

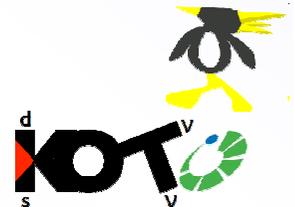
K⁰TO実験に於ける 中性子不感型光子veto検出器の開発

京大理, KEK^A



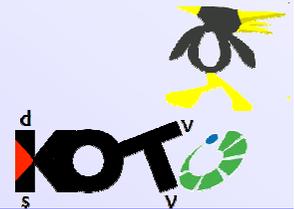
前田 陽祐, 笹尾 登, 野村 正^A, 南條 創,
森井 秀樹, 塩見 公志, 河崎 直樹, 増田 孝彦,
内藤 大地, 高橋 剛

for the K⁰TO collaboration



Contents

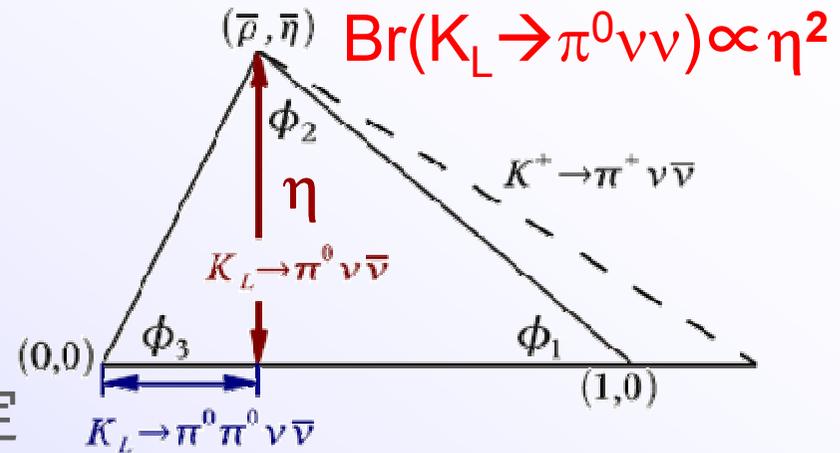
- K⁰TO実験とBeam Hole Photon Vetoの概要
- 2分割モジュールの性能評価
 - e⁺ビームを用いた試験
 - 発光量
 - 入射位置依存性
- AIDA実験で使用されていたエアロジェルの再利用可能性の検討
 - e⁺ビームによる発光量測定
 - 実機に組み込んだ際の性能の見積もり
- まとめと展望



K⁰TO実験

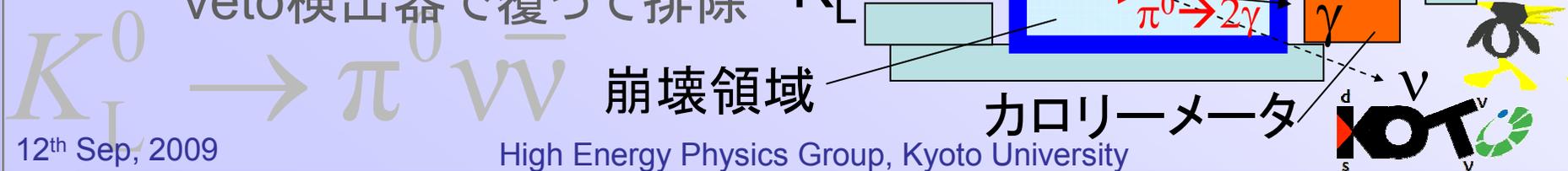
- K_L → π⁰νν̄探索 @J-PARC

- 小林・益川理論に於けるCP対称性を破れを表す複素パラメータηを直接測定
- 理論的不定性が小さく, 標準理論の精密な検証が可能
- 標準理論による分岐比の予言値 : 2.49 × 10⁻¹¹



- hermitic veto system

- 「π⁰ → 2γ以外何も検出されない」
- 余剰粒子を崩壊領域を veto検出器で覆って排除

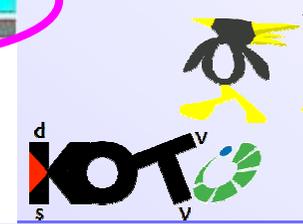
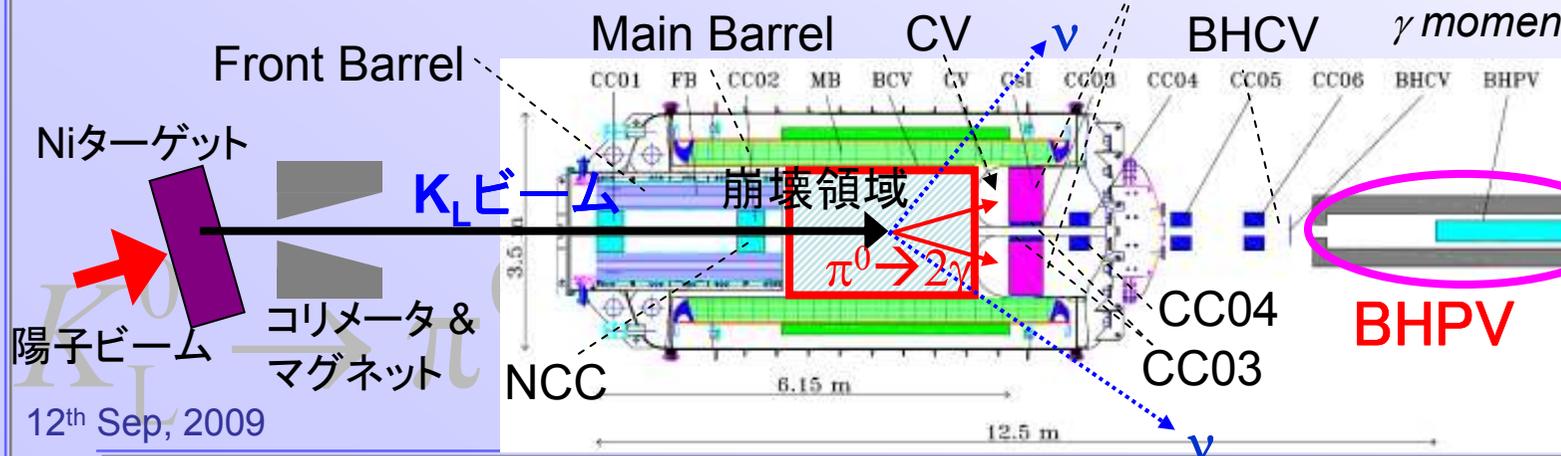
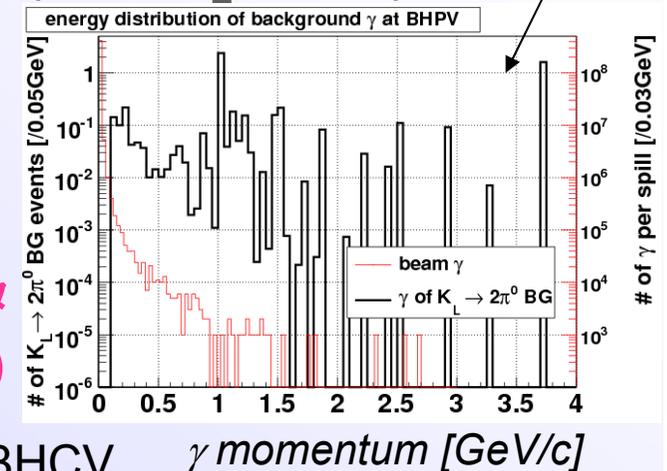


Beam Hole Photon Veto (BHPV)

- ビームホール γ veto検出器

- ビームホールに逃げた余剰な γ を検出(特に $K_L \rightarrow 2\pi^0$)
- ビーム中に置かれる
大量の中性子と光子($\sim 0.5\text{GHz}$)中で
動作しなければならない
 - 高い光子検出能力 **CsIカロリメータ**
 - ビーム粒子に対する不感性** (2γ を検出)

vetoすべき $K_L \rightarrow 2\pi^0$ 由来
の γ の運動量分布(黒)
ビーム γ の運動量分布(赤)

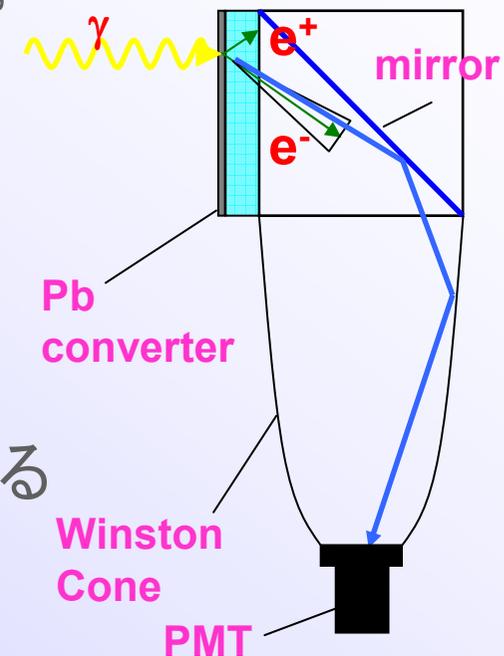


12th Sep, 2009

Design Concept

- エアロジェルを用いたCerenkov閾値型検出器

- 鉛コンバータで γ を e^+/e^- シャワーに変換し、エアロジェルによるCerenkov発光を検出
- 発光閾値のため、中性子反応による低速のハドロンに対して不感
- 25モジュールをビームラインに沿って並べ、連続した3モジュールでのコインシデンスを要求を γ の検出条件とする
 - シャワーの形状で中性子を区別 (中性子反応は等方的に広がる)
 - 低エネルギーの γ を検出しない

