

$K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 探索実験 KEK-PS E391a の現状

2007年3月16日

特定領域「フレーバー物理の新展開」研究会

隅田 土詞

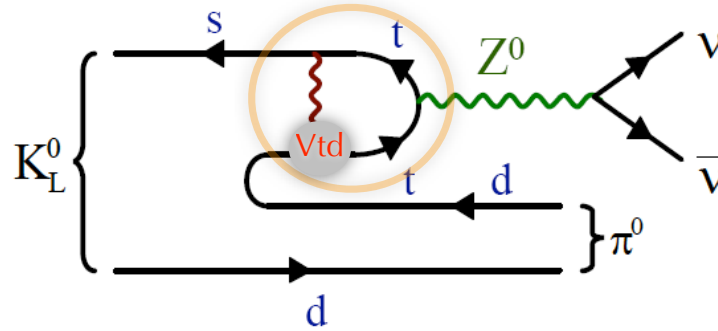
(京都大学)

Contents

- Physics Motivations
 - in the Standard Model
- $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 探索実験
 - 歴史
 - KEK-PS E391a, J-PARC E14
- E391a 実験
 - 実験原理
 - 検出器
 - 解析
 - 物理結果
- まとめ

Physics Motivations (SM)

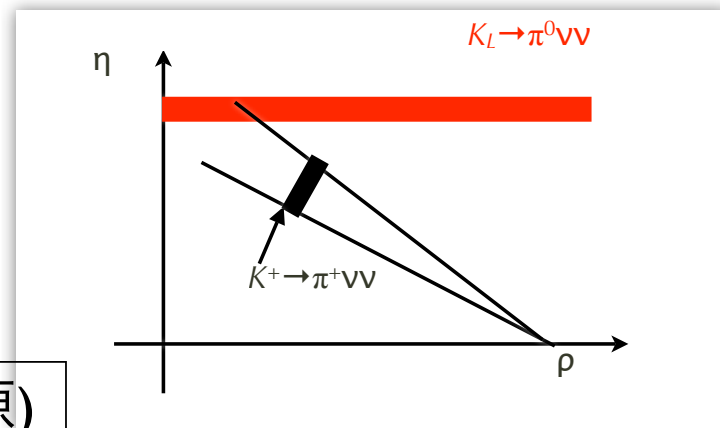
- $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$
 - $\Delta S = 1$ の FCNC 過程における直接的 CP の破れ
- 崩壊分岐比
 - $A(K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}) \propto V_{td}^* V_{ts} - V_{ts}^* V_{td}$
 $= 2 \times V_{ts} \times \text{Im}(V_{td}) \propto \eta$
 $\Rightarrow \text{Br}(K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}) \propto \eta^2$



$$V = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - \lambda^2/2 & \lambda & A\lambda^3(\rho - i\eta) \\ -\lambda & 1 - \lambda^2/2 & A\lambda^2 \\ A\lambda^3(1 - \rho - i\eta) & -A\lambda^2 & 1 \end{pmatrix} + \mathcal{O}(\lambda^4)$$

: η の直接測定

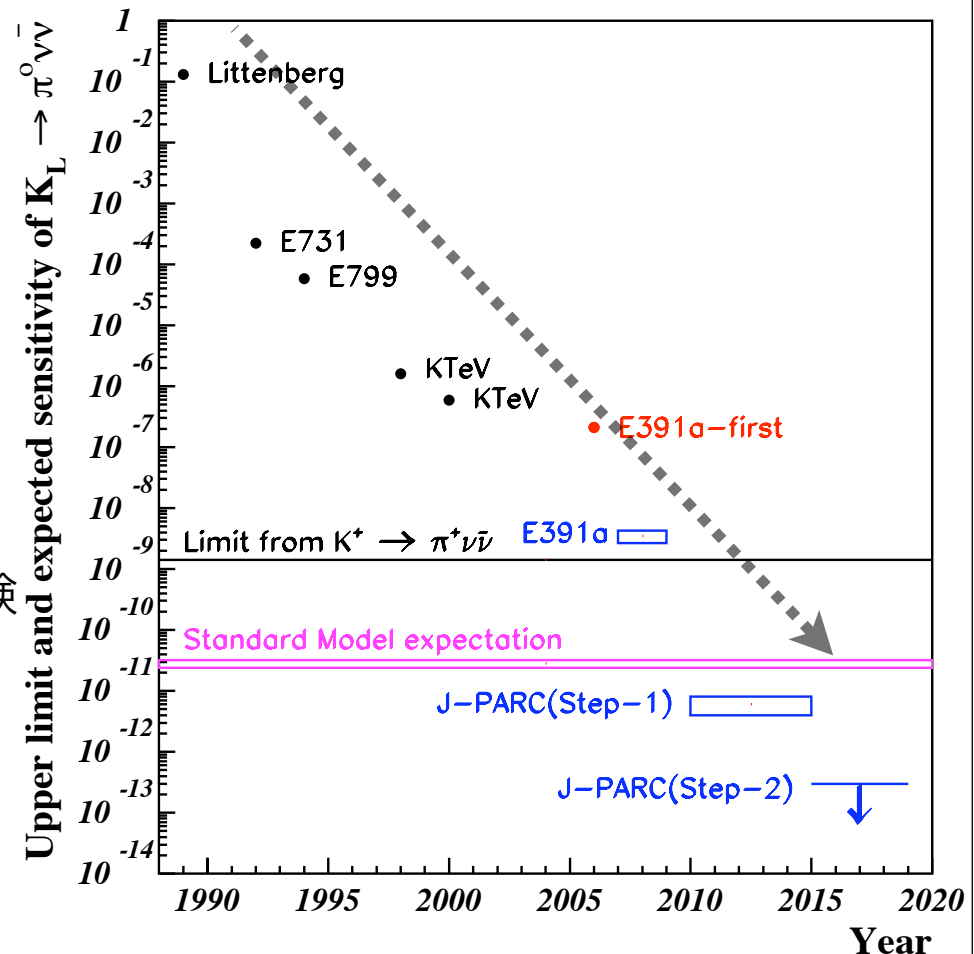
- 理論的な不定性が小さい
 - $\text{Br} \rightarrow \eta : \sigma \sim 1-2\%$
 - $\text{Br}(K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu})_{\text{SM}} \sim (2.8 \pm 0.4) \times 10^{-11}$
- K 中間子のみでユニタリー三角形を作る
 - K_L, K^+ 実験による結果の整合性
 - B 中間子実験との比較



\Rightarrow SM の検証から New Physics \wedge (\rightarrow 小松原)

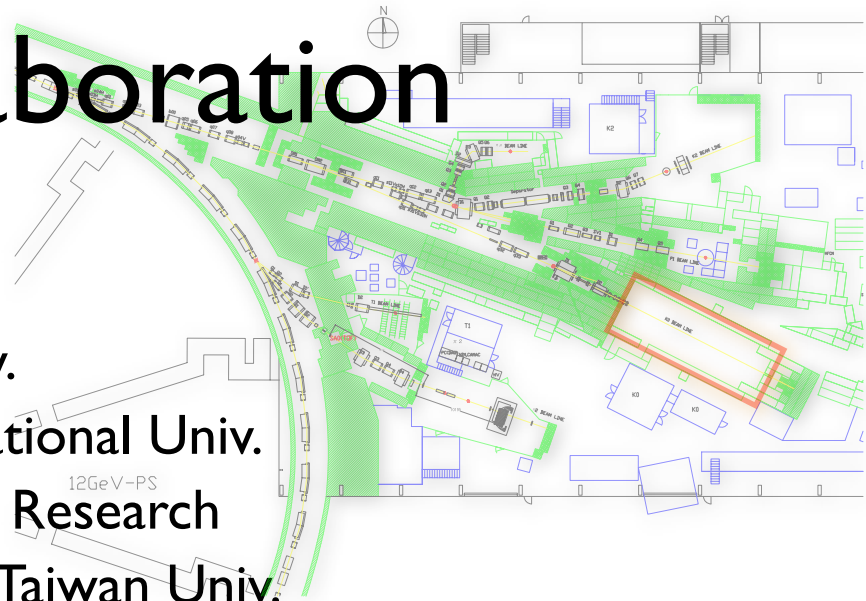
$K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 探索実験

- 非常に困難な実験のため
未だイベントは発見されていない
 - 分岐比が小さい($\sim 10^{-11}$)
 - 複雑なバックグラウンド
 - 3体崩壊
 - 全ての粒子が中性
- 現在の上限値
 - $Br < 2.1 \times 10^{-7}$ (90% C.L.)
(E391a, PRD 74:051105, 2006)
- Step by Step approach
 - KEK-PS E391a
: $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ に特化した世界初の実験
 - 実験方法の確立
 - $O(10^{-9})$ での測定
 - J-PARC K (E14)
 - Step-1: 8×10^{-12} , 初イベント観測
 - Step-2: $\sim 10^{-13}$, 精密測定
 - goal: 400 events
→ $\Delta\eta/\eta \sim 2.5\%$ (LHC-Bと同等)



The E391a collaboration

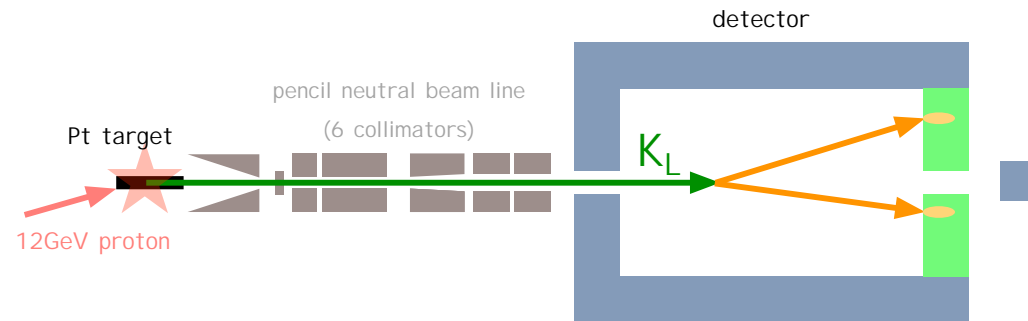
- 11 institutes, ~50 members
 - Dept. of Physics, Saga Univ.
 - Dept. of Physics, Pusan National Univ.
 - Joint Institute for Nuclear Research
 - Dept. of Physics, National Taiwan Univ.
 - Dept. of Physics, Osaka Univ.
 - High Energy Accelerator Research Organization (KEK)
 - Enrico Fermi Institute, Univ. of Chicago
 - National Defense Academy
 - Research Center for Nuclear Physics, Osaka Univ.
 - Dept. of Physics, Kyoto Univ.
 - Dept. of Physics, Yamagata Univ.



