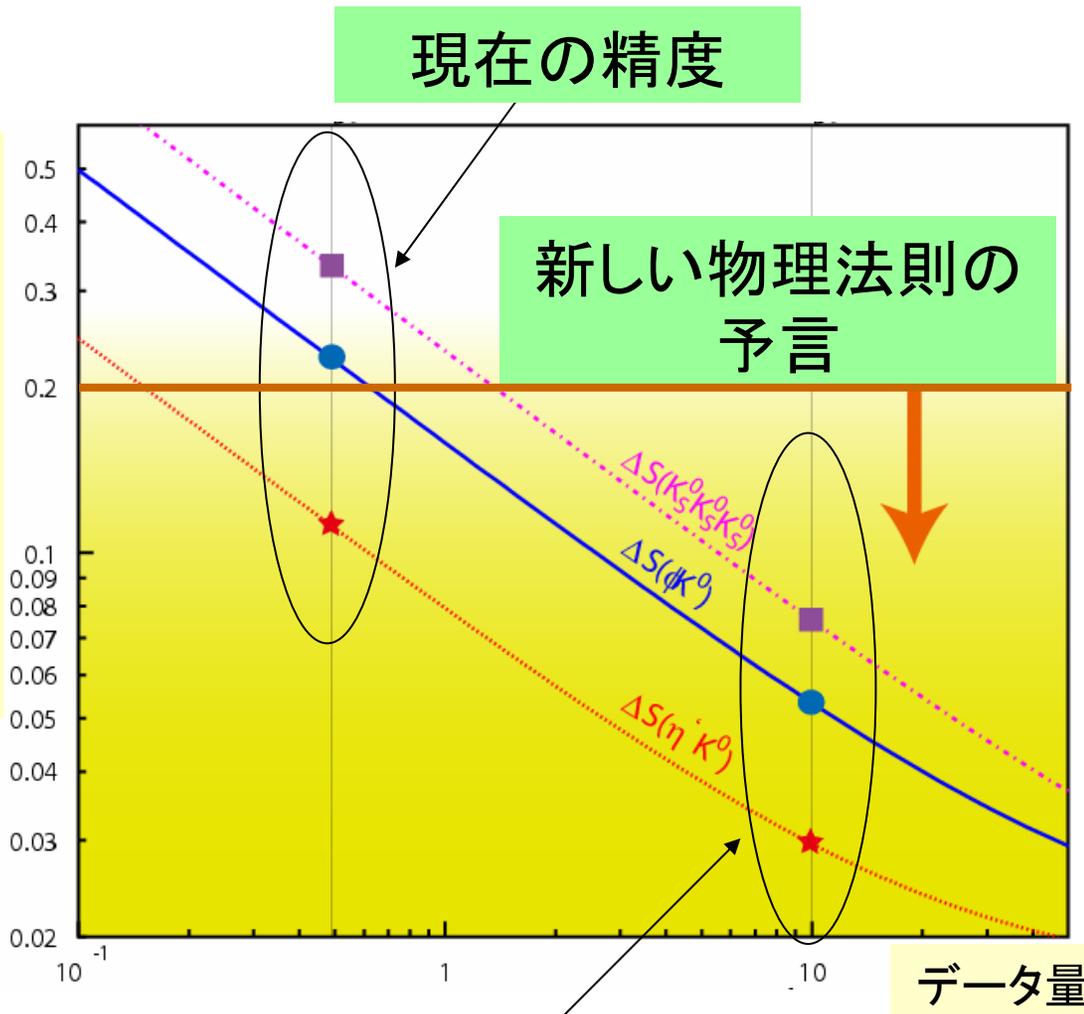


もし矛盾が
あれば

新しいタイプの相互作用の発見

新しいCPの破れ

CPの破れ測定精度



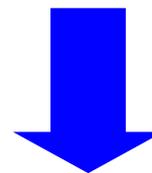
現在の精度

新しい物理法則の
予言

SBFが到達できる精度

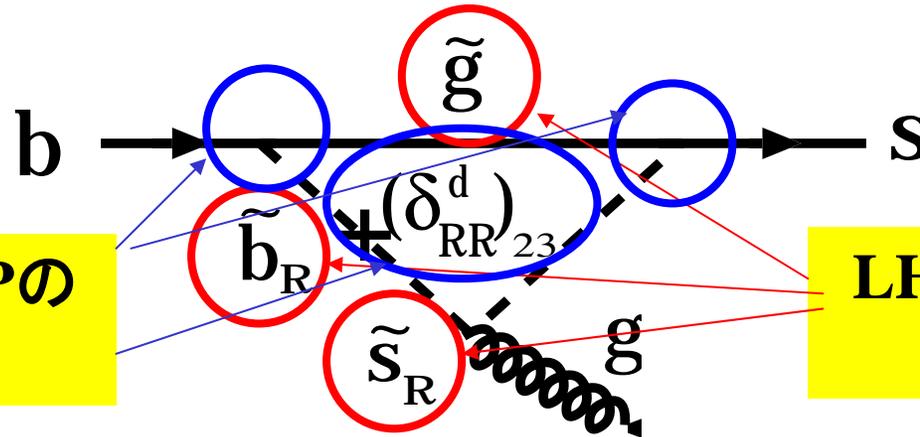
データ量

SBFでは、数十 ab^{-1} のデータ量で、新しい物理法則が予言するCPの破れに感度を持つことができる



新しい相互作用の大きさ
と位相の決定

新しい物理法則の決定



SBFによるCPの
破れ測定



結合の大きさ・位相
の決定

LHCによる直接
生成観測



質量・寿命・スピン
の決定

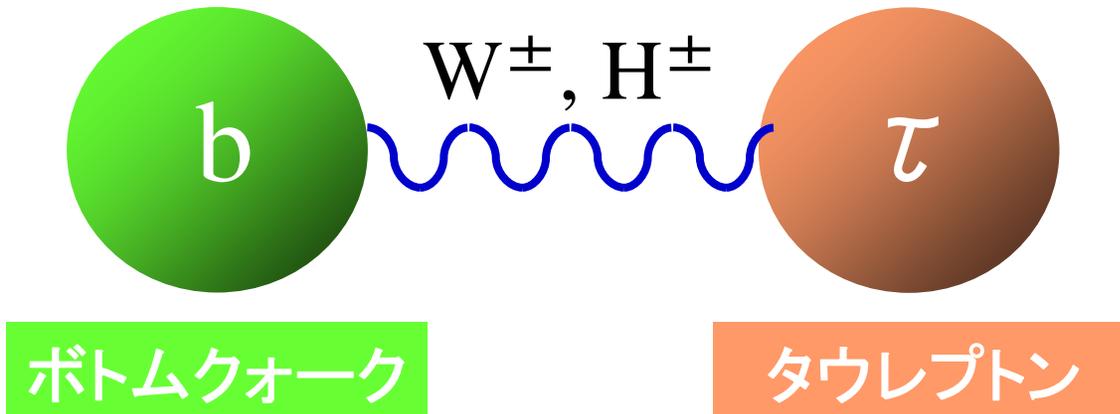


新しい物理法則の決定

A stylized illustration of a mountain range. The central peak is covered in snow and is highlighted with a bright yellow glow. The sky is a gradient of blue, and the foreground shows rolling hills in shades of green and blue. The text "新しい相互作用" is centered over the mountain.

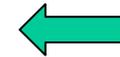
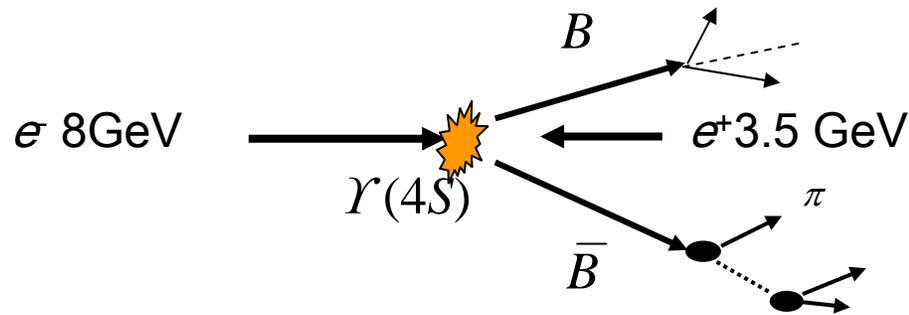
新しい相互作用

第3世代同士の相互作用

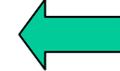


- 標準模型ではWボソンのみが相互作用
- 新しい物理では荷電ヒッグス粒子も相互作用
 - 質量が大きいほど結合は強い
- SBFで荷電ヒッグス粒子探索が可能
 - 終状態に複数のニュートリノを放出するため、特殊な検出方法を使用

SBFでの事象完全再構成法



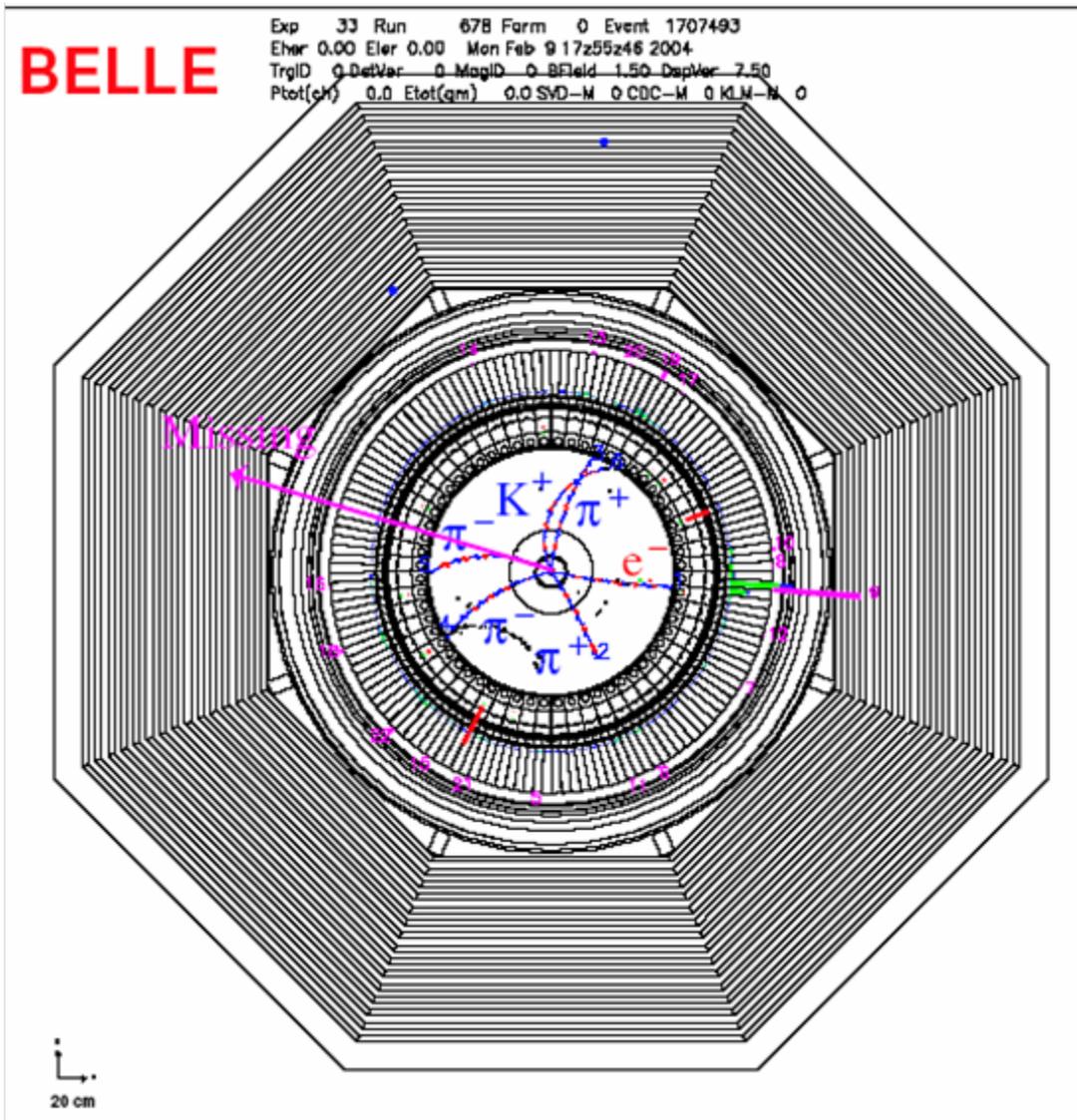
$D\tau\nu, \tau\nu, X\ell\nu, \dots$



ひとつのB中間子を完全
に再構成
 $B \rightarrow D\pi$ 等 ($\epsilon_{\text{tot}} \approx 0.3\%$)

