

# タウレプトンのハドロニック崩壊を使った CP の破れ

両角 卓也 (T.Morozumi)

Hiroshima Univ.

Feb.22,2010: フレーバー物理研究会

木村大自 (広島修道大.)

Kang Young Lee(建国大学 (konkuk Univ.))

中川桂太 (広島大学 → Mitsubishi Material Co.)

高田浩之 (Tomsk Petagological U.)

横崎統一 (広島大)

清水達也 (広島大)

(修士論文：タウレプトンの電気双極子能率と CP の破れ)

最近の発表論文:

Direct CP violation in hadronic tau decays.

Daiji Kimura, Keita Nakagawa, Takuya Morozumi

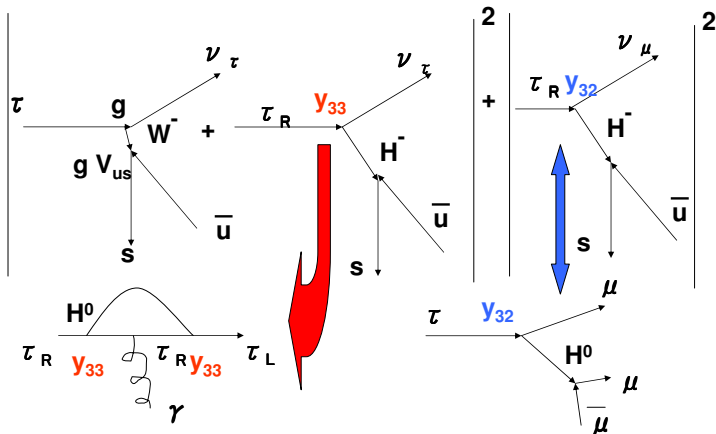
Published in Nucl.Phys.Proc.Suppl.189:84-89,2009.

See also hep-ph 0905.1802/0808.0674

- タウレプトンの崩壊と CP の破れ  
(イントロダクション)
- 標準模型を超える物理を用いた計算例
- タウレプトンのハドロニック崩壊における CPV
- 形状因子のモデル計算と Strong Phase Shifts
- 議論

# タウの崩壊に寄与しうる標準模型を超える効果の例

## CP violation of tau decay and related processes



Tau Electric Dipole Moment

Charged Lepton FCNC

## 2つの測定量

- Hadronic  $\tau$  崩壊の崩壊分布

$$\tau^- \rightarrow K^- \pi^0 \nu \text{ vs } \tau^+ \rightarrow K^+ \pi^0 \bar{\nu}$$

前後方非対称性を  $\tau^-$  と  $\tau^+$  崩壊で比較

- タウの EDM

$$e^+ + e^- \rightarrow \tau^+(s_+) + \tau^-(s_-) \rightarrow \pi^+(p_+) + \pi^-(p_-) + \nu_\tau + \bar{\nu}_\tau$$

$$\mathcal{L}_{edm} = id_\tau \bar{\tau} \sigma_{\mu\nu} \gamma_5 \tau F^{\mu\nu} \quad \mathcal{L}_{QED} = e(\bar{\tau} \gamma_\mu \tau + \bar{e} \gamma_\mu e) A^\mu$$

# タウレプトン EDM(cf. 広大修士論文(2010):清水達也)

- $p_{\pm}$ :  $\pi^{\pm}$  momentum of  $\tau^{\pm}$  rest frame.  
CP odd spin correlation of  $\tau$  pairs  $X = (s_+ \times s_-) \cdot e$   
→ triple CP odd momentum product:  $Y = (\hat{p}_+ \times \hat{p}_-) \cdot e$

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} \sim \text{Re.}(M_{QED}M_{EDM}^*) \sim d_{\tau}(s_+ \times s_-) \cdot e$$

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} \frac{d\Gamma[\tau^- \rightarrow \pi^- \nu]}{d\Omega^-} \frac{d\Gamma[\tau^+ \rightarrow \pi^+ \bar{\nu}]}{d\Omega^+} \sim d_{\tau}(\hat{p}_- \times \hat{p}_+) \cdot e$$

( $s_+ // -p_+, s_- // p_-$  left(right)-handedness of (anti-)neutrinos.)

