Physics
OSAKA UNIVERSITY

スーパーBファクトリーで探る新しい素粒子像

― フレーバー混合、CPの破れの物理 ―

田中 実（理学研究科）

物理談話会

大阪大学理学部D501、2011/12/02

はじめに

素粒子の標準模型(Standard Model, SM)

ゲージ粒子

強い相互作用

g

電磁相互作用

γ

弱い相互作用

$W^{\pm}$ Z

物質粒子

	第１世代	第２世代	第３世代
クォーク	u	c	t
	d	s	b
レプトン	ν_e	ν_μ	ν_τ
	e	μ	τ

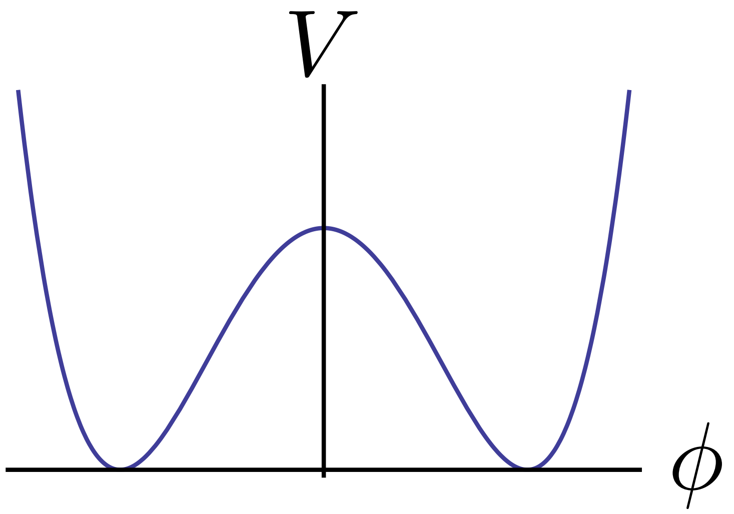
ヒッグス粒子 h

問題点、疑問点

電弱対称性の破れ

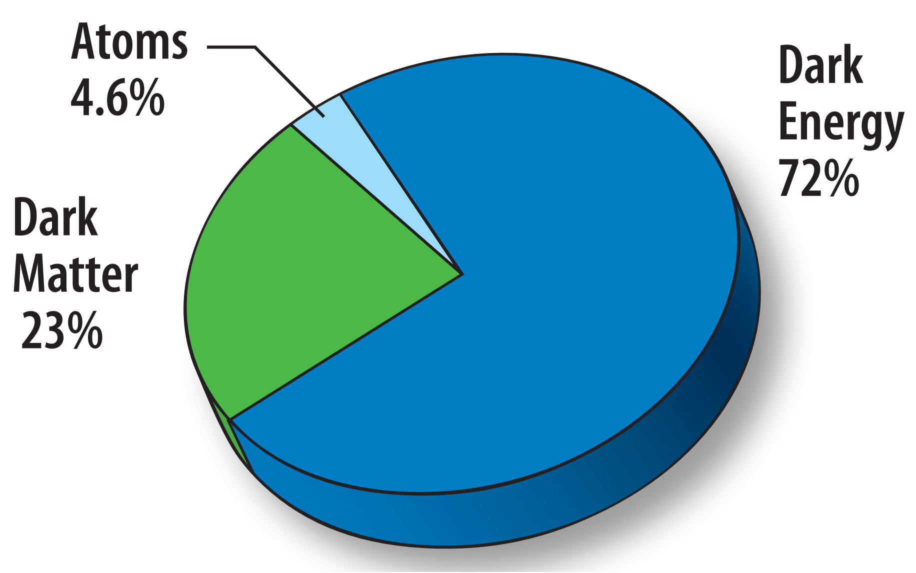
ヒッグス機構

未発見



CERN LHCで探索中

ダークマター、ダークエネルギー



http://map.gsfc.nasa.gov/

SMにDMの候補なし

宇宙のバリオン数

バリオン数＝０ ⇒ バリオン数≠０

サハロフの３条件

1. バリオン数非保存
2. CおよびCPの破れ
3. 非平衡

標準模型では

1. スファレロン過程
2. 小林•益川機構　　CPの破れが小さい
3. 電弱相転移　　平衡からのずれが小さい

⟶ 標準模型を越える新しい物理

B summer workshop, 栂池, September 1993

1993-9-5 栂池

Baryogenesis

小林 誠 (KEK)

宇宙のバリオン密度

$$\boxed{\frac{n_B}{s} \approx (6\sim10)\times10^{-11}} \qquad (N_\nu=3)$$

元素合成 ⇒ $\eta = \frac{n_B}{n_\gamma} = (4\sim7)\times10^{-10}$ $(N_\nu=3)$

cf. $s = \frac{2\pi^2}{45} g_{*s} T^3$

$n_\gamma = \frac{2\zeta(3)}{\pi^2} T^3$

$N_\nu = 3 \Rightarrow \begin{cases} g_{*s} \simeq 4 \\ s \simeq 7 n_\gamma \end{cases}$

・問題は

・fluctuation とは考えにくい

・初期値? → fine tuning, 特に inflation があると

⇒ バリオン生成

サハロフ (Sakharov) の3条件

・$\not{B}$

・$\not{C}$ and $\not{CP}$

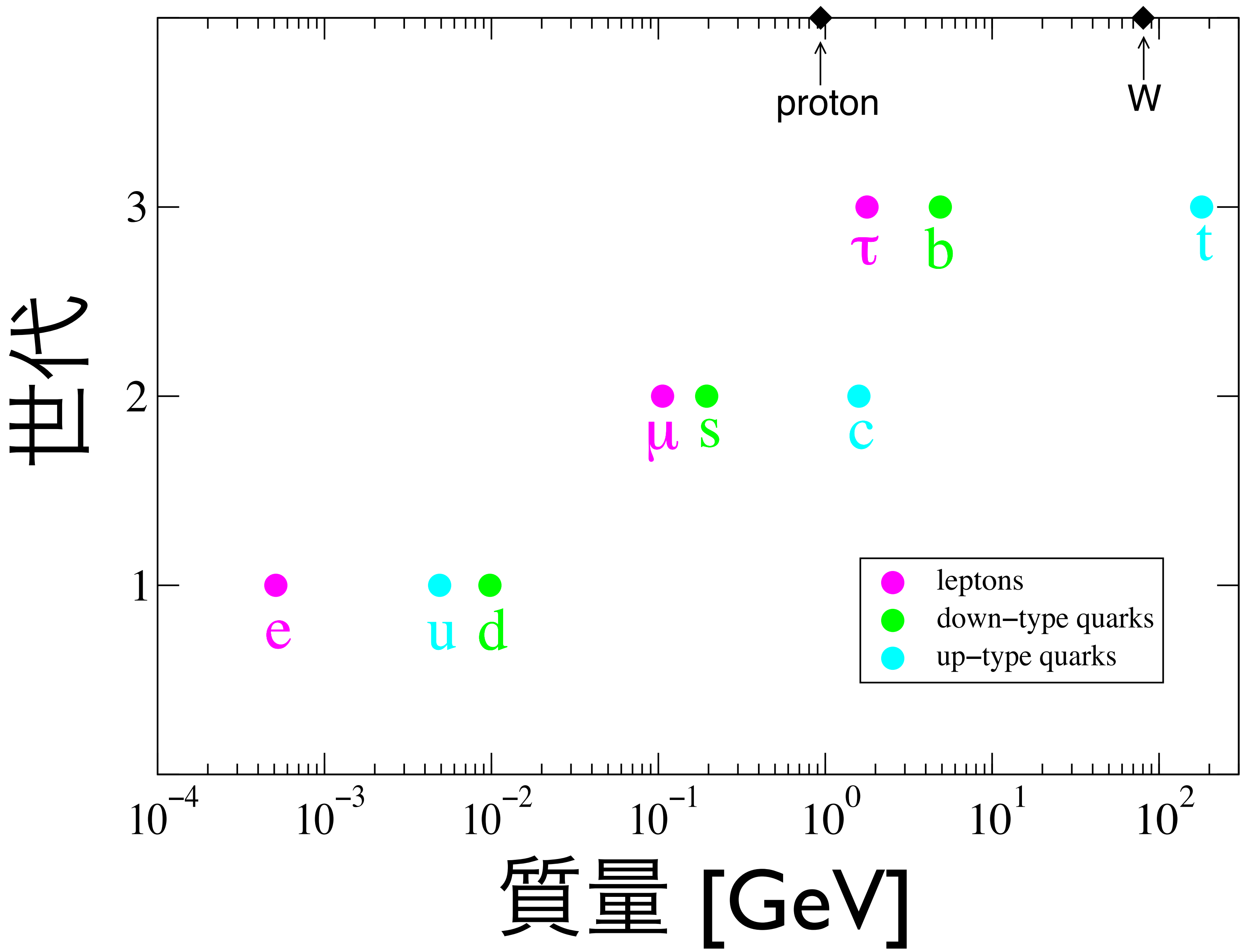
・非平衡　　熱平衡で $q \Leftrightarrow \bar{q}$ があるとすると

$\mu_q = \mu_{\bar q},\ T_q = T_{\bar q} \Rightarrow N_q = N_{\bar q}$

フレーバーの問題

３世代？ 質量パターン？フレーバー混合？

クォーク、レプトンの質量の階層性



$$1\,\mathrm{GeV} = 10^9\,\mathrm{eV}$$

歴史(の一部)

1956: T.D. Lee, C.N. Yang (ノーベル賞1957)

パリティ(P)の破れの理論

1957: C.S. Wu et al.

パリティの破れの発見

1957: L. D. Landau

中性K中間子崩壊におけるCP保存

$K_S \to \pi\pi,\ K_L \to \pi\pi\pi$

1961: S. L. Glashow (ノーベル賞1979)

1964: J.W. Cronin, V. L. Fitch, ... (ノーベル賞1980)

中性K中間子崩壊におけるCPの破れ

$K_L \to \pi^+\pi^-$

1967: A. Sakharov
バリオン数生成の３条件
1967: S. Weinberg (ノーベル賞1979)
1968: A. Salam (ノーベル賞1979)
1970: S.L.Glashow, J. Iliopoulos, L. Maiani
FCNCに基づくチャームクォークの予言
1971: G. ’t Hooft (ノーベル賞1999)
ゲージ理論の繰り込み
1973: M. Kobayashi, T. Maskawa (ノーベル賞2008)
6クォーク模型
1974: S. Ting, B. Richter (ノーベル賞1976)
J/Ψの発見

1975: M. L. Perl (ノーベル賞1995)

タウの発見

1977: L. Lederman

ボトムの発見

1987: ARGUS

B^0–$\bar{B}^0$混合の発見

1989: CLEO

$b \to u$ 遷移の発見

1994: CDF, D0

トップの発見

2002: Belle, BaBar（Bファクトリー実験）

B中間子崩壊におけるCPの破れの確立

(スーパー)Bファクトリー

B中間子

$\Rightarrow b$ クォーク (反 b クォーク) を 1 つ含んでいる中間子

$B^+ = (\bar{b}u)$, $B_d = (\bar{b}d)$, $B_s = (\bar{b}s)$

$B^- = (b\bar{u})$, $\bar{B}_d = (b\bar{d})$, $\bar{B}_s = (b\bar{s})$

質量：$m_B \sim 5.3\,\mathrm{GeV}$、寿命：$\tau_B \sim 1.6\,\mathrm{ps}$

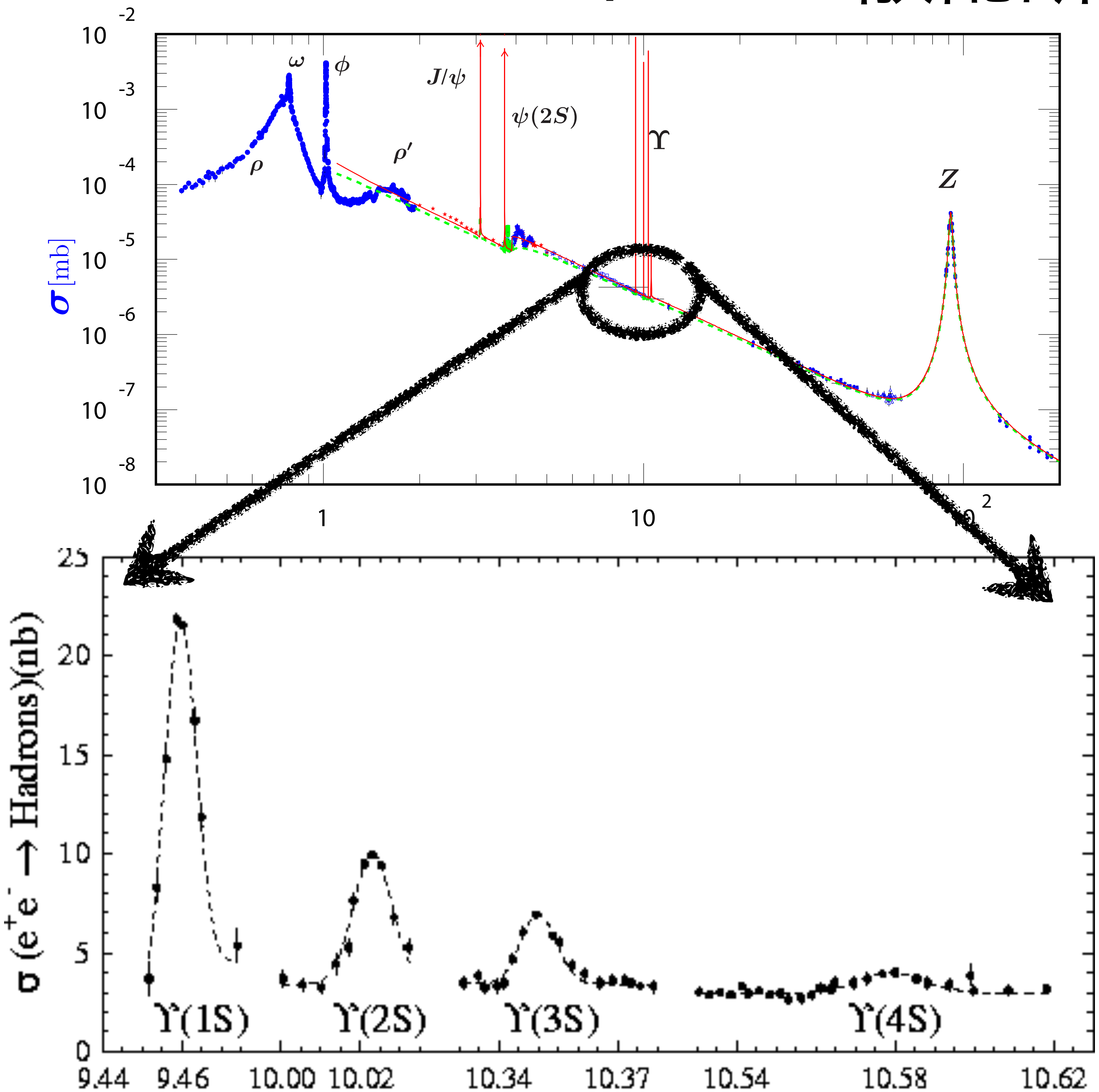
Bファクトリー

電子•陽電子衝突型加速器

KEKB/Belle (KEK, つくば)

