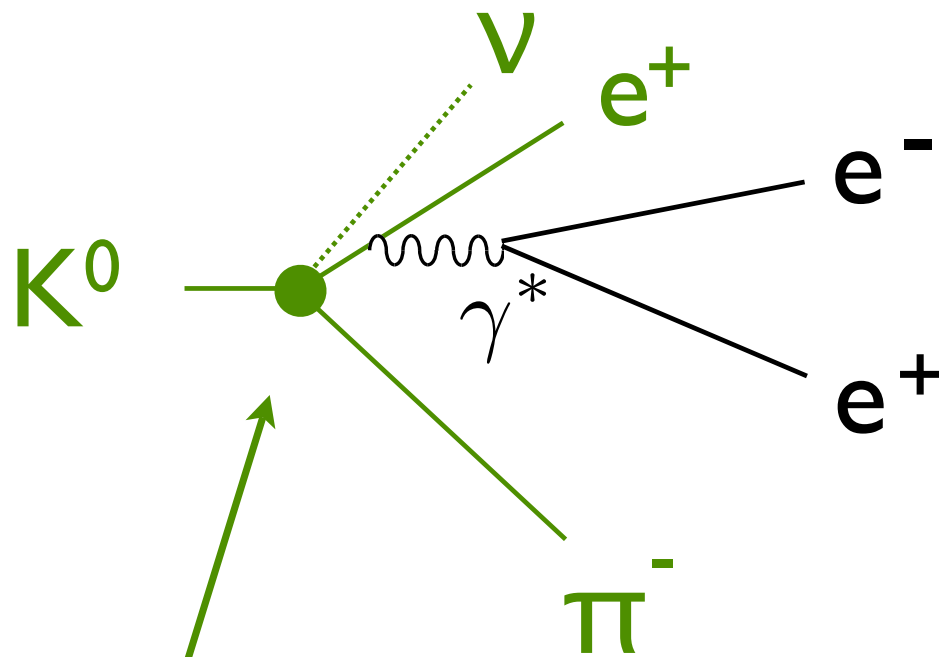


$K_L \rightarrow \pi^\pm e^\mp \nu e^+ e^-$  (Ke3ee)

その物理と崩壊分岐比測定

山中卓研究室 小寺克茂

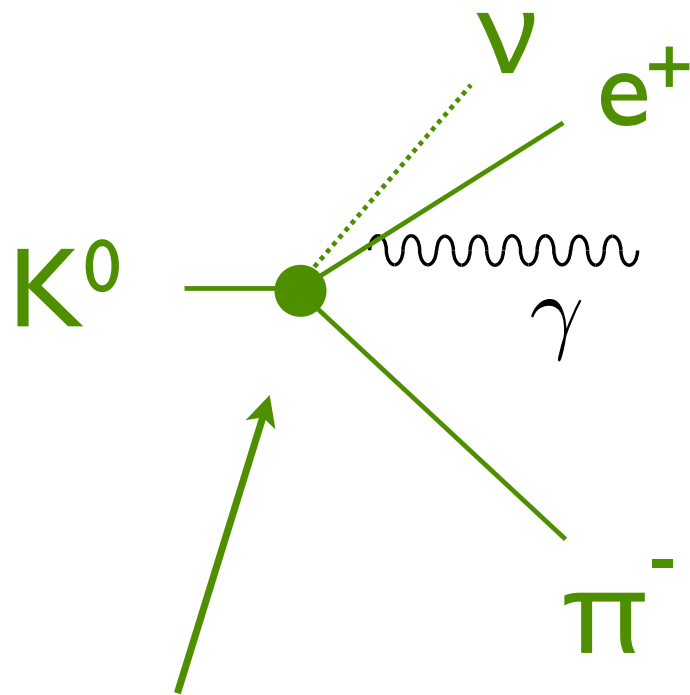
# Ke3eeの崩壊様式



Ke3の荷電外線や  
崩壊頂点から仮想  
光子を放出

- Ke3と呼ばれる  $K_L$ 最大の崩壊過程  
;実光子放出過程を含み40.67(%)

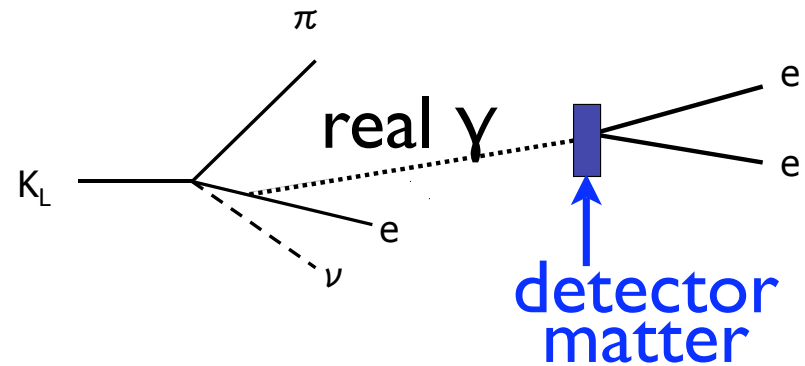
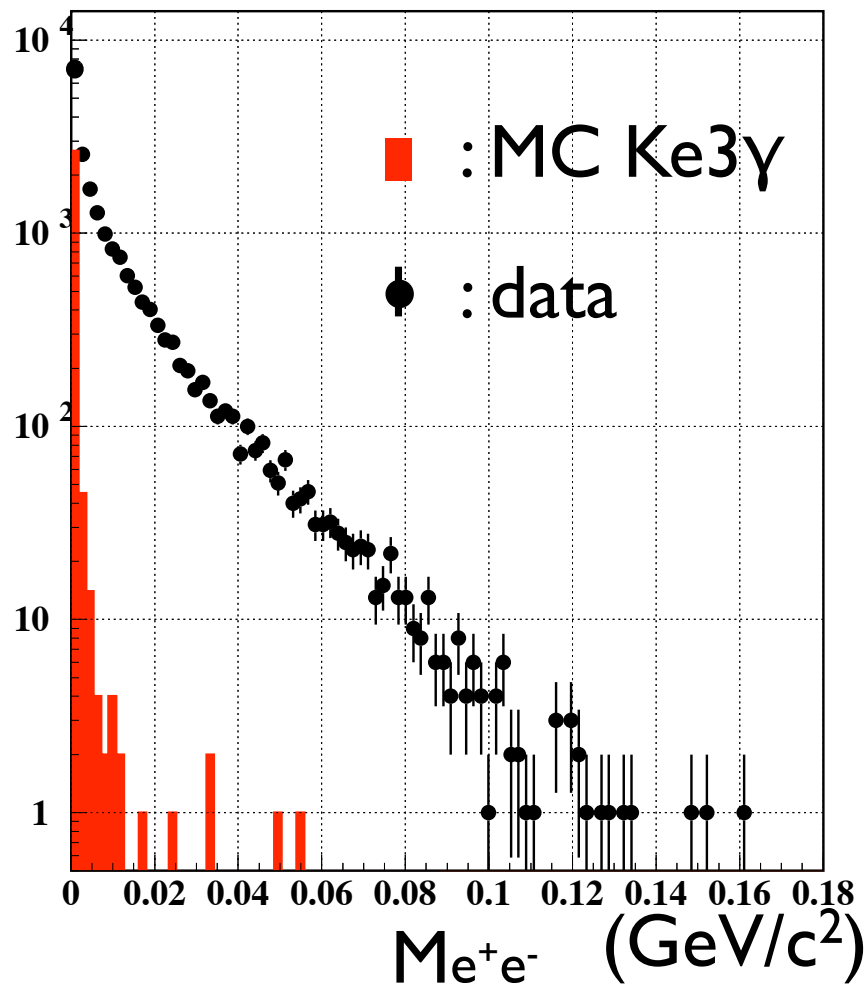
# Ke3eeの崩壊様式



実光子の過程は  
よく研究されて  
いる

- Ke3と呼ばれる  $K_L$ 最大の崩壊過程  
;実光子放出過程を含み40.67(%)

