

K⁰TO実験のCsIカロリメータの 時間性能の評価

京大理、KEK^A、岡山大^B

増田孝彦、関繁人、内藤大地、前田陽祐

河崎直樹、塩見公志、南條創

野村正^A、笹尾登^B

for the K⁰TO Collaboration



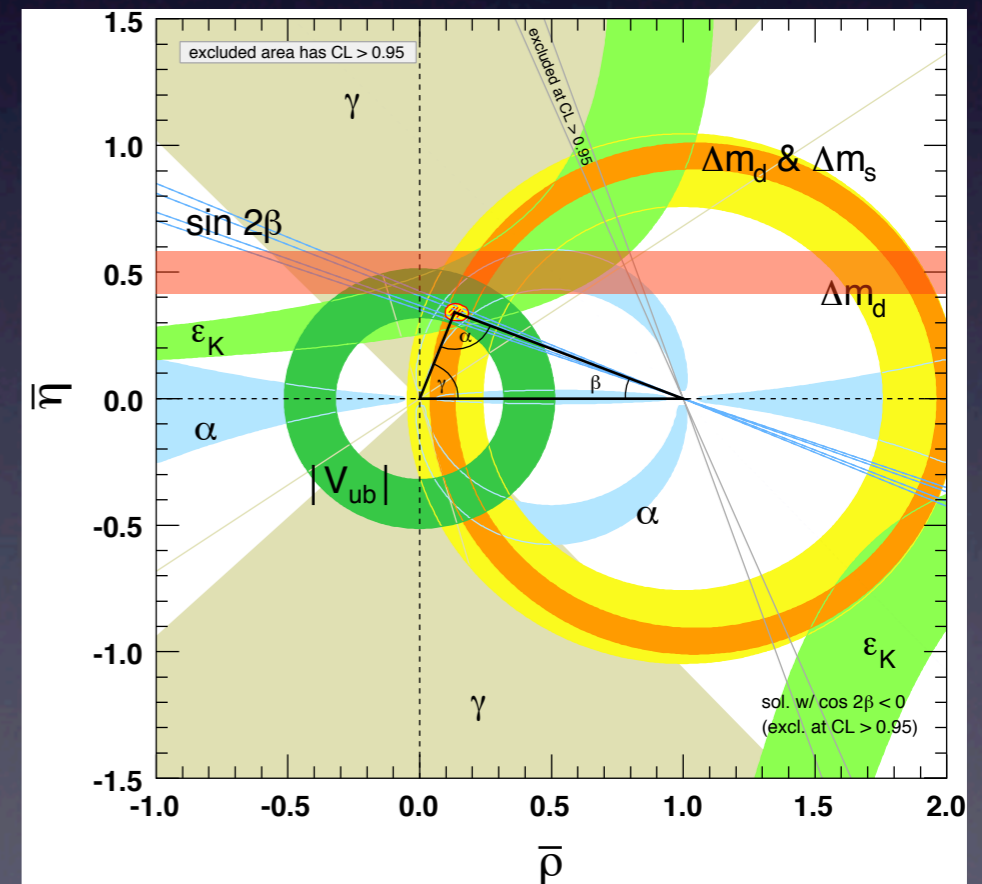
- Introduction
 - K⁰TO実験
 - CsIカロリメータ
 - 読み出しエレクトロニクス
- 時間情報の評価
 - 宇宙線
 - 時間オフセット(t_0)測定
 - 時間分解能
 - 電磁シャワー
 - 時間分解能

K⁰TO experiment

- K⁰TO (K⁰ at TOkai)
 - $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$: 長寿命中性K中間子(K_L)の稀崩壊探索実験
 - $\text{Br}(K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}) \propto \eta^2 \sim 2.5 \times 10^{-11}$

- 実験目的

- $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊事象の発見
- 崩壊分岐比測定による
CPVパラメータ η の直接決定

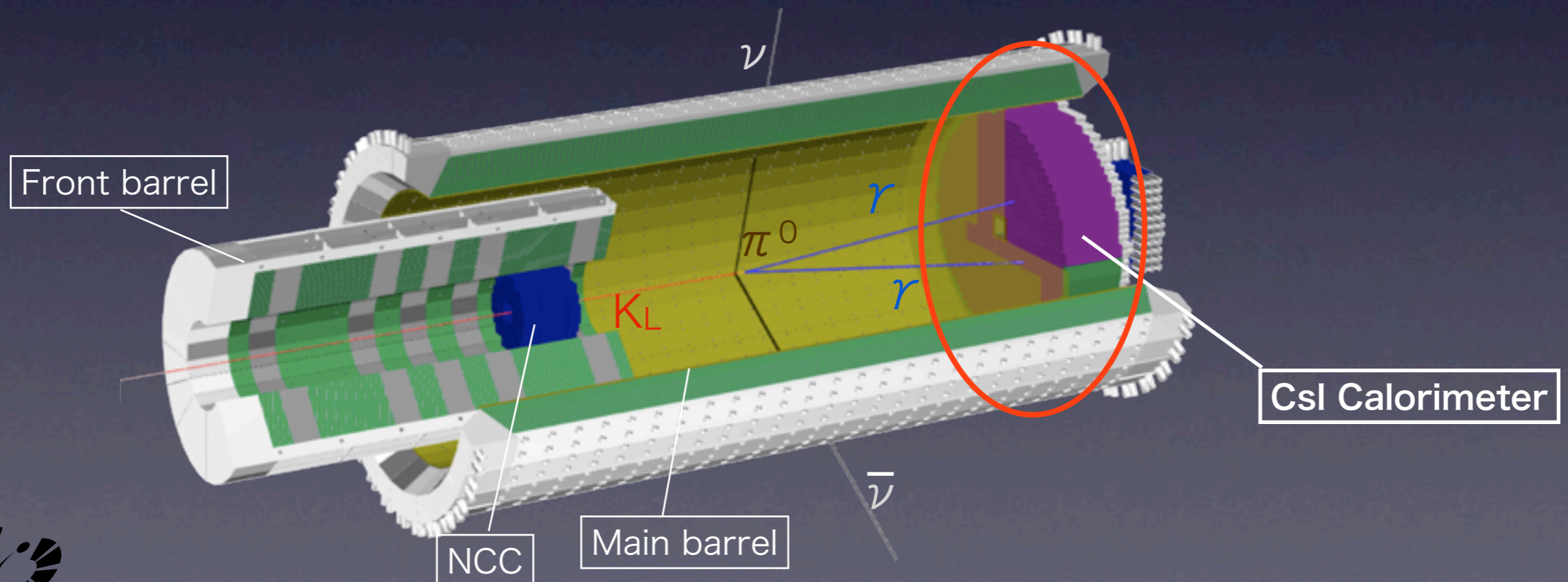


K. Nakamura *et al.* (Particle Data Group), J. Phys. G **37**, 075021 (2010)



Concept

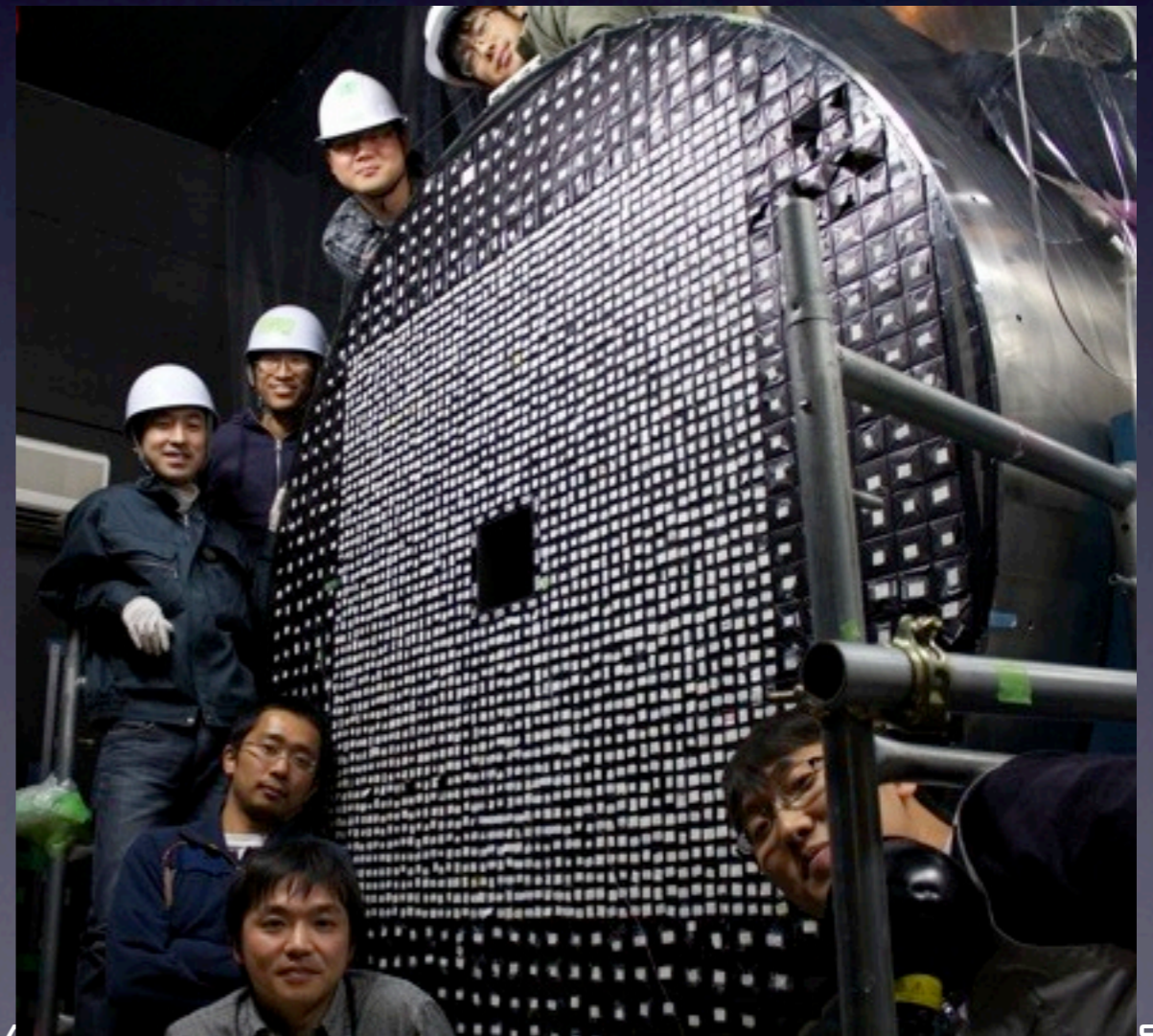
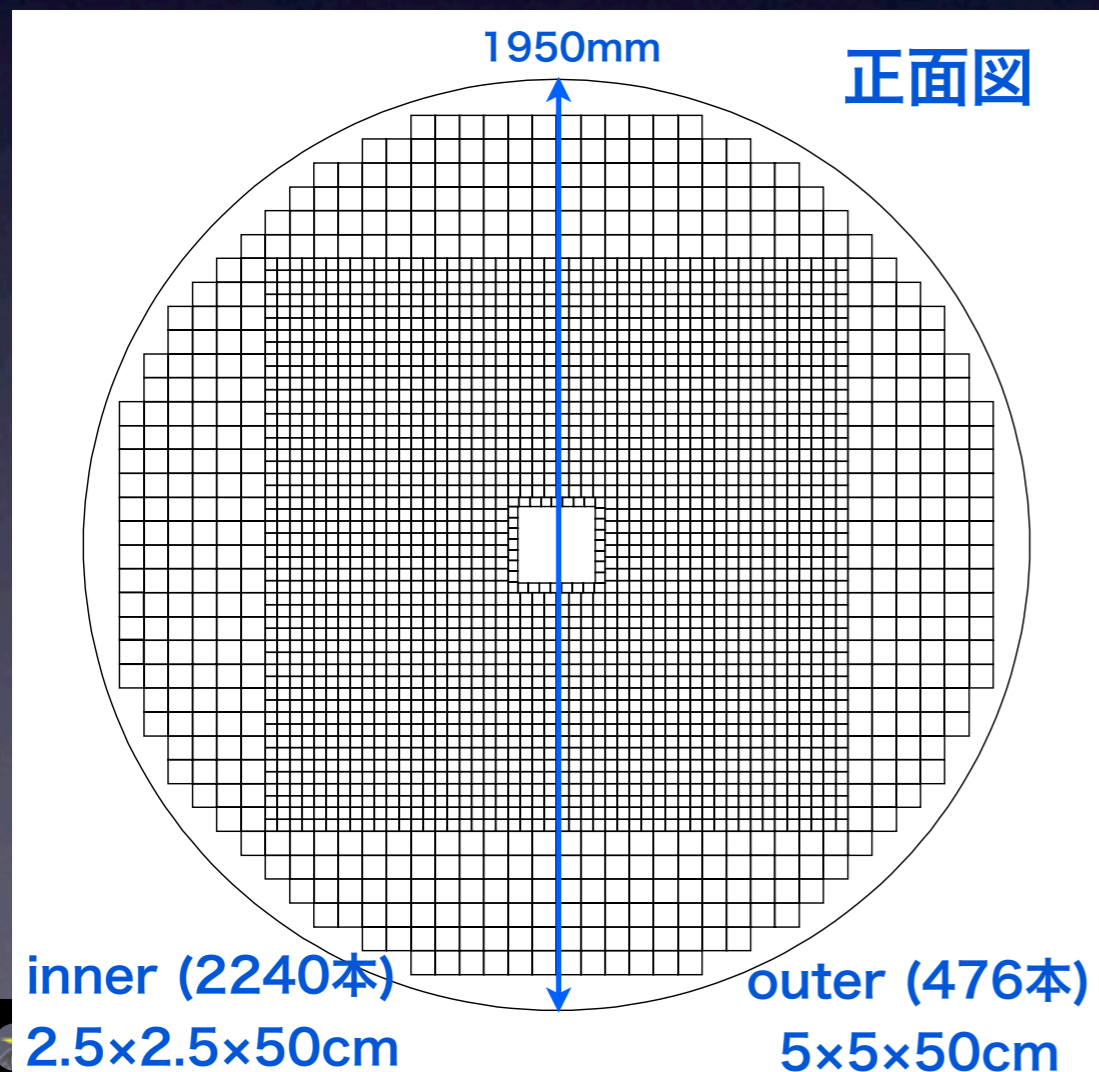
- 信号の同定
 - ν は検出できないので、 π^0 からの崩壊粒子を見る
 - π^0 からの 2γ
 - CsIカロリメータで γ の位置・エネルギーを求め、 π^0 を再構成
 - K_L と π^0 の運動方向のずれ(ν による運動量移行の存在)
 - その他に何も粒子が無い



CsI calorimeter

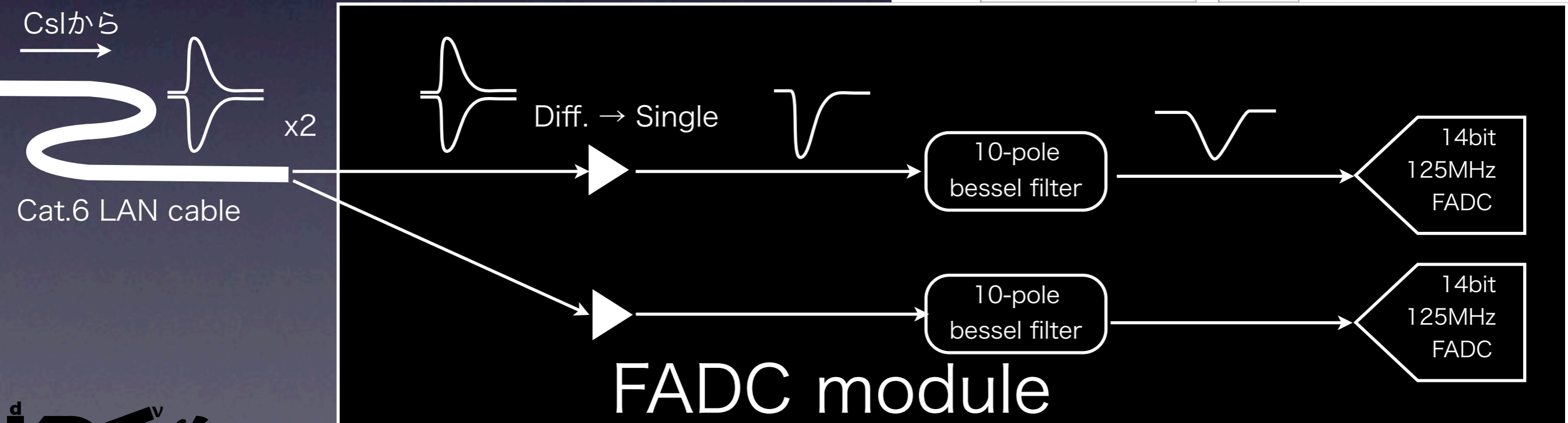
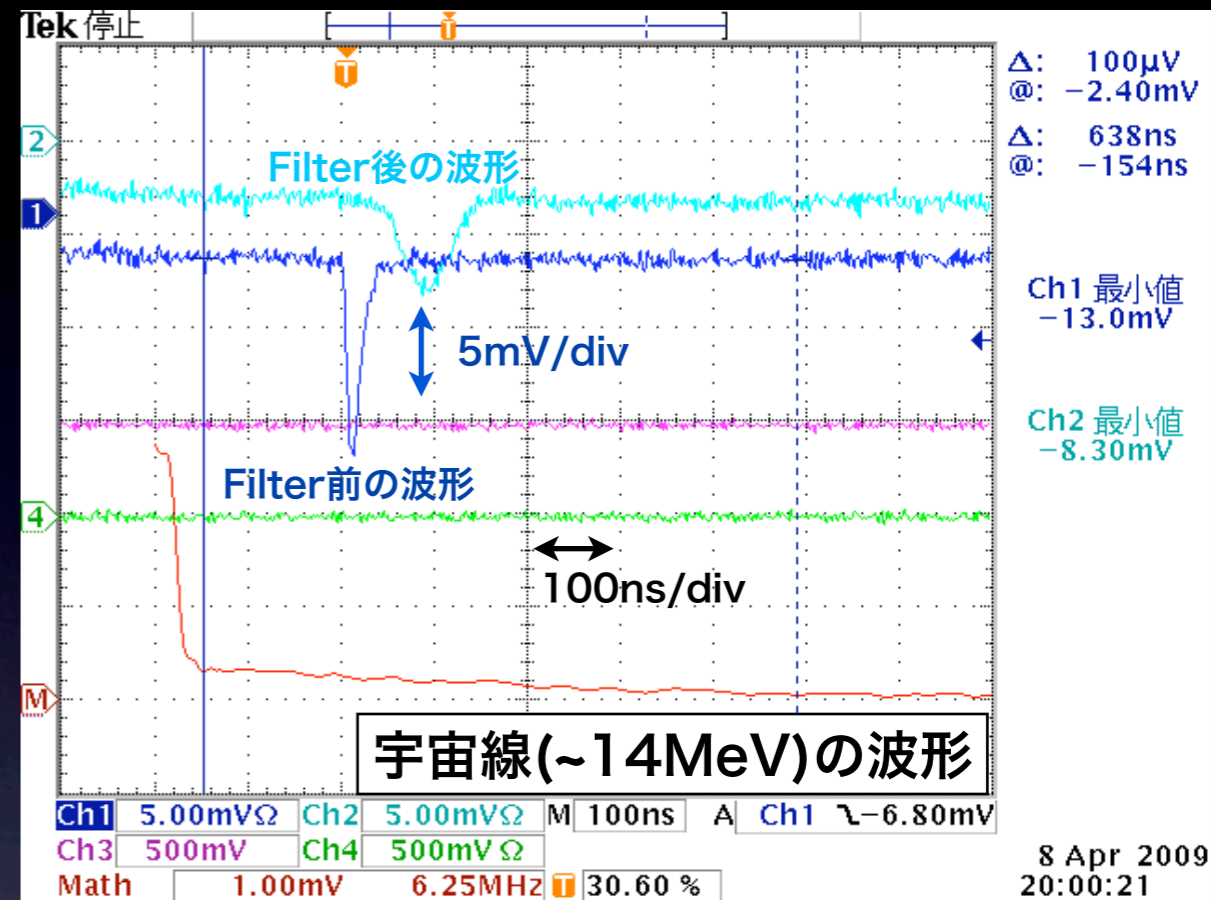
概要

- 長手方向50cm、2716本のpure CsI結晶を使用
 - KTeV実験の再利用品
- 中央部：2.5×2.5cmの結晶を48×48本正方形に並べる
- 外周部：5×5cmの結晶を直径190cmの円形に並べる



Read out scheme

- CsIの発光はPMTで光電変換し、
プリアンプで差動信号に変換して長距離伝送
- 10-pole filter で波形を整形(右図)
- 14bit 125MHz FADCで読み出し
 - 3000chを限られた予算の中でAD変換するため、
高速なFADCは使わず、波形を鈍らせる方式を採用



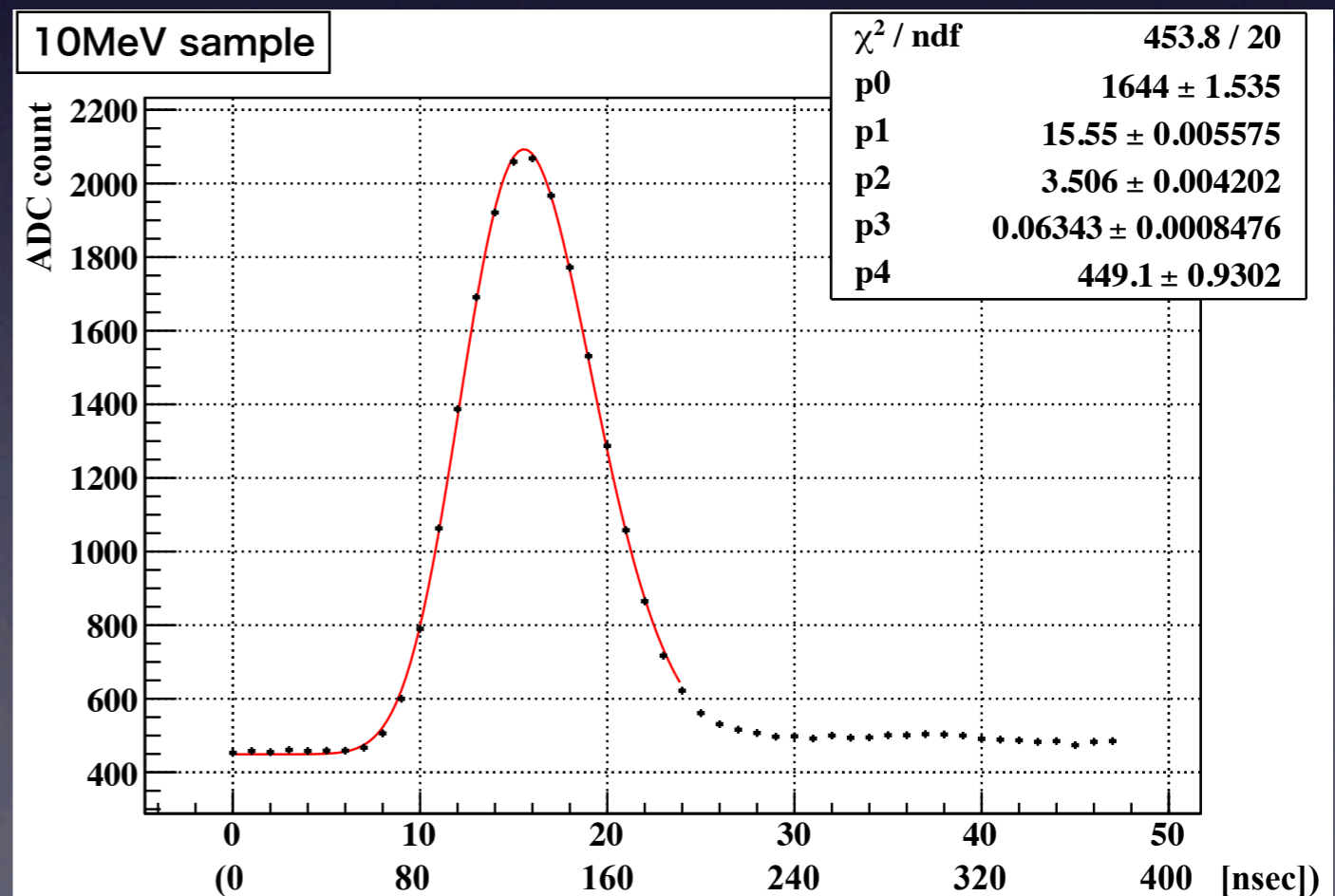
CsI波形サンプル

- 実際にビームを用いて得られた波形サンプル(右下図)
- この波形からどのように時間情報を取り出す?
- わざと波形を鈍らせているが、得られる時間分解能は?