PEP-II/BaBar (SLAC, Stanford)

$e^+e^- \to$ハドロン 散乱断面積

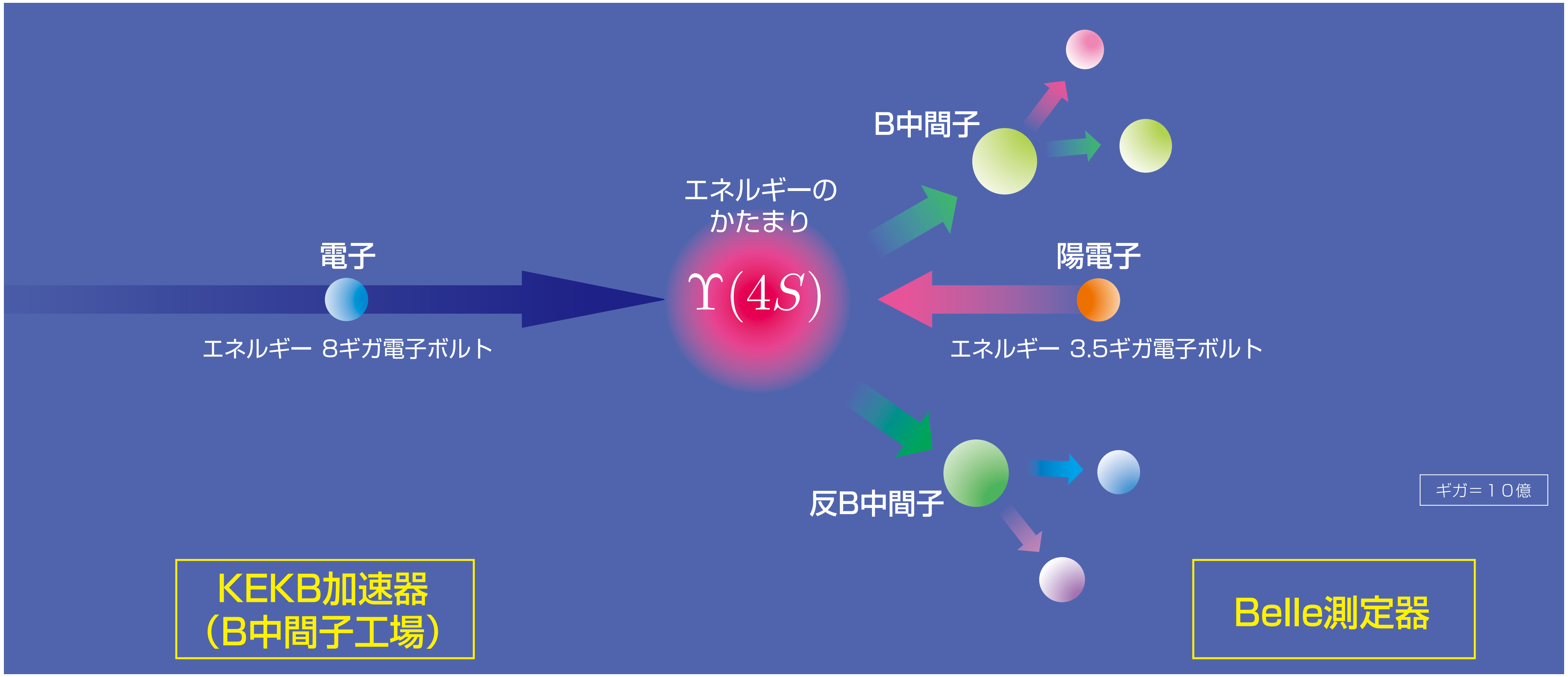


重心系エネルギー [GeV]

$$\Upsilon = (\bar{b}b)$$

$$\Upsilon(4S)$$

B中間子ペアに崩壊



電子: $E_- = 8\,\mathrm{GeV}$ 陽電子: $E_+ = 3.5\,\mathrm{GeV}$

重心系エネルギー（特殊相対論，自然単位)

$$c = \hbar = 1$$

$$\sqrt{s} = \sqrt{(E_- + E_+)^2 - (E_- - E_+)^2} = 2\sqrt{E_- E_+}$$

$$\simeq 10.58\,\mathrm{GeV} \simeq M(\Upsilon(4S))$$

$\Upsilon(4S)$の速度 $\beta = (E_- - E_+)/(E_- + E_+) \simeq 0.39$

KEKB/Belleの実績 (1999/6/2ー2010/6/30)

ピークルミノシティー

$2.1 \times 10^{34}\mathrm{cm}^{-2}\mathrm{s}^{-1}$(設計値 $1 \times 10^{34}\mathrm{cm}^{-2}\mathrm{s}^{-1}$)

積分ルミノシティー

$1.04\,\mathrm{ab}^{-1}$

$1\,\mathrm{b} = 10^{-28}\mathrm{m}^2$

生成されたB中間子の数

積分ルミノシティー X 散乱断面積

$\sim O(10^9)$ 10億個

SuperKEKB/Belle II (2015ー)

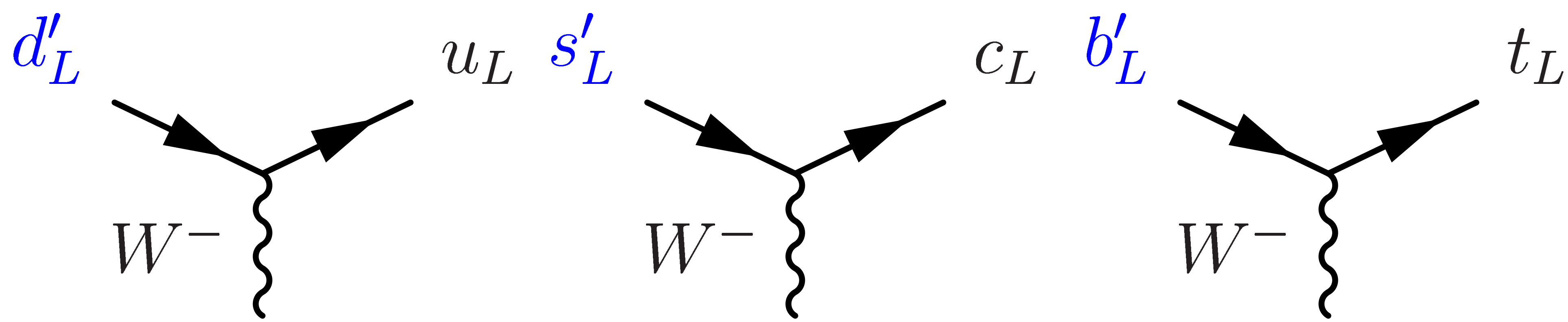
積分ルミノシティー

2021までに $50\,\mathrm{ab}^{-1}$

クォーク混合とCPの破れ

荷電カレント相互作用

$W^{\pm}$ 粒子を媒介とする弱い相互作用で、β 崩壊を起こす。
左巻きのクォーク・レプトンのみ。$\Leftarrow$ パリティー (P) の破れ



d'_L, s'_L, b'_L: フレーバー (あるいはゲージ) の固有状態
$\Rightarrow$ 同じ 世代間での遷移のみ

フレーバーの固有状態 $\neq$ 質量の固有状態 (d_L, s_L, b_L)

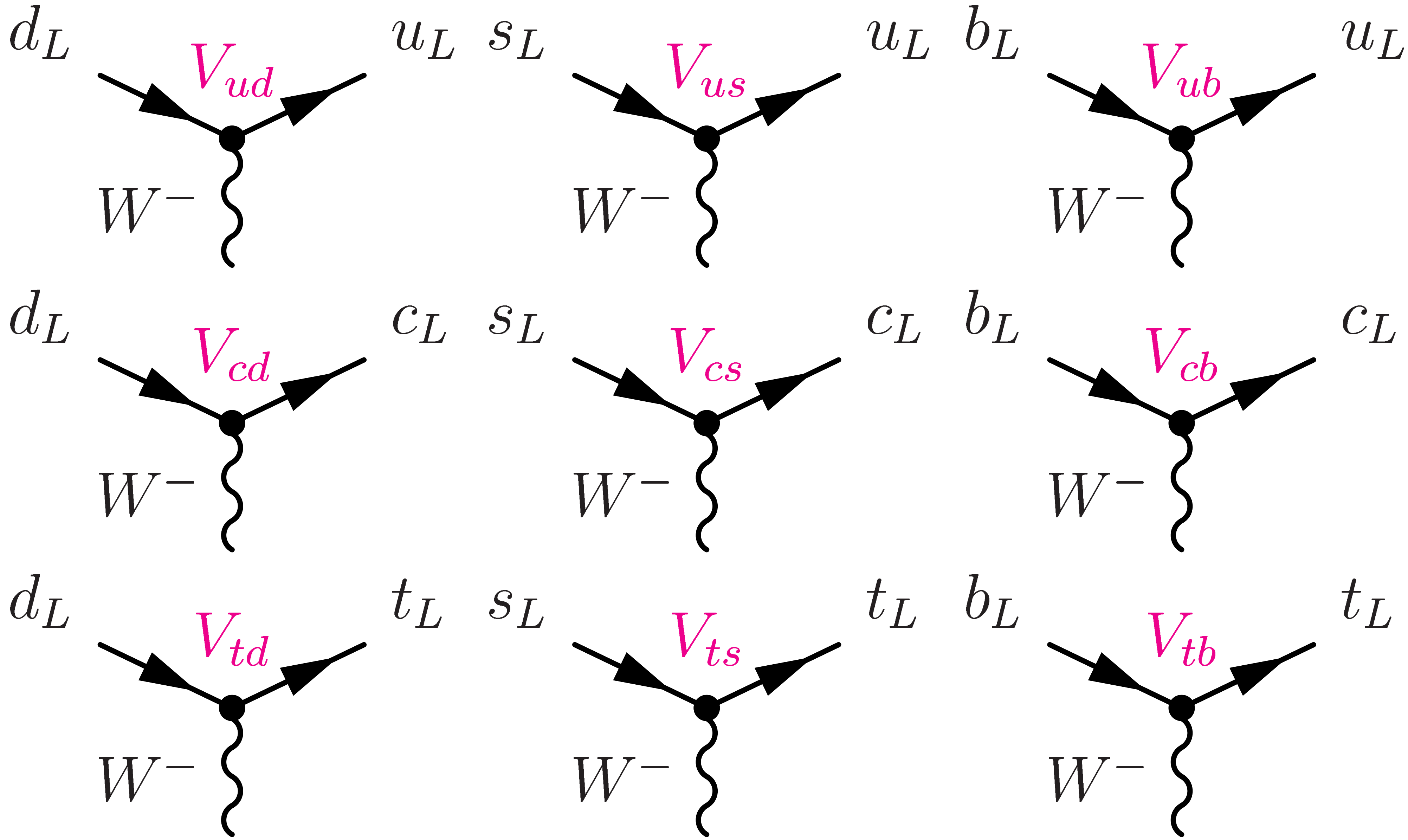
• フレーバーの固有状態と質量の固有状態の関係
$\Rightarrow$ ユニタリー変換で結びつく。

$$\begin{pmatrix} d'_L \\ s'_L \\ b'_L \end{pmatrix} = V_{KM} \begin{pmatrix} d_L \\ s_L \\ b_L \end{pmatrix}$$