- 2つのB中間子の片方を完全再構成
- 残りの検出粒子情報からもう一つのB中間子を再構成
- SBFでのみ可能な方法
 - LHC等ハドロン加速器ではほぼ不可能

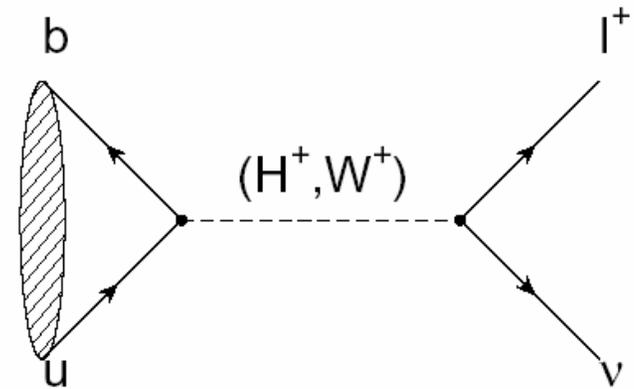
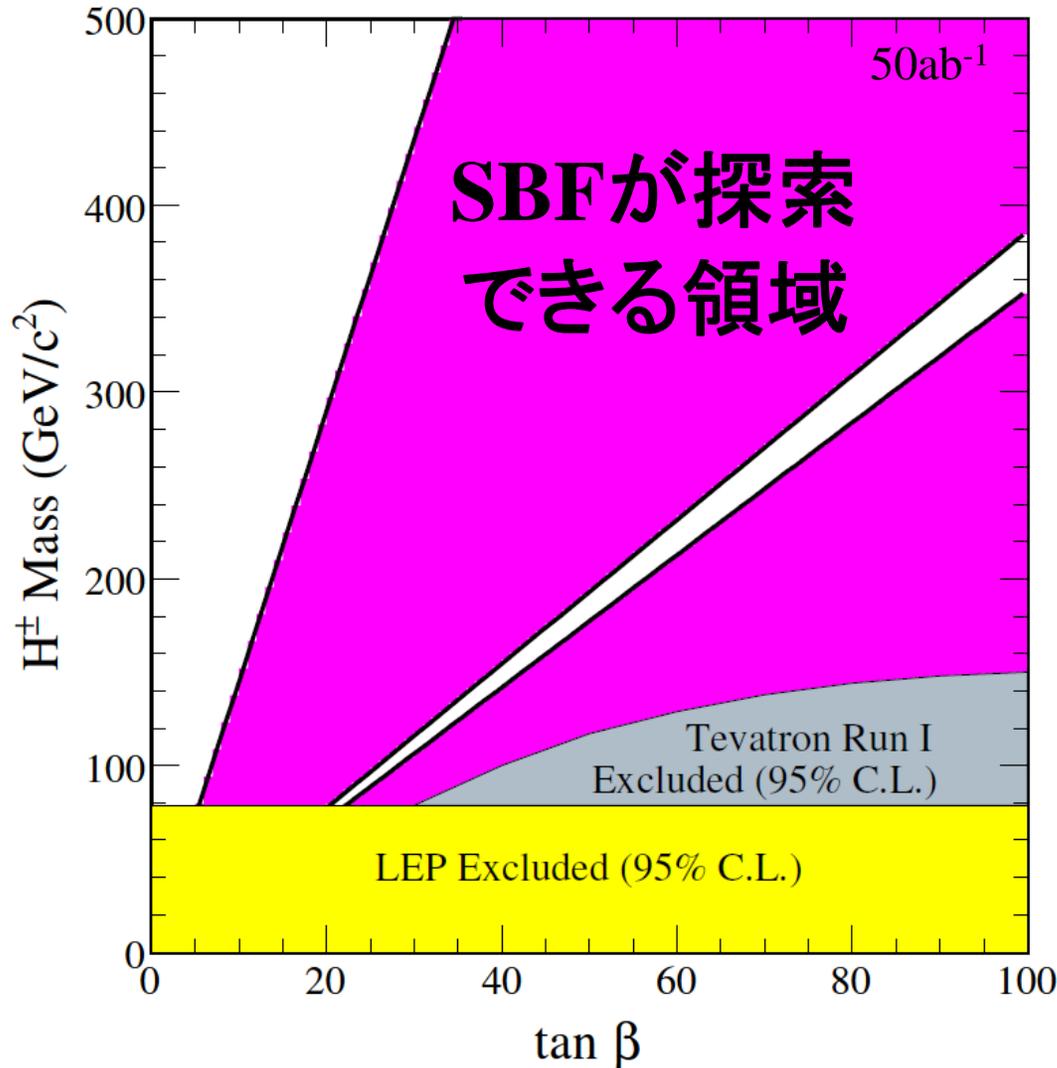
Belleでの完全再構事象例



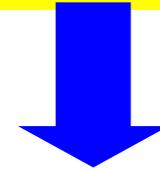
$$B \rightarrow D^0 \pi, D^0 \rightarrow K \pi \pi \pi$$

$$B \rightarrow \tau \nu, \tau \rightarrow e \nu \nu$$

$B \rightarrow \tau \nu$ 崩壊での荷電ヒッグス粒子



$B \rightarrow \tau \nu$ 崩壊分岐比測定により、荷電ヒッグス粒子による影響を測定



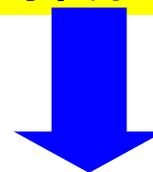
荷電ヒッグス粒子とb、 τ 粒子との結合定数測定

軽いダークマター探索

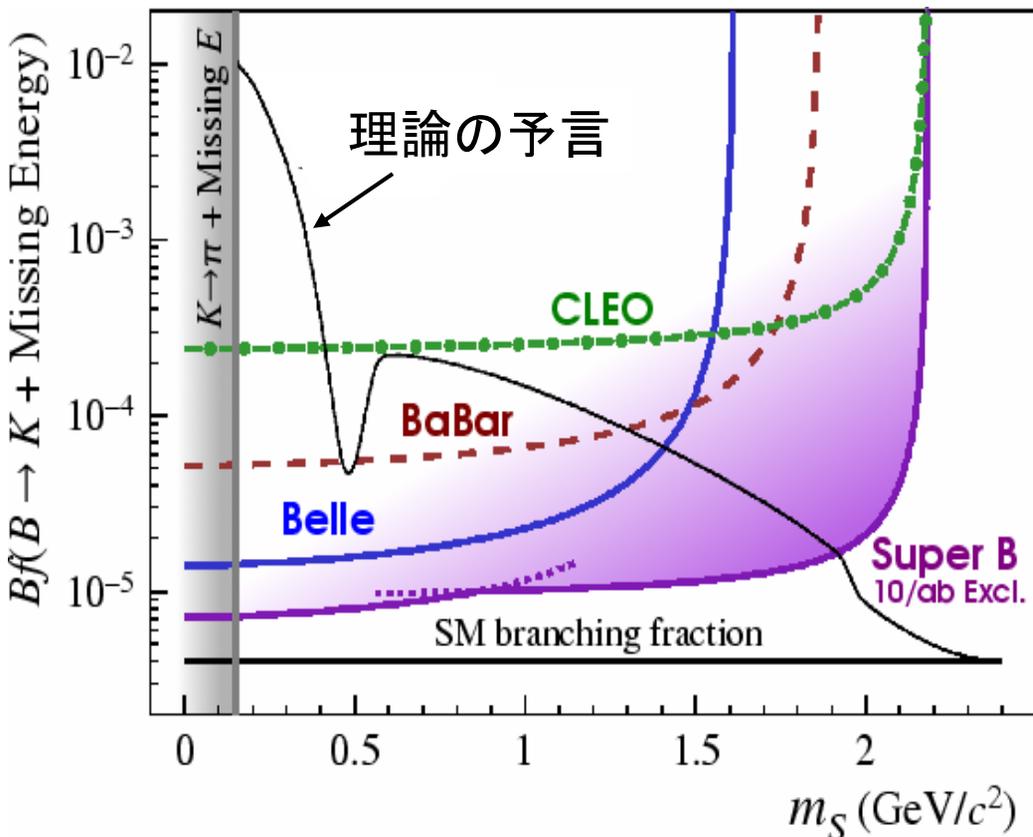
完全事象再構成法のもう一つの応用例

$$B \rightarrow K^{(*)} \nu \bar{\nu} [or \chi \chi]$$

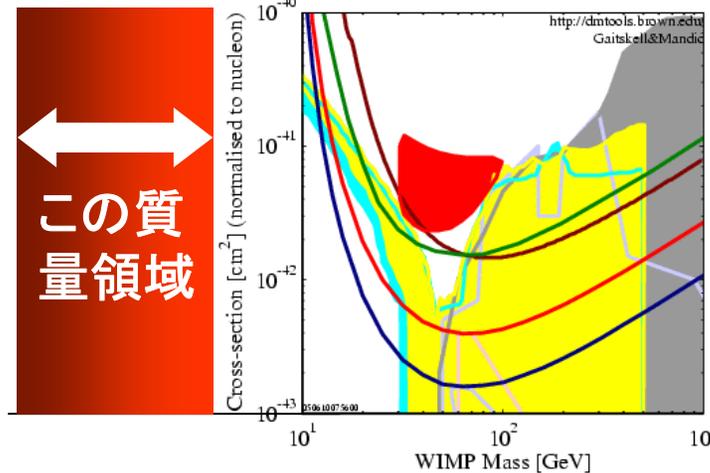
B → K^(*) ν ν 崩壊分岐比より軽いダークマター探索が可能



軽いダークマター探索を行う唯一の方法

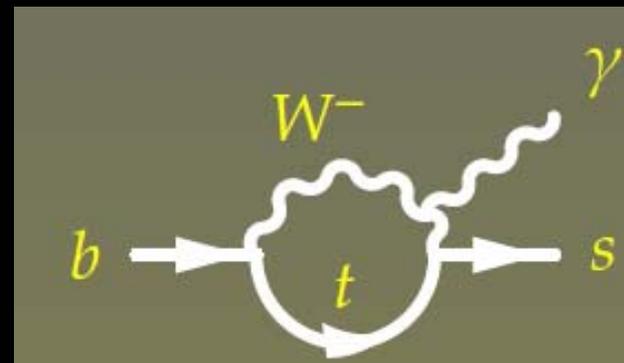


PRL 93, 201803 (2004)