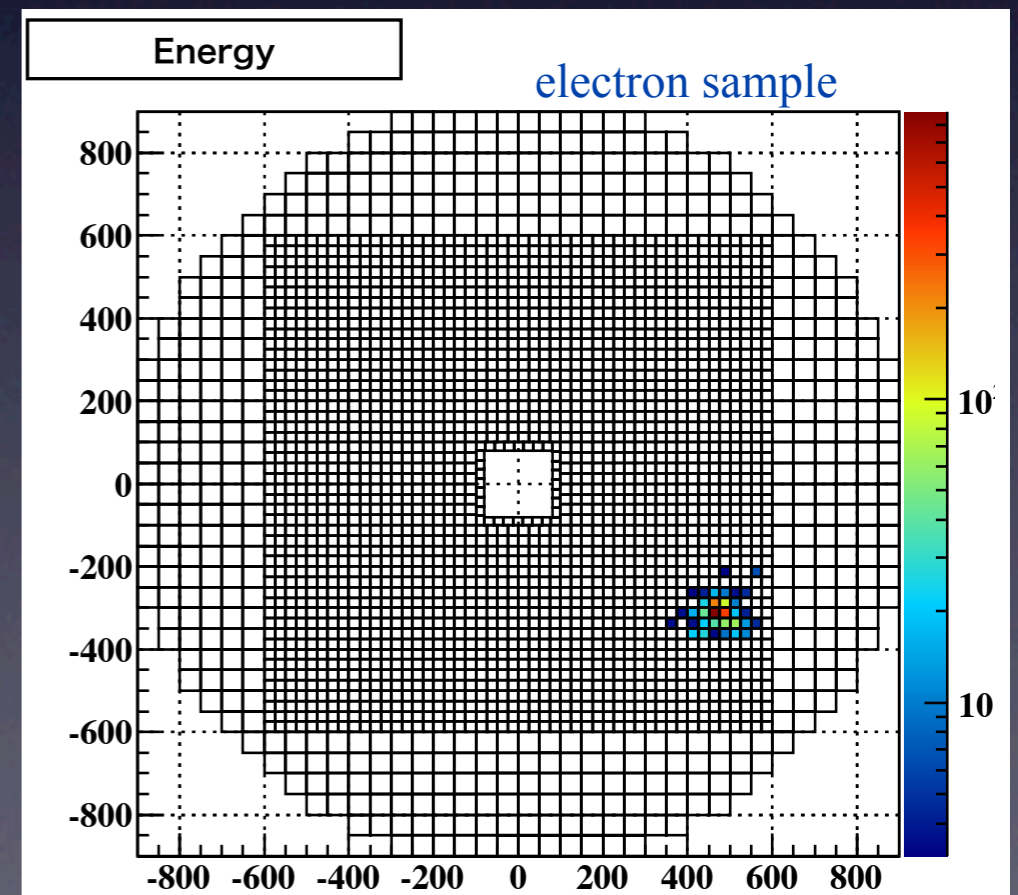
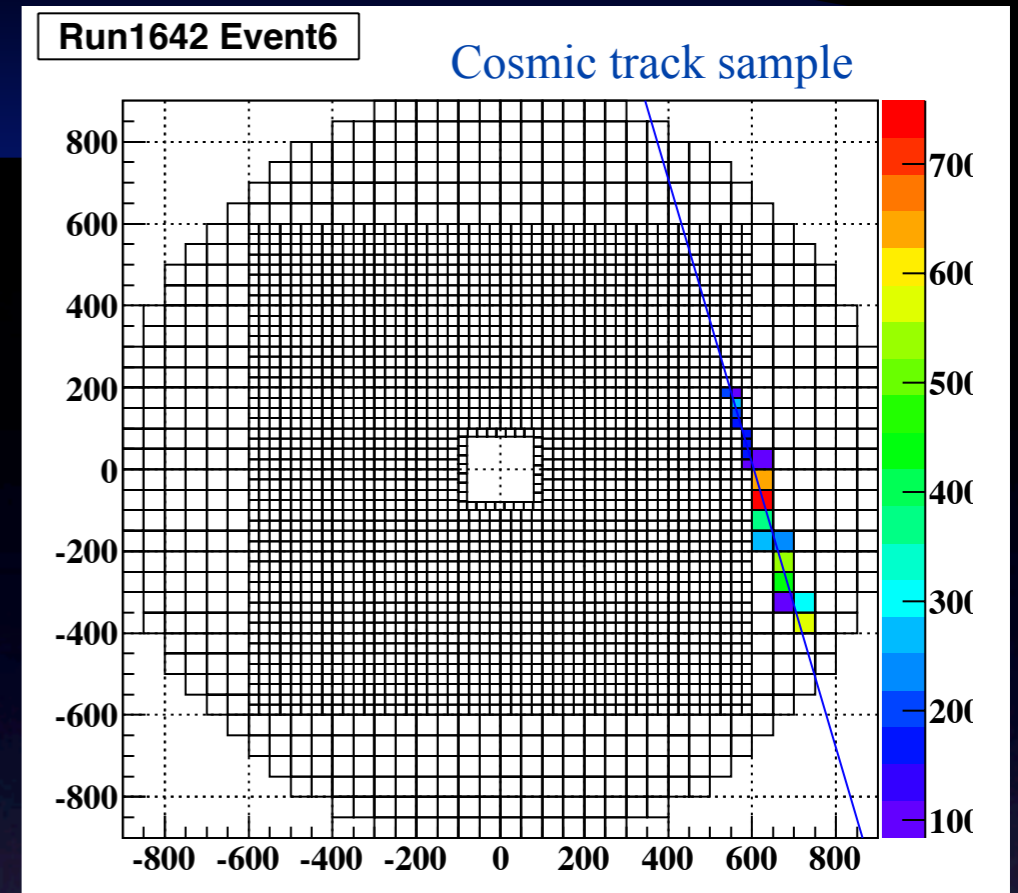
Fit function

$$f(t) = p_0 \exp \left[-\frac{(t - p_1)^2}{2\sigma(t)^2} \right] + p_4$$

$$\sigma(t) = p_3(t - p_1) + p_2$$



- 宇宙線を用いた
 - MIP領域での時間分解能の評価
 - チャンネル毎の時間オフセット (t_0)の導出精度の評価
- 電磁シャワー(e^\pm)を用いた
 - $< 200\text{MeV}$ での時間分解能の評価



Getting timing method

- 以下、3通りの導出方法を比較した

- Constant fraction

- 波高が半分に達する時間を、信号の時間と定義する

- Fitting

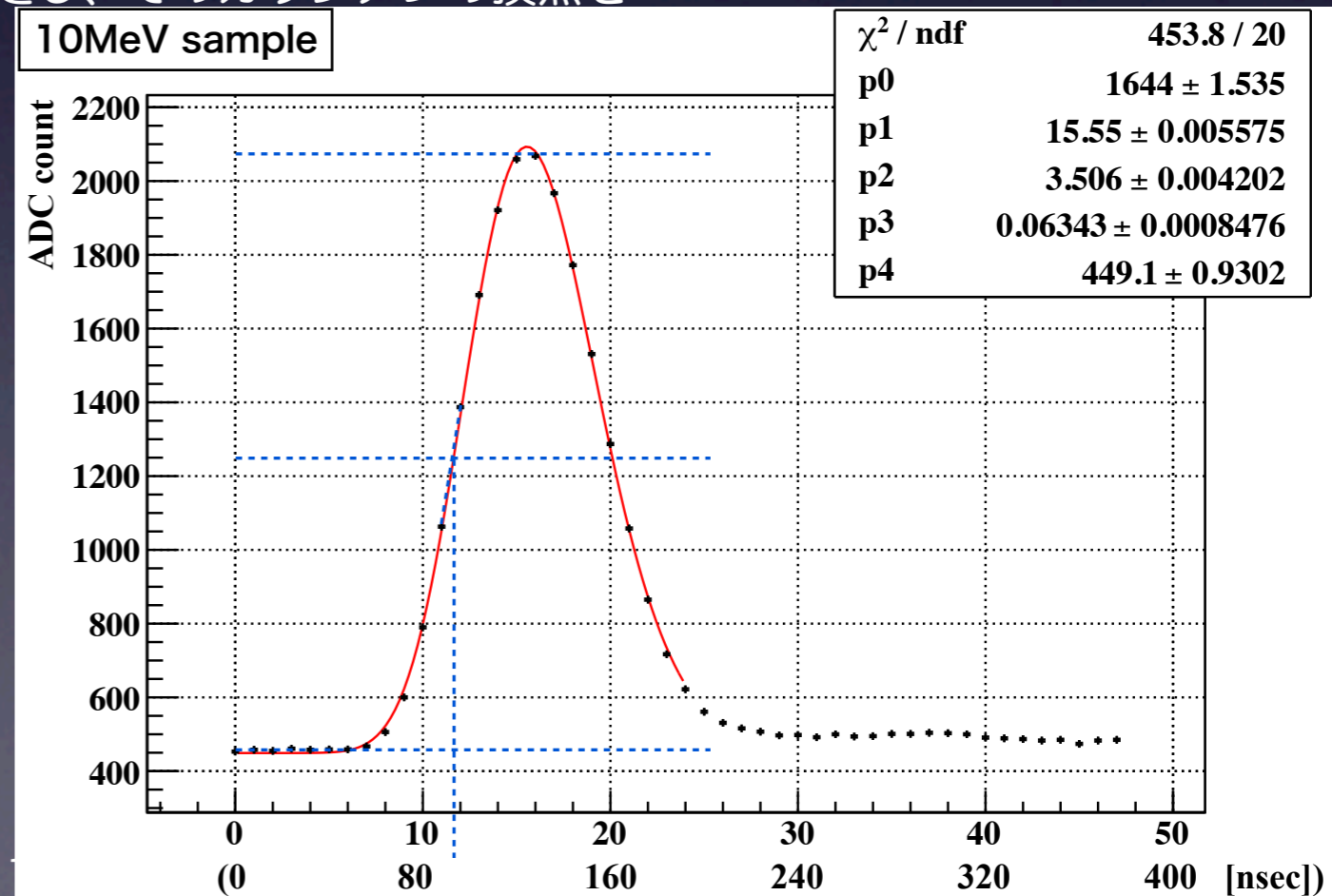
- 波形を非対称ガウシアン(右式)でフィットし、ガウシアン頂点を信号の時間と定義する。

$$f(t) = p_0 \exp \left[-\frac{(t - p_1)^2}{2\sigma(t)^2} \right] + p_4$$

$$\sigma(t) = p_3(t - p_1) + p_2$$

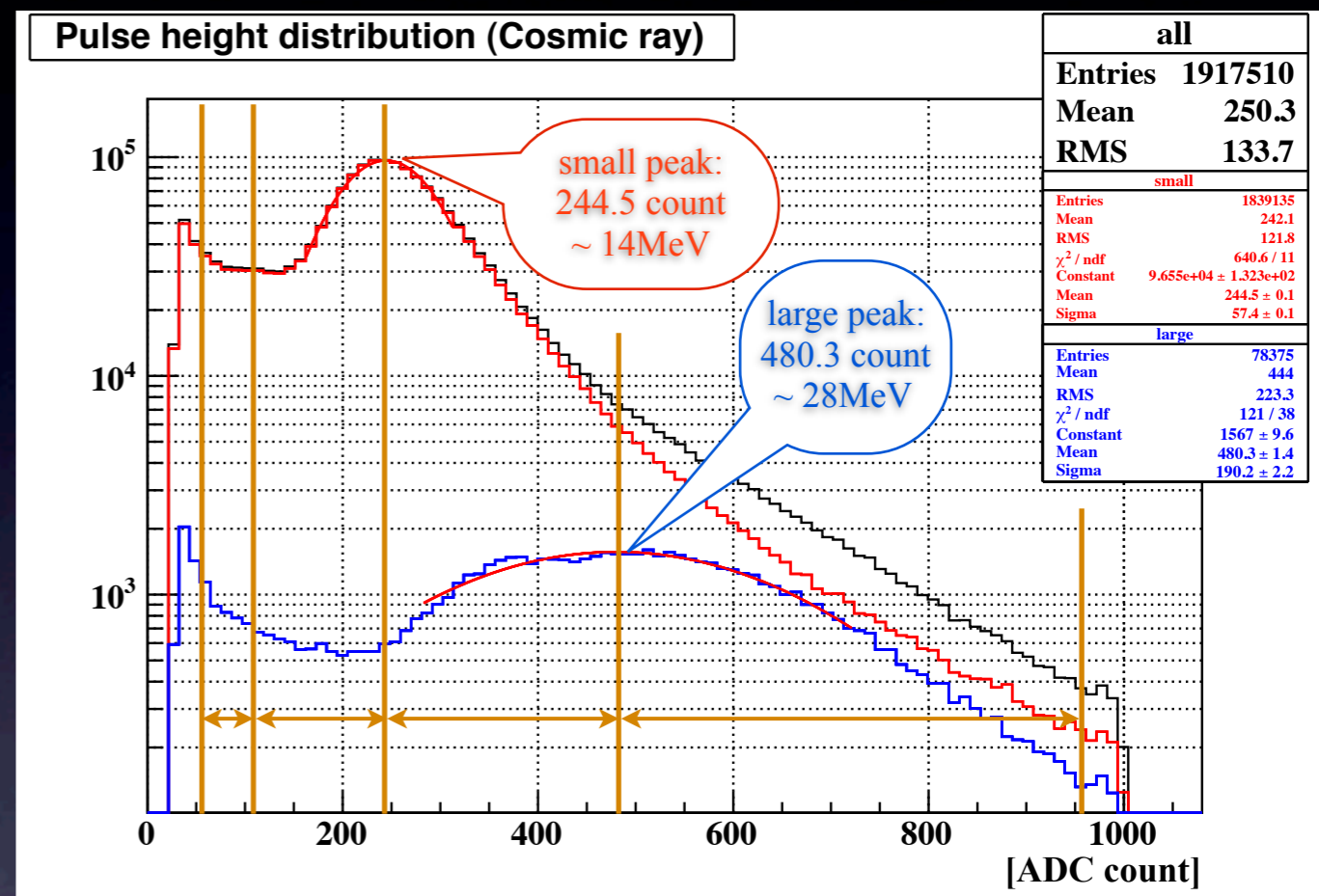
- Top of gaussian

- 波形の上位3点をガウシアンと仮定し、そのガウシアン頂点を信号の時間と定義する。

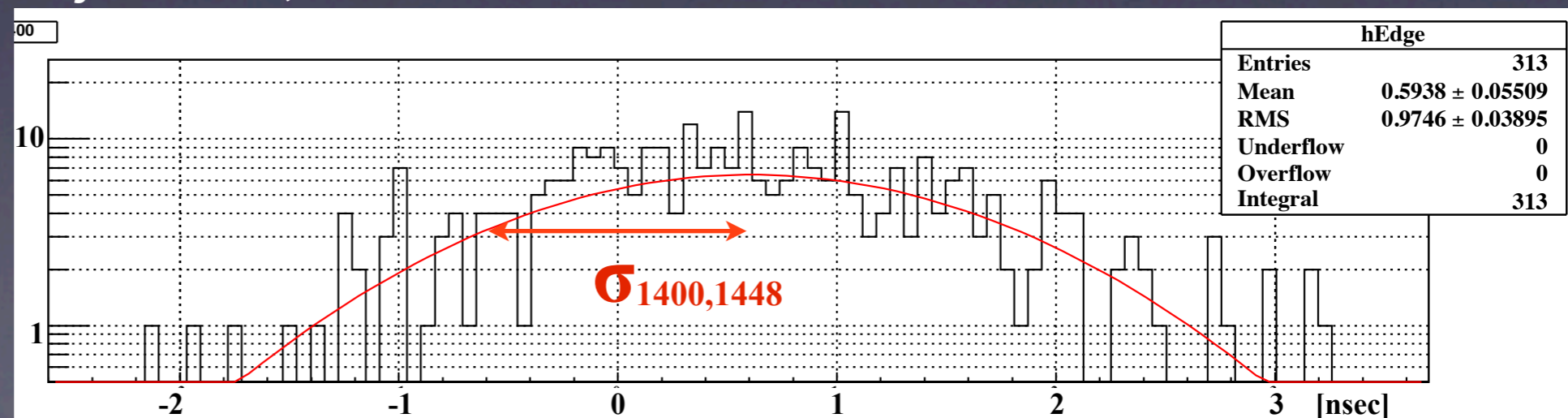


Timing resolution

- 宇宙線を用いて、MIP近傍での時間分解能を評価した。
 - 波高分布を右図のように分割し、それぞれの領域毎に評価
 - 上下隣合った結晶(i,j)の時間差分布の標準偏差 σ_{ij} を求める(右下図)
 - 得られた全(i,j)ペア間の σ_{ij} の加重平均($\times 1/\sqrt{2}$)が時間分解能となる



Crystal 1440, 1448の間の時間差分布

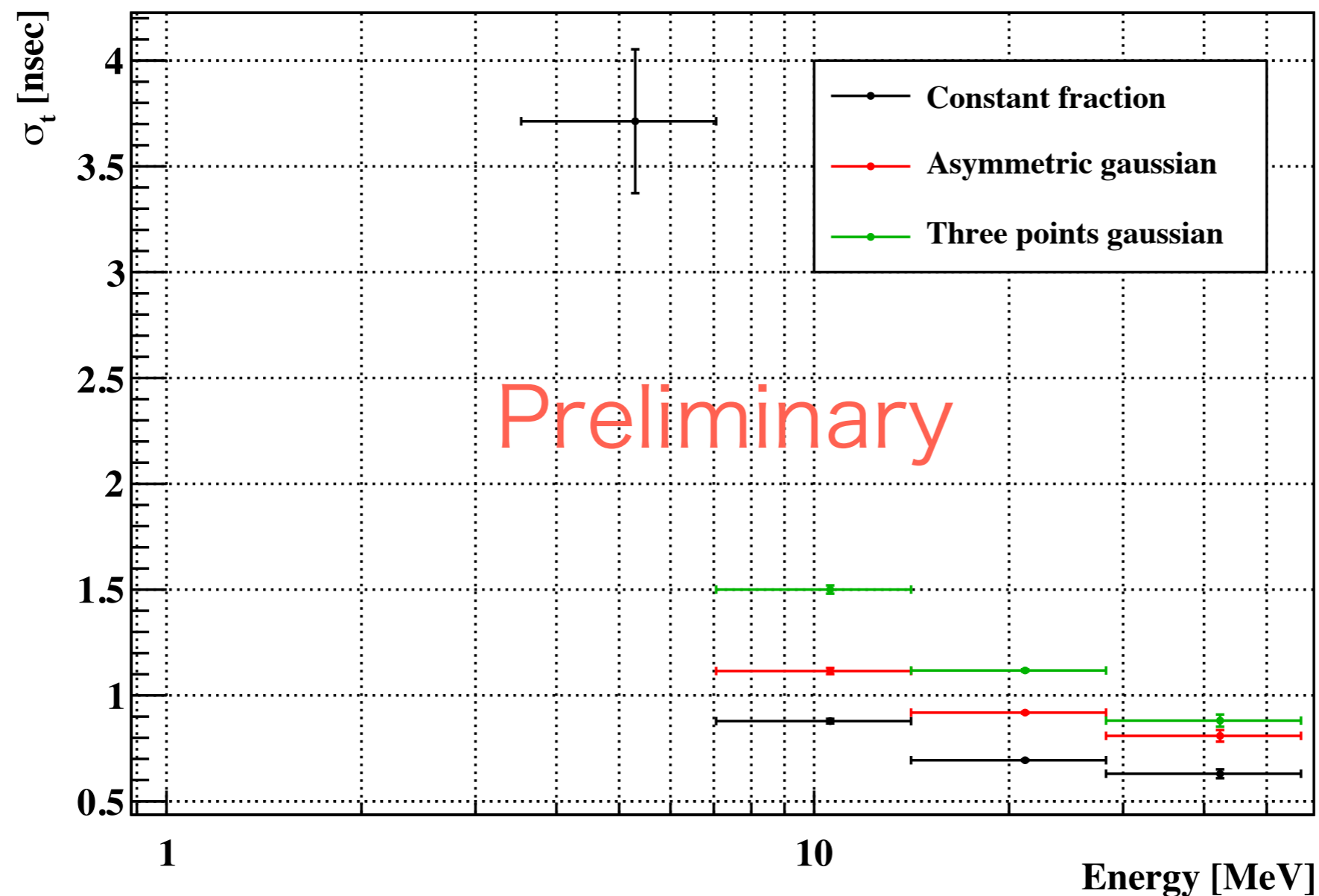


1540	1541	1542	1543	1544	1545	1546	1547
1492	1493	1494	1495	1496	1497	1498	1499
1444	1445	1446	1447	1448	1449	1450	1451
1396	1397	1398	1399	1400	1401	1402	1403
1348	1349	1350	1351	1352	1353	1354	1355
1300	1301	1302	1303	1304	1305	1306	1307
1252	1253	1254	1255	1256	1257	1258	1259
1204	1205	1206	1207	1208	1209	1210	1211
1156	1157	1158	1159	1160	1161	1162	1163
1108	1109	1110	1111	1112	1113	1114	1115
1060	1061	1062	1063	1064	1065	1066	1067
1012	1013	1014	1015	1016	1017	1018	1019
964	965	966	967	968	969	970	971
916	917	918	919	920	921	922	923
868	869	870	871	872	873	874	875
820	821	822	823	824	825	826	827
772	773	774	775	776	777	778	779
724	725	726	727	728	729	730	731
676	677	678	679	680	681	682	683
628	629	630	631	632	633	634	635
580	581	582	583	584	585	586	587
532	533	534	535	536	537	538	539
484	485	486	487	488	489	490	491
436	437	438	439	440	441	442	443
388	389	390	391	392	393	394	395
340	341	342	343	344	345	346	347
292	293	294	295	296	297	298	299
244	245	246	247	248	249	250	251
196	197	198	199	200	201	202	203
148	149	150	151	152	153	154	155
100	101	102	103	104	105	106	107
52	53	54	55	56	57	58	59
4	5	6	7	8	9	10	11

Timing resolution (cosmic)

- Constant fraction が最良の結果となった。
 - 0.88nsec @ 10MeV

Timing resolution (cosmic ray)



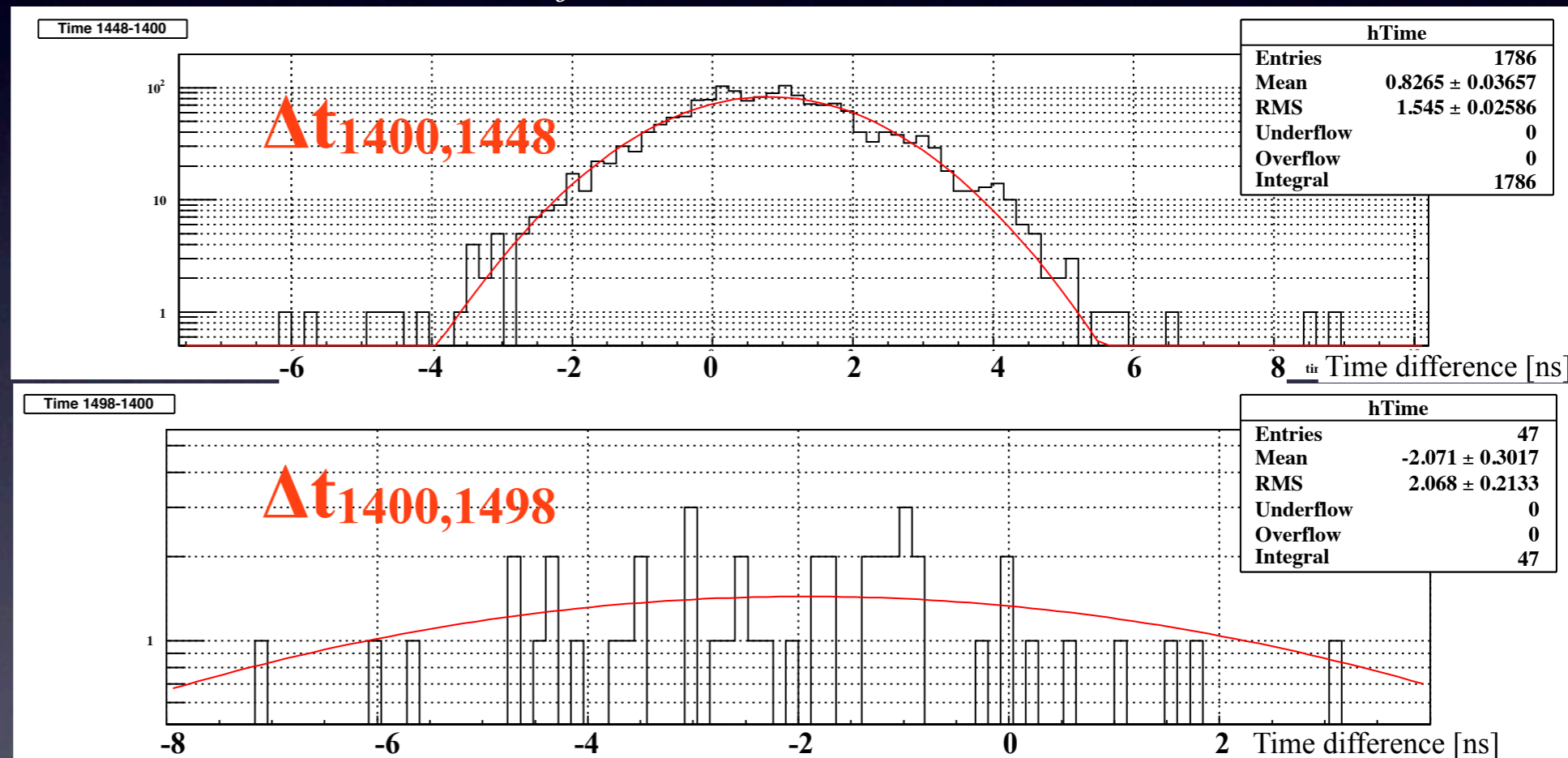
How to get to

- 宇宙線1イベント毎に、
その宇宙線が通った全結晶ペアの時間差 Δt_{ij} を求める

$$\Delta t_{ij} (i < j) \equiv t_i - t_j$$

- 全宇宙線イベントを通して、全ての Δt_{ij} 分布を集める

1540	1541	1542	1543	1544	1545	1546	1547
1492	1493	1494	1495	1496	1497	1498	1499
1444	1445	1446	1447	1448	1449	1450	1451
1396	1397	1398	1399	1400	1401	1402	1403
1348	1349	1350	1351	1352	1353	1354	1355
1300	1301	1302	1303	1304	1305	1306	1307
3024	3025	3026	3027	3028	3029	3030	3031
3023							3001
3022							3002
3021							3003
3020							3004