V_{KM}: 3×3 ユニタリー行列 $\Leftarrow$ 小林・益川 (KM) 行列
$\Rightarrow$ クォークの混合を表す

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

- 質量固有状態で見た荷電カレント相互作用

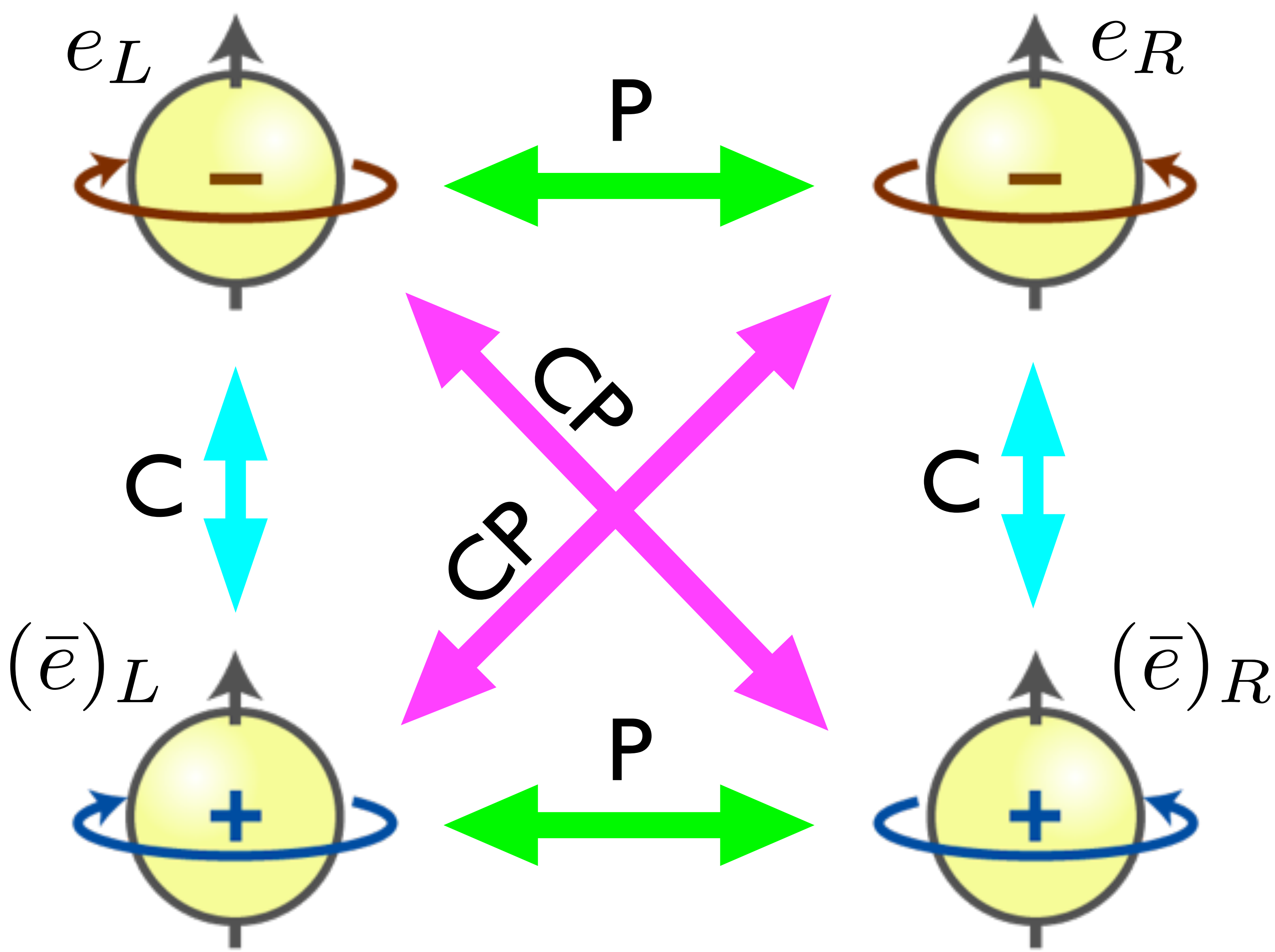


異なる世代間の遷移がある

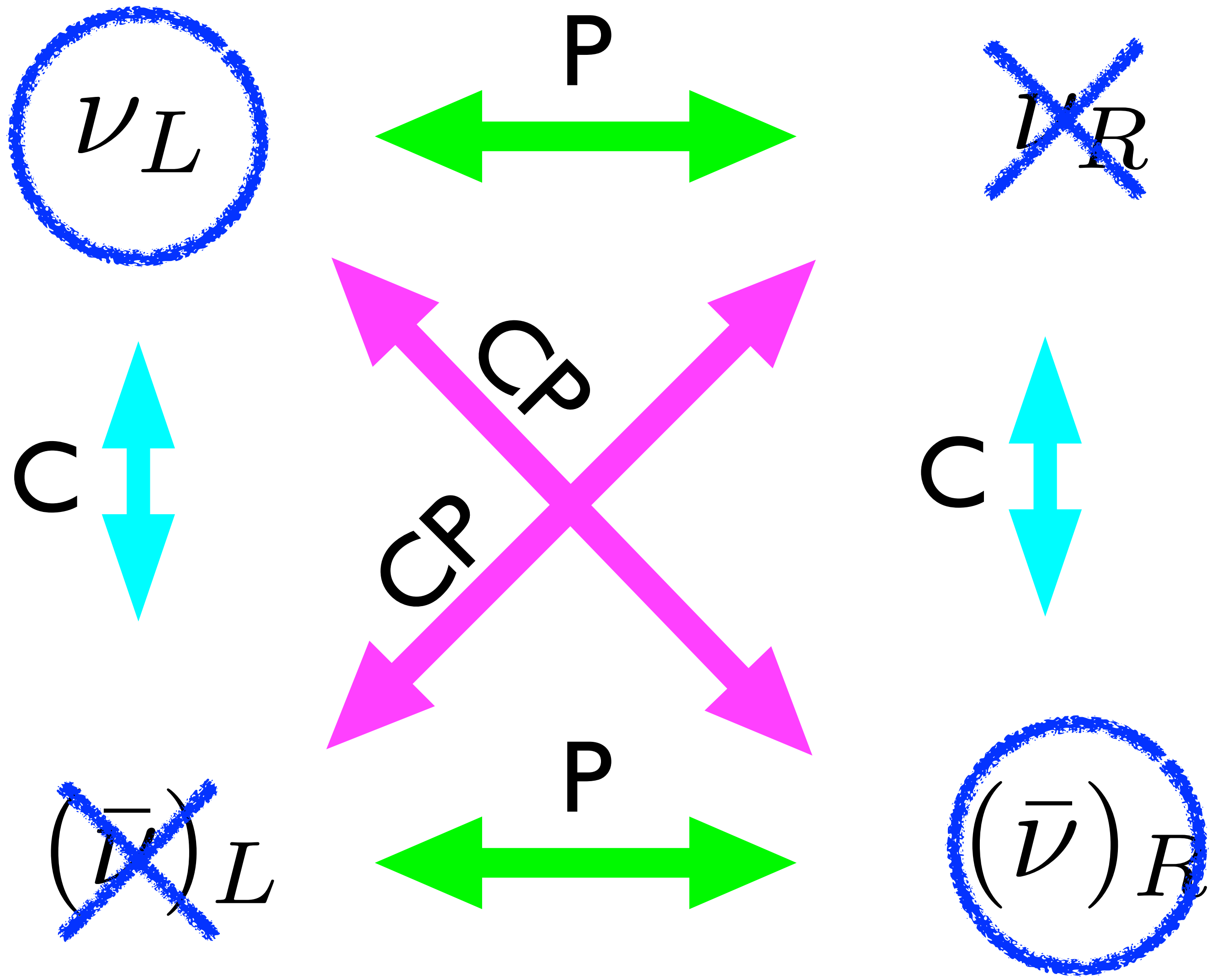
CPの破れ

P: パリティー変換(空間反転)

C: 荷電共役変換(粒子↔反粒子)

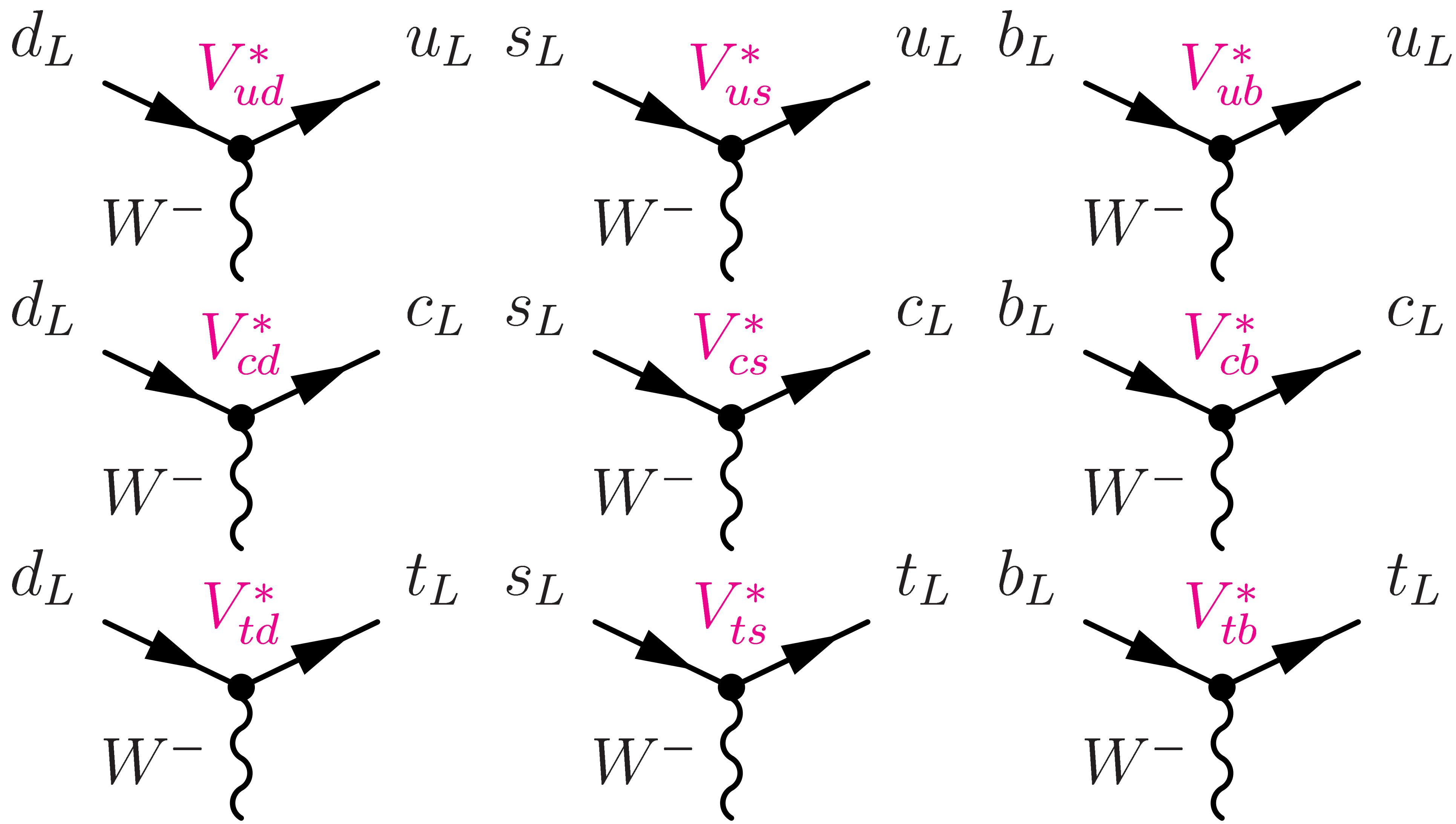


ニュートリノの場合



CとPは破れているが、CPはOK.

- 荷電カレント相互作用を CP 変換してみると

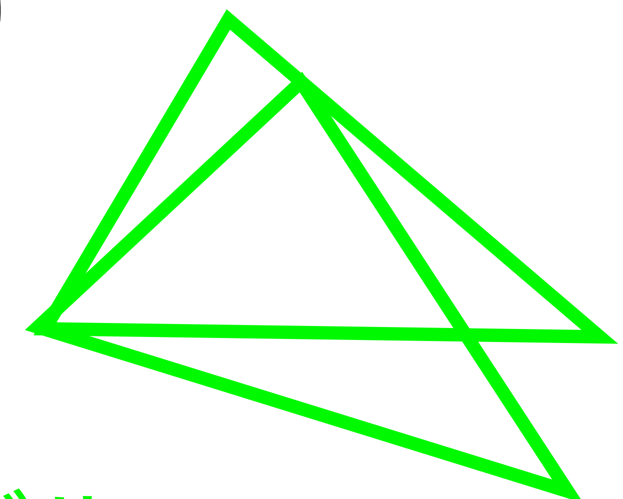


$V_{ij} \to V_{ij}^*$ となるだけ。

$V_{ij} = V_{ij}^*$ 、すなわち V_{ij} が実数なら CP は保存する。

CKM行列のユニタリティー

$i \neq j$ のとき, $\displaystyle\sum_{k=1}^{3} V_{ki}^* V_{kj} = 0$



複素平面上の三角形

ユニタリティートライアングル

三角形の形や面積は, クォークの位相に依らない.

位相の再定義は, 三角形全体の回転に対応.

$$\sum_{k=1}^{3} e^{i\theta_k} V_{ki}^* e^{-i\theta_i} e^{-i\theta_k} V_{kj} e^{i\theta_j} = e^{i(\theta_j - \theta_i)} \sum_{k=1}^{3} V_{ki}^* V_{kj} = 0$$

三角形がつぶれない

$\Updownarrow$

(クォークの位相に依らず)
実数でない V_{ij} が存在

$\Updownarrow$

CPの破れ

三角形の面積 ~ CPの破れの大きさ

N世代理論

N角形がつぶれない ⟺ CPの破れ

N=2はダメ.

N≥3ならOK.

クォークは６種類以上.