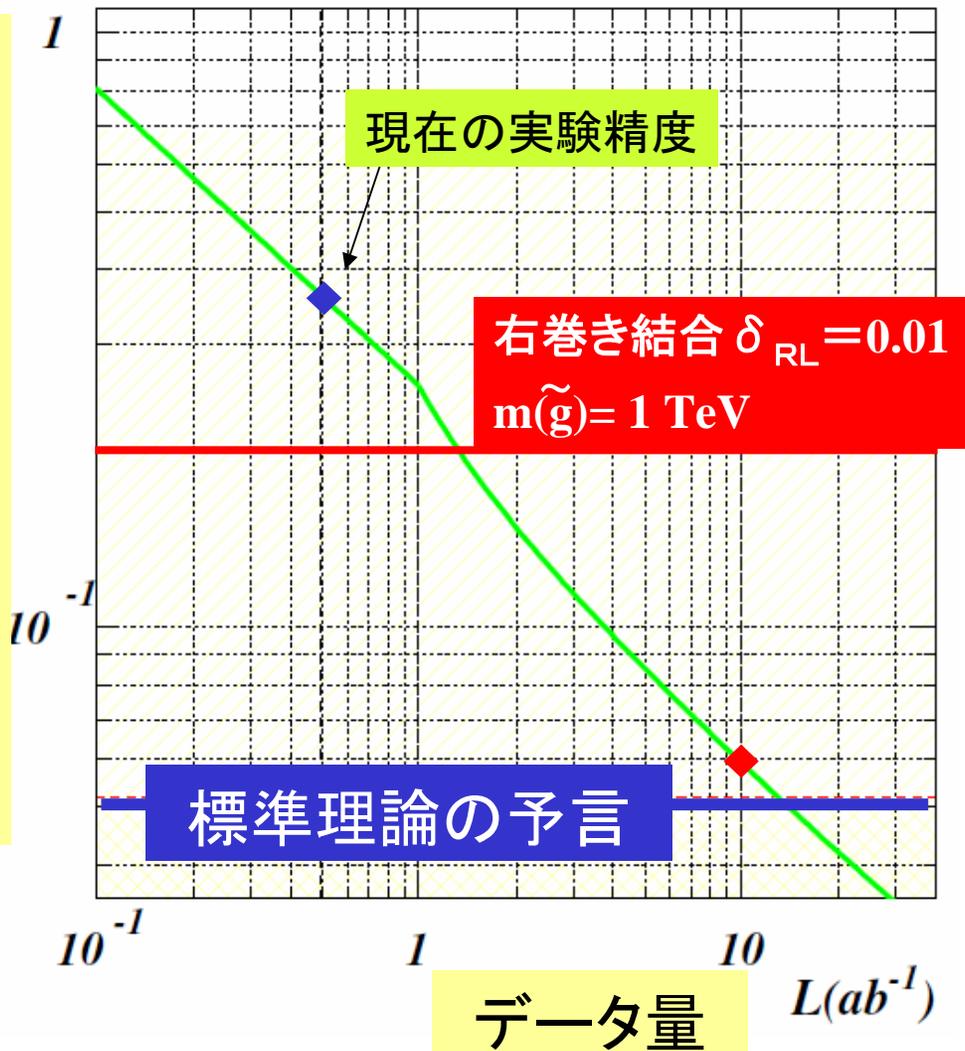
左右の謎

- 標準模型では、左巻きの粒子のみ弱い相互作用をする。
- 右巻き粒子相互作用はどこに？
- $b \rightarrow s \gamma$ 崩壊で謎を探る。
 - 標準模型では、 γ はほぼ100%左巻き
- 右巻き相互作用があると、
 - 大きなCPの破れが現れる
 - γ に偏光がみられる

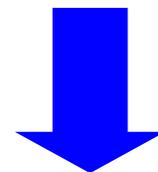


$B^0 \rightarrow K_S \pi^0 \gamma$ でのCPの破れ

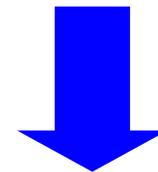
CP非保存の測定精度(感度)



数十 ab^{-1} のデータ右巻き相互作用に感度を持つことができる。

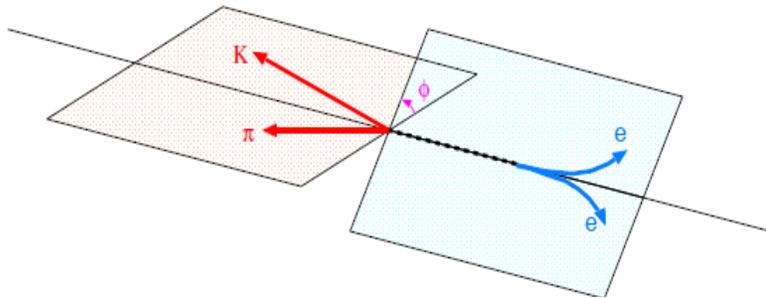


右巻き相互作用の発見または大きな制限

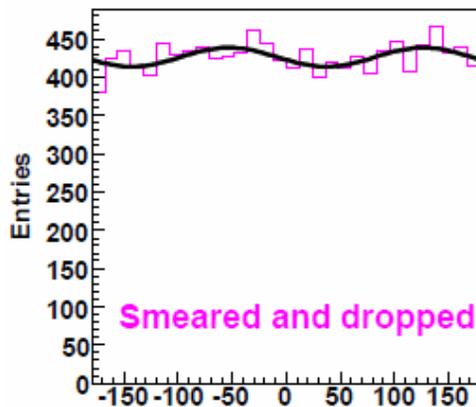


新しい物理法則研究への大きなヒント

γ の偏光の直接測定

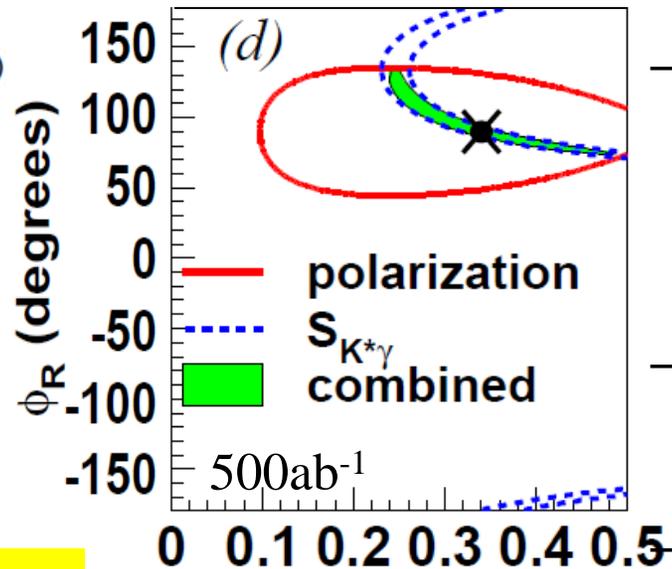


Grossman-Pirjol JHEP 0006,029(2000)



右巻き γ が混じるとモジュレーションが現れる

- $\gamma \rightarrow e^+e^-$ 電子対生成を利用
 - ビームパイプまたはシリコン検出器
 - 現Belle実験検出器では3%の確率で発生
 - SBFでのみ可能な測定



- タングステン箔を挿入、またはCdTeストリップ検出器を使えば5倍の検出効率
- 事象再構成アルゴリズムの改善も必要
- 挑戦者を求む!

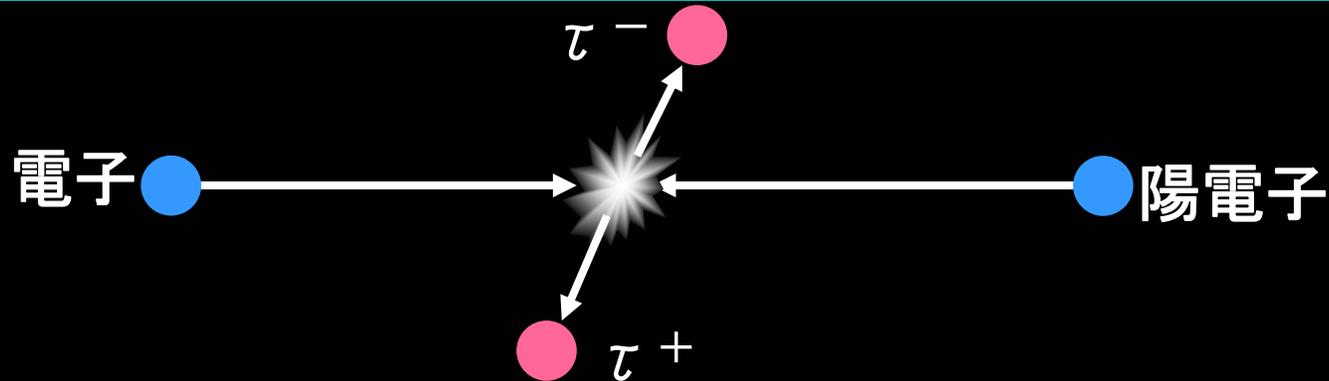
$$R = \frac{|F_L||F_R|}{|F_L|^2 + |F_R|^2}$$

hep-ex/0703039

A stylized illustration of Mount Fuji, the highest mountain in Japan, with its snow-capped peak and surrounding lower mountain ranges. The image uses a soft color palette of blues, greens, and yellows. The text 'τの物理' is centered over the mountain's peak.