- $-0.22 \times 10^{-16} \leq \text{Re}(d_{\tau}) \leq 0.45 \times 10^{-16}(\text{ecm}),$   
 $-0.25 \times 10^{-16} \leq \text{Im}(d_{\tau}) \leq 0.008 \times 10^{-16}$

Belle.PLB551(2003)16. Kenji Inami (2003) Precise measurement of the EDM of the tau lepton at Belle.

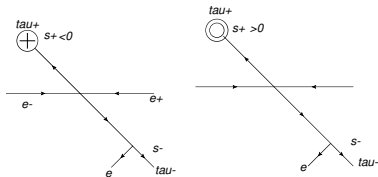


Figure: The events  $X = (s_+ \times s_-) \cdot e$  with  $X > 0$  (left) and with  $X < 0$  (right). EDM generates the asymmetry of  $P(X) \neq P(-X)$ .

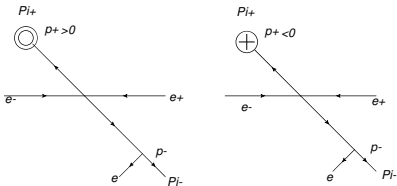


Figure: The events  $Y = (p_+ \times p_-) \cdot e$  with  $Y < 0$  (left) and  $Y > 0$  (right). EDM generates the asymmetry of  $P(Y) \neq P(-Y)$ .

- クォークレベルの反応とハドロン化

$$\begin{aligned}
 \tau^- \rightarrow \quad & \nu_\tau W^{-*} \rightarrow \nu s \bar{u} \rightarrow \nu (K^- \pi^0)_{L=1,0} \quad V_{us}^* \\
 & \nu_\tau H^{-*} \rightarrow \nu s \bar{u} \rightarrow \nu (K^- \pi^0)_{L=0} \quad V_{us}^* r^* \\
 \tau^+ \rightarrow \quad & \bar{\nu}_\tau W^{+*} \rightarrow \bar{\nu} \bar{s} u \rightarrow \bar{\nu} (K^+ \pi^0)_{L=1,0} \quad V_{us} \\
 & \bar{\nu}_\tau H^{+*} \rightarrow \bar{\nu} \bar{s} u \rightarrow \bar{\nu} (K^+ \pi^0)_{L=0} \quad V_{us} r
 \end{aligned}$$

$r$ : 荷電ヒッグスの結合定数:  $V_{us}$  と相対位相を持つとした



# CP の破れ: 無偏極: 始状態タウスピンを平均した場合

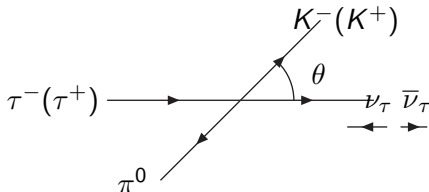


Figure:  $K\pi$  重心系でみたタウの崩壊とその CP 共役なプロセス: CP が保存していればタウとその反粒子の崩壊分布は同じになる  $s = (p_k + p_\pi)^2$

$$\frac{d\Gamma[\tau^- \rightarrow K^- \pi^0 \nu]}{d\sqrt{s} d\cos\theta} \neq \frac{d\Gamma[\tau^+ \rightarrow K^+ \pi^0 \bar{\nu}]}{d\sqrt{s} d\cos\theta} \rightarrow \text{CPV}$$

Charged Higgs( $H^-$ ) coupling to  $\tau\nu_L$

$$\mathcal{L} = -\frac{\sqrt{2}m_\tau}{v} \tan\beta \bar{\nu}_L \tau_R \left(1 - \frac{r}{\sin\beta}\right) H^+$$

Two Higgs doublet model without Natural Flavor Conservation :  $r$  is a parameter.  $\tan\beta = \frac{v_1}{v_2}$ .

