

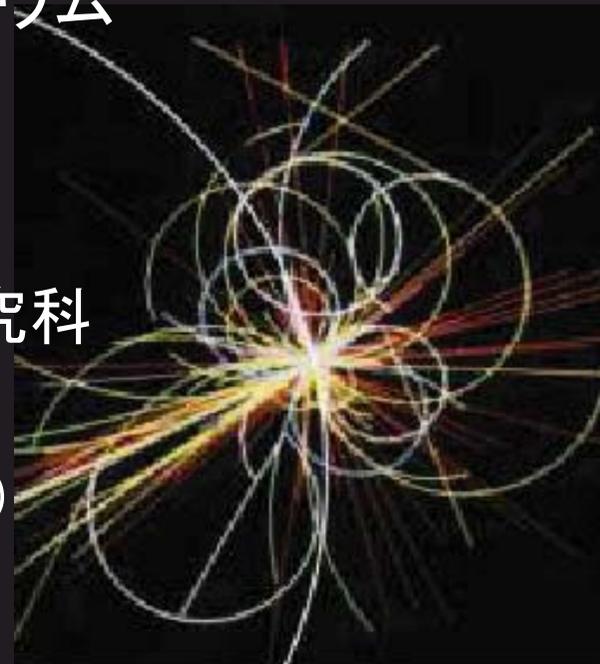
名古屋大学21世紀COEプログラム
「宇宙と物質の起源：宇宙史の物理学的解読」

粒子-反粒子対称性の破れの謎を探る

2006年12月24日

第4回ORIUM-COE シンポジウム
クリスマスレクチャーズ

名古屋大学大学院 理学研究科
飯嶋 徹
(N研、素粒子研究チーム)



素粒子と初期宇宙史

宇宙論・宇宙物理

WMAP衛星

ダーク・エネルギー (73%)

ダーク・マター (23%)

物質優勢宇宙

加速器のフロンティア
(エネルギーと強度)



Big Bang!

力の大統一

超弦理論

$10^{32}/10^{19}$



10^{-36}

新しい物理
~1 TeV

10^{-10}

$10^{28}/10^{15}$

超対称性

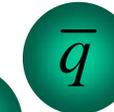
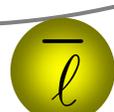


ヒッグス

標準理論

ゲージ理論

$10^{15}/100$



クォークルプトン

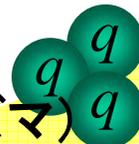


ニュートリノ

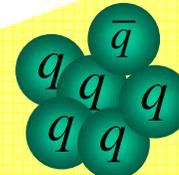
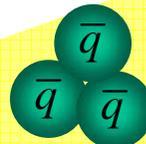


$10^{12}/0.1$

QGP (クォーク・グルーオン・プラズマ)



ハドロン

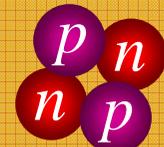


新しいハドロン状態

元素合成

(K/GeV)

原子核



CPの破れ
時間(秒)

10^{-5}

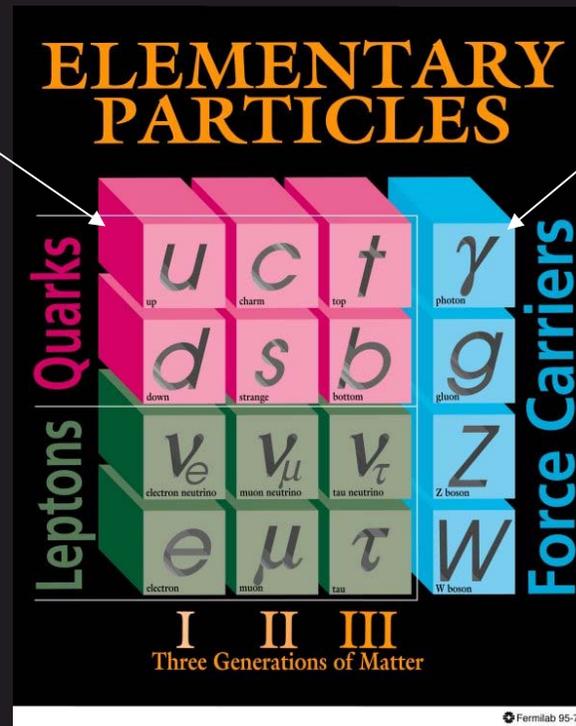
現在の素粒子標準理論

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

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

全ての素粒子には、質量や寿命などが同じだが、
符号の異なる相棒(反粒子)が存在する。

消えた反粒子？

可能なシナリオ...

$$X \rightarrow q + e$$

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

X と \bar{X} の崩壊率の非対称度 $\sim O(10^{-10})$

→ 物質優勢の宇宙

10,000,000,001

クォーク

10,000,000,000

反クォーク

消えた反粒子？

可能なシナリオ...

$$X \rightarrow q + e$$

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

X と \bar{X} の崩壊率の非対称度 $\sim O(10^{-10})$

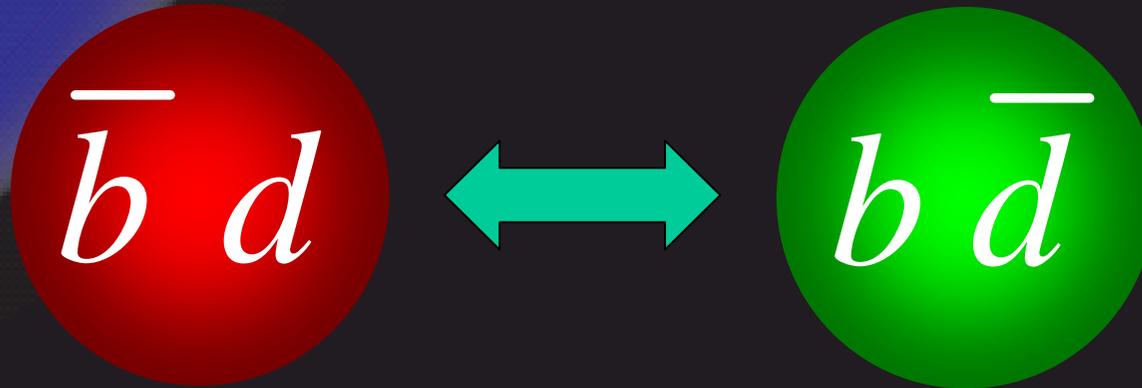
→ 物質優勢の宇宙

1

これが我々！

CP (粒子-反粒子) 対称性の破れが鍵をにぎる。

B中間子



B中間子

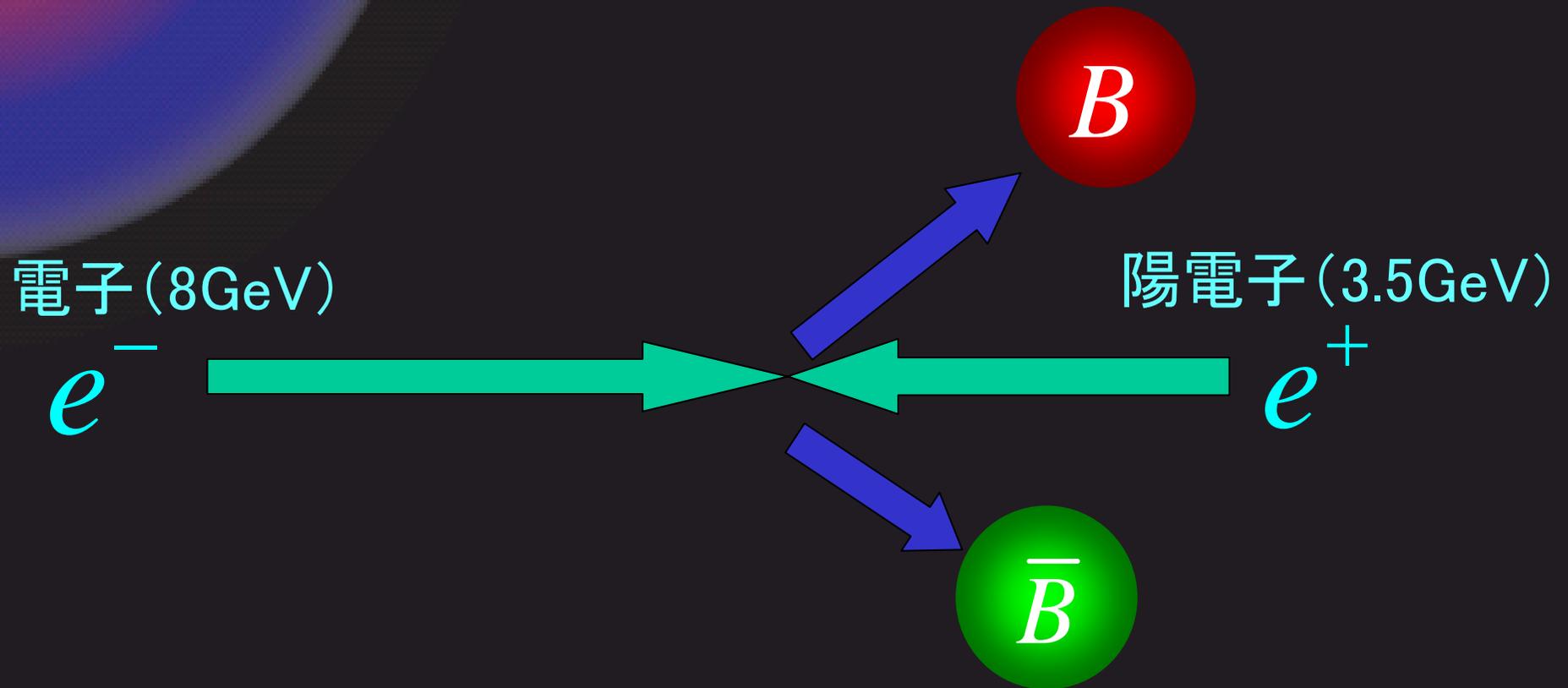
反B中間子

質量は陽子の約5倍程度

寿命は0.000 000 000 00153 秒(1.53ピコ秒)

Bファクトリーで崩壊の違いを精密に測る。

Bファクトリー (B工場)