# きっかけのプロット $Me^+e^-$



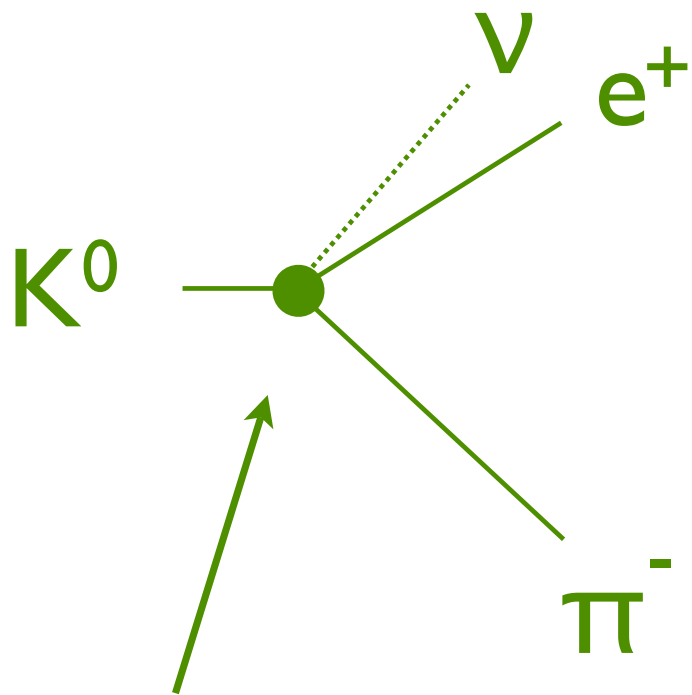
# 物理的背景

物理的背景を議論する目的

Ke3ee の包含する物理の紹介

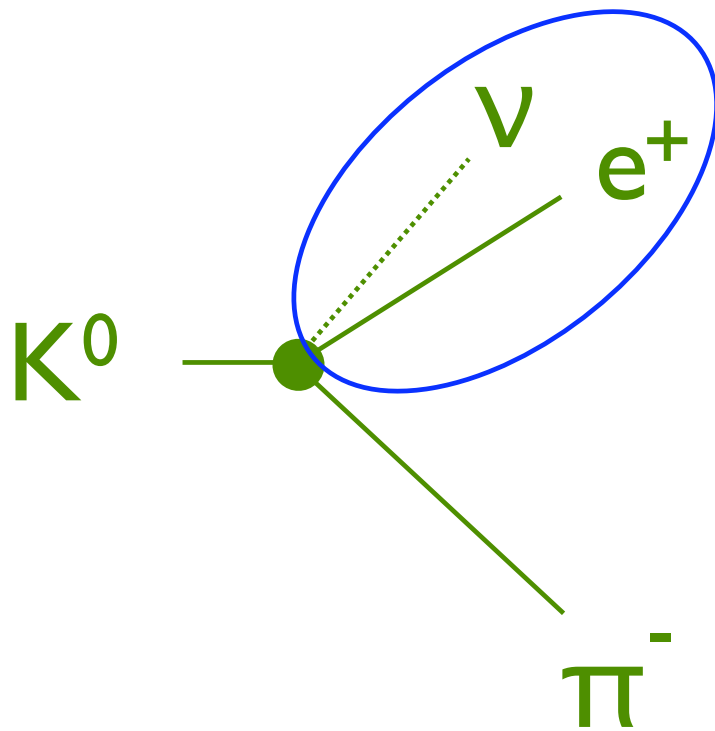
崩壊分岐比を決定するためには、  
そのモードを良く理解したMCが必須

# 物理的背景 入門Ke3の物理



- Ke3と呼ばれる  $K_L$ 最大の崩壊過程( $0.4067 \pm 0.0011$ )

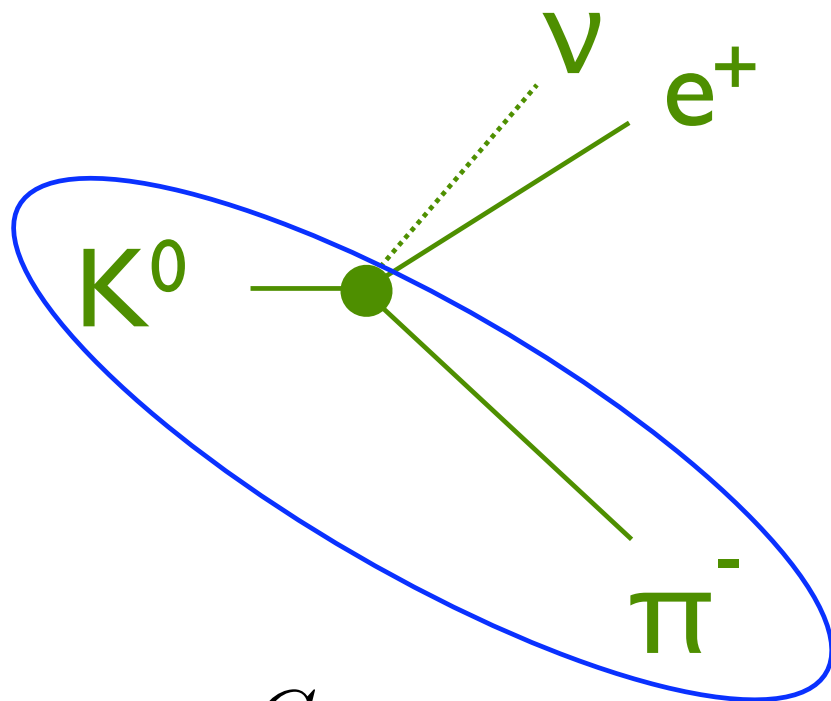
# 物理的背景 入門Ke3の物理



$e^+ - \nu$  current は電弱相互作用で精密な記述

$$M_{kl3} = \frac{G_F}{\sqrt{2}} \langle e^+ \nu | (J_\mu)^+ | 0 \rangle \langle \pi^- (p_\pi) | J^\mu | K^0 (p_K) \rangle$$

# 物理的背景 入門Ke3の物理



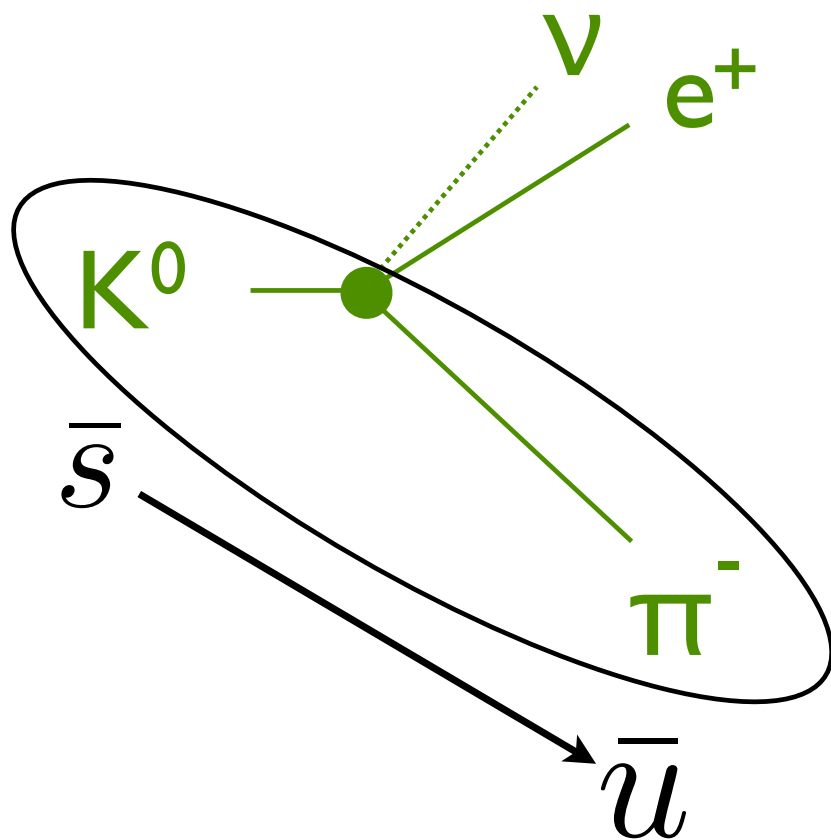
$e^+$ - $\nu$  current は電弱相互作用で精密な記述

$K^0$ - $\pi^-$  弱current は強い相互作用の構造をもち精密解を得られない

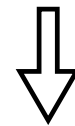
$$M_{kl3} = \frac{G_F}{\sqrt{2}} \langle e^+ \nu | (J_\mu)^+ | 0 \rangle \langle \pi^-(p_\pi) | J^\mu | K^0(p_K) \rangle$$



# 物理的背景 入門Ke3の物理



CKM 行列の  $V_{us}$  を決めるのに使われる



$K^0$ - $\pi^-$  弱current 構造の記述は不可欠  $\rightarrow$  よく研究

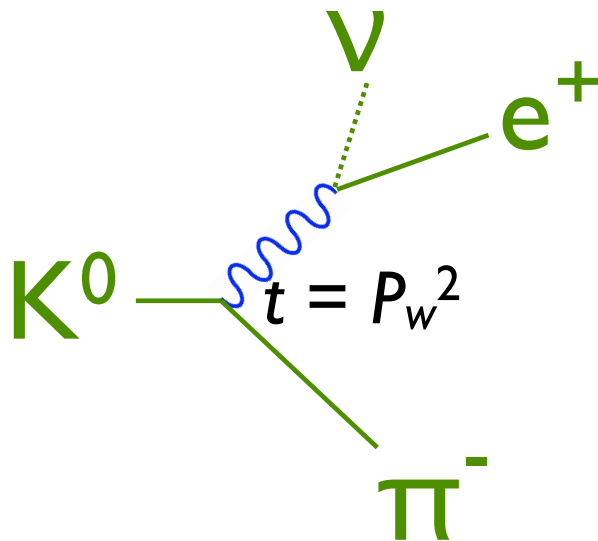
低エネルギーにおける強い相互作用を表す Model の良いテスト

# K- $\pi$ current が理解されないなかで $V_{us}$ をどう決めるか？

答え

現象論的な form factor で K- $\pi$  current を記述

$$\Gamma_{K\ell 3} = \frac{G_F^2 M_K^5}{192\pi^3} S_{EW} (1 + \delta_K^\ell) C^2 |V_{us}|^2 f_+^2(0) I_K^\ell$$



$$f_+(t) =$$

$$f_+(0) \left( 1 + \lambda'_+ \frac{t}{M_\pi^2} + \frac{1}{2} \lambda''_+ \frac{t^2}{M_\pi^4} \right)$$