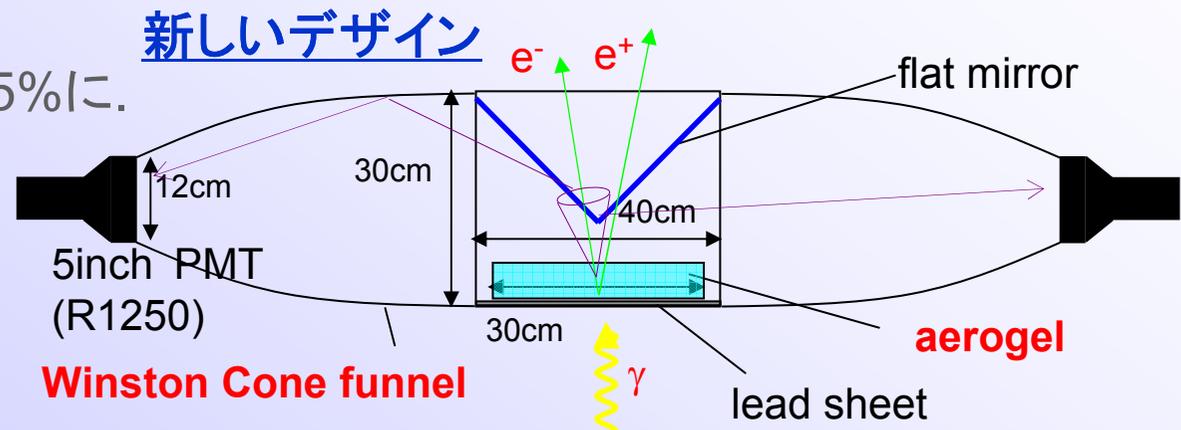


モジュールデザインの改良

- K⁰TO実験のBHPVとしては高いビーム粒子のフラックス中での動作が求められる. 更に改良が必要.
 - 2分割読み出しによりPMT1本当たりのカウンティングレートを削減.

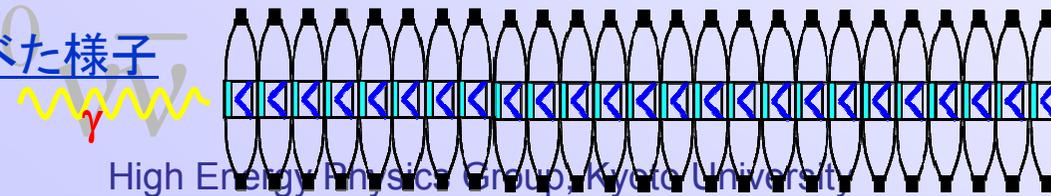
- 片読みに比べ65%に.
- 集光率が向上.

- エアロジェルや鉛コンバータの厚みを最適化



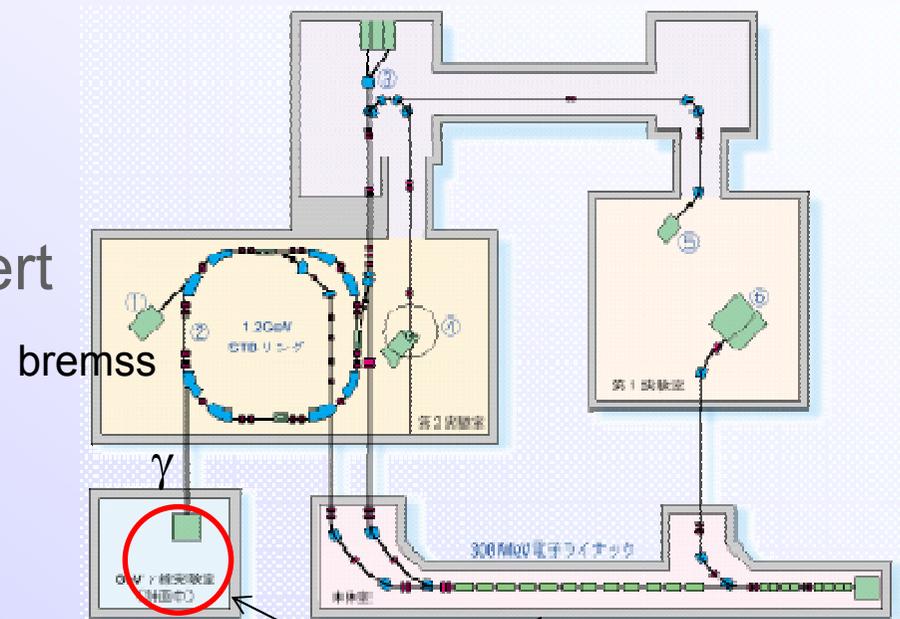
→ 検出効率を保ちながらも、より高いビーム粒子のフラックス中での動作可能.

25モジュールを並べた様子



東北大 核理研でのe⁺ビームテスト

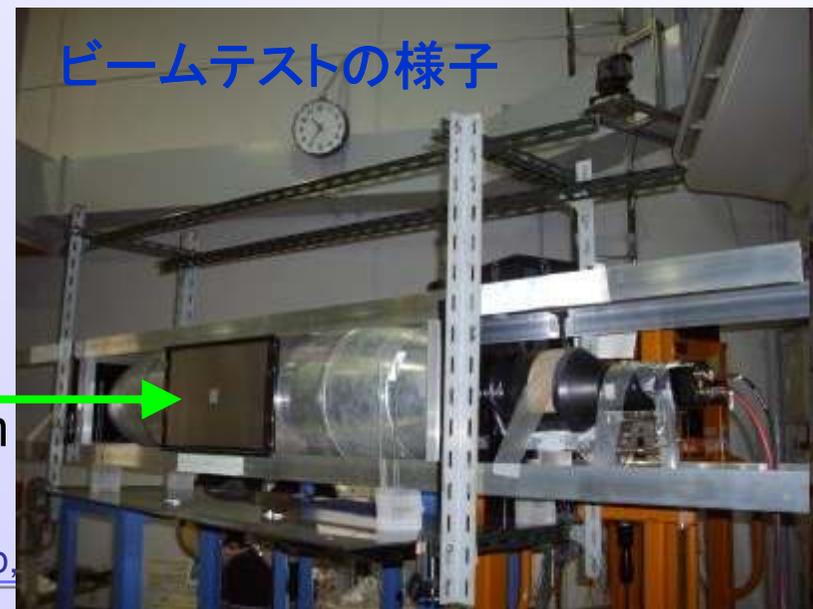
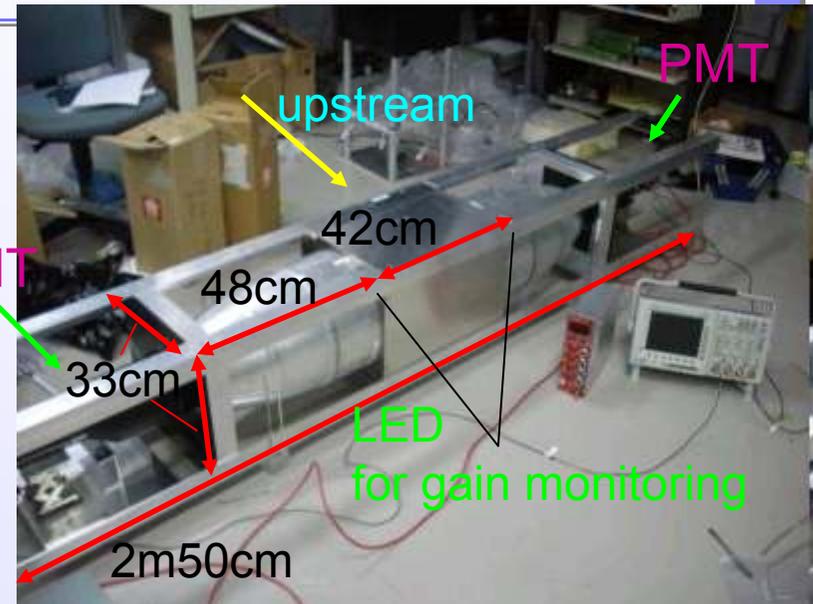
- 東北大学 原子核理学研究施設のe⁺ビームを用いた性能評価を行った.
- 実験の概要
 - 1次電子ビーム
 - bremsstrahlung → convert
 - で得られる3次ビーム
 - 600MeV/cのe⁺ビーム
 - 1cm角のトリガー
- 実験内容
 - 2分割プロトタイプの性能評価
 - AIDA実験で用いられていたエアロジェルの発光量の測定



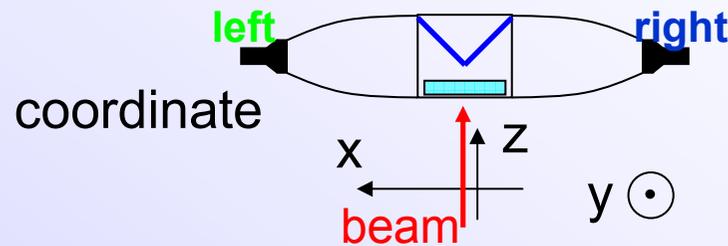
測定室
1次電子ビーム
(γ を鉛でe⁺/e⁻に変換し,
磁石で運動量を選択)