- スピン平均 ( $\sum_{s_z=\pm 1}$ ) した崩壊分布の差:

$$A_{FB} - \bar{A}_{FB} = \frac{2 \frac{p_K}{\sqrt{s}} \frac{|F_s|}{|F|} \sin\delta_{st}}{\left(\frac{2m_\tau^2}{3s} + \frac{4}{3}\right) \frac{p_K^2}{m_\tau^2} + \frac{1}{2} \frac{|F_s^{KP}|^2}{|F^{KP}|^2}} \left( \frac{Q^2 \tan^2\beta}{M_H^2 \sin\beta} \right) \text{Im.}(r)$$

$$A_{FB}(s) = \frac{\int_0^1 d\cos\theta \frac{d\text{Br}}{d\sqrt{s}d\cos\theta} - \int_{-1}^0 d\cos\theta \frac{d\text{Br}}{d\sqrt{s}d\cos\theta}}{\frac{d\text{Br}}{d\sqrt{s}}}$$

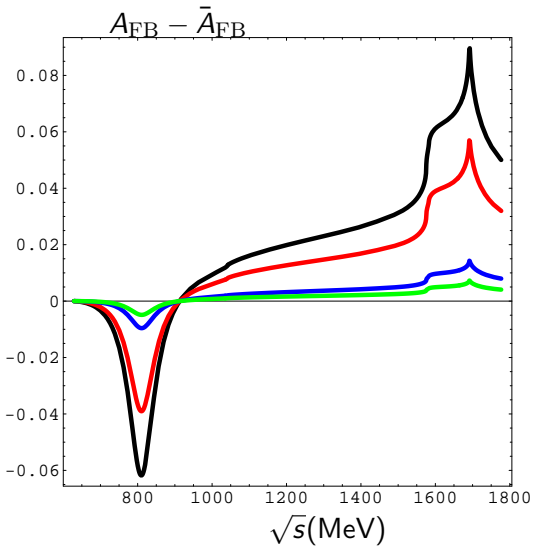
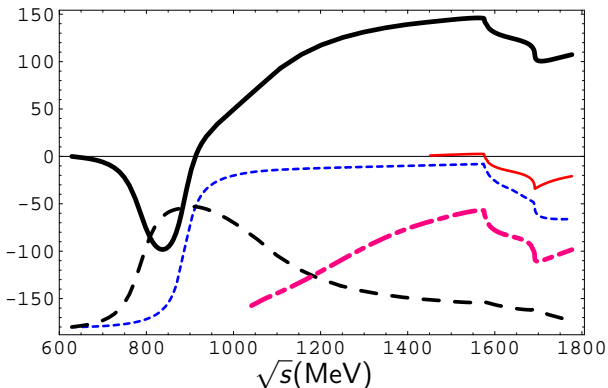


Figure: CP violation for the FB asymmetry of  $\tau \rightarrow K\pi^0\nu$ . The charged Higgs boson mass is changed as  $M_H(\text{GeV}) = 200(\text{black}), 250(\text{red}), 500(\text{blue})$  and  $700(\text{green})$ . The other parameters are  $\tan\beta = 50$ ,  $|r| = 1$  and  $\arg r = \frac{\pi}{2}$ . (From Kimura et.al.Nucl.Phys.Proc.Suppl.189:84-89,2009)

# Strong phase shift $\delta_{st}$ (単位=degree)



**Figure:** The phase of the vector form factor:  $\delta_V^{K\pi} = \arg.F^{K\pi}$  (blue) and the phase of the scalar form factor  $\delta_S^{K\pi} = \arg.F_S^{K\pi}$  (black). The strong phase shift  $\delta_{st}^{K\pi} = \delta_V^{K\pi} - \delta_S^{K\pi}$  is shown with red line.  $\delta_{st}^{K\eta}$  and  $\delta_{st}^{K\eta'}$  are shown with magenta line and green line respectively. (From Kimura et.al.Nucl.Phys.Proc.Suppl.189:84-89,2009)