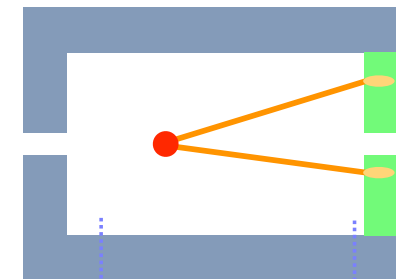
E391a の実験原理

- π^0 が崩壊してできた2つの γ と
「他には何も粒子がない」ことを要求する

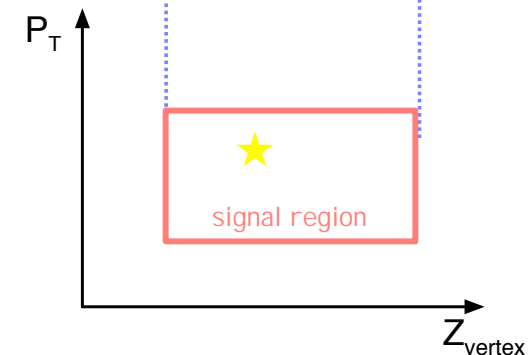
(1) γ のエネルギーと
位置を測定する



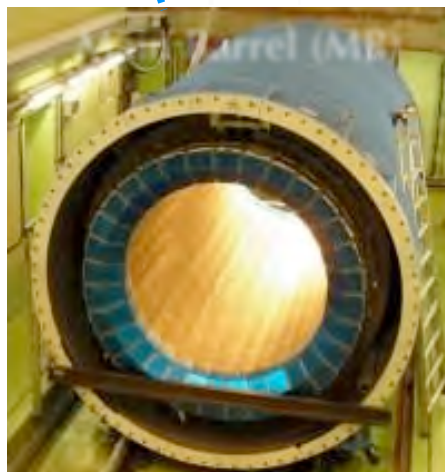
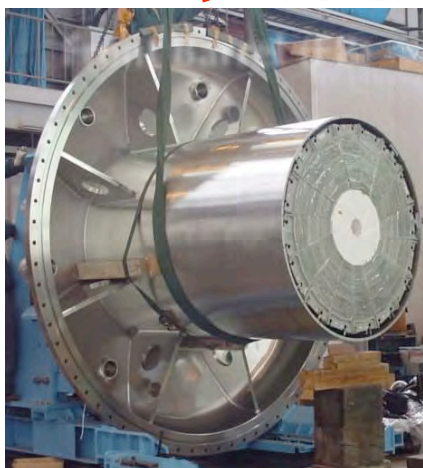
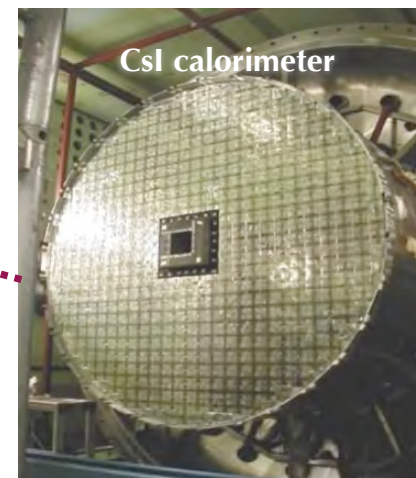
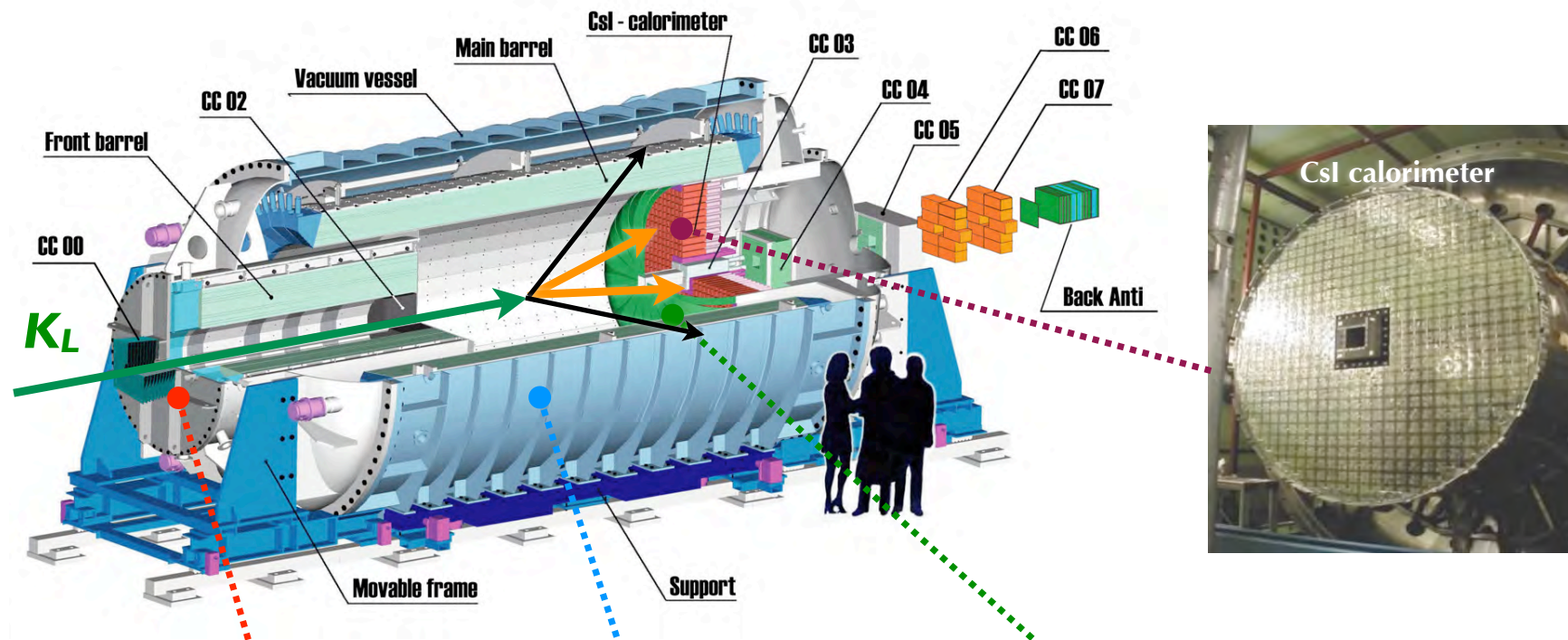
↓
(2) $M_{2\gamma} = M_{\pi^0}$ であることを仮定して
ビーム軸上の崩壊位置を計算する



↓
(3) 横方向運動量(P_T)と
崩壊位置がある領域に
入っていることを要求する

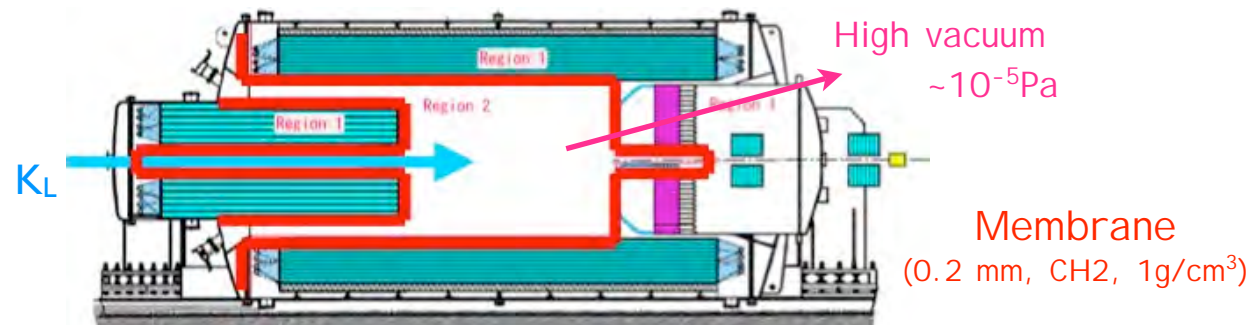
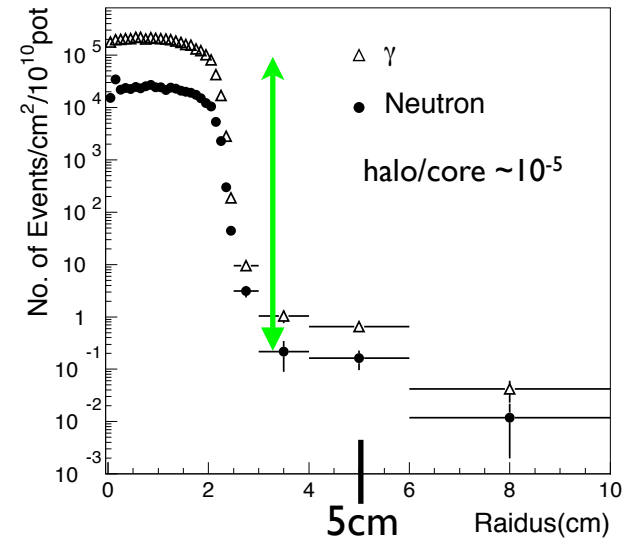


E39 Ia 検出器



E39Ia実験の特徴

- “Pencil” ビームライン
 - ビームサイズ: 2 mrad half cone
 - 直径 8cm at CsI (ターゲットから16m)
⇒ π^0 Pt の分解能を向上させる
- “Hermetic” veto system
 - $K_L \rightarrow 2\pi^0$ 等のバックグラウンドを排除
- 真空システム
 - 残留ガスとビーム粒子との反応による π^0 の生成を抑える
 - 検出器全体: 0.1 Pa
 - 崩壊領域: 10^{-5} Pa
 - これらは“membrane”によって隔てられている

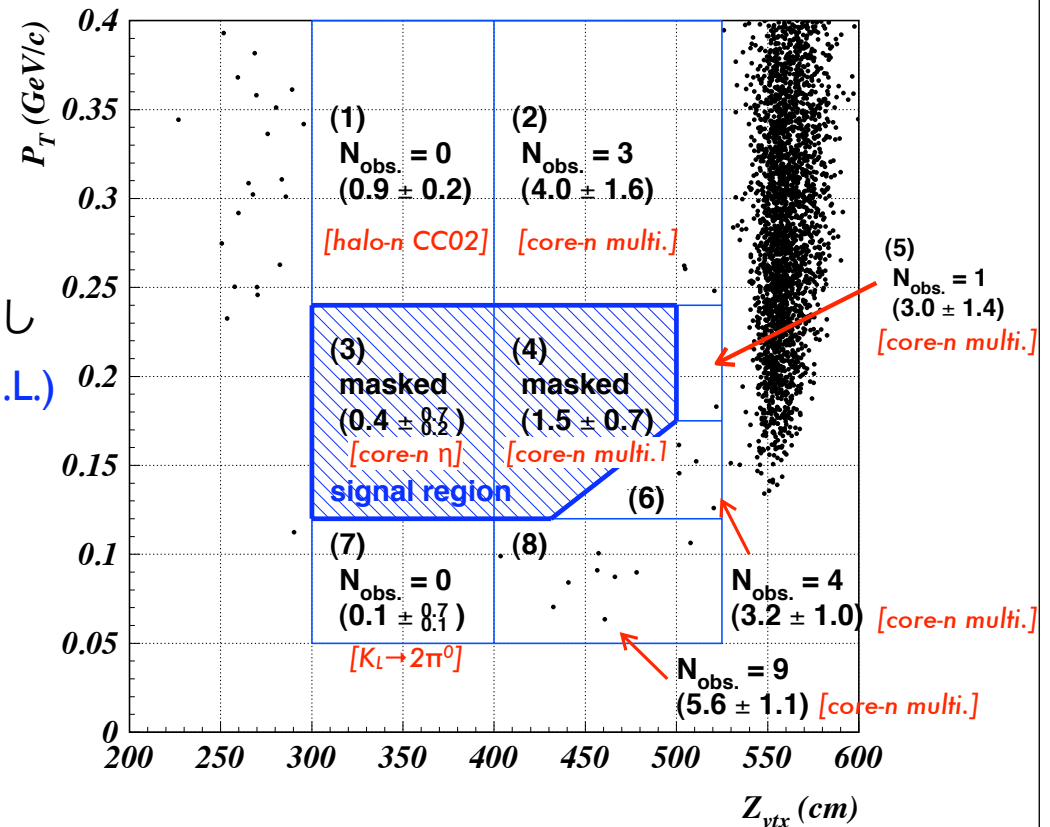


Physics Runs

- Run-I : Feb. 2004 - Jul. 2004 (坂下)
 - new result published
with 1 week(10%) data (PRD 74:051105, 2006)
- Run-II : Feb. 2005 - Apr. 2005 (隅田)
 - using full sample to check data
 - analysis of 1/3 data to study backgrounds
- Run-III : Nov. 2005 - Dec. 2005 (森井)
 - Data quality check