試作機の製作

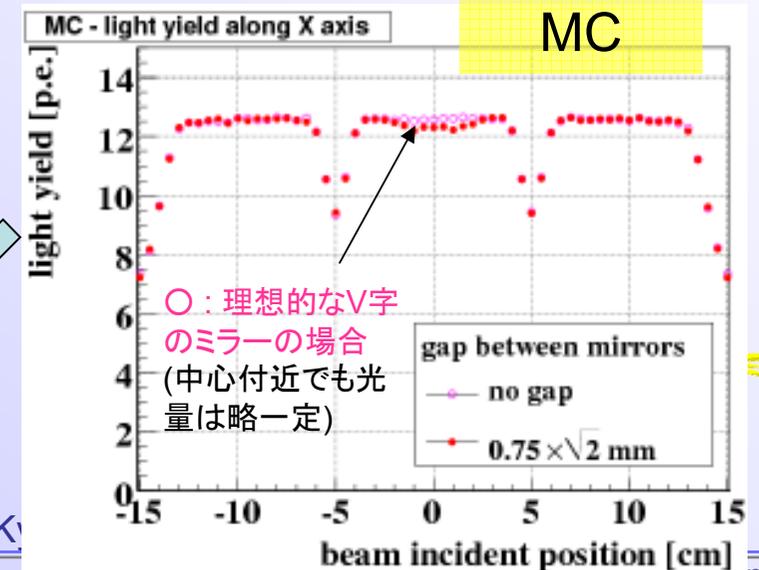
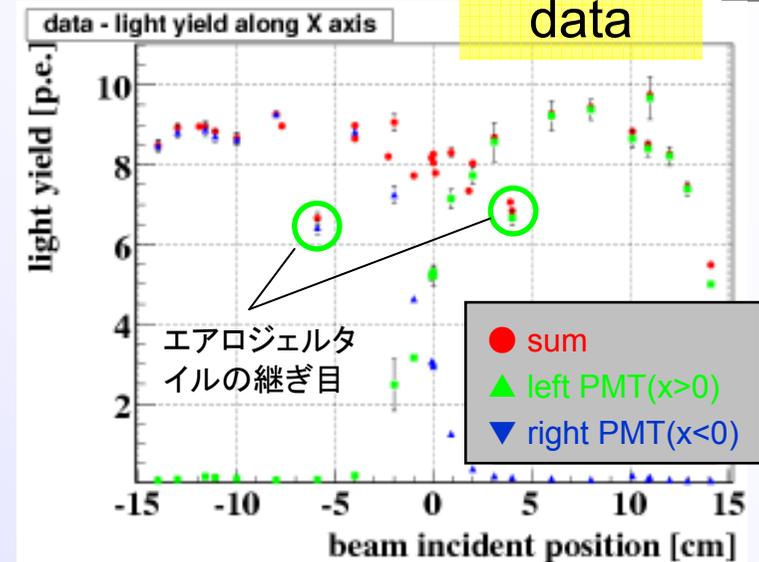
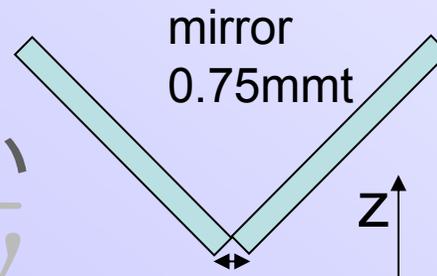
- 実機サイズの試作機を製作
- モジュールを動かしながら発光量の位置依存性を測定
- エアロジェルは松下のYI30 (n=1.03)を使用。
 - 1tile : 10cm x 10cm x 1.1cm (5枚重ね, 30cm角に敷き詰め)
 - 分割なしモジュールでの発光量 : 9.9 p.e.(後述)
- MC : 2005年の π^+ を用いた
ビームテストの結果を再現するように調整



結果 - X scan



- 広い範囲での光量の一様性を確認出来た.
- $x \sim \pm 5\text{cm}$ での光量の減少
→ タイルの継ぎ目によるロス
- 中心付近での光量減少
→ ミラーの継ぎ目によるロス
- 絶対光量は MC に比べ少ない

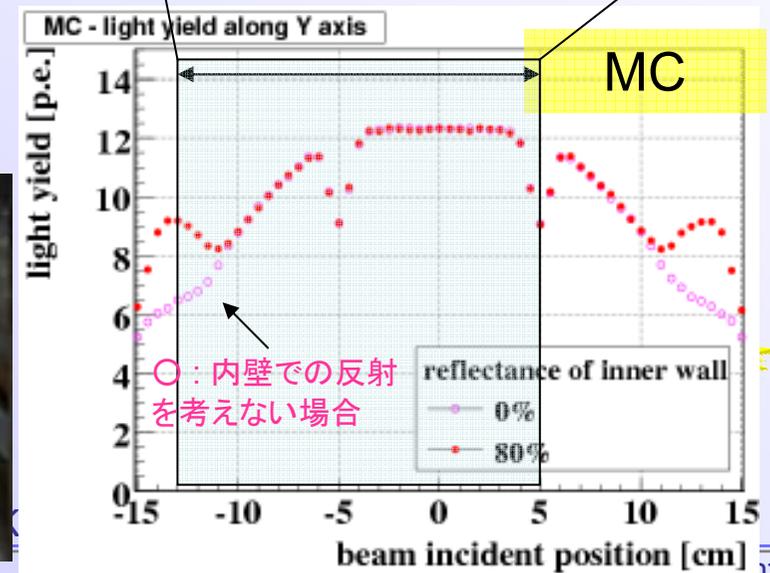
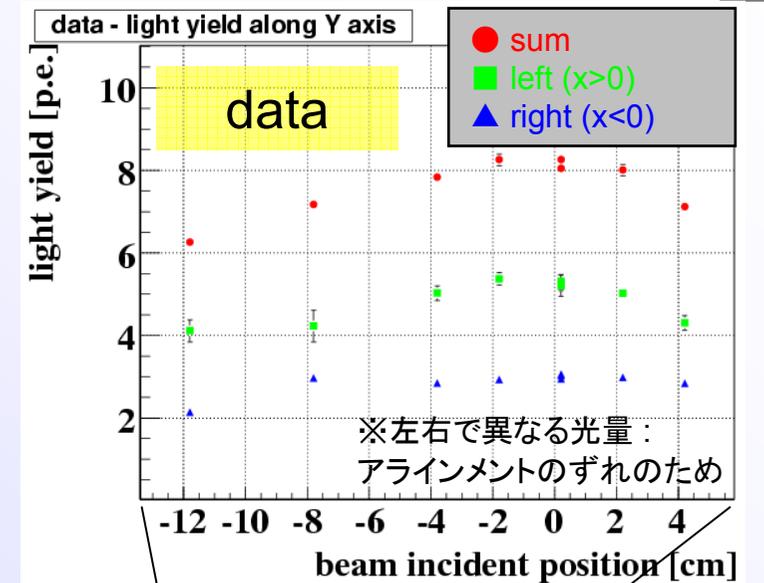


$K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$

結果 - Y scan

- セットアップの都合上,主に $y < 0$ の領域を測定
- 光量減少が小さい
→ optical box内壁での反射で集光がよくなっている
- 絶対光量はやはりMCに比べ小さい

optical box内壁の様子→

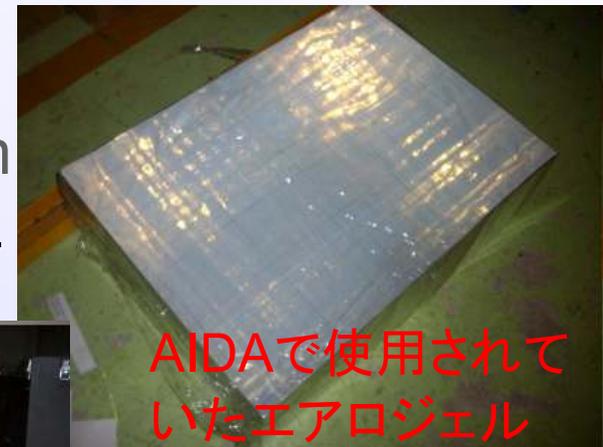


$K_L^0 \rightarrow \pi^0 \gamma$

12th Sep, 2009

エアロジェル再利用可能性の検討

- エアロジェルとしてKEK-PS E248 AIDA実験で用いられたものが利用可能：K⁰TOで使えないか？
 - n=1.03
 - タイルサイズ：~15cm角 x 厚み~3cm
- 以前にビームテストが行われ性能評価がよく行われている分割なしモジュールを使用