電子-陽電子衝突で大量の $B\bar{B}$ 中間子対を生成する。

KEKB加速器

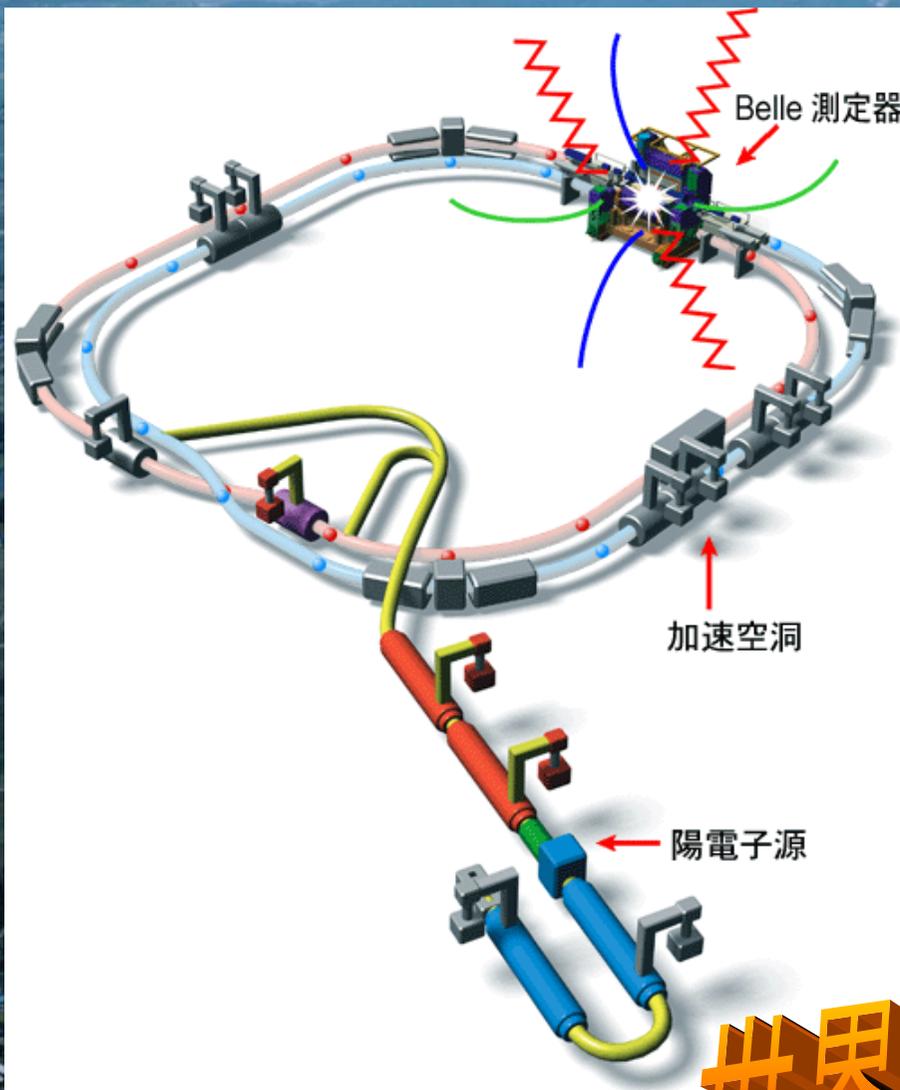
$e^- (8\text{GeV})$



$e^+ (3.5\text{GeV})$



KEKB加速器

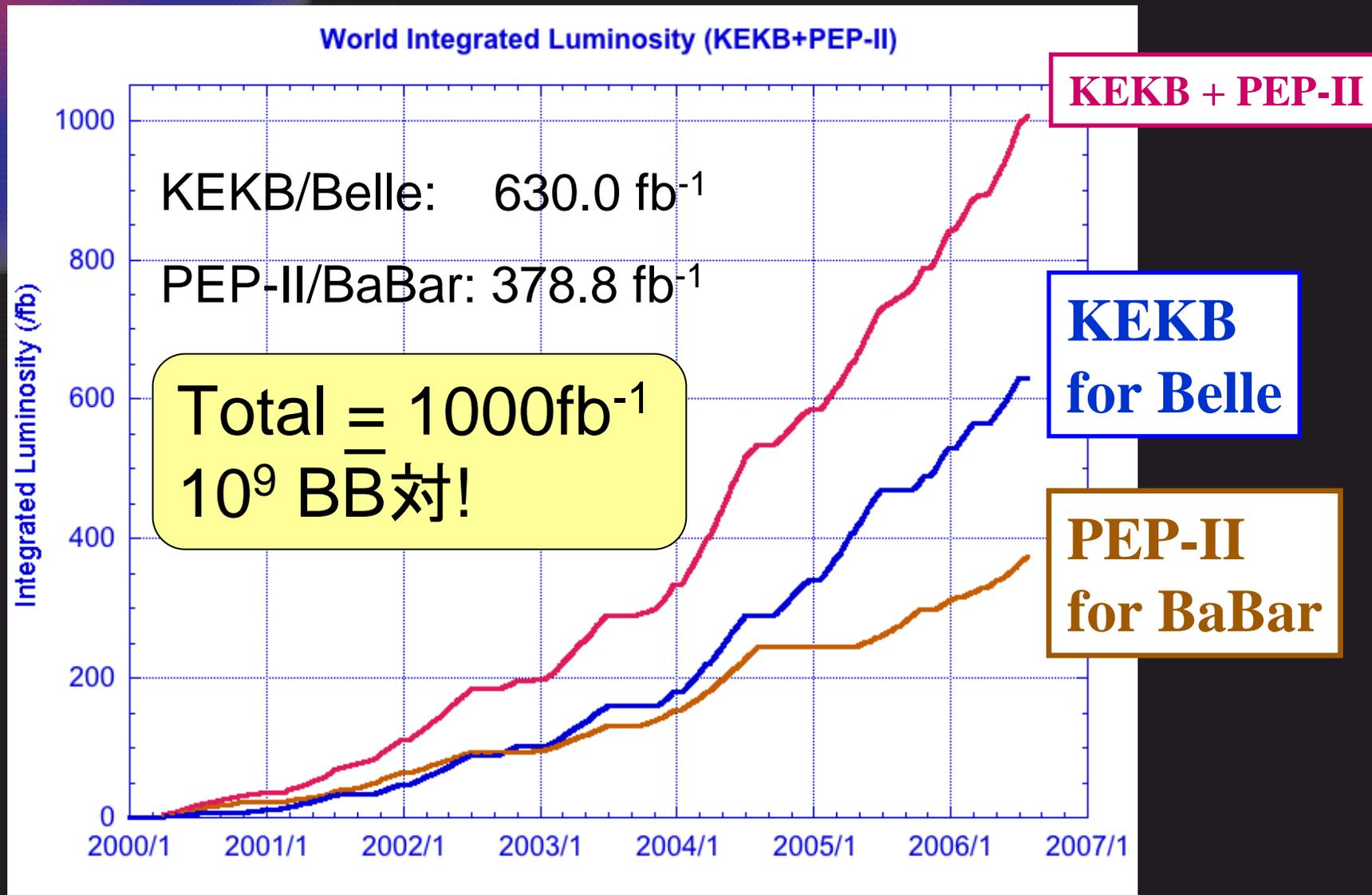


ルミノシティー
 $1.7 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$!
↓
年間約2億対のBBを生成。

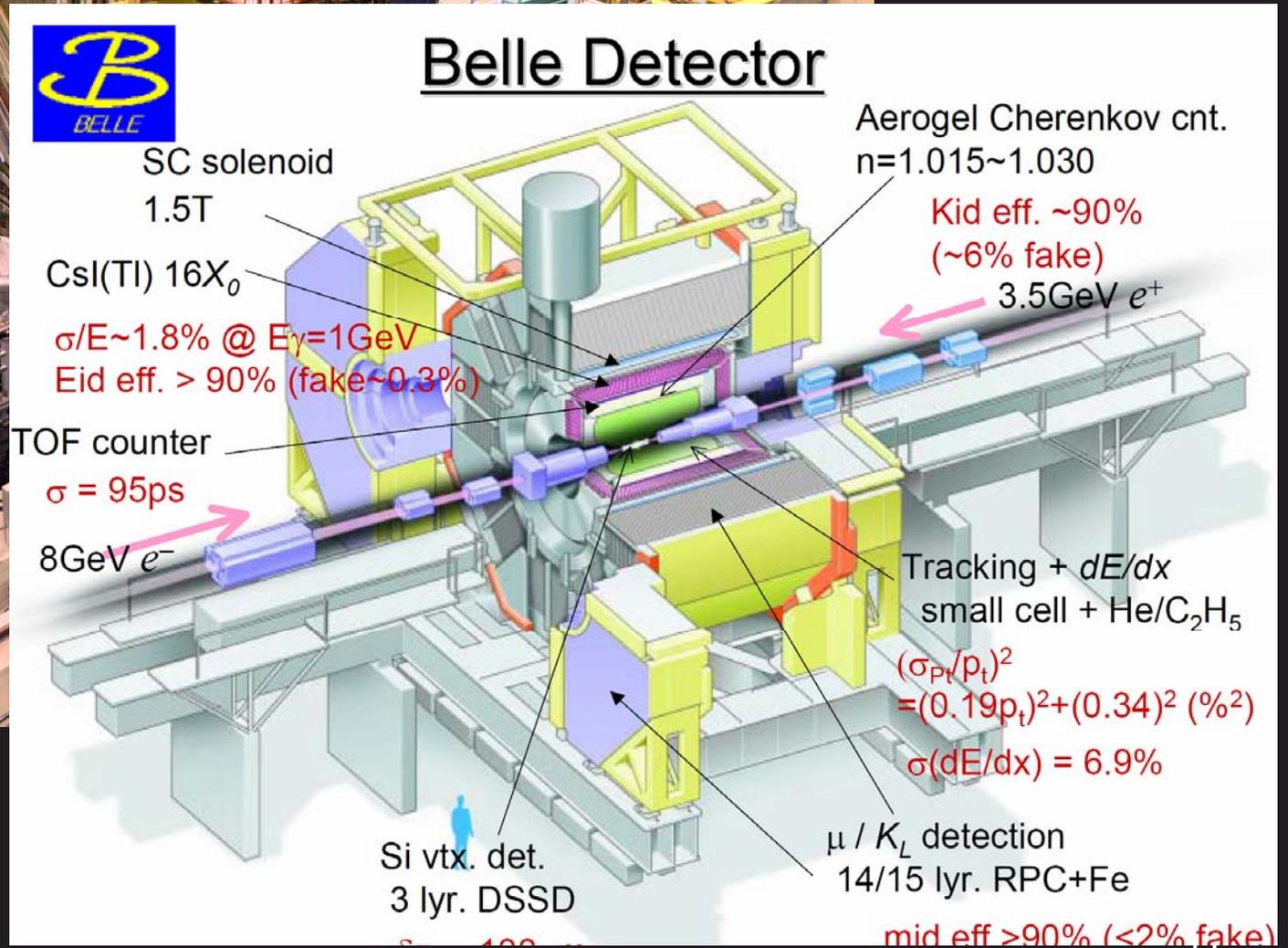
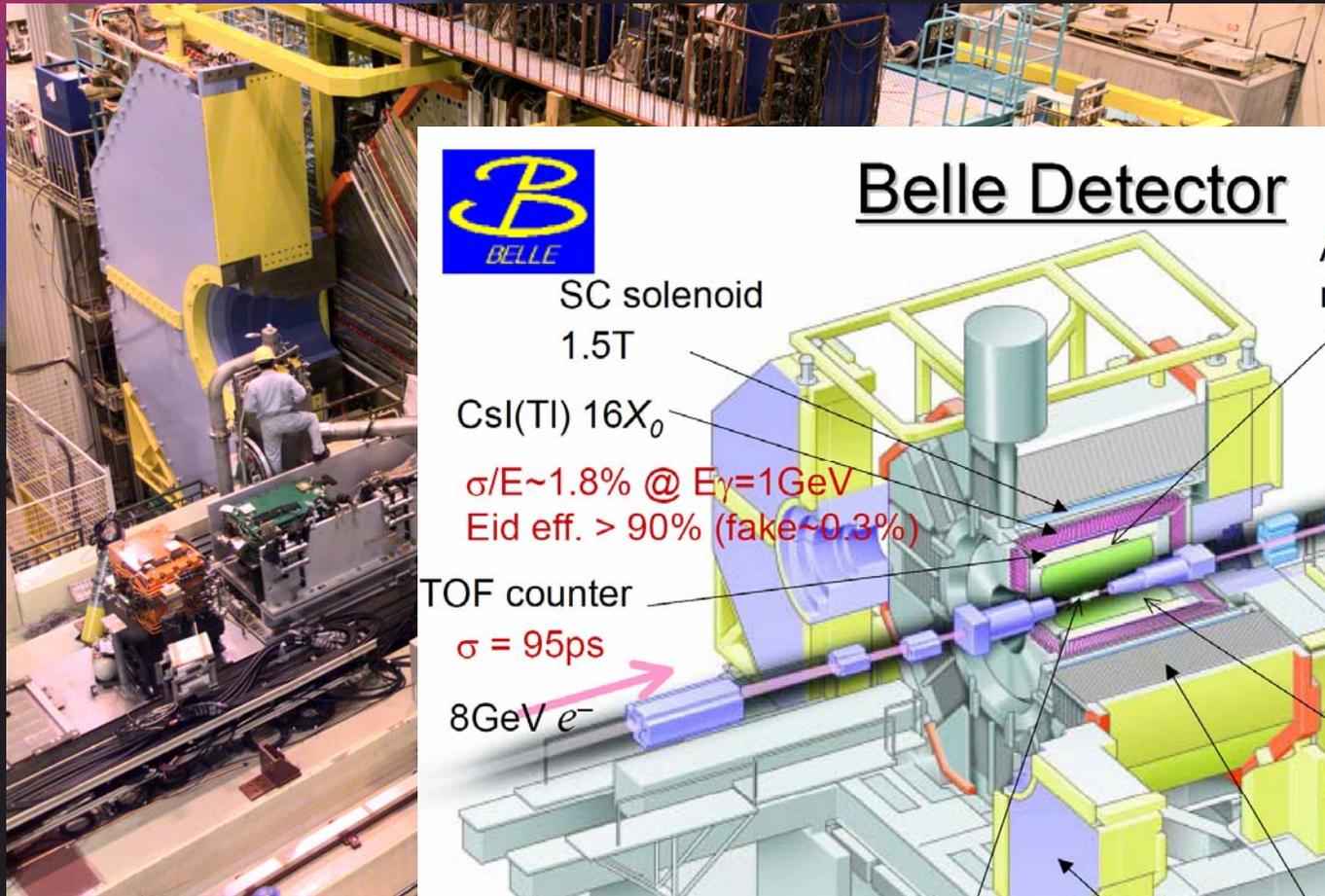
世界最高強度を達成!