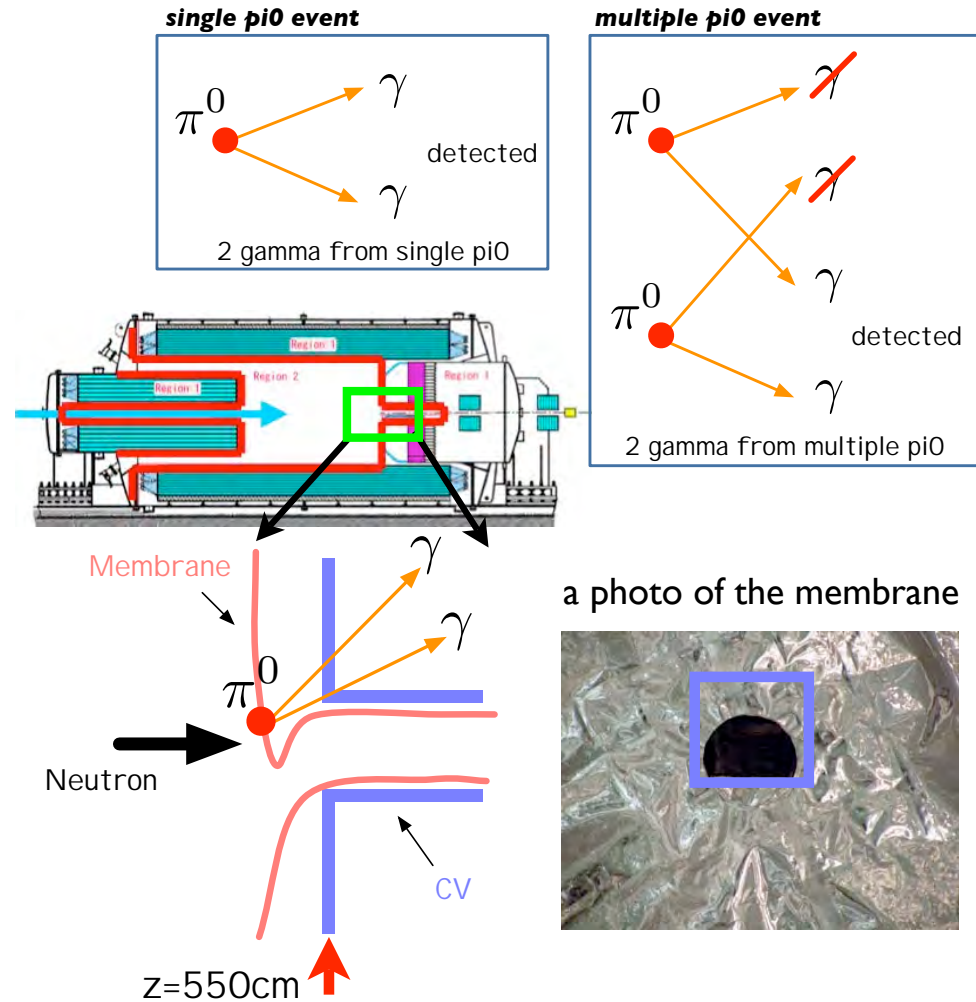
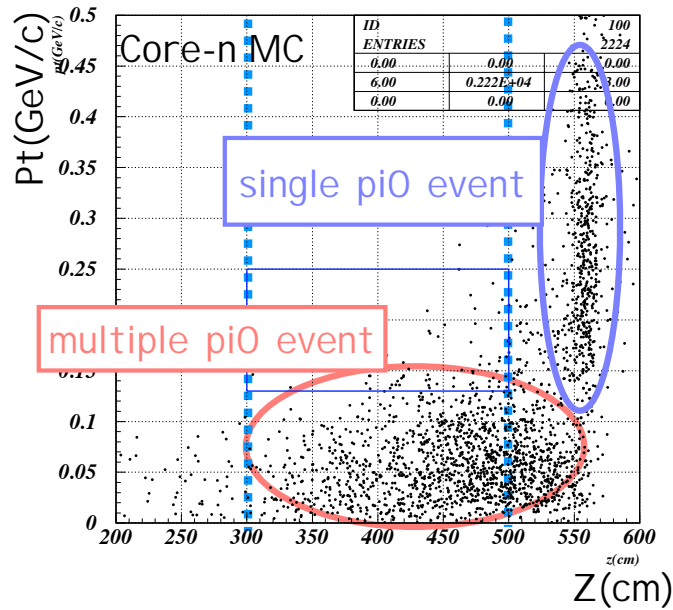
Result from Run-I 1 week

- 10% のデータを用いた
- 基本的な解析方法を確立
- バックグラウンド排除のため非常に厳しいカットが必要
 - 結果, シグナル領域にイベント無し
 - 新しい上限値 $Br < 2.1 \times 10^{-7}$ (90% C.L.) を得た
- published in PRD 74:051105, 2006



Problem in Run1

- Three background sources
 - **single π^0 event**
 - **multiple π^0 event**
 - **eta event**



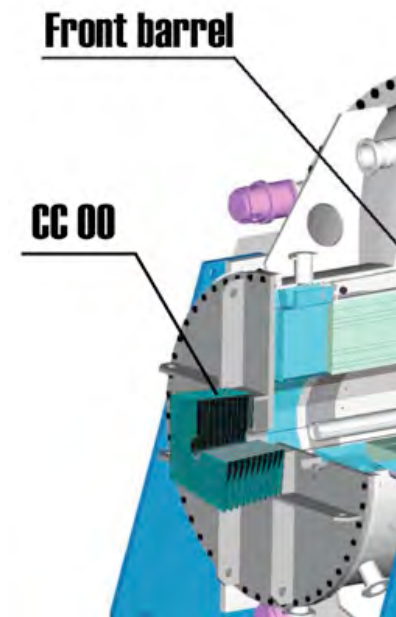
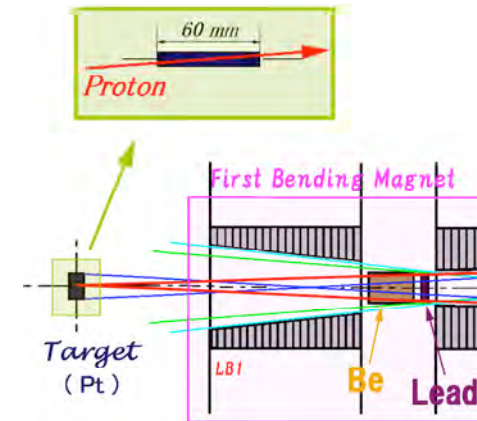
RunII における改善

- membrane を早速直した
- core neutron に対するカットを緩和
⇒シグナルアクセプタンス: 約3倍改善



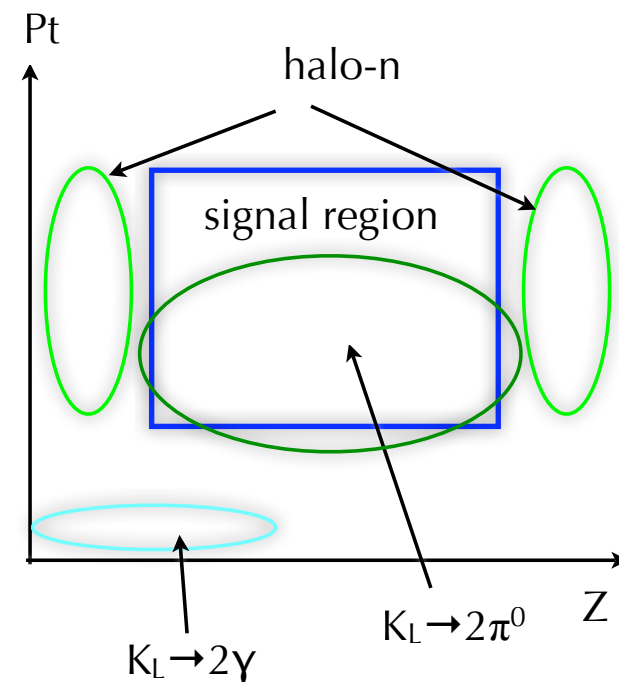
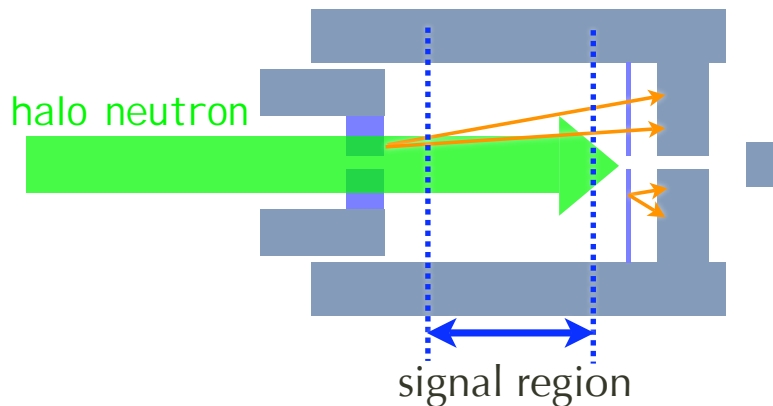
RunII における改善(cont'd)

- **Be absorber**
 - number of KL : 0.57
 - Trigger rate: 600Hz→250Hz
 - DAQ live ratio: 0.72→0.89
 - accidental loss in photon veto
 - except BA: 0.52 / 0.42
 - 0.94 / 0.85 : BA
 - **結果: sensitivity はRun-Iと同条件でも変わらない**
 - **中性子バックグラウンドは軽減される**
 - interaction length for KL, $n: \lambda(K) / \lambda(n) = 1.7$
- その他
 - ビームカウンターの追加(CC00)
 - ビーム中の荷電粒子検出器
 - Multihit TDC
 - データ転送
 - エレクトロニクス
 - etc.



