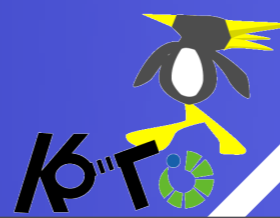


K⁰TO実験における Charged Vetoのための MPPC読み出し回路の開発

京大理, KEK^A

内藤大地, 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, 前田陽祐, 高橋剛
and K⁰TO collaboration

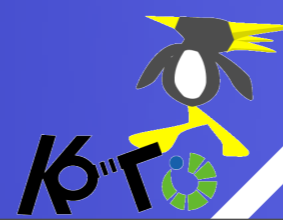


K⁰TO Experiment

Search for $K^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$

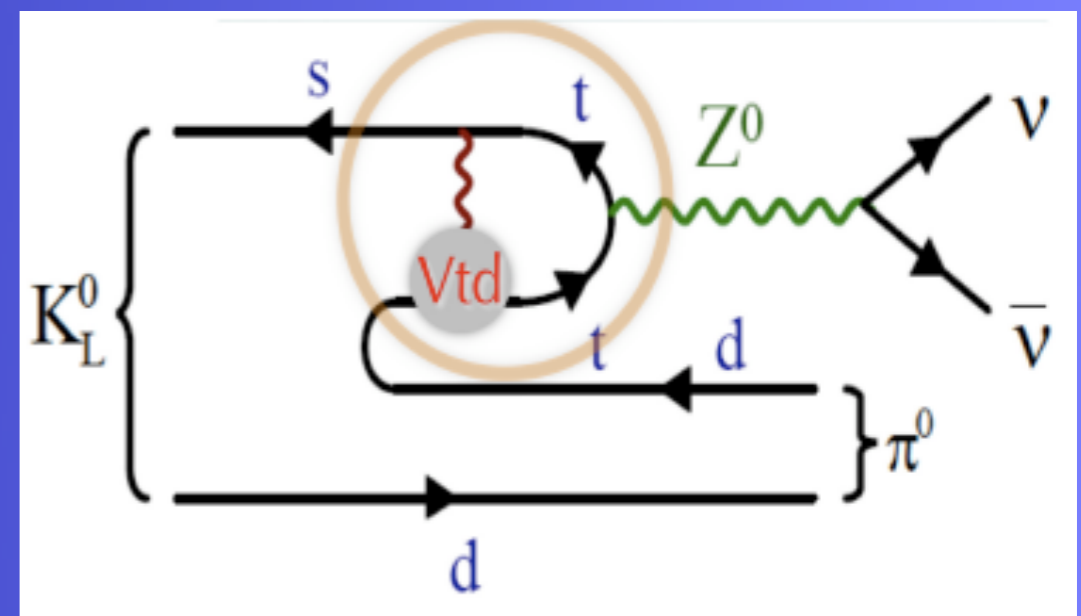
contents

- K^0 TO実験の概要
- Charged Veto(CV)の概要
- MPPC ganging readoutで起きる現象
- CVプロトタイプの性能評価
- summary



K⁰T0実験の概要 ～物理的動機～

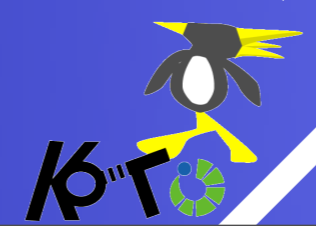
- K_L → π⁰ ν ν̄ 稀崩壊探索実験
- KEK PSで行われたE391a実験のアップグレード実験
- J-Parc 50GeV PS を用いて2011開始
- Br(π⁰ ν ν̄) ∝ η², 理論的不定性が非常に小さい
 - CKMの精密検証
 - Brの予言値からのずれが新物理に直結
- Br ≃ 2.5 × 10⁻¹¹, 反応に関わる粒子が中性粒子
 - 実験的困難



崩壊のダイアグラム

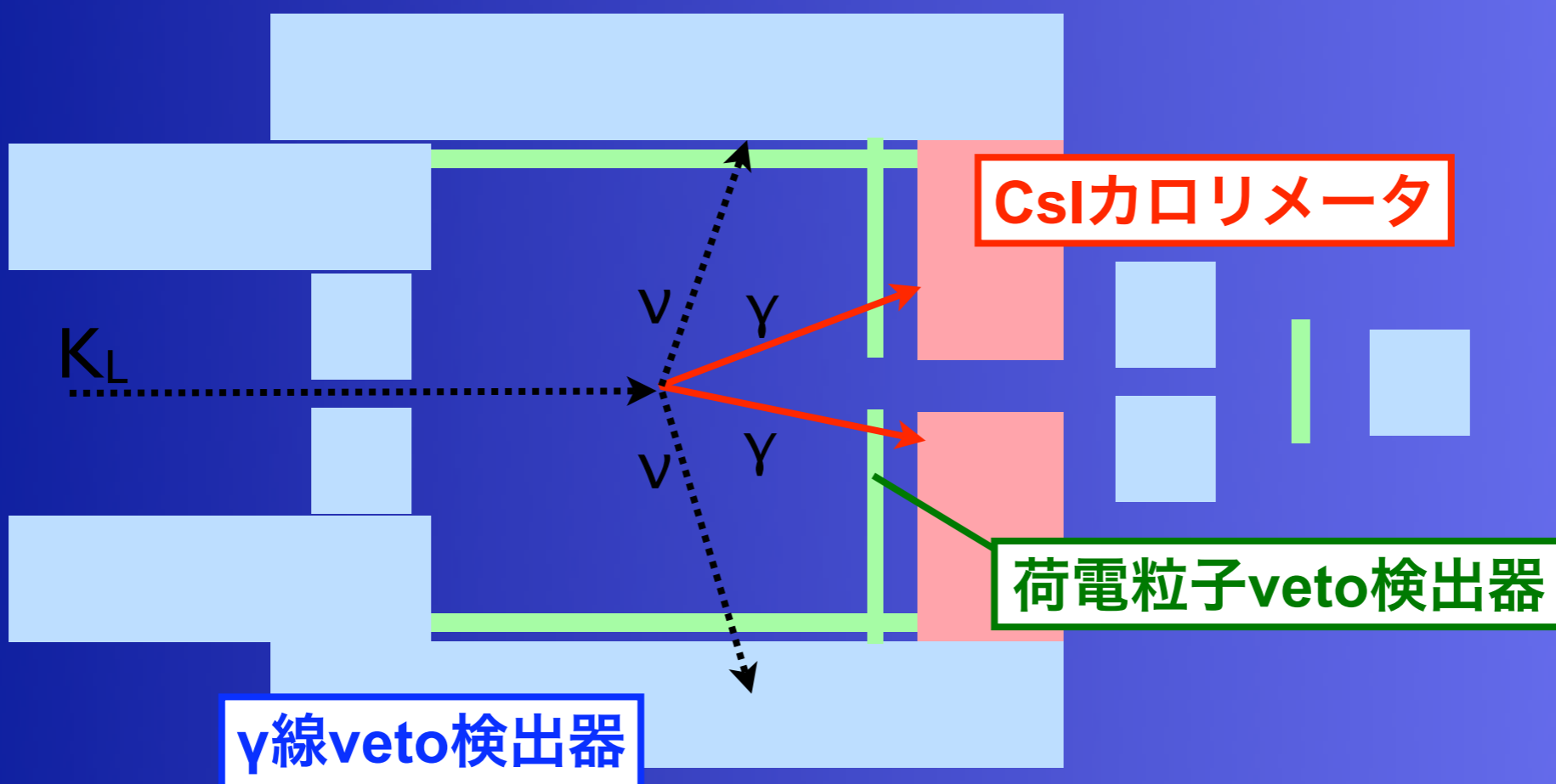
K⁰T0 Experiment

Search for K⁰ → π⁰ ν ν̄



K⁰T0実験の概要 ～実験原理～

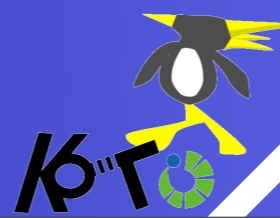
- π^0 は生成した瞬間2 γ に崩壊する
→終状態は2 γ が観測できるだけ
- γ はCslカロリメータで位置とエネルギーを測定
- 崩壊領域を全立体角Vetoで覆う



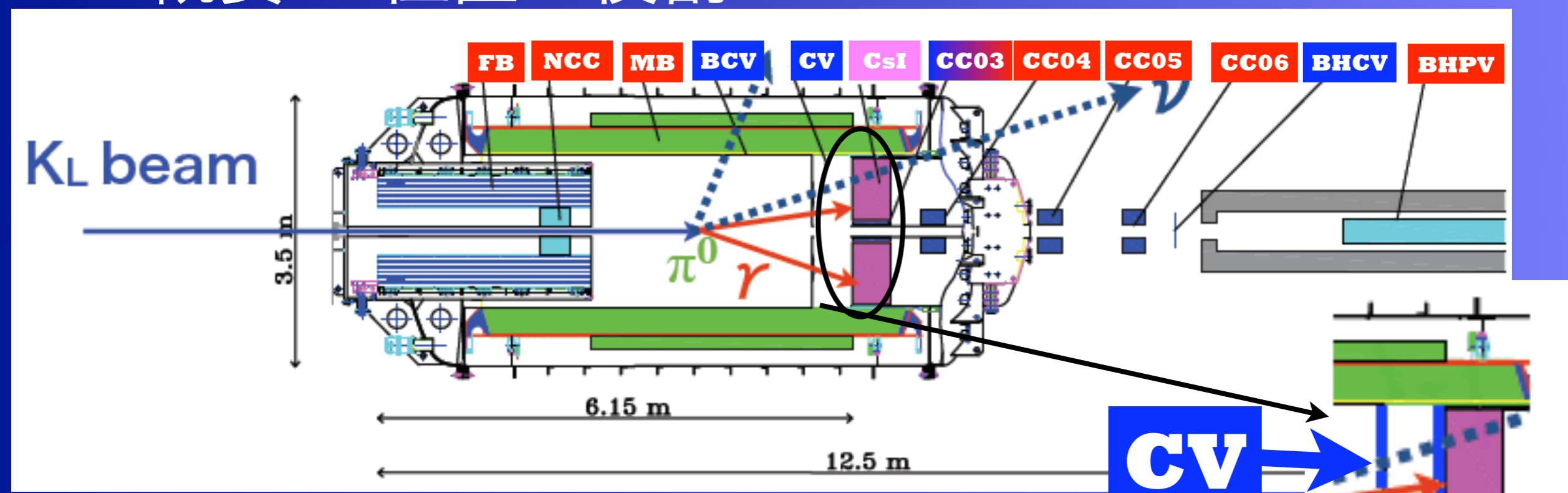
CsIカロリメータ

荷電粒子veto検出器

γ線veto検出器

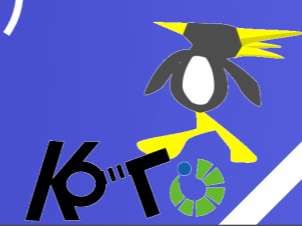
K⁰T0 ExperimentSearch for $K^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$

CVの概要 ～位置と役割～



- Charged Veto(CV)の役割
- $K_L \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$ によって生じる荷電粒子のVeto
- $K_L \rightarrow e^{+/-} \pi^{-/+} \nu$ によって生じる荷電粒子のVeto

この内CVで一番重要な役割は $\pi^+ \pi^- \pi^0$ を良いefficiencyで Vetoすること (10^{-4} inefficiency)