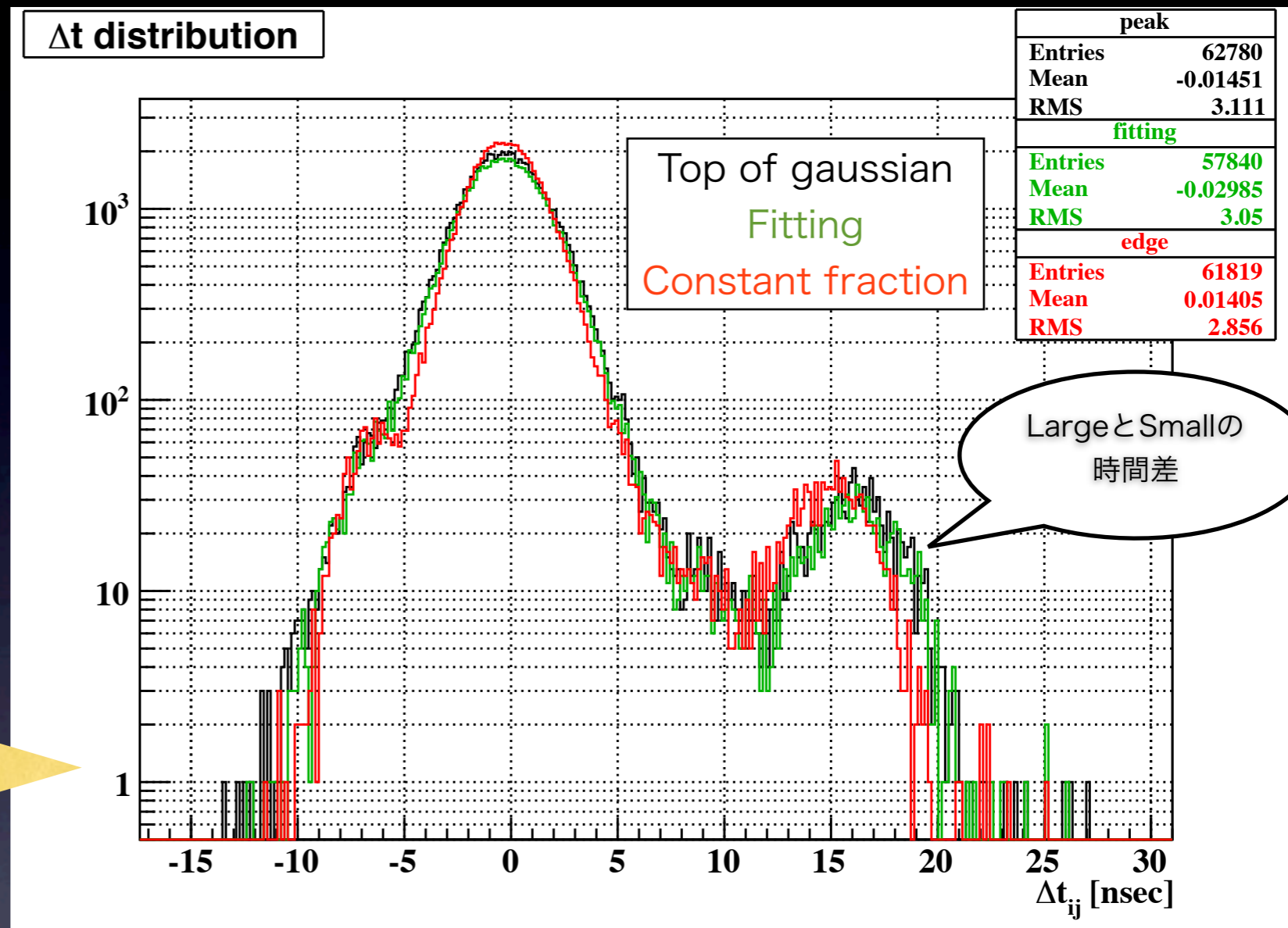


- Δt_{ij} を最小化するように、各結晶の時間オフセットを調整する
 - 宇宙線の速度は光速を仮定

Δt_{ij} distribution

- 以下の χ^2 を最小化するようなOffset $_{i,j}$ を求める

This histogram is Δt_{ij} of each (i, j) pair.
There are around 60,000 pairs.

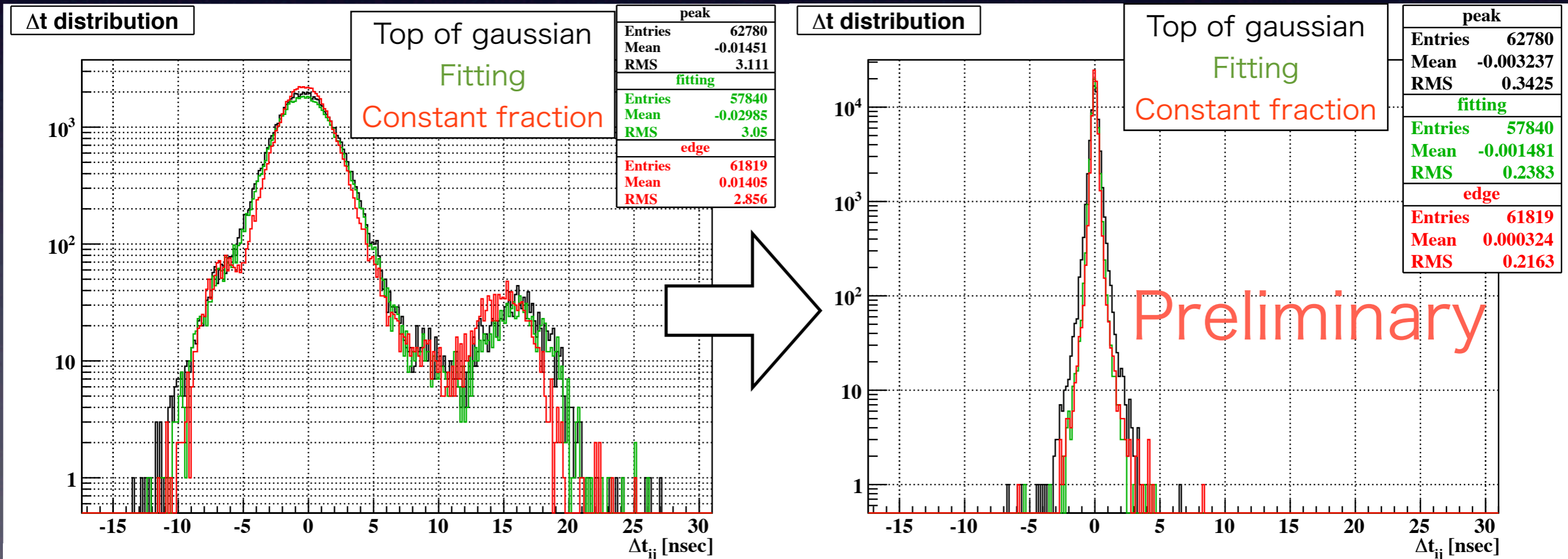


$$\chi^2 \equiv \sum_{i,j}^{i < j} \left[\frac{\text{Mean}(\Delta t_{ij}) - \text{Offset}_i + \text{Offset}_j}{\text{Error of Mean}(\Delta t_{ij})} \right]^2$$

After minimization

- RMS

- Top of gaussian : 3.1 \rightarrow 0.34 nsec
- Fitting : 3.1 \rightarrow 0.24 nsec
- constant fraction : 2.9 \rightarrow 0.22 nsec
- こちらも constant fractionが最良となっている

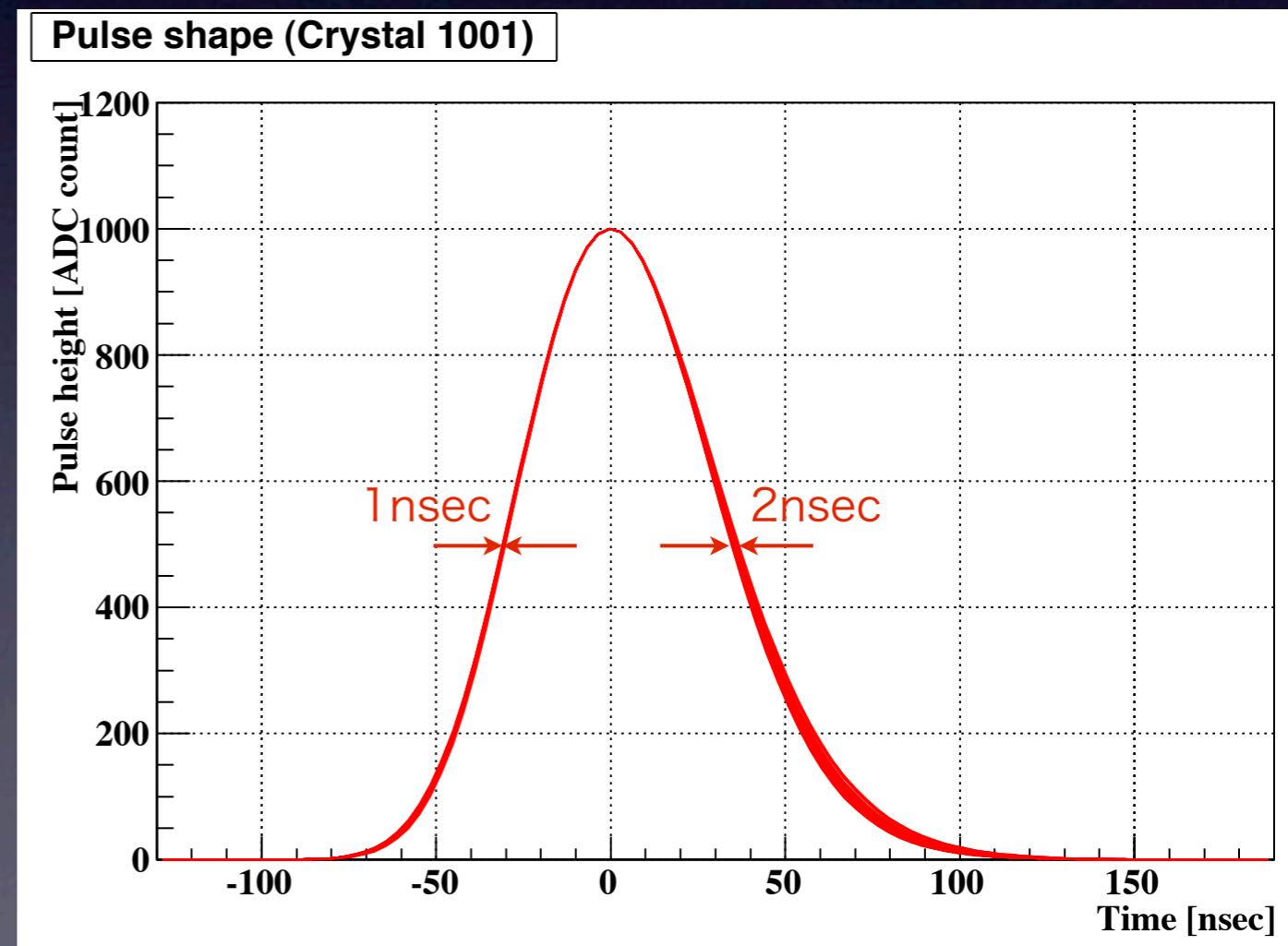


Constant fraction

- なぜ、Constant fractionが最も良い？
 - 同じチャンネルでも、波形が毎回異なっているのが要因と思われる
 - 特に波形の後半が顕著
 - 波形が異なる原因は、まだ未解決

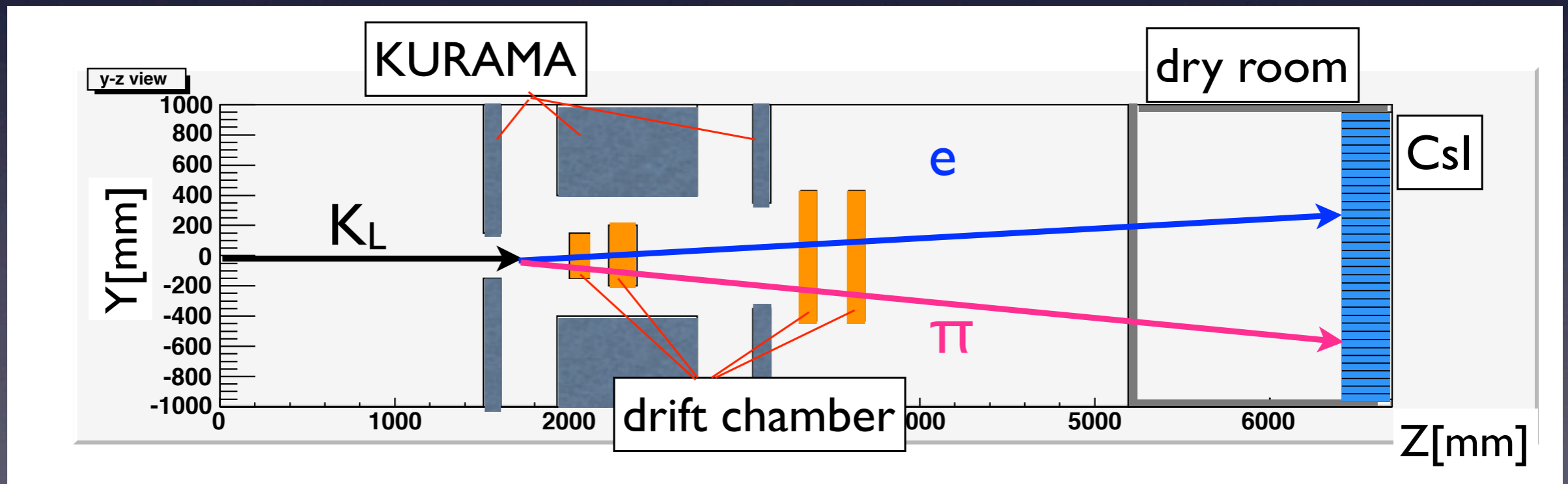
Crystal 1001の信号波形を重ね書きしたものの

30MeV < Energy < 300MeV
 ピークを0nsecに揃える
 ピークの高さで規格化



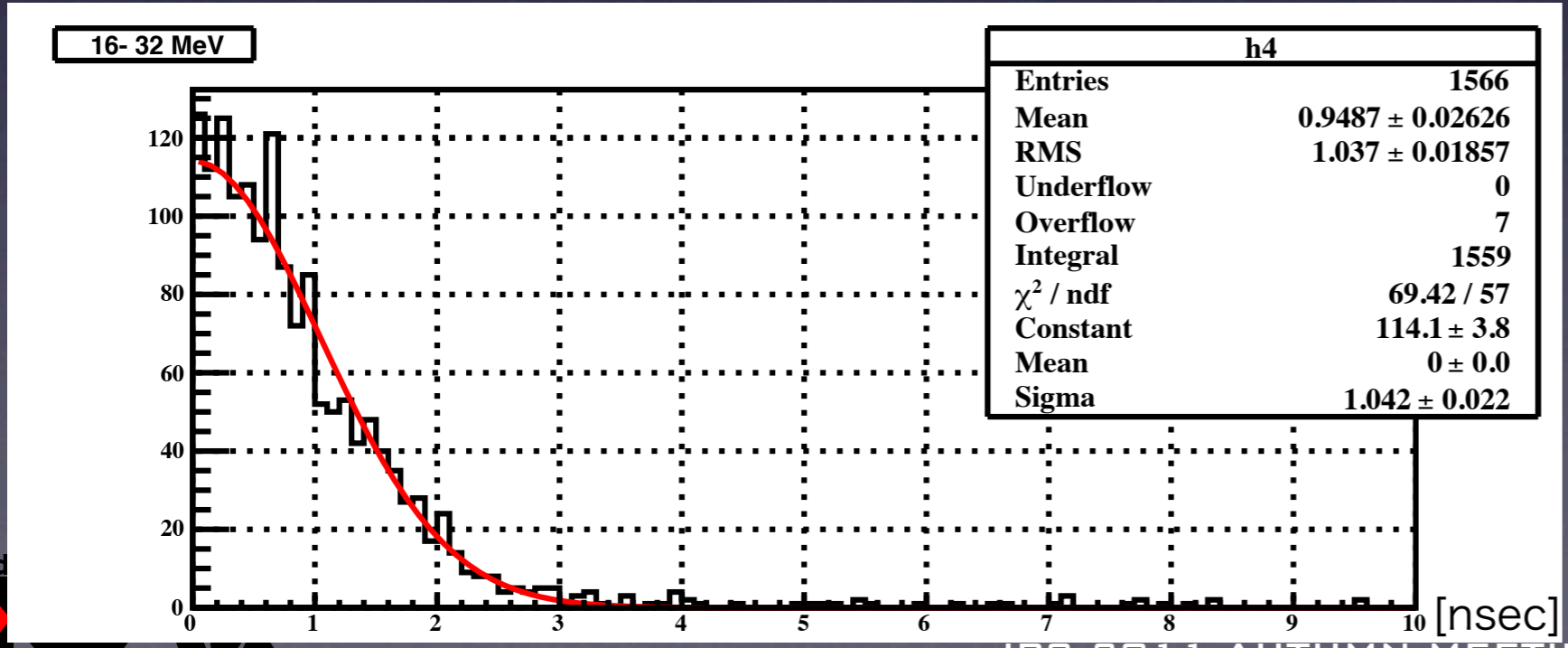
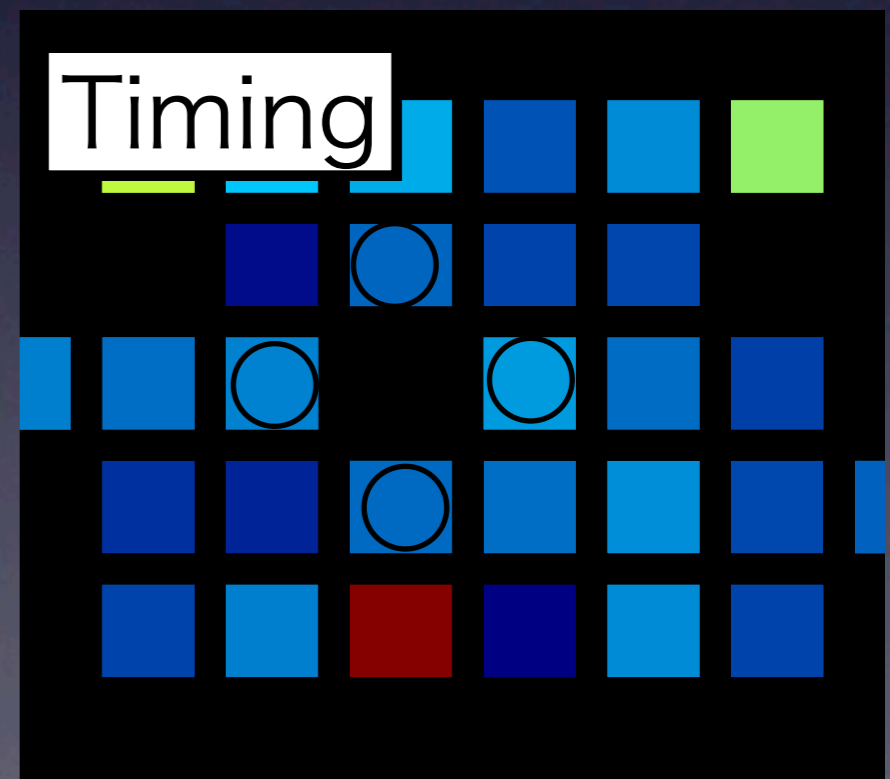
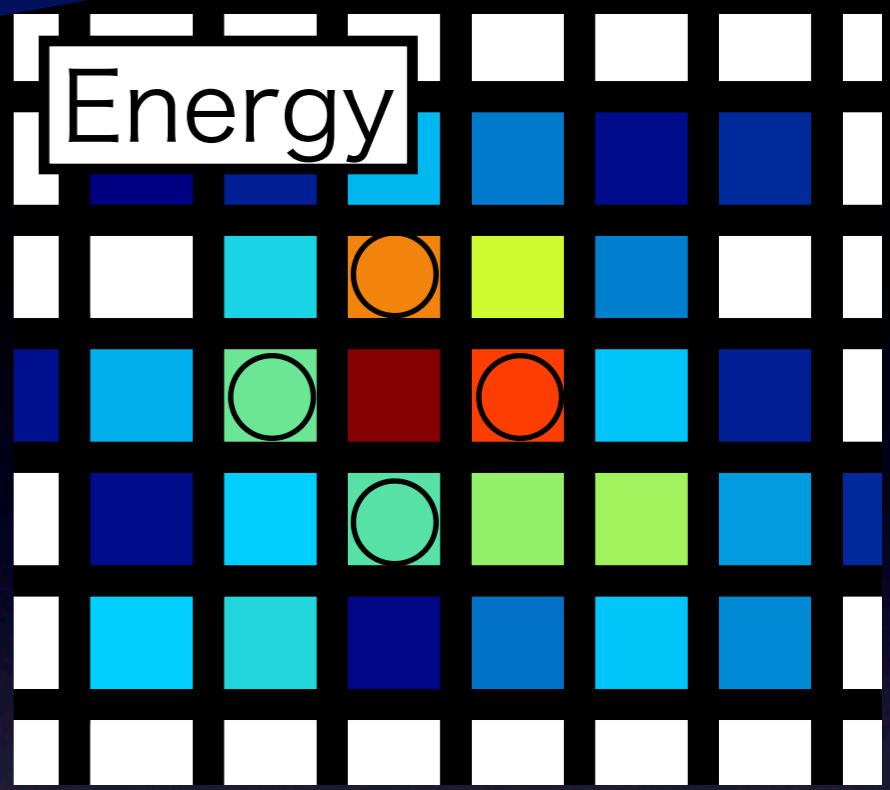
電磁シャワー

- ビーム由来の e^\pm を用いて、もっと広いエネルギー領域の時間分解能を求める
 - $K_L \rightarrow \pi e \nu$ ($Br \sim 40.6\%$)
- CsI上流に設置された電磁石(KURAMA)とDrift chamberを用いて K_L ビームからの崩壊粒子をtrackingし、 e^\pm を選び出す。
 - 本測定の詳細は19pSE-6