データ蓄積の状況

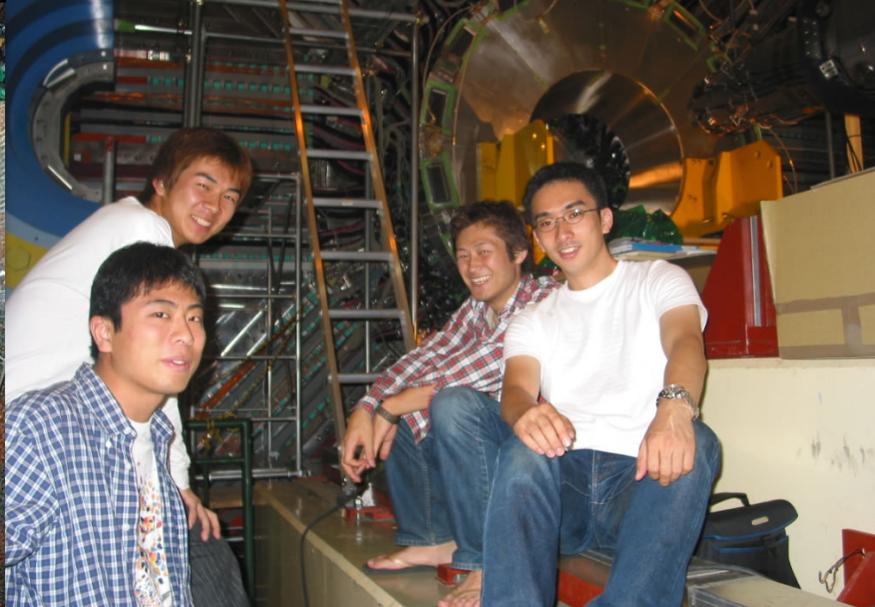
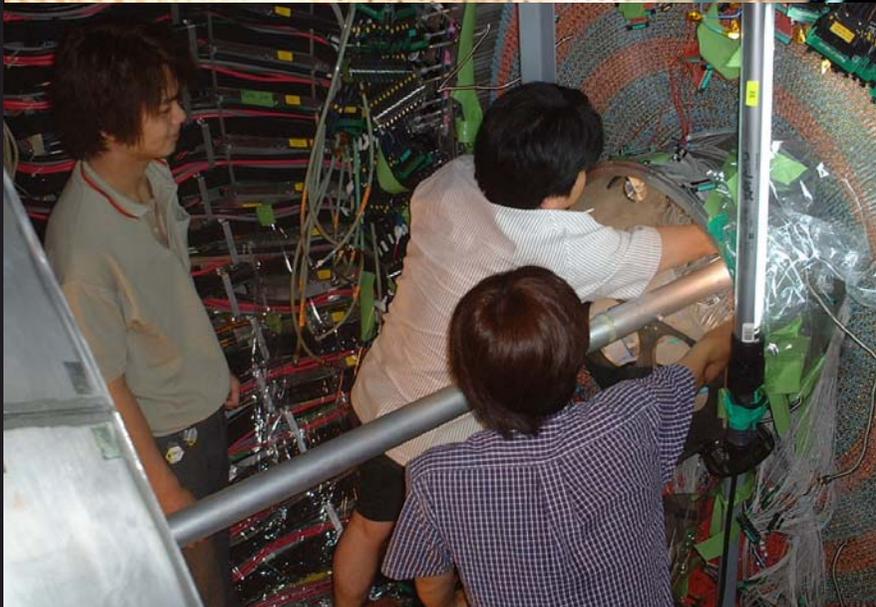
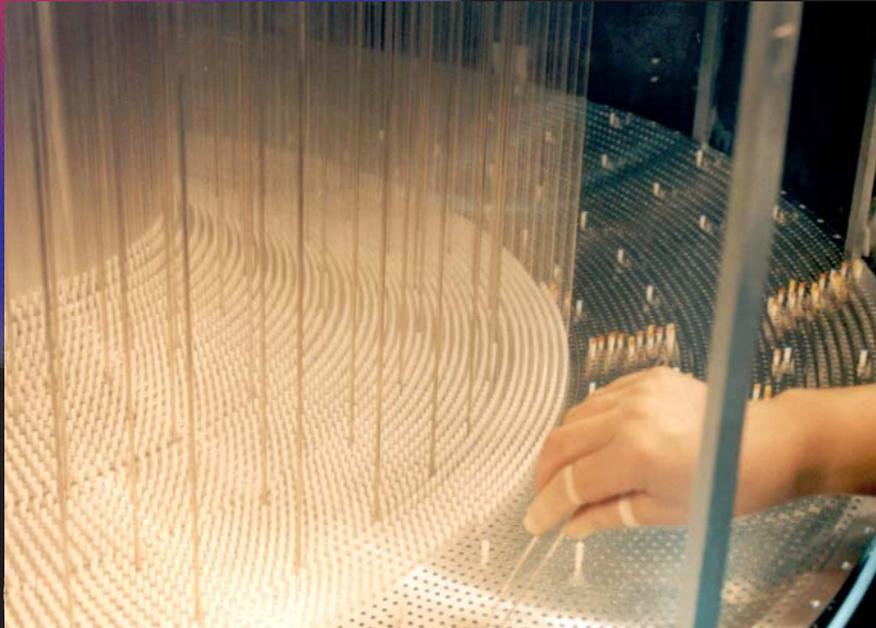
2006年7月24日時点



Belle測定器

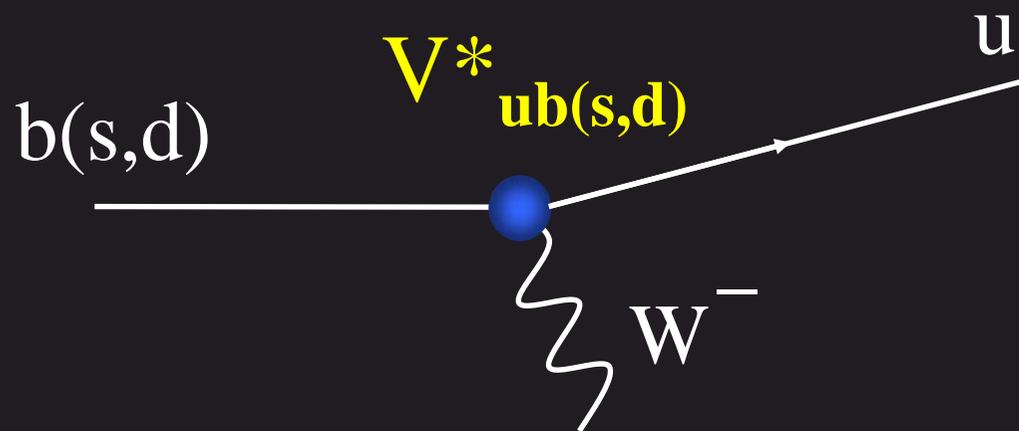
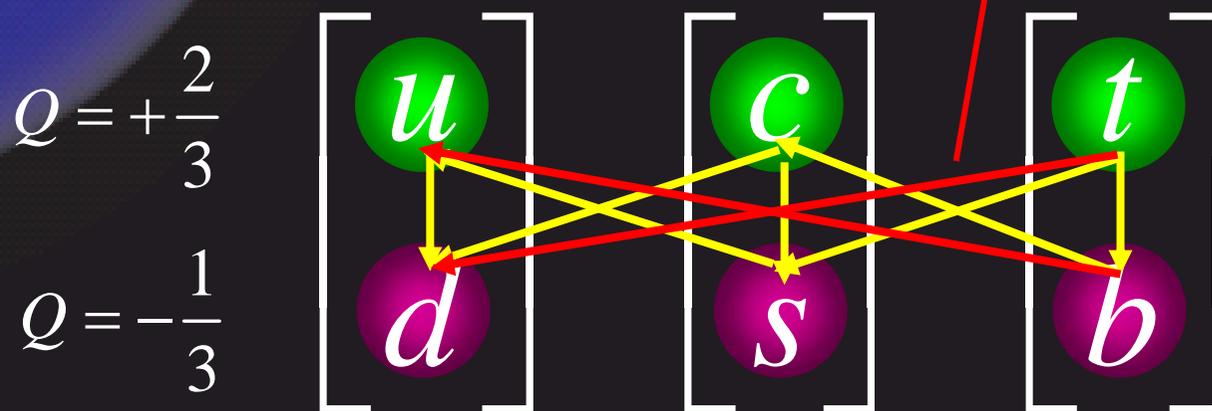