K⁰TO Experiment

Search for $K^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$

CVの概要 ～CVへの要求, 閾値と時間分解能～

- $\pi^+\pi^-\pi^0$ を良いefficiencyでVetoするためには

1. 閾値100 keVを要求

→ π^- は荷電交換反応($\pi^-p \rightarrow \pi^0n$)を起こすため。

荷電交換反応が起こる前にvetoする必要がある。

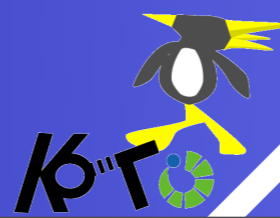
2. 3ns以下の時間分解能

→本実験ではCslに2 γ がhitしCVで閾値を超えた粒子が入射した場合にある時間だけvetoがonになる。

→Cslに2 γ hitがある時のCV上での $\pi^+\pi^-$ のTOFの広がり分vetoしなければならない。

→detectorの時間分解能が悪いとTOFが広がりvetoしなければならない時間が増える。

→signal loss 5%以下



K⁰TO Experiment

Search for $K^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$

CVの概要 ～CVへの要求, 閾値と時間分解能～

• $\pi^+\pi^-\pi^0$ を良いefficiencyでVetoするためには

1. 閾値100 keVを要求

→ π^- は荷電交換反応($\pi^-p \rightarrow \pi^0n$)を起こすため。

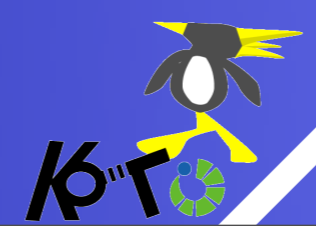
2. 3ns以下の時間分解能

**プラスチックシンチレータを
波長変換ファイバー+MPPC
で読み出すことで達成させる**

広がり分vetoしなければならない。

→detectorの時間分解能が悪いとTOFが広がり
vetoしなければならない時間が増える。

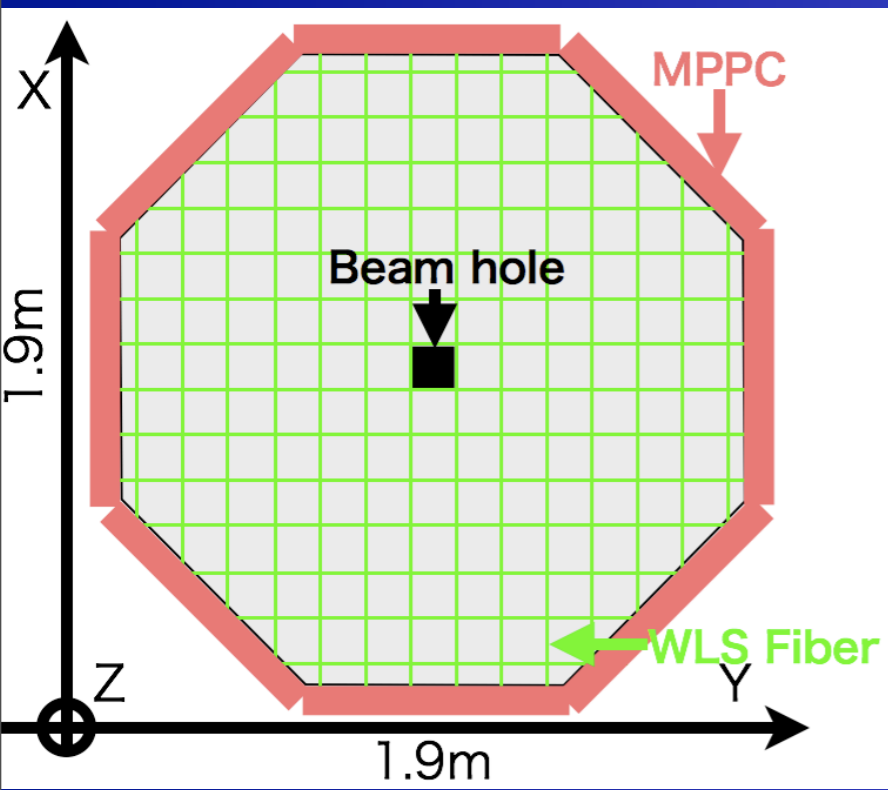
→signal loss 5%以下



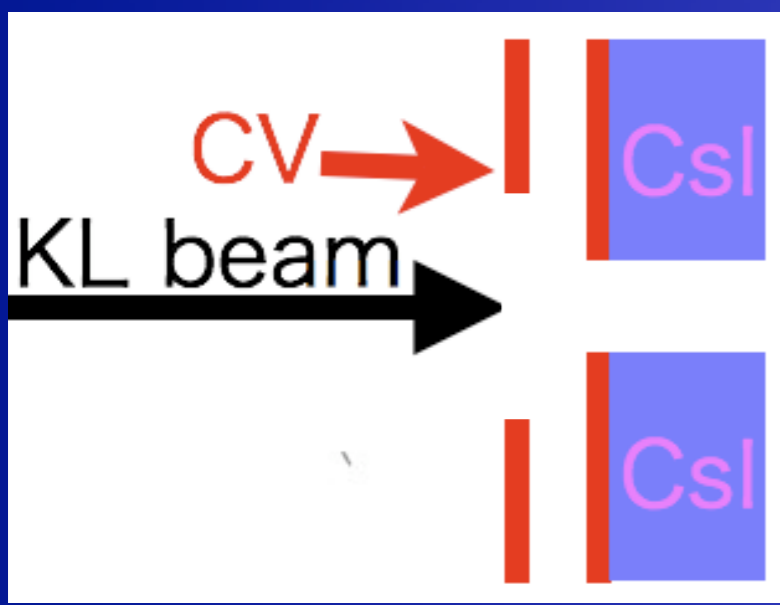
K⁰TO Experiment

Search for $K^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$

CVの概要 ~design~



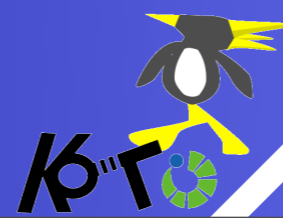
- ・ シンチレータに波長変換ファイバーを埋め込み MPPCで読み出す (受光面1.3x1.3mm角使用)
- ・ 正八角形、厚さ3mmのシンチレータの2層構造
- ・ 一つはCslに直付け, もう一つは25cm上流
- ・ MPPCは8個をgang (並列に並べて一つの信号として読み出す)
- ・ MPPCの信号はAMPで50倍に増幅
- ・ 読み出しにはFADCを用いる
- ・ MPPCの数は全部で約1400個
- ・ ch数は176



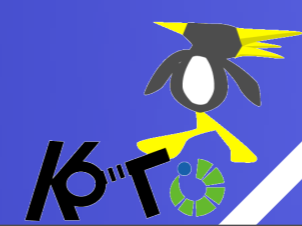
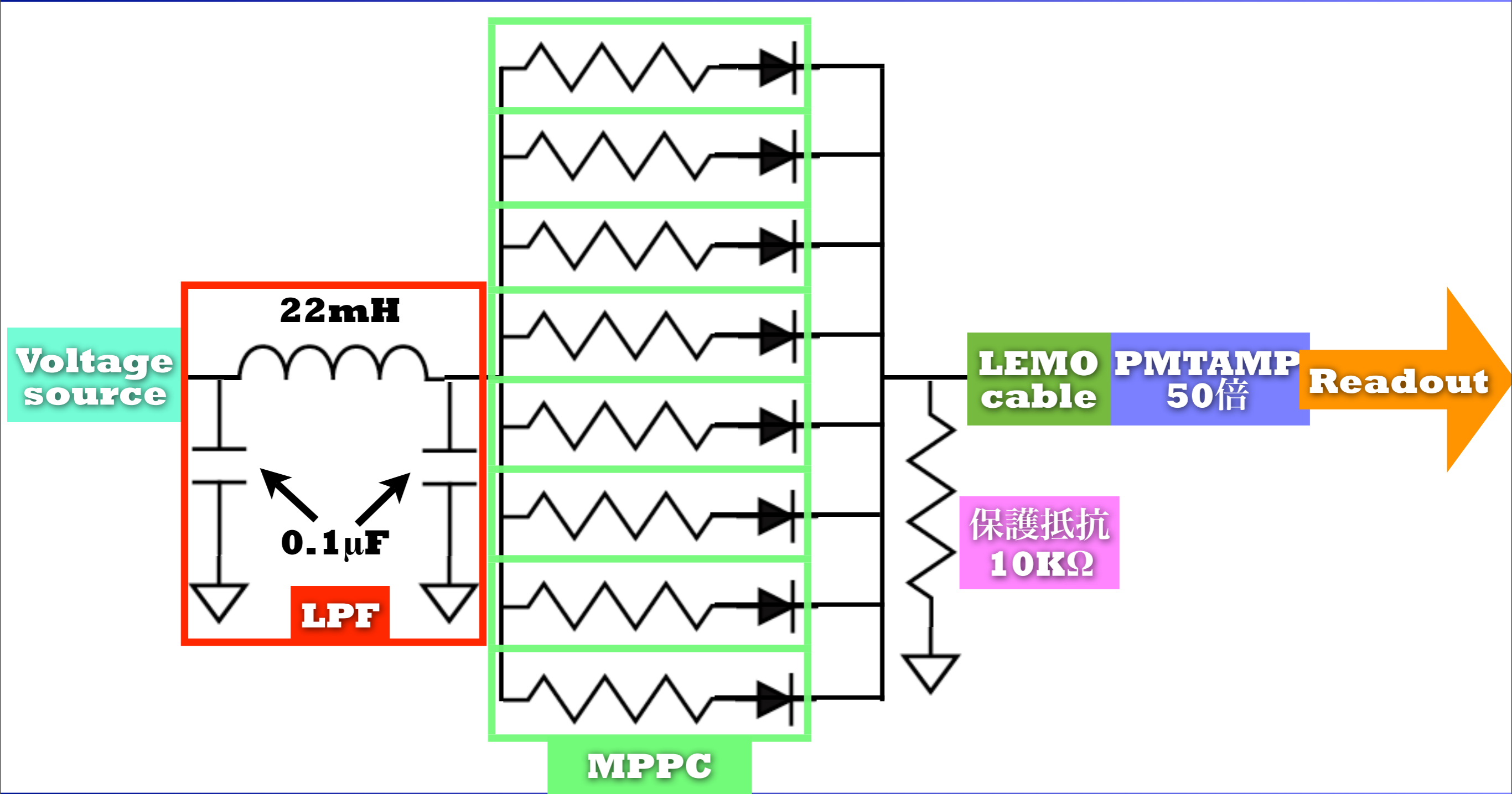
この検出器の特色:
MPPCをgangして読み出すこと

今回の発表の流れ

- 1.MPPCをgangした時の特徴
 - ・ pulse shape(波形が伸びる)
 - ・ 波形が伸びるメカニズム
- 2.CVプロトタイプを作成し性能評価
 - ・ 時間分解能の測定

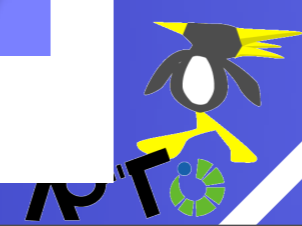
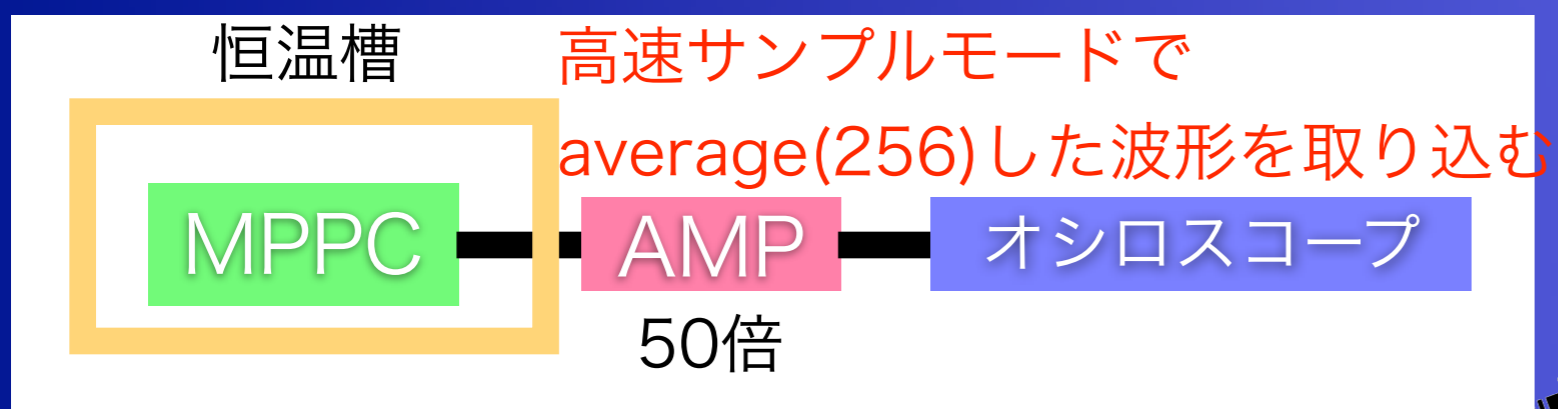


gang時のセットアップ

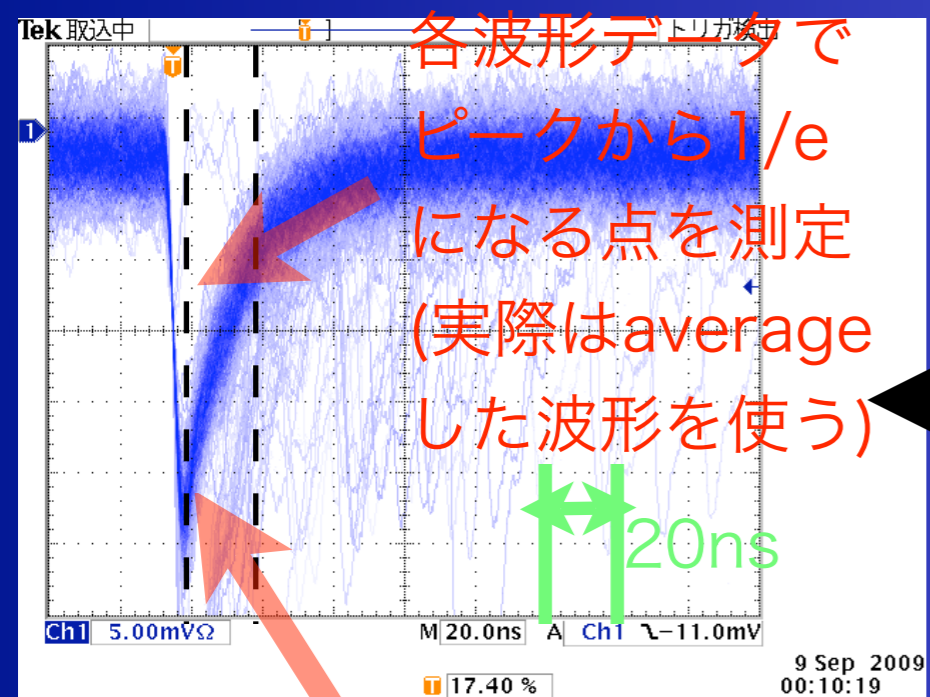


pulse 測定セットアップ

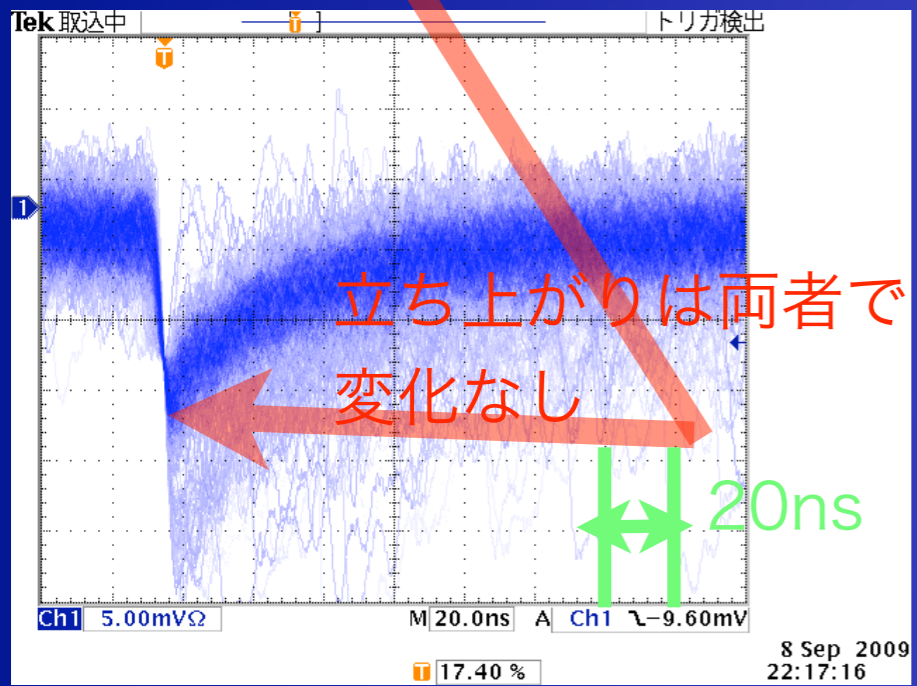
- 測定にはピクセルサイズ50 μ m,受光面1.3mmのMPPCを使用
- MPPCはbreakdown voltage \pm 50mV, gain \pm 3%で一致しているものを使用
- 測定はダークカウントノイズの影響を減らすため0 $^{\circ}$ Cで行う
(測定する波形にaccidentalに別の波形が被らないように)
- キャリブレーションを事前に行い $\Delta V=1.0$ で測定
- 波形データはオシロスコープで取得
- AMPの入カインピーダンスは50 Ω