バックグラウンド

- Run-II における主なもの
 - $K_L \rightarrow 2\pi^0 \rightarrow 4\gamma$ ($Br \sim 10^{-3}$) 崩壊において 2γ を失ったもの
 - ビーム周りの中性子(Halo Neutrons) によるもの

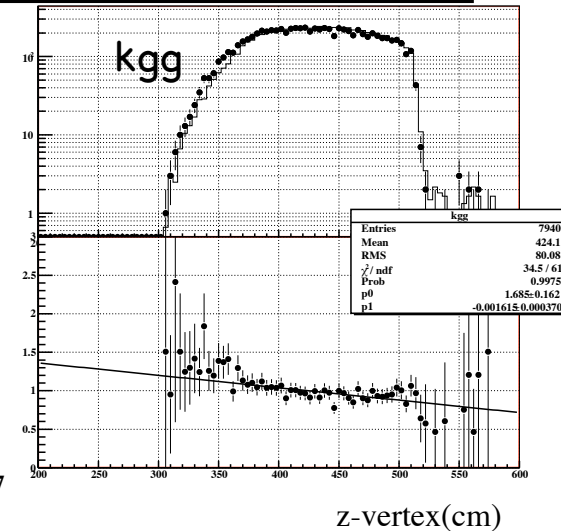
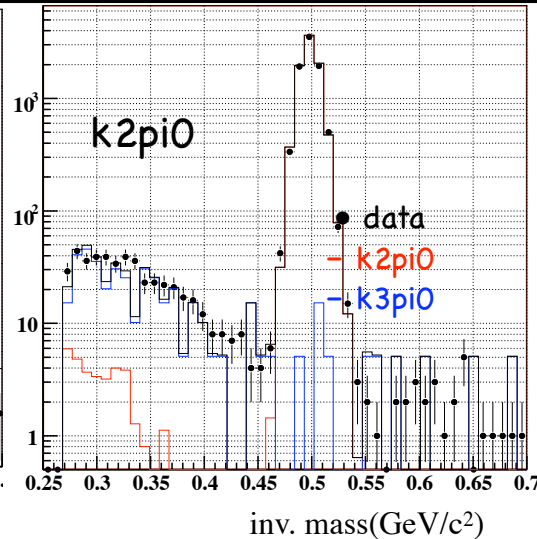
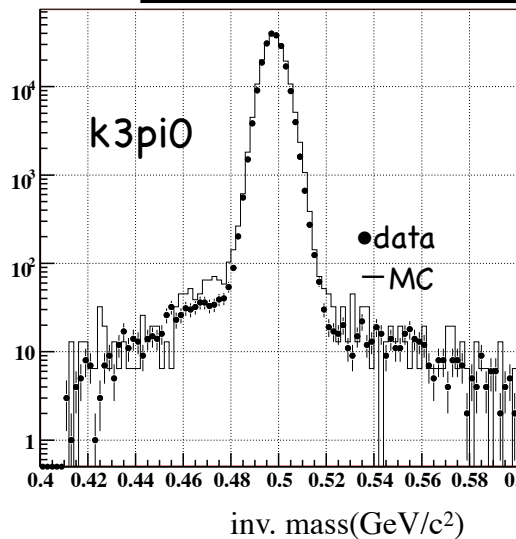


K_L の再構成

- Full Data を用いて K_L の数を測定する
 - K_L → 3π⁰, K_L → 2π⁰ : 0.47 < m < 0.53 (GeV/c²)
 - K_L → 2γ : Pt2 < 0.001, acop. angle < 10 deg.

~10%で一致

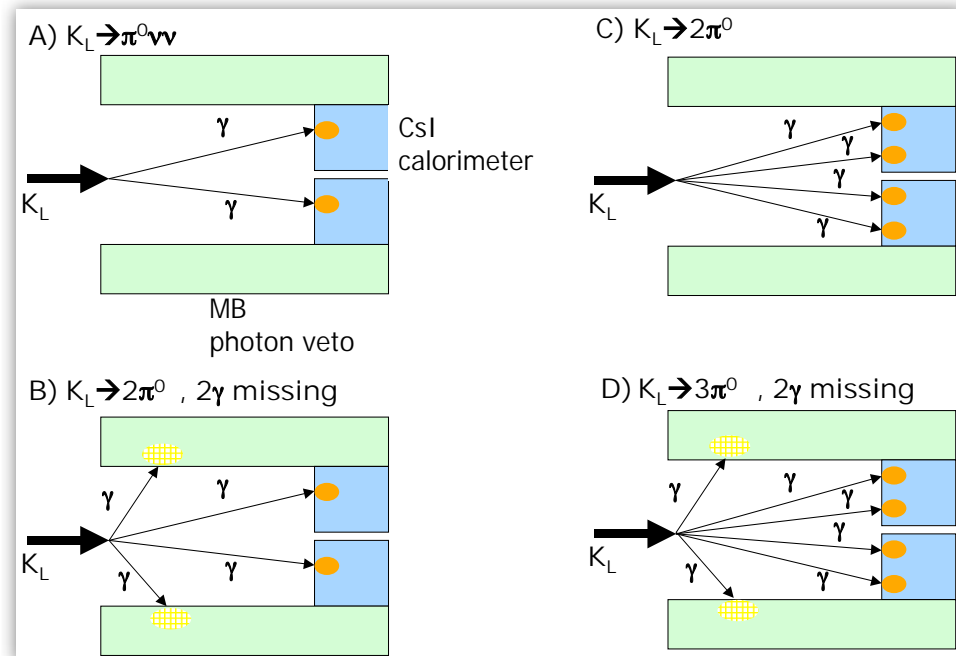
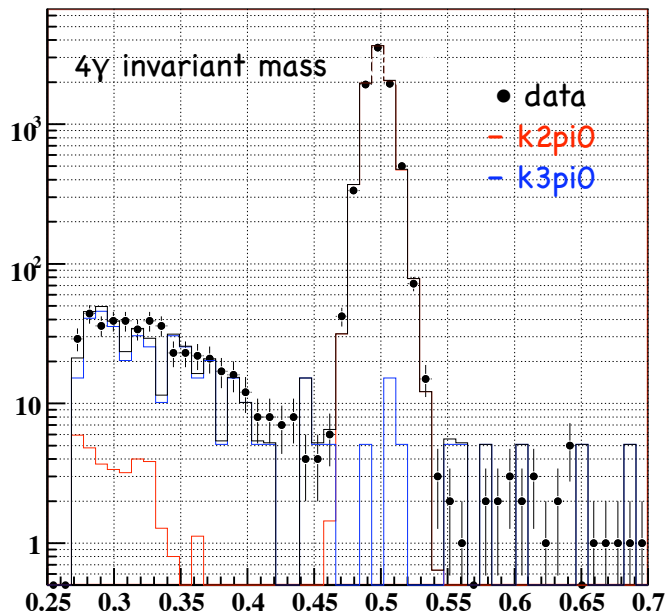
	# of rec. with data	acceptance	branching fraction	# of KL decay
K _L → 3π ⁰	307165	4.32×10 ⁻⁴	0.1956	(4.45±0.03)×10 ⁹
K _L → 2π ⁰	8378.0	2.24×10 ⁻³	8.69×10 ⁻⁴	(5.21±0.07)×10 ⁹
K _L → 2γ	7503	2.25×10 ⁻⁴	5.48×10 ⁻⁴	(5.17±0.08)×10 ⁹



4 γ イベントによる veto 検出器の評価

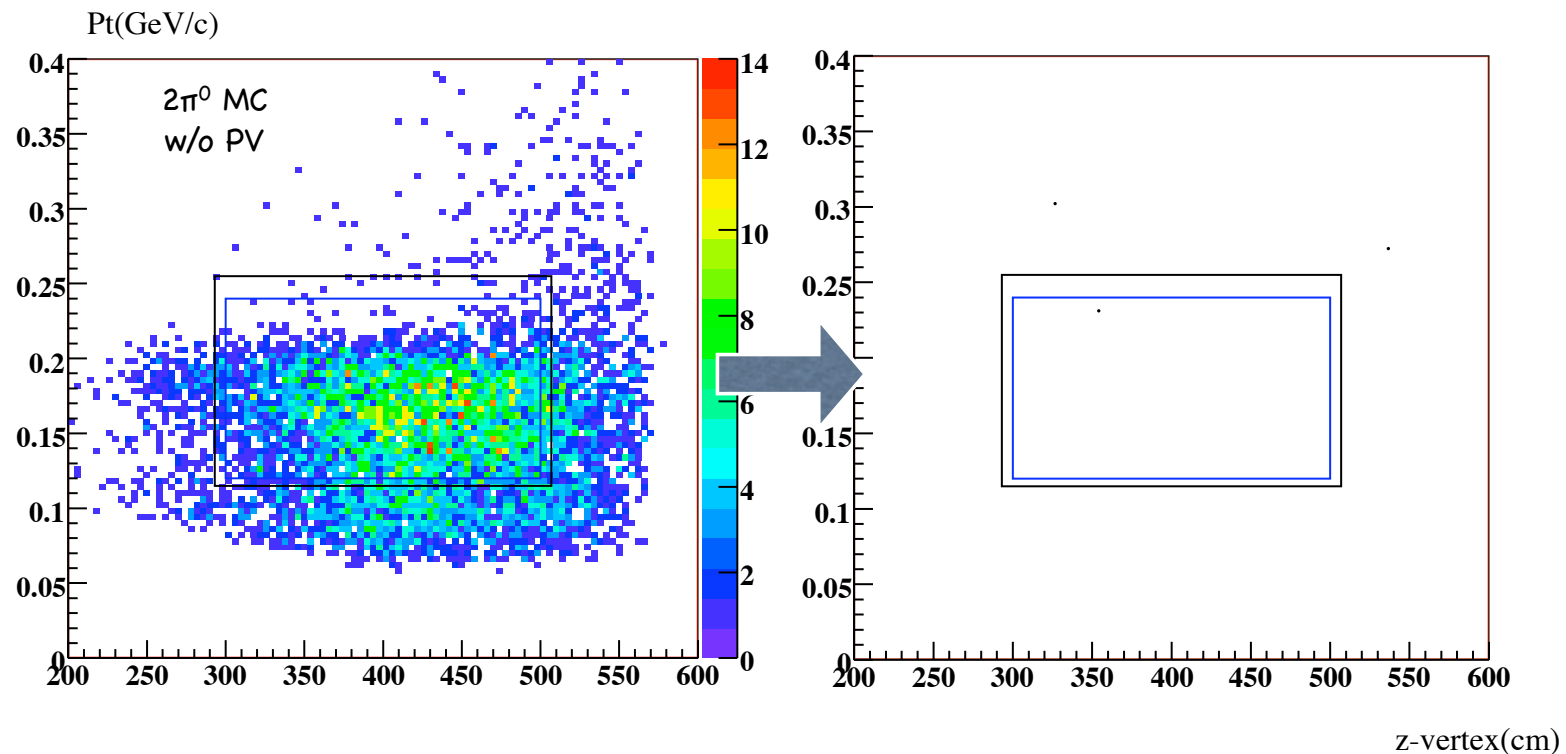
- 4 γ の invariant mass を再構成
- $2\pi^0$ のピーク
- $3\pi^0$ のバックグラウンド