中央飛跡検出器

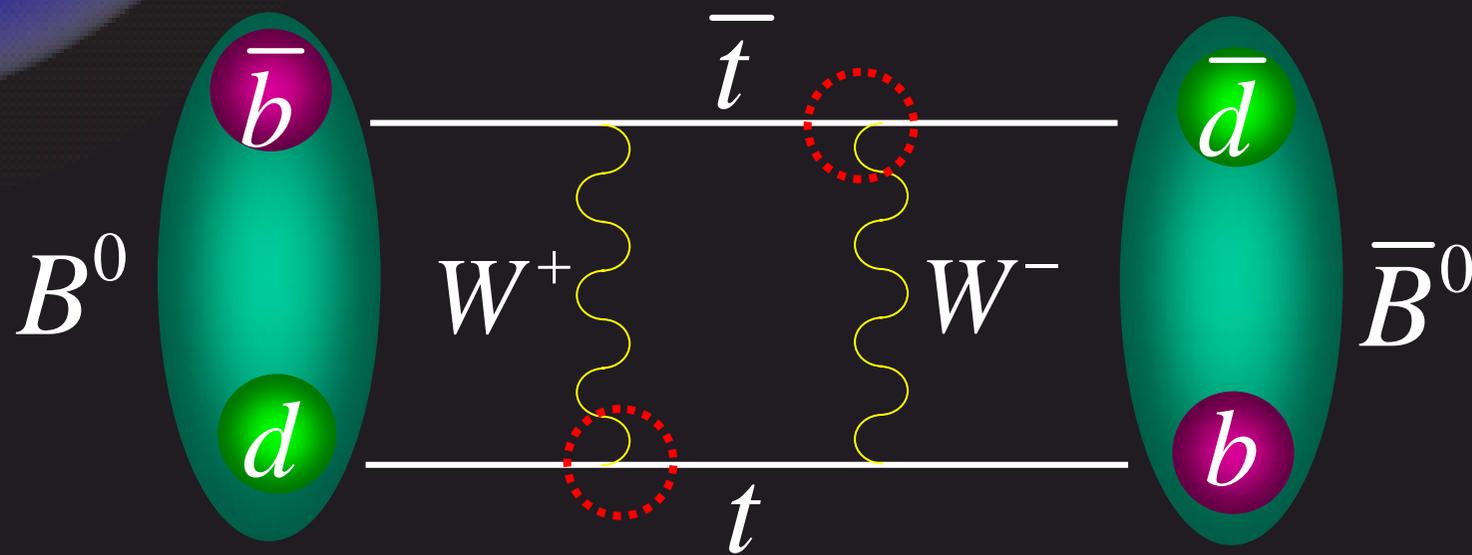


小林益川理論

CPの破れのもと



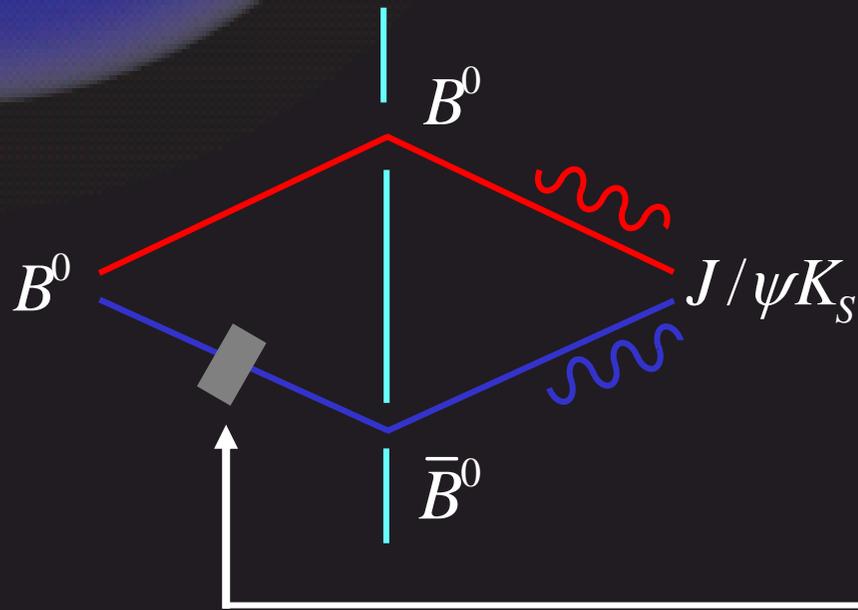
B中間子の振動



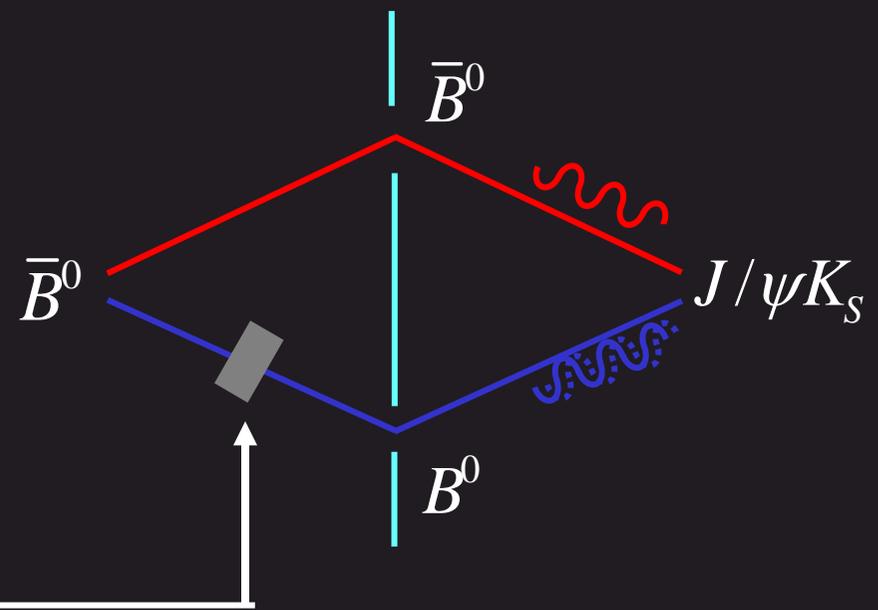
素粒子の“変身”

B崩壊でのCP対称性の破れ

B中間子の崩壊



反B中間子の崩壊



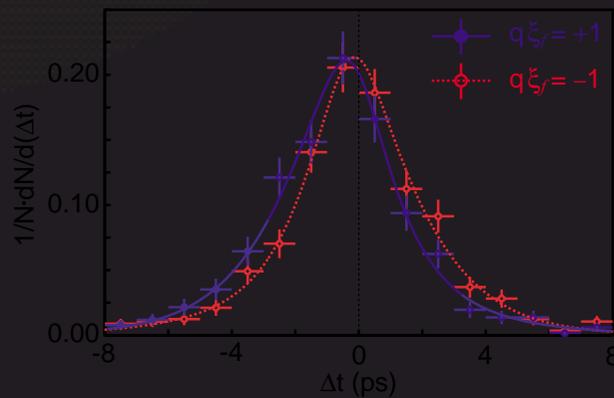
$$B^0 \rightarrow \bar{B}^0 \neq \bar{B}^0 \rightarrow B^0 \quad \text{違う!}$$

- (初期状態が) B^0 と \bar{B}^0 で二つの波の干渉が異なる。

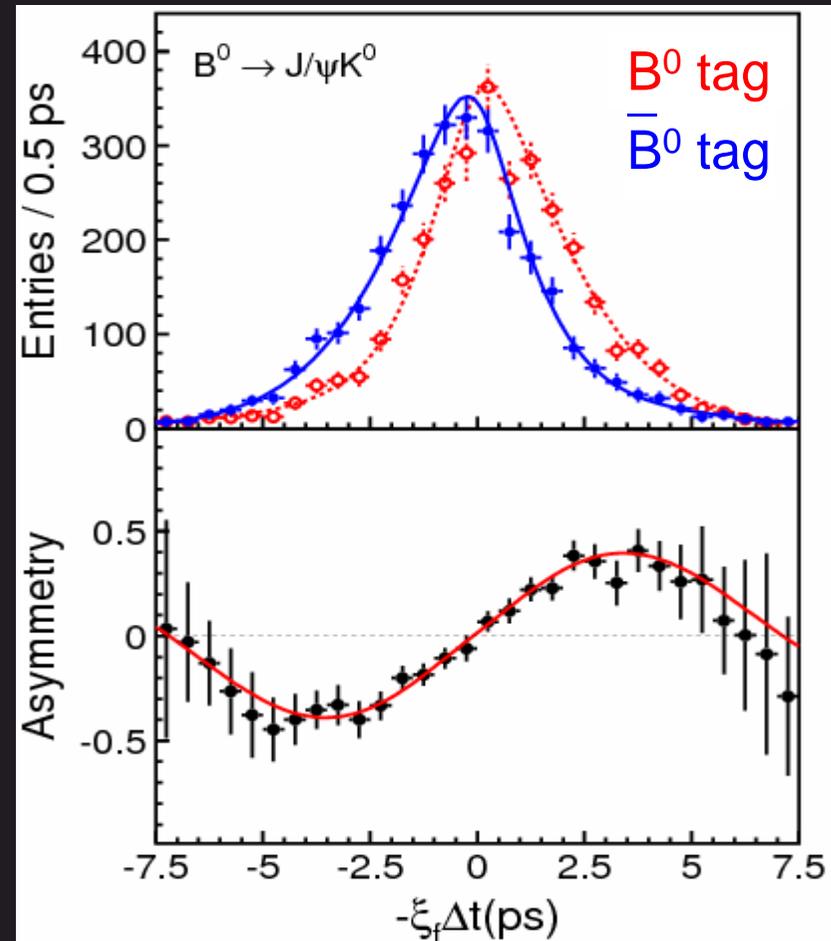
B崩壊におけるCPの破れの発見

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

2001年(31M $B\bar{B}$)



2006年(532M $B\bar{B}$)