τ の物理

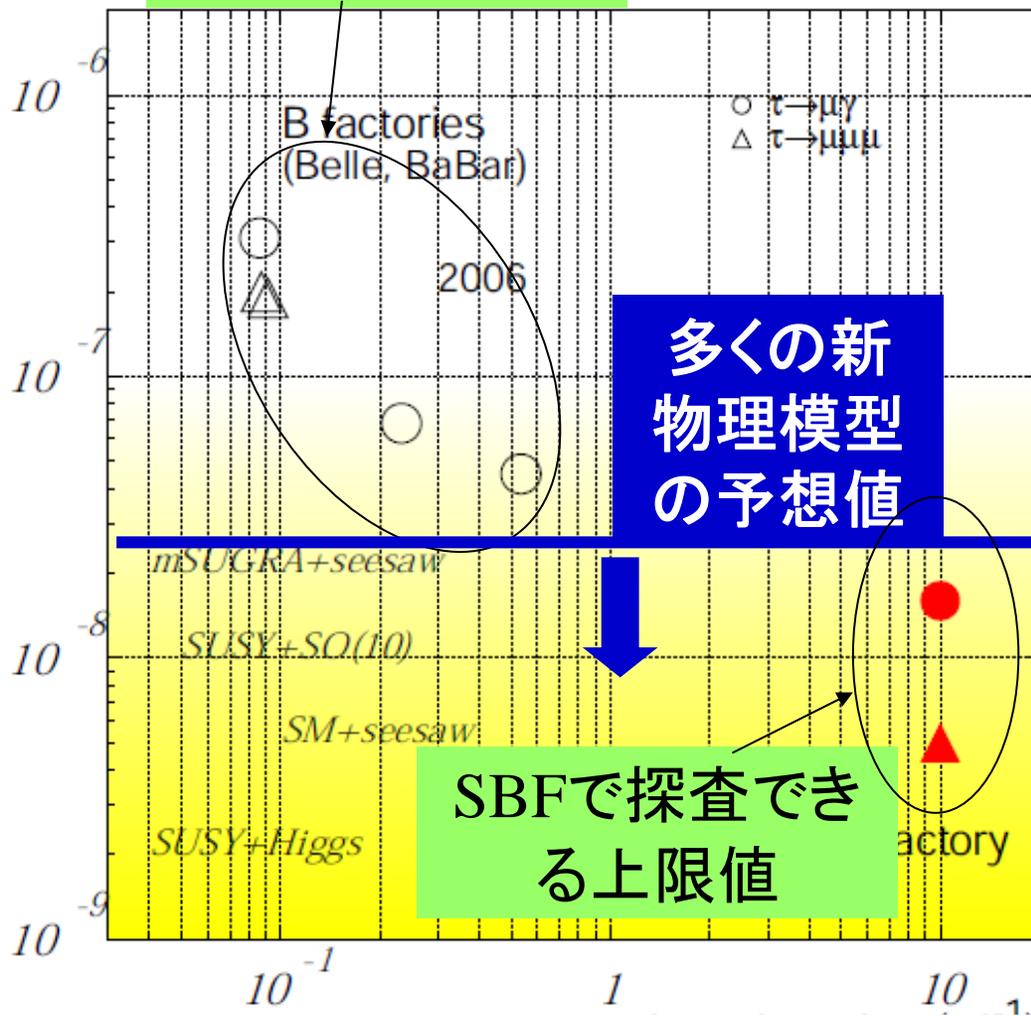
レプトン数の破れ



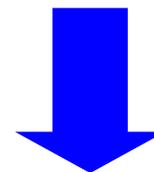
- SBFはB中間子とほぼ同数の τ 粒子も生成
 - スーパータウファクトリー
- τ レプトンからレプトン数の破れを探索
 - $\tau \rightarrow \mu \gamma$ 、 $e \gamma$ 、 $\mu \mu \mu$ 等
 - 荷電レプトンでのレプトン数の破れはまだ見つかっていない。
 - 標準模型はほぼ厳密にレプトン数を保存

$$\tau \rightarrow \mu \gamma, \mu \mu \mu$$

現在の上限値



τ 粒子崩壊での
レプトン数の破れ
の測定



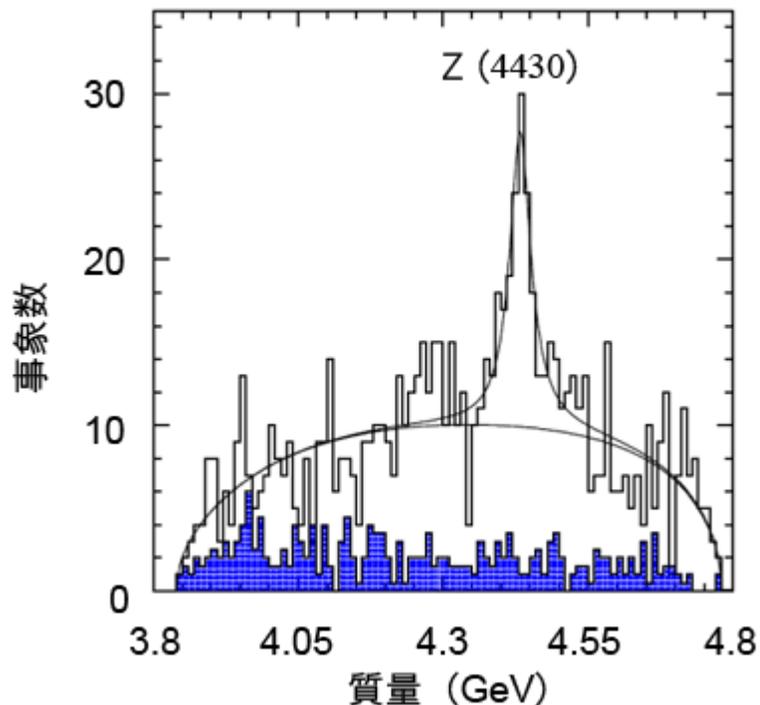
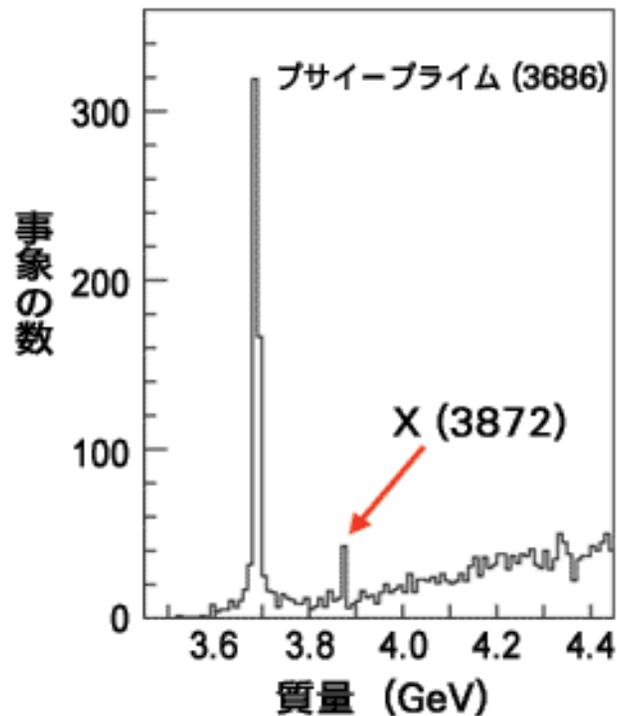
レプトンでの相互
作用の大きさから、
新しい物理模型
への制限

$\tau \rightarrow \mu \gamma$ 分岐比



共鳴粒子の研究

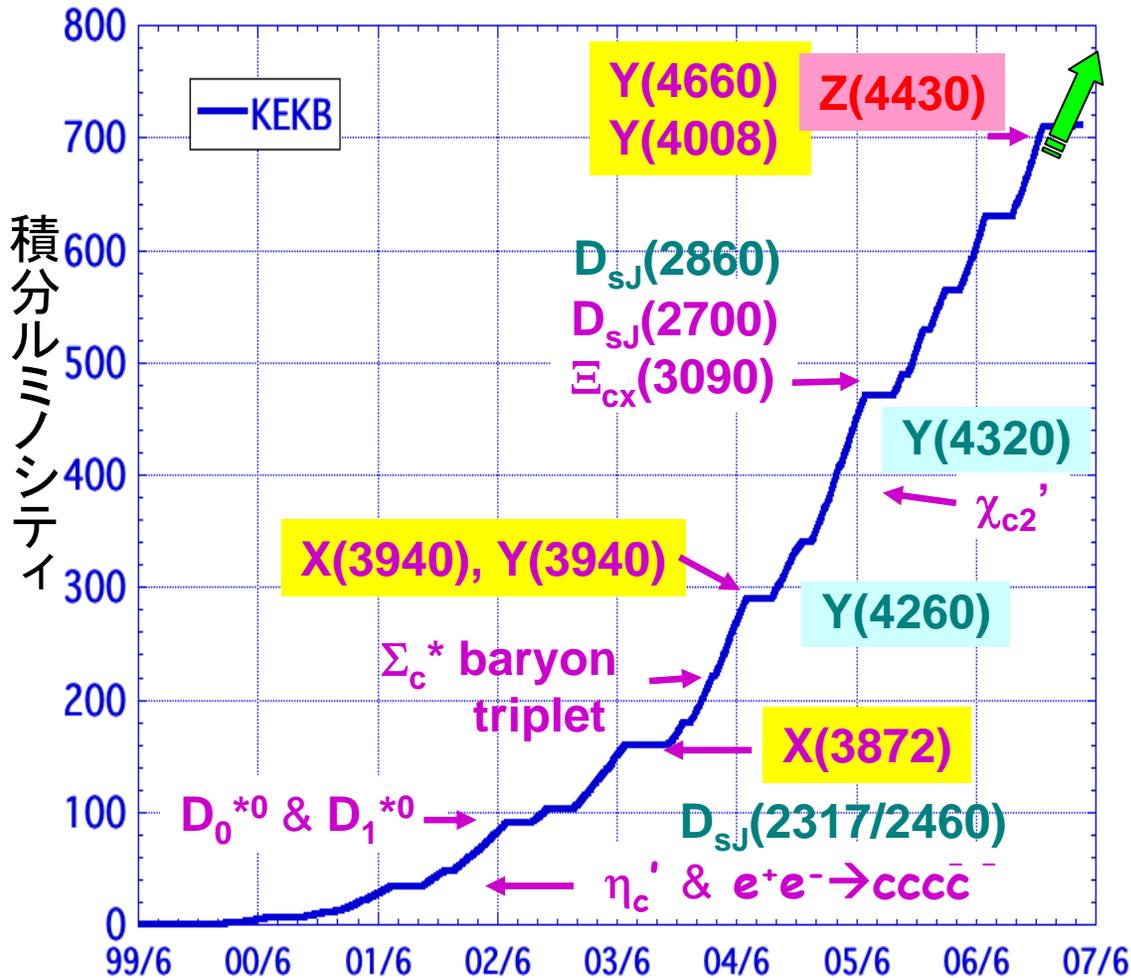
思いもよらなかつた共鳴粒子発見



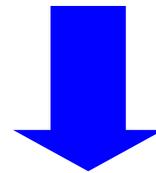
- 従来、クォーク束縛状態は、中間子 ($q\bar{q}$) またはバリオン (qqq) の形でしか見つかっていなかった。
- Bファクトリー実験により4クォーク状態 ($qqq\bar{q}$) がみつかった。