# より理論的に動機付けられたモデルでの現実的な計算

- 大きな Tree level での CPV な荷電 Higgs の結合は期待できない。
- 自然に Tree level での Flavor changing Neutral current を Suppress するような Two Higgs doublet 模型では、Charged Higgs の結合定数は標準模型の Charged Current と同じ
- Natural Flavor Conservation を満たすような Higgs セクターの拡張  
→ ループによって Induce される新しい CP の破れ：効果は小さいと期待されるがどのくらい小さいか？  
→ 具体的に計算 → 複数の物理量で大きさを比較



# タウのスピンの偏極を使う場合:タウの静止系で考える

- ①  $e_\nu$ :ニュートリノ  $= -n_Q$ :ハドロン,  $e_z$ : reference axis of the spin,  $e_{k\perp}$ :Kaon( $\perp e_\nu$ ),  $e_\perp$ : $e_z \perp e_\nu$
- ②  $\cos \alpha = n_Q \cdot e_z$ ,  $e_\nu \sin \phi = e_\perp \times e_{k\perp}$

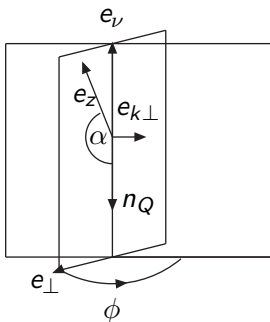


Figure:  $\tau$  静止系でみた  $K\pi\nu$  崩壊と角度の定義

# スピン偏極したタウ崩壊の CP の破れ:

CP 変換のもとで 粒子が反粒子になるとともに すべてのベクトルは符号を変えるのでスピン偏極したタウとその反粒子の崩壊分布における CP の破れのシグナルは、2 つの崩壊分布を比べ次を満たすこと:

$$\Delta_{CP} \equiv \frac{d^4 Br[\tau^+(-s_z) \rightarrow K^+ \pi^0 \bar{\nu}]}{d\sqrt{s} d \cos \theta d \cos \alpha d \phi} \Big|_{-\phi, \alpha, \theta} - \frac{d^4 Br[\tau^-(s_z) \rightarrow K^- \pi^0 \nu]}{d\sqrt{s} d \cos \theta d \cos \alpha d \phi} \Big|_{\phi, \alpha, \theta} \neq 0$$

註 :  $\sin \phi \equiv \mathbf{e}_\nu \cdot (\mathbf{e}_\perp \times \mathbf{e}_{k\perp})$

$s_z = \pm 1$  (スピンの  $\mathbf{e}_z$  方向成分の 2 倍):  $s_z \equiv (\mathbf{e}_z \cdot \boldsymbol{\sigma})$

CP 変換の下で  $\phi \rightarrow -\phi, s_z \rightarrow -s_z$



# 実際の崩壊分布はどのようになっているか (標準模型)

$$\text{amp.}(\tau^- \rightarrow K^- \pi^0 \nu) \sim G_F V_{us}^* \langle K^- \pi^0 | \bar{u} \gamma_\mu (1 - \gamma_5) s | 0 \rangle \bar{u}_\nu \gamma^\mu (1 - \gamma_5) u_\tau$$

Hadronic form factors

- Vector  $F(L=1, L=0)$  and scalar  $F_S(L=0)$  form factors

$$\langle K^-(p_k) \pi^0(p_\pi) | \bar{s} \gamma^\mu u | 0 \rangle = \left( g^{\mu\nu} - \frac{Q^\mu Q^\nu}{Q^2} \right) q_\nu F(Q^2) + Q^\mu F_S(Q^2)$$

$$\langle K^-(p_k) \pi^0(p_\pi) | \bar{s} u | 0 \rangle = \frac{Q^2}{m_s - m_u} F_S(Q^2)$$