⇒ γ inefficiency を正しく再現できている



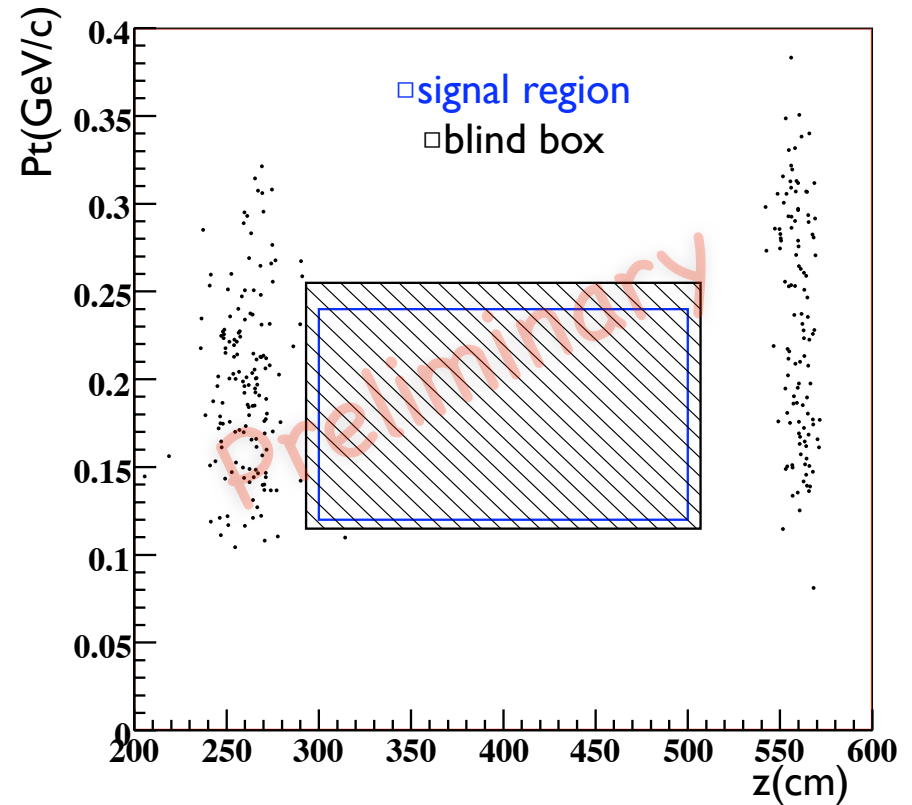
$K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0$ Background

- MC での見積り
 - 統計量: Run-II 1/3 データの36 倍
 - 結果: <0.03 events



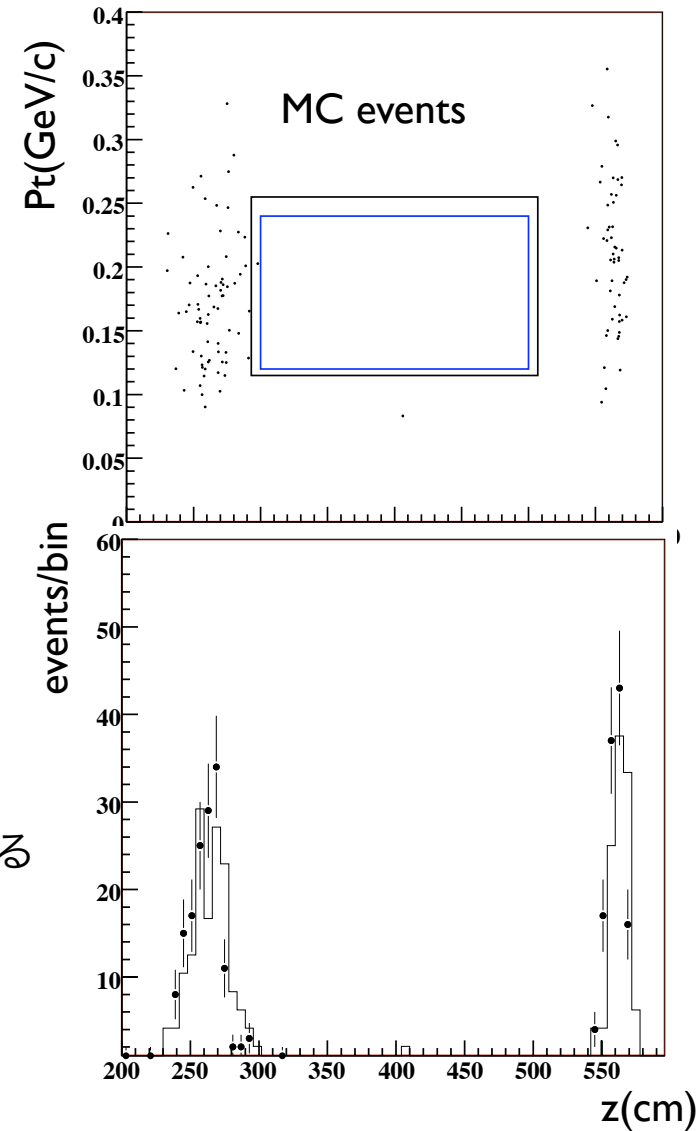
Final Plot

- “blind” analysis
- Halo neutron バックグラウンド
 - 上流: CC02 (~270cm)
 - 下流: CV (~560cm)
- 300-500 cm の領域はクリア



Halon neutron BG

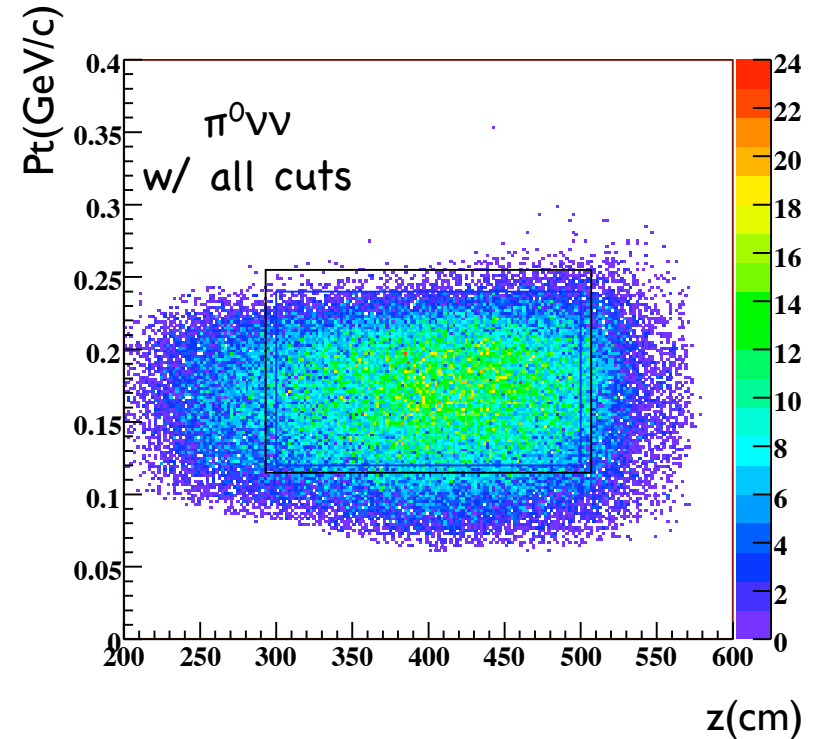
- ビームラインシミュレーションを行い、collimator で生成された Halo neutron を用いる
- MCサンプルの統計
 - Run-II 1/3 data の 1/1.76
- BG events
 - “CC02” events ~ 270
 - 148 ± 18 (data: 149)
 - “CV” event ~ 560
 - 112 ± 15 (data: 119)
- Background estimation
 - data による event の広がりからシグナル領域への contamination を見積る
 - $N_{BG} \sim 0.5$
 - signal box を右へずらして S/N の最大を取る (10%程度の acceptance loss)



Single Event Sensitivity

- Signal acceptance estimation
 - $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ signal MC で行う
 - $A = 1.64 \times 10^{-2}$
- Number of K_L
 - $N_{K_L} = 5.21 \times 10^9$
- Expected Single Event Sensitivity
w/ full data in Run-II
 - $SES = 1 / (1.64 \times 10^{-2} * 5.28 \times 10^9)$
 $= 1.17 \times 10^{-8}$

Run-I 1week の結果から
約1桁感度を改善できた



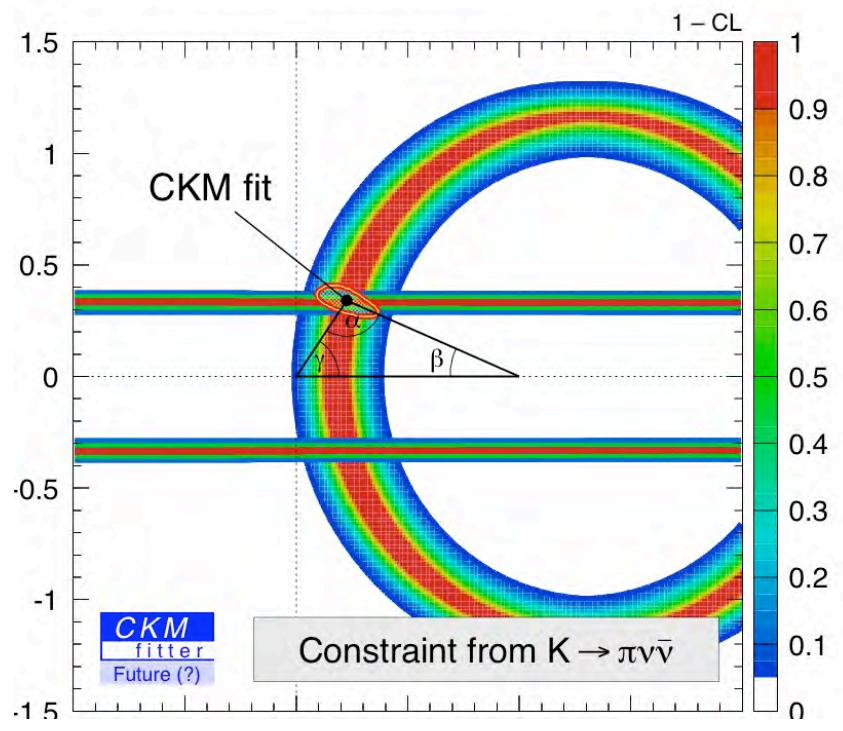
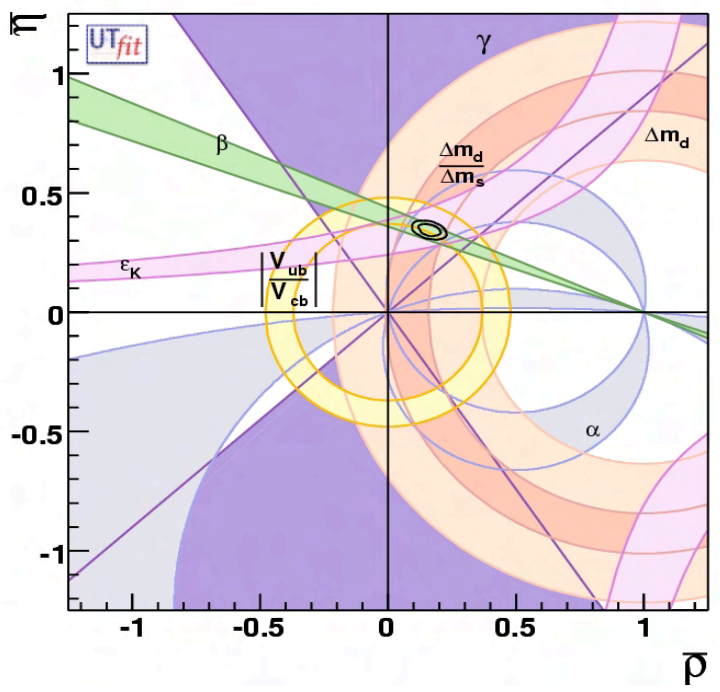
まとめ