共鳴粒子の研究

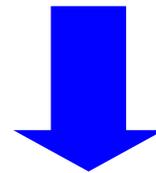
Bファクトリーで発見された新共鳴粒子



SBFにおける多くの新共鳴粒子の質量・自然幅・スピン・崩壊モードの測定。



共鳴粒子の正体解明

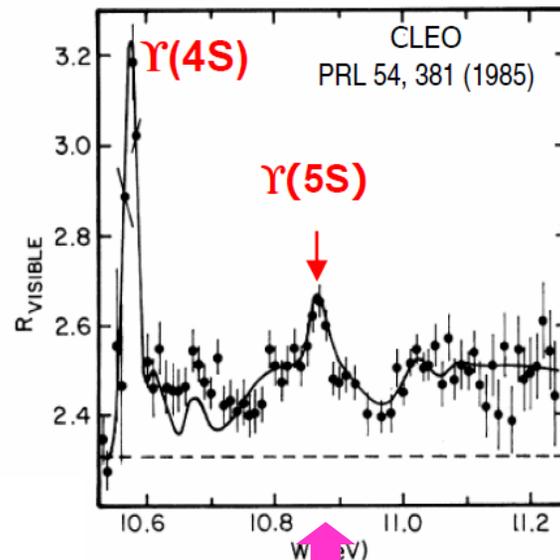
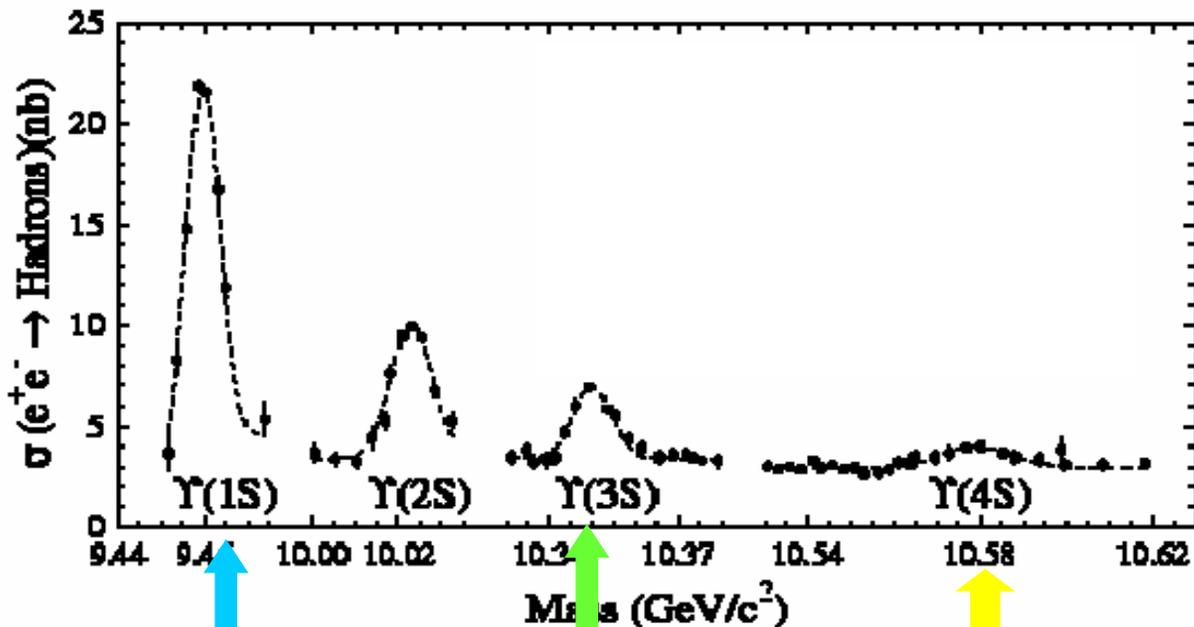


QCDの精密検査

A stylized illustration of Mount Fuji, the highest mountain in Japan. The mountain is depicted with a snow-capped peak and is rendered in shades of green and yellow. The Japanese text 'その他' (Sonota) is overlaid on the mountain's slope. The background is a clear blue sky, and the foreground shows rolling hills in various shades of green.

その他

SBFで重心系エネルギーを変える



η_b の探索
 α_s 測定

ダークマ
ター探索

B_d 、 B_u 、 $Y(4S)$
の物理

B_s 、 $Y(5S)$
の物理

τ 、 c の物理 radiative return, two photon を用いた共鳴状態研究

重心系エネルギーを変えることにより、さらに多種多様な物理
研究を行うことができる。

A stylized illustration of Mount Fuji, the highest mountain in Japan, depicted with a snow-capped peak and a soft, hazy atmosphere. The mountain is rendered in shades of light green and yellow, set against a clear blue sky. The Japanese text '終わりに' (At the end) is written in a dark blue, sans-serif font across the center of the mountain's peak.

終わりに

フレーバー物理の歴史から学ぶ

- 重い新粒子はループによる量子補正効果から発見されてきた。
 - チャームクォーク: K中間子混合や $K \rightarrow \mu \mu$
 - トップクォーク: B中間子混合やBの寿命
- 重い新粒子の相互作用の大きさはフレーバー物理から測定された。
 - トップクォークの場合:
 - Tevatronが直接観測および質量測定
 - B factoriesが結合定数 V_{td} の大きさと位相を精密測定
- フレーバー物理は素粒子物理学上重要な発見・測定を行ってきた。

将来のシナリオ

LHCで新しい素粒子発見！



質量、自然幅、スピンの測定される。

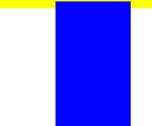


クォーク・レプトンとの相互作用の大きさは？

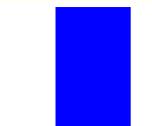


SBFで測定可能

LHCで新しい素粒子発見できない



より高いエネルギースケールを別の方法で探索しなくてはならない



SBFで探索可能

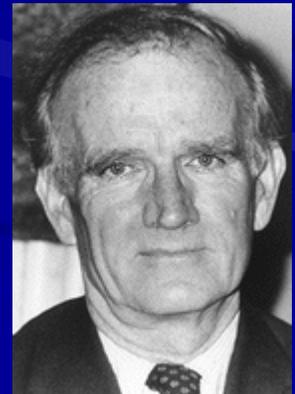
どちらのシナリオでもSBFは重要な役割を果たす

Wise words from one of the discoverers of CP violation

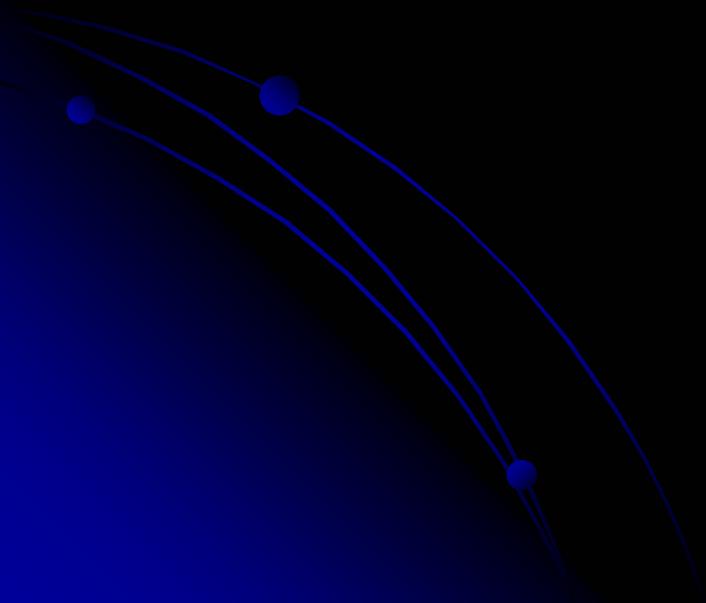
At any one time there is a natural tendency among physicists to believe that we already know the essential ingredients of a comprehensive theory.

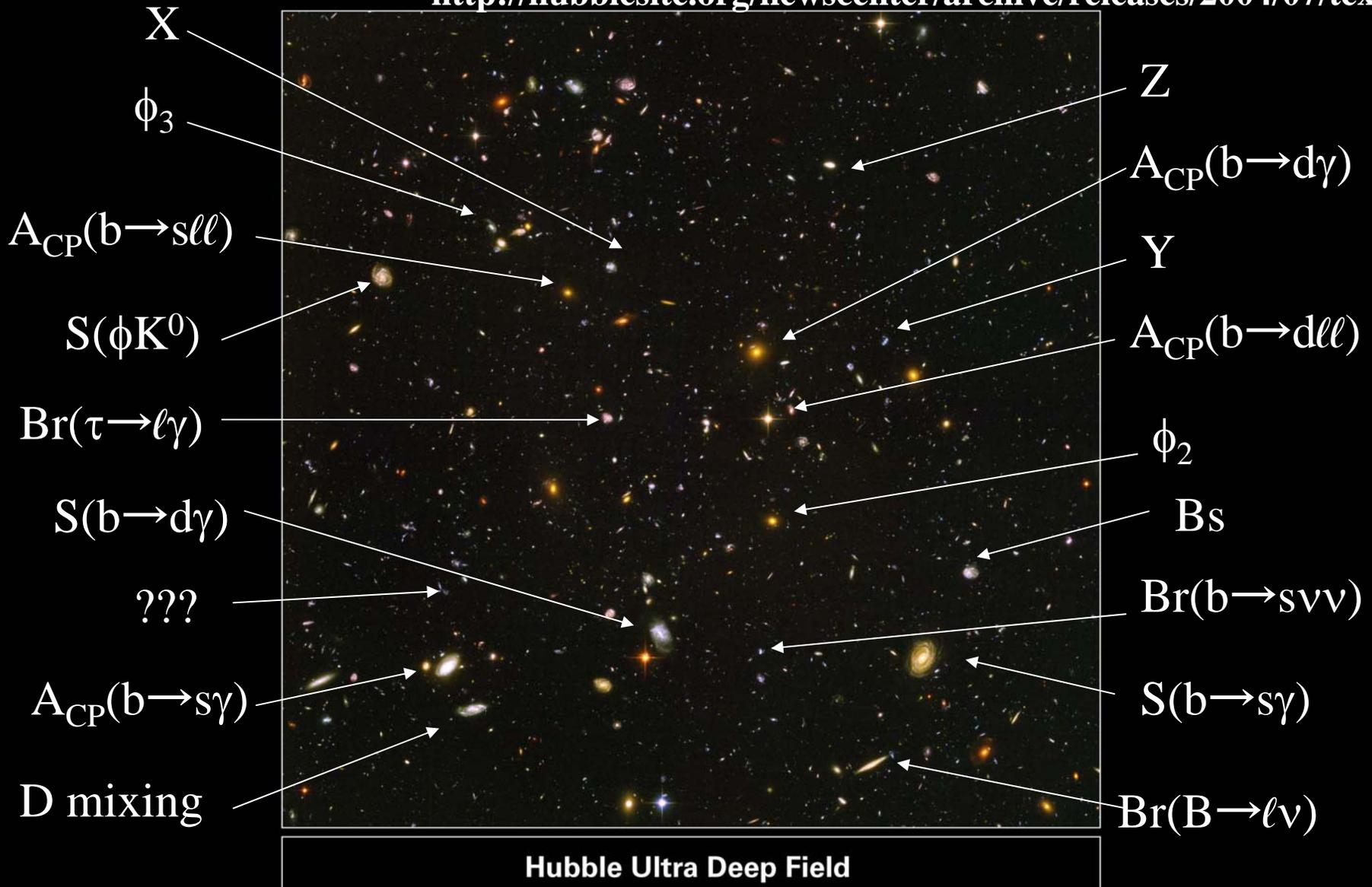
But each time a new frontier of observation is broached we inevitably discover new phenomena which force us to modify substantially our previous conceptions. I believe this process to be unending, that the delights and challenges of unexpected discovery will continue always.