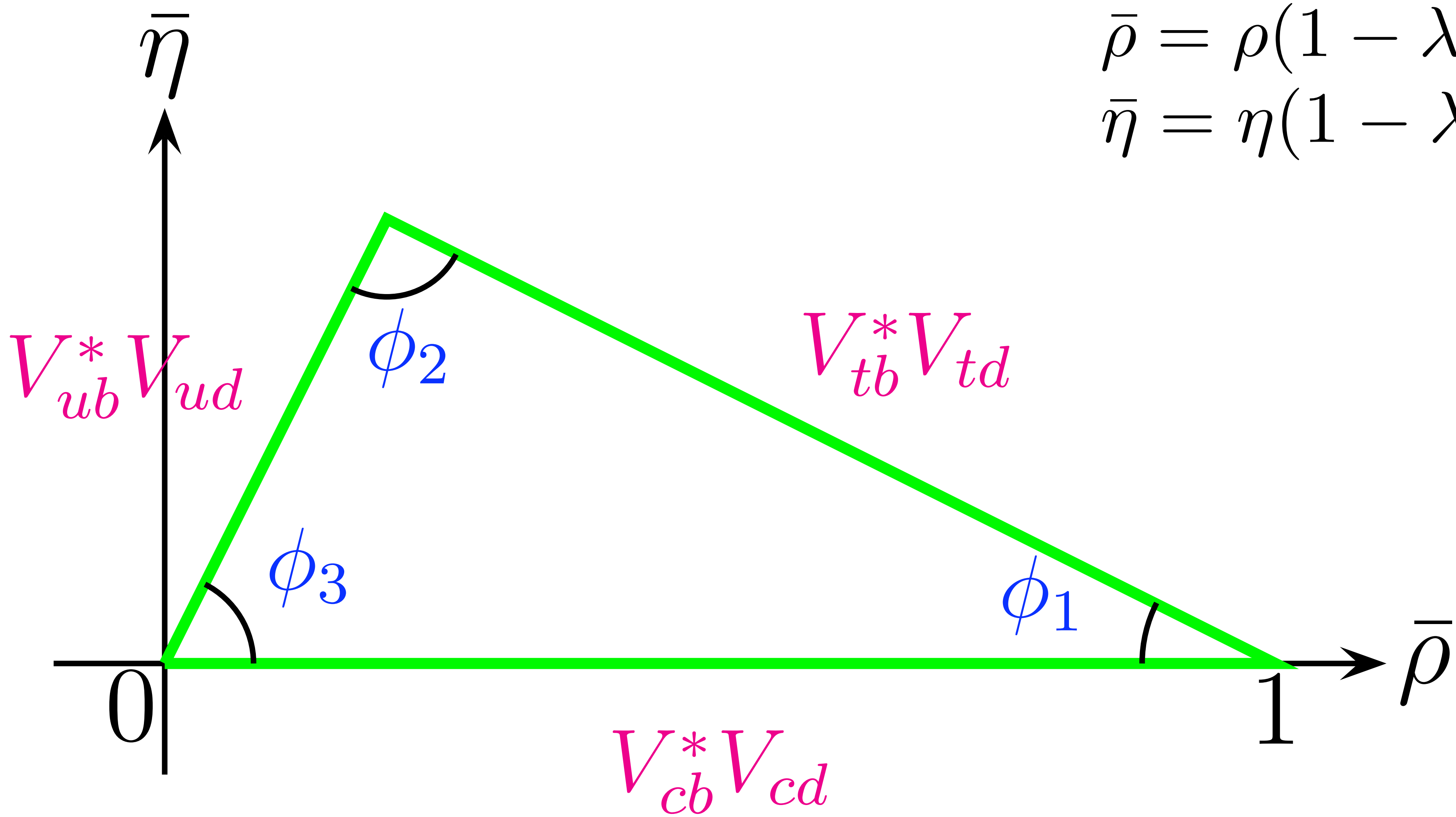
小林•益川の発見.　　ノーベル賞(2008)

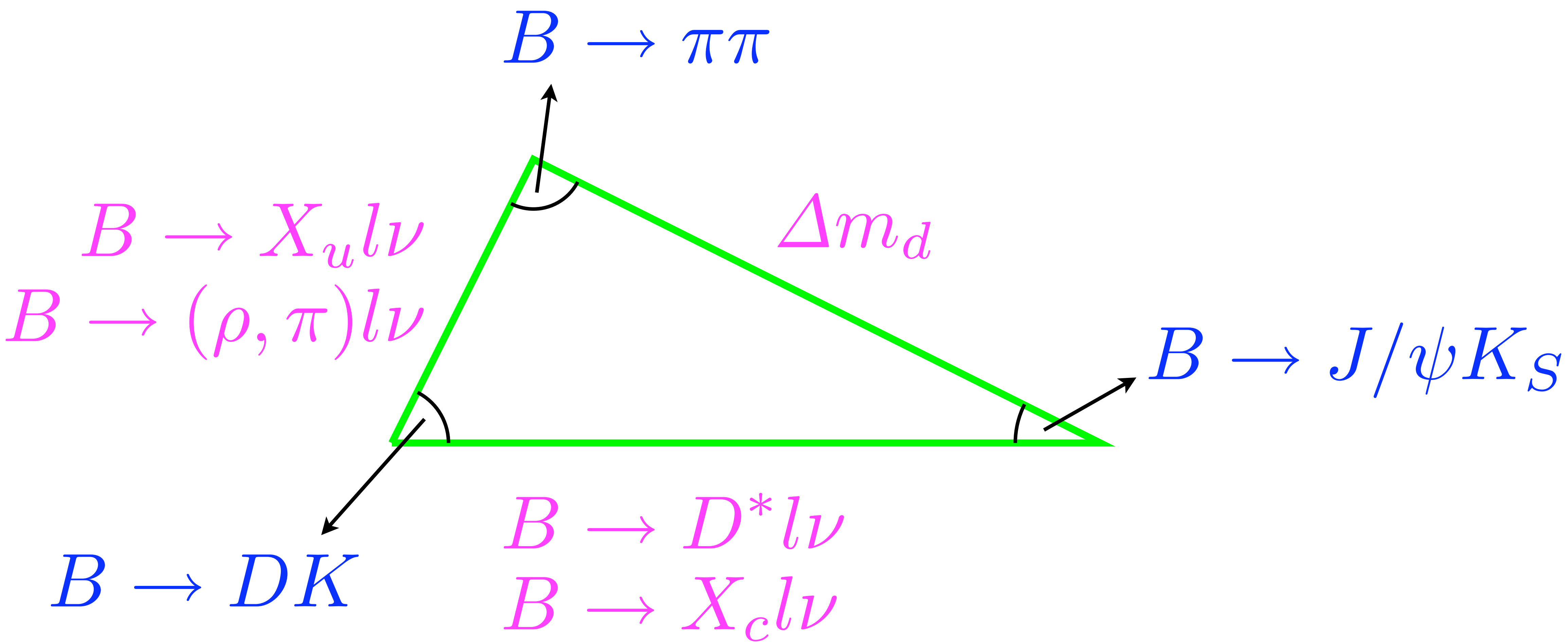
物理的複素位相の数　$(N-1)(N-2)/2$

B中間子とUT

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

$$\bar{\rho} = \rho(1 - \lambda^2/2 + \cdots)$$
$$\bar{\eta} = \eta(1 - \lambda^2/2 + \cdots)$$





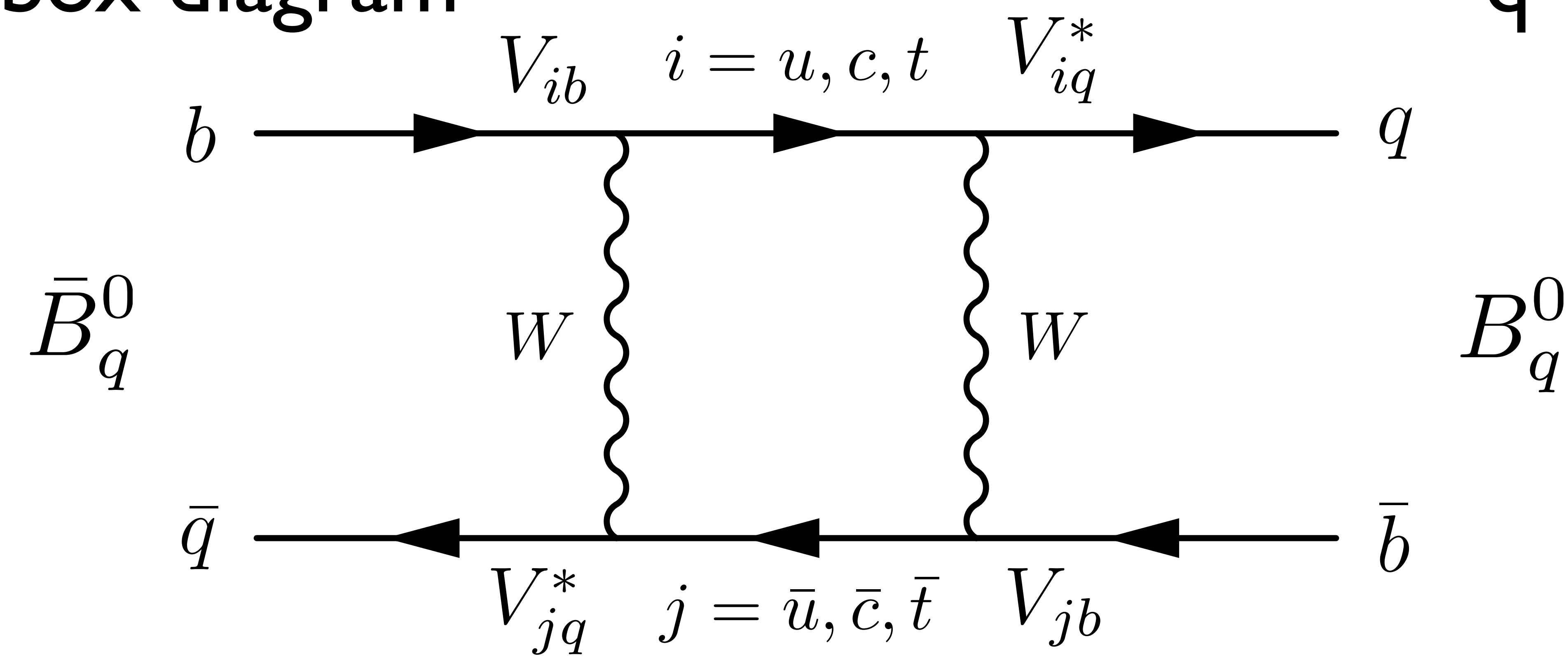
$B \to \pi\pi$
$B \to X_u l\nu$
$B \to (\rho, \pi) l\nu$
Δm_d
$B \to J/\psi K_S$
$B \to DK$
$B \to D^* l\nu$
$B \to X_c l\nu$

B中間子混合の量子力学

B^0–$\bar{B}^0$ 混合

box diagram

q = d or s



topの寄与が支配的

$$M_{12}(B_d) \propto (V_{tb} V_{td}^*)^2$$

$$M_{12}(B_s) \propto (V_{tb} V_{ts}^*)^2$$

$B^0 \leftrightarrow \bar{B}^0$ 遷移 $\Rightarrow$ B^0–$\bar{B}^0$ 混合

波動関数: $|\psi(t)\rangle = \psi_B(t)|B^0\rangle + \psi_{\bar{B}}(t)|\bar{B}^0\rangle$

$$|\psi_B(0)|^2 + |\psi_{\bar{B}}(0)|^2 = 1$$

運動方程式 (Schrödinger 方程式):

$$i\frac{d}{dt}\begin{pmatrix} \psi_B(t) \\ \psi_{\bar{B}}(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M_{11} - \frac{i}{2}\Gamma_{11} & M_{12} - \frac{i}{2}\Gamma_{12} \\ M_{21} - \frac{i}{2}\Gamma_{21} & M_{22} - \frac{i}{2}\Gamma_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \psi_B(t) \\ \psi_{\bar{B}}(t) \end{pmatrix}$$

M, Γ: 2×2 エルミート行列

注) $M - \frac{i}{2}\Gamma$ はエルミートでない. $\Leftarrow$ B 中間子崩壊

物理的な状態(ハミルトニアンの固有状態)

$M - \frac{i}{2}\Gamma$ の固有ベクトル: $|B_{H,L}\rangle = p|B^0\rangle \pm q|\bar{B}^0\rangle$

H: heavy, L: light

$$\frac{q}{p} = \frac{\sqrt{(M_{12} - \frac{i}{2}\Gamma_{12})(M_{12}^* - \frac{i}{2}\Gamma_{12}^*)}}{M_{12} - \frac{i}{2}\Gamma_{12}}, \quad |p|^2 + |q|^2 = 1$$

固有値: 質量 と 幅 ($\propto$ 寿命の逆数)

$$\begin{aligned} \lambda_{H,L} &= m_{H,L} - \frac{i}{2}\Gamma_{H,L} \\ &= M_0 - \frac{i}{2}\Gamma_0 \pm \sqrt{(M_{12} - \frac{i}{2}\Gamma_{12})(M_{12}^* - \frac{i}{2}\Gamma_{12}^*)} \end{aligned}$$

状態の時間発展

Schrödinger 方程式の解

B^0 at $t=0 : |B^0(t)\rangle = g_+(t)|B^0\rangle + \frac{q}{p}g_-(t)|\bar{B}^0\rangle$
$\bar{B}^0$ at $t=0 : |\bar{B}^0(t)\rangle = \frac{p}{q}g_-(t)|B^0\rangle + g_+(t)|\bar{B}^0\rangle$

$$g_\pm(t) = \frac{1}{2}[\exp(-i\lambda_H t) \pm \exp(-i\lambda_L t)]$$

標準模型: ボックスダイアグラム ($= M_{12} - \frac{i}{2}\Gamma_{12}$)

$\Rightarrow$ $|M_{12}| \gg |\Gamma_{12}|$

$$\Delta m = 2|M_{12}|, \ \Delta\Gamma = 0 \ (\Gamma_H = \Gamma_L \equiv \Gamma)$$

$$\frac{q}{p} = \frac{M_{12}^*}{|M_{12}|} = \frac{V_{tb}^* V_{td}}{V_{tb} V_{td}^*} = e^{-2i\phi_1}$$