- $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 探索実験
 - η の直接測定
 - SMの検証のため重要
 - New Physics に感度がある
- KEK-PS E391a
 - 世界初の $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 探索専用実験
 - 3回の物理ランを行った
 - Run-I: 1week(10%) data の解析が完了 → published
 - Run-II:
 - 成功裡に実験が終了
 - 1/3 dataによる preliminary result
 - $K_L \rightarrow 2\pi^0$ background BG を抑えた
 - Halo neutron BG について理解が進んだ
 - $SES = 1.17 \times 10^{-8}$
- 今後
 - Halo neutron BG についての study
 - シグナルBOX の optimization
 - 他の K_L BG についてチェック
 - Run-III data の解析

最終的な感度: $< 5 \times 10^{-9}$ を目指す

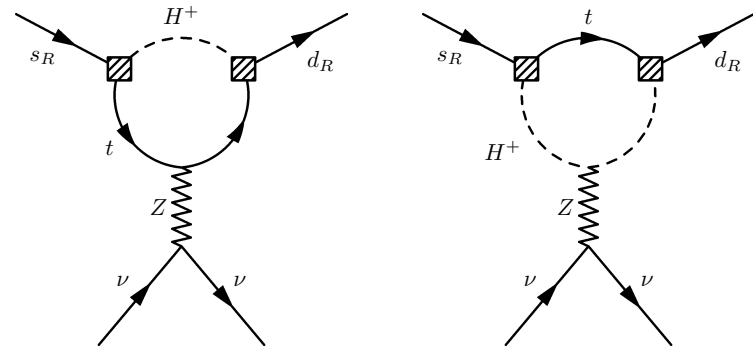
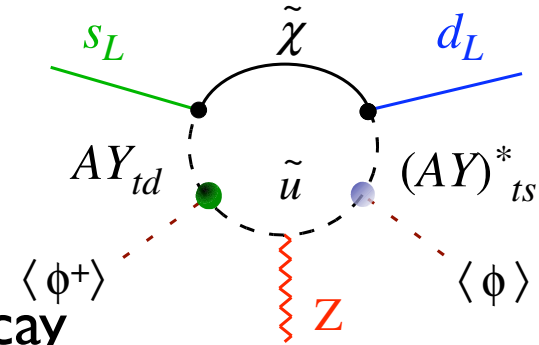
Backup slides

CKM fit



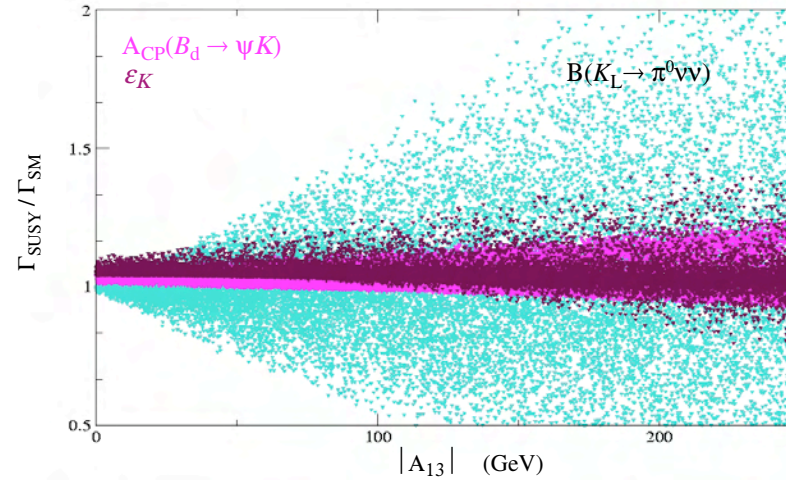
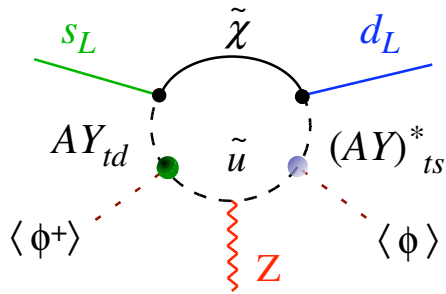
$K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ beyond the SM

- ex.1) Minimal Flavor Violation
 - non-trivial Yukawa coupling
 - up-squark in the loop
- ex.2) Charged Higgs mediated decay
 - flavor symmetry breaking at TeV scale

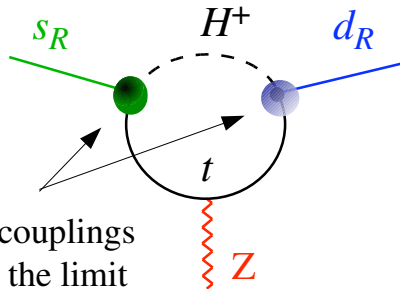


このような New Physics による反応が
崩壊幅を増やす可能性がある

New Physics



E.g.: RR Higgs-mediated Z penguins at large $\tan\beta$



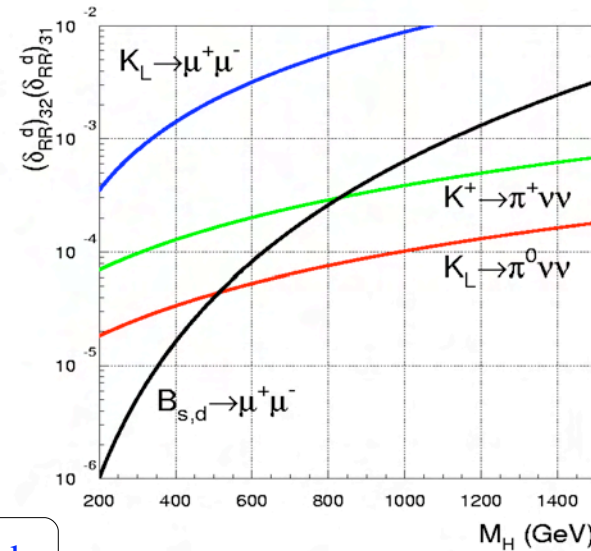
Effective one-loop couplings
(non decoupling in the limit
of large SUSY masses)