Val Fitch, Nobel Prize Speech 1980



結論





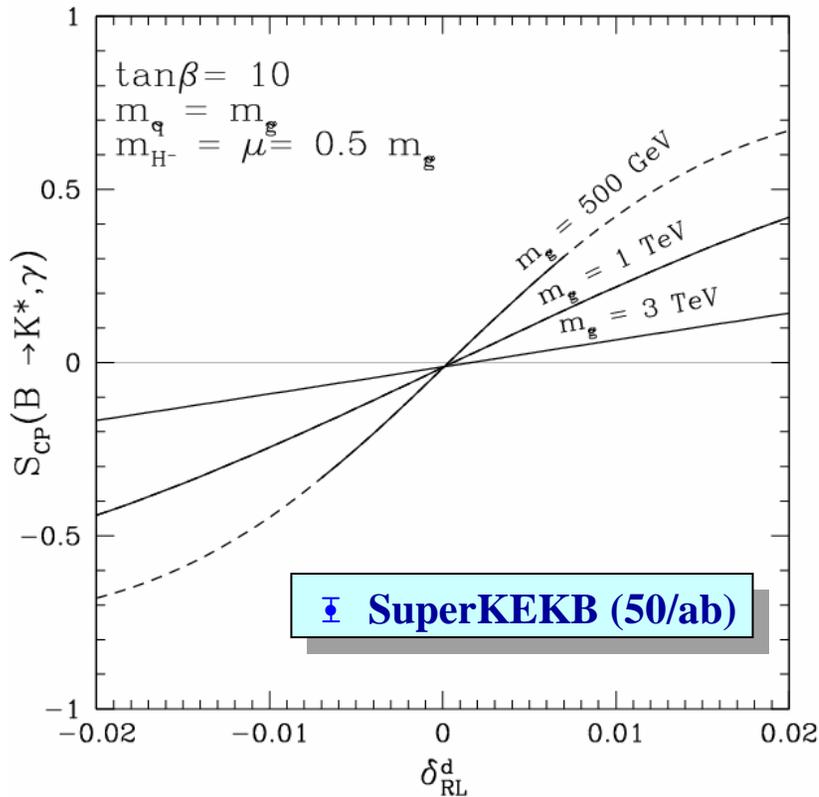
あなたの星を Super B Factory で見つけてください。

backup slides

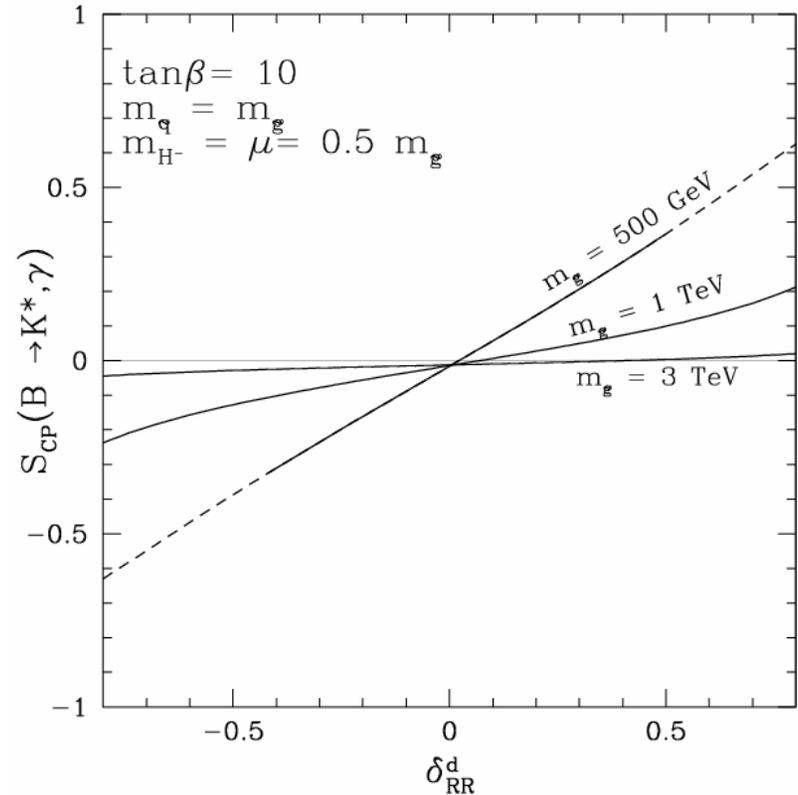
Measurement (in SM)	Theoretical limit	Present error
$B \rightarrow \psi K_S$ (β)	$\sim 0.2^\circ$	1.6°
$B \rightarrow \phi K_S, \eta^{(\prime)} K_S, \dots$ (β)	$\sim 2^\circ$	$\sim 10^\circ$
$B \rightarrow \pi\pi, \rho\rho, \rho\pi$ (α)	$\sim 1^\circ$	$\sim 15^\circ$
$B \rightarrow DK$ (γ)	$\ll 1^\circ$	$\sim 25^\circ$
$B_s \rightarrow \psi\phi$ (β_s)	$\sim 0.2^\circ$	—
$B_s \rightarrow D_s K$ ($\gamma - 2\beta_s$)	$\ll 1^\circ$	—
$ V_{cb} $	$\sim 1\%$	$\sim 3\%$
$ V_{ub} $	$\sim 5\%$	$\sim 15\%$
$B \rightarrow X\ell^+\ell^-$	$\sim 5\%$	$\sim 20\%$
$B \rightarrow K^{(*)}\nu\bar{\nu}$	$\sim 5\%$	—
$K^+ \rightarrow \pi^+\nu\bar{\nu}$	$\sim 5\%$	$\sim 70\%$
$K_L \rightarrow \pi^0\nu\bar{\nu}$	$< 1\%$	—

$S(B \rightarrow K_S \pi^0 \gamma)$ in SUSY general mixing framework

δ_{RL}



δ_{RR}

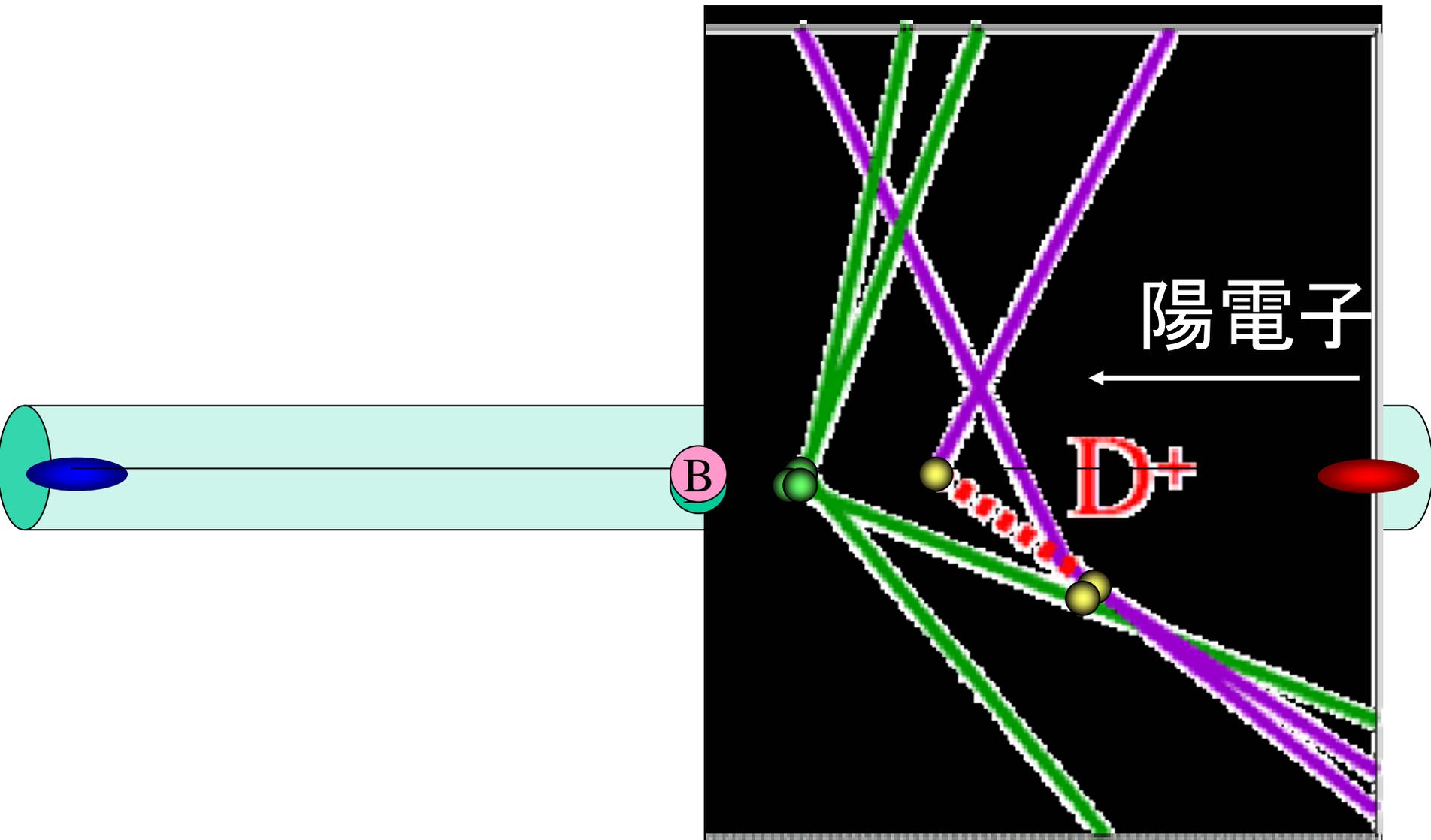


Other exp. constraints (Bs mixing, $\text{Br}(b \rightarrow s\gamma)$) taken into account

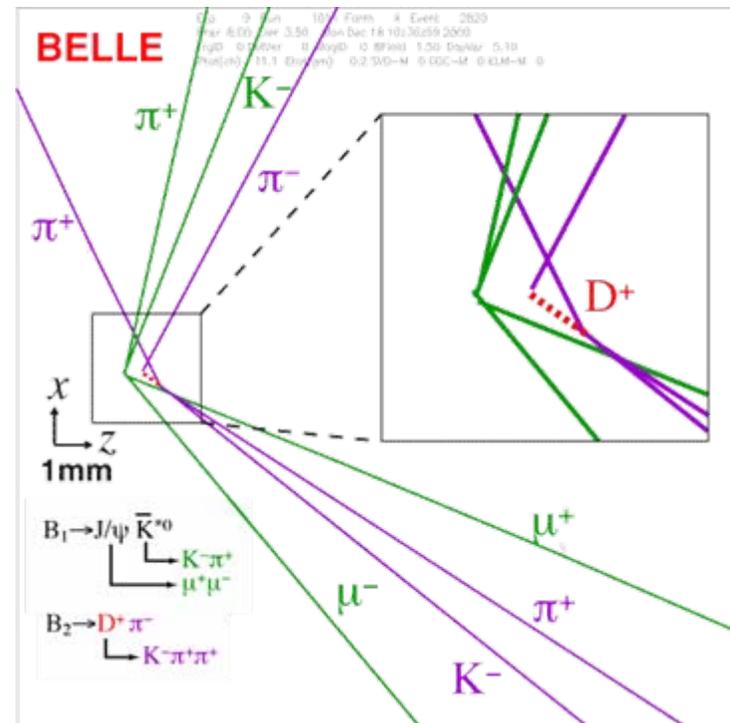
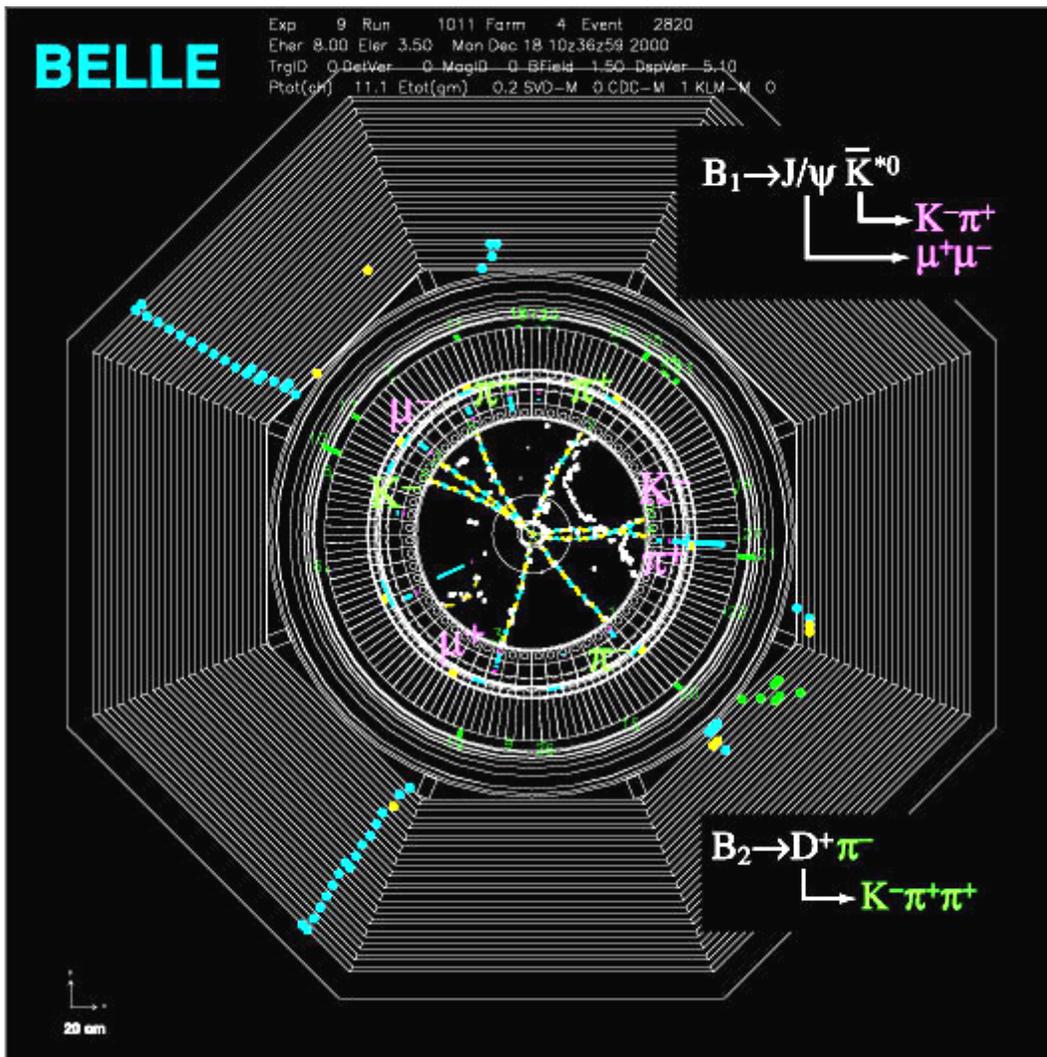
J. Foster, K. Okumura, L. Roszkowski, for SuperKEKB physics book update