$$Q^2 = (p_k + p_\pi)^2 = s$$

# スピン偏極したタウレプトンの崩壊分布

J. H. Kuhn and E. Mirkes (96)

$$\frac{d^4 Br[\tau^-(s_z) \rightarrow K^- \pi^0 \nu]}{d\sqrt{s} d\cos\theta d\cos\alpha d\phi} = \frac{1}{\Gamma_\tau} \frac{G_F^2 |V_{us}|^2 (m_\tau^2 - s)^2}{2^7 \pi^4 m_\tau^3} p_K W_{s_z}(s, \theta, \alpha, \phi),$$

$$\begin{aligned} W_{s_z}(s, \theta, \alpha, \phi) = & \left( \frac{m_\tau^2}{s} \cos^2 \theta + \sin^2 \theta \right) p_K^2 |F(s)|^2 + \frac{m_\tau^2}{4} |F_s(s)|^2 \\ & - \frac{m_\tau}{\sqrt{Q^2}} \cos \theta m_\tau p_K \underline{\text{Re}(F(s)F_s(s)^*)} \\ & + s_z \left[ \left\{ \left( \frac{m_\tau^2}{s} \cos^2 \theta - \sin^2 \theta \right) \cos \alpha - \frac{m_\tau}{\sqrt{s}} \sin 2\theta \sin \alpha \cos \phi \right\} p_K^2 |F(s)|^2 \right. \\ & - \left. \left( \frac{m_\tau}{\sqrt{s}} \cos \theta \cos \alpha - \sin \theta \sin \alpha \cos \phi \right) m_\tau p_K \underline{\text{Re}(F(s)F_s(s)^*)} \right. \\ & \left. - \sin \theta \sin \alpha \sin \phi m_\tau p_K \underline{\text{Im}(F(s)F_s(s)^*)} + \frac{m_\tau^2}{4} \cos \alpha |F_s(s)|^2 \right]. \end{aligned}$$

# タウ崩壊分布と CP の破れのシグナル

反粒子の過程 ( $\tau^+(s_z) \rightarrow K^+\pi^0\bar{\nu}$ ) に対しては

$$\frac{d^4 Br[\tau^+(s_z) \rightarrow K^+\pi^0\bar{\nu}]}{d\sqrt{s}d\cos\theta d\cos\alpha d\phi} = \frac{1}{\Gamma_\tau} \frac{G_F^2 |V_{us}|^2 (m_\tau^2 - s)^2}{27\pi^4 m_\tau^3} p_K \overline{W}_{s_z}(s, \theta, \alpha, \phi)$$

$$\begin{aligned} \overline{W}_{s_z}(s, \theta, \alpha, \phi) &= W_{-s_z}(s, \theta, \alpha, -\phi) \\ \rightarrow \Delta_{CP} &\sim |V_{us}|^2 (\overline{W}_{-s_z}(s, \theta, \alpha, -\phi) - W_{s_z}(s, \theta, \alpha, \phi)) = 0 \end{aligned}$$

標準模型の Tree レベルでは CP の破れは起きない。  
(CKM 要素  $V_{us}$  が絶対値としてファクトライズ)

## どのような場合に CP の破れが起きるか

$V_{us}$  に相対位相を持つ 新たな結合  $r \neq 0$  があれば, 反粒子の分布は, 粒子側の崩壊分布において結合乗数  $r$  を複素共役  $r^*$  に置き換えたもので与えられる.

$$\overline{W}_{s_z}(s, \theta, \alpha, \phi, r) = W_{-s_z}(s, \theta, \alpha, -\phi, r^*)$$

CP の破れのシグナルはスピンの向きが反対の粒子と反粒子の分布の差

$$\begin{aligned}\Delta_{CP} &= \overline{W}_{-s_z}(s, \theta, \alpha, -\phi, r) - W_{s_z}(s, \theta, \alpha, \phi, r) \\ &= W_{s_z}(s, \theta, \alpha, \phi, r^*) - W_{s_z}(s, \theta, \alpha, \phi, r) \\ &\sim \text{Im}(r)\end{aligned}$$