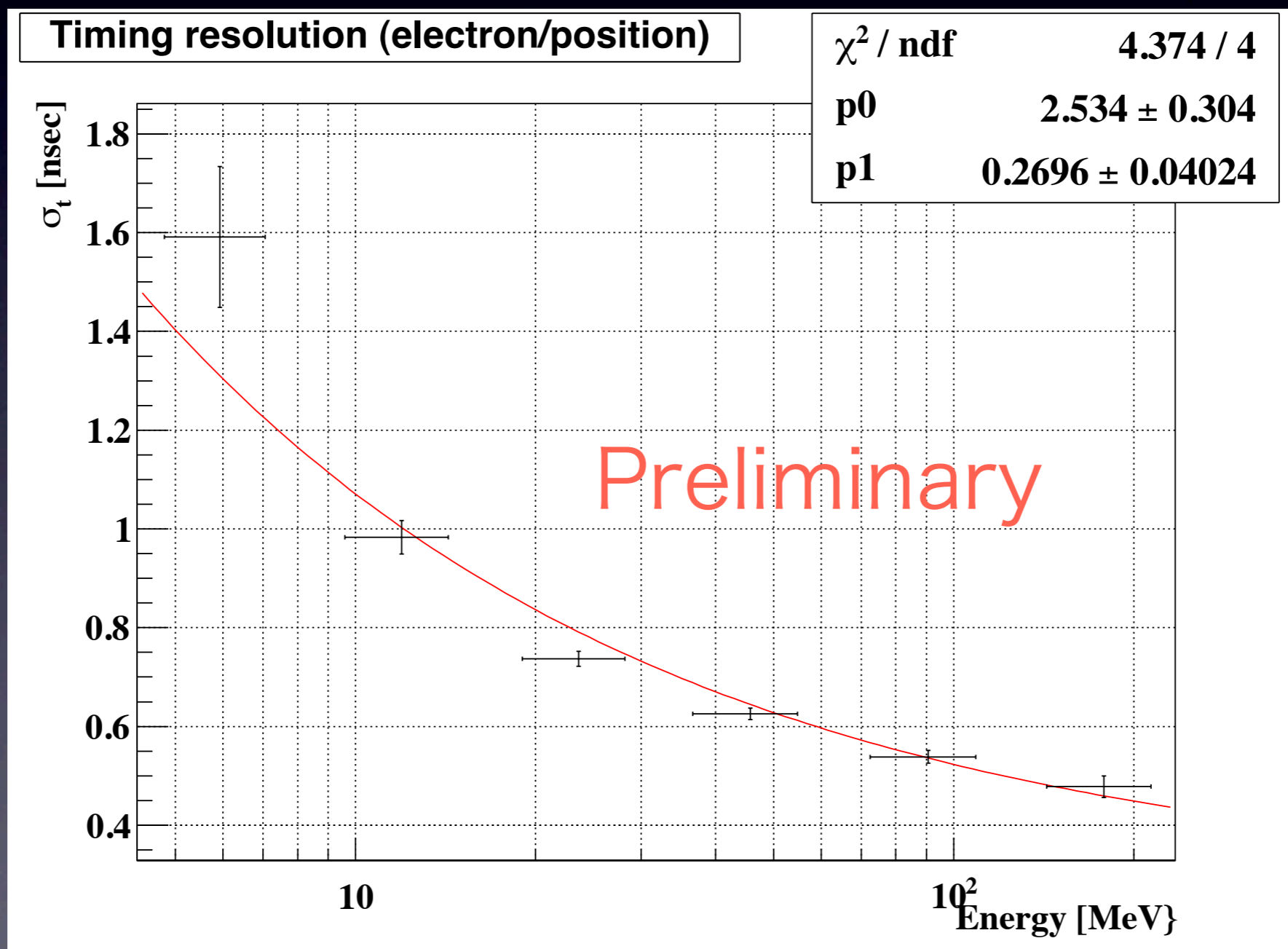
Timing resolution (EM)

- 最もエネルギーの大きい結晶の上下左右4結晶のみを用いる
→ 6 pairs.
- 同じエネルギーの結晶ペアを選び出す。
- エネルギー領域毎にペア間の時間差分布を算出する (左下図)
- 分布のSigma/ $\sqrt{2}$ が、そのエネルギー領域での時間分解能となる



Timing resolution (EM)

$$\sigma_t [\text{nsec}] = \frac{2.5}{\sqrt{E [\text{MeV}]} + 0.27}$$



Summary

- K⁰TO実験

- $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \nu$ 探索実験
- pure CsIの信号をBessel filterを用いて、非対称ガウシアンに引き延ばし、125MHzのFADCで読み出す。

- 時間分解能

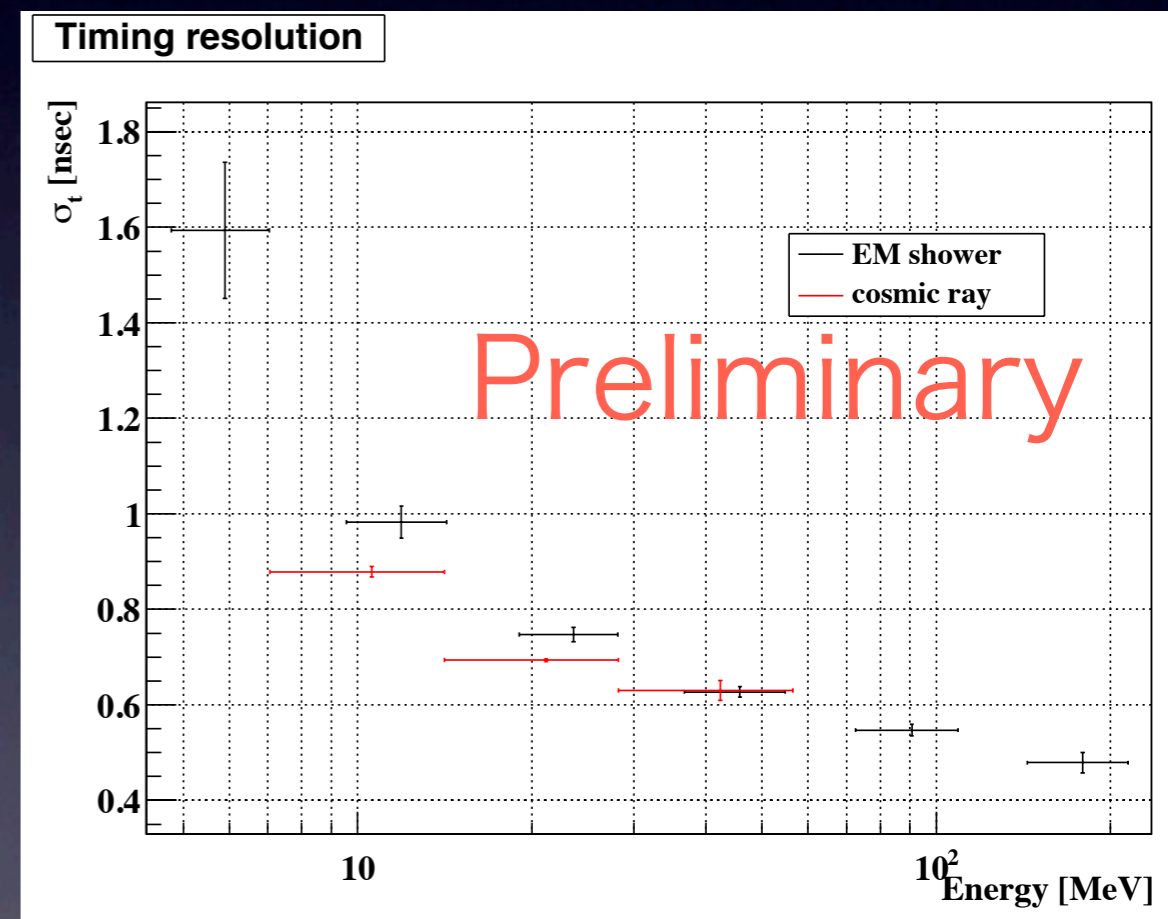
- 時間の取得は、Constant fractionが最良
- 0.88nsec @ 10MeV (Cosmic ray)

$$\sigma_t [\text{nsec}] = \frac{2.5}{\sqrt{E [\text{MeV}]} + 0.27}$$

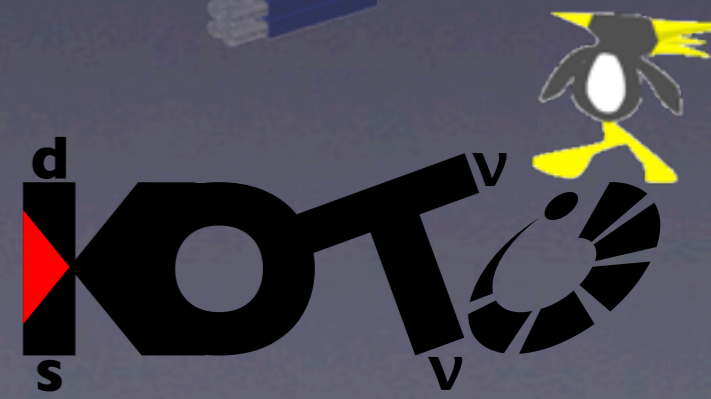
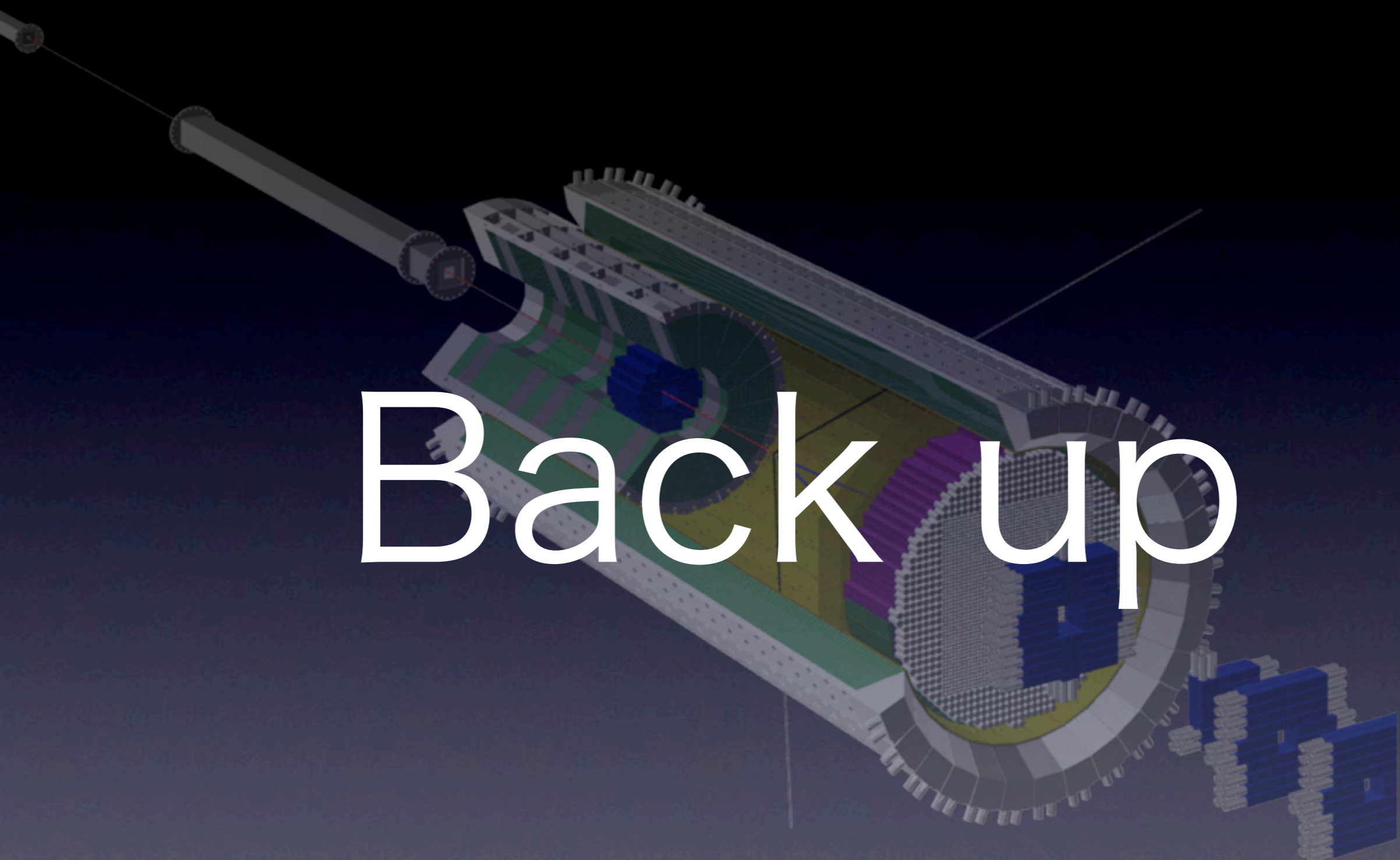
(EM Shower)

- 時間オフセット

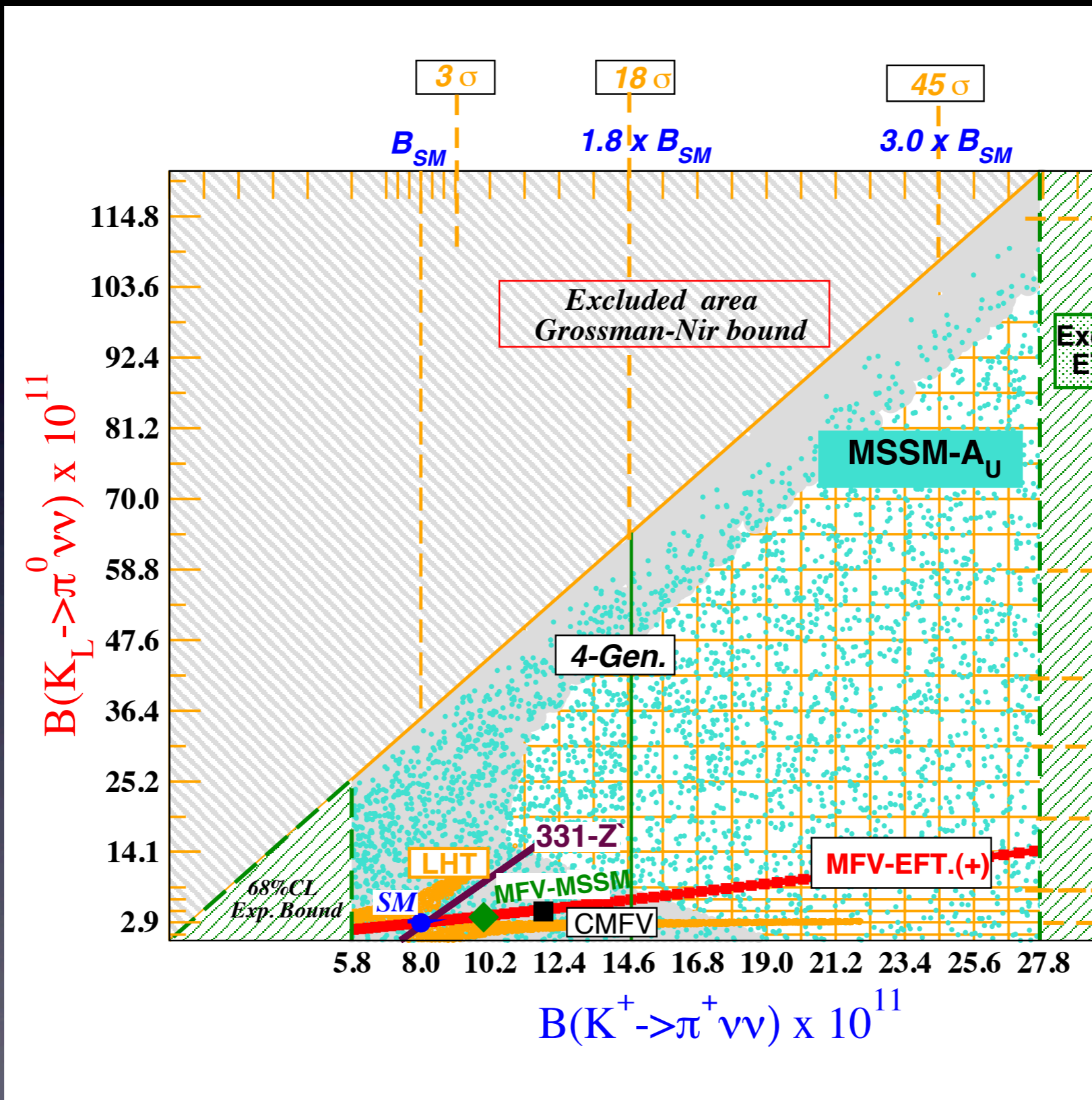
- 宇宙線を用いて 0.22nsec_{rms} の精度で決定



Backup



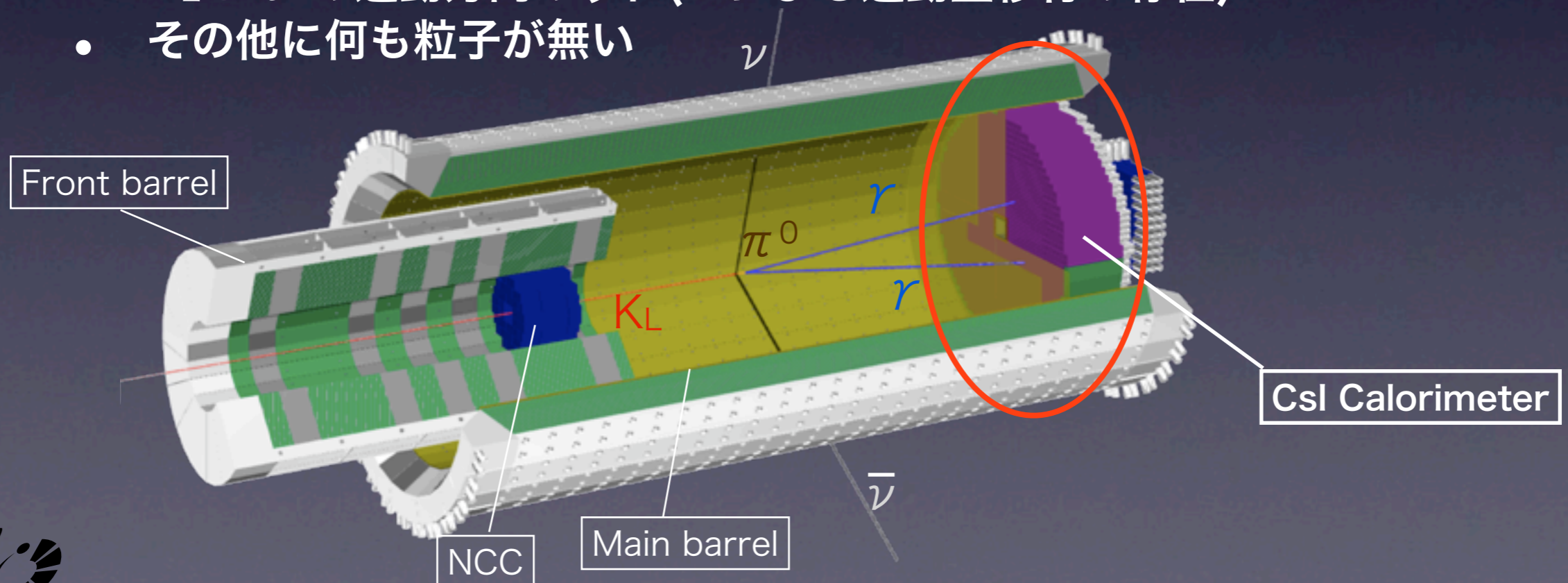
Beyond SM



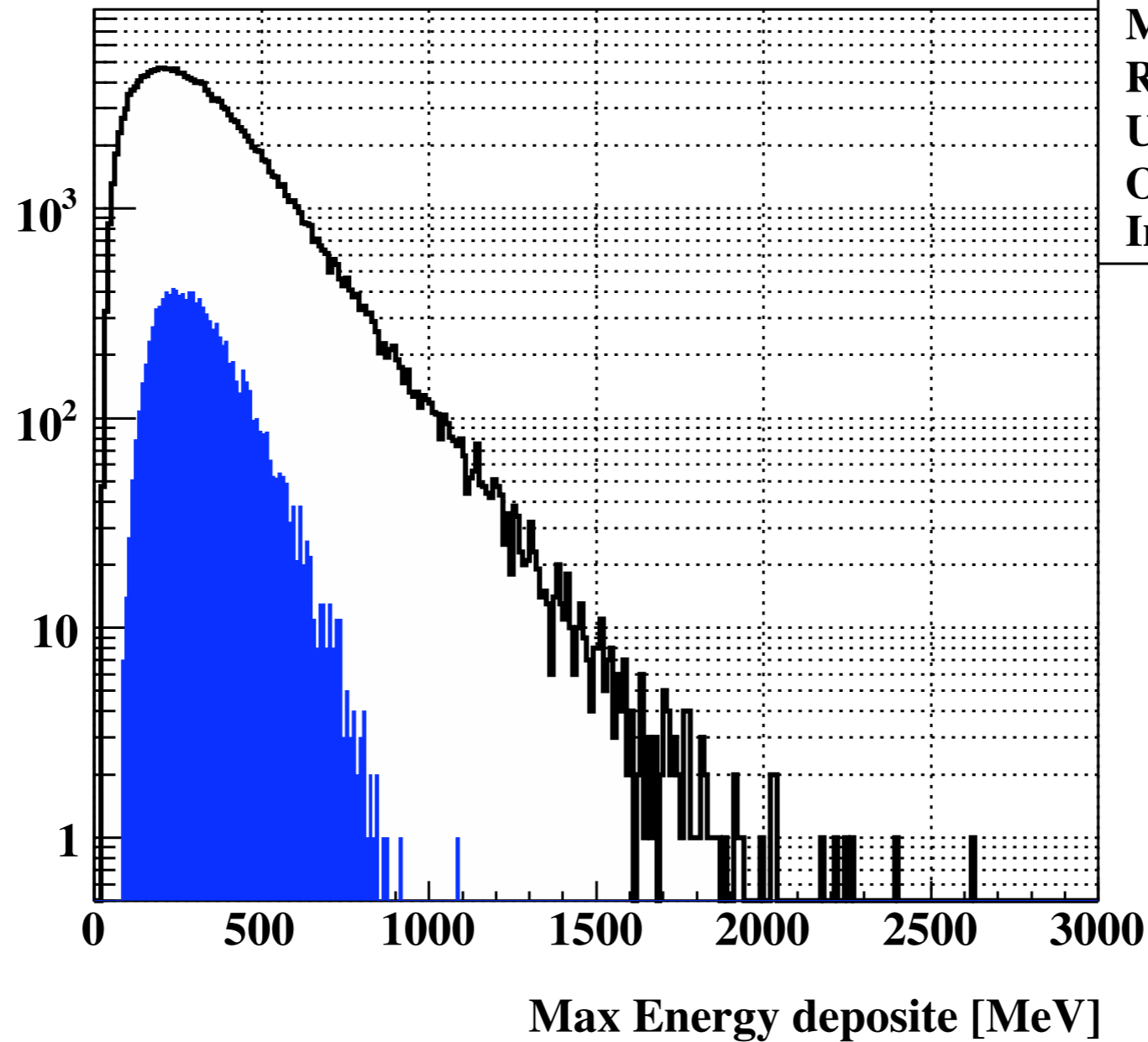
Concept

• 信号の同定

- ν は検出できないので、 π^0 からの崩壊粒子を見る
- π^0 の崩壊モード
 - $\pi^0 \rightarrow e^+e^- \gamma$ 荷電粒子のtrackingによる π^0 の再構成が可能 (Br 1.2%)
 - $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ 分岐比が大きい (Br 98.8%)
- π^0 からの 2γ
 - CsIカロリメータで γ の位置・エネルギーを求め、 π^0 を再構成
 - K_L と π^0 の運動方向のずれ(ν による運動量移行の存在)
 - その他に何も粒子が無い