$$\sim y_b (\delta_{RR})_{3i} \epsilon_{\text{loop}} (\tan\beta)^2$$

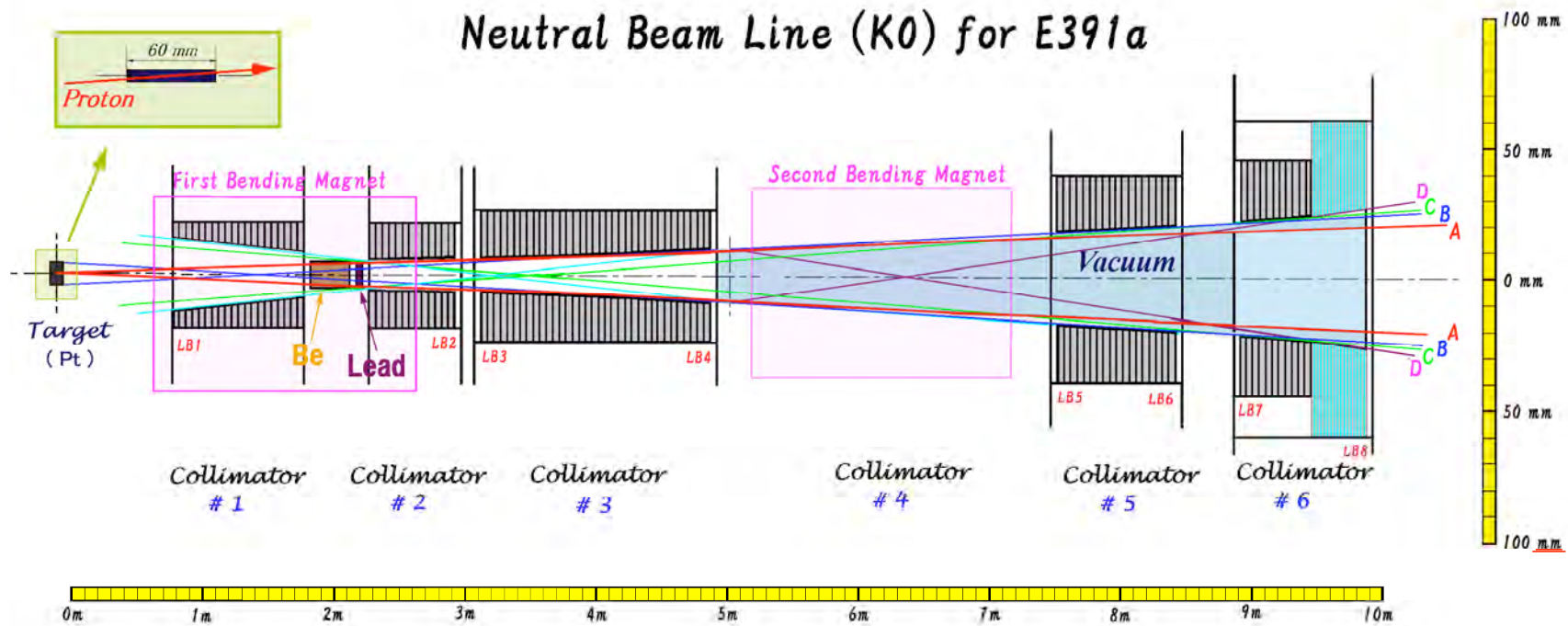


$(\tan\beta)^4$ – contribution to the decay amplitude

Paradisi & G.I. '06

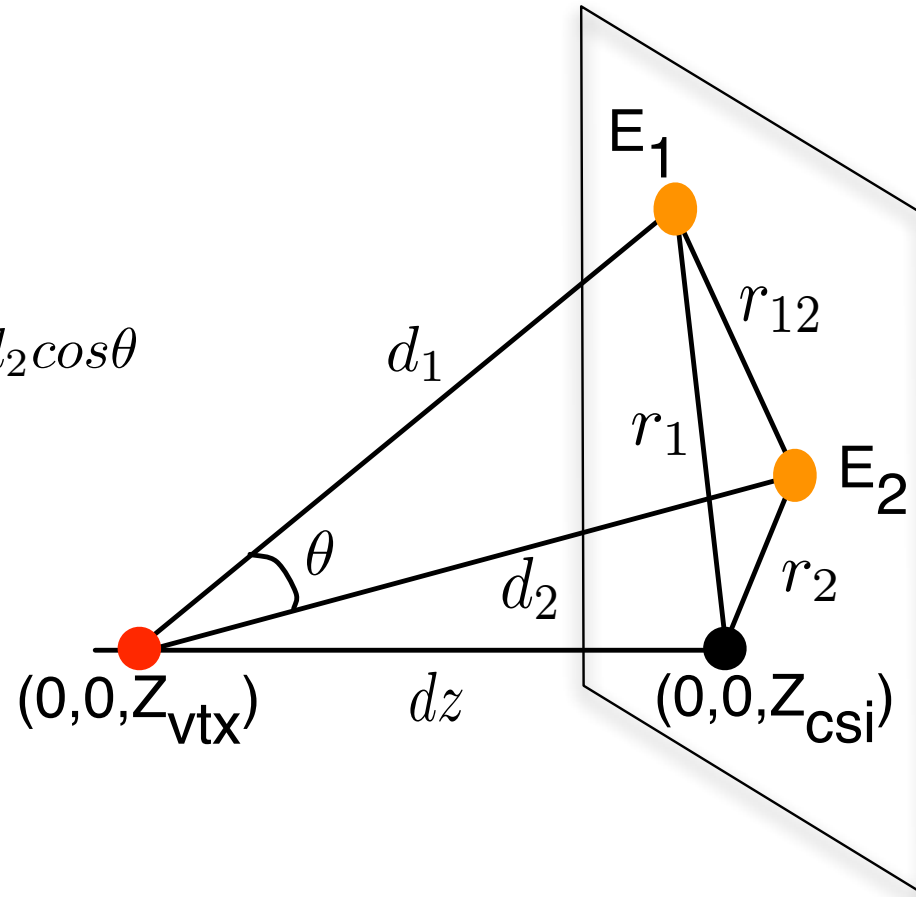


E391a beamline



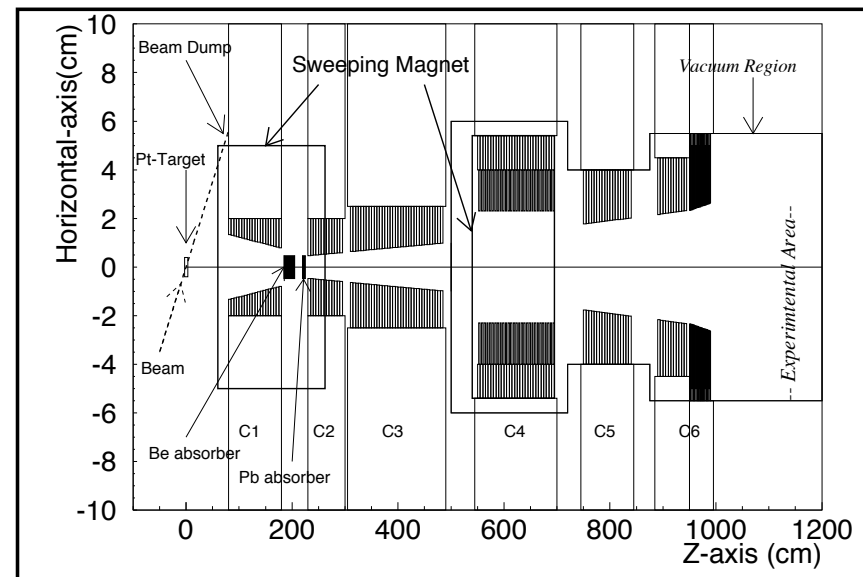
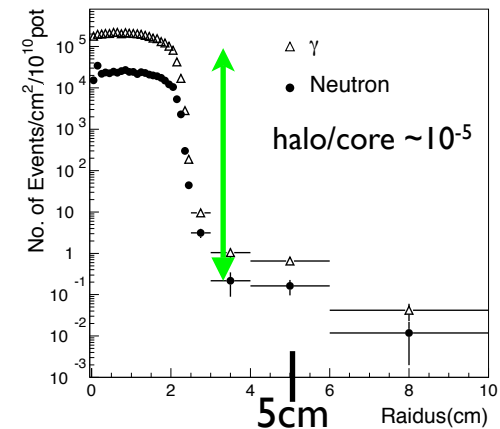
π^0 reconstruction

$$\begin{aligned} \cos\theta &= 1 - \frac{M_{\pi^0}^2}{2E_1 E_2} \\ r_{12}^2 &= d_1^2 + d_2^2 - 2d_1 d_2 \cos\theta \\ d_1 &= \sqrt{r_1^2 + (dz)^2} \\ d_2 &= \sqrt{r_2^2 + (dz)^2} \\ dz &\equiv Z_{csi} - Z_{vtx} \end{aligned}$$



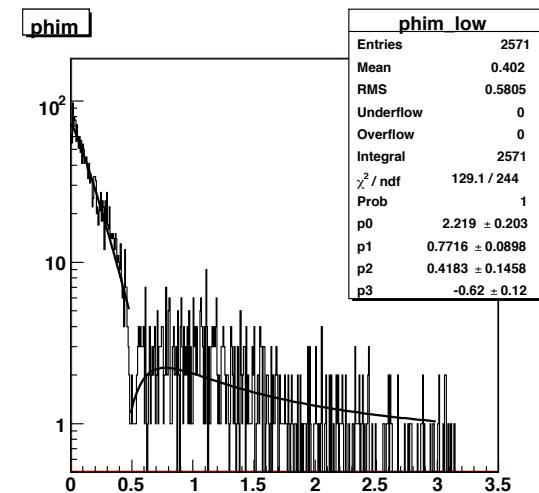
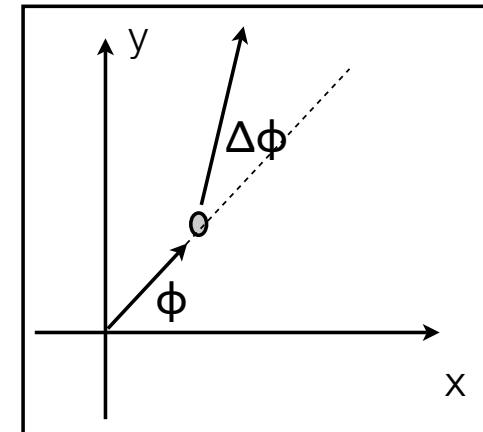
Halo neutron MC

- Method
 - target simulation
 - 12GeV proton on target
 - beamline simulation
 - inject particles from target into collimator
 - collect neutrons which hit the detector
 - detector simulation
 - inject halo neutrons

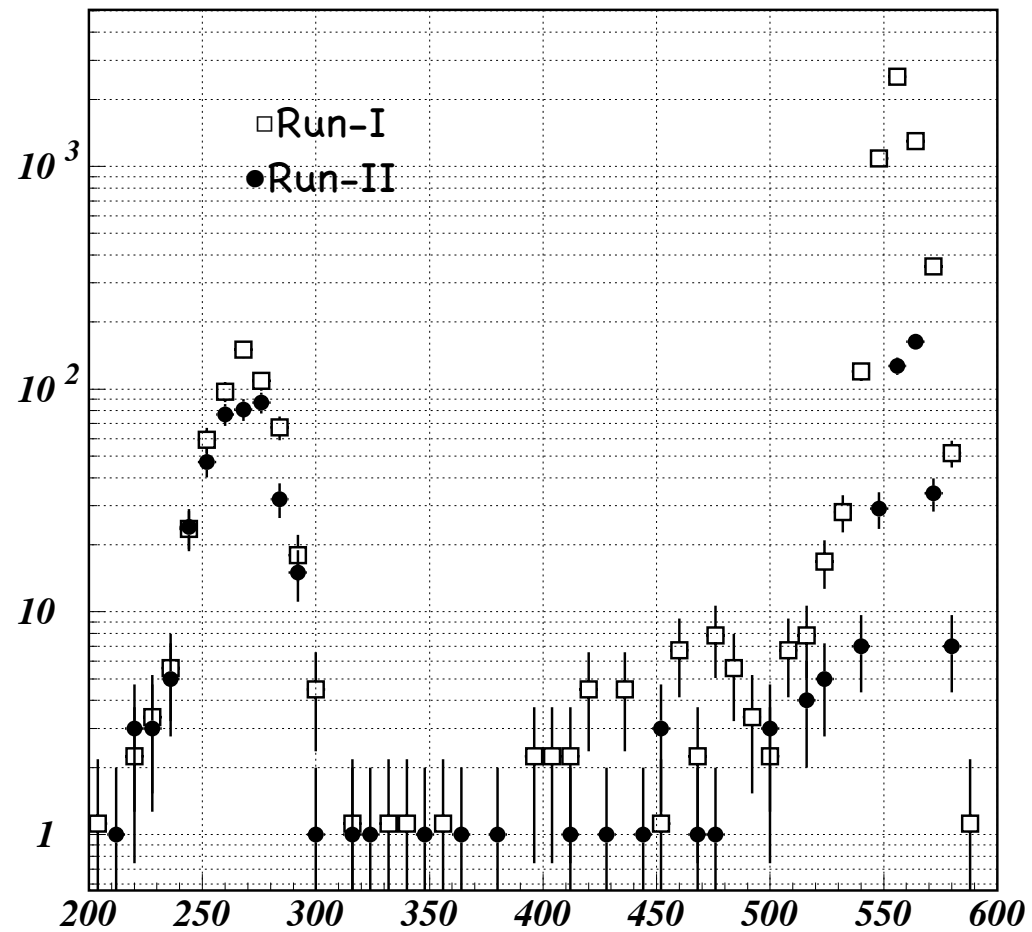


Halo neutron MC(2)

- Halo neutron generation
 - parameters
 - $\rho, R, \theta, \Phi R, \Delta\Phi$
- use halon seed from the beamline simulation
 - w/ different random seed
 - uniform Φ distribution
 - add small fluctuation
 - ρ : 2%, r : 1%, θ : 1%, $\Delta\Phi$: 0.1%