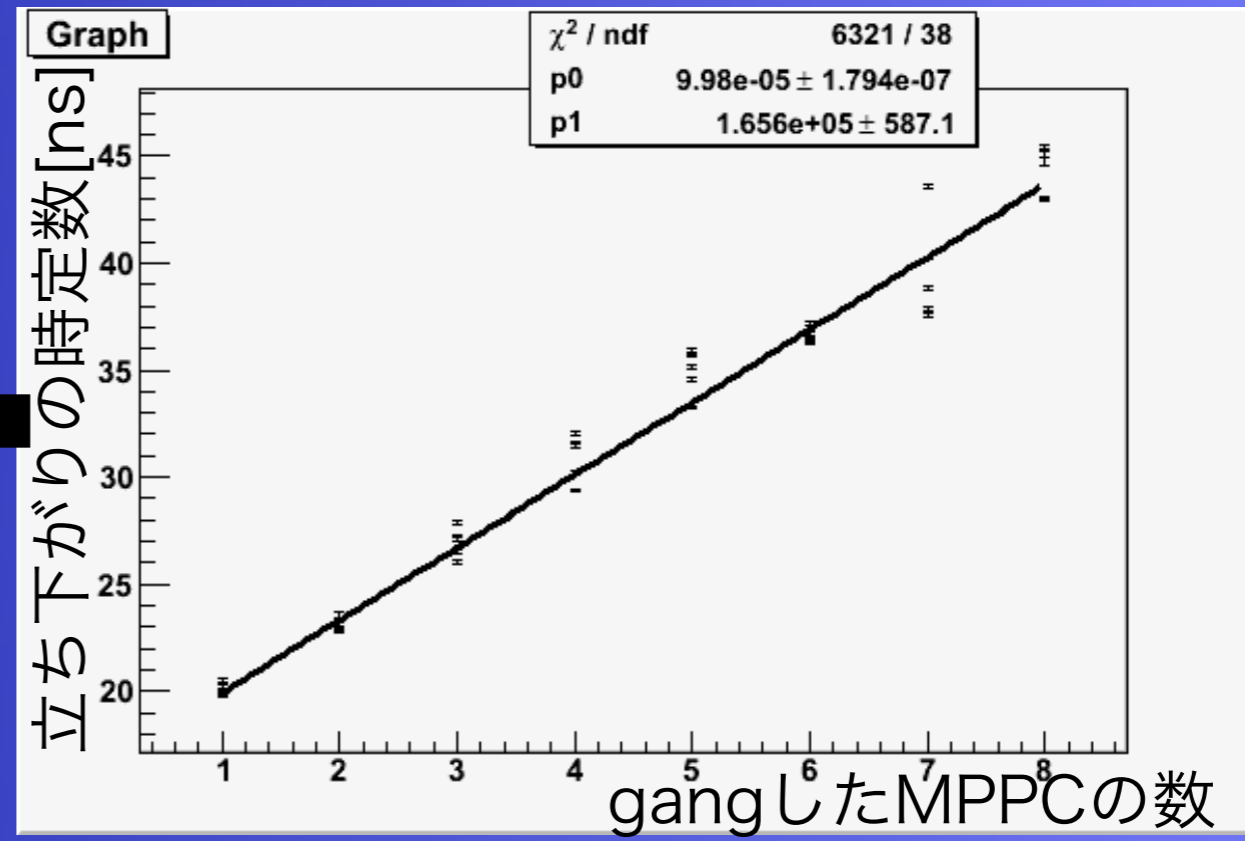
測定結果



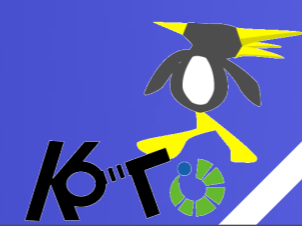
MPPC単体の1 p.e.波形(20ns/div)



MPPC8個gangの1 p.e.波形(20ns/div)



目視で分かるほど有意に波形が伸びる。また電荷は保存する。(ADCを使ってgainを確認)
グラフからgangするMPPCの数に比例して波形が伸びるが分かる



K⁰TO Experiment

Search for $K^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$

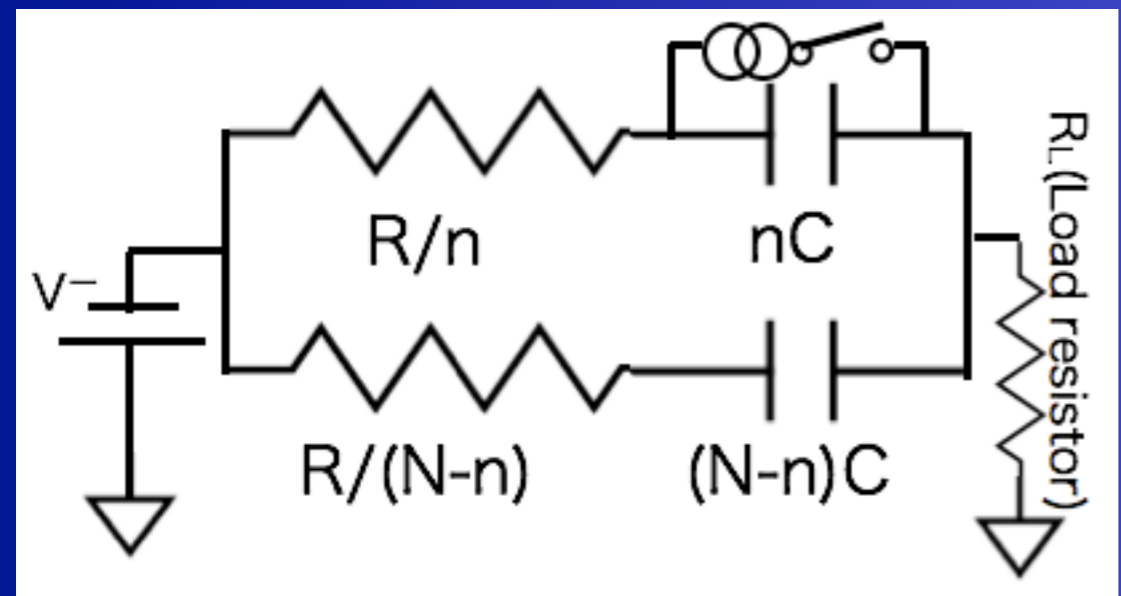
現象の理解

- multi-pixelモデル(アヴァランシェを起こしていないpixelを考慮に入れる)ならば説明可能。

- このモデルを解析的に解くと立ち下がりの時定数は

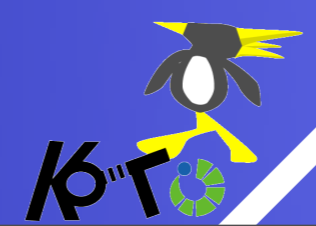
$$T = (N-n) \times C \times \{R_L + R / (N-n)\} + n \times C \times R_L$$

$$= N \times C \times R_L + R \times C$$

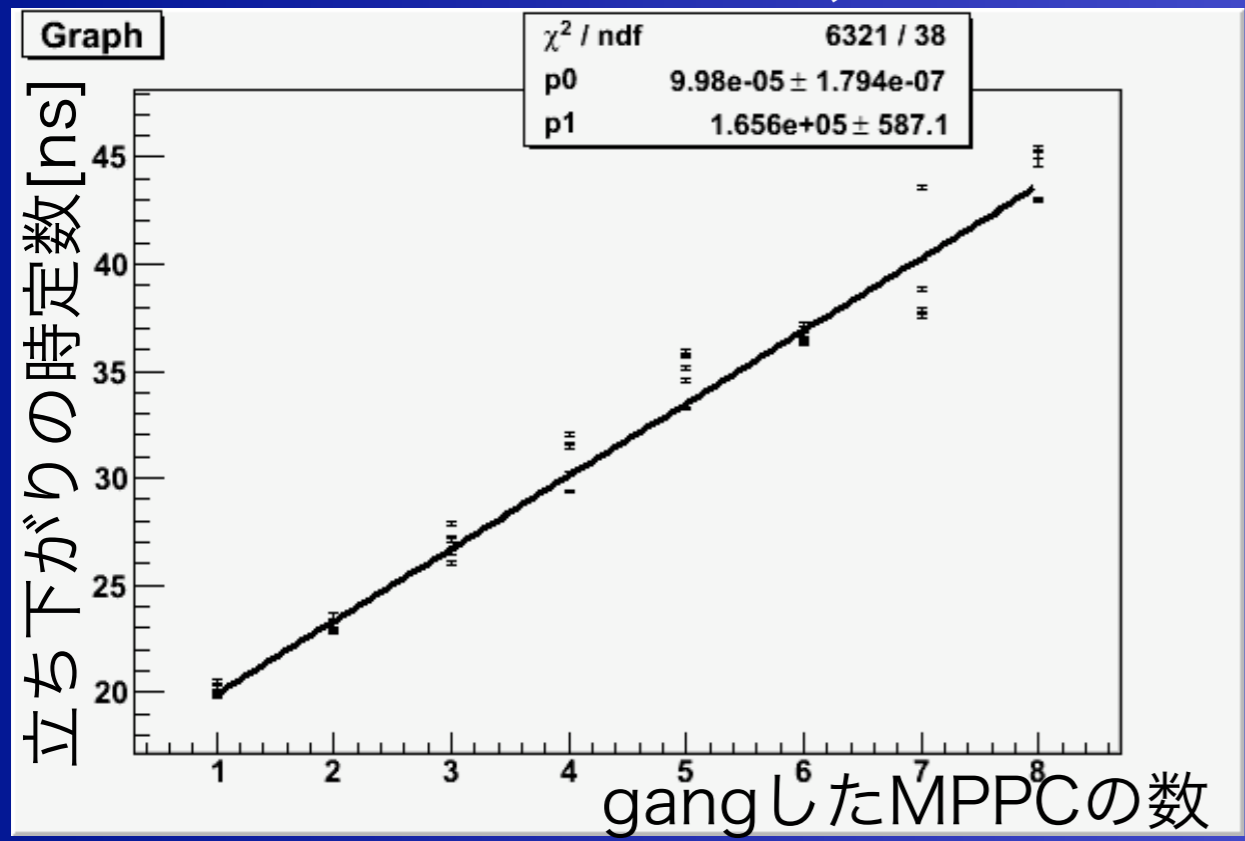


立ち下がりの時定数は全ピクセル数に比例し(gangするとMPPPCの実効的なピクセル数が増えたため,gangする数に比例する), ロード抵抗にも比例する。

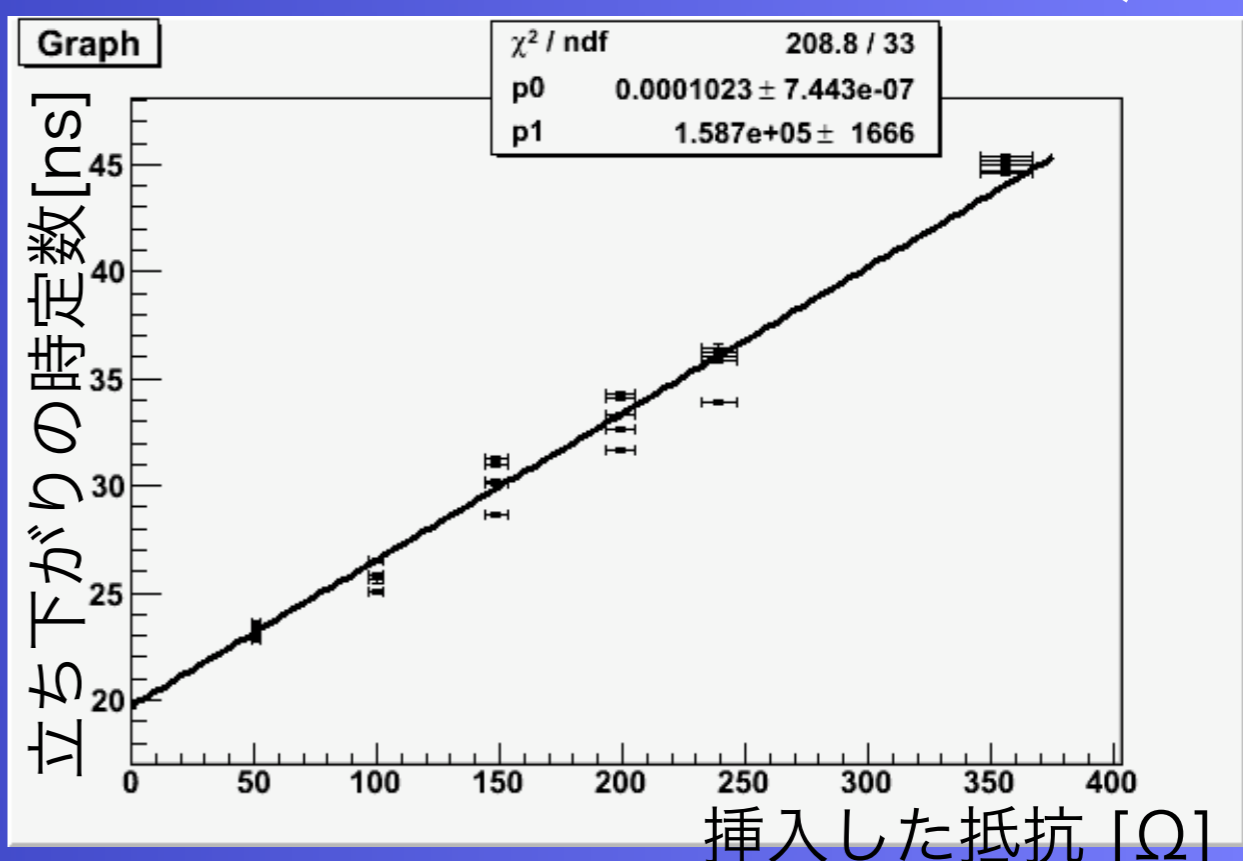
- R: 1 pixel当たりのクエンチング抵抗
- C: 1 pixel当たりの静電容量
- n: アヴァランシェを起こしているpixelの数
- N: 全pixelの数



- MPPCの読み出しに直列に抵抗を加え,実効的にロード抵抗を増やしてみた(右下図, MPPC単体に対して行った。)



$C \cdot (x \cdot N_{\text{MPPC単体}} \cdot R_L + R)$ でFit
 C: 99.8 ± 0.179 fF
 R: 165.6 ± 0.587 k Ω



$C \cdot \{N_{\text{MPPC単体}} \cdot (x + R_L) + R\}$ でFit
 C: 102.3 ± 0.744 fF
 R: 158.7 ± 1.67 k Ω

キャリブレーションから求めたCの値は 116.2 ± 1.14 fF。

定性的にはこのモデルで良いと思われる。

波形が伸びると何が問題か？

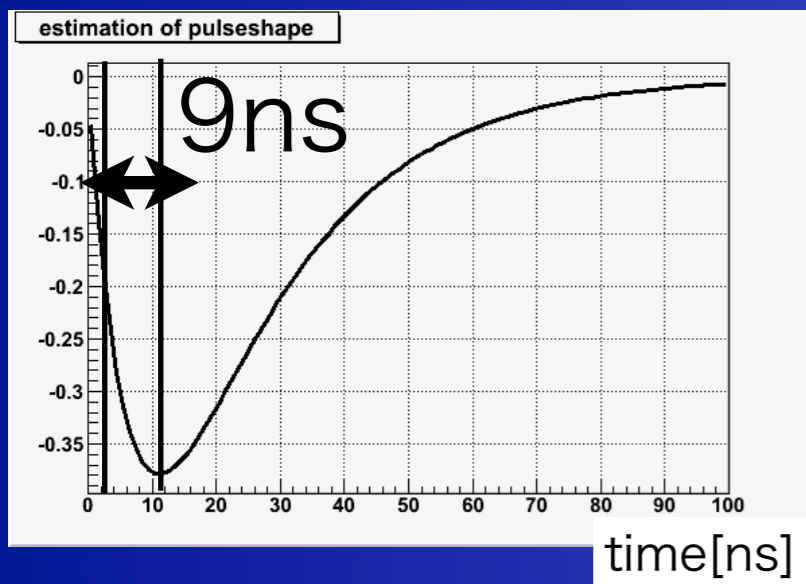
→Next page



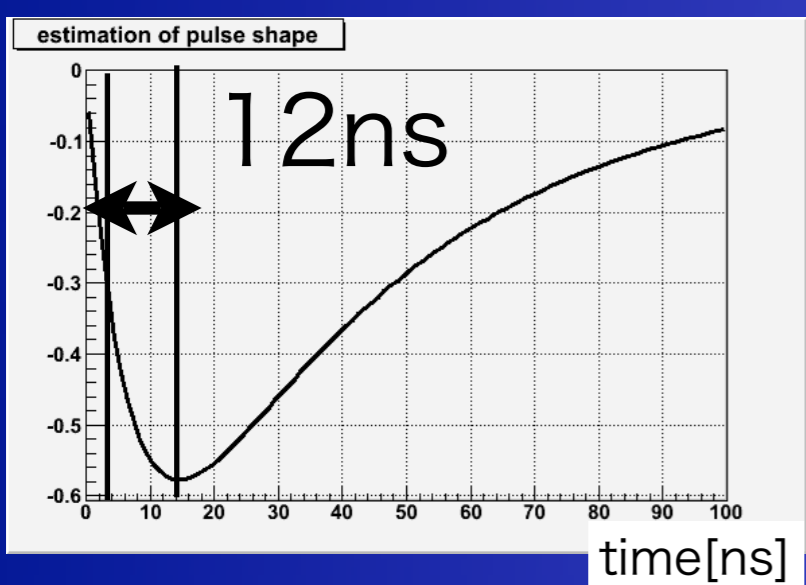
K⁰TO Experiment

Search for $K^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$

シンチレータからの光を波長変換ファイバー(Y11)で読み出した場合,ファイバーの発光の時間構造とMPPCの波形のconvolutionが出力波形として観測される。