質量差 $\Delta m_q \simeq 2|M_{12}(B_q)| \quad (q = d, s)$

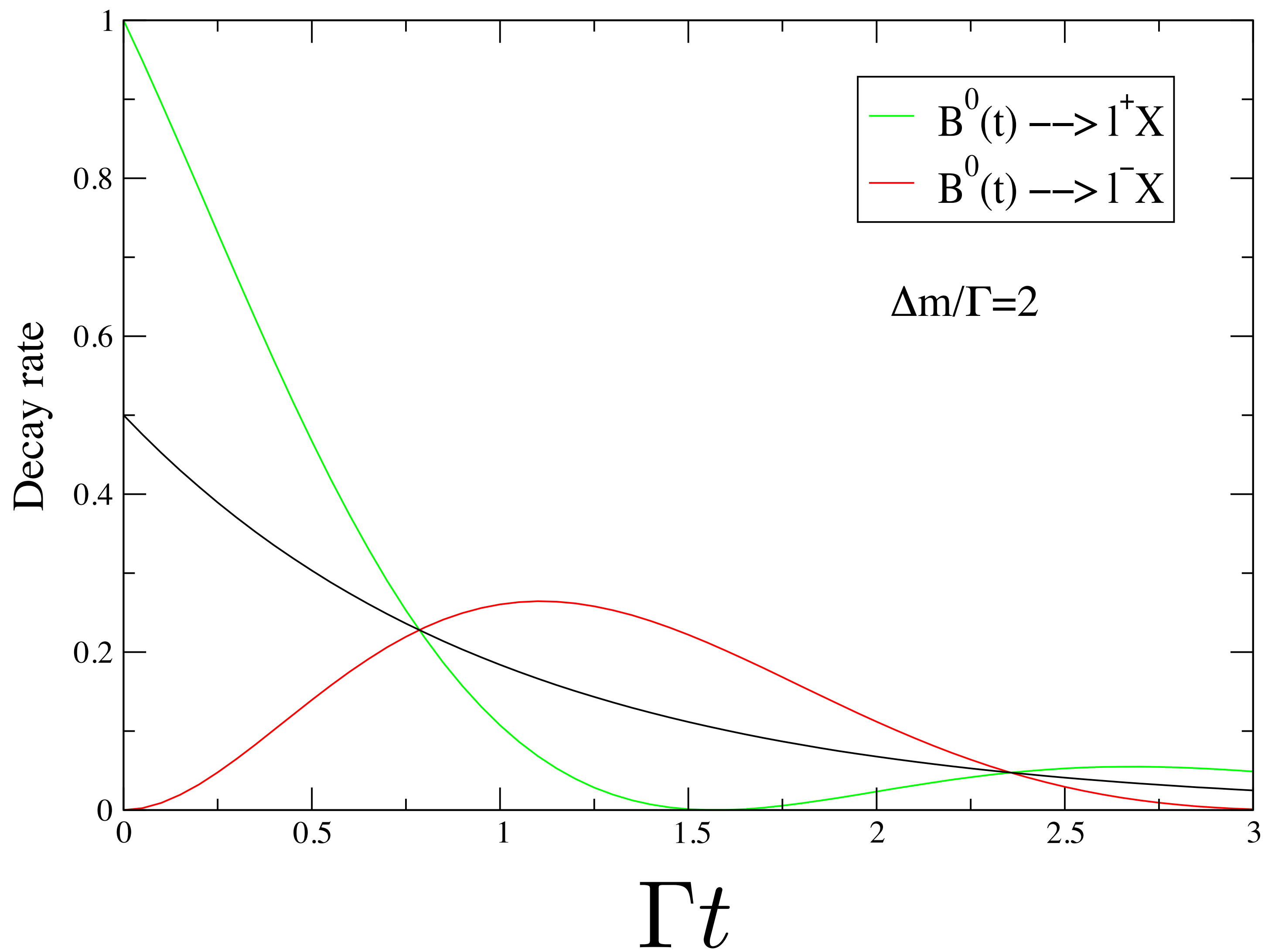
- B^0–$\bar{B}^0$ 混合の測定

レプトンタグ: $B^0 \to l^+ X,\ \bar{B}^0 \to l^- X$

時間の関数としての崩壊確率

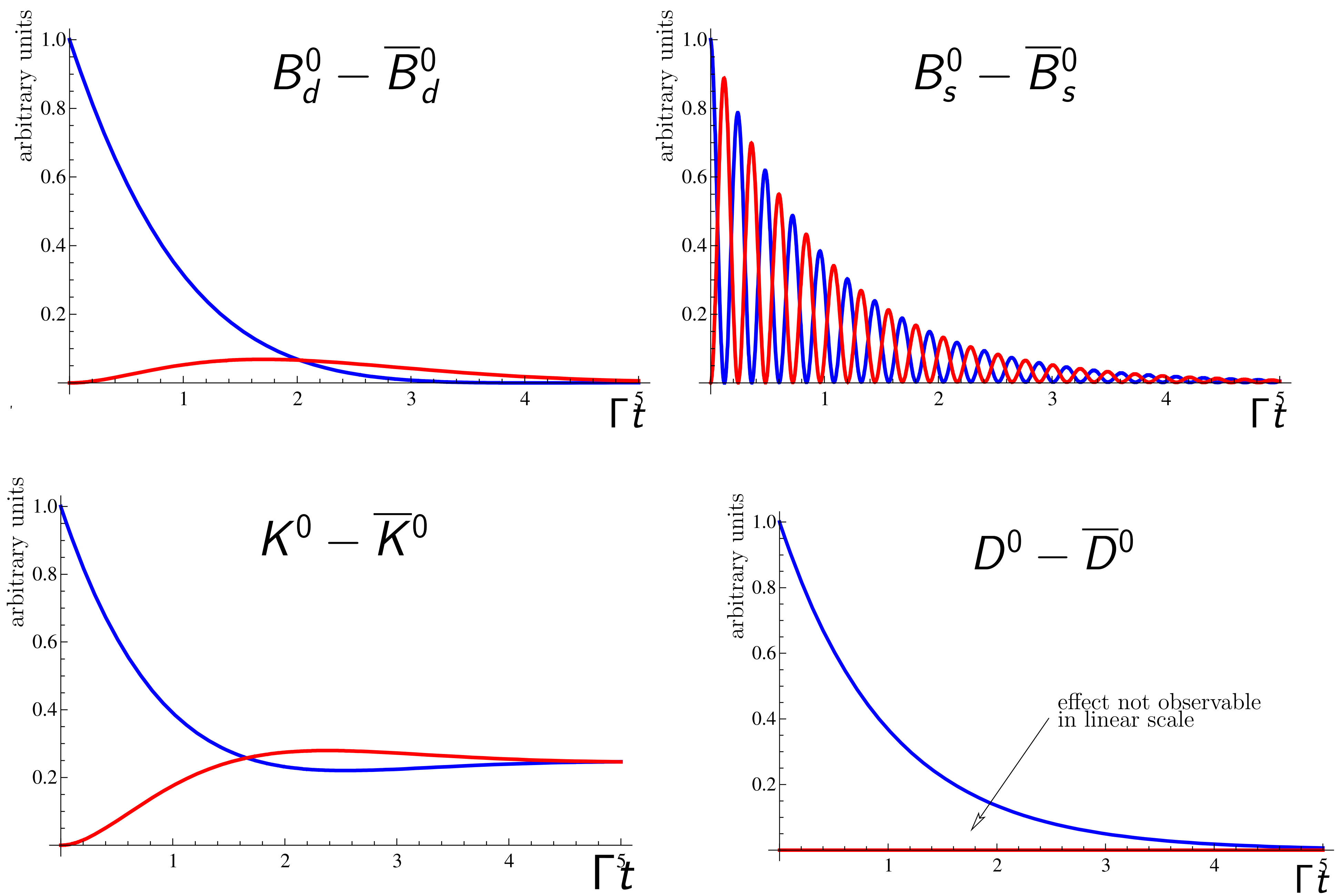
$$\Gamma(B^0(t) \to l^+ X) \propto e^{-\Gamma t}(1 + \cos \Delta m\, t)$$

$$\Gamma(B^0(t) \to l^- X) \propto e^{-\Gamma t}(1 - \cos \Delta m\, t)$$



実験値:

$$\Delta m_d = 0.507 \pm 0.004\,\mathrm{ps}^{-1}$$
$$\Delta m_s = 17.77 \pm 0.10 \pm 0.07\,\mathrm{ps}^{-1}$$



Zupanc, FPCP2011

CP非対称性

$$\Gamma(B^0(t) \to f) \propto 1 + |\lambda_f|^2 \boxed{\begin{matrix} + \\ + \end{matrix}} \begin{matrix} (1 - |\lambda_f|^2) \cos \Delta m\, t \\ 2\,\mathrm{Im}\lambda_f \; \sin \Delta m\, t \end{matrix}$$

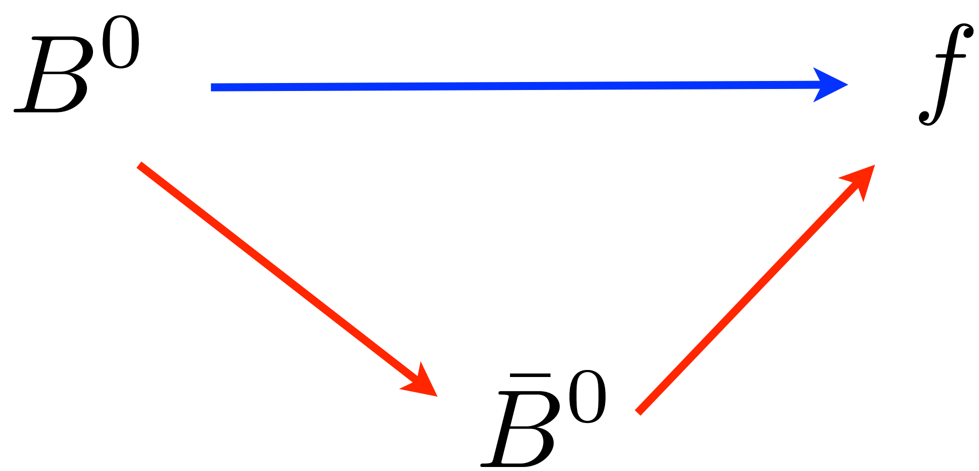
$$\Gamma(\bar{B}^0(t) \to f) \propto 1 + |\lambda_f|^2 \boxed{\begin{matrix} - \\ - \end{matrix}} \begin{matrix} (1 - |\lambda_f|^2) \cos \Delta m\, t \\ 2\,\mathrm{Im}\lambda_f \; \sin \Delta m\, t \end{matrix}$$

$$\lambda_f = \frac{q}{p} \frac{\langle f | \bar{B}^0 \rangle}{\langle f | B^0 \rangle} \simeq \frac{M_{12}^*}{|M_{12}|} \frac{\langle f | \bar{B}^0 \rangle}{\langle f | B^0 \rangle}$$

$$\begin{aligned} \mathcal{A}_f &= \frac{\Gamma(\bar{B}^0(t) \to f) - \Gamma(B^0(t) \to f)}{\Gamma(\bar{B}^0(t) \to f) + \Gamma(B^0(t) \to f)} \\ &= S_f \sin \Delta m\, t - C_f \cos \Delta m\, t \end{aligned}$$

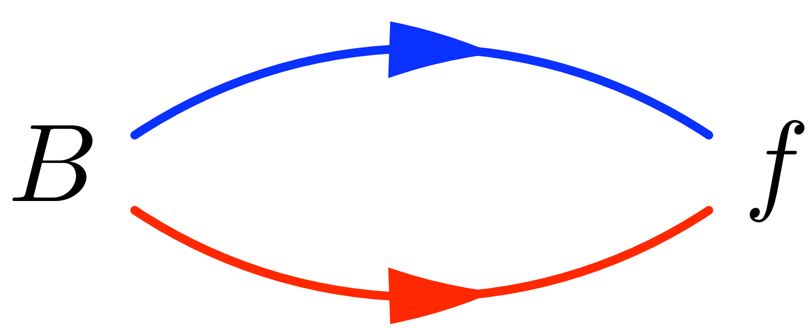
$$S_f = -\frac{2\,\mathrm{Im}\lambda_f}{1+|\lambda_f|^2}$$

Mixing-induced CPV



$$C_f = \frac{1-|\lambda_f|^2}{1+|\lambda_f|^2}$$

Direct CPV



B ファクトリー: $t=0,\ \Upsilon(4S)\to B^0\bar{B}^0$

$t=t_1$ で $B_1\to f_1$, $t=t_2$ で $B_2\to f_2$

一方をタグ

$f_1=\bar{B}^0,\ f_2=f(e.g.\ \psi K_s), t_1+t_2$ で積分 $(\tau\equiv t_2-t_1)$

$$\Gamma(\bar{B}^0,f;\tau) = \frac{|A|^2}{2}e^{-\Gamma|\tau|}\Big[1+|\lambda_f|^2+(1-|\lambda_f|^2)\cos\Delta m\,\tau$$
$$\boxed{+2\mathrm{Im}\lambda_f\ \sin\Delta m\,\tau}\Big]$$

$f_1=B^0,\ f_2=f$

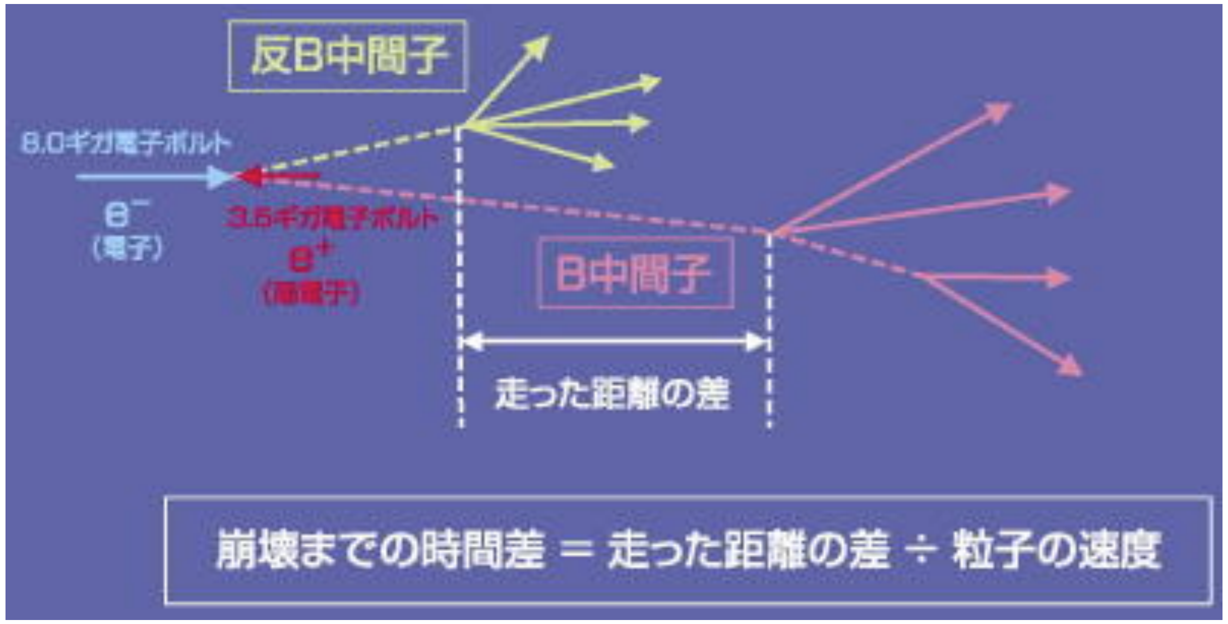
$$\Gamma(B^0,f;\tau) = \left|\frac{p}{q}\right|^2\frac{|A|^2}{2}e^{-\Gamma|\tau|}\Big[1+|\lambda_f|^2-(1-|\lambda_f|^2)\cos\Delta m\,\tau$$
$$\boxed{-2\mathrm{Im}\lambda_f\ \sin\Delta m\,\tau}\Big]$$