# Ke3eeにもこのform factor を使える？

$$\Gamma_{K\ell 3} = \frac{G_F^2 M_K^5}{192\pi^3} S_{EW} (1 + \delta_K^\ell) C^2 |V_{us}|^2 f_+^2(0) I_K^\ell$$

ここに実光子のモードは入っている

$$\epsilon^\mu \rightarrow \frac{e}{q^2} \bar{u} \gamma^\mu v \text{ の読み替えだけでよい？ } \times$$

Gauge invariance を破るなど物理的にナンセンスになる可能性  
しかし、MCのため K- $\pi$  current の表現は必須

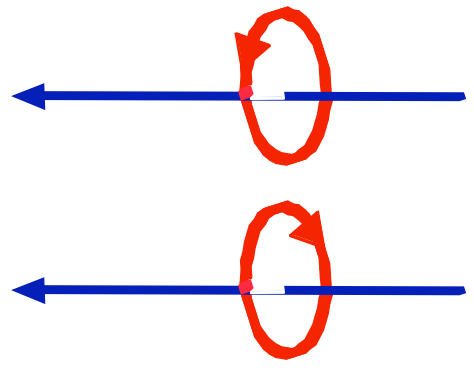
# Chiral Perturbation Theory (ChPT)を試みる

今行っている研究に依存するパラメータがない  
(何かを Tune する必要がない)

未知のモード ( $K\ell_3\ell\ell$ ) による ChPT  $\rightarrow$  QCD の検証

# ChPT入門(Chiral symmetry)

Chiral symmetry } 標準理論の根底  
Gauge symmetry }


$$\frac{1}{2}(1 - \gamma_5)\psi = \psi_L$$
$$\frac{1}{2}(1 + \gamma_5)\psi = \psi_R$$

$$\psi'_L = e^{-i\beta} \psi_L, \quad \psi'_R = e^{+i\beta} \psi_R$$

右巻きと左巻きで  
違う変換を処すのが  
カイラル変換

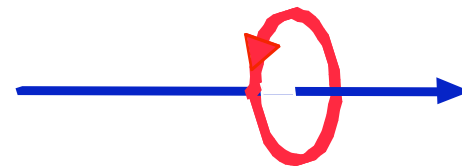
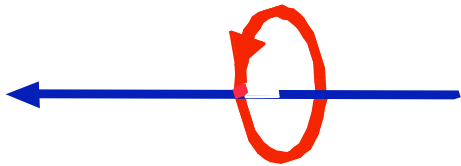
# ChPT入門(Chiral symmetry)

Dirac eq.

$$\gamma^\mu i\partial_\mu \psi_{\text{R}} - m\psi_{\text{L}} = 0$$

$$\gamma^\mu i\partial_\mu \psi_{\text{L}} - m\psi_{\text{R}} = 0$$

massは右巻きと  
左巻きを混合



左巻きやでえ



右巻きやでえ



# ChPT入門(Chiral symmetry)

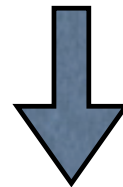
Dirac eq.

$$\gamma^\mu i\partial_\mu \psi_{\text{R}} - m\psi_{\text{L}} = 0$$

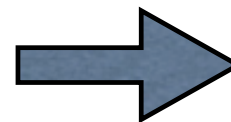
$$\gamma^\mu i\partial_\mu \psi_{\text{L}} - m\psi_{\text{R}} = 0$$

massは右巻きと  
左巻きを混合

~~$m =$  与えられたパラメータ~~



Chiral symmetry を保ちながら,  
それ自身の真空期待値  $\neq 0$   
が元の場に質量を与える場?



ラグランジアン  
に加える

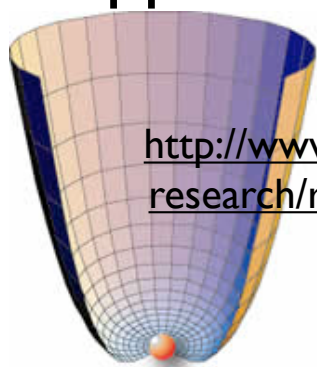
# ChPT入門 (Spontaneously symmetry breaking)

Chiral symm.が自発的に破れて quark はMassを獲得

→同時にMass less Pseudo scalar meson が発生

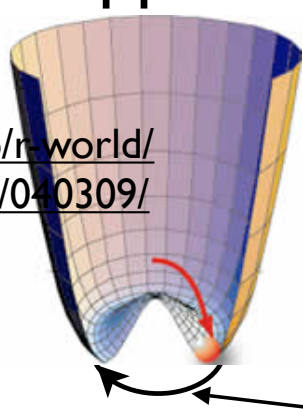
(Higgs機構ではGauge symm.と絡んでMass less pseudo scalar は出ない)

$$\langle q\bar{q} \rangle = 0$$



自発的対象の破れ

$$\langle q\bar{q} \rangle \neq 0$$



このモードが

質量を持たないNGB

Mass less pseudo scalar meson  
=Nambu-Goldston Boson  
(NGB)は無限に縮退



# Chiral 変換 for ChPT

$u, d, s$  flavor symmetry に対する変換

$$\exp \left[ i \sum_i^8 \lambda_i \theta_{Li} \right] \frac{1 - \gamma_5}{2} \begin{pmatrix} u \\ d \\ s \end{pmatrix}, \quad \exp \left[ i \sum_i^8 \lambda_i \theta_{Ri} \right] \frac{1 + \gamma_5}{2} \begin{pmatrix} u \\ d \\ s \end{pmatrix}$$

$SU(3)_L \quad \otimes \quad SU(3)_R$

足したり引いたり

→  $SU(3)_V \otimes SU(3)_A$

残る symmetry      壊れる symmetry

# NGB場--低エネルギー--展開, 摂動が可能

$\pi, K, \eta$  の pseudo scalar meson が NGB

[これらが  $m \neq 0$  であるのは, (Higgs 機構により)

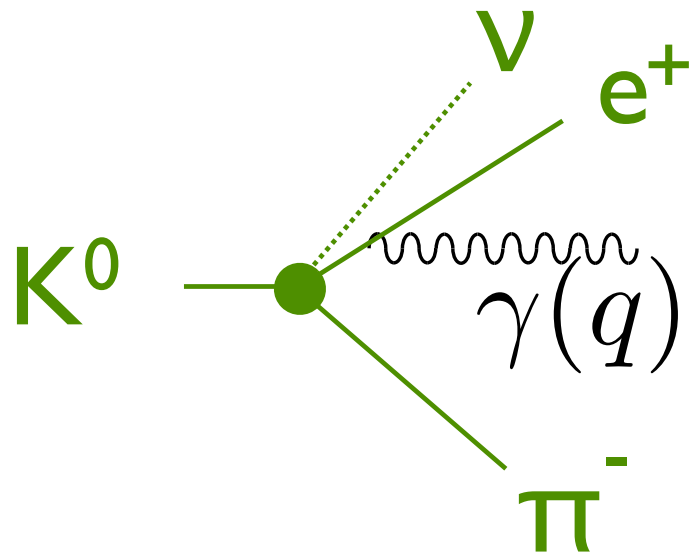
$u, d, s$  が質量を持つことによる.]

$$U = \exp \left[ i \sum_i^8 \frac{1}{F_\pi} \lambda_i \phi_i \right] \quad \mathcal{L}_2 = \frac{1}{4} F^2 \text{tr} \{ \partial_\mu U \partial^\mu U^\dagger + 2B_0 \mathcal{M}(U + U^\dagger) \}$$

摂動展開の条件  $\longrightarrow p_\mu p^\mu / 4\pi F \ll 1$

$$\sum_i^8 \lambda_i \phi_i = \sqrt{2} \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \pi^0 + \frac{1}{\sqrt{6}} \eta_8 & & \pi^+ & K^+ \\ \pi^- & & -\frac{1}{\sqrt{2}} \pi^0 + \frac{1}{\sqrt{6}} \eta_8 & K^0 \\ K^- & & \bar{K}^0 & -\frac{2}{\sqrt{6}} \eta_8 \end{pmatrix}$$

# Why Ke3ee ?



$\gamma$  : K- $\pi$  current の構造を探る  
プローブ(殆どが外線のBrems.)