MPPC単体+Y11での予想波形



MPPC8個gang+Y11での予想波形

出力波形 $\propto \exp(-t/T_{Y11}) - \exp(-t/T_{MPPC})$

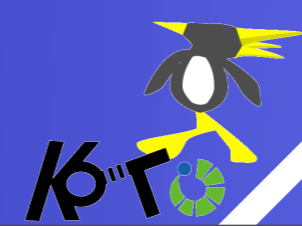
T_{Y11} :Y11の発光の時定数

T_{MPPC} :MPPCの掃き出しの時定数

MPPCの波形が伸びるとこの効果による立ち上がりのなまり方が大きくなってしまふ

・立ち上がりがなまると時間分解能がでないかも

→実際にプロトタイプを制作し性能評価

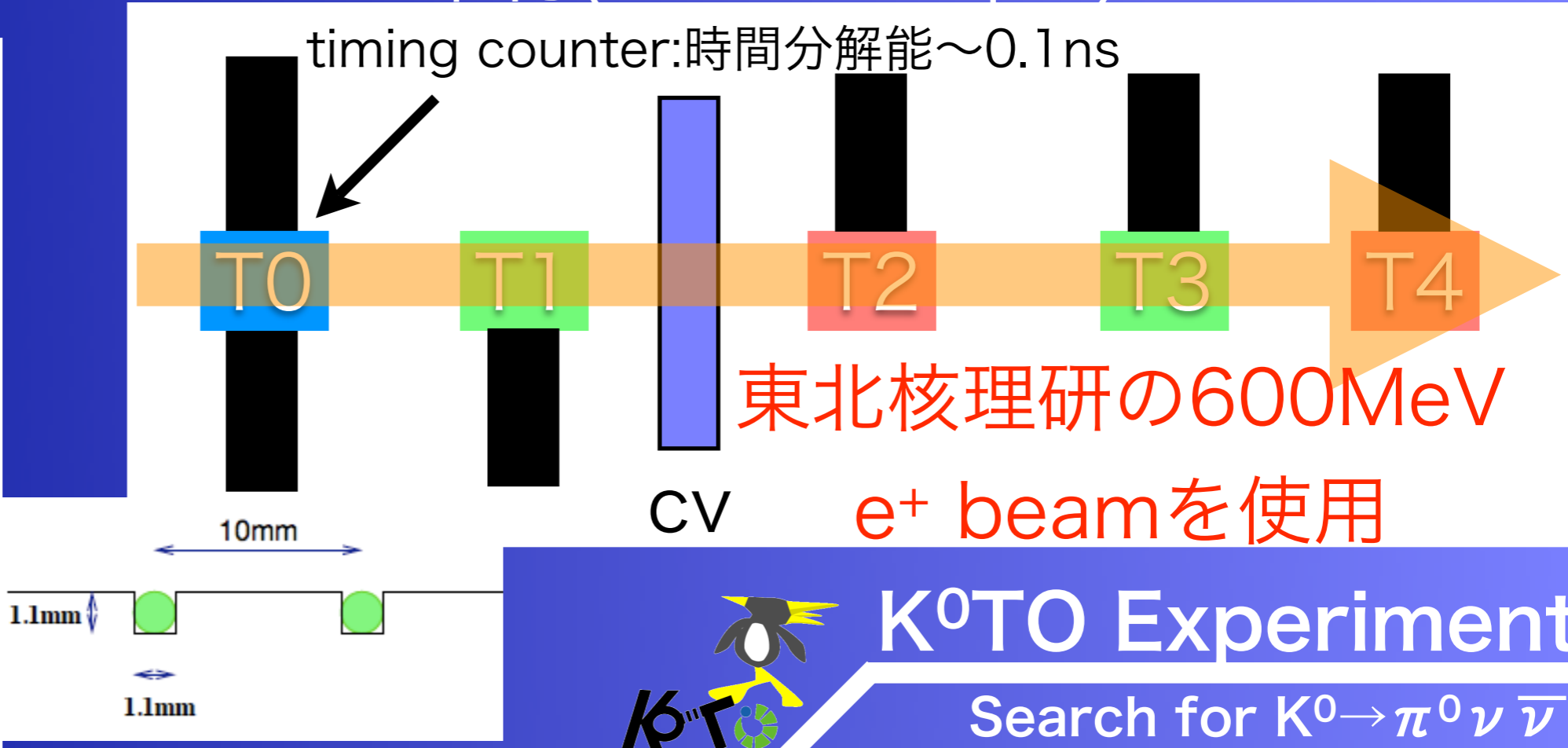
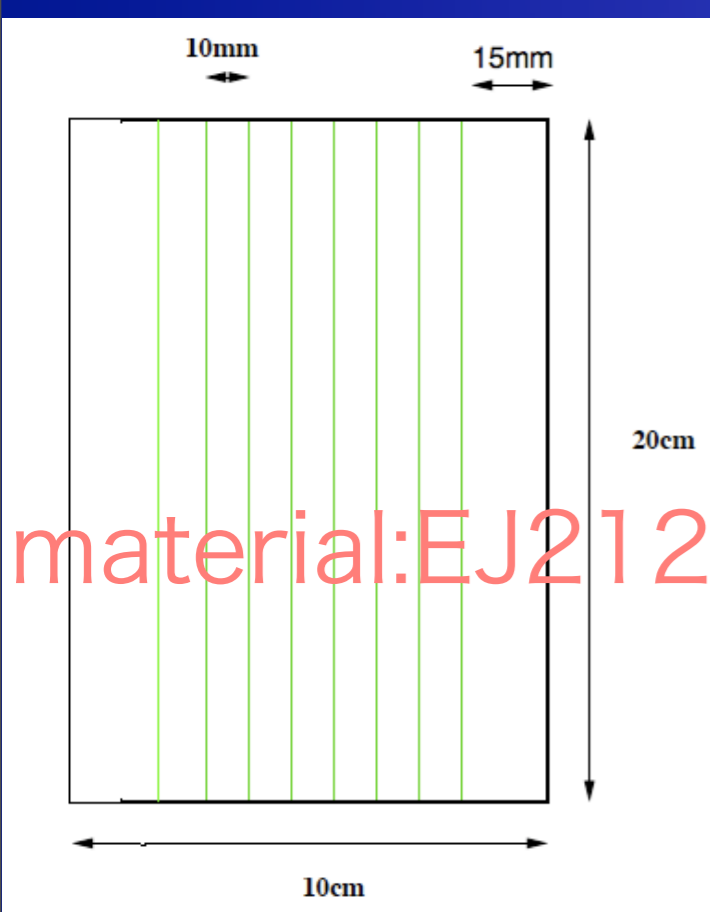


K⁰TO Experiment

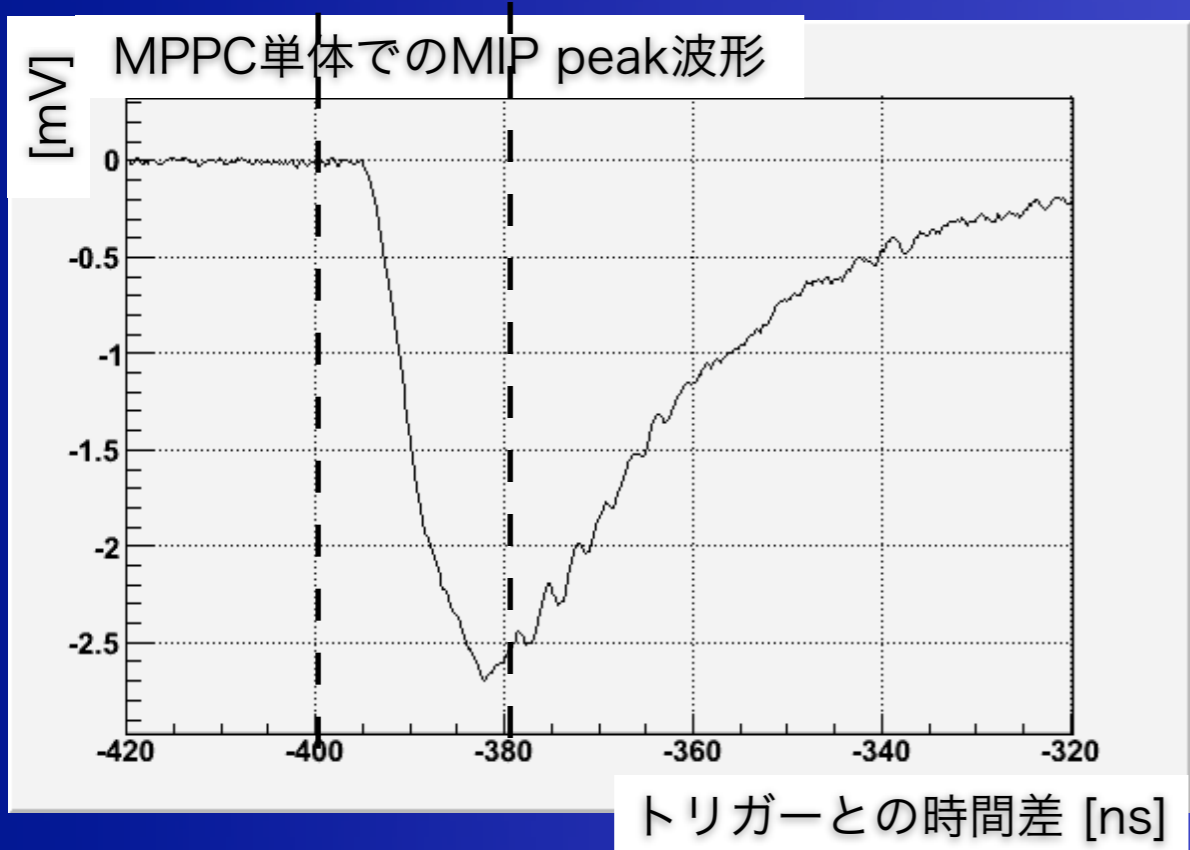
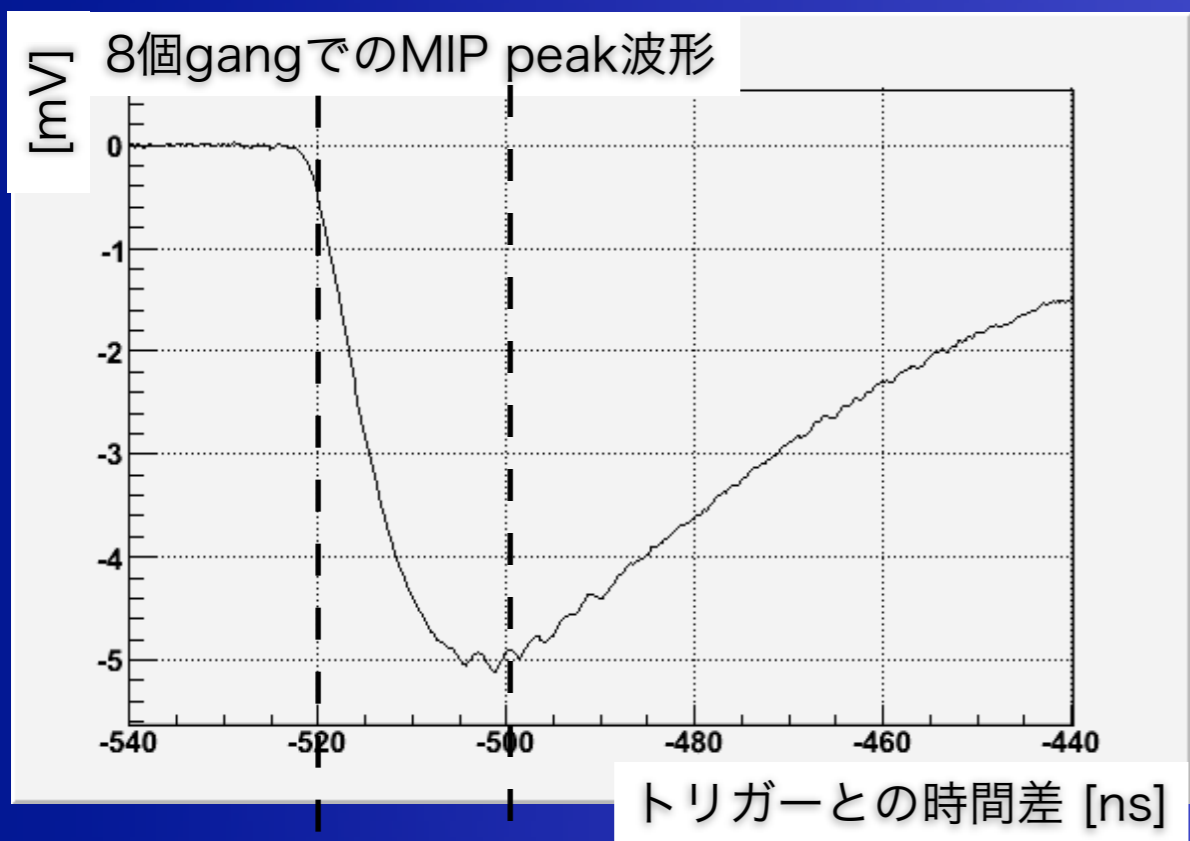
Search for $K^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$

プロトタイプの性能テスト

- 厚さ3mmのシンチレータに $\phi 1\text{mm}$ のY11を埋め込む(8本)
- キモトのレフトホワイトGR25DM(反射材)で包む
- ファイバーの両端はMPPPCで読み出した後ギャング
- 信号は周波数特性250MHzのPMT AMPで増幅
- timing counterの信号をトリガーにしてオシロスコープを使ってリモートでデータ取得(5GHz sample)



測定結果 1～8個gangと単体の波形比較～



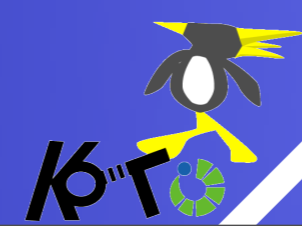
測定はAMPやケーブルの影響を取り除くためMPPCで読み出した直後にオシロスコープ(周波数特性1GHz)で波形を取得

8個gangで立ち上がり16ns
MPPC単体で立ち上がり10ns

予想通り時定数が長い方がより立ち上がりがなまる

時間分解能はできるのか?