Energy deposit

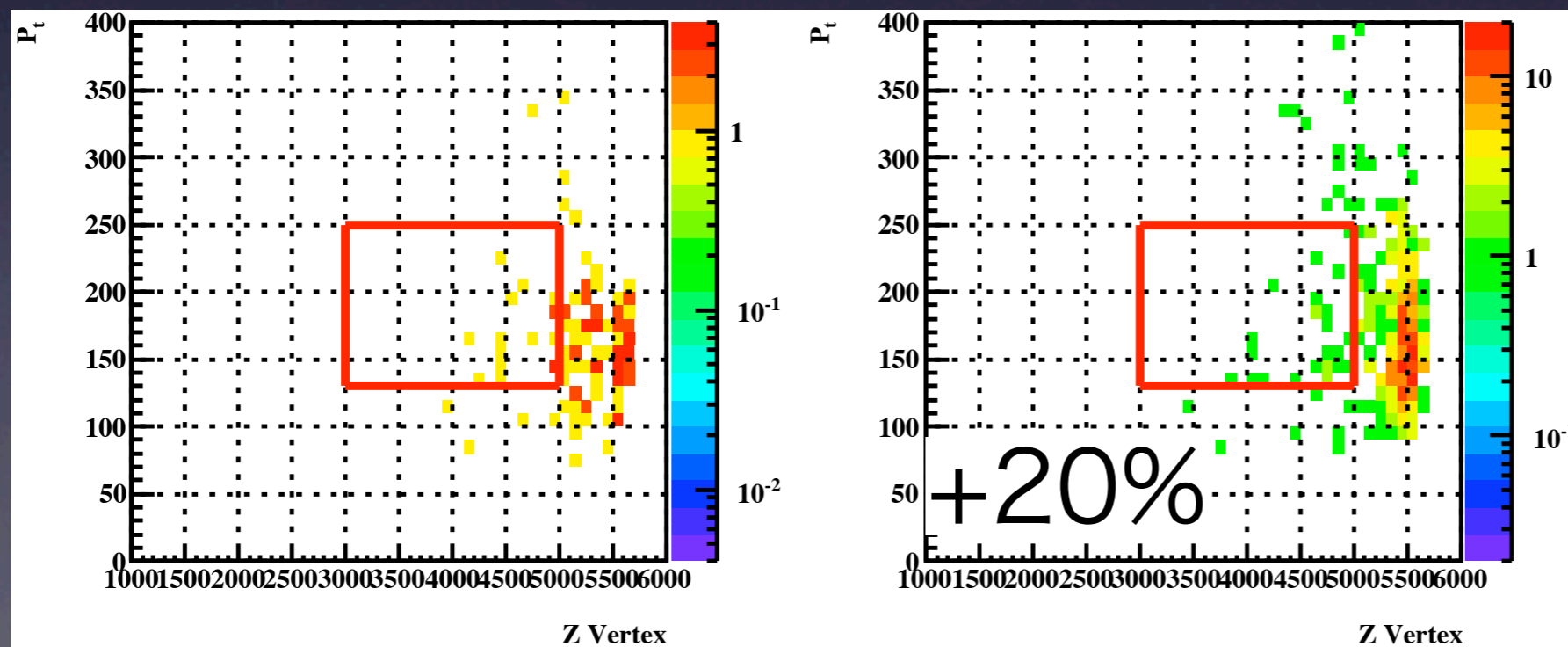
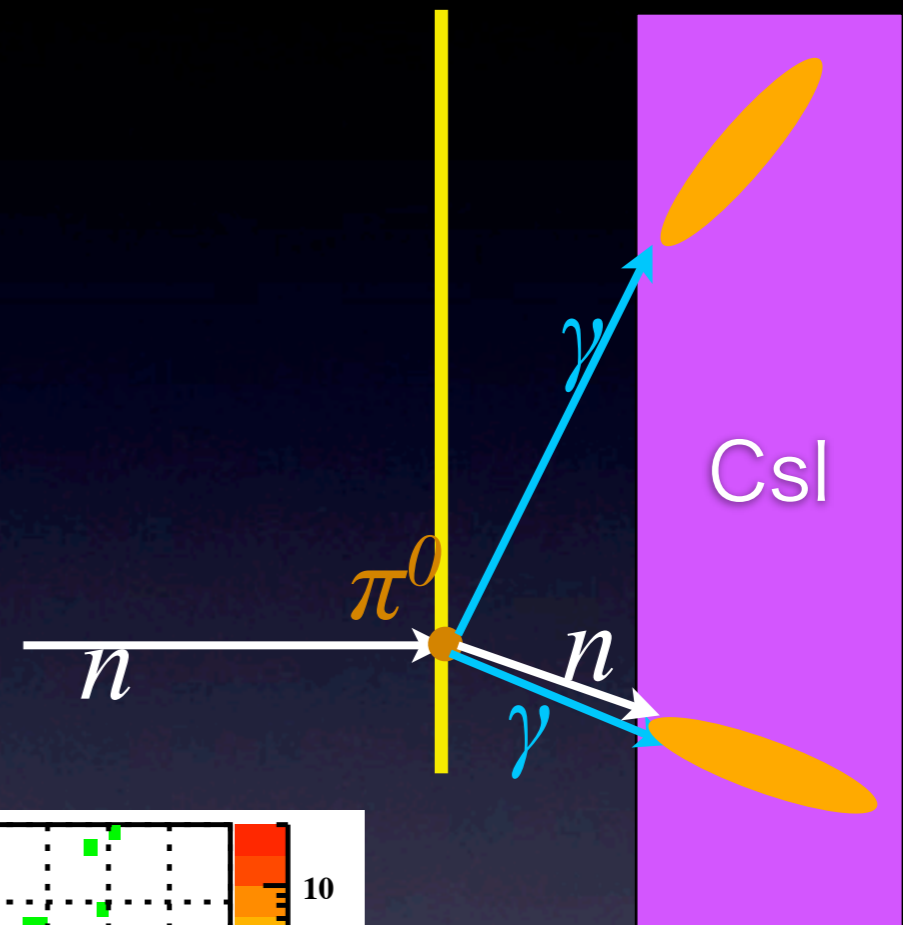
 $\pi^0 \nu \bar{\nu}$


h1	
Entries	188245
Mean	332.1
RMS	204.8
Underflow	0
Overflow	0
Integral	1.882e+05

CV- π^0 B.G.

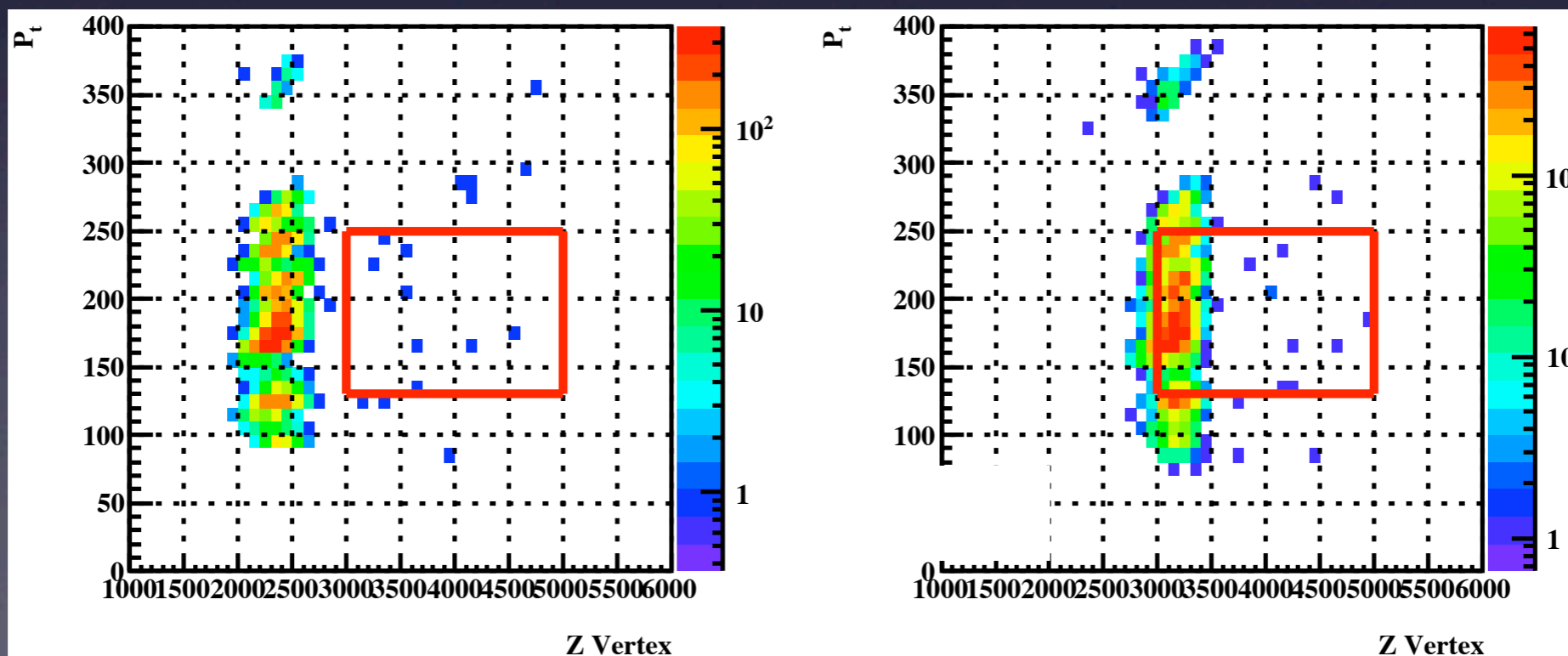
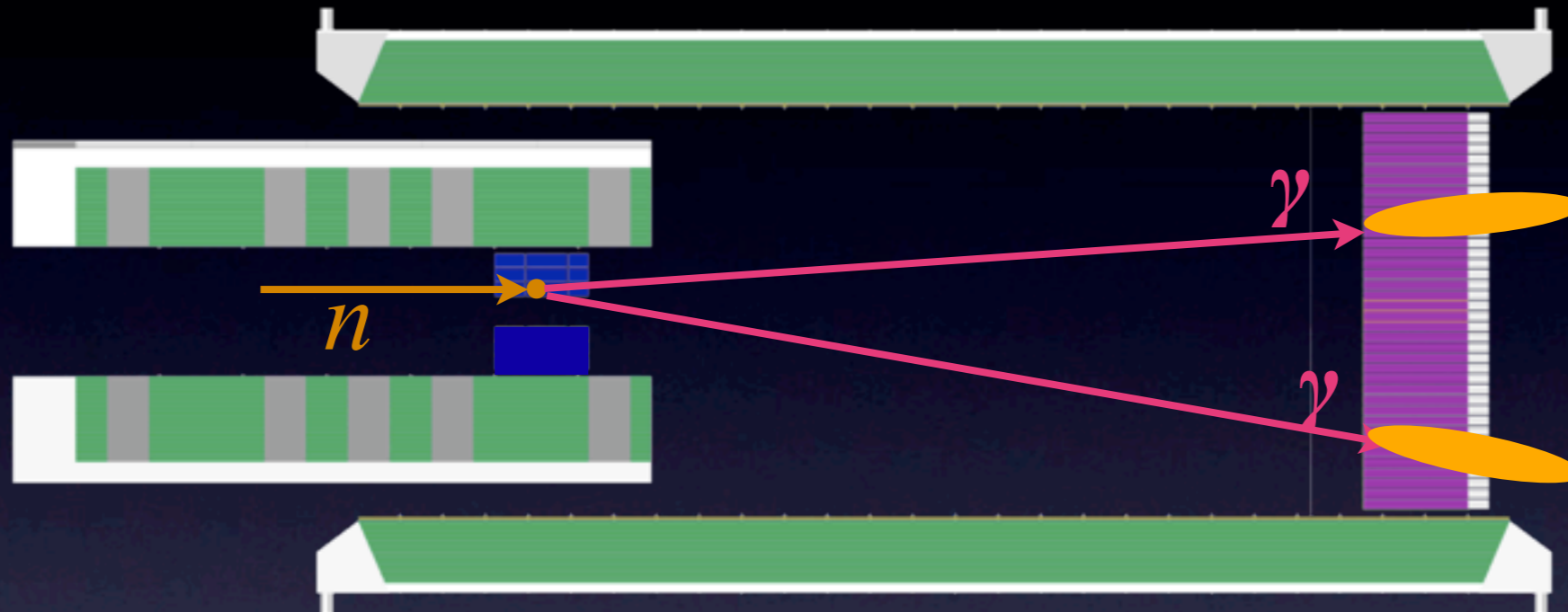
- エネルギーを大きく間違えると増加

CV

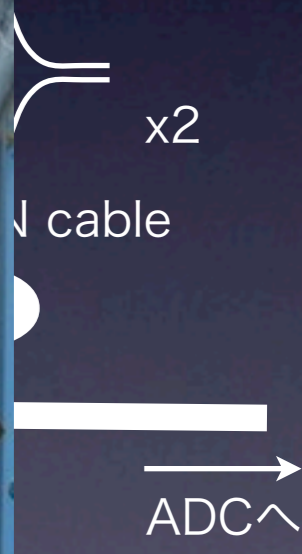
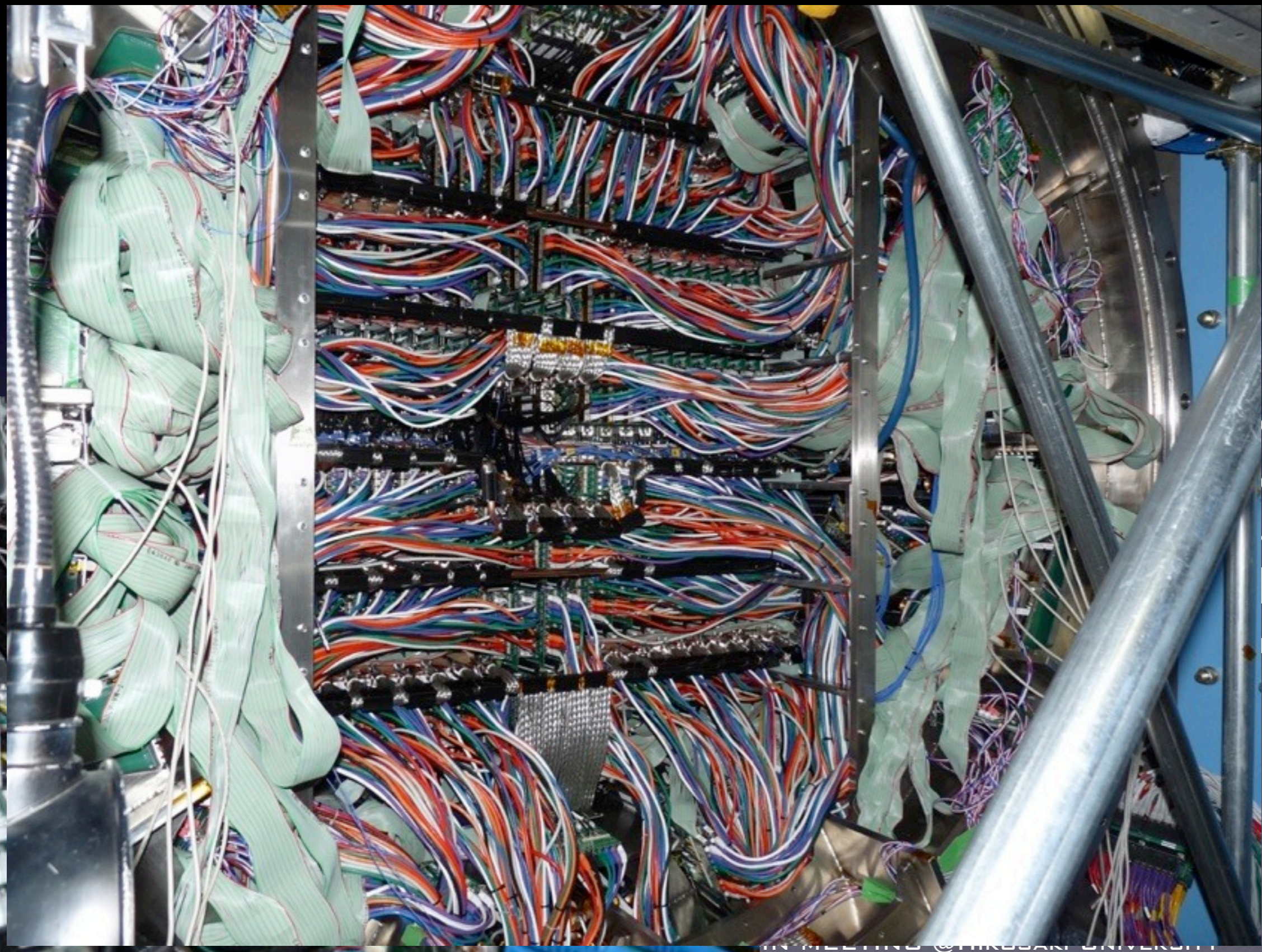


CC02- π^0 B.G.

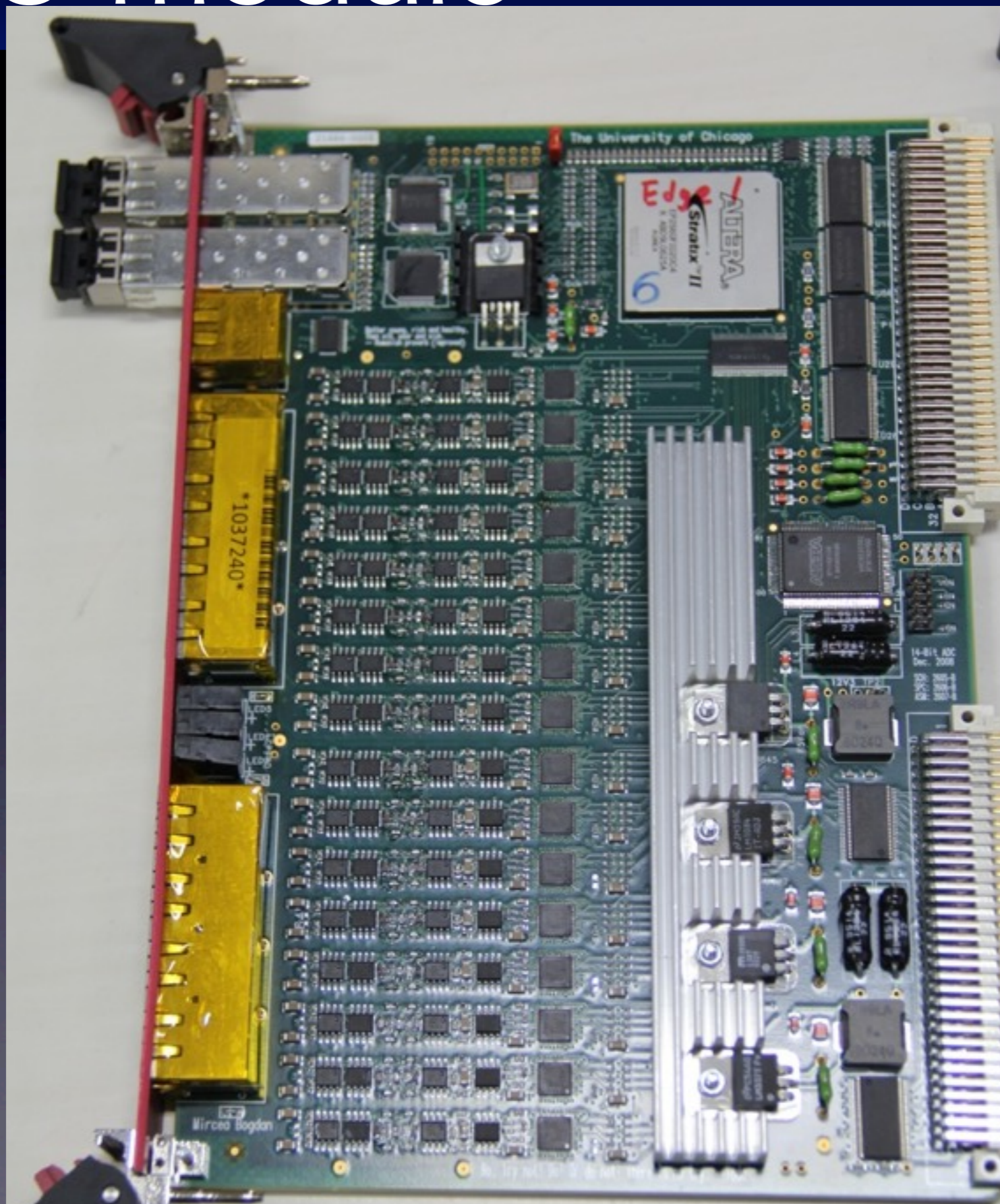
- エネルギーを小さく間違えると増加



Read out scheme



FADC module

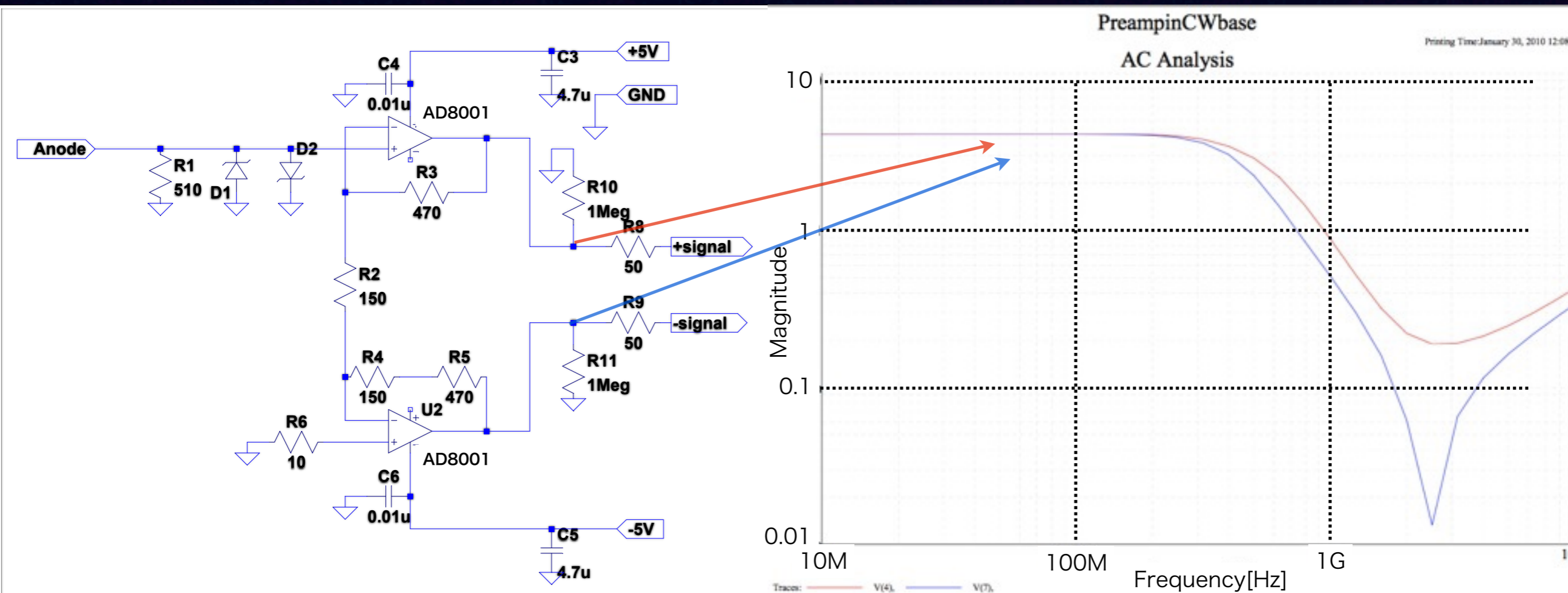


プリアンプ



• 設計思想

- 消費電力を押さえるため、アノード終端抵抗を高めに設定
- 耐ノイズ性を高めるため、差動出力+STPケーブルで送信
- 高速・低ノイズ・高出力アンプの採用

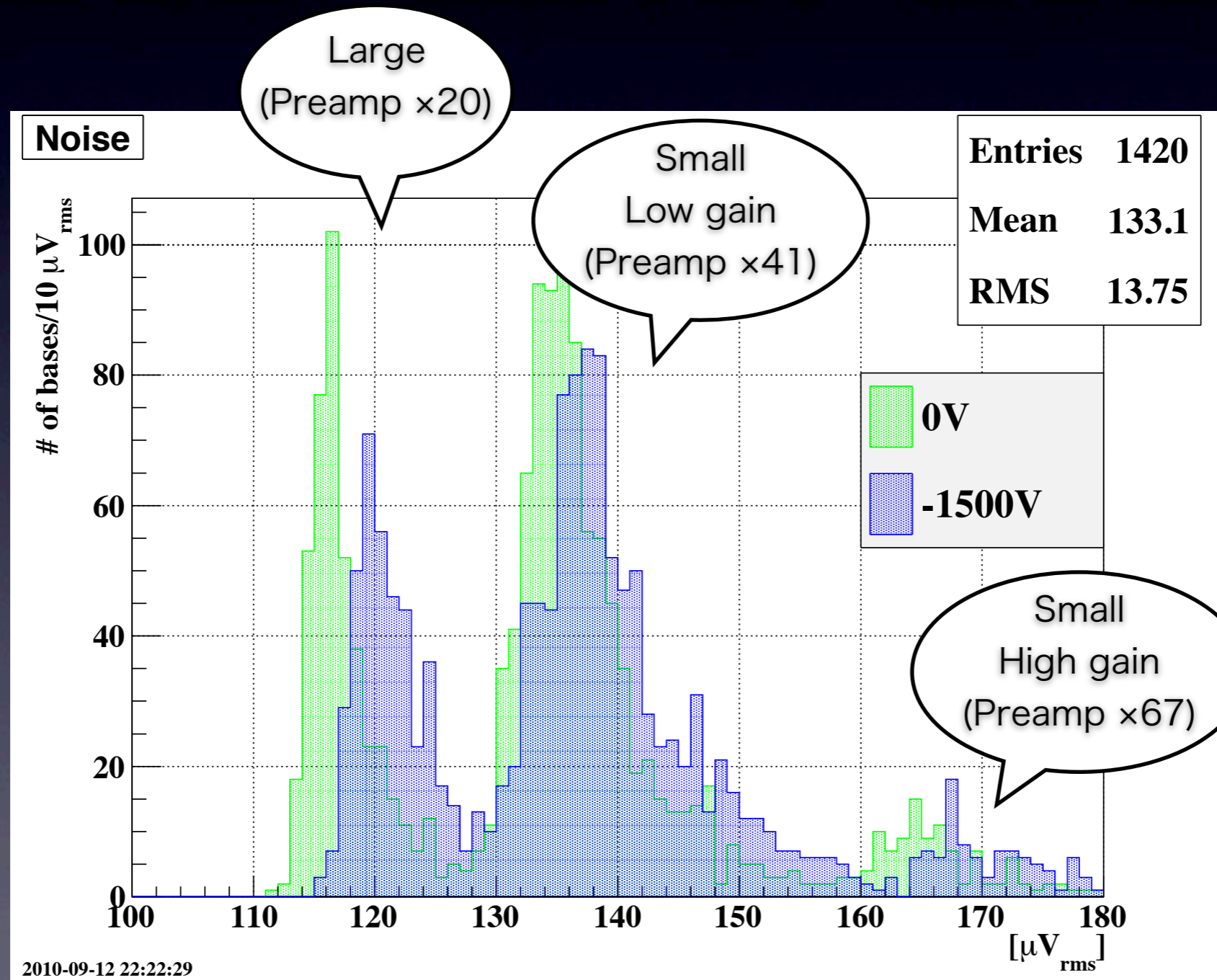


CW base spec

	Large	Small Low gain	Small High gain
型番	HPMC-1.8N-05	HPMC-1.8N-04	
高電圧生成回路	Cockcroft-Walton		
入力	+5V, +1.5V, ±5V(プリアンプ電源)		
最大出力	-1800V		
ダイノード段数	6	5	
電圧分割比	K 2-1-2-2-2-2-1 A	K 3-2-2-2-2-1 A	
消費電力	60mW(CW) + 90mW(Amp) [カロリメータ全体で400W]		
PMT増倍率	typ. 20000	typ. 8000	
プリアンプ信号増倍率	20倍	41倍	67倍
Noise level (typ.)	135 μ V _{rms}	155 μ V _{rms}	170 μ V _{rms}
使用数	476本	2240本	