# CP の破れは分布にどのように現れるか

例:(Two Higgs doublet model with a new charged Higgs boson CPV couplings to *tau* lepton)

$$\text{amp.}(\tau^- \rightarrow \nu_\tau K^- \pi^0) = -\frac{G_F}{\sqrt{2}} V_{us}^* \bar{u}_\nu \gamma^\mu (1 - \gamma_5) u_\tau$$
$$\left\{ (q_\mu - \frac{\Delta_{KP}}{Q^2} Q_\mu) F + \left( \left(1 - \frac{Q^2}{M_H^2} \tan^2 \beta\right) + \frac{Q^2}{M_H^2} \frac{\tan^2 \beta}{\sin \beta} \mathbf{r} \right) F_s^{KP} Q_\mu \right\} (1)$$

標準模型のスカラ Form Factor  $F_s$  を次で置き換え

$$F_s \rightarrow \left\{ \left(1 - \frac{Q^2}{M_H^2} \tan^2 \beta\right) + \frac{\tan^2 \beta}{\sin \beta} r \right\} F_s$$

# 崩壊先の粒子の角度分布にどのように CP の破れの効果が現れるか

$$\begin{aligned}\Delta_{CP} &\sim \overline{W}_{-s_z}(s, \theta, \alpha, -\phi, r) - W_{s_z}(s, \theta, \alpha, \phi, r) \\ &= W_{s_z}(s, \theta, \alpha, \phi, r^*) - W_{s_z}(s, \theta, \alpha, \phi, r) \\ &= 2\text{Im}(r) \frac{\tan^2 \beta Q^2}{M_H^2} m_\tau p_K |F(s)F_s(s)| \times \\ &\quad \left( -\frac{m_\tau}{\sqrt{s}} \sin \delta_{st} \cos \theta (1 + s_z \cos \alpha) + s_z \sin \theta \sin \alpha \sin(\phi + \delta_{st}) \right)\end{aligned}$$

$\delta_{st}$  = ベクトル形状因子  $F$  とスカラー形状因子  $F_s$  の位相差 (Strong phase shift difference).

$$\delta_{st} \equiv \arg \frac{F}{F_s}$$

# $e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$ からスピン偏極した分布を取り出す方法

- $\tau^\pm$  対生成とその崩壊
- 以下の互いに CP 共役なタウ反タウ対生成と崩壊過程を考える。

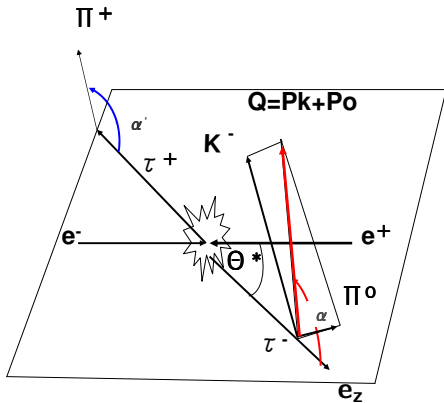
$$e^+e^- \rightarrow \tau^+(s'_z) + \tau^-(s_z) \rightarrow \underline{K^-\pi^0\nu} \quad (\text{ターゲットプロセス})$$
$$\hookrightarrow \pi^+\bar{\nu} \quad (\text{スピナナライザー})$$

$$e^+e^- \rightarrow \tau^-(s'_z) + \tau^+(s_z) \rightarrow \underline{K^+\pi^0\bar{\nu}} \quad (\text{ターゲットプロセス})$$
$$\hookrightarrow \pi^-\nu \quad (\text{スピナナライザー})$$

- 二体崩壊  $\tau^\pm \rightarrow \pi^\pm\bar{\nu}(\nu)$  において  $\tau$  の静止系で  $(\pi^+)\pi^-$  の運動量方向と (反)タウのスピンの向きに相関 (逆相関) がある。
- タウ, 反タウ対生成のときに生成される 2 つの粒子のスピンの相関がある。

$$P_{s_z, s'_z}, P_{++} = P_{--} \geq P_{-+} = P_{+-} \quad (e^+e^- \rightarrow \gamma^* \rightarrow \tau^+\tau^-)$$