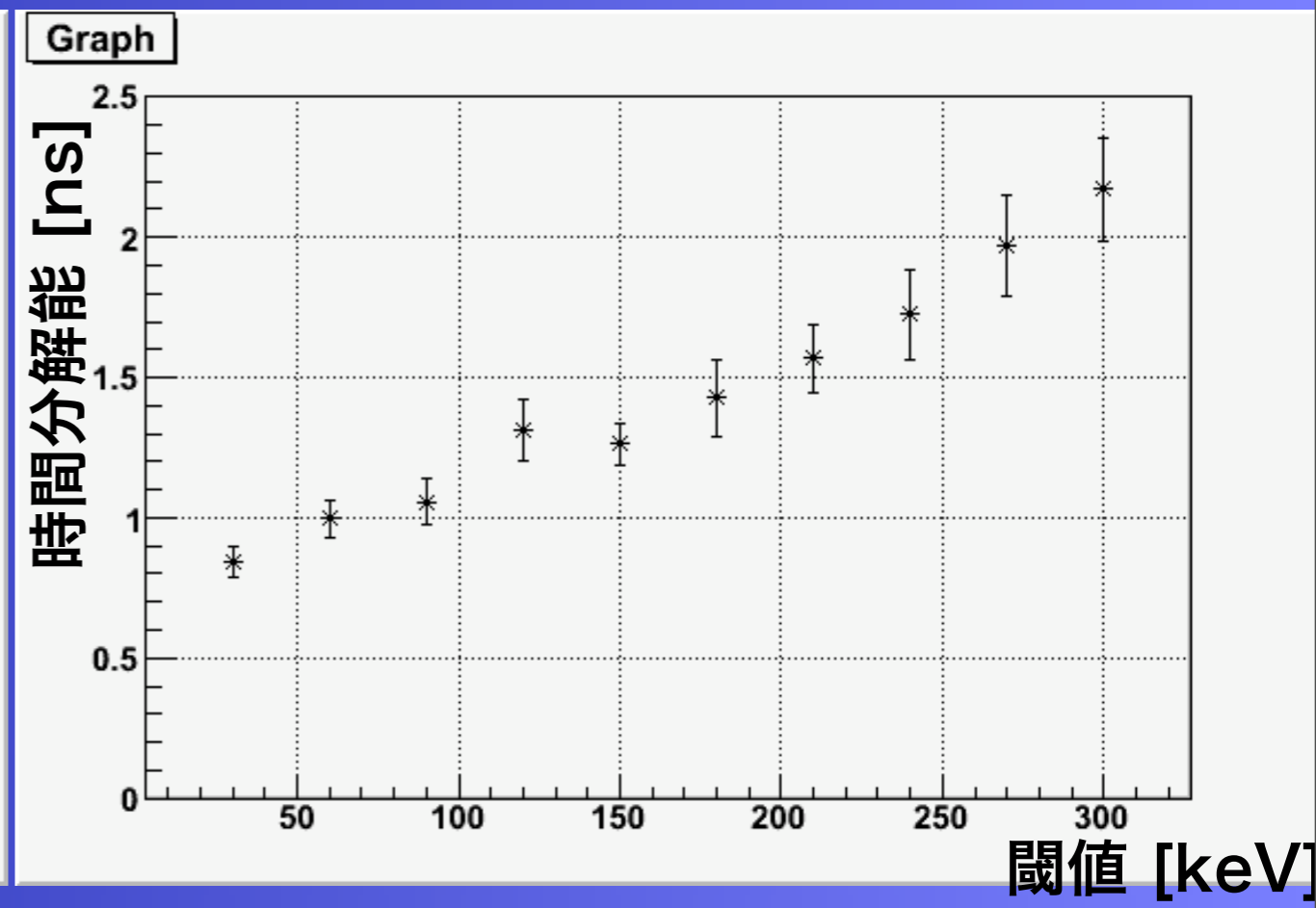
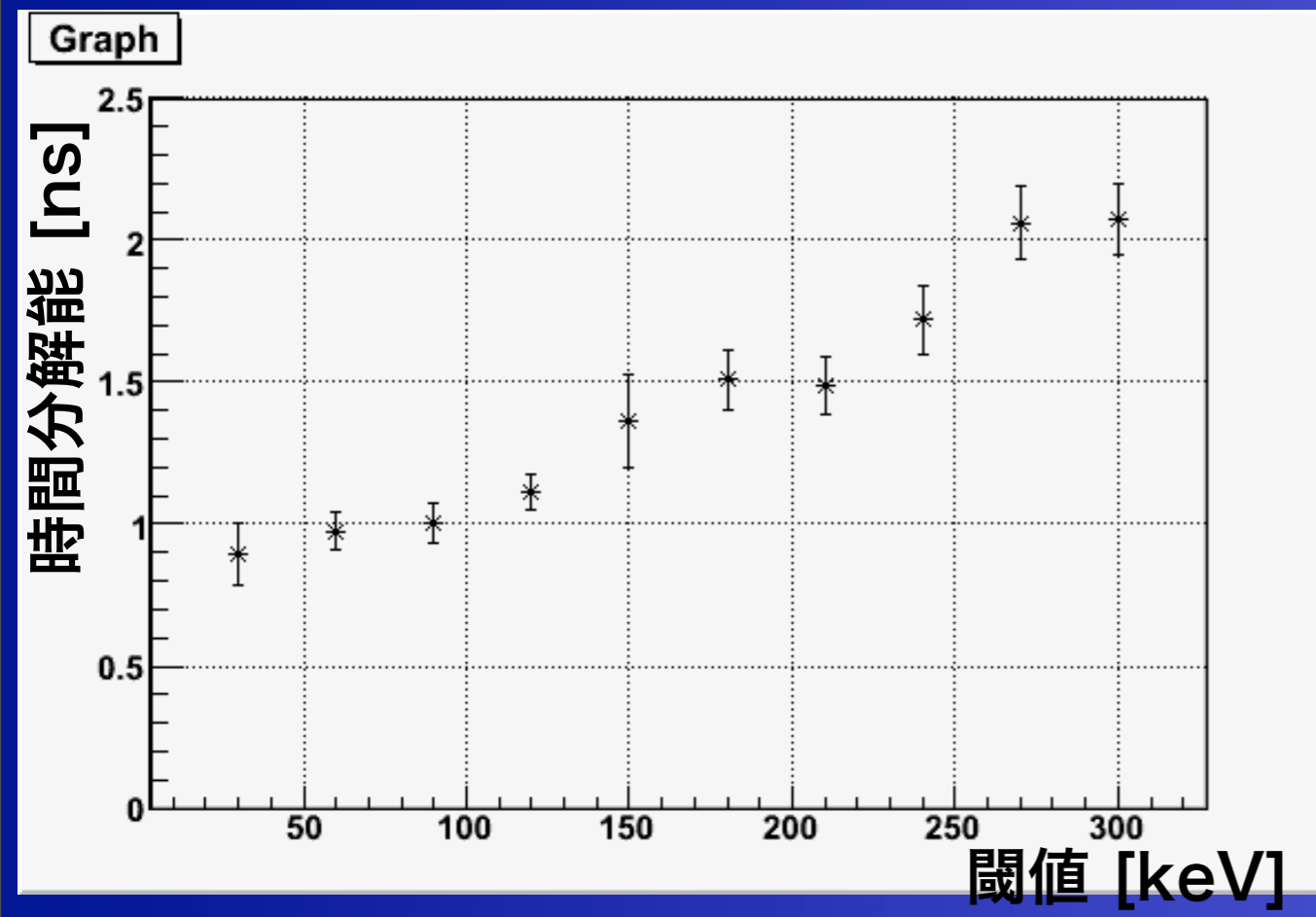
→Next page



K⁰TO Experiment

Search for $K^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$

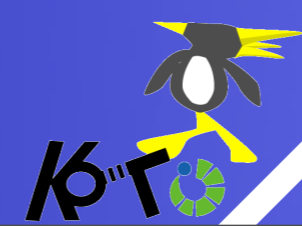
測定結果2～8個gang時の時間分解能～



左側読み出し

右側読み出し

- 閾値100keVで～1.2nsの時間分解能を達成。
→時間分解能の要求(<3ns)を満たすことを証明

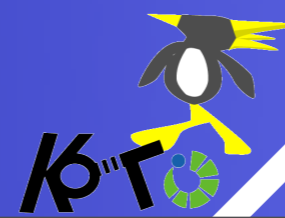


K⁰T0 Experiment

Search for $K^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$

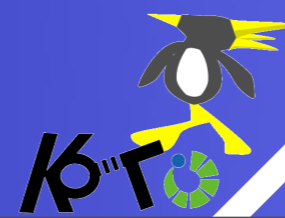
summary

- MPPC ganging readoutの特徴についての研究
 - gangすると波形が伸びる
 - 立ち下がりの時定数はgangするMPPCの数に比例する
→multi-pixelモデルを考えれば説明できる
- シンチ+波長変換ファイバー読み出し応用時の影響を評価
 - 時定数が伸びると立ち上がりがなまる効果が増大
 - プロトタイプでの性能評価
 - ~閾値100keVで1.2nsの時間分解能達成。時間分解能3ns以下というCVでの要求を達成。

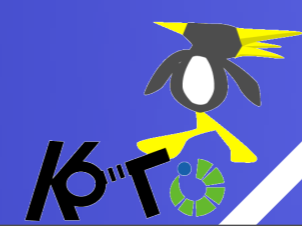


prospect

- 受光面3mm角MPPCの使用を検討
(3mm角 vs 1.3mm角8個gang)
- メリット
 - コストが現在の半分
 - ファイバー1本に対する受光面積を広く取れる
→光量の増大
- デメリット
 - dark countノイズが大きい。(8個gangの1.5倍程度)
 - intrinsicに時定数が長い
→我々の実験では許容範囲



はっくあっぷ

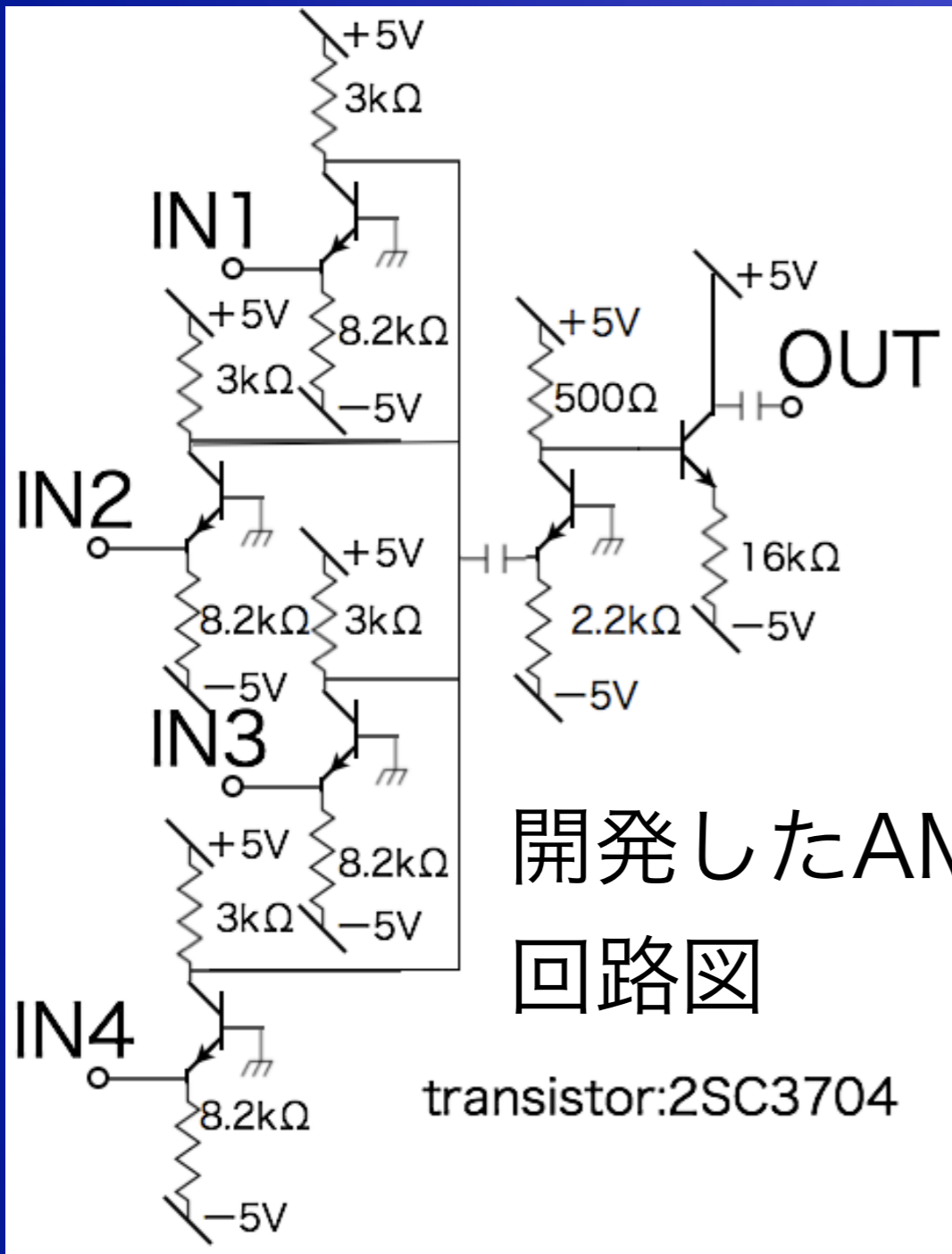


K⁰T0 Experiment

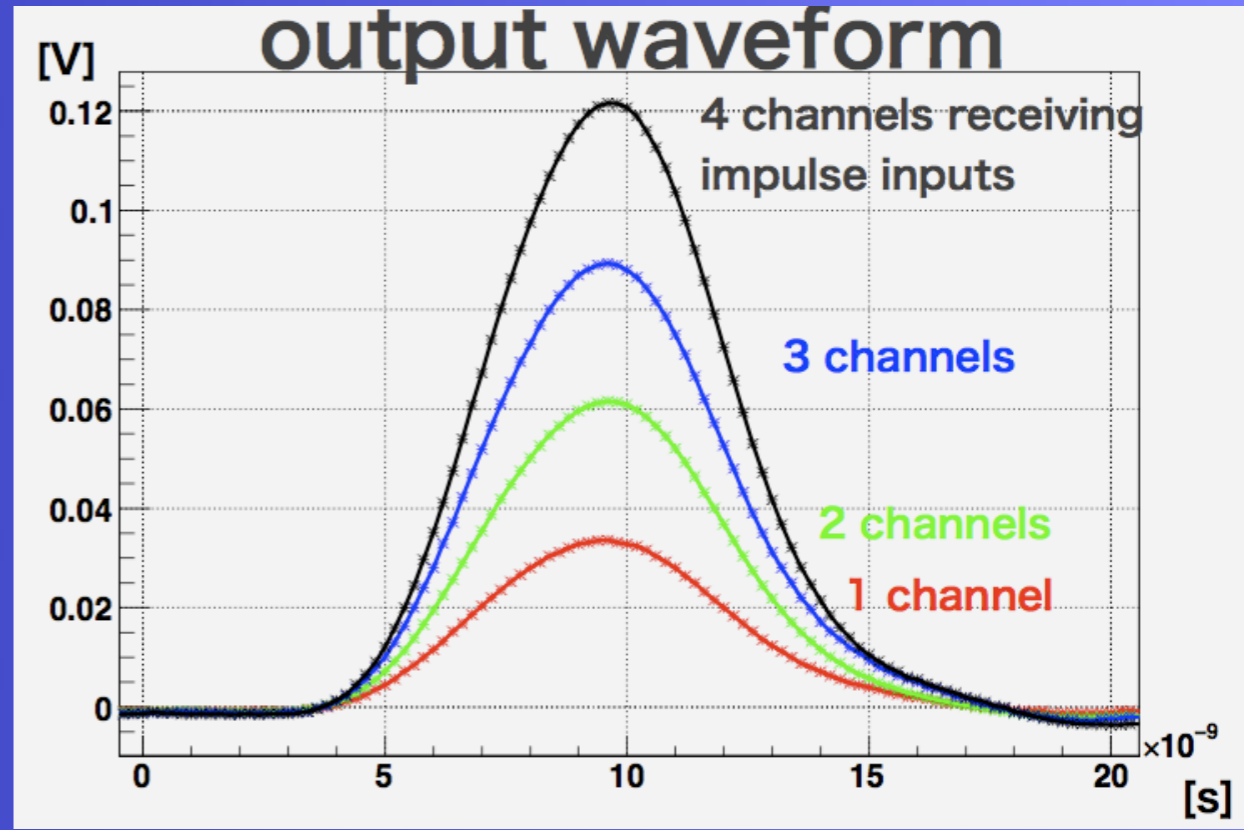
Search for $K^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$