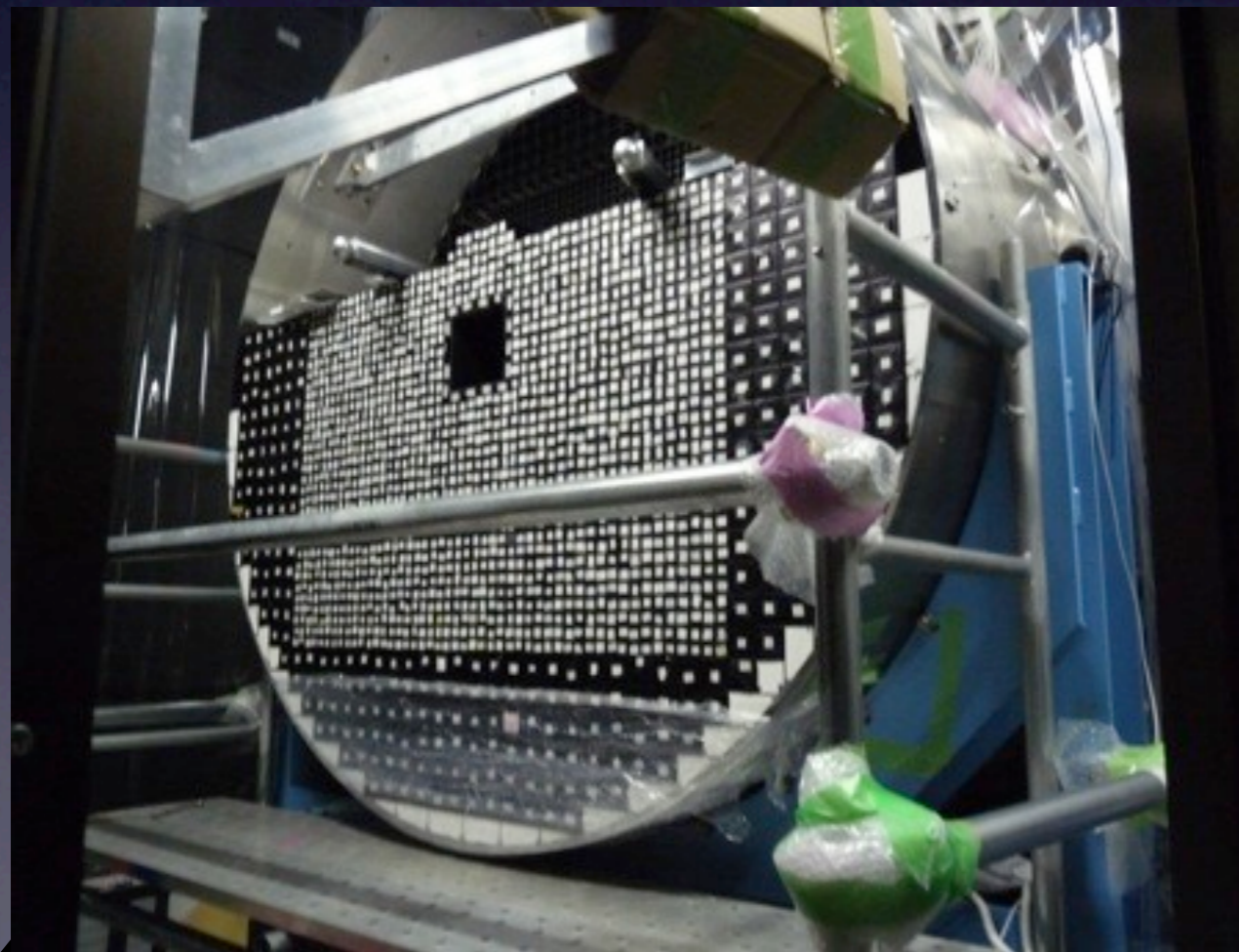
Noise

- 1MeVを測定するために必要な条件($<180\mu\text{V}_{\text{rms}}$)を全て満たしている

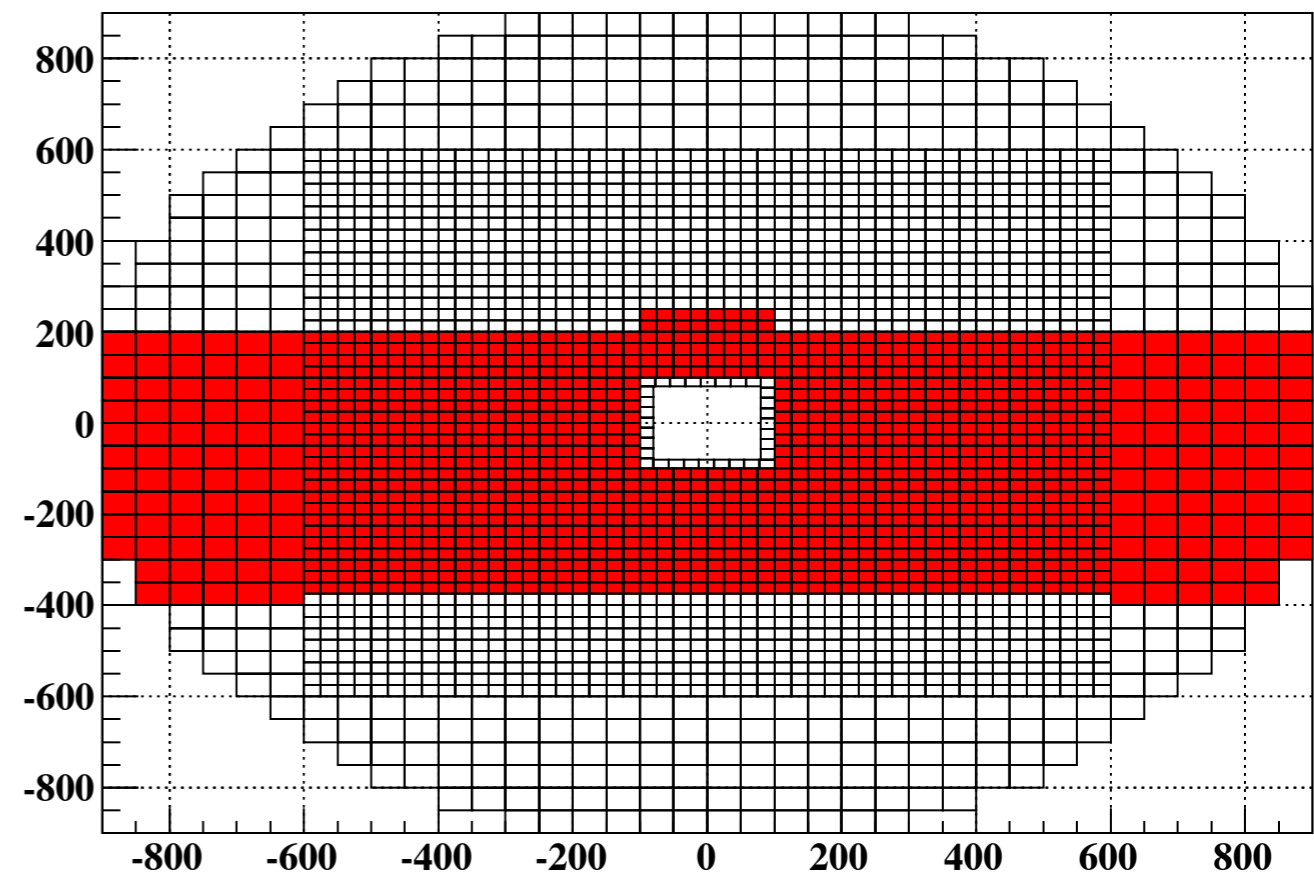


Csl Calorimeter test

- 2010/10-11月、Csl Calorimeterのintegration testを行った。
 - 1196ch/2716ch(右下図)

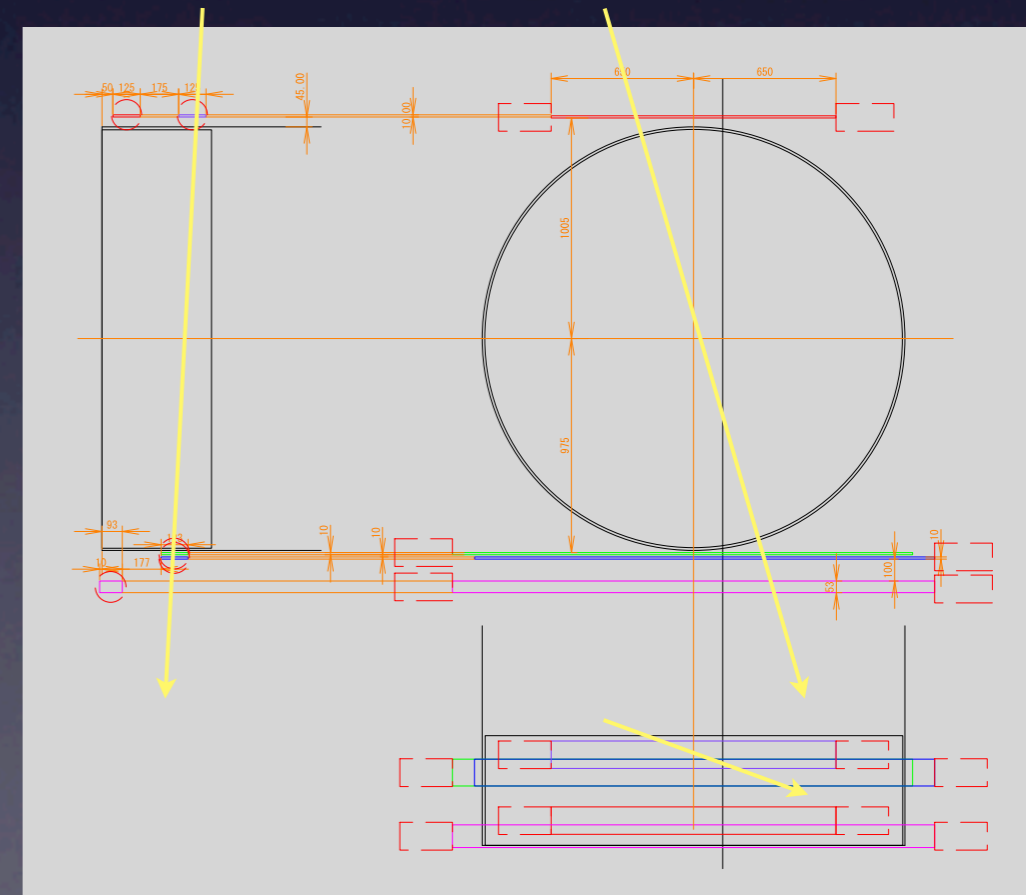
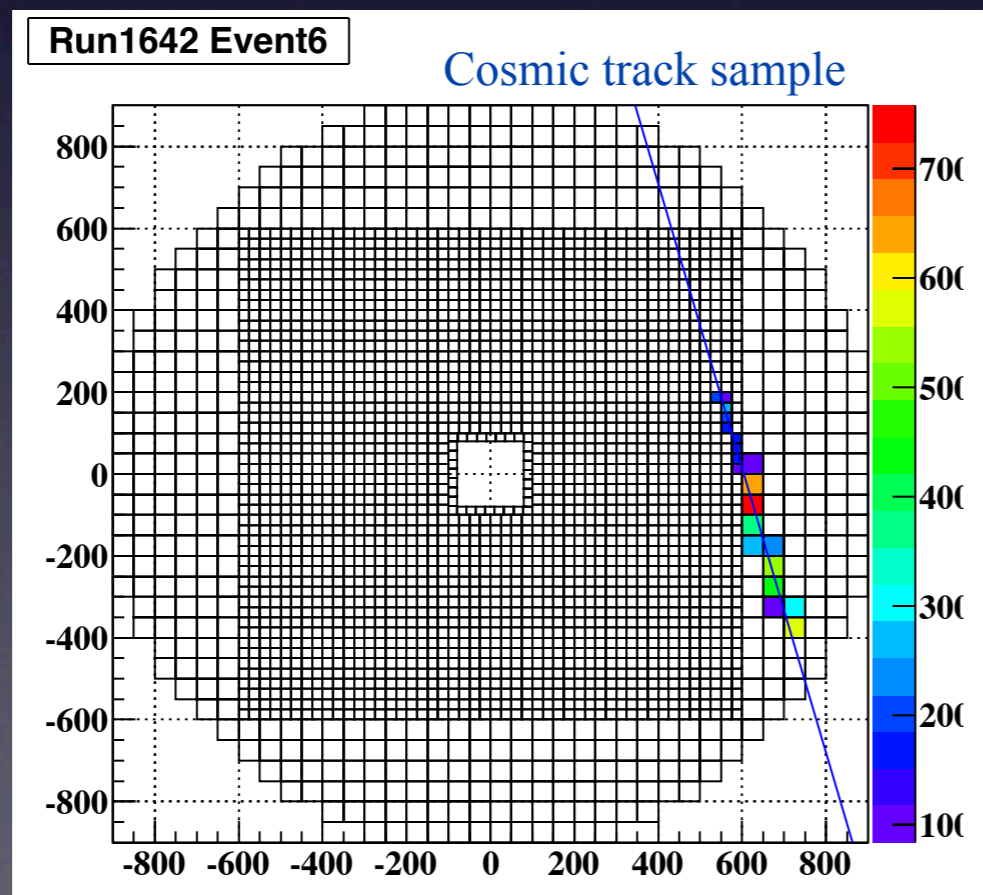
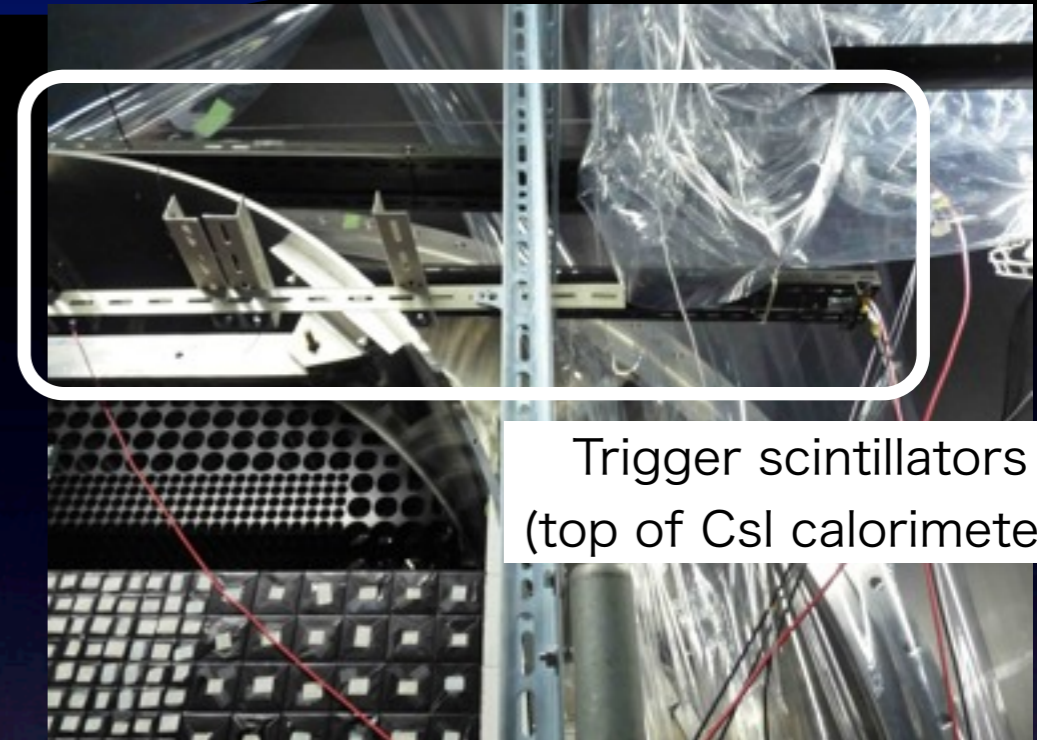


November Run



Cosmic ray analysis

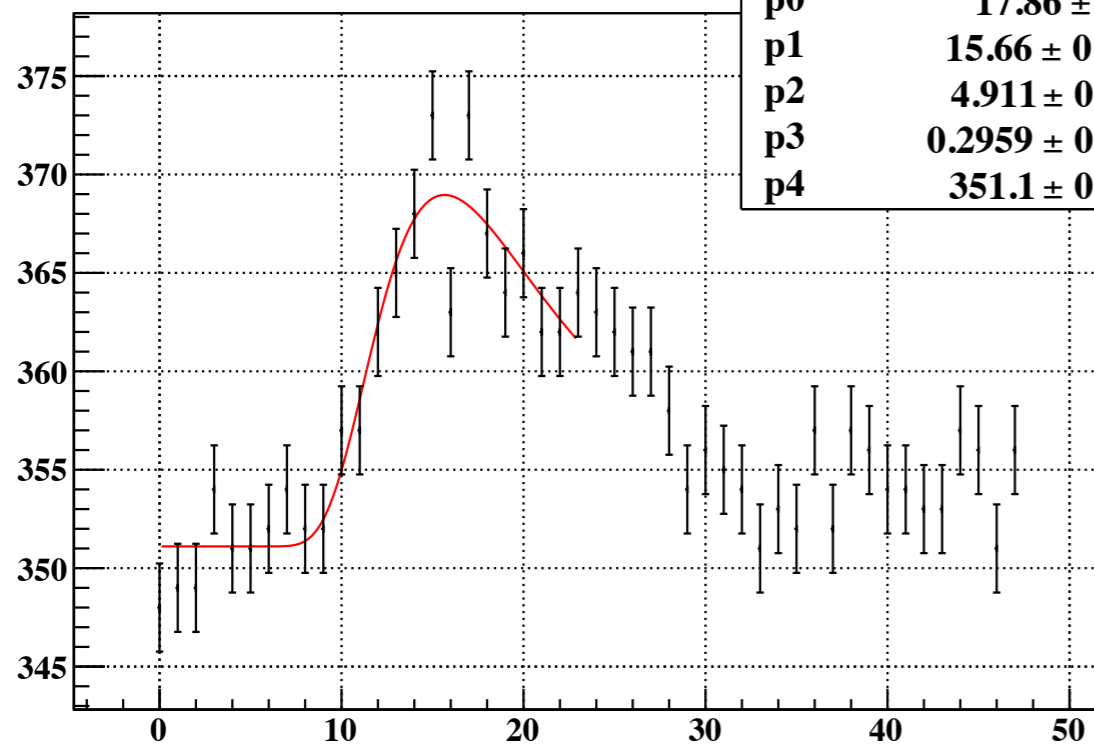
- Trigger
 - CsI Calorimeterの上下に2枚ずつ、計4枚のPlastic scintillatorを設置した。
 - 本講演の解析では下流側上下2枚のcoincidenceのみを要求
 - ビーム軸方向の位置を125mmの範囲に制限し、CsI内での発光位置の不定性を除去



波形サンプル

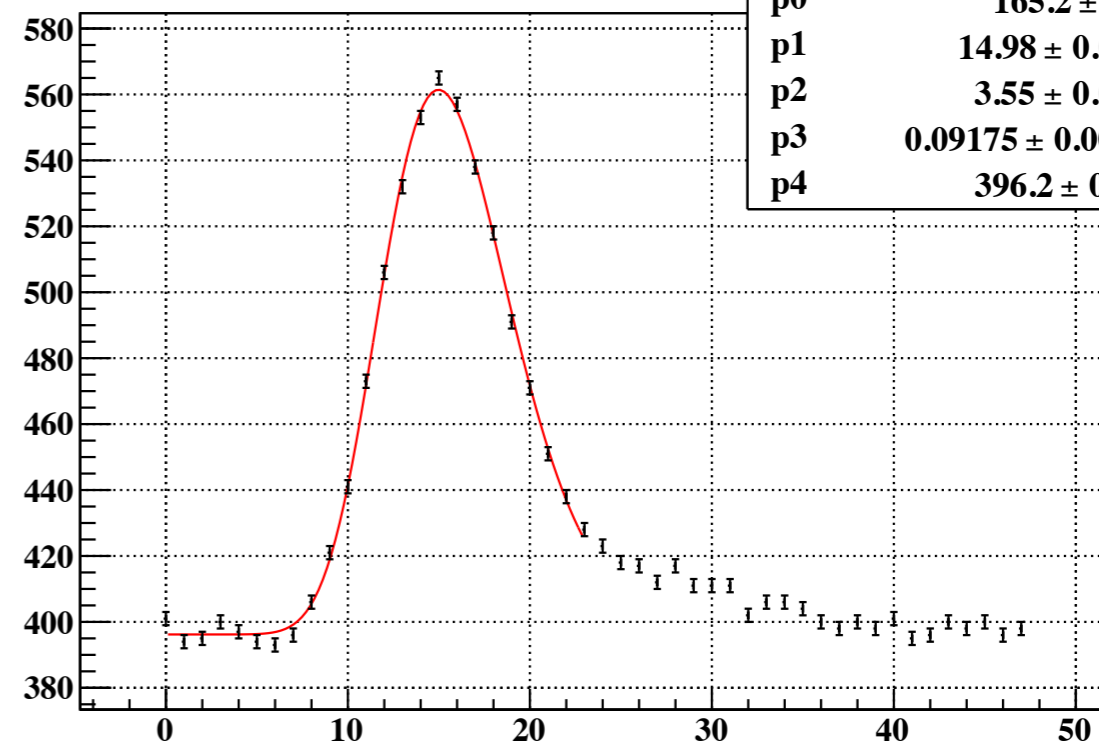
1MeV

χ^2 / ndf	26.75 / 19
p0	17.86 ± 1.27
p1	15.66 ± 0.5954
p2	4.911 ± 0.6133
p3	0.2959 ± 0.1262
p4	351.1 ± 0.7863