平面ミラー



$K_L^0 \rightarrow \pi^0 \gamma \gamma$

12th Sep, 2009 High Energy Physics

発光量測定の結果

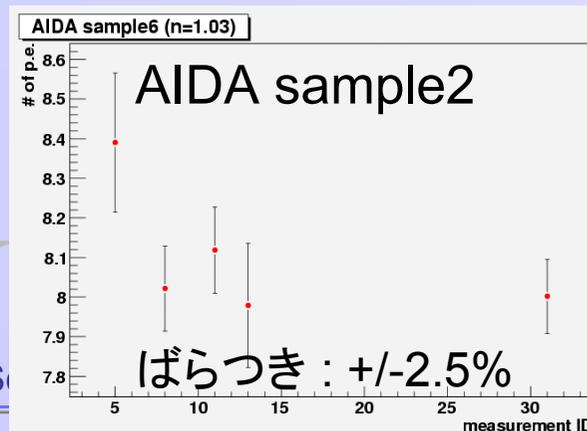
- 2サンプルについて発光量を測定
 - 写真のように3cm厚のタイル2枚を重ね、エアロジェルを中心にビームが当たるように配置



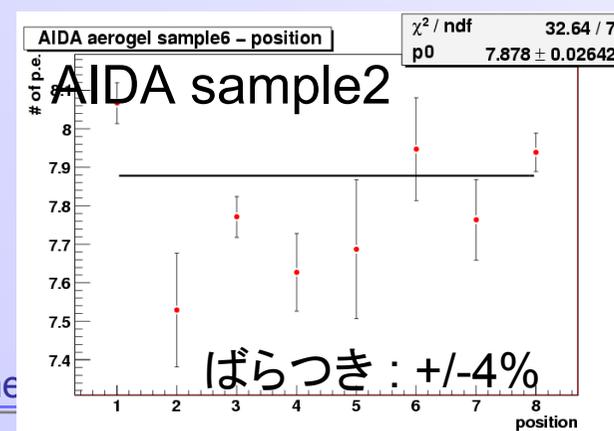
測定結果

AIDA sample1	6.0cm	7.73 +/- 0.07
AIDA sample2	6.0cm	8.39 +/- 0.18
松下 YI30	5.5cm	9.92 +/- 0.11

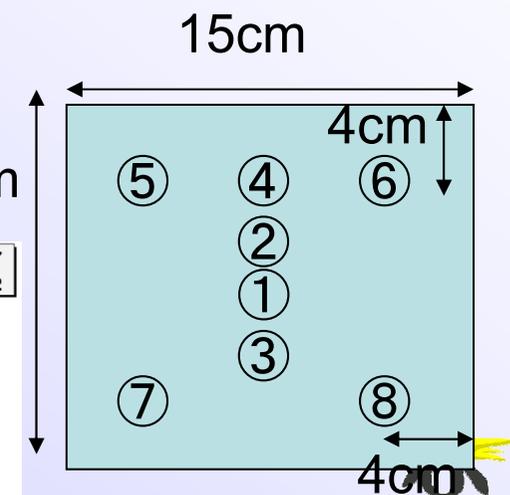
再現性の確認



場所依存性



15cm



光量に対する考察

- 松下YI30 の測定結果はMCの予想に比べ小さい。
→エアロジェルの厚み(=タイルを重ねる枚数)を変えて測定を行い,結果を厚みの関数として

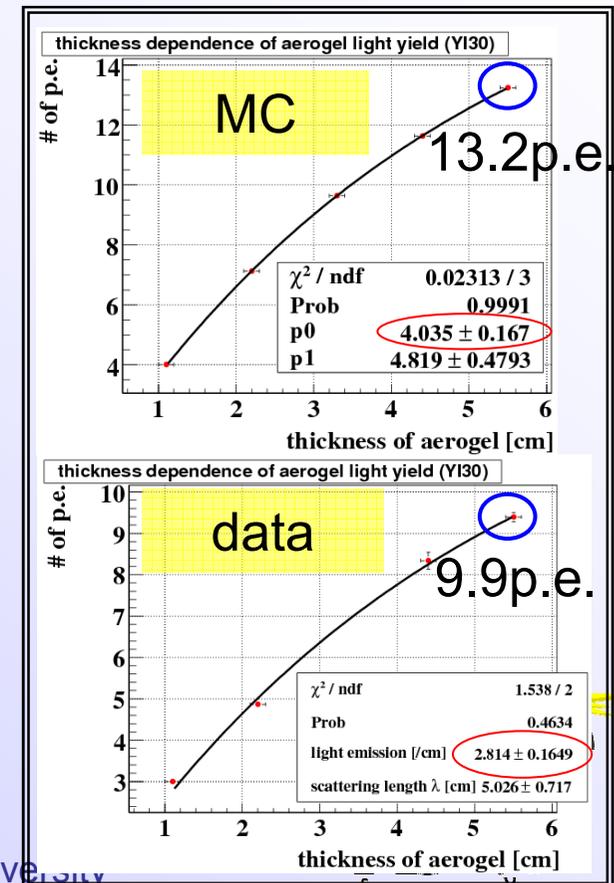
$$A\lambda(1 - \exp(-t/\lambda))$$

A : 単位長さ当たりの発光量

λ : エアロジェル内での光の散乱長
でfit.

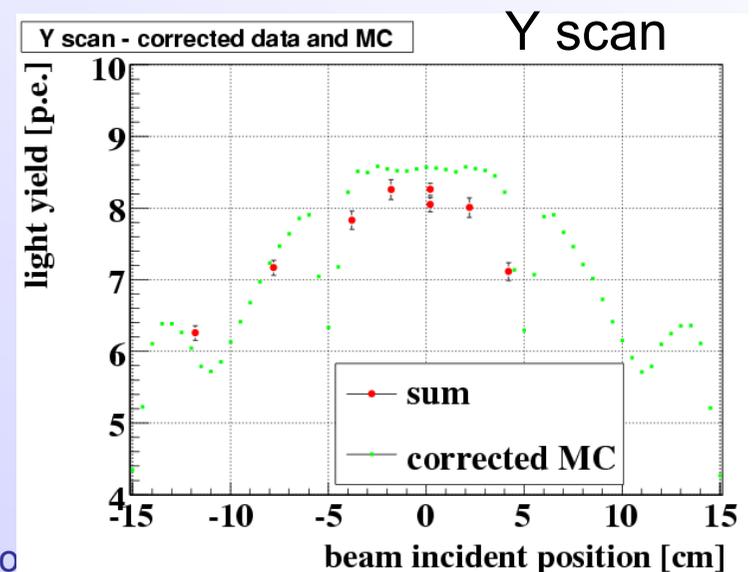
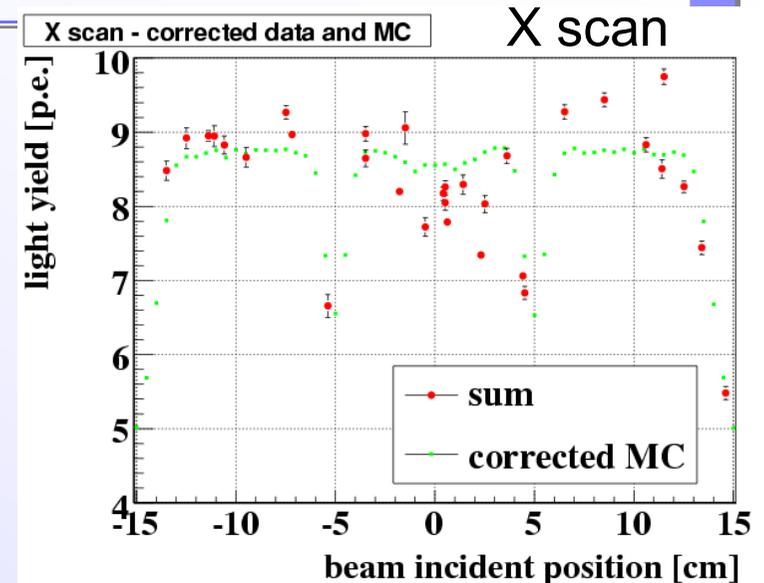
	data	MC
A(発光量) [p.e./cm]	2.81 +/- 0.16	4.04 +/- 0.17
λ(散乱長) [cm]	5.03 +/- 0.72	4.81 +/- 0.48

→散乱の効果はMCと大きく変わっていないが,発光量の値が小さくなっている



2分割読み出しの結果とMCの比較

- 2分割読み出しの結果を再考
 - 先の結果を元にMCの値を補正
 - 発光量パラメータAの比
(測定結果) / (MC) =
 $2.81/4.04 = 0.6955 \pm 0.049$
をかけることで補正をした。
 - ばらつきが大きいですが、絶対光量も含めてMCの測定の再現がよくなった。
- 発光量低下の原因としては、エアロジェル輸送等、取り扱いによる悪化等が考えられる。



再利用エアロジェルでの期待される性能

- AIDA実験で使用されたエアロジェルを実機で使用した場合の性能の見積もりを行った。
- AIDAエアロジェルでの厚み依存性測定の結果 ($A=2.267, \lambda=4.231$)を用いてMCの光量を補正し、このエアロジェルを2分割読み出しで使用した際の性能を見積もった。