gang時に波形が伸びる効果を打ち消す方法

- トランジスタを用いたヘッドアンプを各MPPCに接続して isolate した後にgangする。



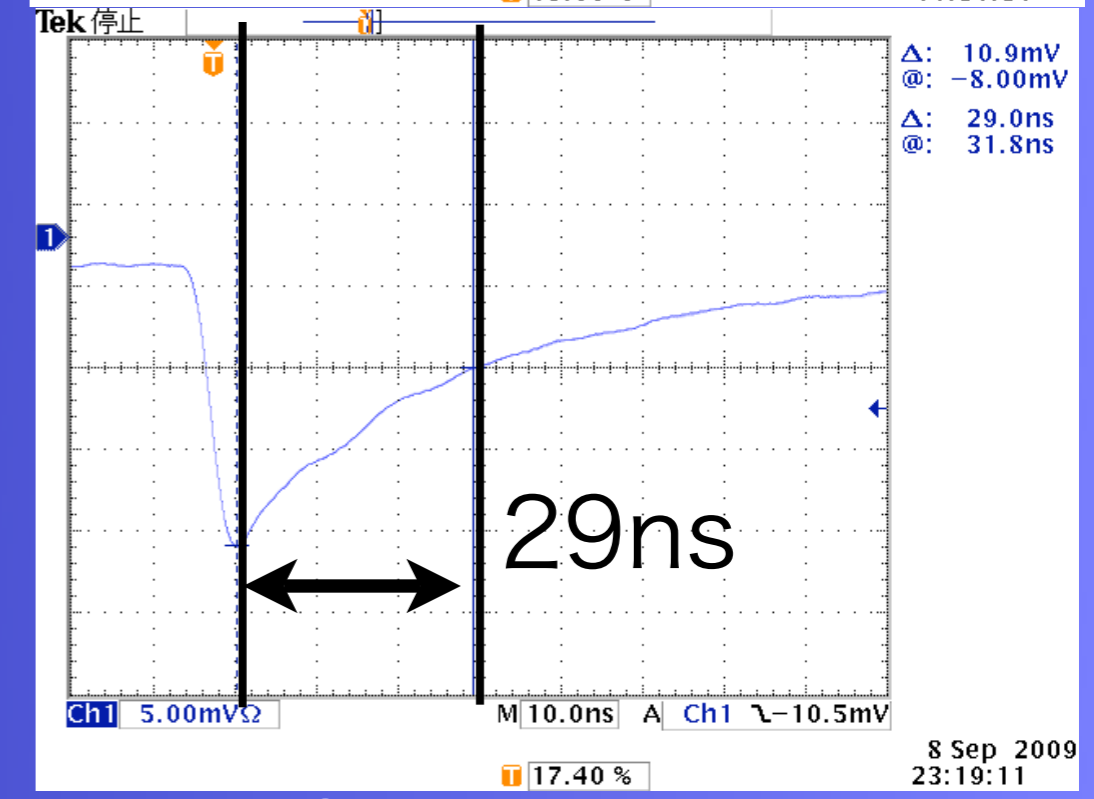
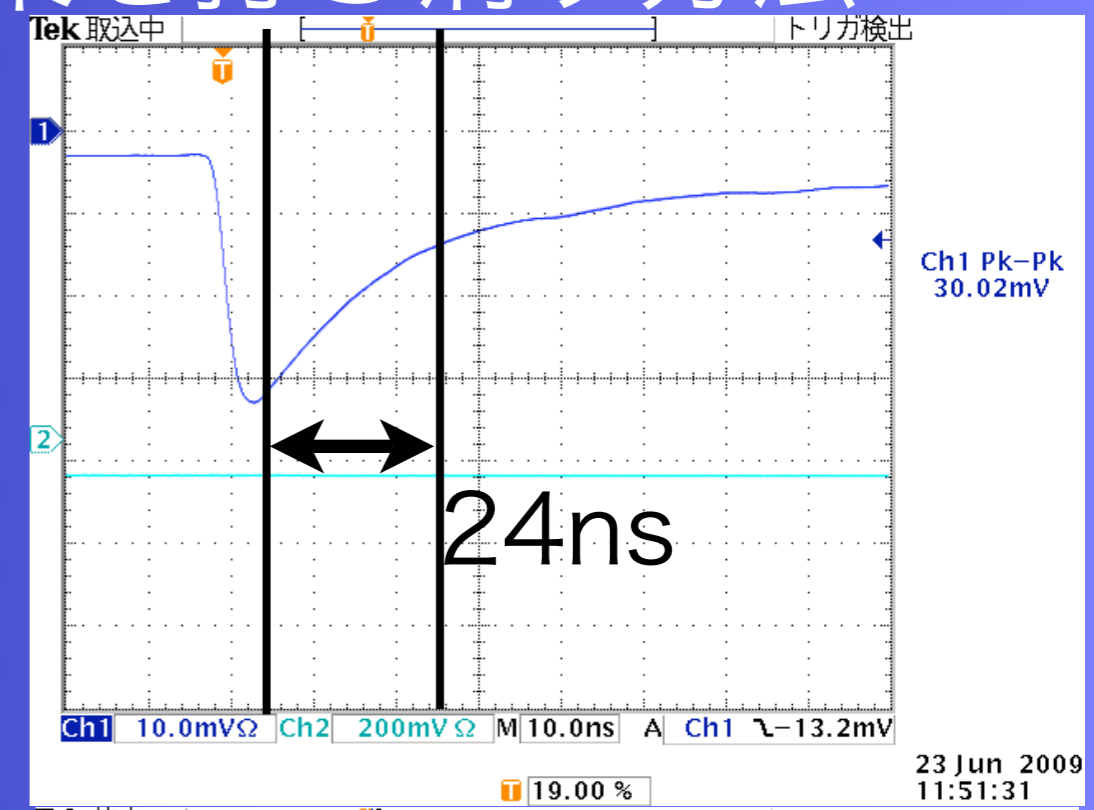
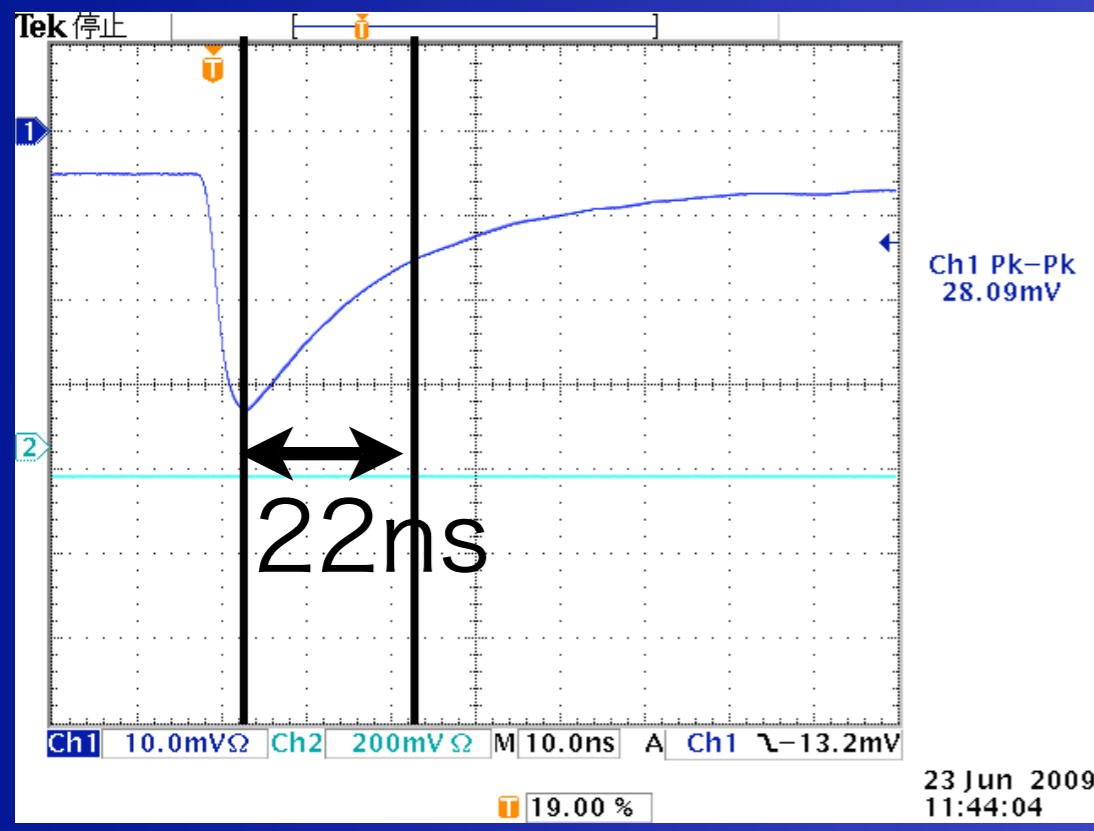
開発したAMPの回路図



impulse inputに対する応答

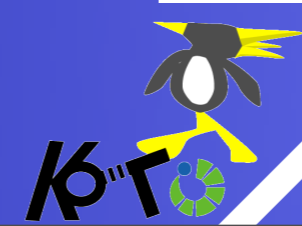


gang時に波形が伸びる効果を打ち消す方法



MPPC単体波形(今回制作したAMP)
 右上:今回開発したAMPでMPPC4個を読み出した場合
 場合
 右下:PMT AMPでMPPC4個gangを読み出した場合
 ※MPPC単体の波形は制作したAMPとPMT AMPで
 変化なし

**波形が伸びる効果を抑制する
 ことに成功!!**

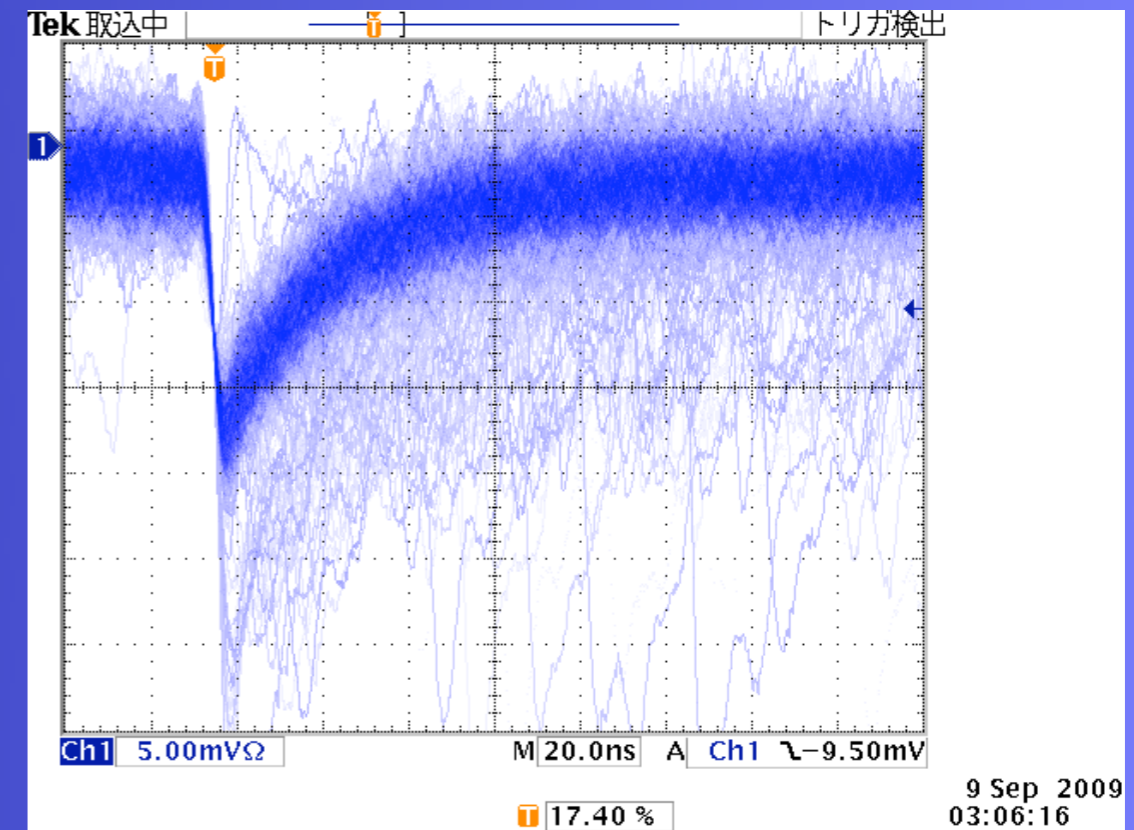
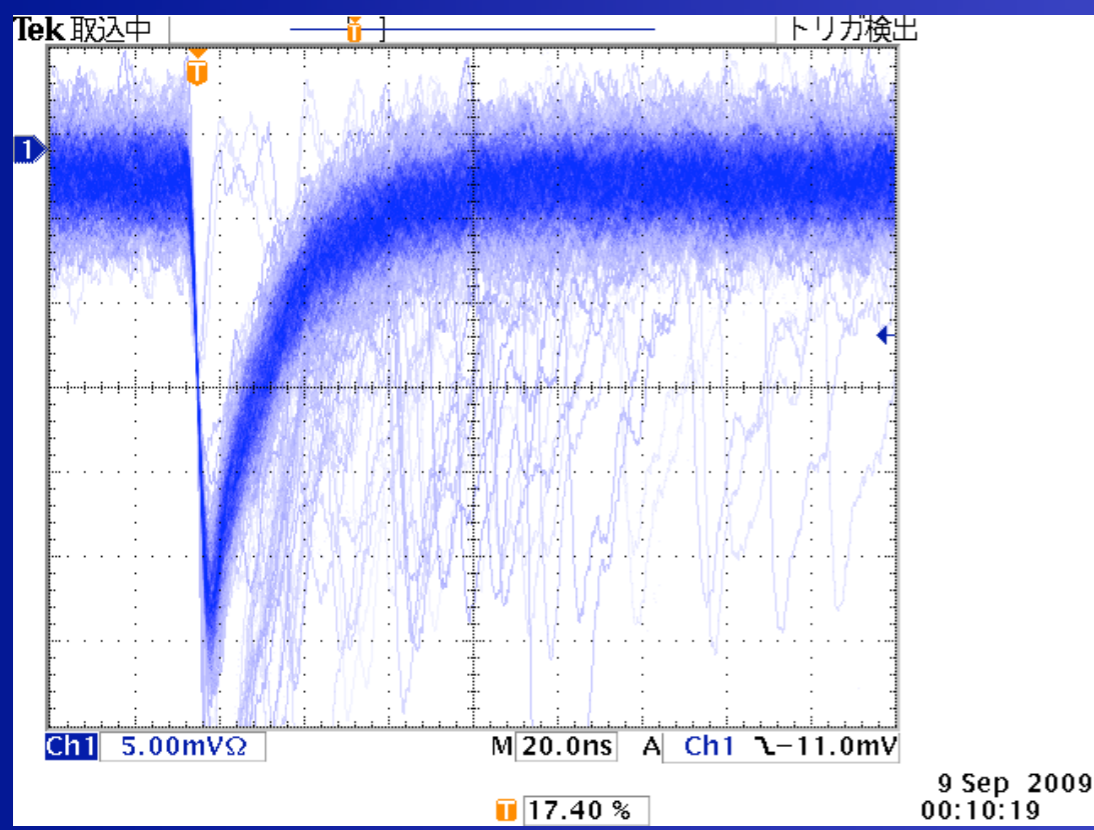