$E_\gamma$  spectrum にBrems. 以外の  
影響を発見できるか？

$\nu$  測定不可能のため K energy に2つの解

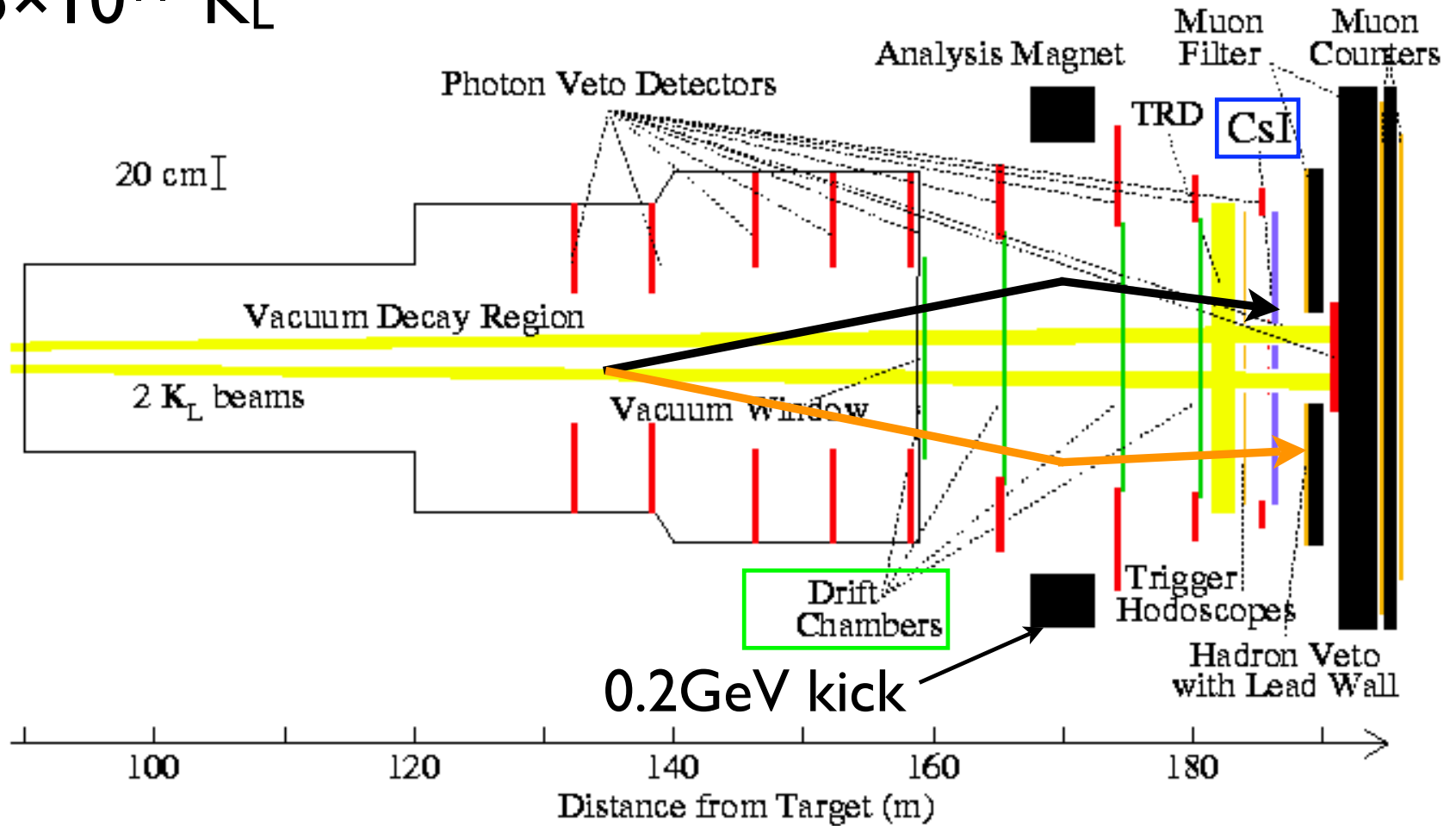
Virtual  $\gamma^* \rightarrow e^+e^-$  の  $M_{ee}$  にこの問題はない。  
 $q_\mu q^\mu \neq 0$  によって生きる項が存在。

# Ke3ee 物理的背景のまとめ

- Ke3ee は Ke3が仮想光子を伴ったモード
- Ke3 は  $V_{us}$  を決めるために使われる
- $K-\pi$  current は現象論的 *form factor* で記述
- Ke3 *form factor*をそのままKe3eeには使えない
- ChPT は一義のMCを与える(Tune 不要)
- Ke3ee は新たな ChPT (QCD) 検証
- *Massive radiation*がKe3 $\gamma$ にない情報を持つ

# 実験 KTeV experiment

$1.5 \times 10^{11}$   $K_L$

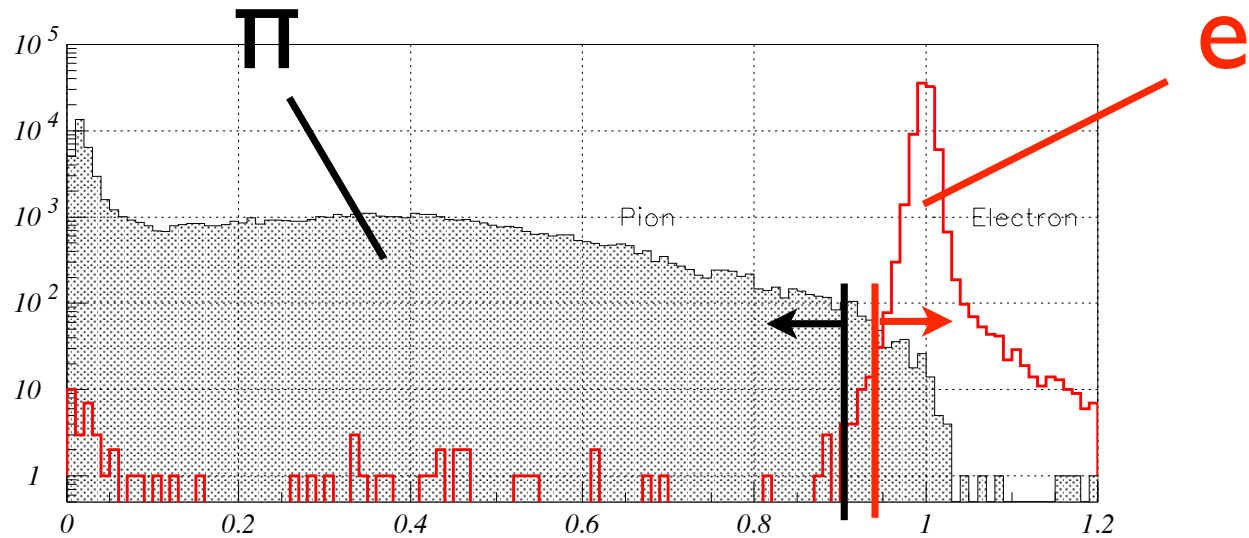


# Event selection

1) Four track event with good Vertex quality

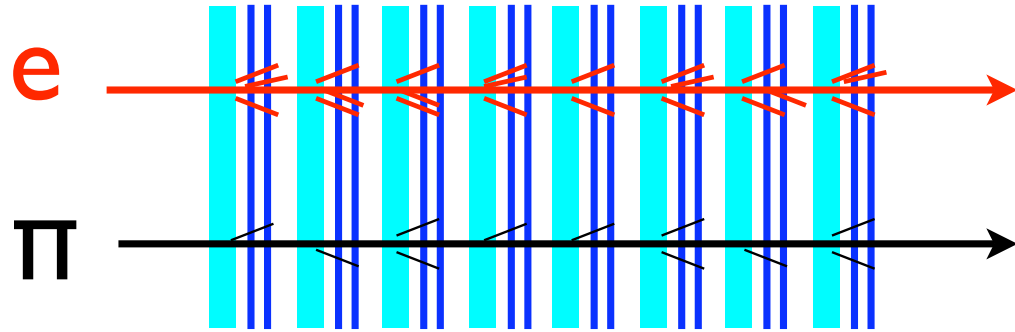
2) PID ( $\pi^\pm e^\mp e^+ e^-$ )