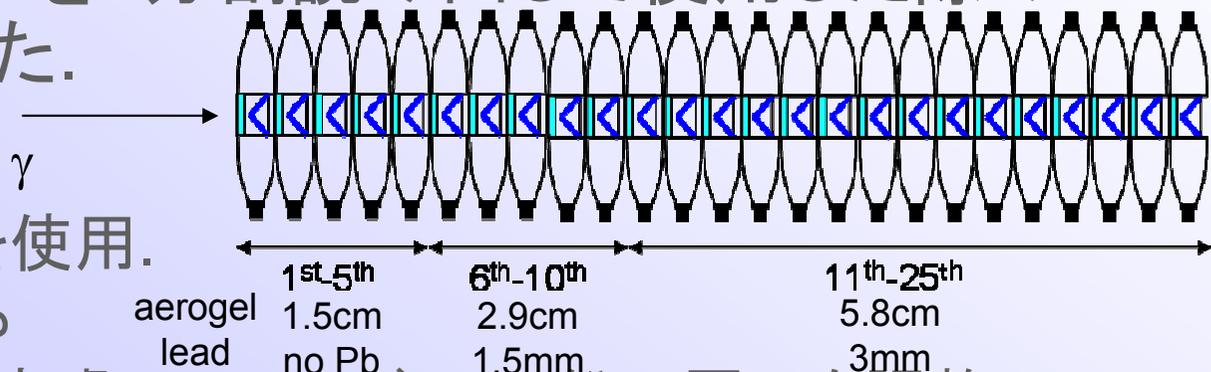
- setup

- 25モジュールを使用。

- PMTのレートや

γ の検出効率を考慮し、エアロジェル・鉛の厚みを調整。

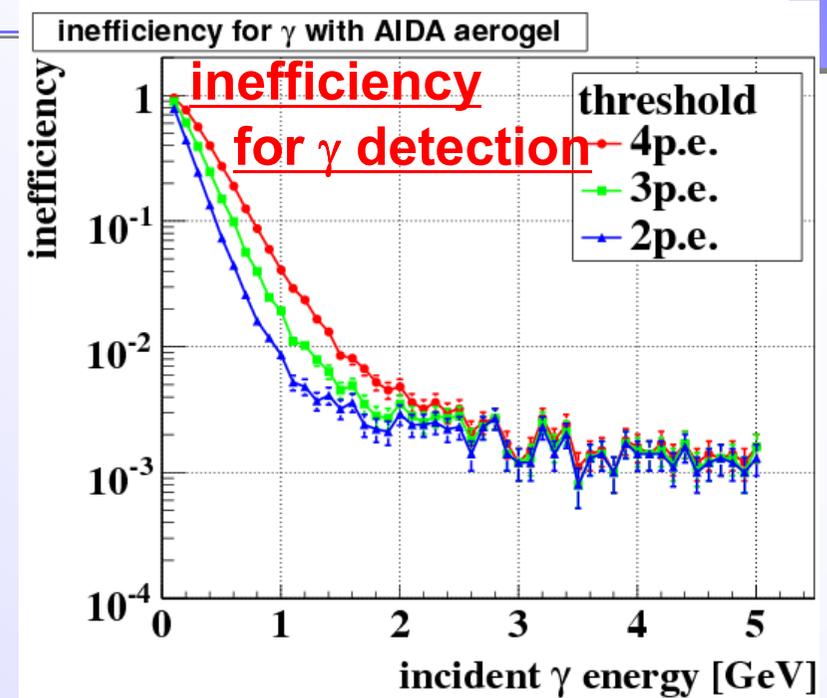
- γ の検出条件：3つ以上連続したモジュールでの閾値以上の光量を観測する。



simulation result

- inefficiency for γ
 - 25cm角に一様に γ を照射
 - 2p.e. threshold(左右の合計)で $<1\%$ ($E_\gamma > 1\text{GeV}$)
- 予想されるバックグラウンド
 - $K_L \rightarrow 2\pi^0$ を考慮
 - inefficiencyを入射 γ のエネルギー E_γ の関数として

$$p_0 \exp(p_1 E_\gamma) + p_2$$
 でfit

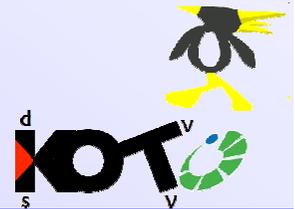


BHPVでvetoすべき総数	6.04 +/- 1.64
上記のinefficiencyを適応	0.28 +/- 0.034
対応する $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 事象数	4.46 +/- 0.28

$K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ → 十分なバックグラウンド排除能力を持つ!!

summary and prospect

- K⁰TO実験のためのBeam Hole Photon Vetoの試作機を作成し,e⁺ビームによるテストを行った.
 - 広い範囲で一様な光量を得ることが出来た.
 - ミラーの継ぎ目でのロスや内壁での反射による光量増加の効果が見られた.
 - 絶対光量は以前の測定に比べ少なくなっているが,エアロジェル等の劣化によるもので,これを考慮すればMCと測定結果はよく一致する.
 - AIDA実験で用いられていたエアロジェルの光量を測定し,予想される性能を見積もったところ,十分なバックグラウンド削減能力を持つことがわかり,今後本実験の少なくとも初期段階では活用可能である.
- 今年秋,J-PARCの実際のK_Lビームによる3モジュールでの性能評価を行う予定.



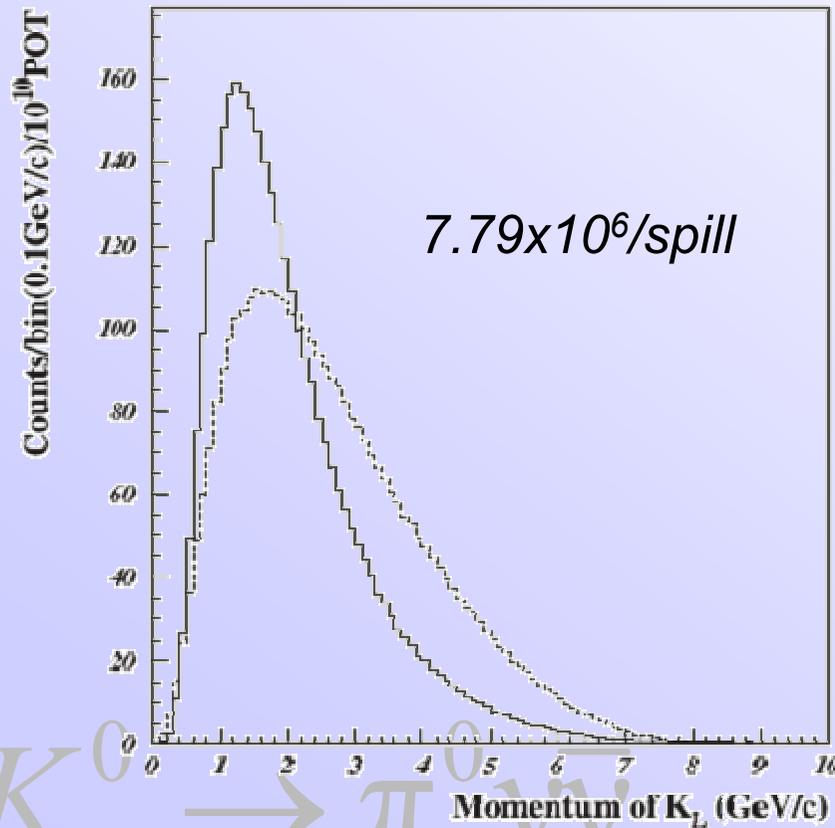
backup slides

- ・ビーム粒子の運動量分布
- ・ビームテストの詳細
- ・分割なしモジュールでの π^+ による発光量評価
- ・バックグラウンド見積もりの手順
- ・バックグラウンドとなる γ にBHPVへの入射位置分布