K⁰TO Experiment

Search for $K^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$

モデルの検証

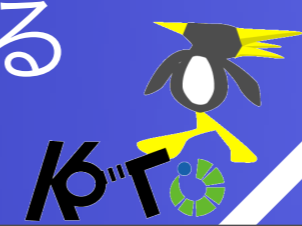
波形がpixel数に依存するなら受光面1.3mmに対し, 3mm角でも波形が伸びるはず



1.3mm角単体時定数 \sim 20ns

3mm角単体時定数 \sim 32ns

1.3mm角は静電容量はキャリブレーションから116fF, 115fFであった。もしクエンチング抵抗が等しいとするとmulti-pixel modelで説明できる

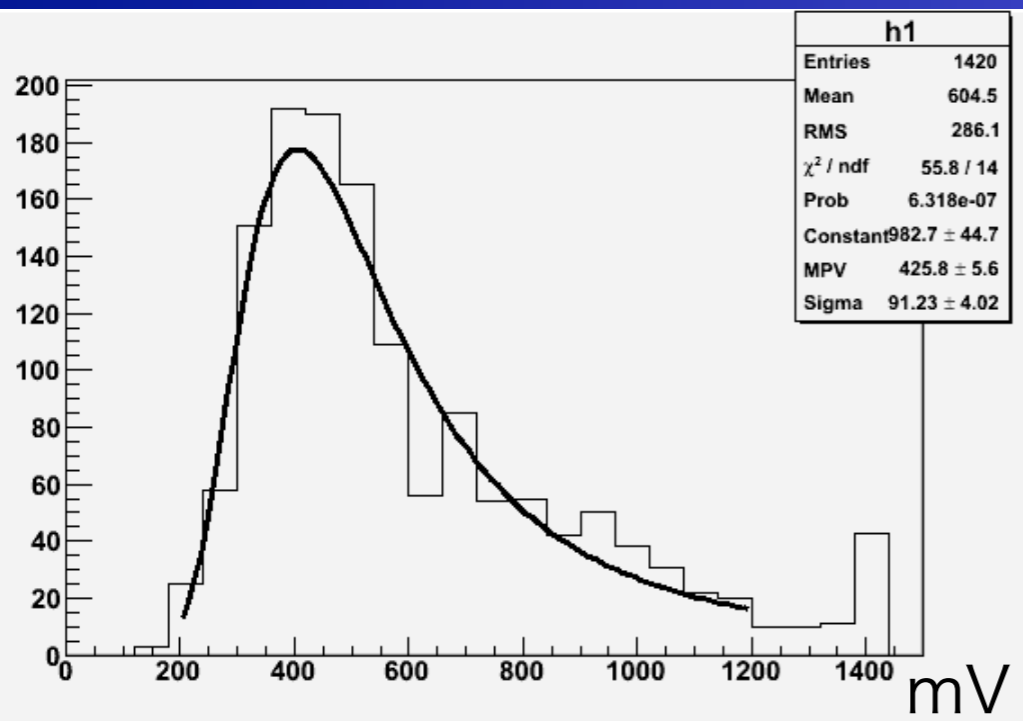


K⁰TO Experiment

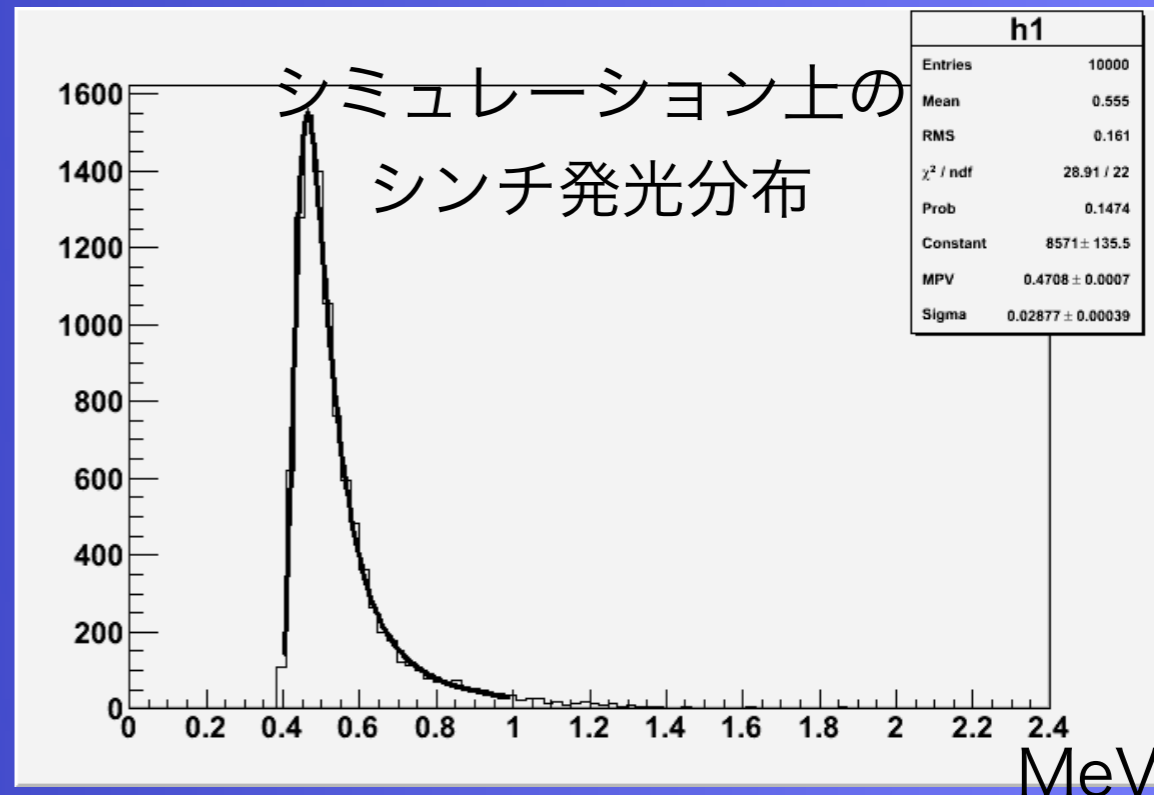
Search for $K^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$

時間分解能解析方法1

1. 波形データからMIPピークでの波高をもとめ、エネルギーに焼き直す。

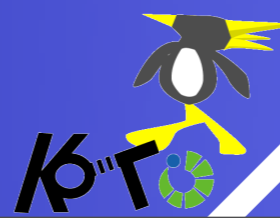


各波形からとったピークの分布を
ランダウでfit



シミュレーションを行い、波形データ
と比較しkeV当たりの波高に換算する

ビームテストではノイズの問題で絶対的な光量は測定
でき無かった

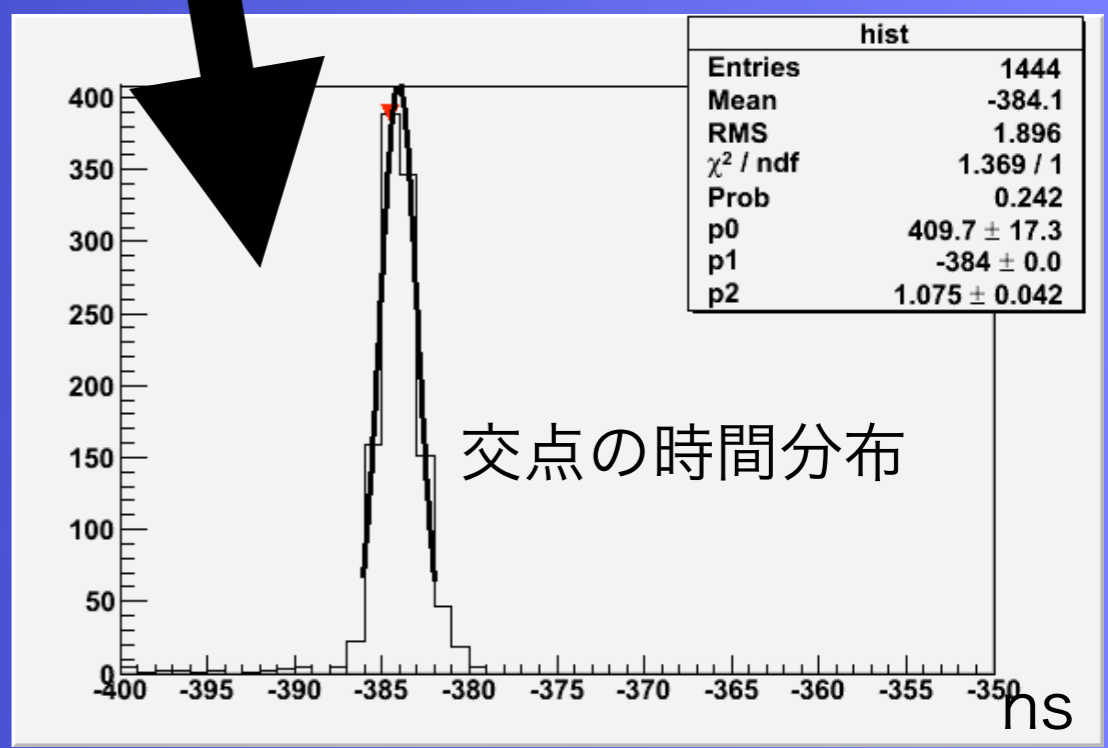
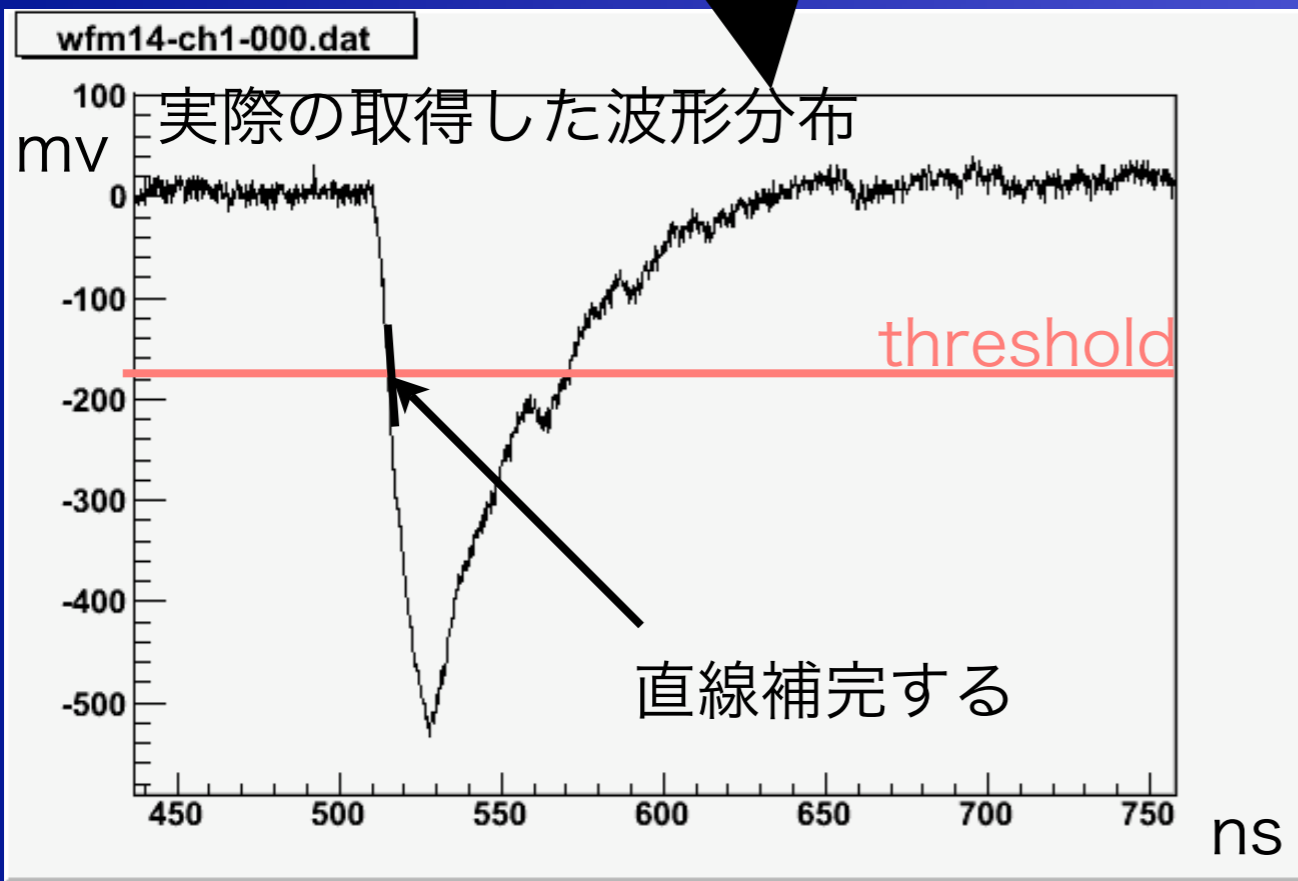


K⁰TO Experiment

Search for $K^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$

時間分解能解析方法2

- 各エネルギー-thresholdでの時間分解能を計算
 (それぞれの波形においてあるthresholdを超えた点とその前の点で直線補完してthresholdとの交点の時間の分布を見た)
- 交点の分布をfitして時間分解能とした