# PID by $E/p$

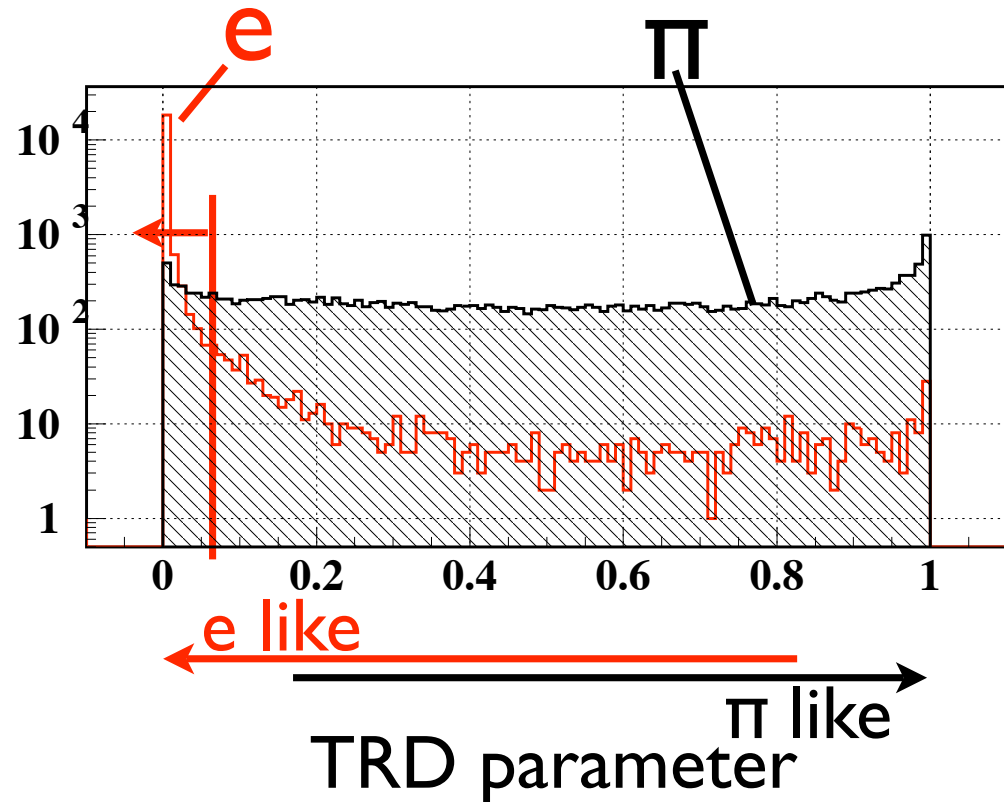
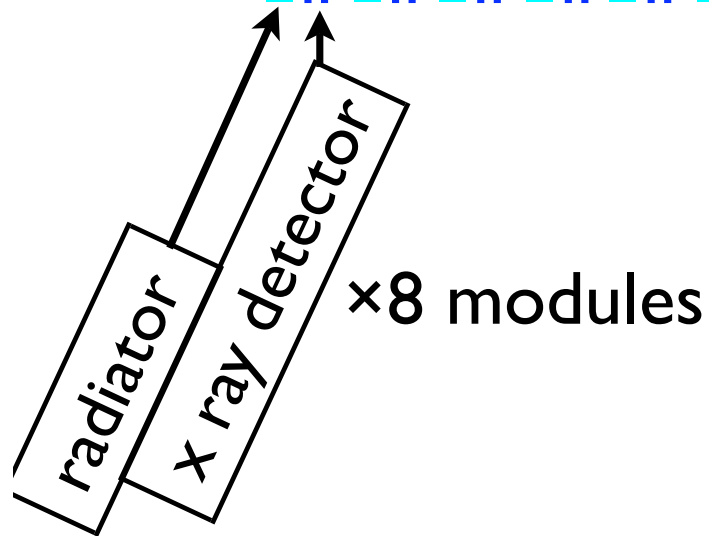


Energy on CsI / Momentum of track

# Particle ID by TRD



Transition Radiation  
Depends on relativistic  
parameter  $\gamma$





# Backgrounds

- $K_L \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0_D$   
 $(\pi^0 \rightarrow e^+ e^- \gamma)$   
 $\downarrow$   
 One  $\pi^\pm$  fakes  $e^\pm$
- $K_L \rightarrow \pi^\pm e^+ \nu \pi^0_D$   
 $(\pi^0 \rightarrow e^+ e^- \gamma)$
- $K_L \rightarrow \pi^\pm e^+ \nu \gamma$   
 $(\gamma \rightarrow e^+ e^- : \text{external conversion})$
- $K_L \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0_{4e}$   
 $(\pi^0 \rightarrow e^+ e^- e^+ e^-)$

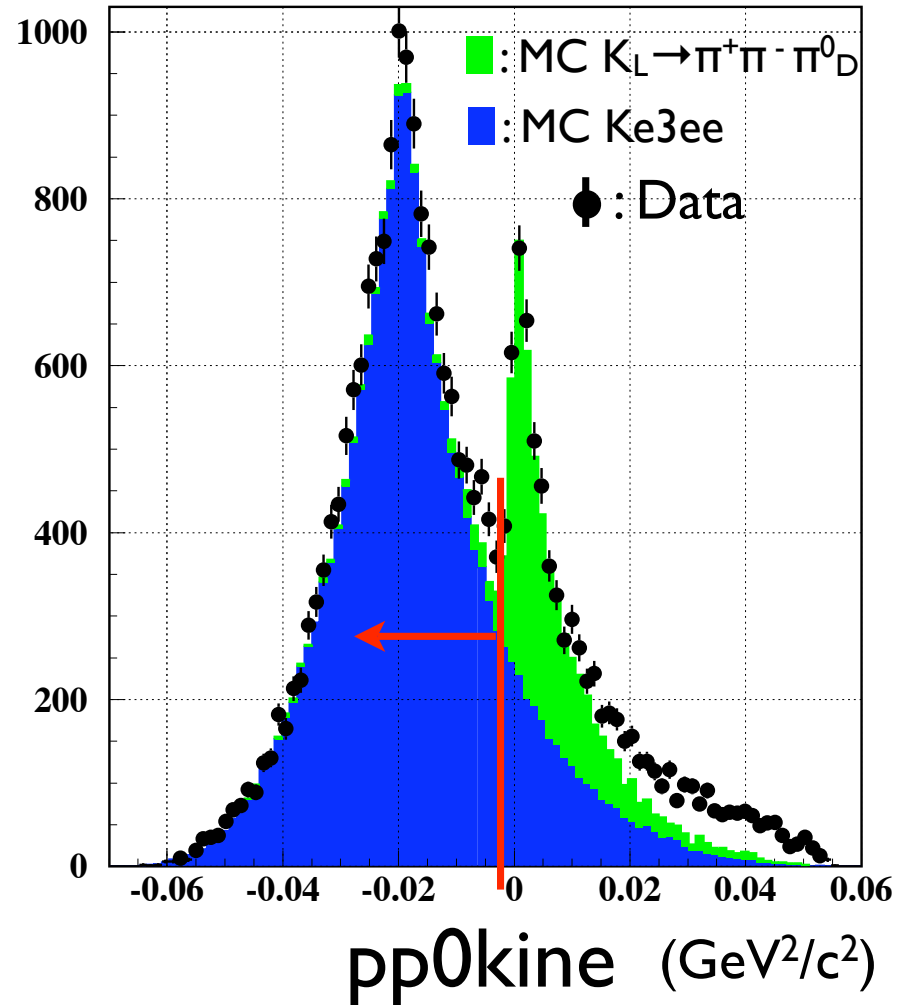
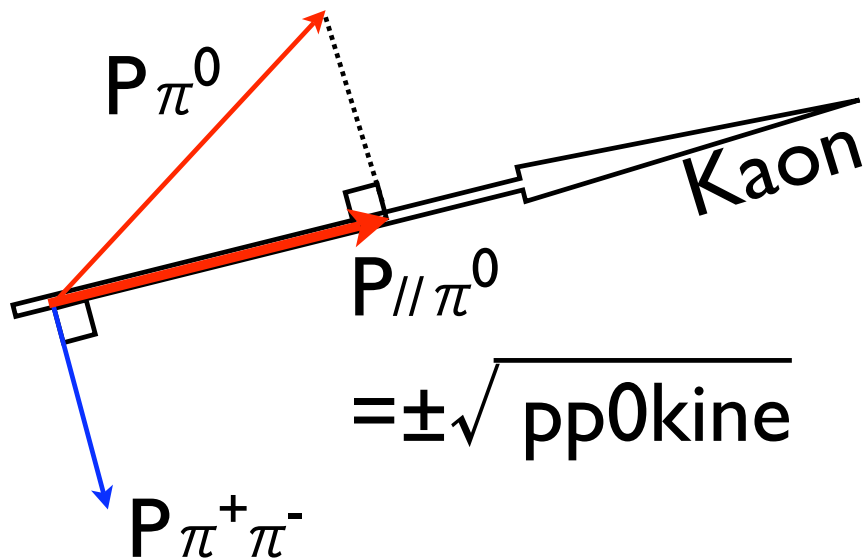
Important  
 $\pi$ -e rejection !