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

わかったこと＋深まる謎

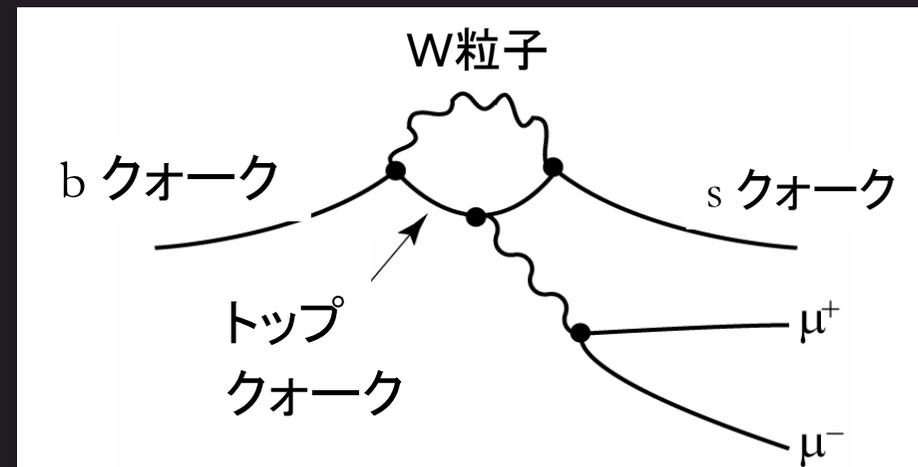
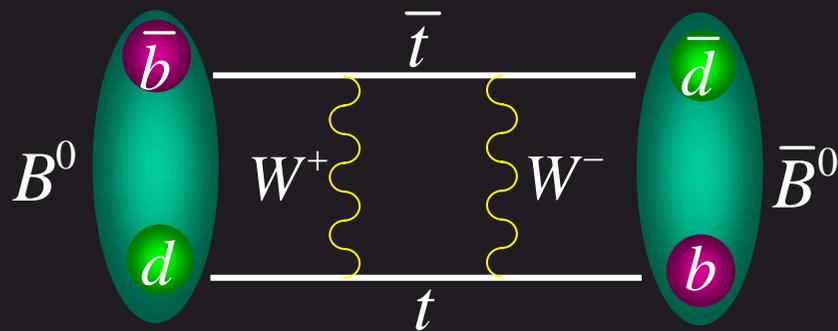
- 小林・益川理論の正しさ(クォークの世界の粒子・反粒子非対称の理由)
- 小林・益川だけでは、宇宙の物質優勢を説明できない。非対称が足りない。
- 小林・益川メカニズム以外のCP非対称の源が必要(新しい物理が必要)。
- 今後の研究は新しい物理の証拠探しへ！

新しい物理の探索

- 不確定性関係

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar$$

B中間子崩壊の中間状態に重い粒子が登場する。



トップクォークやW粒子以外の効果が見えないか？

“新しい現象”か？(2003年)

電子衝突時

「標準理論」外の現象か

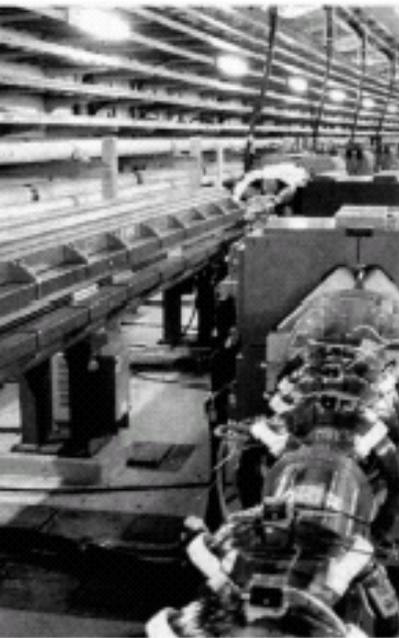
大型加速器で観測

「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、揺らぐことなかった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。今回、B中間子がクォークとK中間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%の確率で違ふ」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素粒子量子核研究

今度、B中間子がクォークとK中間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%の確率で違ふ」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、実験共同責任者の山内



大型加速器「Bファクトリー」の1周約3kmのトンネル内。電子の周囲リング（左）と陽電子の周囲リング（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で

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くと考える物理理論。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形で、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ら、粒子と反粒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。

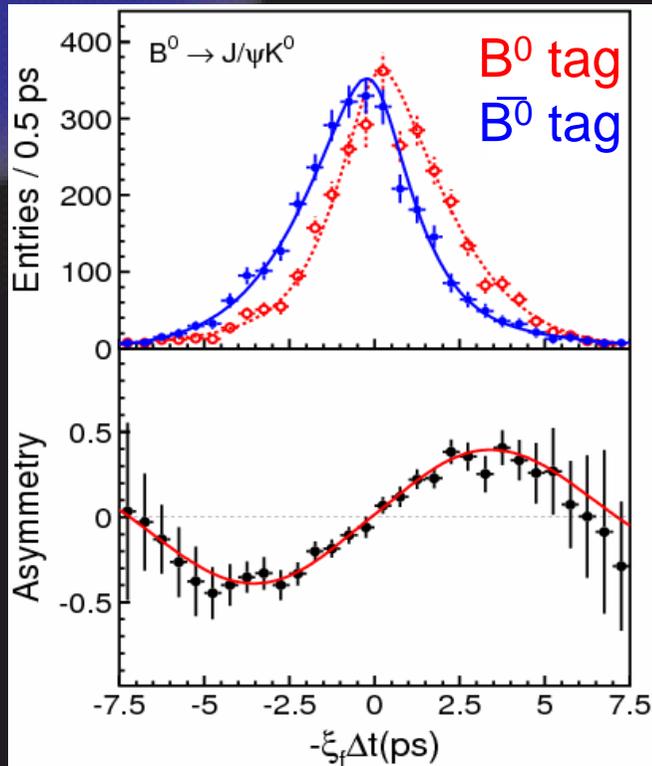
所長と益川敏英・京都大名誉教授が73年に予言した現象で、「小林・益川理論」の正しさが証明された。この時点では標準理論

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・

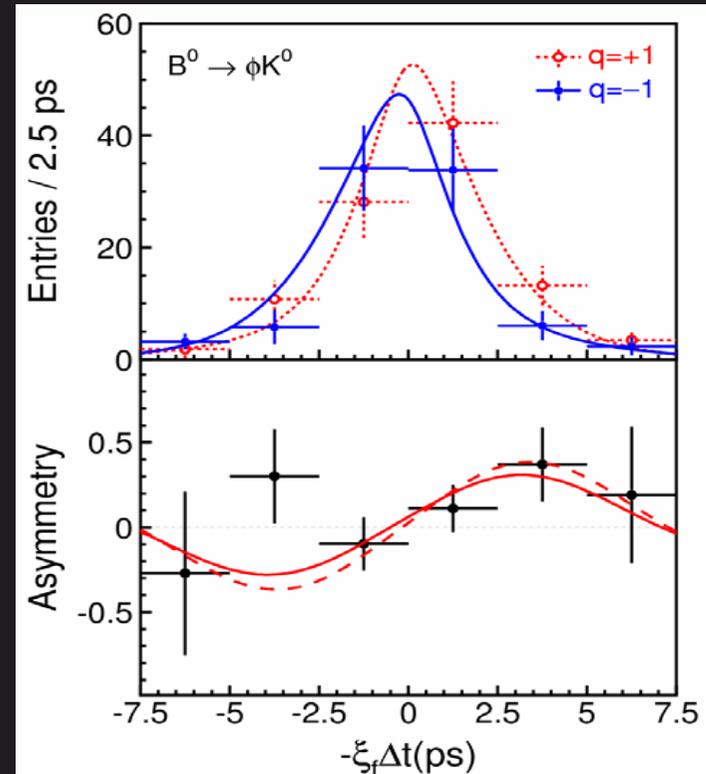
名古屋大教授（素粒子理論の話。米スタンフォード線形加速器センターも同じ実験をしているの）の現象を説明する理論の検討を始めた。