対称コライダー: 崩壊時刻を測定できない。
$\Rightarrow \tau$ で積分することになる。

$$\int_{-\infty}^{\infty} d\tau e^{-\Gamma|\tau|} \sin \Delta m \, \tau = 0$$

CP 非対称性が消える！

非対称コライダー: $B^0 \bar{B}^0$ が走っている。



$$z \sim c\beta\gamma\hbar/\Gamma \simeq 200 \, \mu\text{m}$$

時間依存性から CP 非対称性を見ることができる。

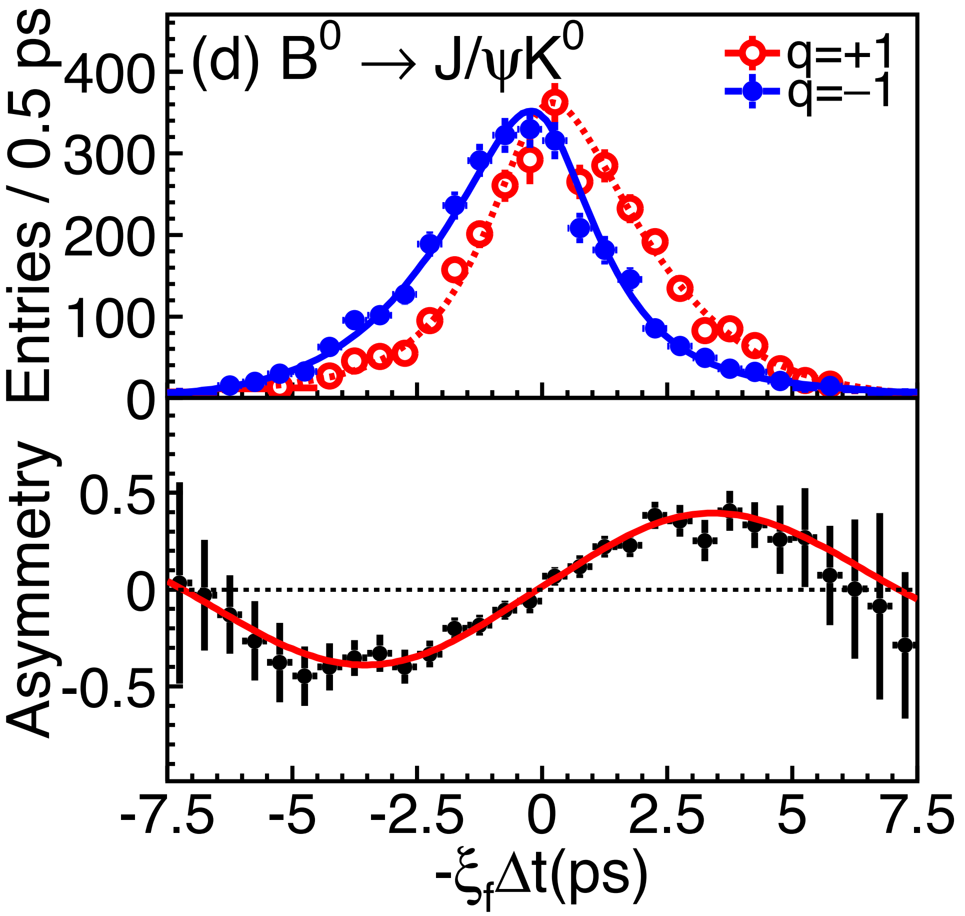
$$f = J/\psi\, K_S$$ (CP odd)

$$\lambda_{J/\psi K_S} = \frac{M_{12}^*}{|M_{12}|} = \frac{V_{tb}^* V_{td}}{V_{tb} V_{td}^*} = e^{-2i\phi_1}$$