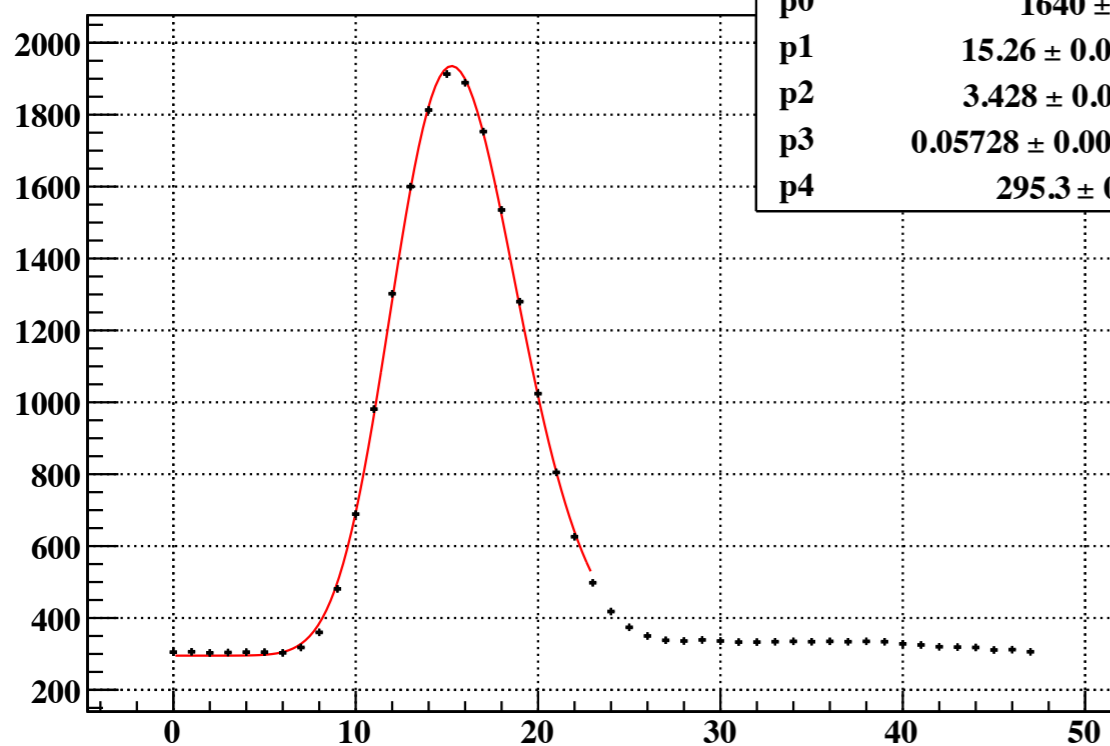
10MeV

χ^2 / ndf	33.54 / 19
p0	165.2 ± 1.151
p1	14.98 ± 0.04046
p2	3.55 ± 0.03199
p3	0.09175 ± 0.006422
p4	396.2 ± 0.7108



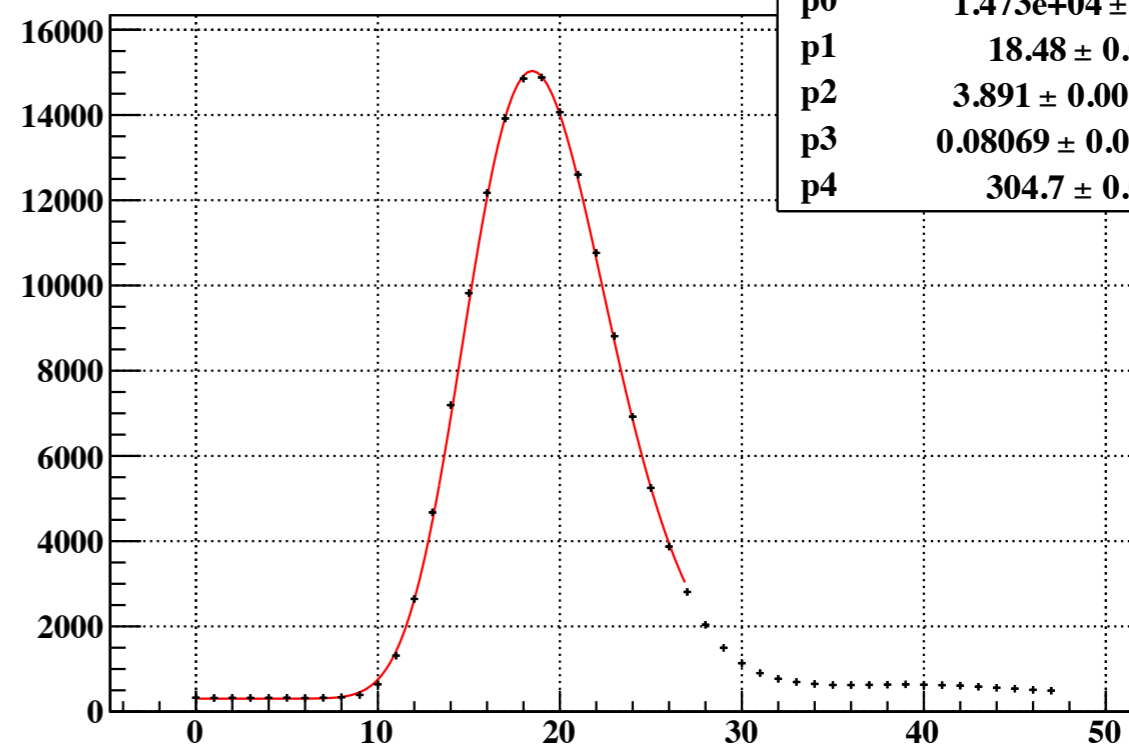
100MeV

χ^2 / ndf	895 / 19
p0	1640 ± 1.177
p1	15.26 ± 0.004278
p2	3.428 ± 0.003161
p3	0.05728 ± 0.0006726
p4	295.3 ± 0.7052



900MeV

χ^2 / ndf	$1.589 \times 10^4 / 23$
p0	$1.473 \times 10^4 \pm 1.323$
p1	18.48 ± 0.00105
p2	3.891 ± 0.0005751
p3	0.08069 ± 0.000121
p4	304.7 ± 0.04038

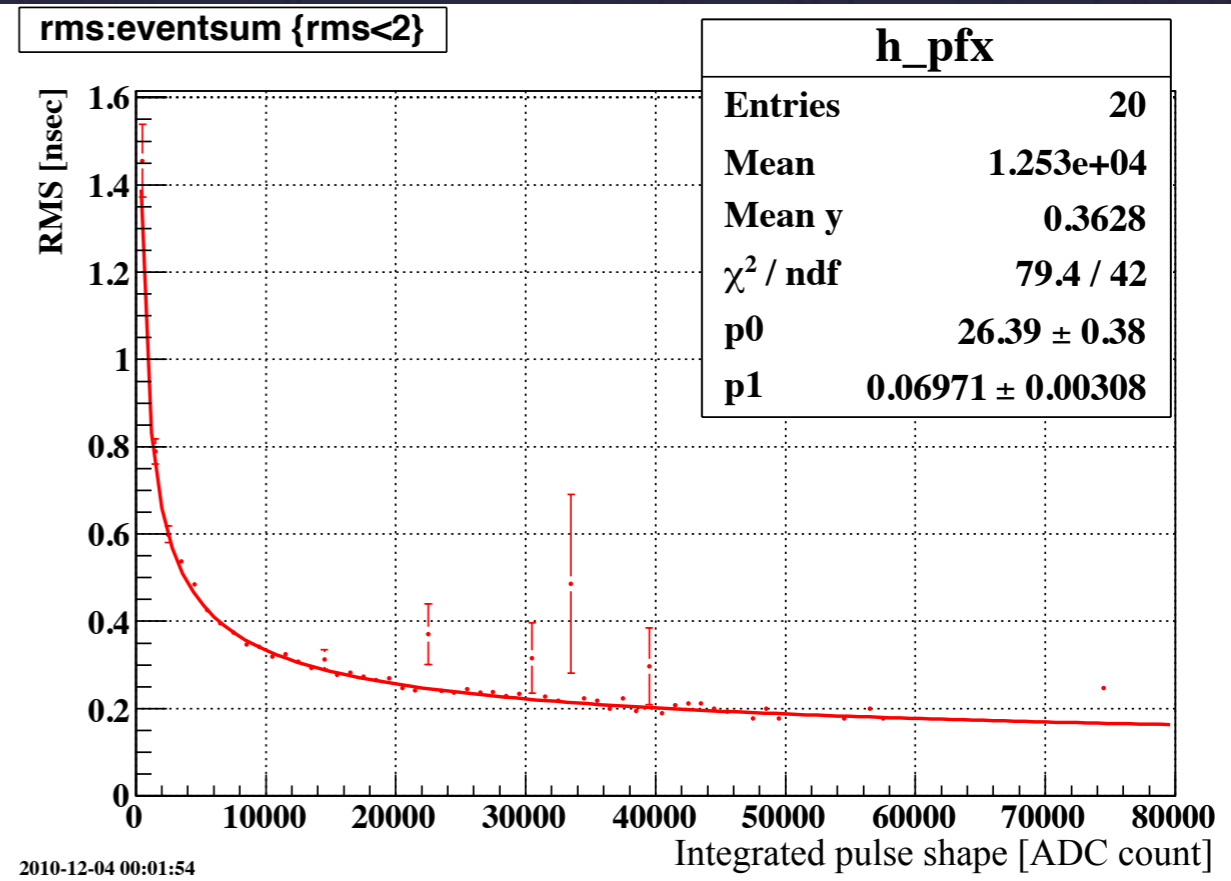
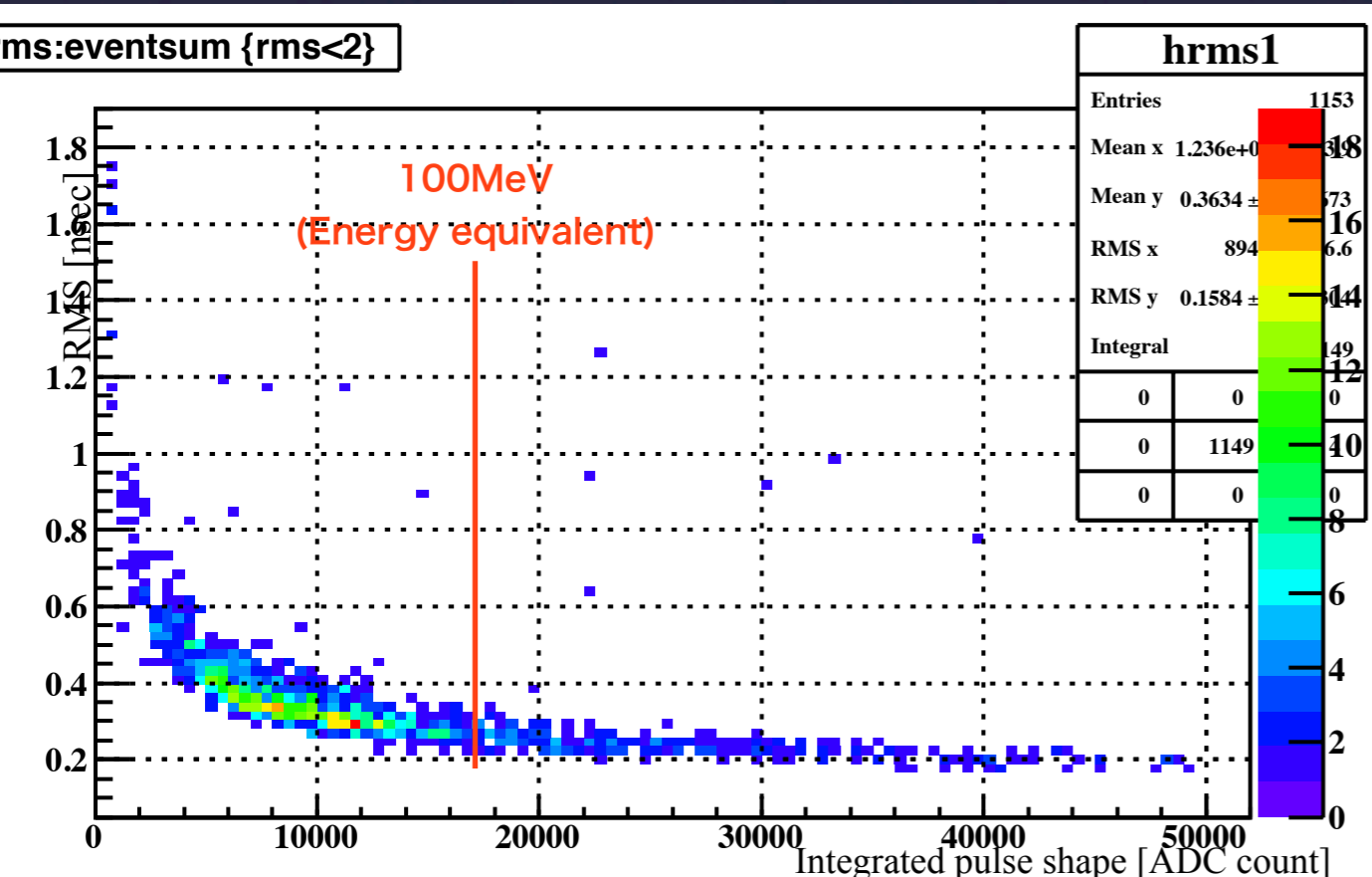


Timing resolution (Laser)

- Method
 - Collecting timing deference from certain crystal (#961) for each crystal event by event, then I got timing resolution of each crystal.
 - Light yield of each crystal distributes wide range, so it is able to derive timing resolution vs. integrated pulse shape.

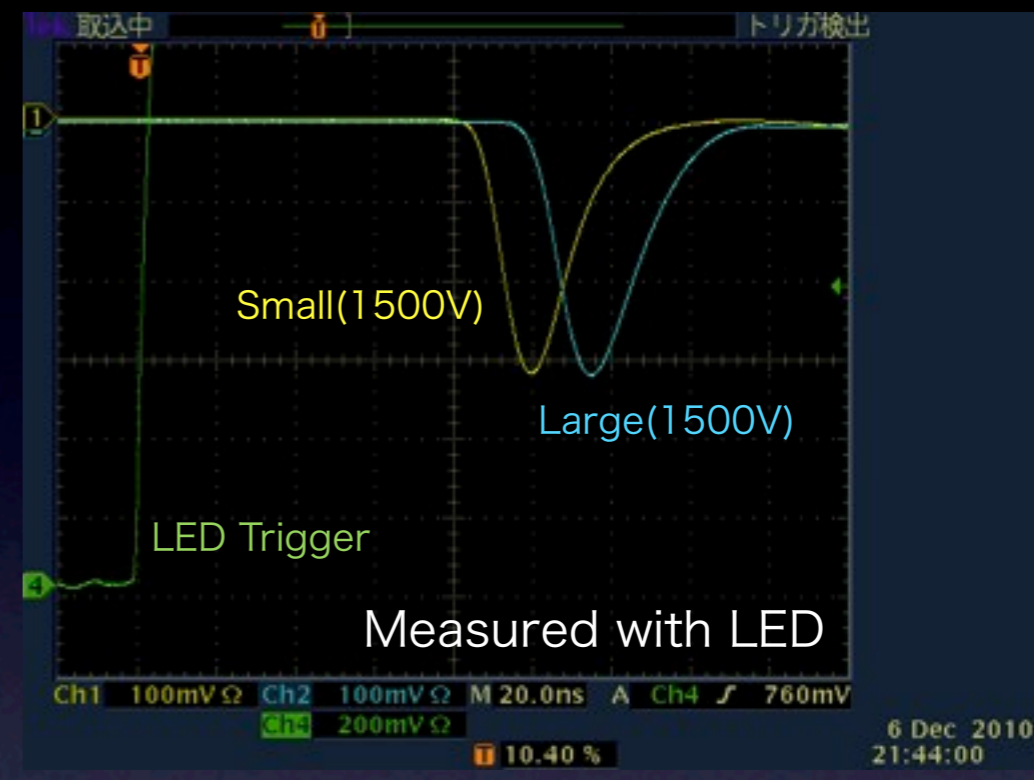
$$\sigma_t [\text{nsec}] = \frac{2.16}{\sqrt{E [\text{MeV}]} + 0.0697$$

0.29nsec @ 100MeV
1nsec @ 6MeV



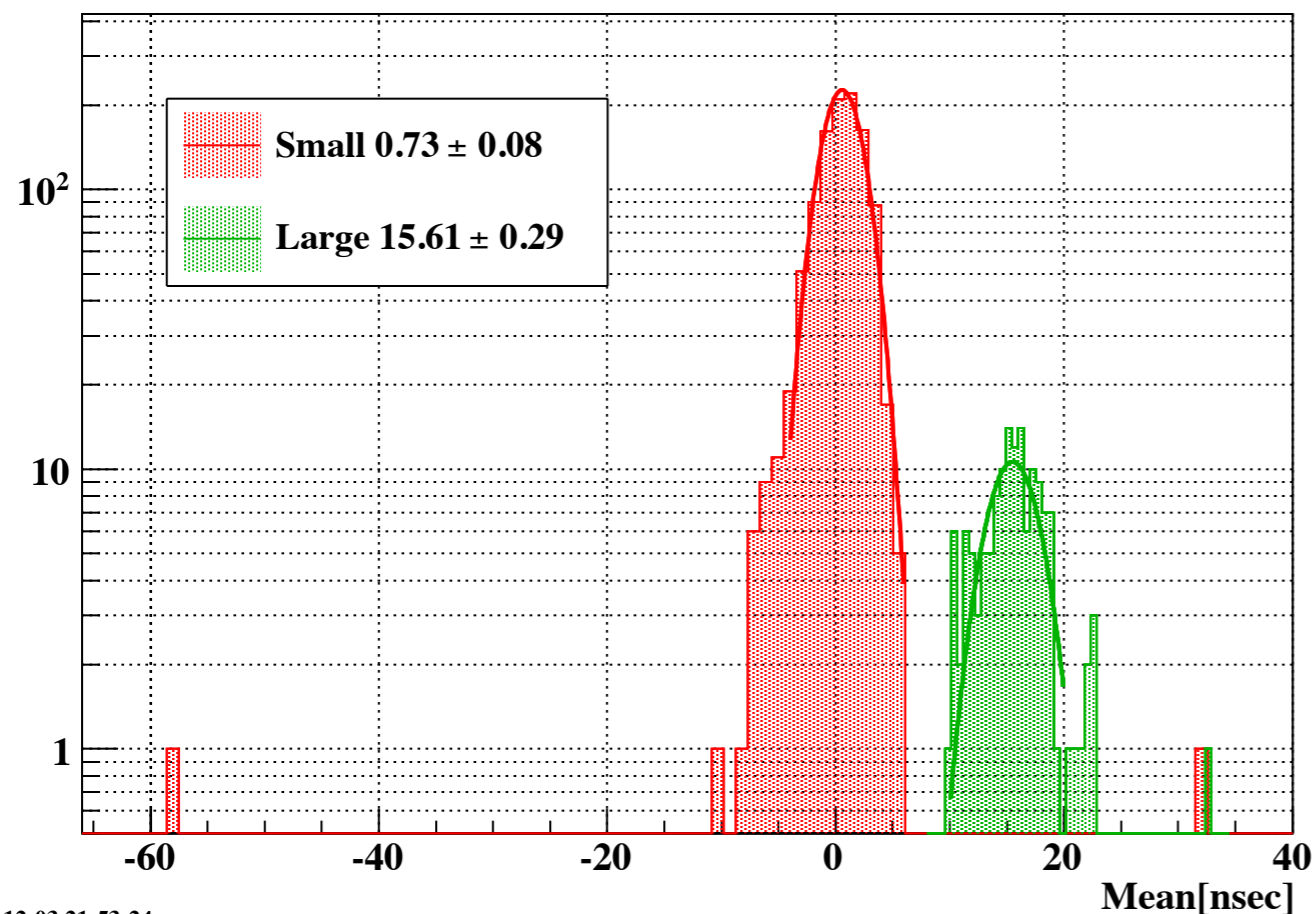
PMT transit time

- Small - Large
 - 14.88 ± 0.30 nsec

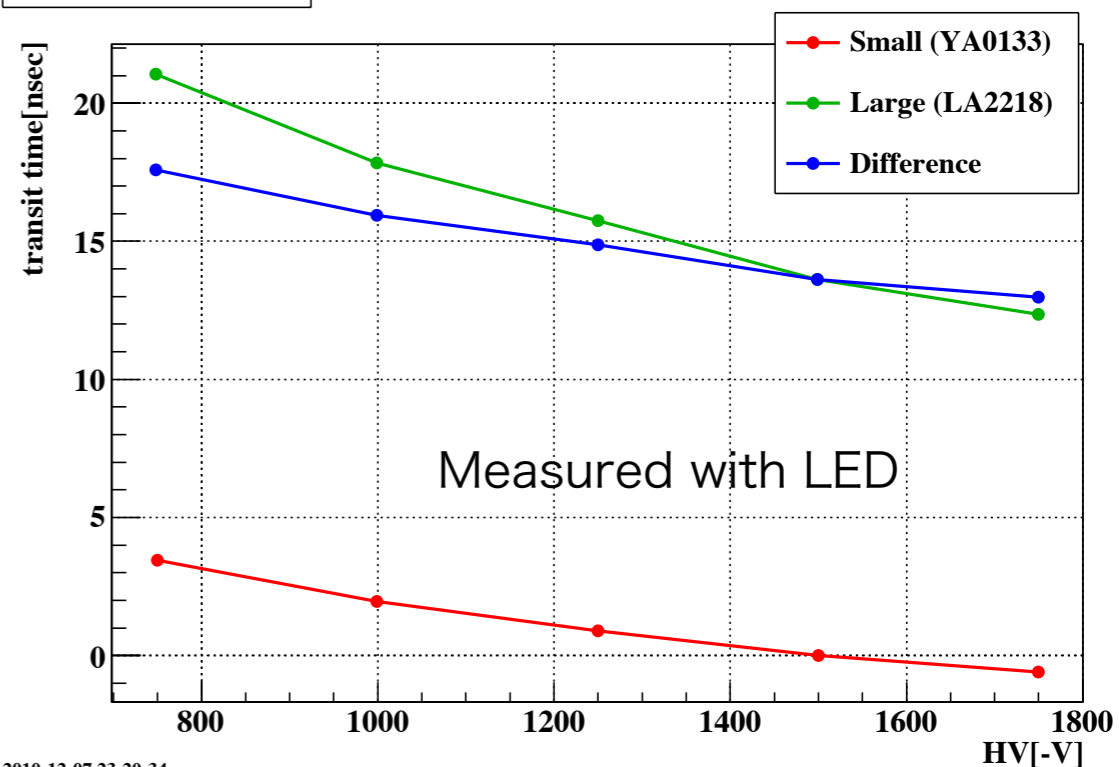


Laser timing distribution

Laser data (Run1550)