されていくのを見守りたい。もし本当ならば世界的な発見で、私たちがその現象を説明する理論の

ペンギン崩壊におけるCPの破れ



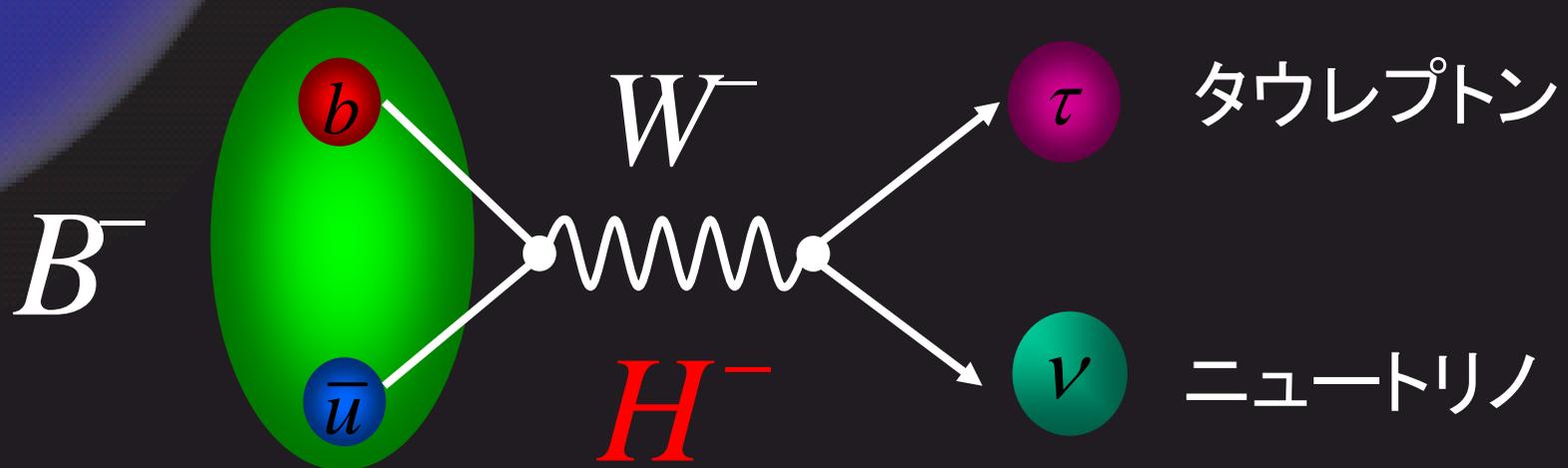
$$\sin 2\phi_1 = 0.64 \pm 0.04$$



$$\sin 2\phi_1 = 0.44 \pm 0.27$$

両者の結果が異なれば新しい物理の証拠となる。

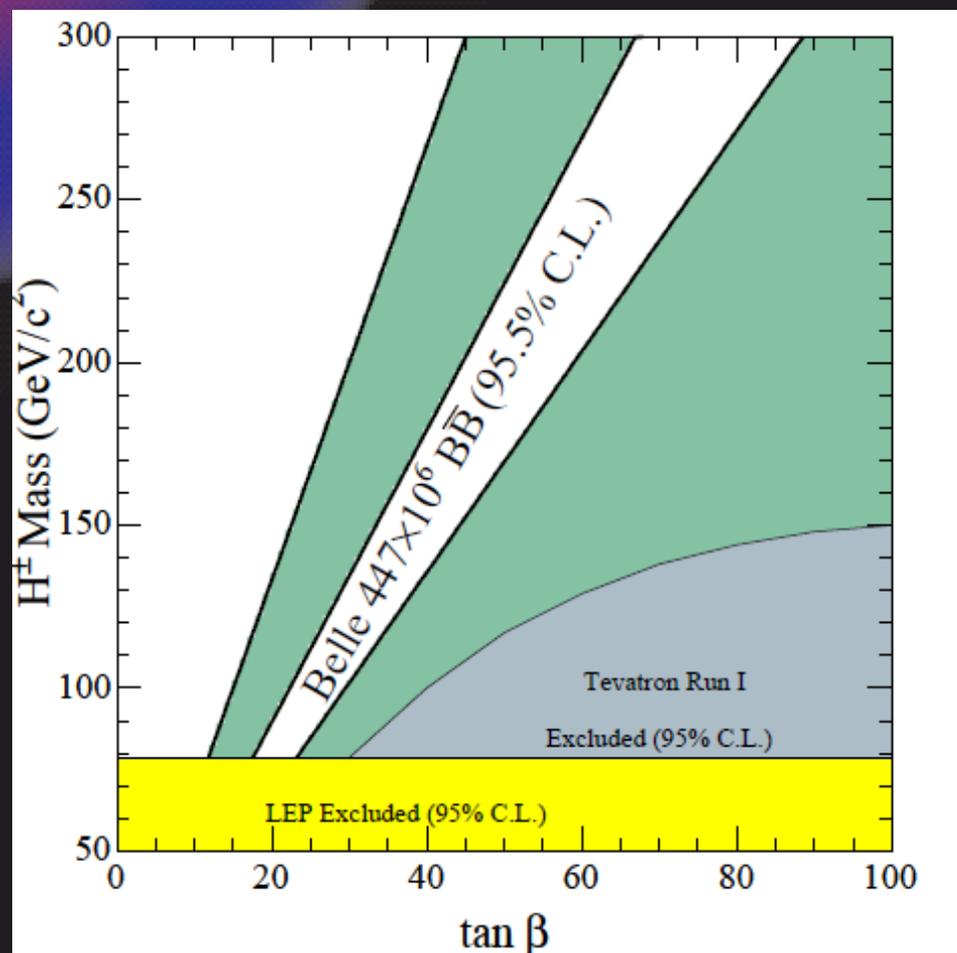
$B \rightarrow \tau \nu$ 崩壊によるヒッグス探索



崩壊の中間状態

- 標準理論ではウィークボゾン (W^-) が飛ぶ。
- 新しい物理があれば、荷電ヒッグス (H^-) も飛び、崩壊分岐比が変化するかもしれない。

荷電ヒッグス粒子に対する制限



- 荷電ヒッグスの存在可能な領域は白い部分に限られる。
- 今回得られた制限は、過去の高エネルギーでの直接探索結果をはるかに凌ぐ。

今後の素粒子研究

フレーバー物理

クォーク 荷電レプトン ニュートリノ の混合現象	Bファクトリー
	JPARC
	SK

新しい物理 (新粒子) の探索

ヒッグス粒子 の物理

質量の起源解明
LHC ILC

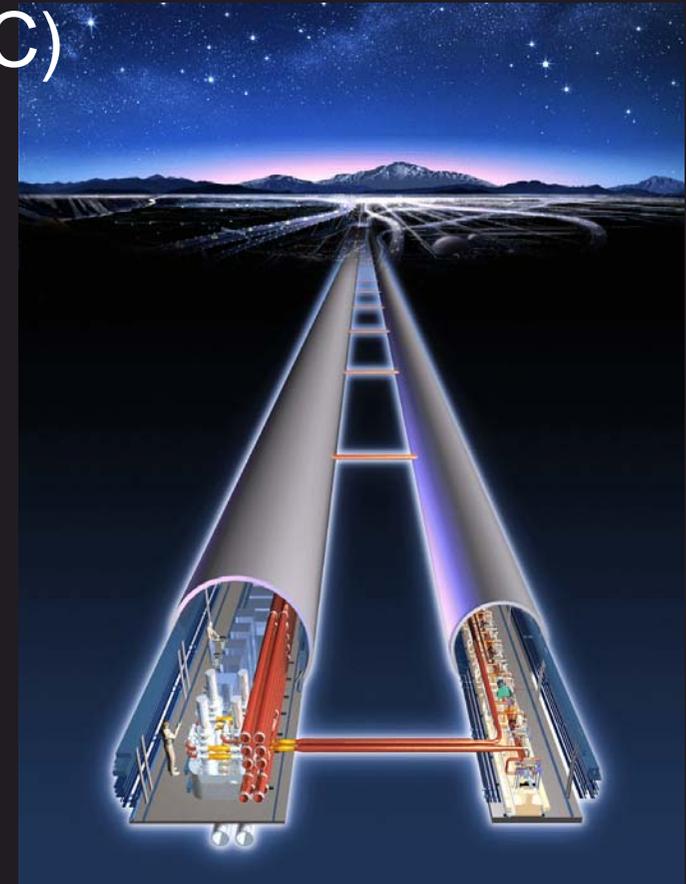


Figure by
Dr. Hayasaka
(Nagoya Univ.)

標準理論を越えた新しい粒子世界の探索へ！

エネルギーフロンティア加速器

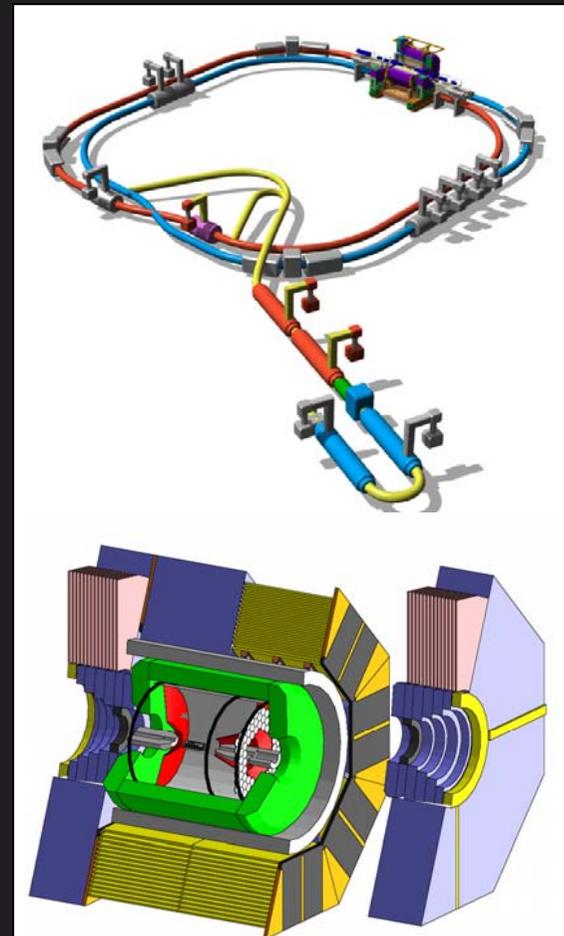
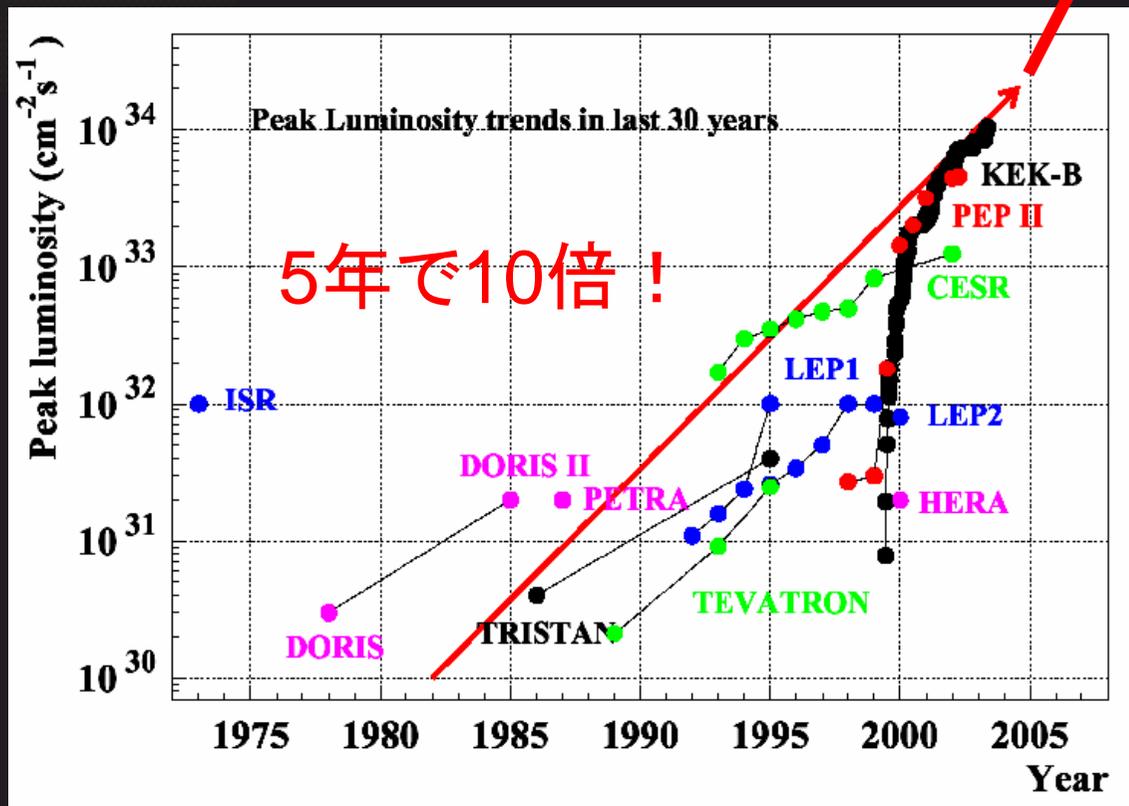
- LHC(CERN)
7TeV 陽子 × 7TeV 陽子, 2007年完成予定
- 国際リニアコライダー計画 (ILC)