$$S_{J/\psi K_S} = \sin 2\phi_1 \qquad\qquad C_{J/\psi K_S} = 0$$

実験値

$$\sin 2\phi_1 = 0.676 \pm 0.020$$

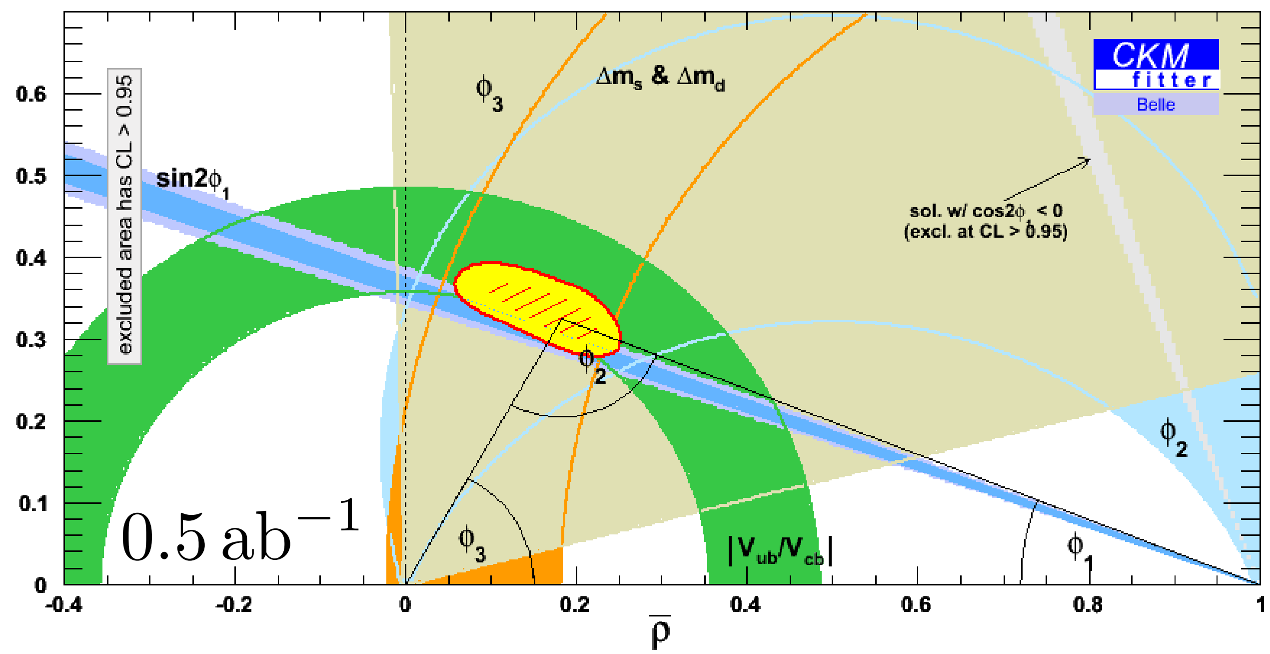


スーパーBファクトリーが
目指す物理

UTの精密測定

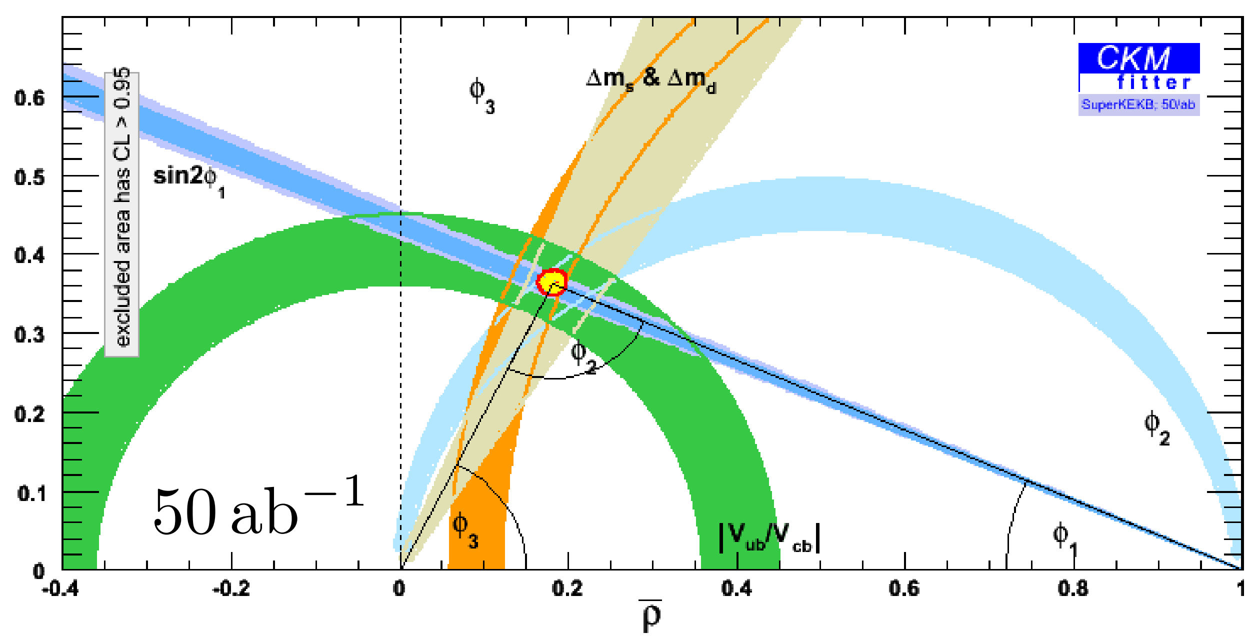
Bファクトリー

~10%

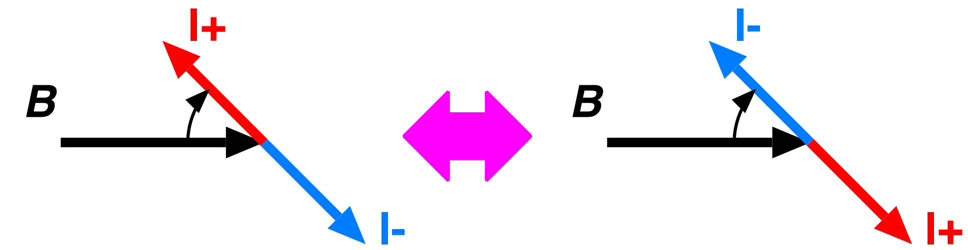


スーパーBファクトリー

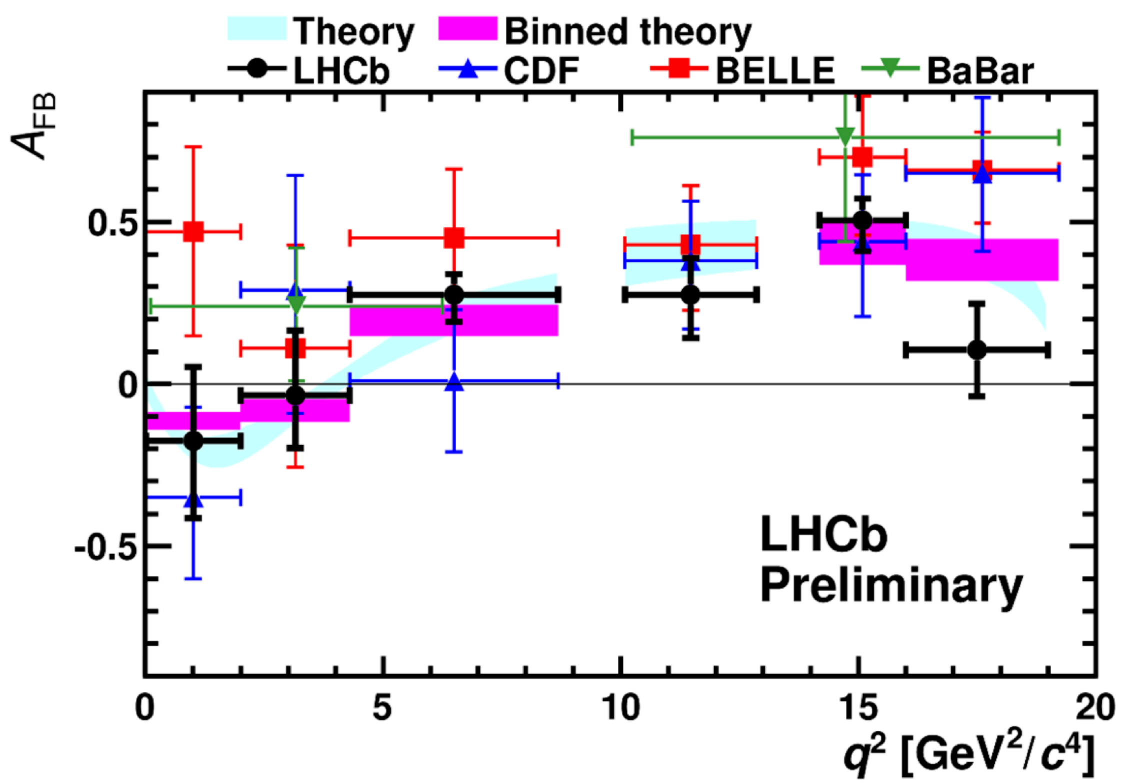
~1%



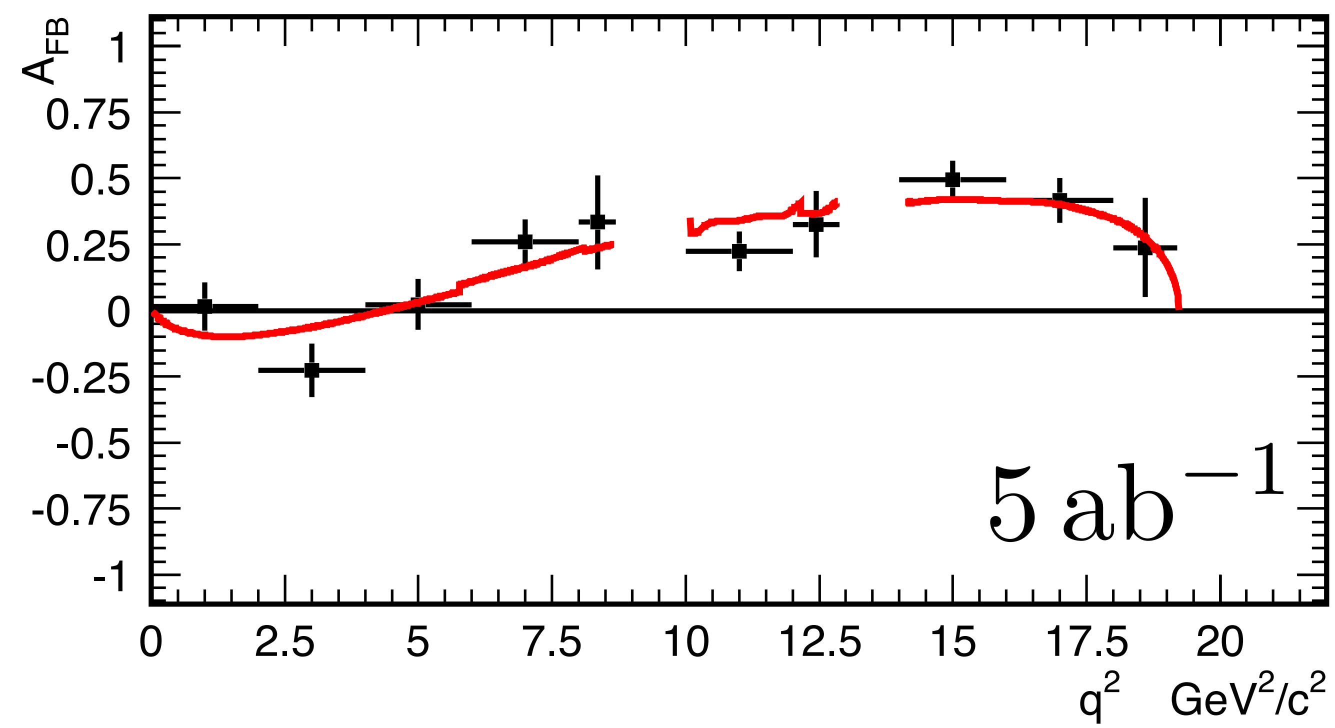
$B \to K^* \ell^+ \ell^-$の前後非対称性



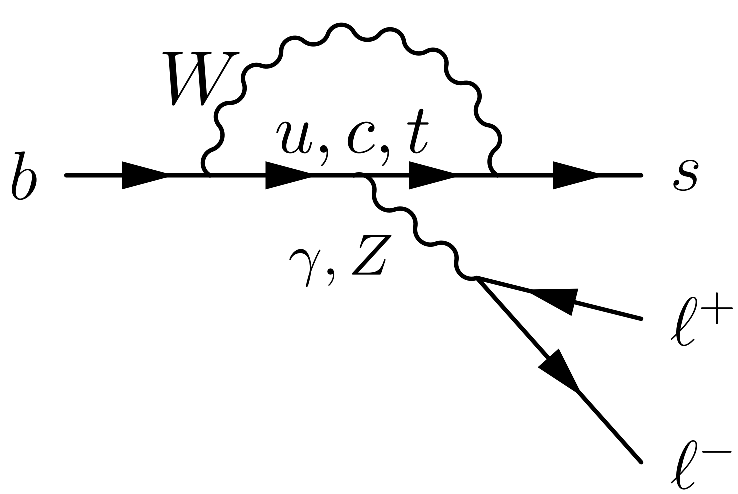
2011



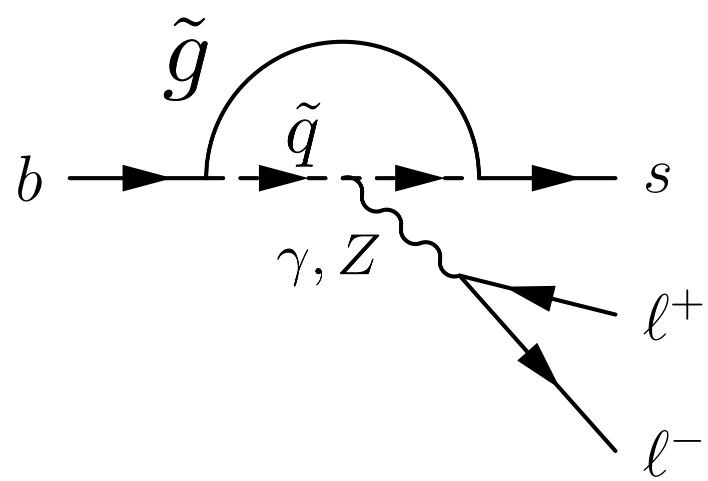
スーパーBファクトリー

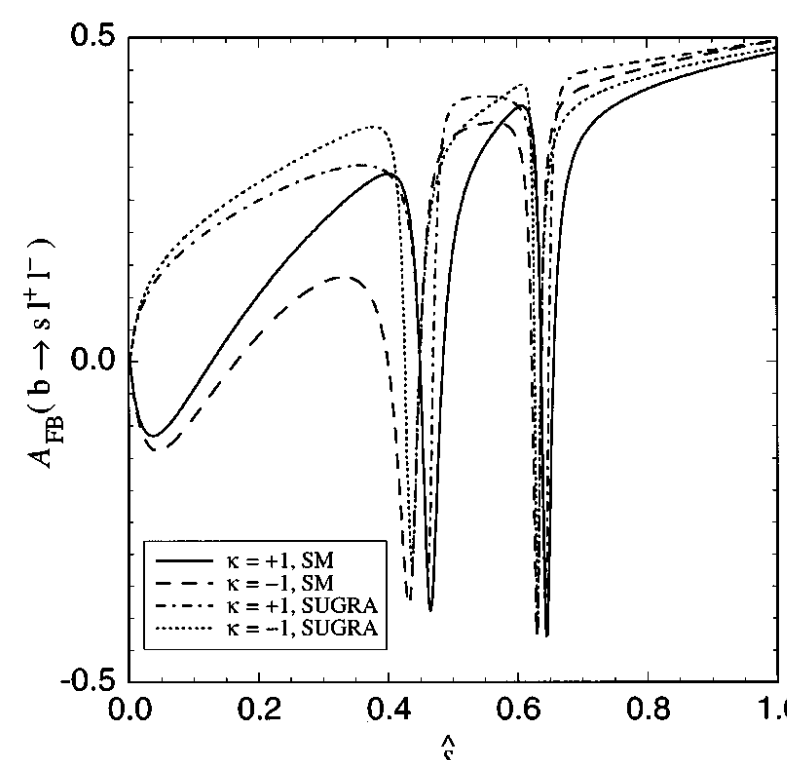


標準模型

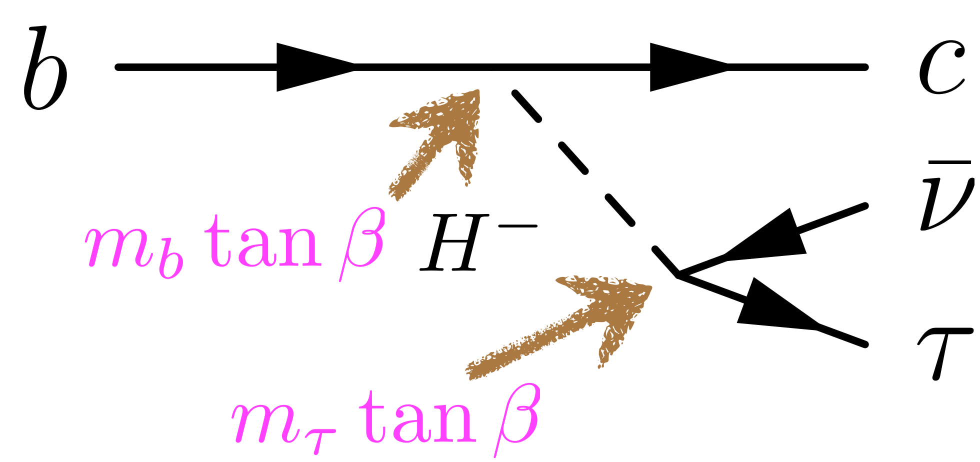


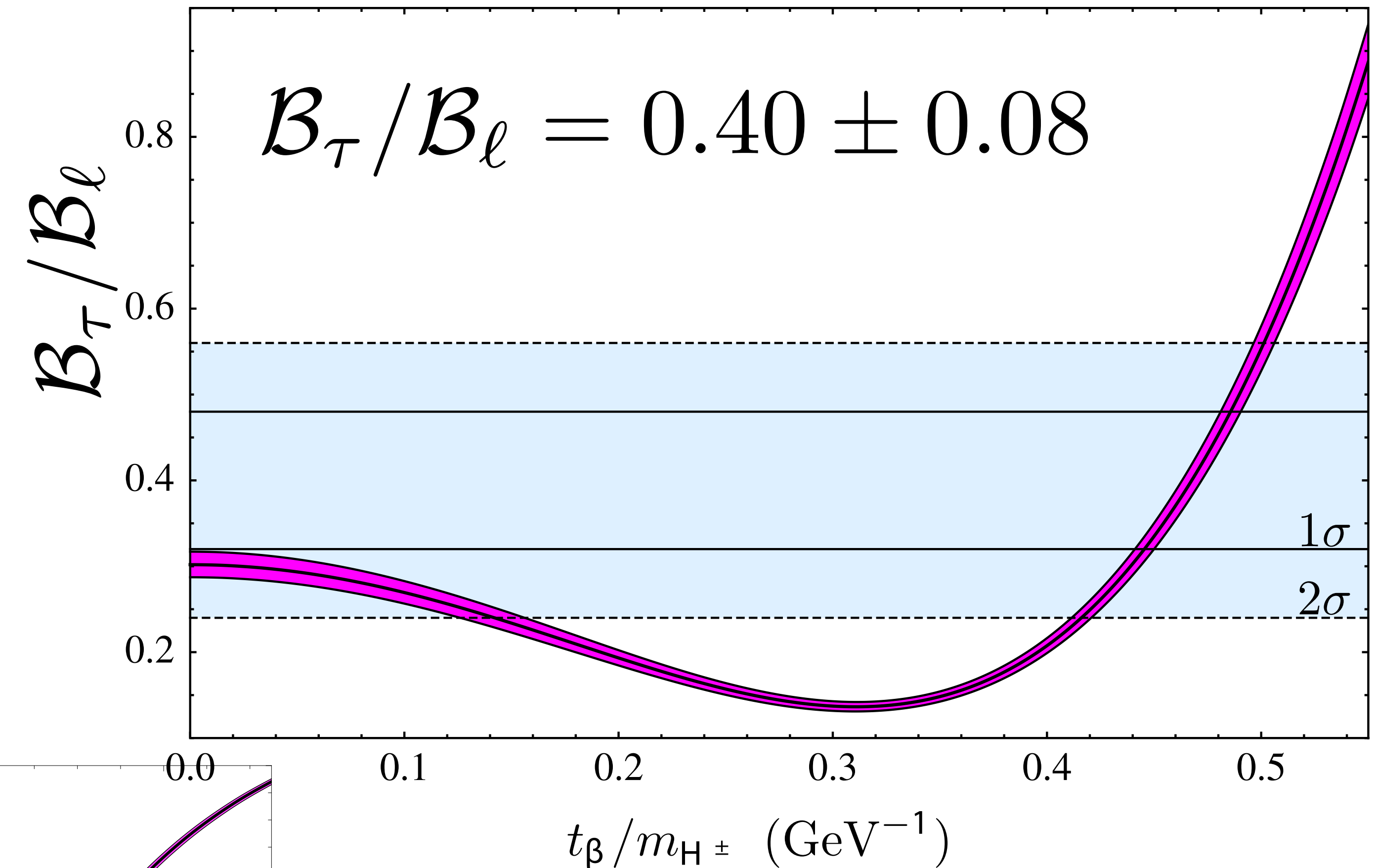
超対称模型