# One more cut to reject $K_L \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0_D$

pp0kine

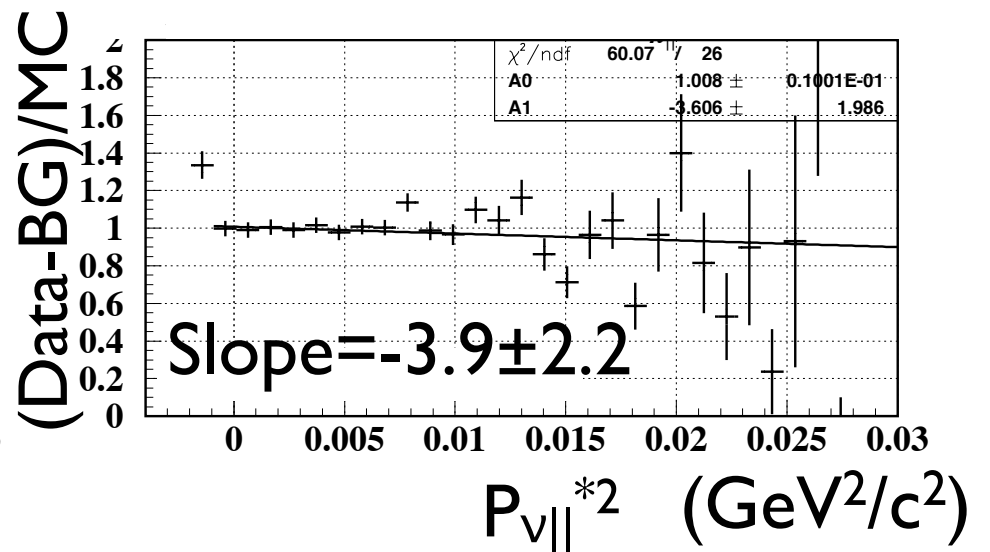
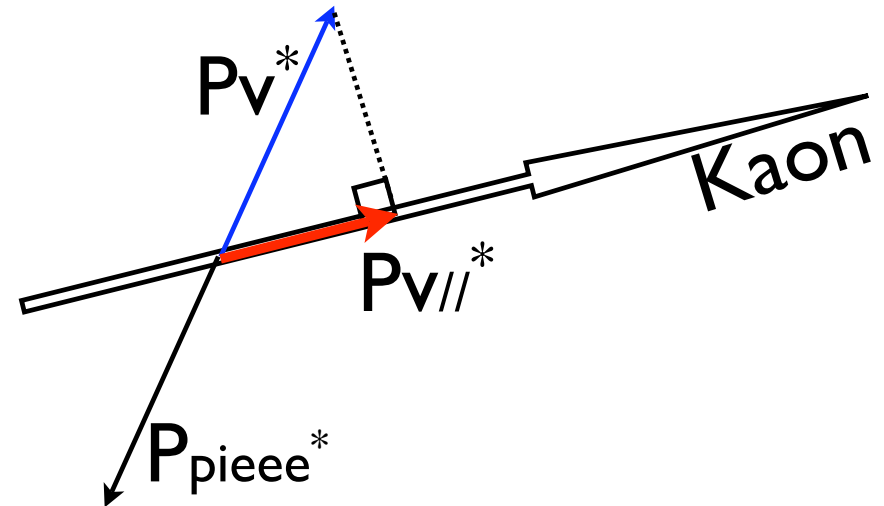
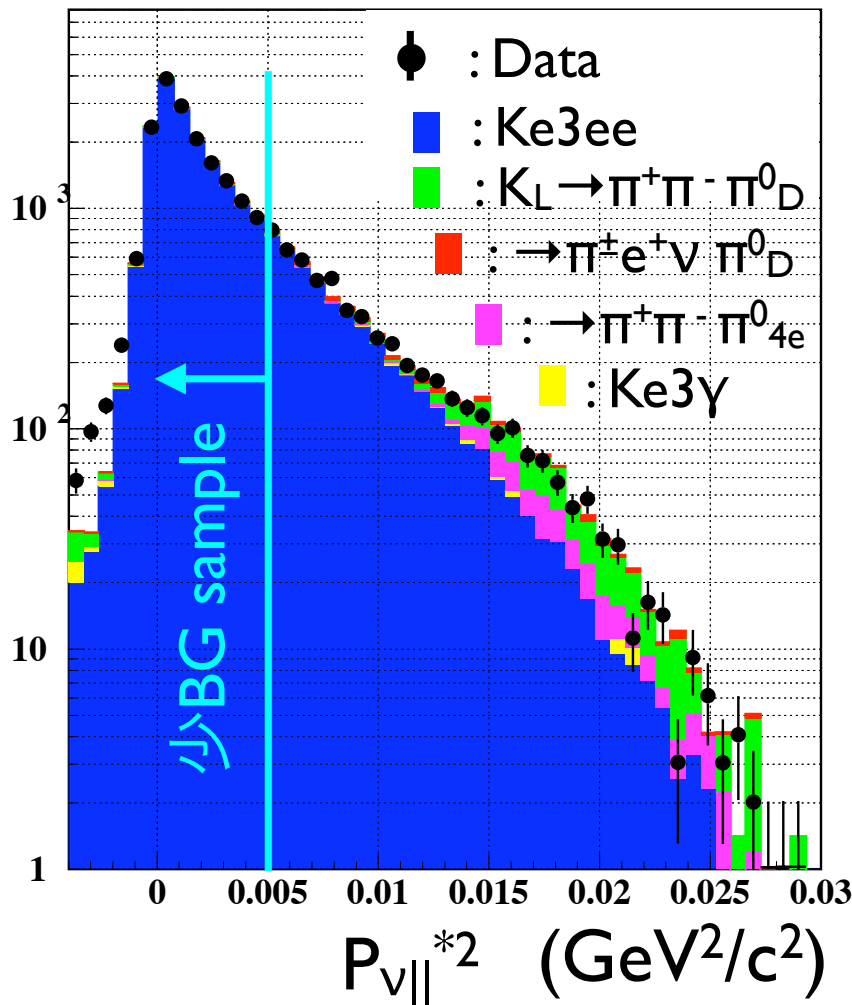
We have  $\boxed{\pi^+ e^-} e^+ e^-$

Assuming :  $K_L \rightarrow \boxed{\pi^+ \pi^-} \pi^0$   
 : missing  $\pi^0$

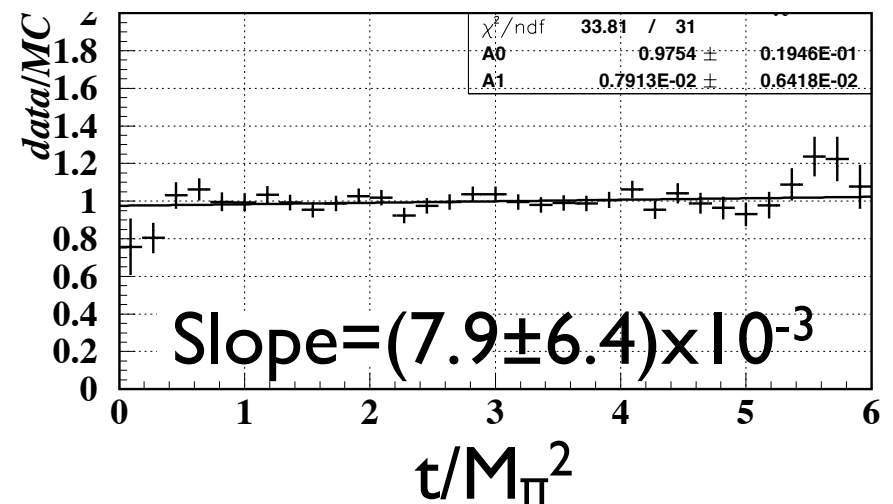
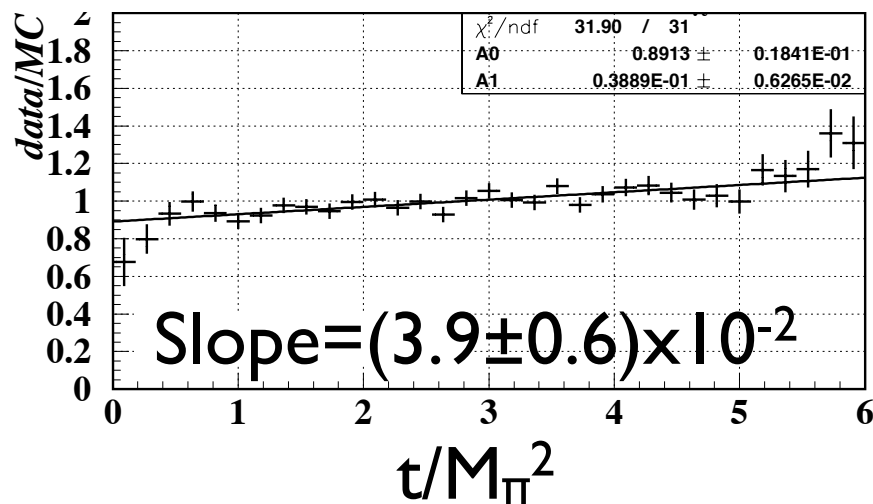
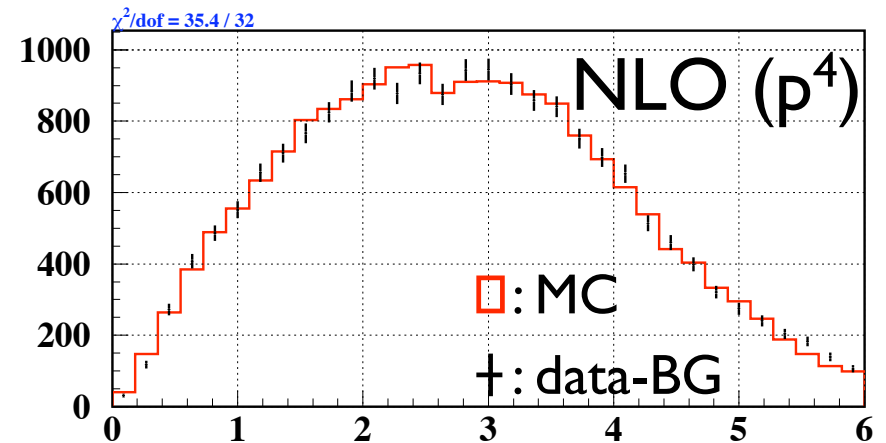
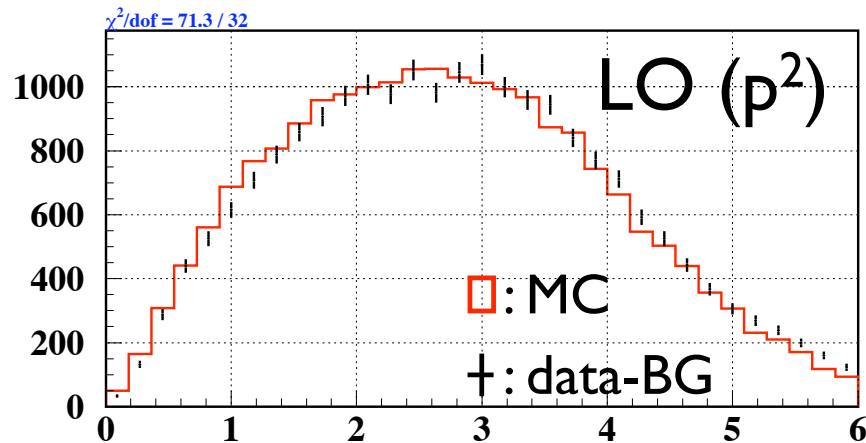