どのようにして、 $\sin^2\phi_1$ は測定されるのか

Belle検出器内部では

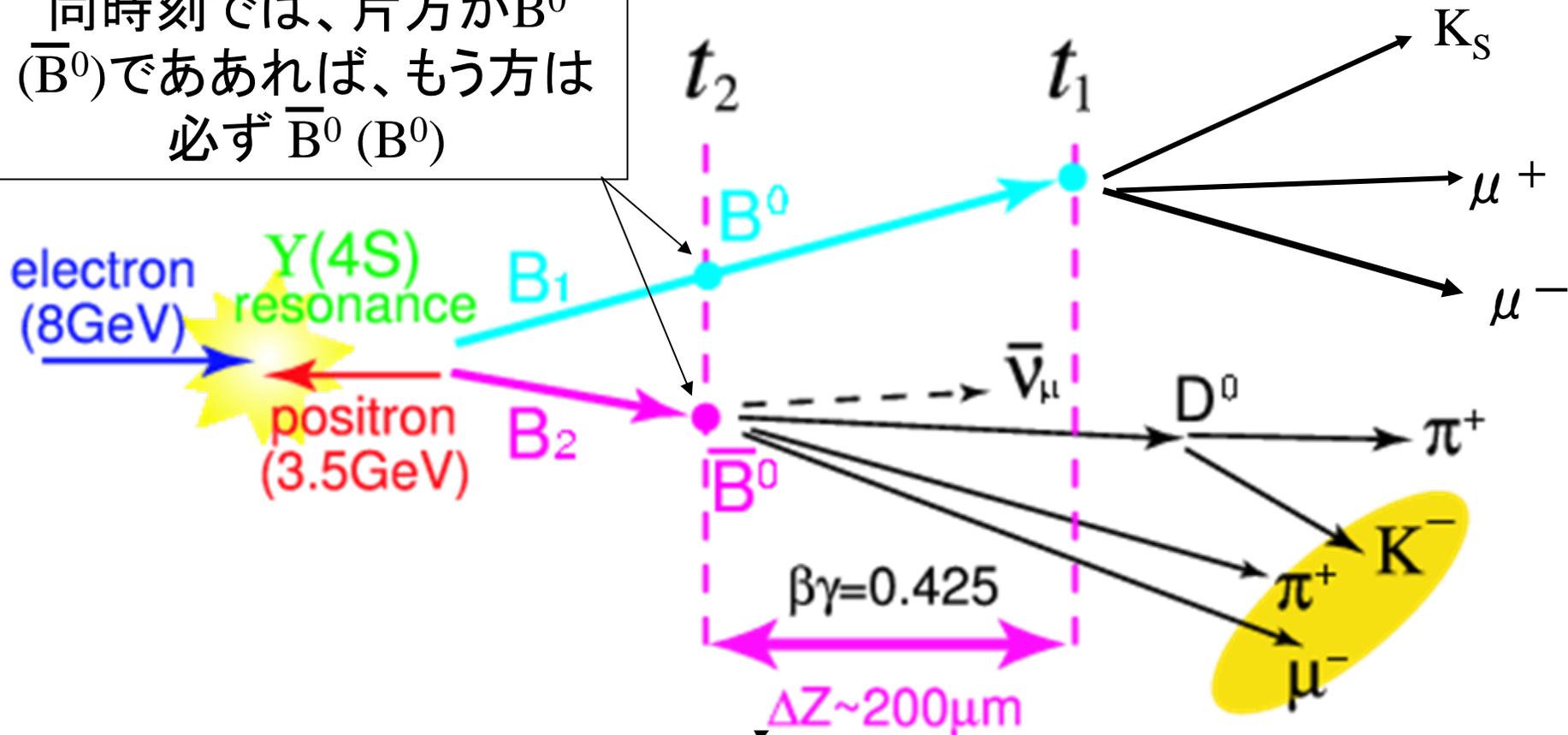


両方のBが再構成された事象例



2つのBの崩壊時間差を測る

同時刻では、片方が B^0
(\bar{B}^0)であれば、もう方は
必ず \bar{B}^0 (B^0)



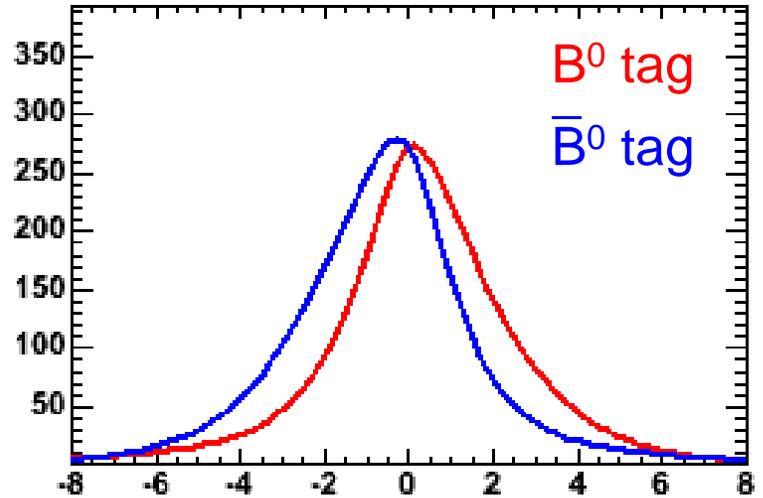
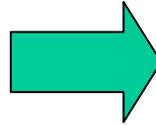
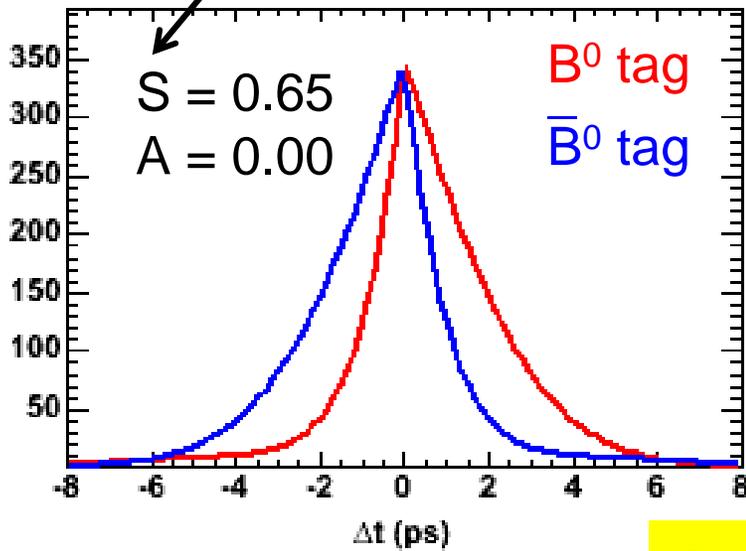
$$\Delta t \cong \Delta z / c\beta\gamma$$

から崩壊時間の差を決定

片方のBの種類を
崩壊粒子の電荷
から同定

$$-\xi_{CP} \sin 2\phi_1$$

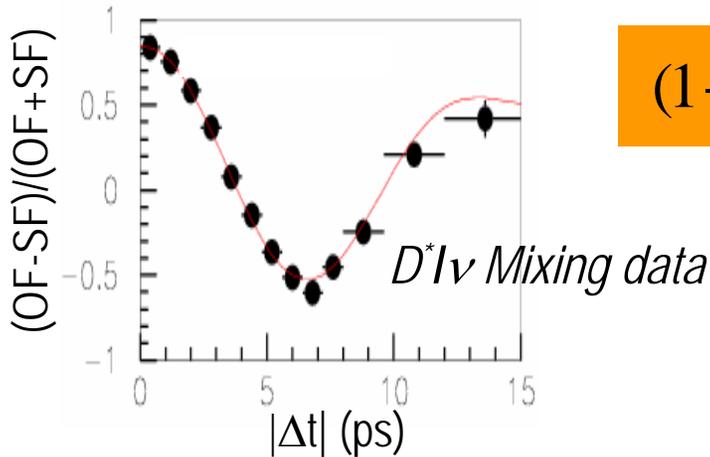
Experimental Complications (MC)



CPの破れを示すパラメター

$$P(q = \pm 1, \Delta t) = \frac{1}{4\tau} e^{-\frac{|\Delta t|}{\tau}} \left[1 \pm (S \sin \Delta m \Delta t + A \cos \Delta m \Delta t) \right] \otimes R$$