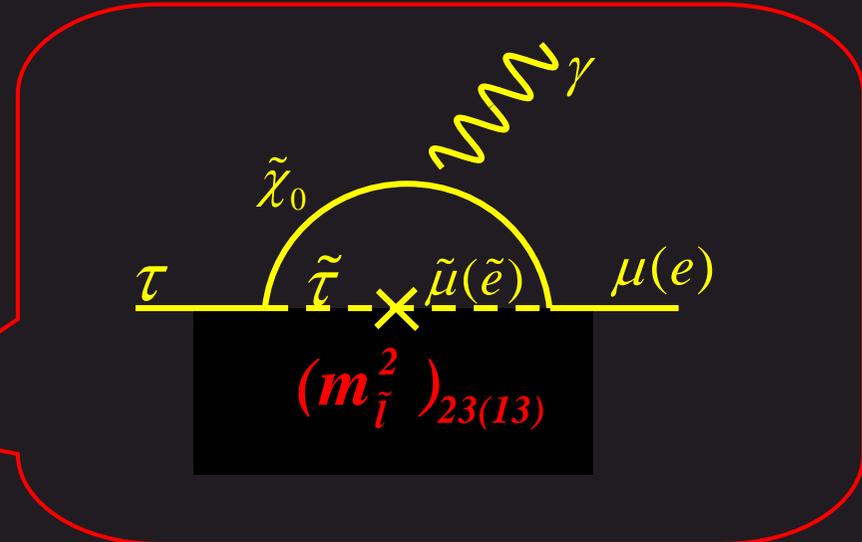
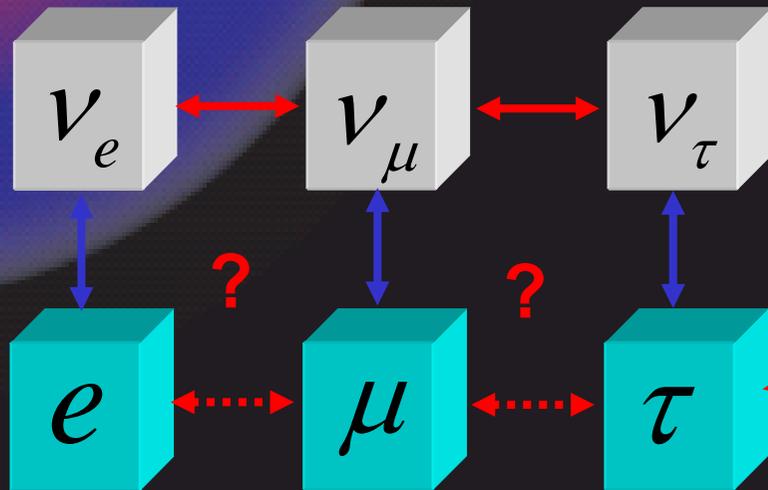
インテンシティーフロンティア

スーパーBファクトリー計画
= 現在の約50倍のビーム強度

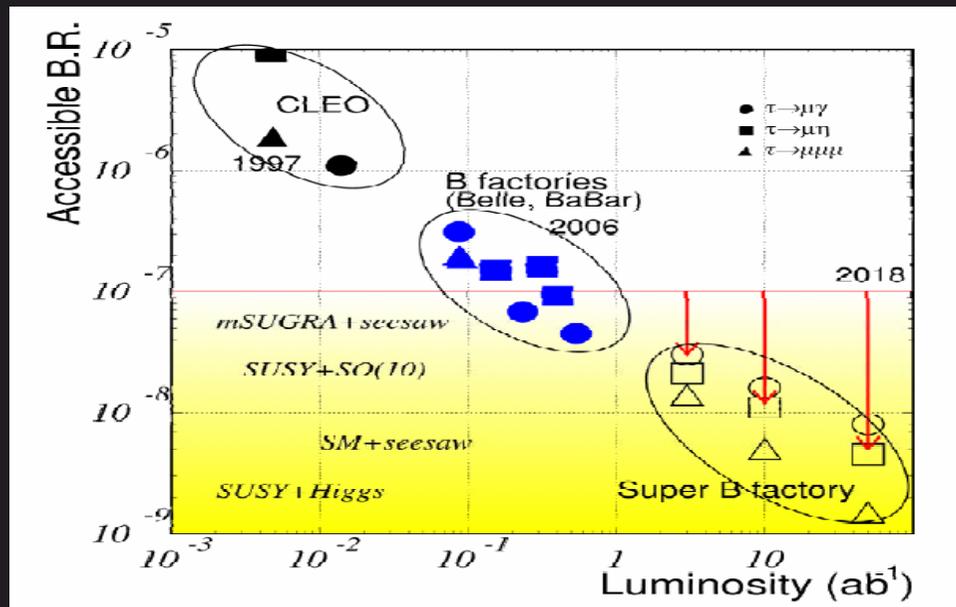
約 $10^{36} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$



タウレプトンの崩壊と新物理の探索



$$(m_{\tilde{l}}^2)_{23(13)}$$



素粒子と初期宇宙史

宇宙論・宇宙物理

WMAP衛星

ダーク・エネルギー (73%)

ダーク・マター (23%)

物質優勢宇宙

加速器のフロンティア
(エネルギーと強度)

Big Bang!

超弦理論

$10^{32}/10^{19}$

X?

10^{-44} 力の統一

10^{-36}

新しい物理
~1 TeV

$10^{28}/10^{15}$

超対称性

H

ヒッグス

標準理論

ゲージ理論

$10^{15}/100$

\bar{l}

W

Z

l

クォークルプトン

ν

q

\bar{q}

$\bar{\nu}$

ニュートリノ

10^{-5} CPの破れ 時間(秒)

$10^{12}/0.1$

QGP (クォーク・グルーオン・プラズマ)
温度/E (K/GeV)

q q q

ハドロン

\bar{q}
q q

\bar{q}
q q q

原子核

新しいハドロン状態

元素合成

p n
n p

補足資料

研究概要

ビッグバン

未知の新粒子

クォーク (q) 反クォーク (\bar{q})



CP 対称性の破れ

物質優勢の宇宙

宇宙の進化

地上の加速器実験

Bファクトリーにおける
CP 対称性の破れの研究

新粒子が関与する
現象の探索

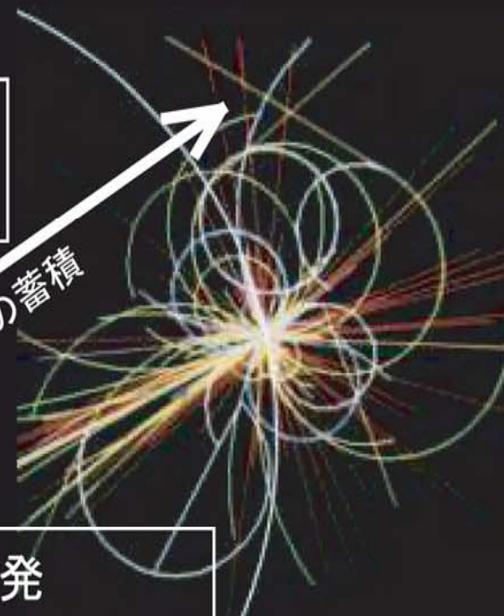
標準理論の精密検証

B中間子崩壊における
CP 対称性の破れの発見

実験技術の開発

- エアロジェル RICH
- TOPカウンター

B崩壊データの蓄積

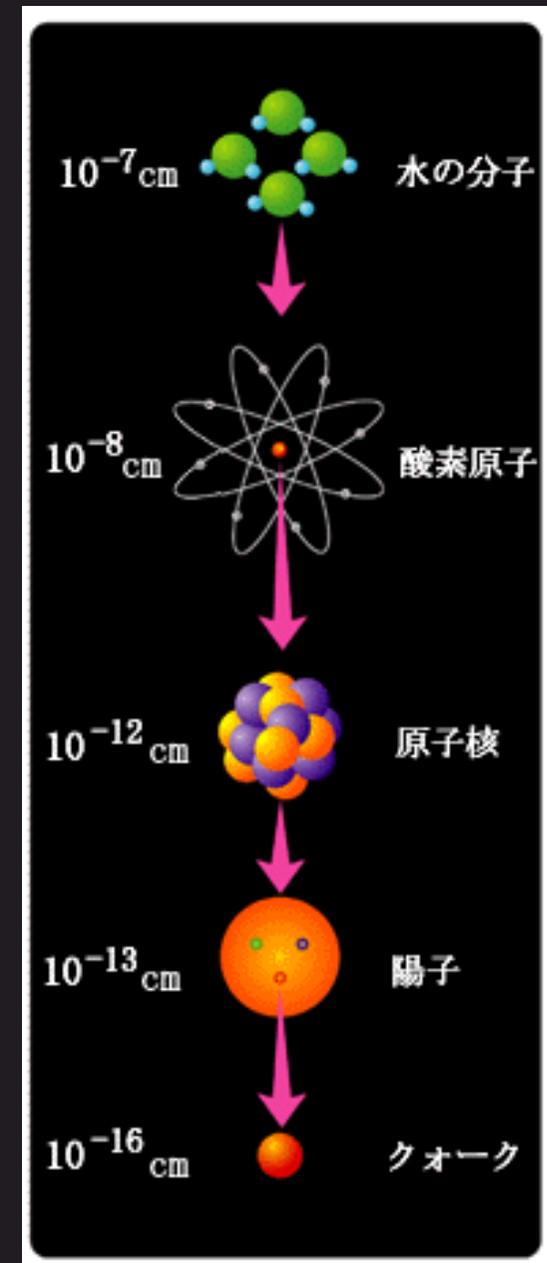


素粒子物理学

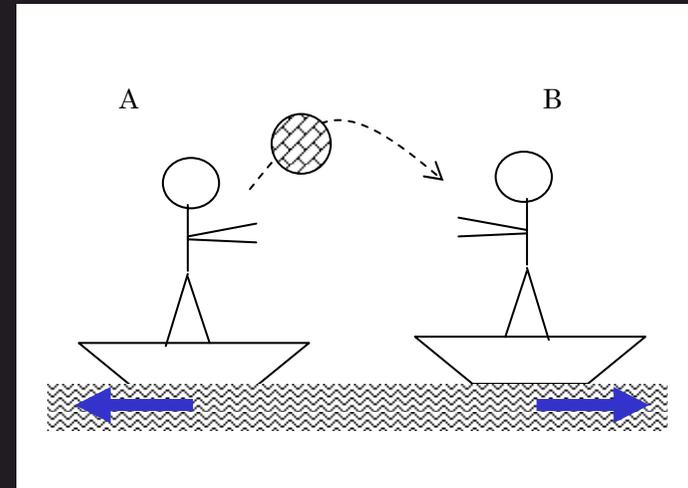
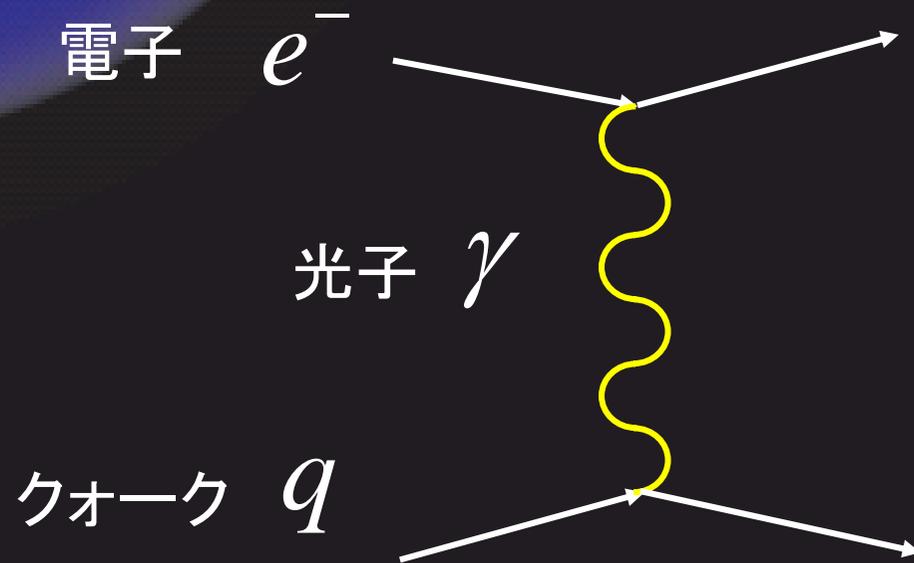
- 基本粒子は何か？
- 基本法則は何か？