# Comparison between Data/MC

$P_{\nu||}^{*2}$  : Squared longitudinal momentum of neutrino in Kaon rest frame.

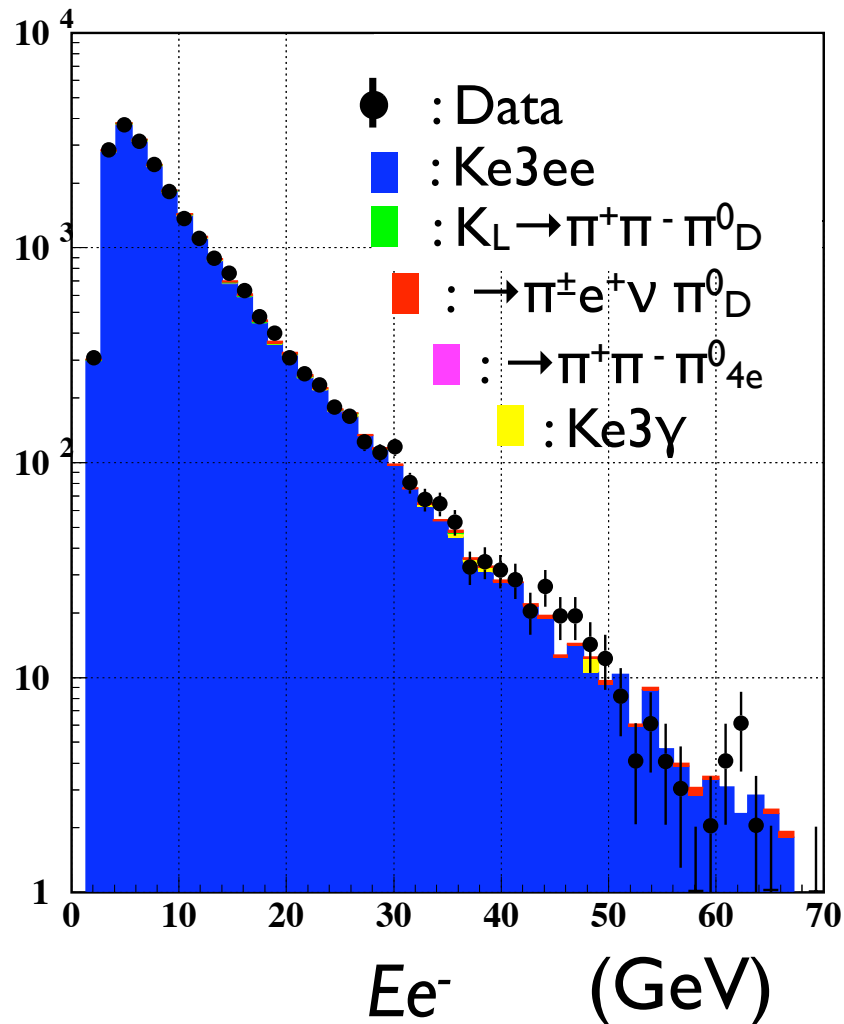


# LO vs. Next to LO( $t/M_{\pi}^2, \text{min}$ )



# Comparison between Data/MC

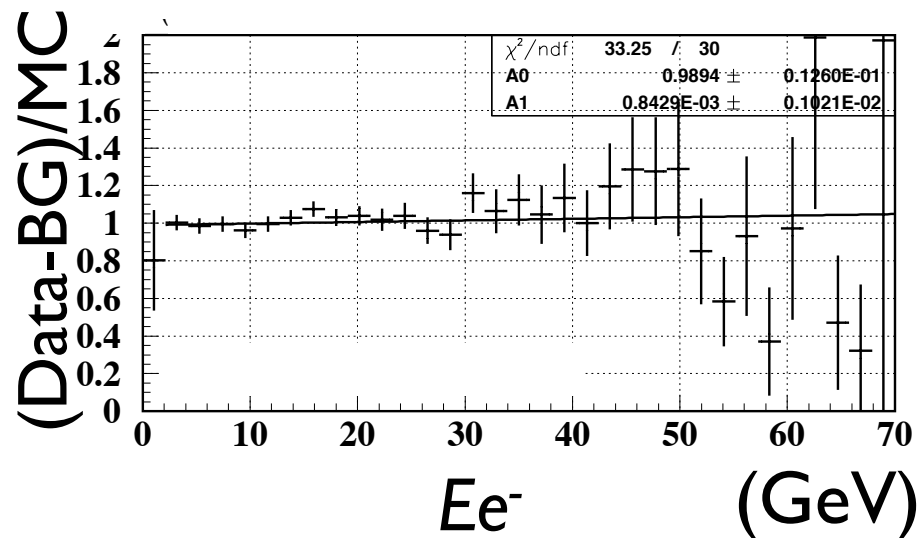
Energy of electron (of pair)