$(1 - 2w)$

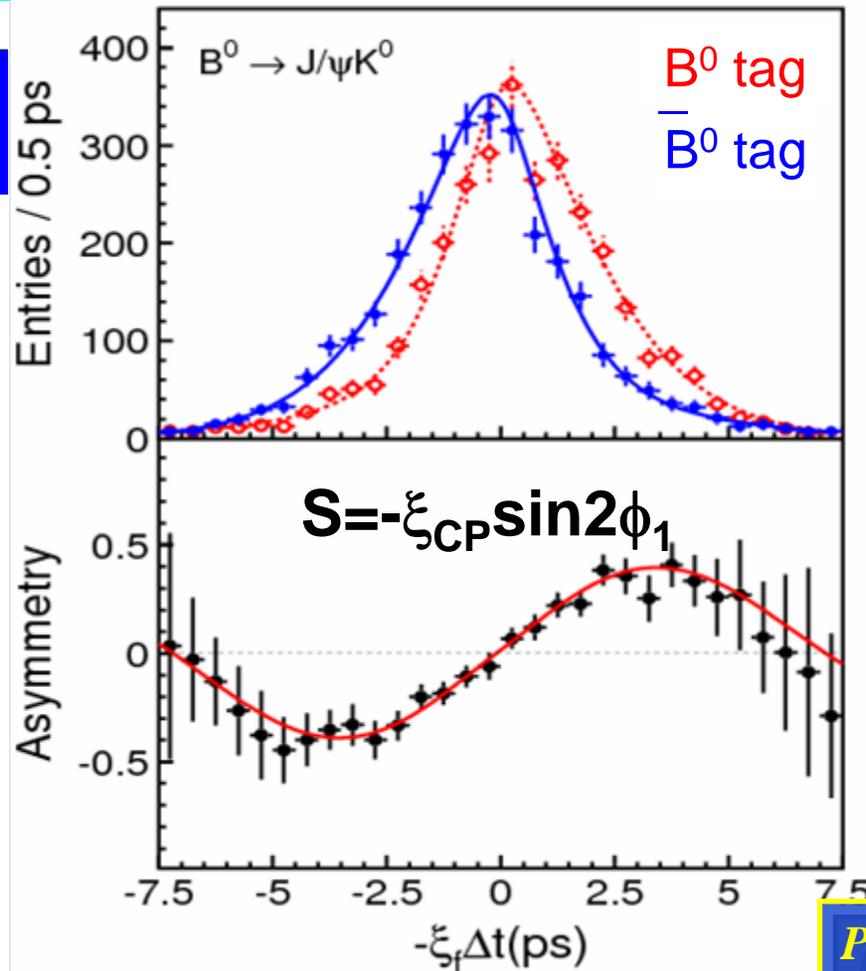


R: 位置測定分解能
w: Bフレーバー同定を間違える確率
 $D^*lv, D^{(*)}\pi$ データを使って決定

$\sin 2\phi_1$ の測定結果



$B^0 \rightarrow J/\psi K^0$



PRL 98, 031802 (2007)

$\sin 2\phi_1 = 0.642 \pm 0.031(\text{stat}) \pm 0.017(\text{syst})$
 $A = 0.018 \pm 0.021(\text{stat}) \pm 0.014(\text{syst})$

分岐比測定の状態

CLEO [9.1 fb⁻¹]
 PRL87,251807(2001)

BaBar [81.5 fb⁻¹]
 PRD72,052004(2005)

BaBar [81.5 fb⁻¹]
 PRL98,022002(2007)

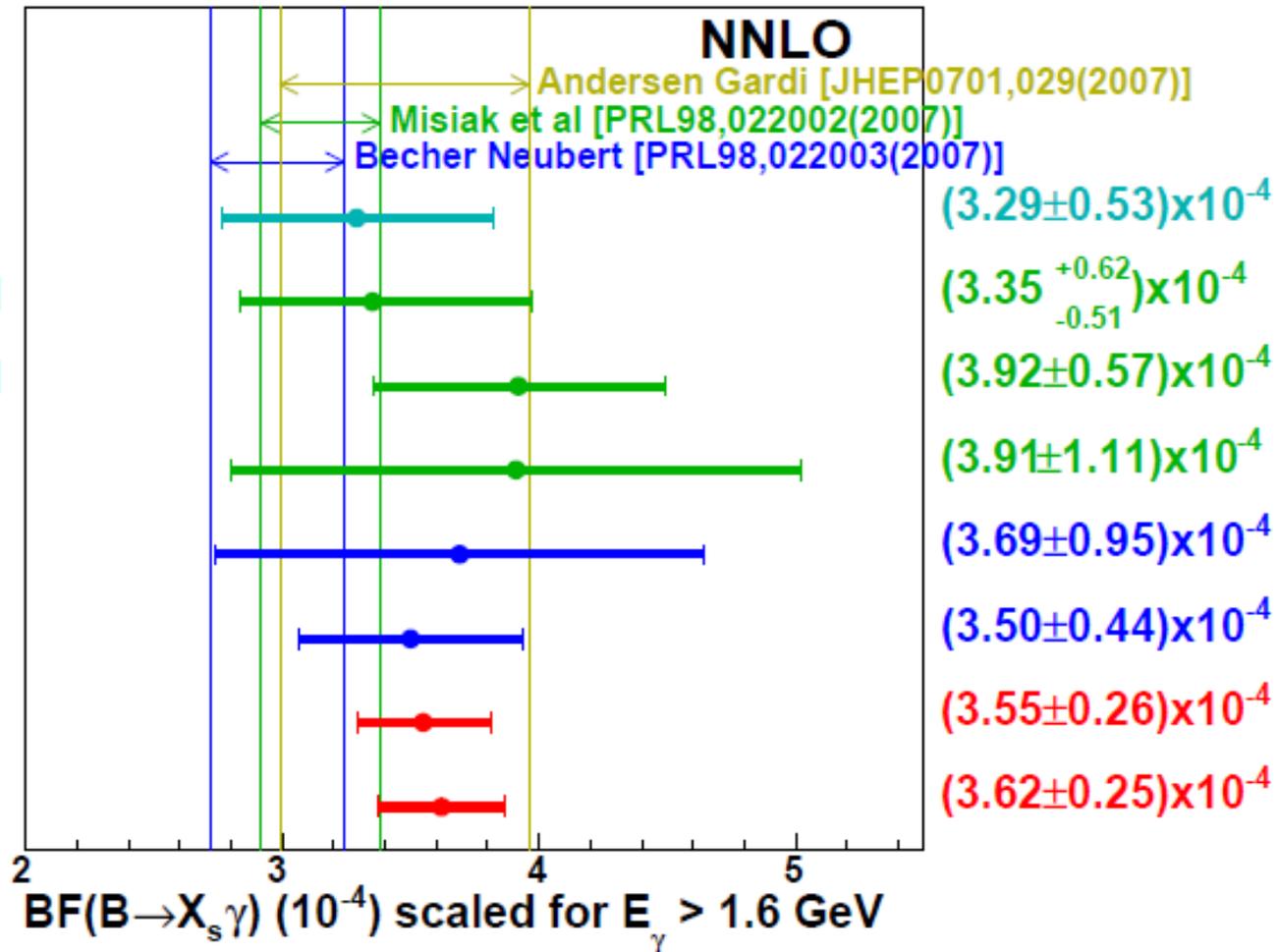
BaBar [210 fb⁻¹]
 new

Belle [5.8 fb⁻¹]
 PLB511,151(2001)

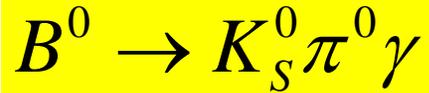
Belle [140 fb⁻¹]
 PRL93,061803(2004)

HFAG 2006
 hep-ex/0603003

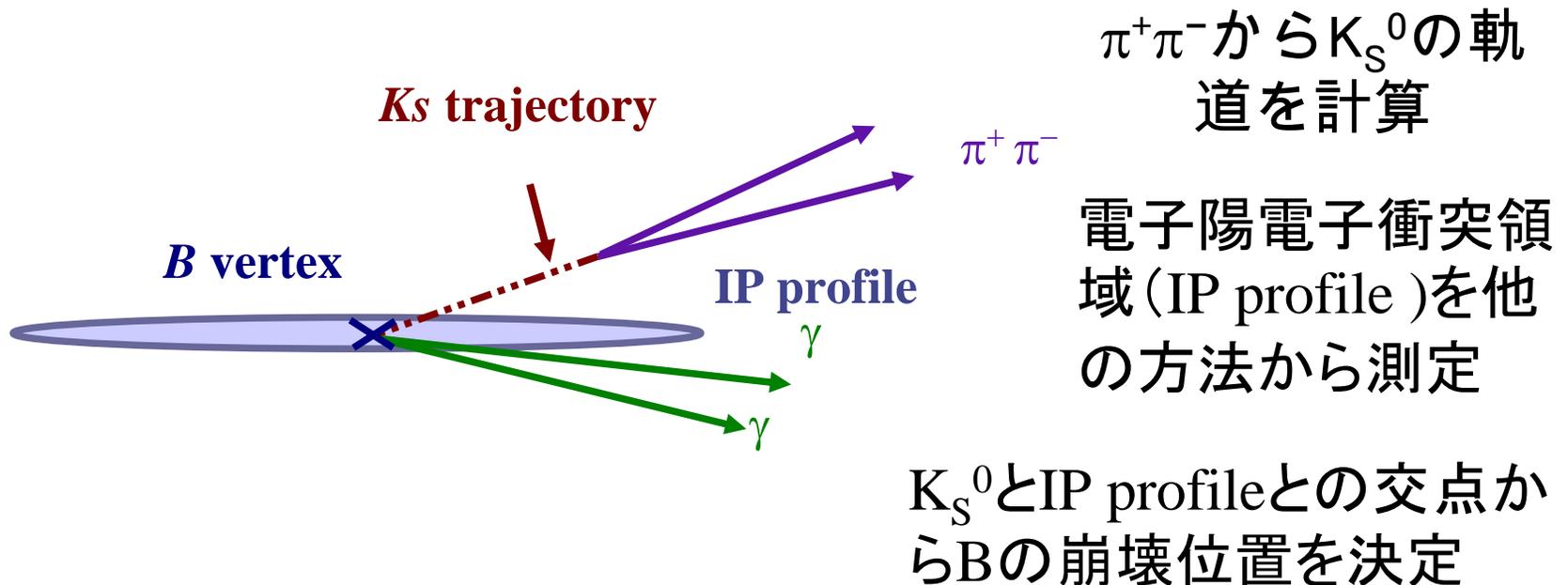
(* simple minded average)



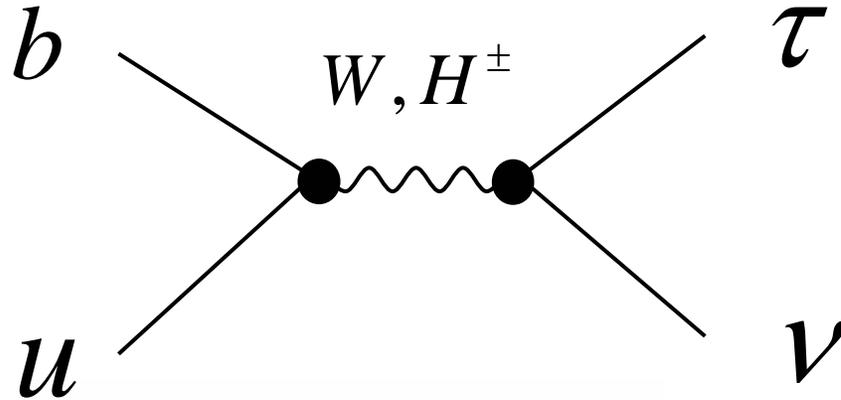
時間に依存するCPの破れ測定



- K_S^0 のみでBの崩壊位置を測定
– 実験的にchallenging



B → τν



標準模型の予言 :

$$BF(B^+ \rightarrow \tau^+ \nu_\tau) = 1.2 \times 10^{-4} \left(\frac{f_B}{200 \text{ MeV}} \right)^2 \left(\frac{V_{ub}}{0.004} \right)^2$$

荷電ヒッグスが媒介すると、

$$\mathcal{B}(B \rightarrow \tau \nu) = \mathcal{B}(B \rightarrow \tau \nu)_{\text{SM}} \times r_H$$

$$r_H = \left(1 - \frac{m_B^2}{m_H^2} \tan^2 \beta \right)^2$$