- 対生成した  $\tau^\pm$  のスピン相関と 2 体崩壊のパイ中間子の方向と親のタウのスピン相関を利用してターゲットプロセス ( $\tau(s_z) \rightarrow K\pi\nu$ ) のスピン偏極した崩壊分布の情報が得られる。



**Figure:** タウ対生成を利用した偏極タウの3体崩壊分布の情報を求める方法の概念図:  $N(0 < \alpha' < \frac{\pi}{2}) \rightarrow s'_z = -1$  をより多く含む  $\rightarrow s_z = -1$  をより多く含む  
 $N(\frac{\pi}{2} < \alpha' < \pi) \rightarrow s'_z = 1$  をより多く含む  $\rightarrow s_z = 1$  をより多く含む.



# 形状因子の計算 (経過報告) : Form factor from chiral lagrangian with vector resonances

- タウの崩壊で大きなエネルギーがハドロンに解放される. ( $m_X \leq m_\tau$ )
- モデリング:  
共鳴状態の導入:  $K^* \rho \ m_X \leq 1 \sim m_\tau$ .  
→ 同じ方法で  $\tau \rightarrow \rho\nu \rightarrow \pi^+\pi^0\nu$  and  $\tau \rightarrow K^*\nu \rightarrow K^+\pi^0\nu$ . を扱える.
- $K\pi$  などのループ補正 → ベクトル中間子の崩壊巾など. →  $\delta_{st}$  に寄与.  
ループの計算の発散 → tree level にはなかった新たな Counter Terms

# Chiral Lagrangian with vector resonance: Weinberg (non-linear sigma model with rho meson) Bando, Kugo, Yamawaki, Yanagida(hidden local symmetry)

Respect chiral symmetry

$$\begin{aligned}\mathcal{L} &= \frac{f^2}{4} \text{Tr} D U D U^\dagger + B \text{Tr} M (U + U^\dagger) \\ &\quad - \frac{1}{2} \text{Tr} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + M_V^2 \text{Tr} (V_\mu - \frac{\alpha_\mu}{g})^2\end{aligned}$$

$F_{\mu\nu}$  ベクトル中間子 ( $SU(3)_f$  8 重項) の運動項  $M_V$  vector meson mass in chiral limit.

$M$  chiral breaking term. diagonal. ( $m_u, m_d, m_s$ )

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L}_c = & -(Z_V - 1) \frac{1}{2} \text{Tr} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + \frac{f^2}{4} (Z_U - 1) \text{Tr} (D U D U^\dagger) \\
 & + Z_U^{(4)} \frac{1}{4} \text{Tr} (D^\mu D_\mu U D^\nu D_\nu U^\dagger) \\
 & + i c_3 \frac{1}{2} \text{Tr} F^{\mu\nu} \alpha_{\perp\mu} \alpha_{\perp\nu} \\
 & + c_1 \text{Tr} \left( \frac{\xi \chi \xi + \xi^\dagger \chi^\dagger \xi^\dagger}{2} \right) \left( V_\mu - \frac{\alpha_\mu}{g} \right)^2 \\
 & + c_2 \text{Tr} \left( \frac{\xi \chi \xi + \xi^\dagger \chi^\dagger \xi^\dagger}{2} \right) \text{Tr} \left( V_\mu - \frac{\alpha_\mu}{g} \right)^2 + \mathcal{L}_4 \\
 & + C_4 \text{Tr} (\xi F_V^{\mu\nu} \xi^\dagger F_{L\mu\nu})
 \end{aligned}$$

$\chi = \chi^\dagger \sim M$  (chiral breaking)  $\mathcal{L}_4 \rightarrow$  Gasser Leutwyler  $O(p^4)$  counter terms:

# Form Factors の計算 (概略)

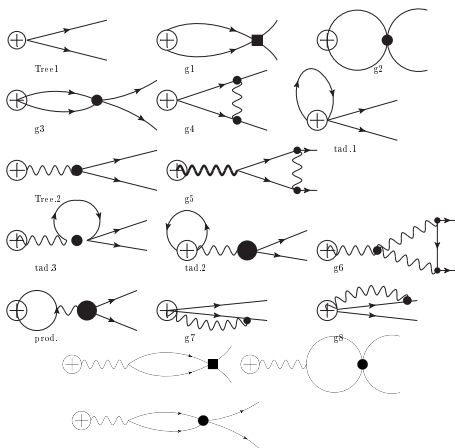


Figure 1: Feynman diagrams contributing to the  $K\pi$  form factor

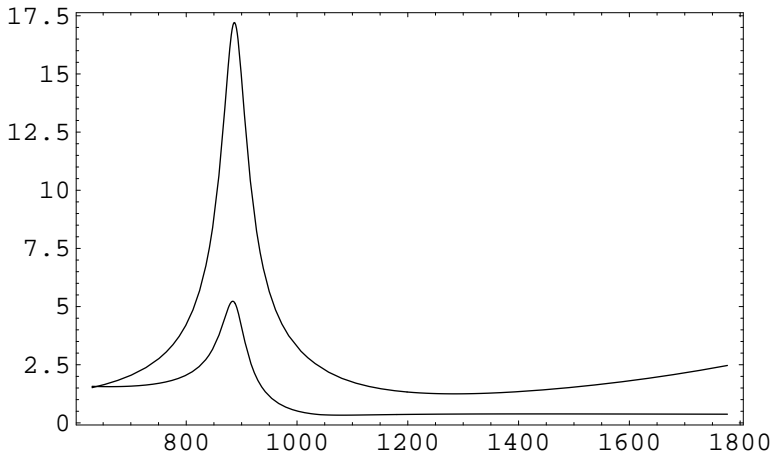


Figure: ベクトル  $|F|$ (大) とスカラー形状因子  $|F_s|$ (小)

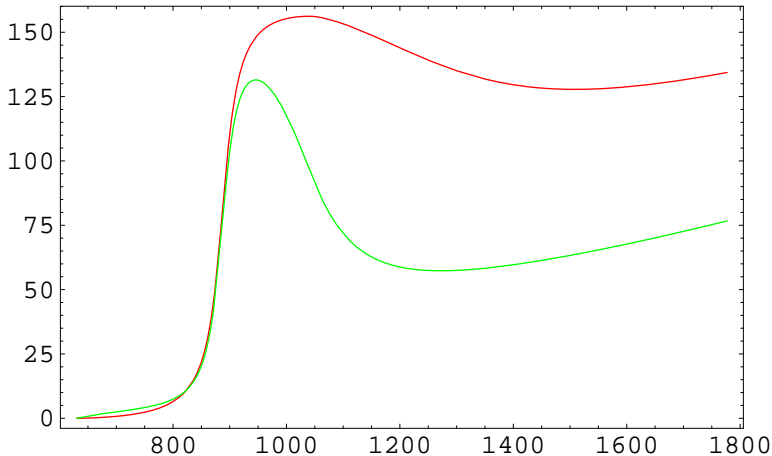


Figure: Strong phase shift  $\arg F$ (Red),  $\arg F_s$ (Green)

- タウレプトンのハドロニック崩壊の CP の破れの崩壊分布に関してレビューした
- タウレプトンのスピン無偏極な崩壊分布から CP の破れを引き出す方法を説明 (例: Two Higgs doublet 模型の荷電ヒッグスの CP の破れ)
- スピン偏極に依存する部分の崩壊分布を タウペアー対生成 ( $e^+ + e^- \rightarrow \tau^+ \tau^-$ ) から取り出す方法を紹介.
- 現在我々のグループが取り組んでいる, タウハドロニック崩壊  $\tau \rightarrow K \pi \nu$  に寄与するハドロン形状因子の計算の現状を報告.