宇宙 \longleftrightarrow 原子 \longleftrightarrow 基本粒子
百億光年 1億分の1センチ <10兆分の1センチ

➡ 初期宇宙の解明も。



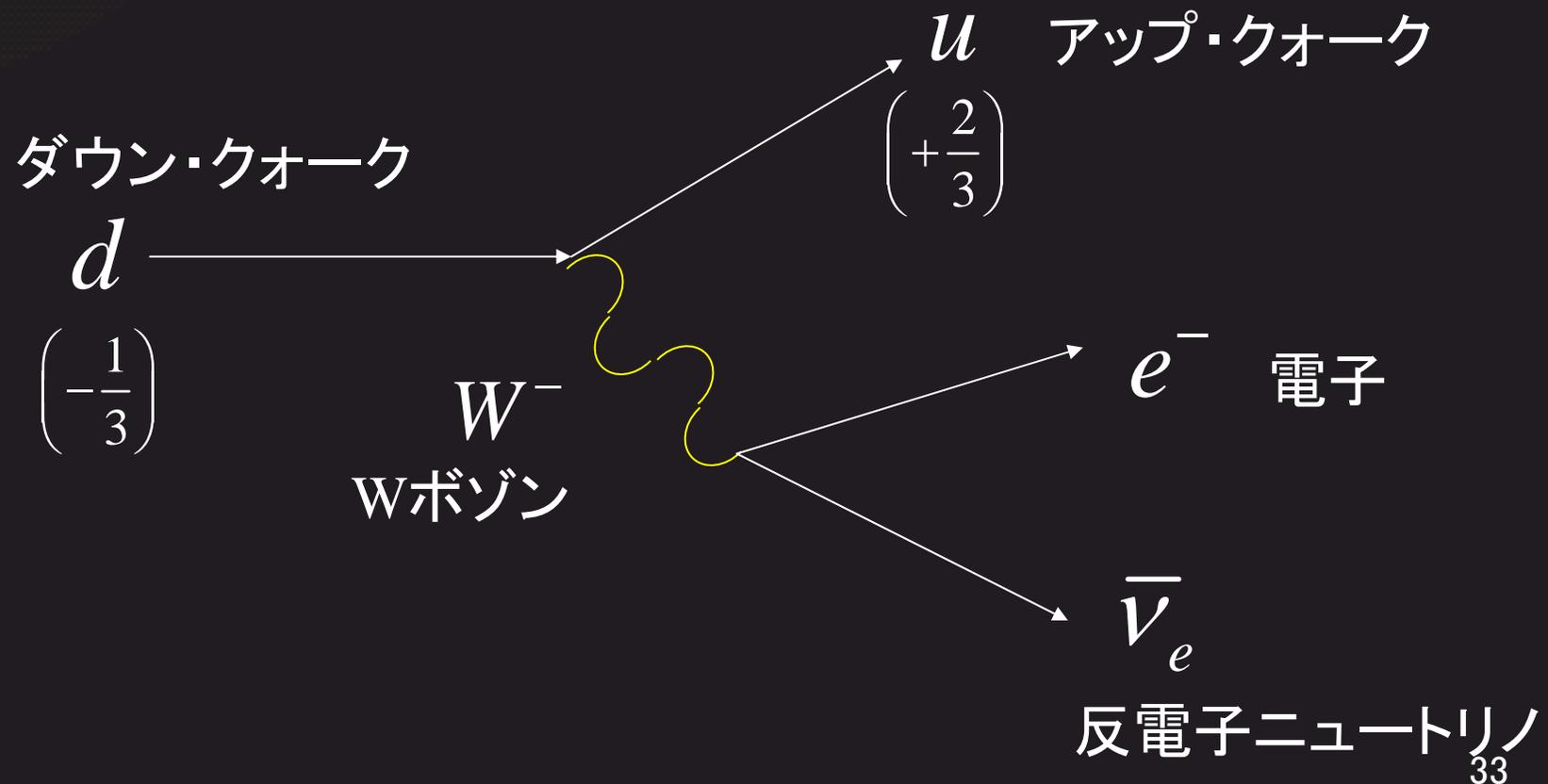
素粒子の相互作用



- 力は「ゲージ粒子」の交換で生じる

弱い力

- 弱い力はウィークボゾン W^\pm の交換によって引き起こされ、反応前後でクォークが変化する。



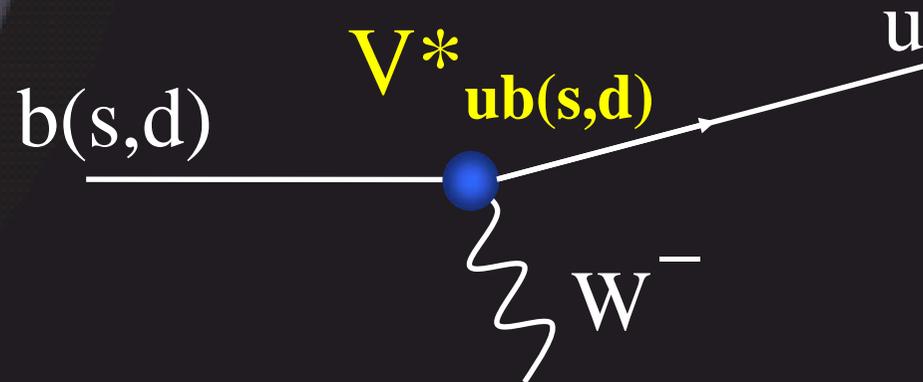
CP対称性の破れの歴史

- 1964年 K中間子の崩壊で発見
- 1973年 小林－益川理論
 - クォークが6種類あればCP対称性は必然的に破れる。
 - 当時知られていたクォークは3種類→後に全て発見された。
- 1981年 三田らがB中間子崩壊で大きなCPの破れを予言。

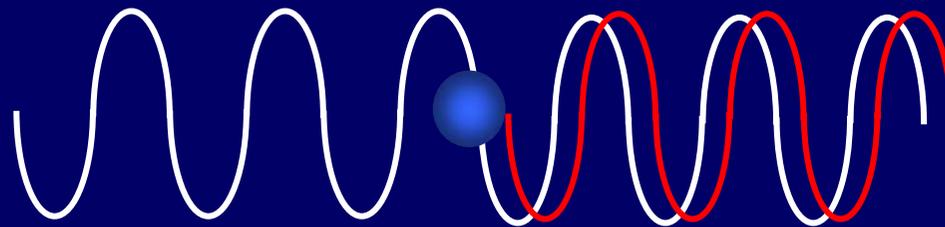
Bにおける大きなCPの破れは、小林-益川理論を含む標準理論の最終課題のひとつ(だった)。



CPの破れの源



$b \rightarrow c$
 $b \rightarrow u$



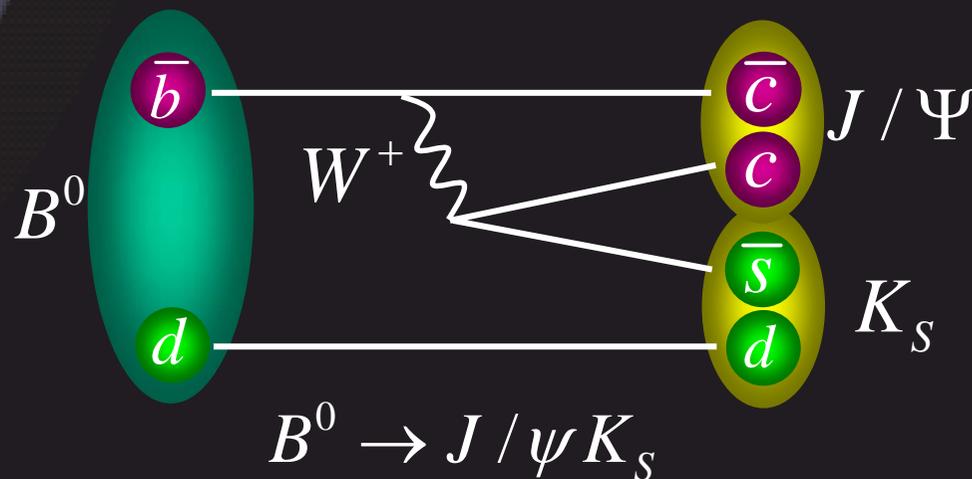
真空(ヒッグスの海)

ヒッグスとの相互作用 \longrightarrow 質量+混合

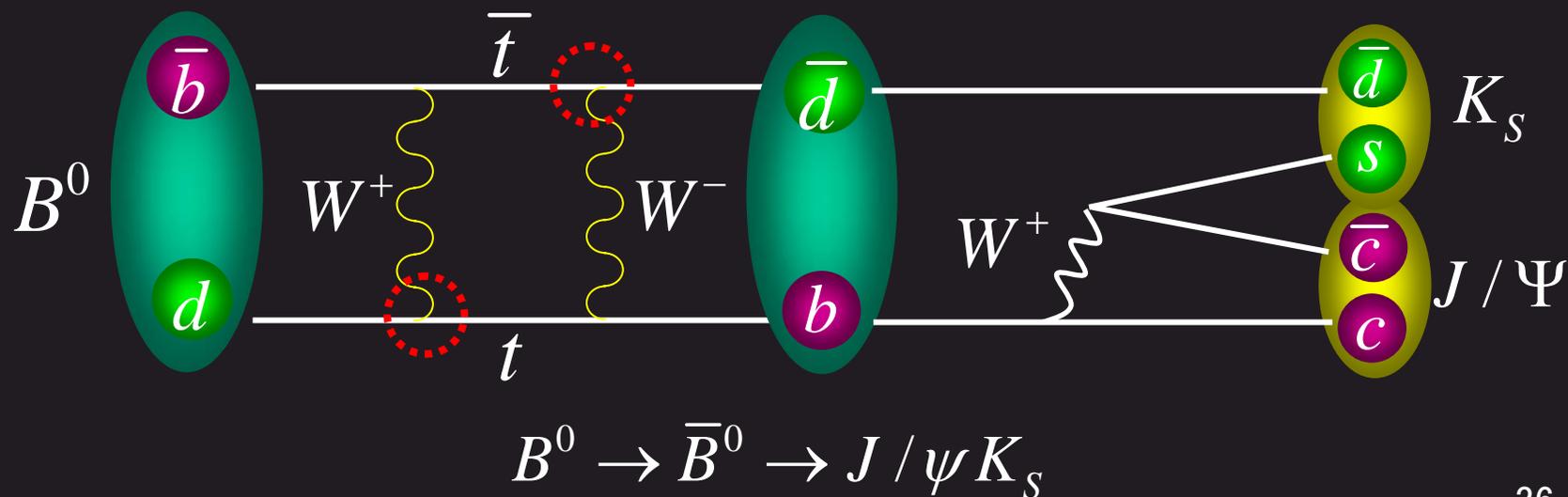
重いクォークから軽いクォークへの変化で
波の位相が変化する。

B中間子の崩壊は“二刀流”

- 木の形



- 箱+木の形



スーパーBファクトリでは...