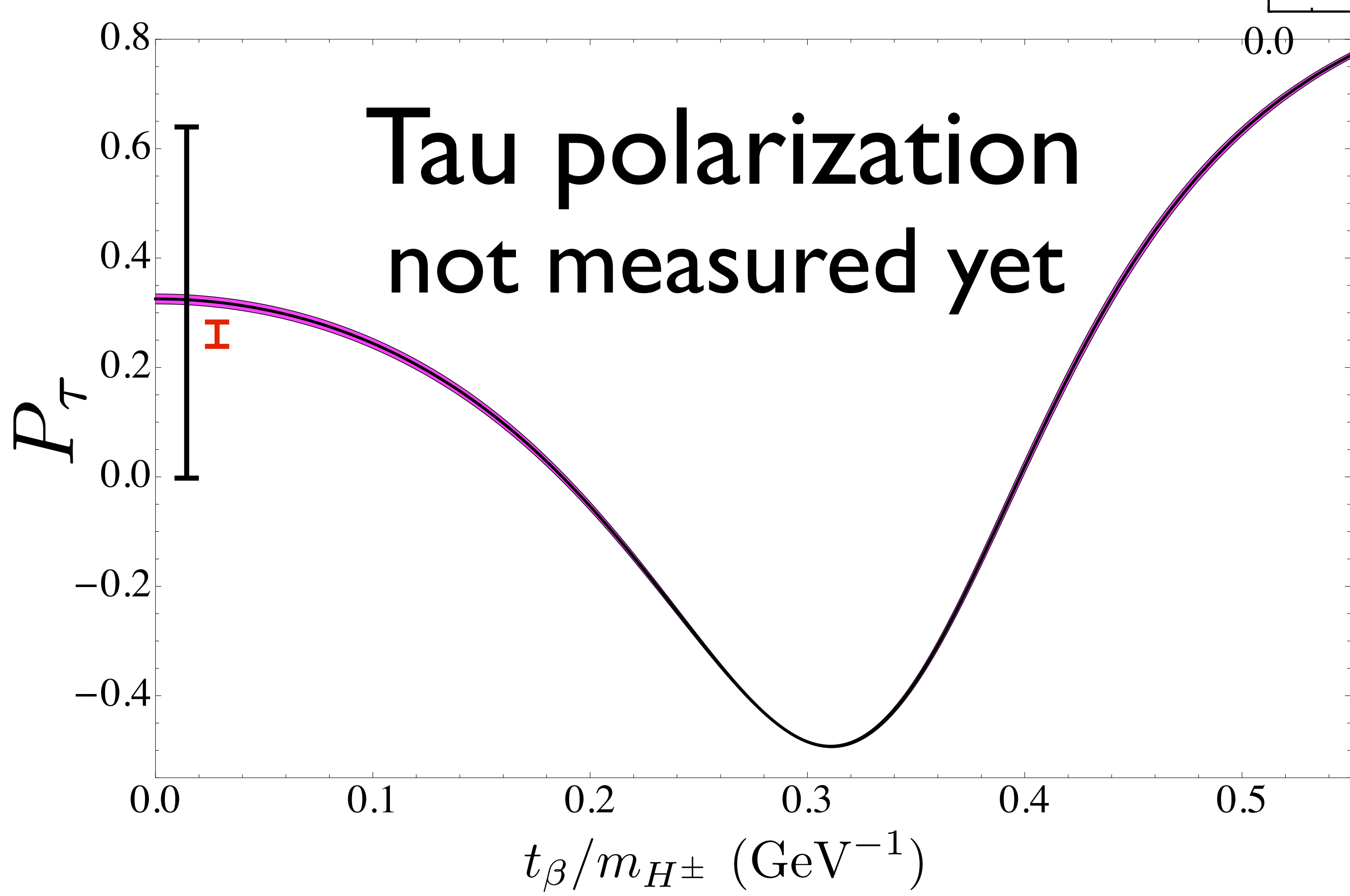


B → Dτνにおける荷電ヒッグス粒子の効果





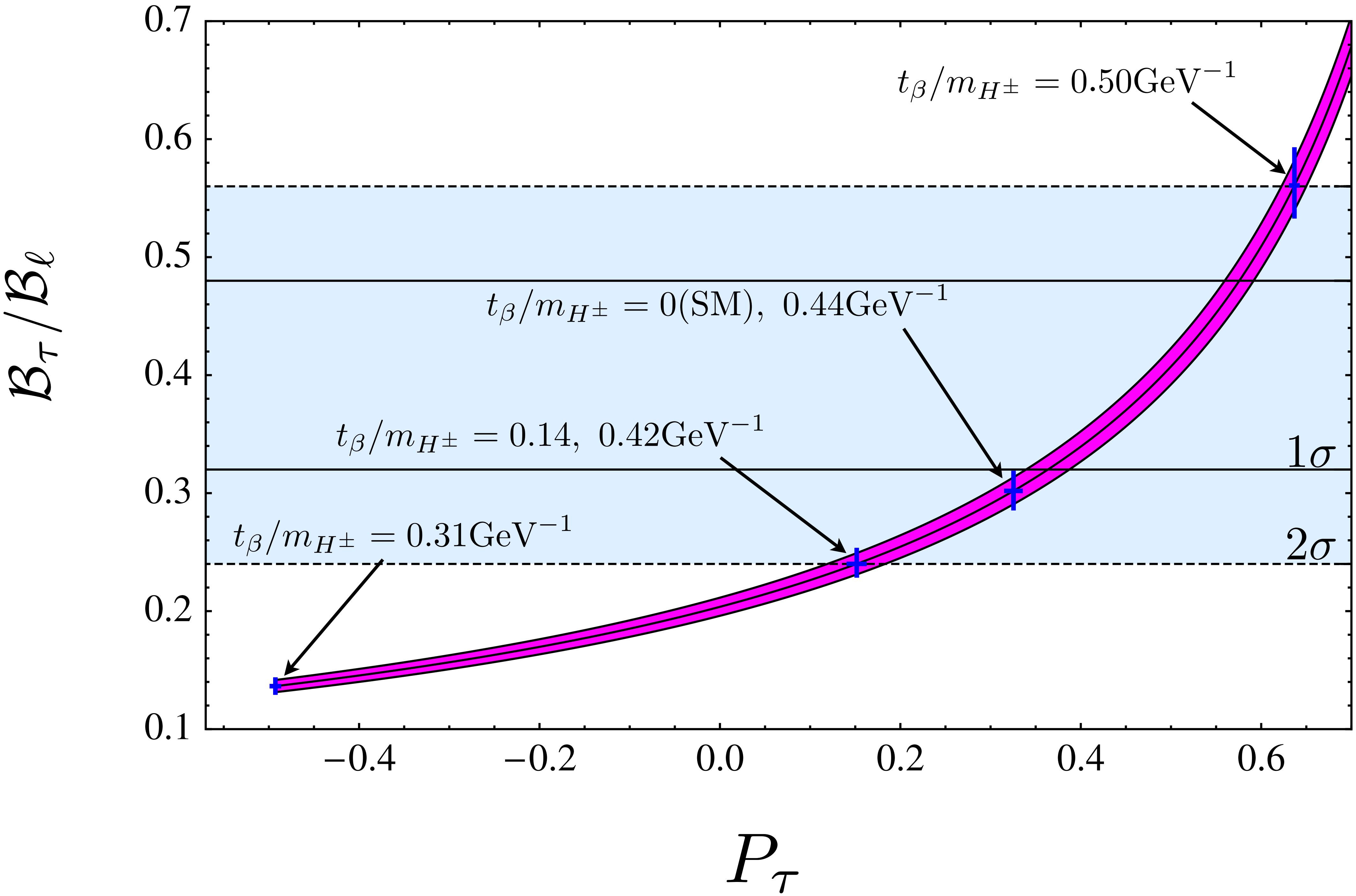
MT, R. Watanabe (2010)



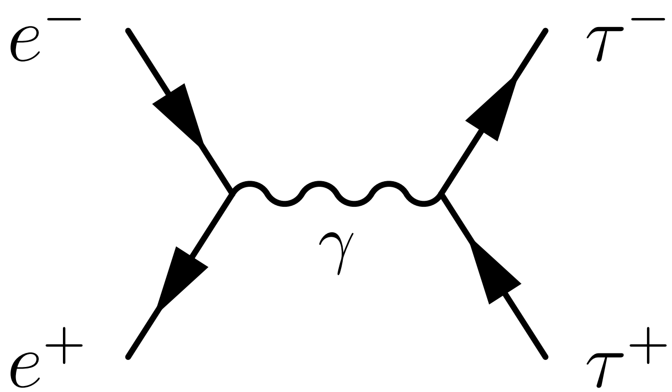
Belle $\delta P_\tau \sim 0.3$

Belle II $\delta P_\tau \sim 0.04$

BR and tau pol.

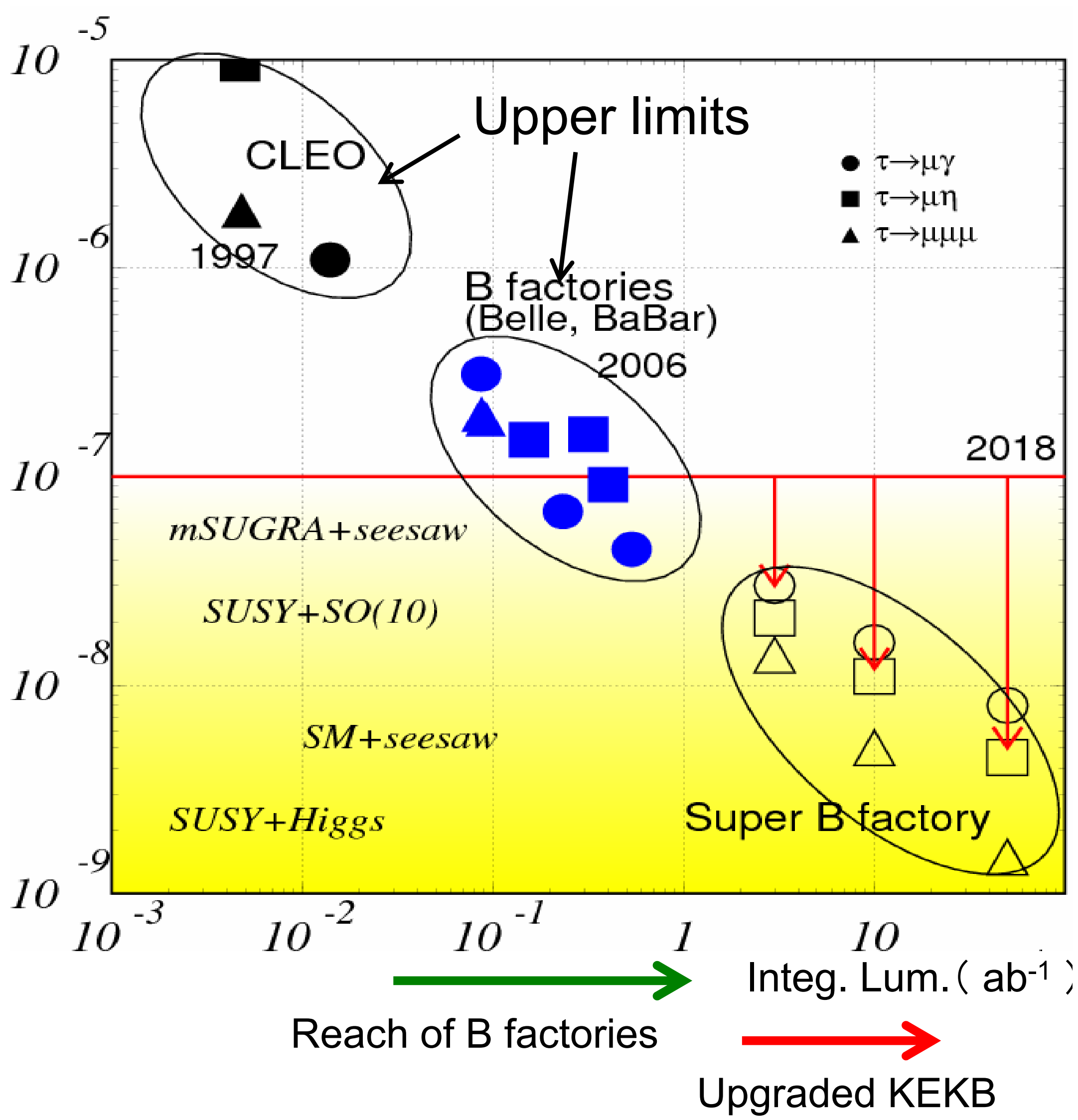


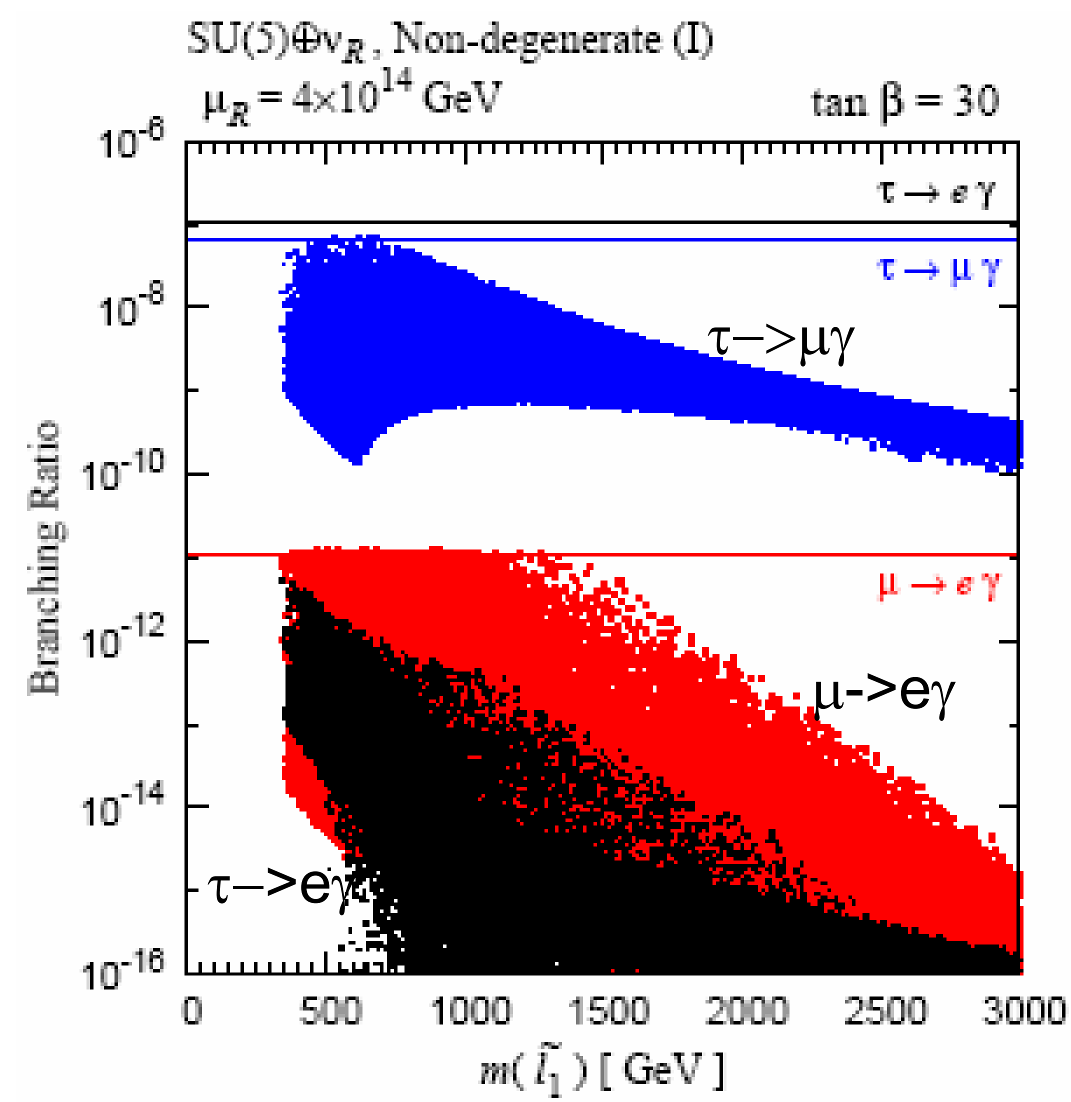
タウファクトリーとしてのスーパーBファクトリー



$O(10^{11})$個のタウを生成

$\tau \to \mu\gamma$ 標準模型では禁止





超対称模型

まとめ

- ★ (スーパー)Bファクトリー
  走っているB中間子ペアを多数作る。
  (タウもたくさんできる。)
- ★ 走っているBの崩壊⇒崩壊時刻がわかる。
  B中間子混合、CP非対称性
- ★ Bファクトリー：～10%の精度でKMを検証
  スーパーBファクトリー：～1%
- ★ 標準模型を越える新しい物理
  宇宙のバリオン数⇒未知のCPの破れ？
  ダークマター⇒未知の素粒子？
  超対称性？　余剰次元？
  フレーバーの謎