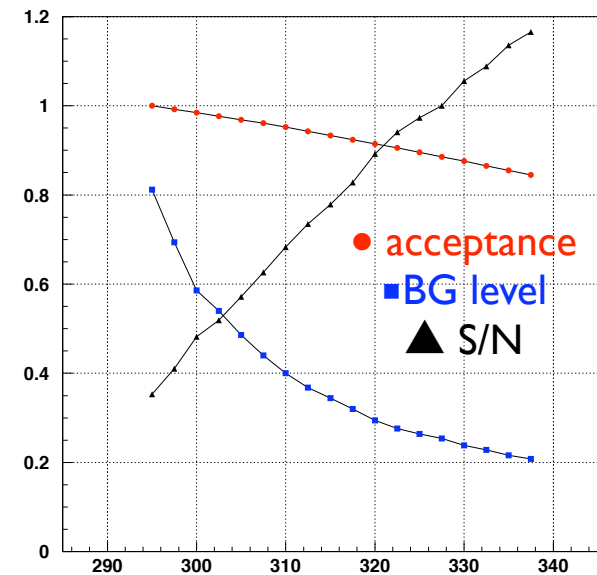
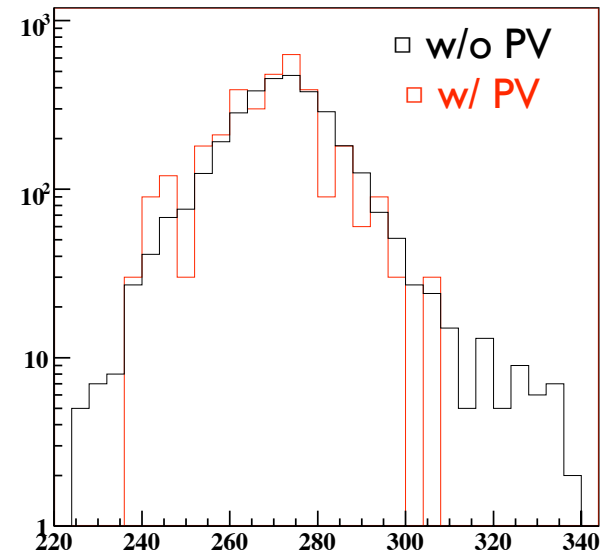
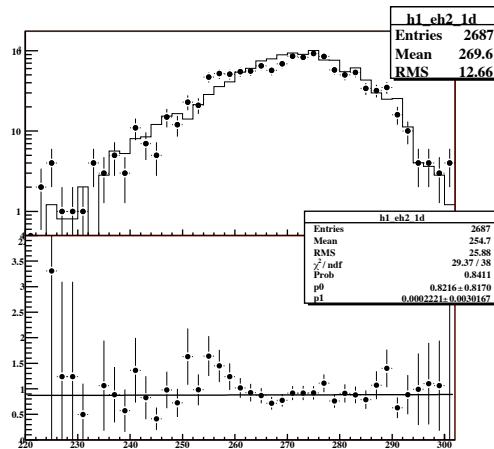


Run I, II の直接比較



BG estimation

- CC02
 - taking ratio: $\#(w/) / \#(w/o)$
 - multiply the ratio to the number of the events in the box
- S/N doesn't make peak



photon veto Cuts

- FB: 1.0MeV
- CC02: 2.4MeV
- MB: inner 1.0, outer 0.5 MeV
- Outer CV 0.3MeV
- Inner CV 0.7MeV
- Csl single crystal
- 2.0 MeV for $d > 17\text{cm}$
- 20MeV for $d < 17\text{cm}$
- Sandwich 2.0MeV
- CC03 6.0MeV
- CC04 sci 0.7MeV
- CC04 cal 1.0MeV
- CC05 sci 0.7MeV
- CC05 cal 3.0MeV
- BA (sci 20MeV)
- && (qtz 0.5MIPs)
- BCV 0.5MeV
- CC06 10MeV
- CC07 10MeV
- BHCV 0.1MeV
- CC00 2.0 MeV

gamma, pi0 Cuts

- gamma $E_1 > 250\text{MeV}$, $E_2 > 150\text{MeV}$
- cluster size ≥ 3
- crystal size ≥ 5
- Energy ratio > 0.88
- TDI < 3.0
- RMS < 5.2 , RMS-sum < 9.5
- Energy balance < 0.75
- gamma distance $> 15\text{cm}$
- gamma position $> 15\text{cm}$
- fusion NN > 0.7
- $\Delta\theta = > -20$

Gamma selection cuts

- Energy cuts
- Shape cuts

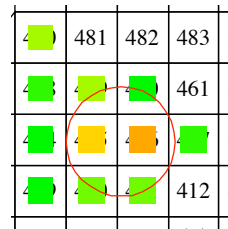
$$Balance = \frac{E_{\gamma_1} - E_{\gamma_2}}{E_{\gamma_1} + E_{\gamma_2}}$$

$$TDI = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N (T_i - T_m)^2}$$

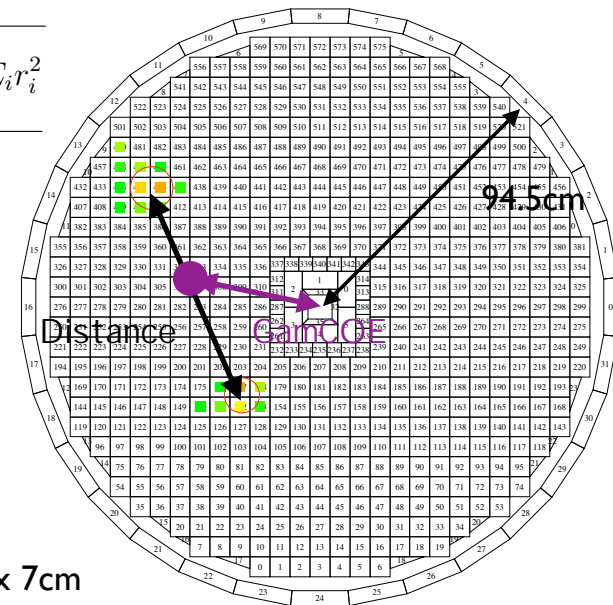
$$Erat = \frac{E_1 + E_2 + E_3}{E_{tot}}$$

$$T_m = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n T_i}$$

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n E_i r_i^2}{E_{tot}}}$$

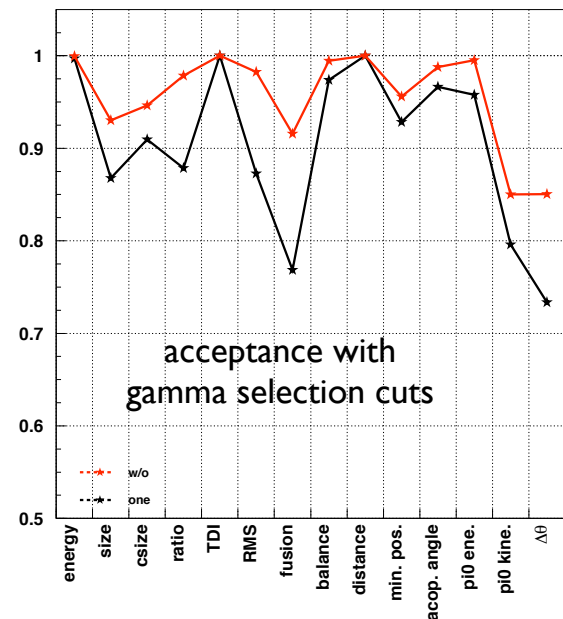
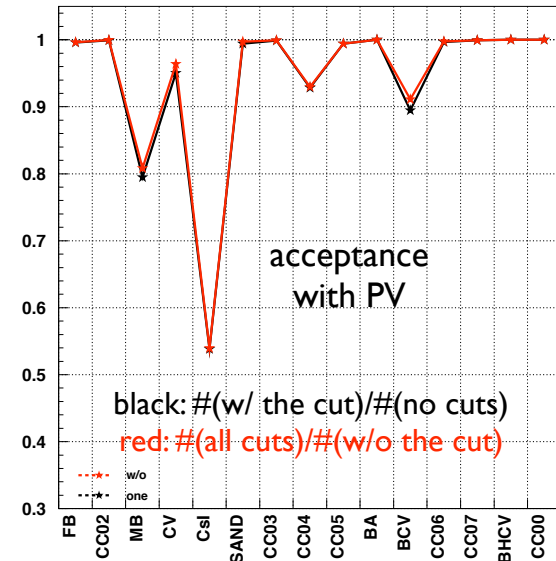


7cm x 7cm



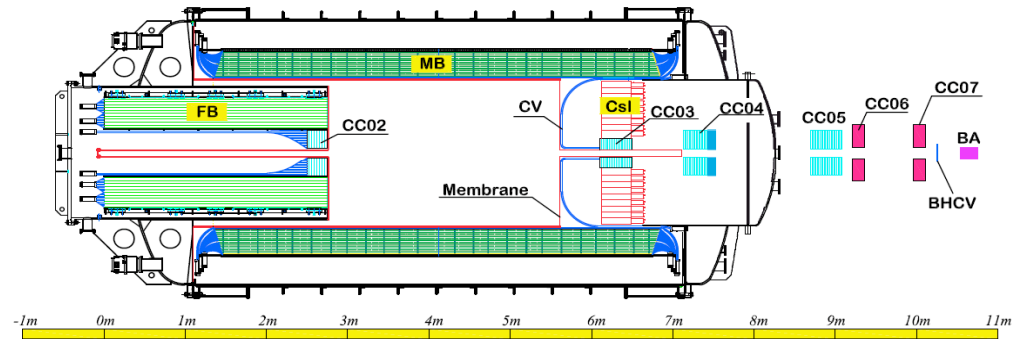
Acceptance

- Signal acceptance for $KL \rightarrow \pi^0 \nu \nu$
 - calculated with MC
 - decaying at the fiducial
 - acceptance: 1.93 %
- Accidental loss
 - estimated with data taken with a trigger by Target Monitor
 - total accidental loss: 15.5% (.845 acceptance)
- Total acceptance
 - $A = 1.93 \times 0.845$
= 1.64 %

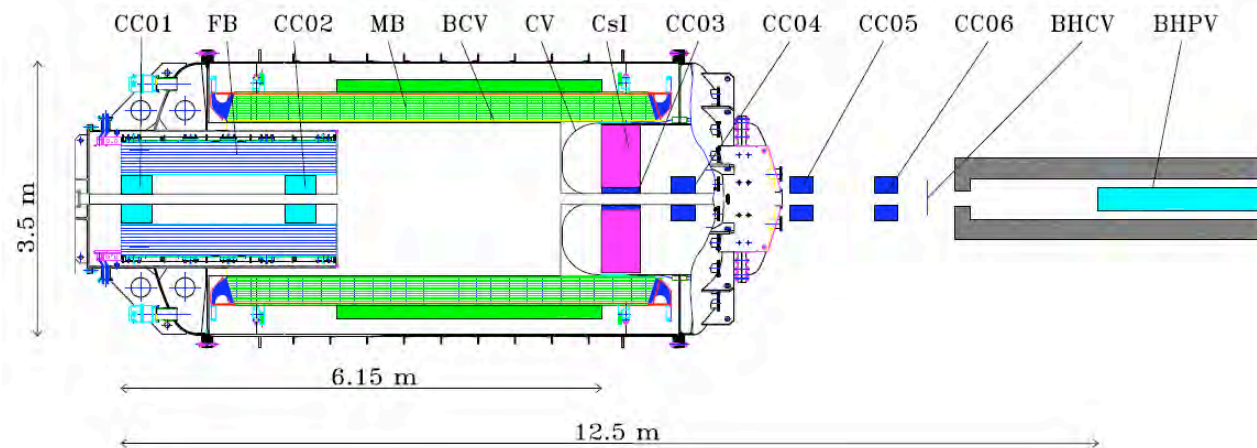


Detector Upgrade

- E391a



- E14



Detector Upgrade(cont'd)

- CsI
 - 7cm → 2.5cm , 5cm(KTeV実験)
 - エネルギー分解能の向上
 - 2つの γ が近くでhitしたときにそれを一つだと思ってしまう現象(fusion)を排除できる
- 読み出し回路エレクトロニクスの開発
 - 125MHz FADC w/ 7 pole Bessel filter
- 検出器開発
 - **ビームホール光子検出器**
 - **ビームホール荷電粒子検出器**
 - **”カラー”中性子検出器の開発**
 - CsI結晶 の性能テスト
 - 荷電粒子 veto 用 straw chamber の開発