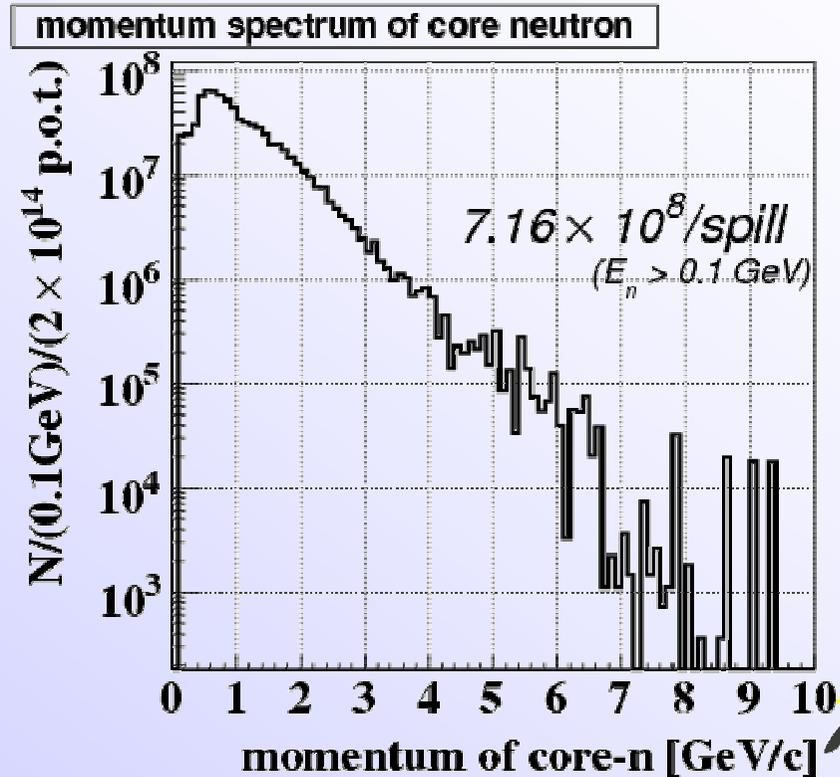


ビーム粒子の運動量分布

K_L

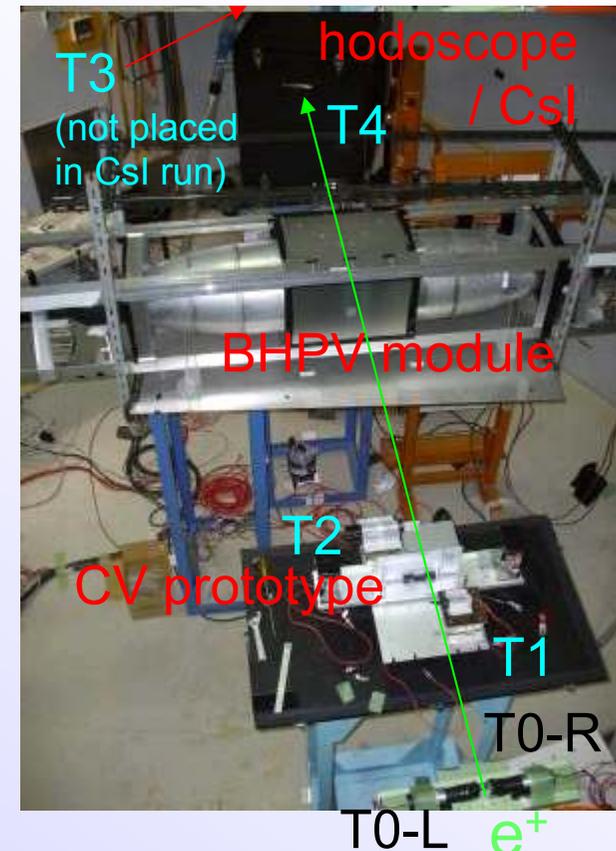


中性子



ビームテスト setup (2分割モジュールテスト)

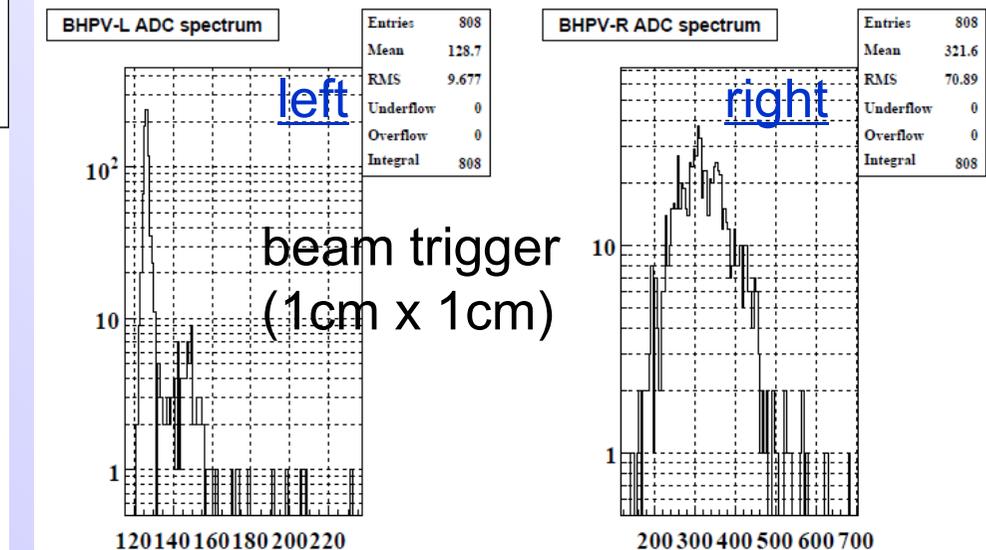
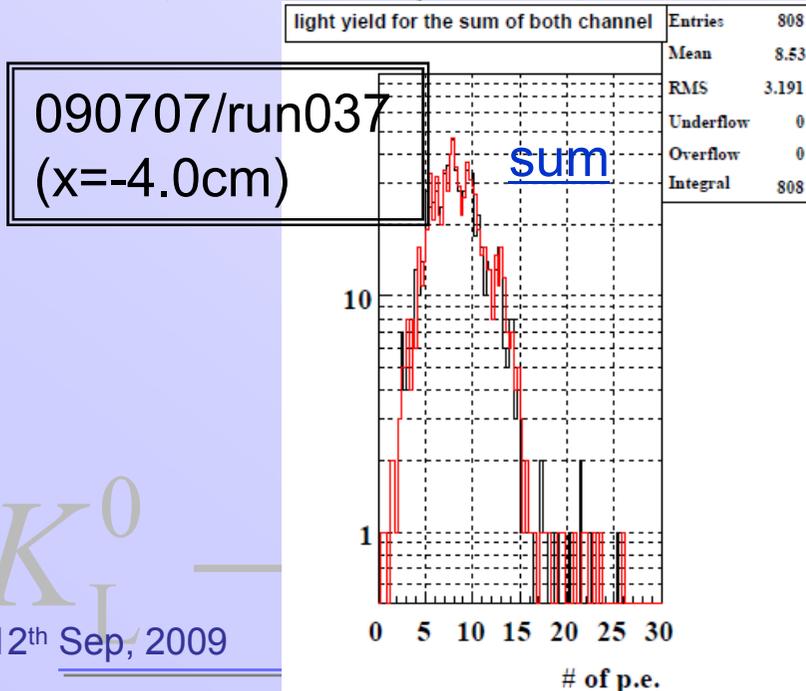
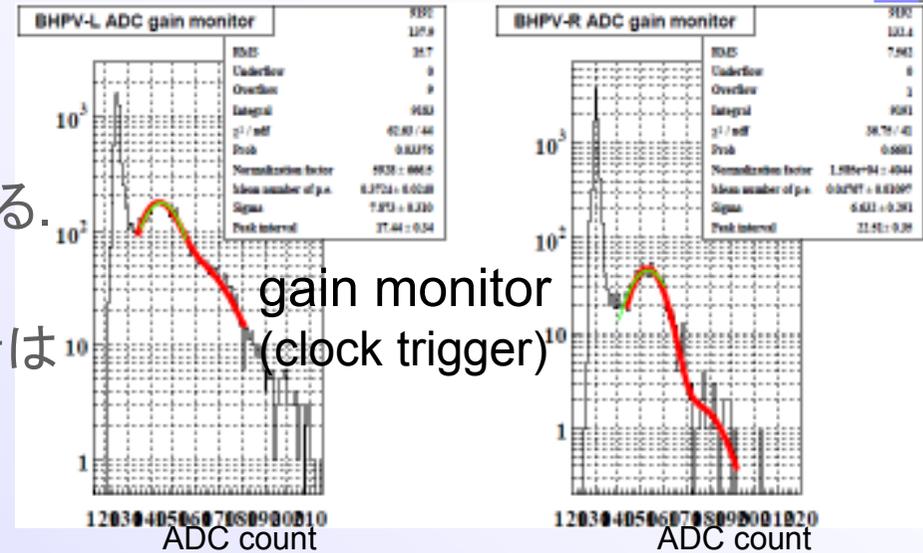
- trigger scintillators
 - 4cm x 4cm x 1cm 両読み(T0L,R)
 - 1cm x 1cm x 0.5cm (T1, T4)
 - 4cm x 4cm x 0.3cm (T2, T3)
 - BHPVの測定には全てのtrigger counterを使用.
 - T0Lがタイミングを決定
- gain monitor
 - off spill(~7s)時に100Hz(or 500Hz)でモジュールに内蔵したLEDを光らせ,run毎にPMTのgainをモニターしている



$$K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$$

ビームテストデータの解析

- LEDトリガーのデータをペDESTAL, 1p.e.ピークをfittingし,ゲインを求める.
- 各PMTの光量はビームトリガーのデータの平均値から,両PMTの合計はイベント毎にp.e.換算した上でヒストグラムにしてその平均から求める.