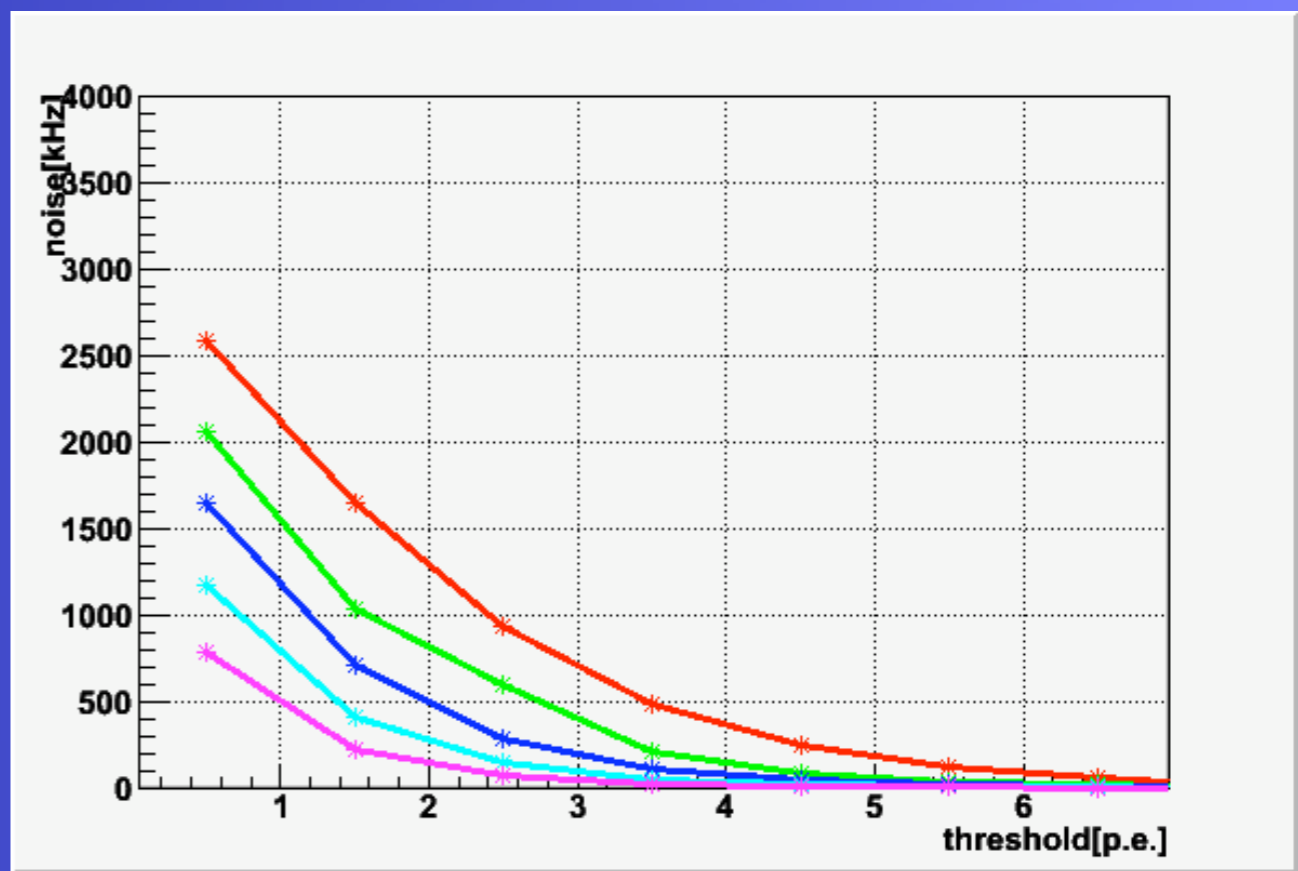
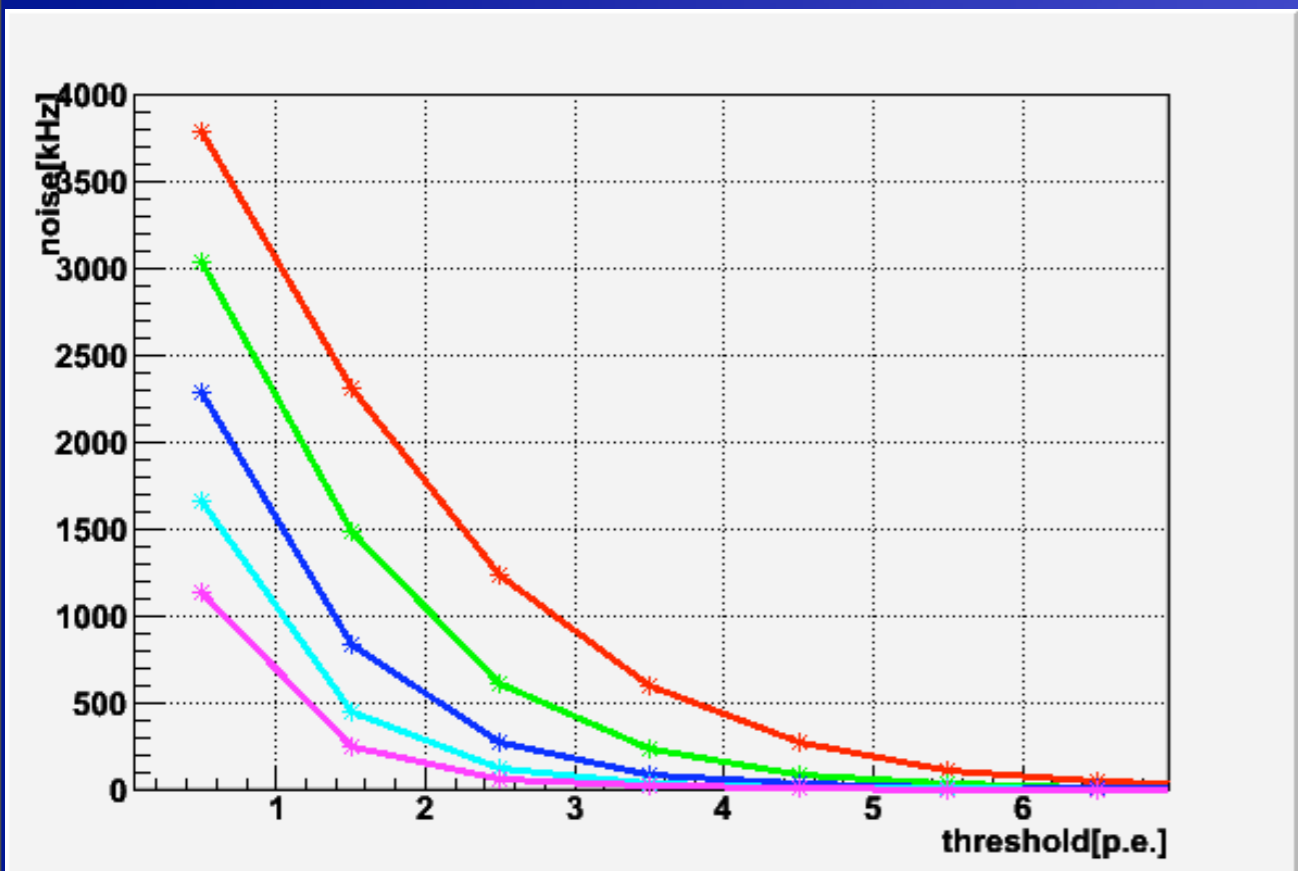


K⁰TO Experiment

Search for $K^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$

3mm角 vs 1.3mm角 8個gang

dark count noise ($\Delta V = 1.2 \pm 0.05$)

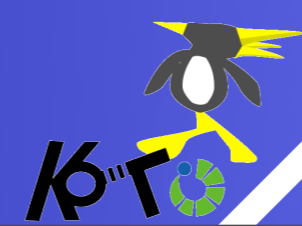


3mm角

赤から順に20°C, 15°C, 10°C, 5°C, 0°Cを示す。

ノイズは1.3mm角8個ギャングの約 1.5倍

1.3mm角x8



K⁰TO Experiment

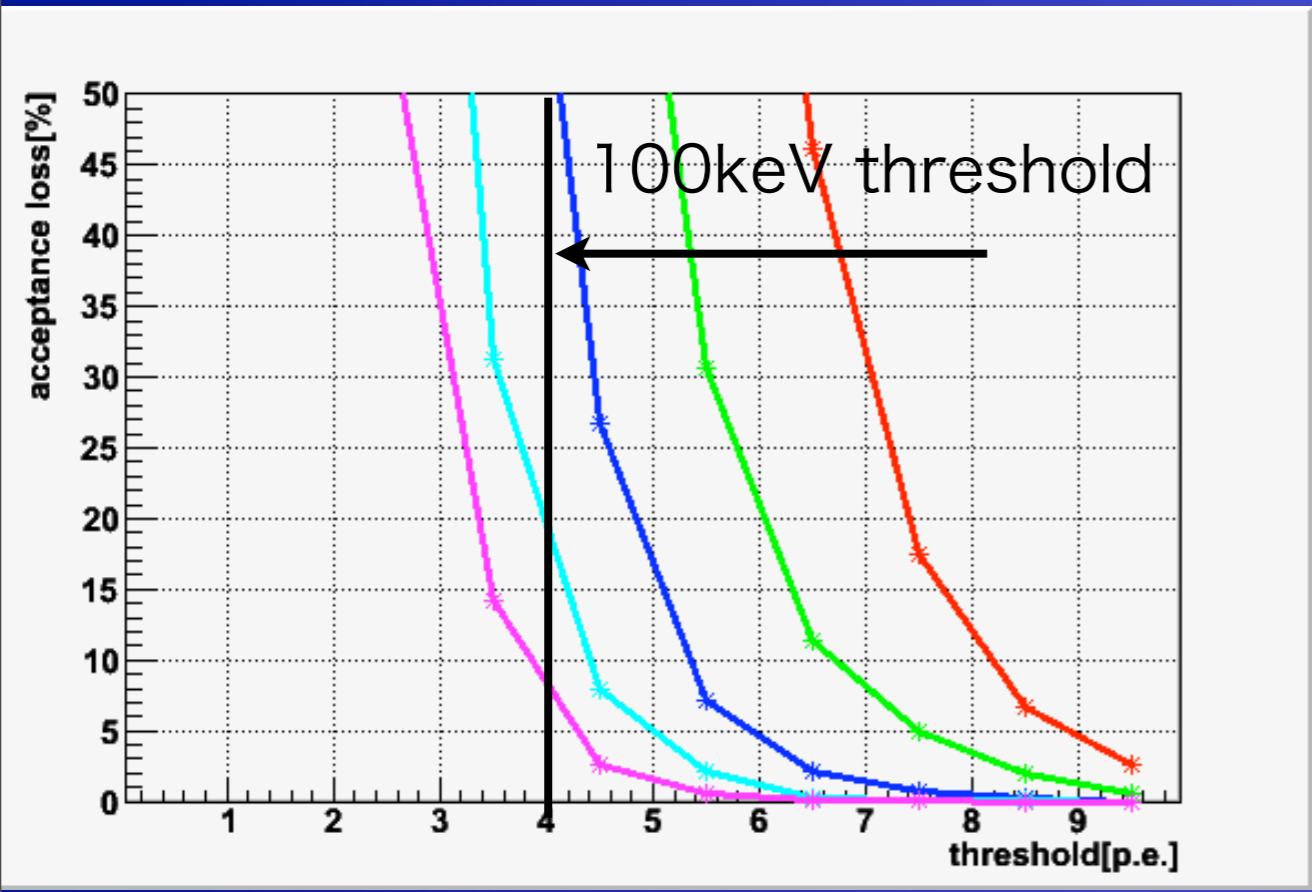
Search for $K^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$

3mm角 vs 1.3mm角 8個gang

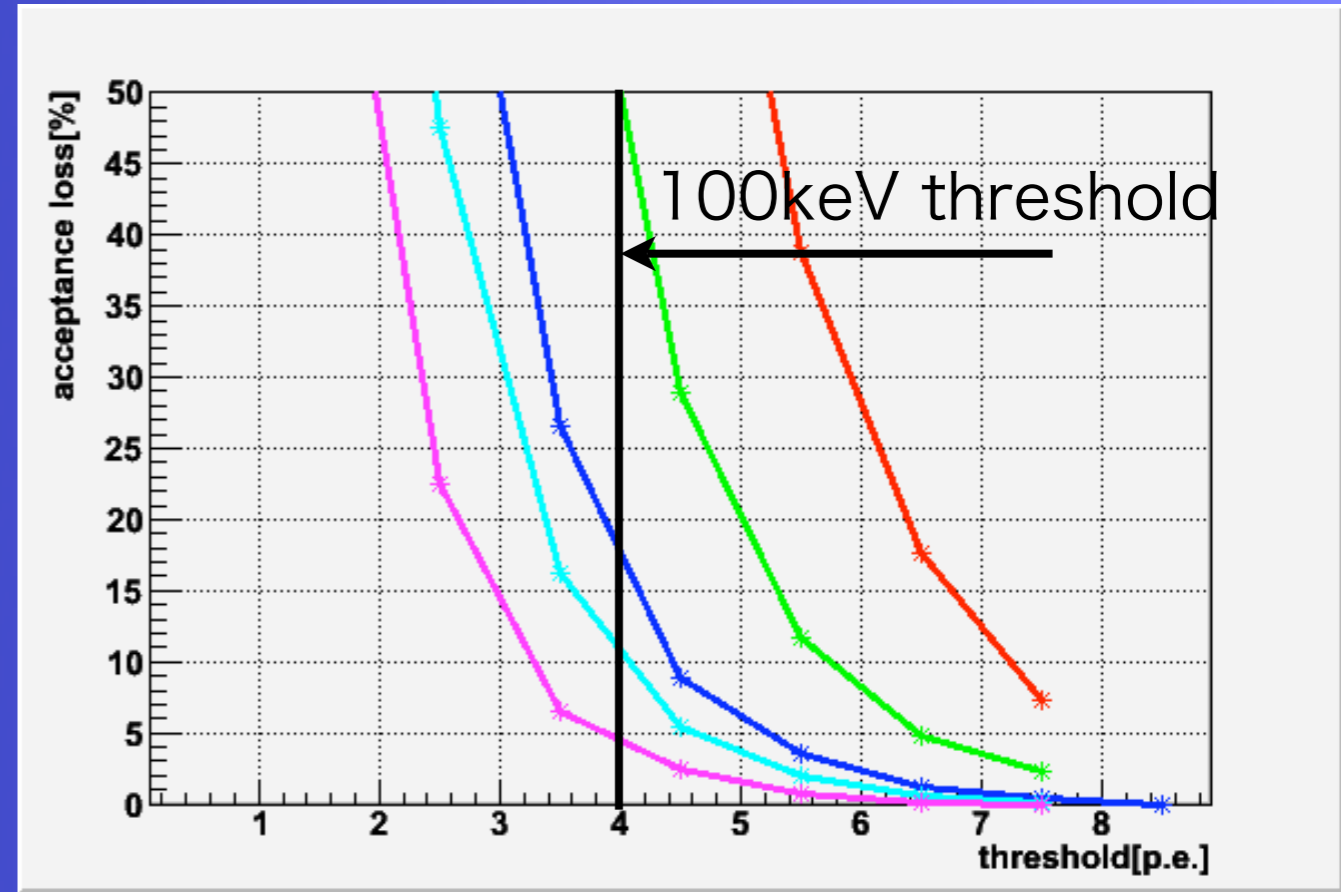
～accidental lossの計算～

- 全channelのorで考える

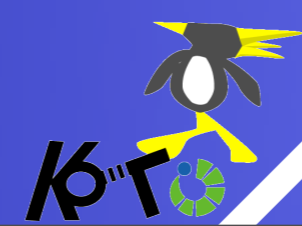
$$\text{loss} = \text{dark count rate} \times \text{time window} \times \# \text{ of ch}$$



3mm角



1.3mm角x8



K⁰TO Experiment

Search for $K^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$