$$P_{\nu\parallel}^{*2} < 0.005 \text{ GeV}^2/c^2$$

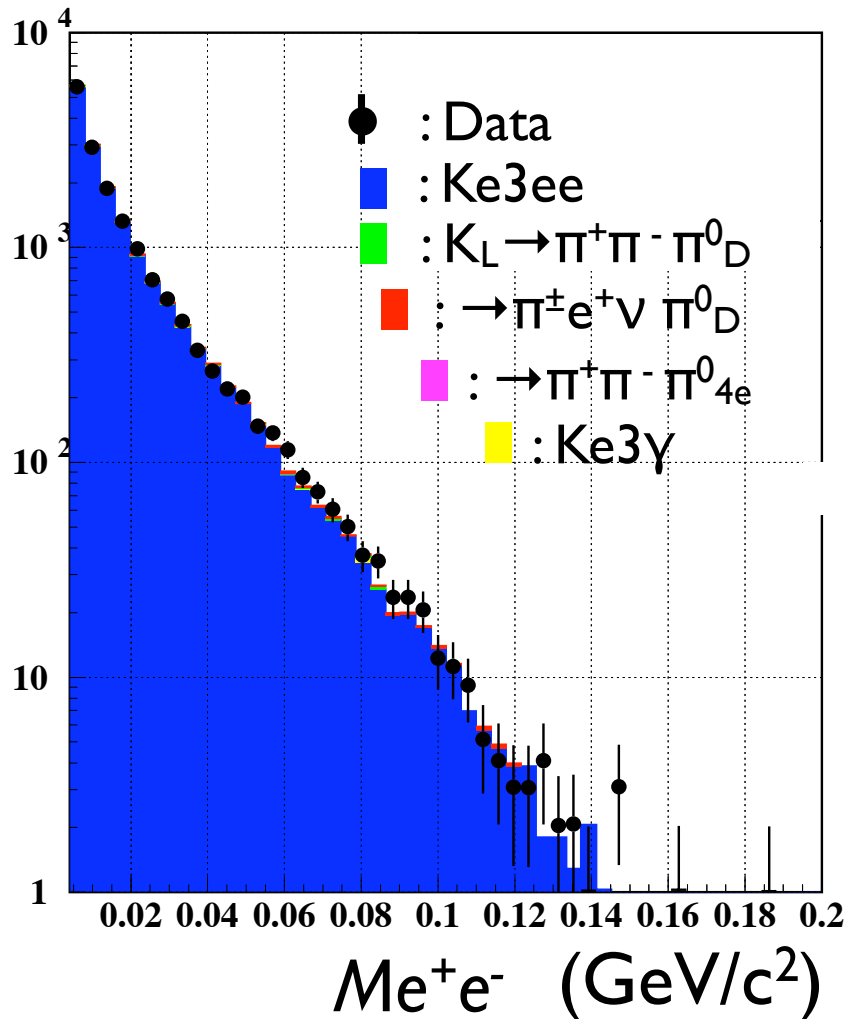
少BG sample

$$\text{Slope} = (0.8 \pm 1.0) \times 10^{-3} \text{ GeV}^{-1}$$



# Comparison between Data/MC

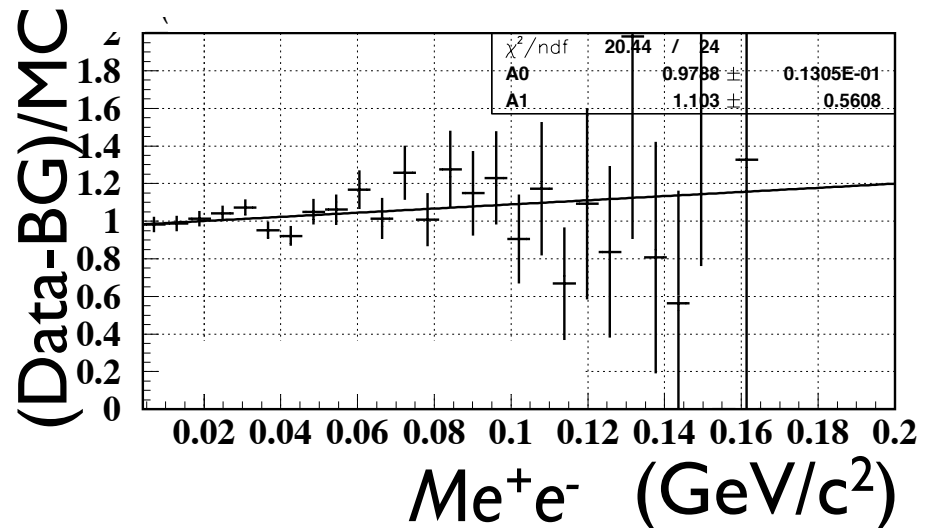
Invariant mass of  $e^+e^-$



$$P_{\nu||}^{*2} < 0.005 \text{ GeV}^2/c^2$$

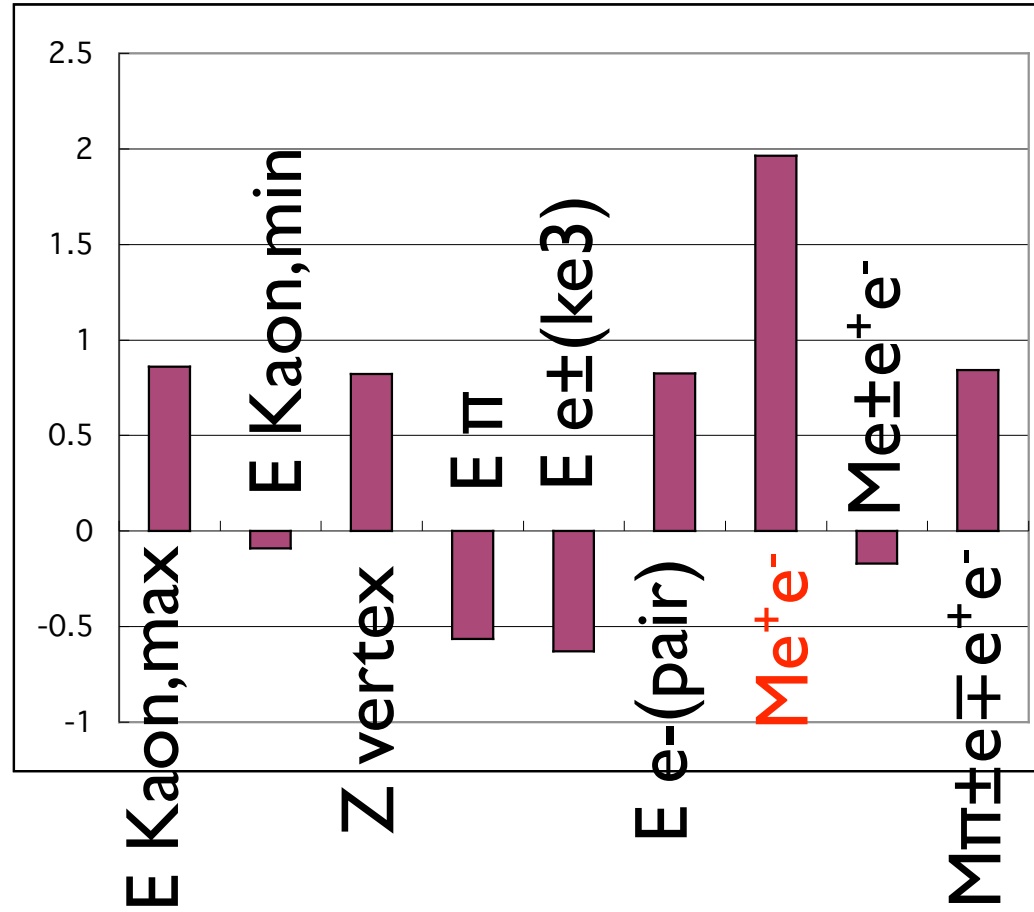
少BG sample

$$\text{Slope} = 1.10 \pm 0.55 \text{ (GeV}/c^2\text{)}^{-1}$$



# Significance of slopes

Slope/ $\delta$ slope



# Observed events and estimated BG

(Normalization mode  $K_L \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0_D$ )

	without $P_{V  }^{*2}$ cut	$P_{V  }^{*2} < 0.005 (\text{GeV}^2/c^2)$
Ke3ee(with BG)	19466 evts	14080 evts
$K_L \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0_D$	356.1 evts	34.3 evts
$K_L \rightarrow \pi^\pm e^+ \nu \pi^0_D$	256.0 evts	88.2 evts
$K_L \rightarrow \pi^\pm e^+ \nu \gamma$	132.0 evts	84.7 evts
$K_L \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0_{4e}$	182.2 evts	2.6 evts
$\Xi \rightarrow \Lambda \pi^0_D$	1.7 evts	0.3 evts
Double Ke3	39.5 evts	29.1 evts
N/S	5.0%	1.7%
BR[Ke3ee]		



# Correction and error(%)

		error(%)
Statistic		0.84
Systematic		
	cut variation	0.82
	$\pi$ ineff. (E/p)	$\delta=0.72$ 0.05
	$\pi$ loss in TRD	$\delta=2.91$ (2.24,Signal ) (2.58,norm.) 0.59
	e ineff.(E/p)	$\delta= 0.39$ 0.10
	Radiative corr.	$\delta= 2.1$ 0.1
	Systematic Total(internal)	1.02
	Systematic (external)	2.84
Systematic Total		3.02

# Summary

*Ke3ee* 物理を *ChPT* によって研究している

- *ChPT* は *Ke3ee event* をよく再現
- *ChPT NLO* はさらによく再現
- $Me^+e^-$  はさらに詳細な構造をみせている？

*Preriminary*

-  $BR(Ke3ee) =$



# Event Selection

Pick up  $\pi^\pm e^\mp e^+ e^- \dots$  **ke3ee**  
 $\pi^+ \pi^- e^+ e^- \dots$  **pm0d**

EKaon < 200 GeV (Both soln.)	
95 < Z vertex < 150 m	
Vertex $\chi^2 < 125$	
0.93 < E/p < 1.15 for electron tracks	
E/p < 0.9 for pion tracks	
TRD probability < 0.06 for electron tracks	
$E_{e^\pm(\text{pair})} > 3 \text{ GeV}$	
$M_{e^+e^-} > 0.005 \text{ GeV}/c^2$	
- for Ke3ee	for pm0d
$M_{\pi^\pm e^+ e^+ e^-} < 0.5 \text{ GeV}/c^2$	$0.492 < M_{\text{pm0}} < 0.504 \text{ GeV}/c^2$
-	$0.127 > M_{e^+e^-g} > 0.143 \text{ GeV}/c^2$
$p_{p0\text{kine}} < -0.002 \text{ (GeV}/c)^2$	$p_{p0\text{kine}} > -0.002 \text{ (GeV}/c)^2$
$E_{e^\pm(\text{Ke3})} > 10 \text{ GeV}$	-
$E_{\pi^\pm} > 10 \text{ GeV}$	$E_{\pi^\pm} > 8 \text{ GeV (for one } \pi^\pm)$