ビームテスト結果 – 2D scan

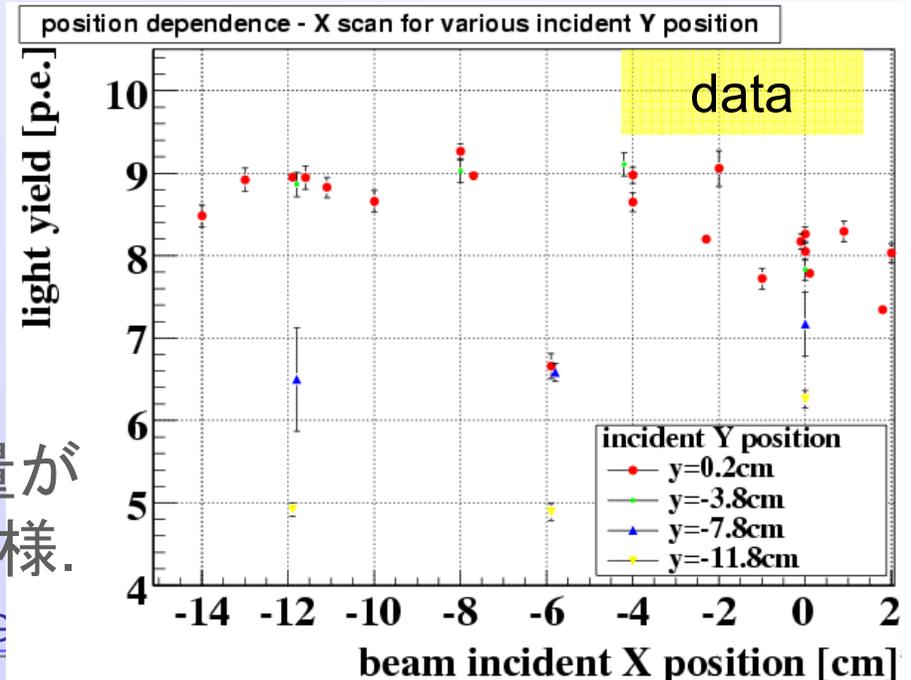
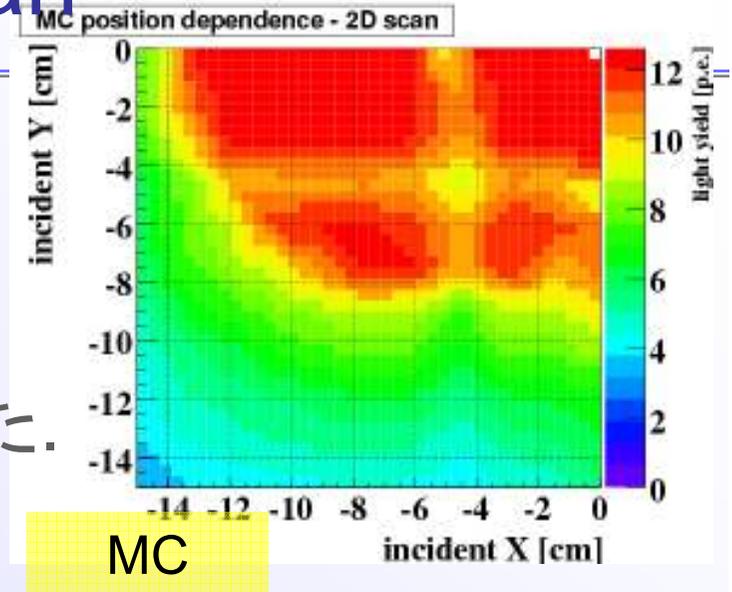
- $x < 0, y < 0$ の入射位置について、 $y = -4\text{cm}, -8\text{cm}, -12\text{cm}$ とし、 x 方向に各数点ずつ測定を行った。

- MC

- 1.5cm の格子状にそれぞれ 1cm 角の e^+ ビームを打ち込んだ。
- 壁の反射率は先と同じく 0。

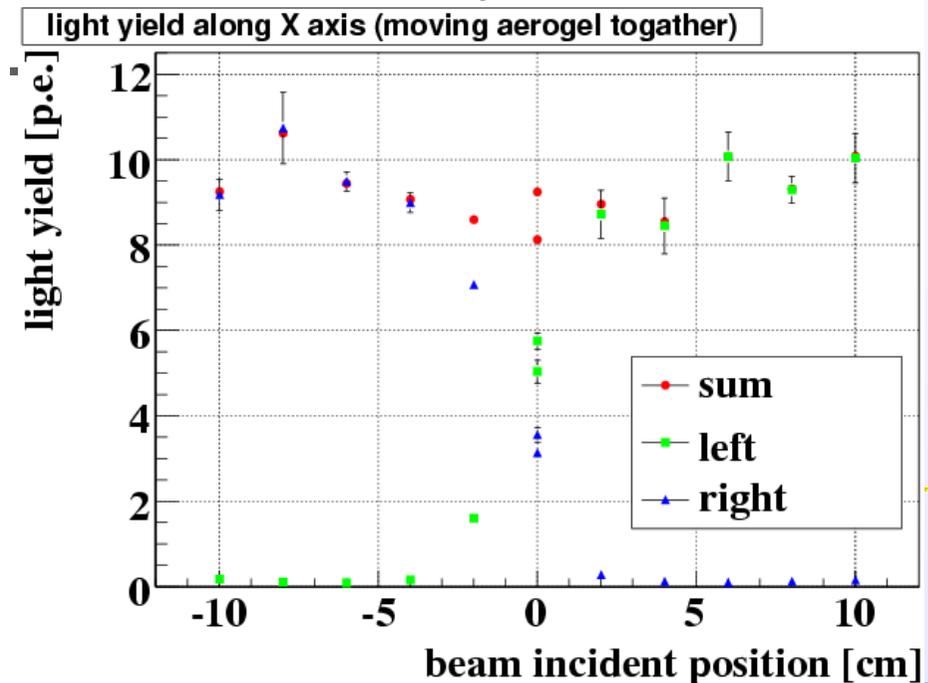
- 測定結果

– y 方向にずれるに従って光量が減るが、 x 方向には比較的一様。



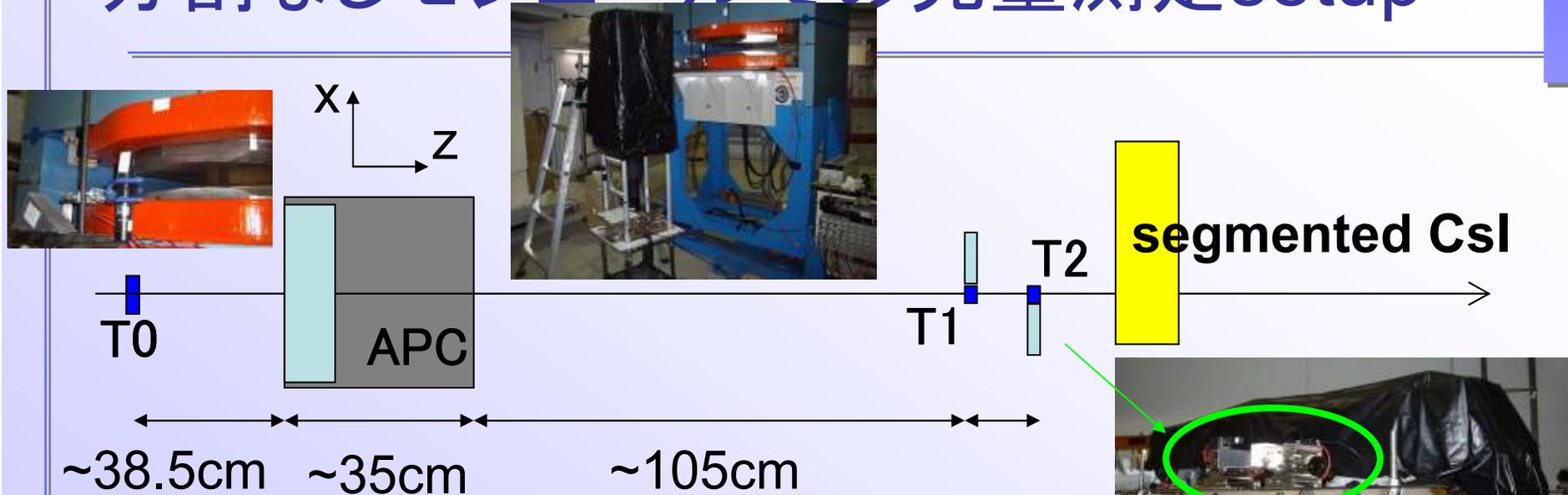
ビームテスト結果 - X scan special

- モジュールと同時にエアロジェルも動かし、常に同一エアロジェルの同じ場所にビームが当たるようにして測定した。
- 継ぎ目の位置(補正前で $x=-6\text{cm}$, $x=4\text{cm}$)での光量の低下は見られない。
- 最終日に測定したが、この日の測定はばらつきが大きく、絶対光量も他の測定と合わないものが多い。



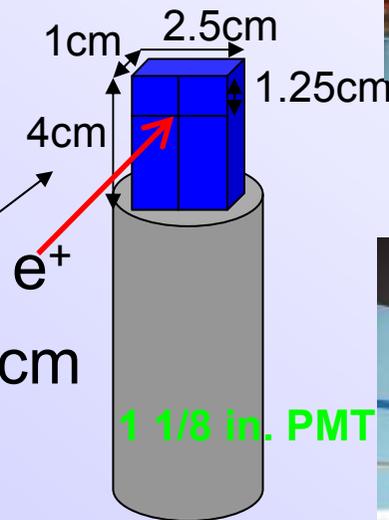
$K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$

分割なしモジュールでの光量測定setup



トリガーシンチレータ

- ・T0 : 2.5cm x 4cm x 厚さ1cm (ライトガイドなし)
- ・T1, T2 : 1cm x 1cm x 厚さ0.5cm (ライトガイド付き)

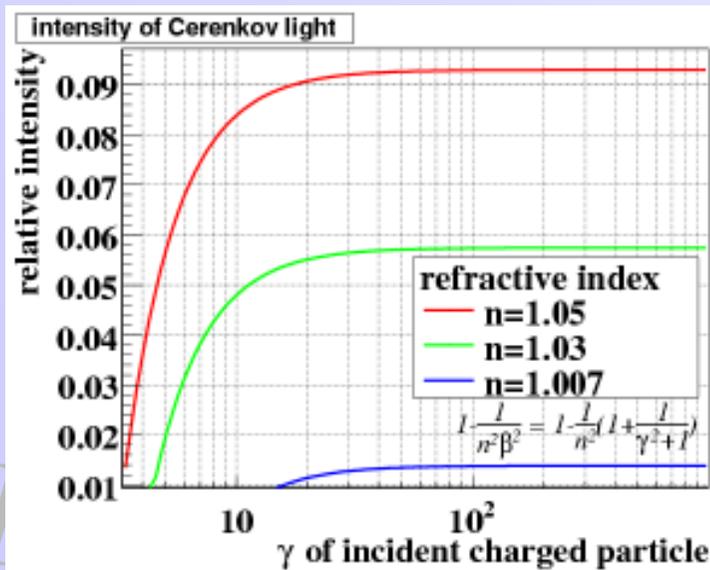
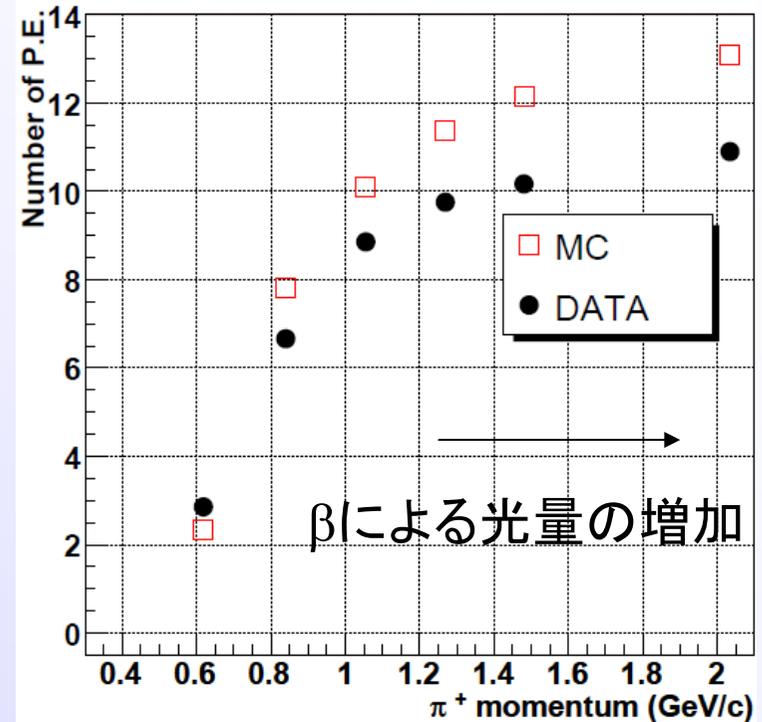


3つのコインシデンスでトリガーを発行.



分割なしモジュールの π^+ ビームによる光量評価

- エアロジェル：松下YI30
- KEK-PS T1ビームライン (2005年6月)

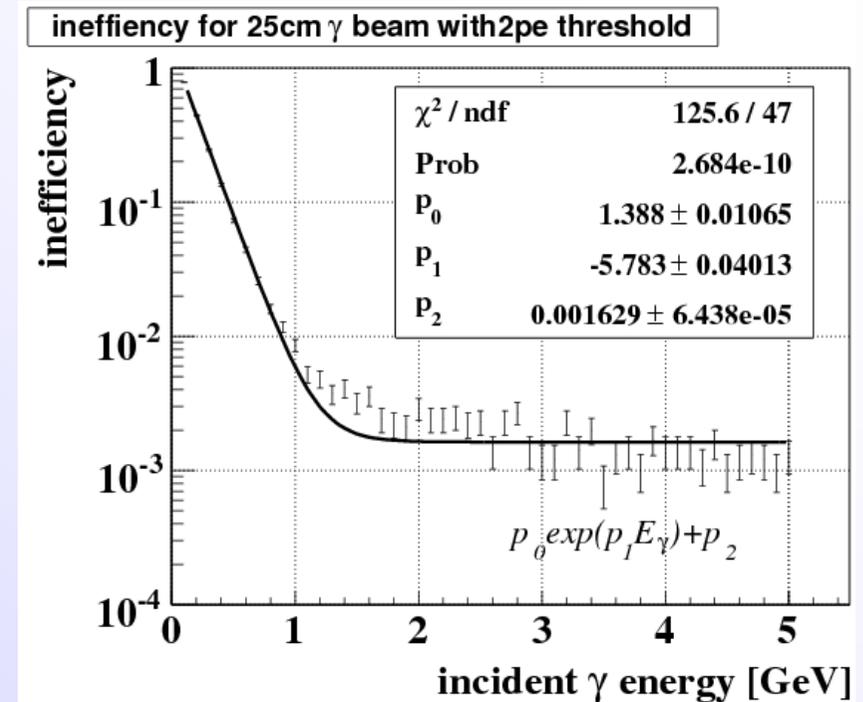


運動量による発光量の変化



バックグラウンド見積もりの手順

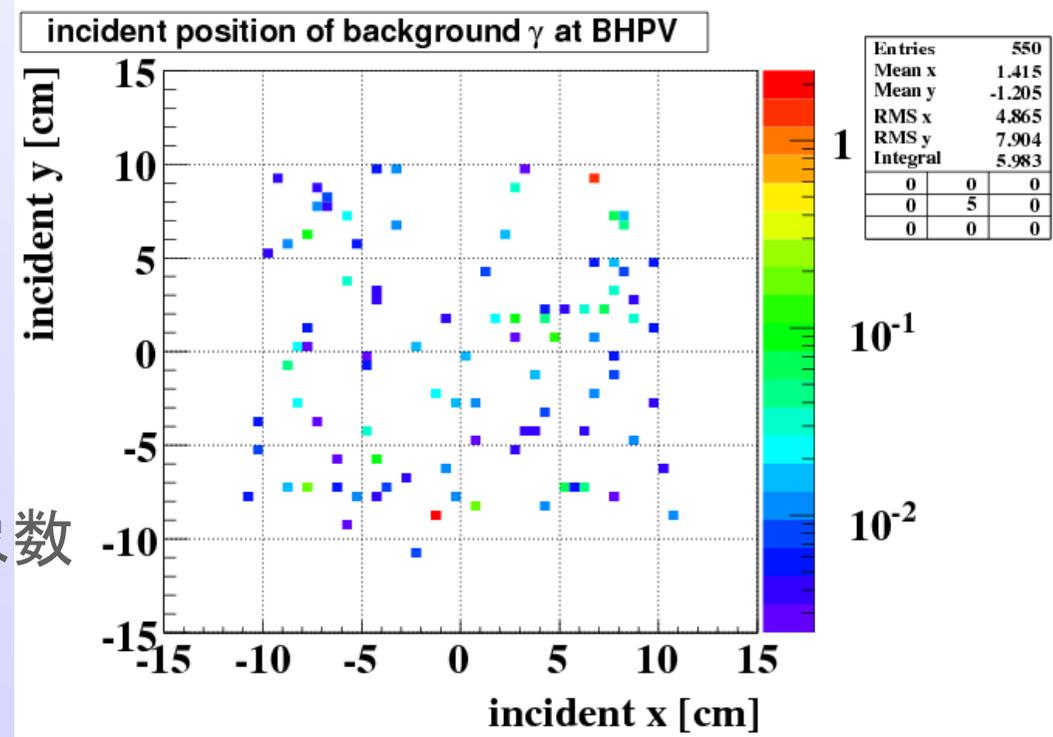
- K⁰TO検出器を全て配置し, 3.71×10^7 の $K_L \rightarrow 2\pi^0$ 崩壊を起こさせる. 各検出器に入った粒子は表面で止められる.
- CsIに2hitがあり, 運動学カットを通過するイベントで, BHPVにhitがあるものを選んでくる.
- 上の各イベントについて, veto検出器に入った粒子について, 入射位置・運動量から inefficiencyを計算し, これを掛け合わせて event weightとする. BHPVに今回のsimulation結果(右図)を用いる
- event weightを足し合わせ, 3年間のrunにスケールする.



バックグラウンド γ の位置分布

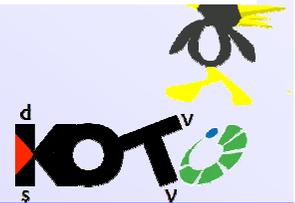
- BHPVへのバックグラウンドとなりうる $K_L \rightarrow 2\pi^0$ からの γ の入射位置分布

- 統計 : 3.69×10^7
- およそ20cm角の領域に一様
- 色は3年間のrunにスケールしたときのバックグラウンド事象数



12th Sep, 2009

High Energy Physics Group, Kyoto University



J-PARC K⁰TO experiment

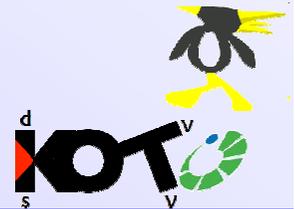
AIDAエアロジェルでの性能評価(+ α)

- accidental acceptance loss
 - 2pe threshold
 - g : 1.4676%
 - n : 0.94614%
 - K_L : 0.52976%
- background estimation
 - 3pe threshold : 0.398 +/- 0.0418 event
 - 4pe threshold : 0.567 +/- 0.0495 event



12th Sep, 2009

High Energy Physics Group, Kyoto University



J-PARC K⁰TO experiment