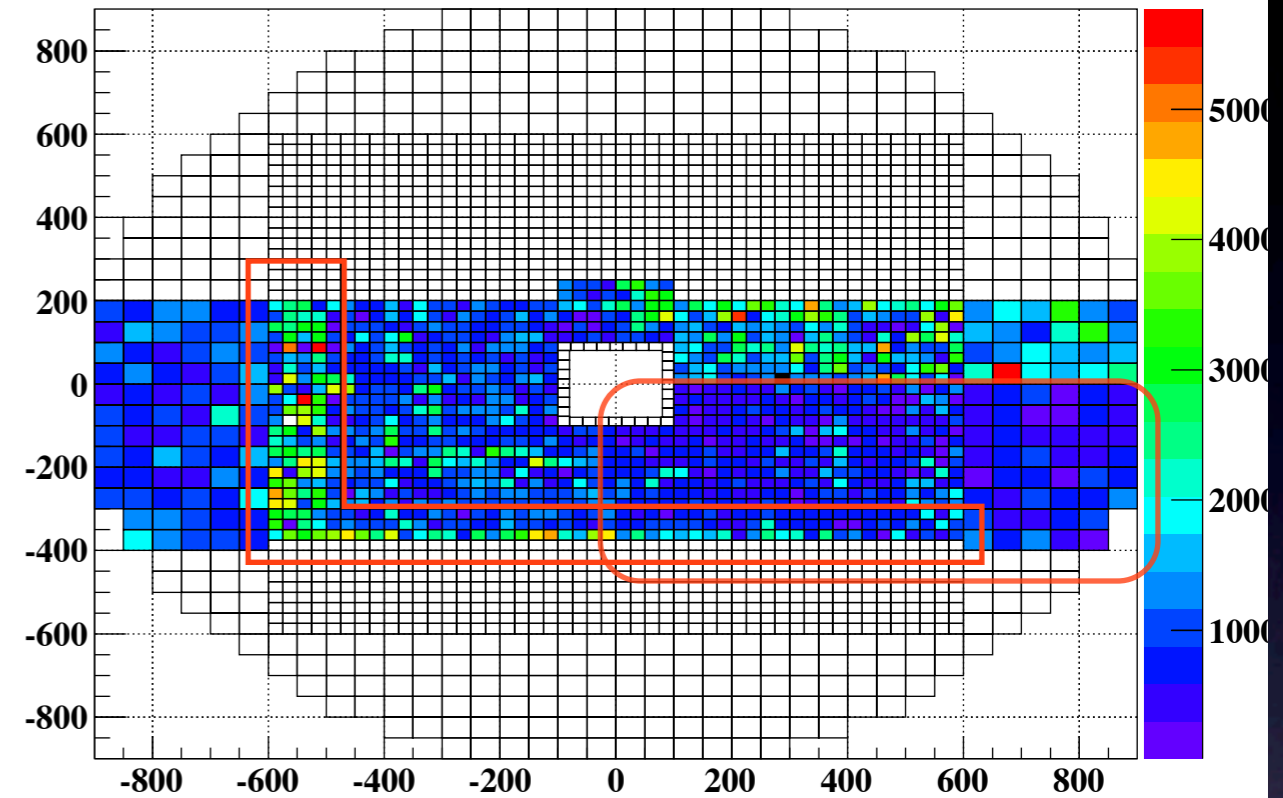
PMT transit time



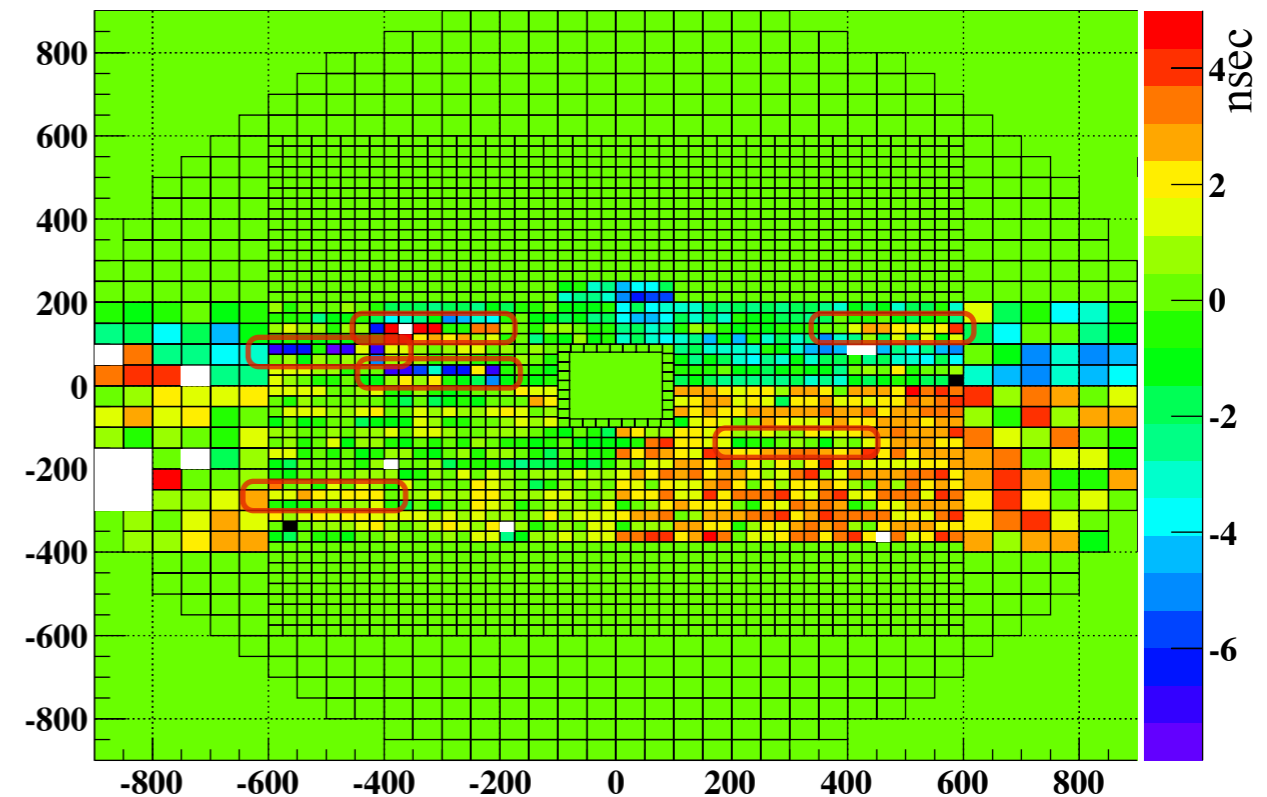
Laser timing

- 右下のSmall signal領域の構造は
タイミングでも見えている
 - Laserは上下左右完全に四分割され、それぞれ単独の
ボーリングボールから入射する。
- SmallのL字型Large signal領域が
タイミングでは見えない
 - そもそもなぜこのような構造がある？
 - PMT gainの分布との相関はあるのか？
- ところどころ横8chの構造が見えている
 - FADCモジュールとの相関？
 - ただしFADCモジュールは横8×縦2で1モジュール
(Channel AssignはAppendix)

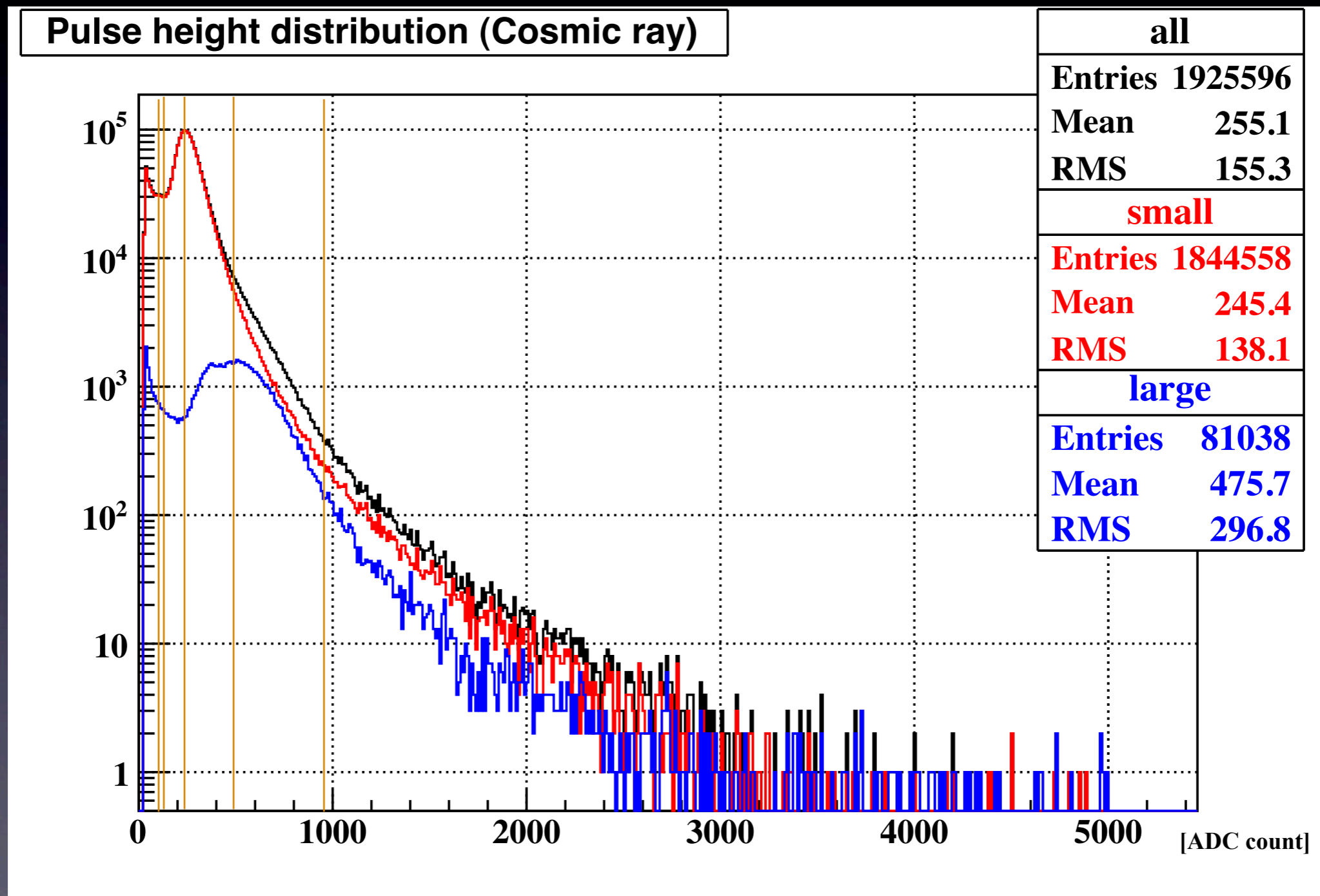
EventSum



Mean



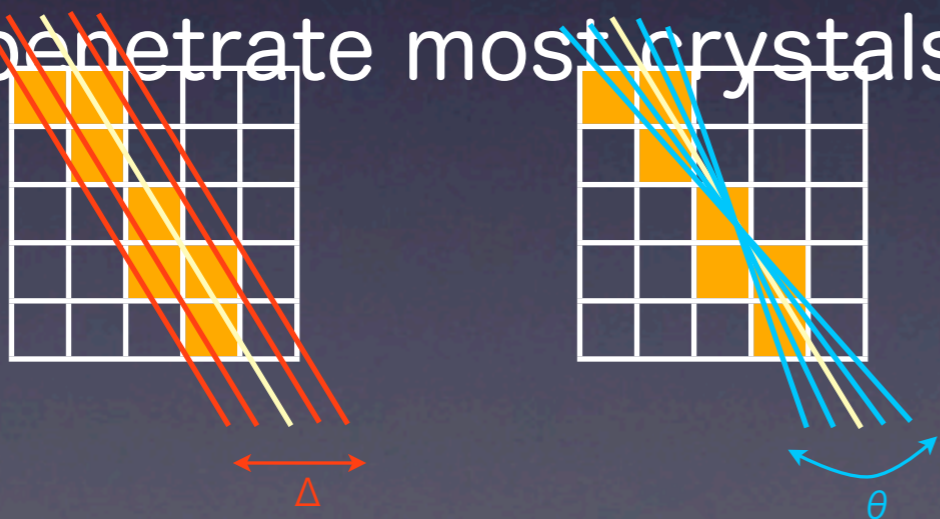
Cosmic ray distribution



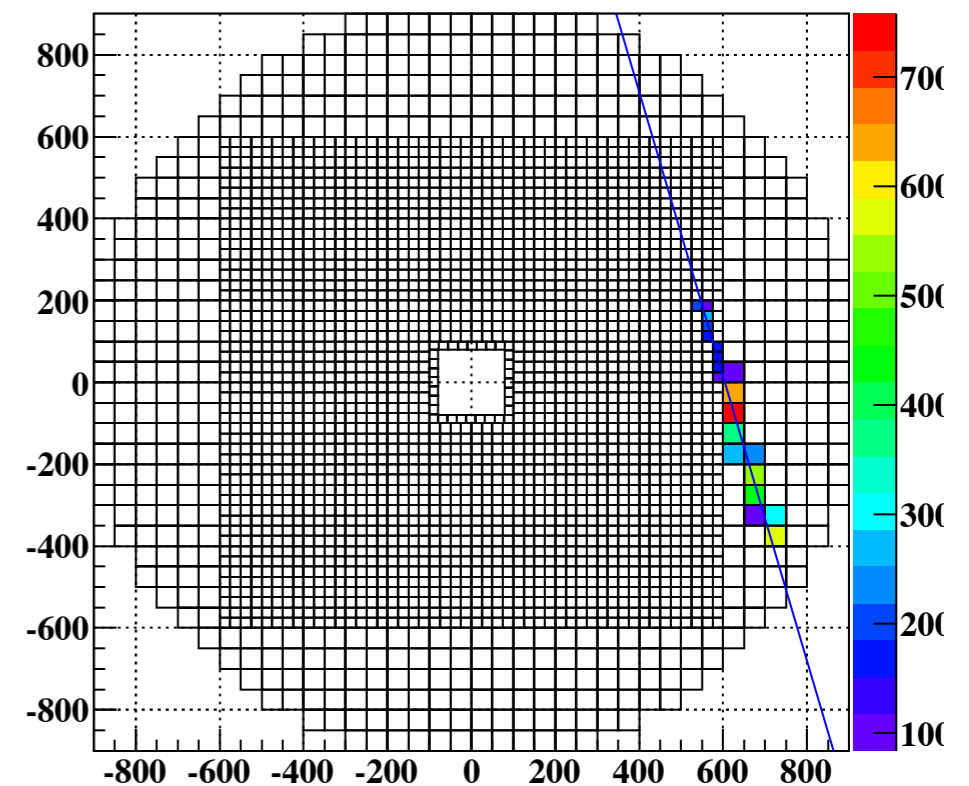
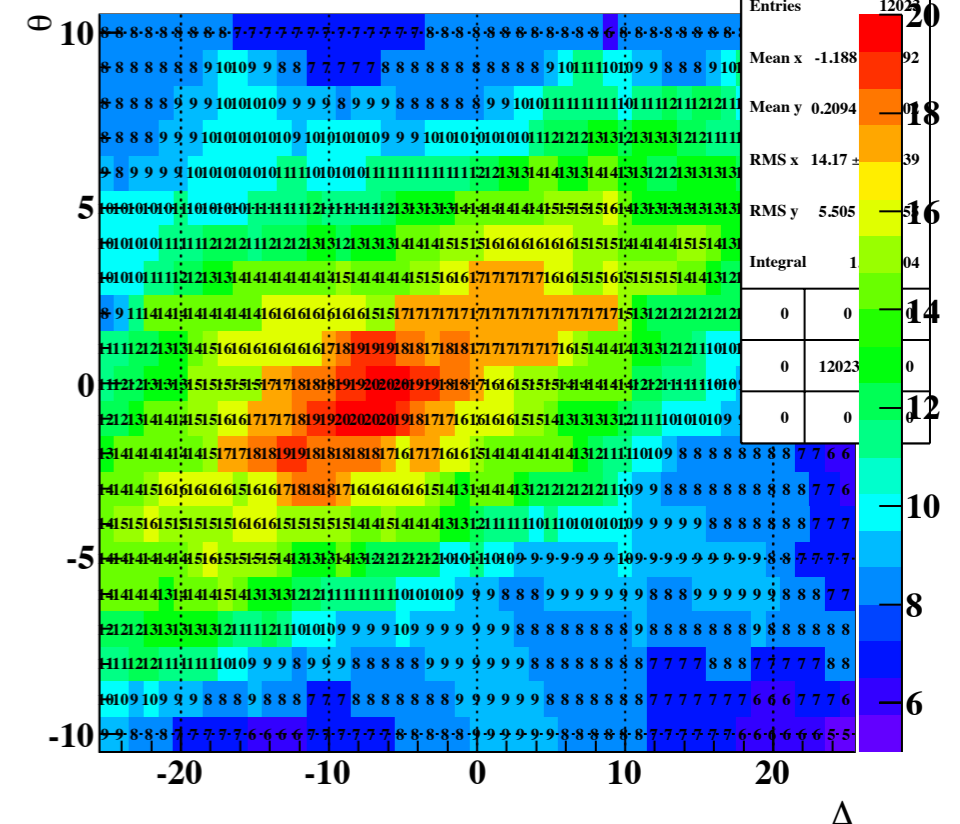
Track検出

- Asymmetric gaussian fit
 - pulse height > 30 ($\sim 2\text{MeV}$)
- Require 1 or adjacent 2 hit on the top line and also bottom line
- Stirring line, I adopt the line which

penetrate most crystals

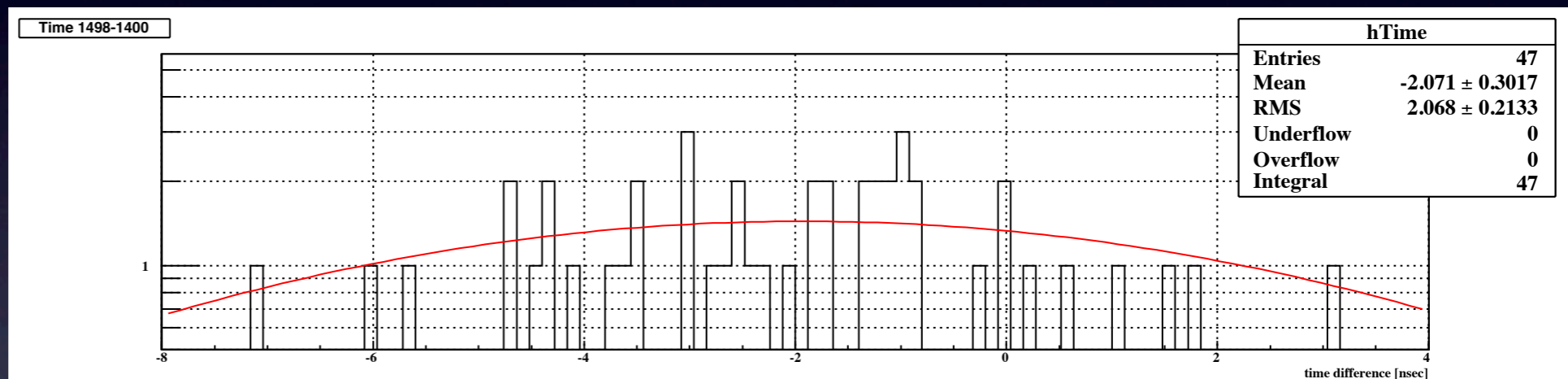
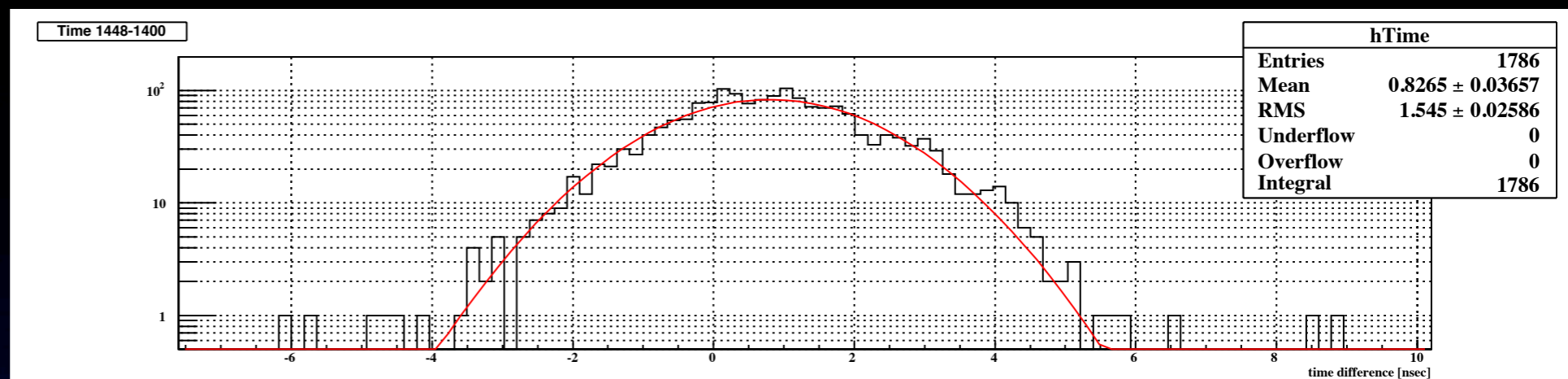


Run1642 Event6

 Δ - θ chart

結晶間の時間差 Δt_{ij}

1588	1589	1590	1591	1592	1593	1594	1595
1540	1541	1542	1543	1544	1545	1546	1547
1492	1493	1494	1495	1496	1497	1498	1499
1444	1445	1446	1447	1448	1449	1450	1451
1396	1397	1398	1399	1400	1401	1402	1403
1348	1349	1350	1351	1352	1353	1354	1355
1300	1301	1302	1303	1304	1305	1306	1307
1252	1253	1254	1255	1256	1257	1258	1259
1204	1205	1206	1207	1208	1209	1210	1211
1156	1157	1158	1159	1160	1161	1162	1163
1108	1109	1110	1111	1112	1113	1114	1115
1060	1061	1062	1063	1064	1065	1066	1067
1012	1013	1014	1015	1016	1017	1018	1019
964	965	966	967	968	969	970	971
916	917	918	919	920	921	922	923
868	869	870	871	872	873	874	875
820	821	822	823	824	825	826	827
772	773	774	775	776	777	778	779
724	725	726	727	728	729	730	731
676	677	678	679	680	681	682	683
628	629	630	631	632	633	634	635
580	581	582	583	584	585	586	587
532	533	534	535	536	537	538	539
484	485	486	487	488	489	490	491
436	437	438	439	440	441	442	443
388	389	390	391	392	393	394	395
340	341	342	343	344	345	346	347
292	293	294	295	296	297	298	299
244	245	246	247	248	249	250	251
196	197	198	199	200	201	202	203
148	149	150	151	152	153	154	155
100	101	102	103	104	105	106	107
52	53	54	55	56	57	58	59
4	5	6	7	8	9	10	11



- Δt_{ij} cut

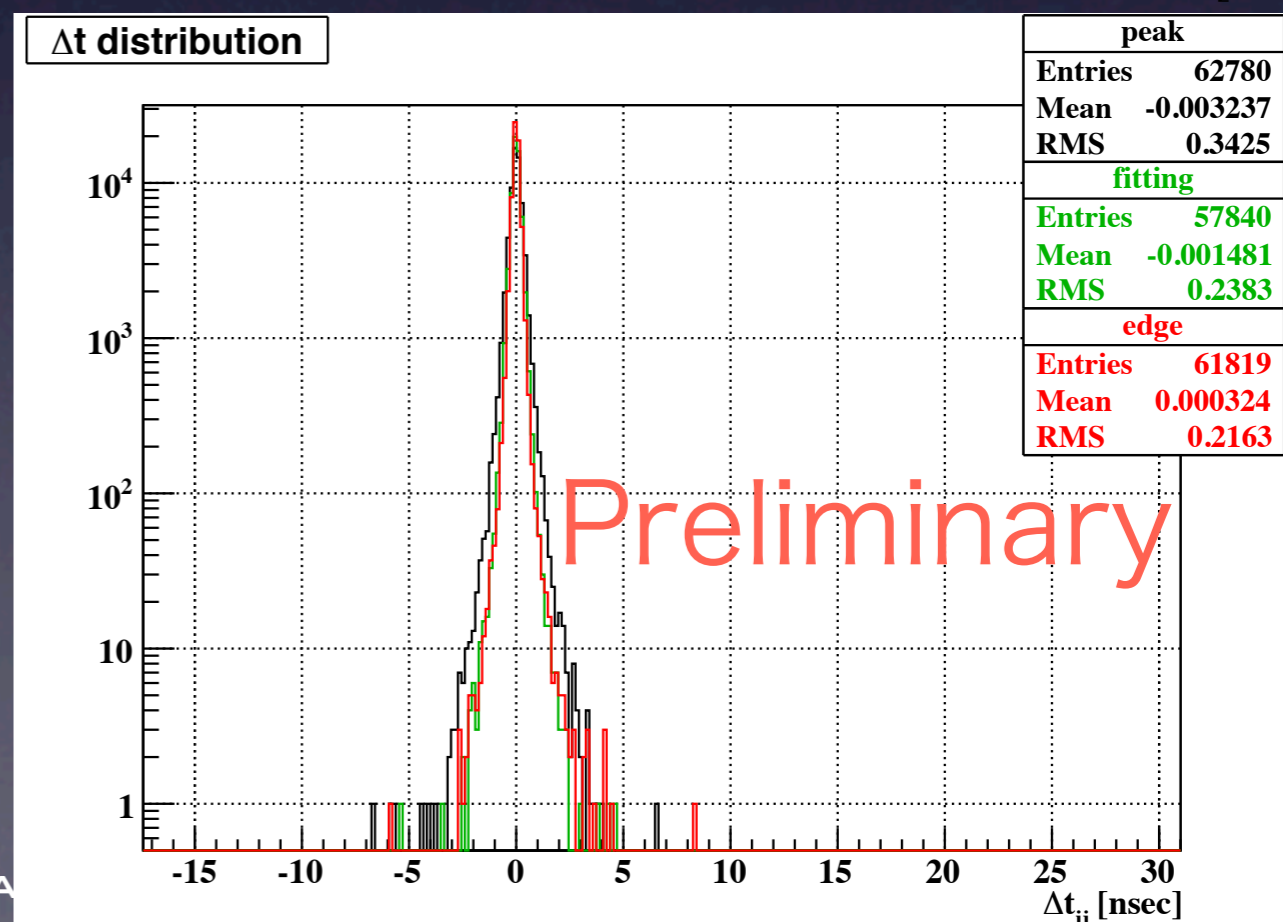
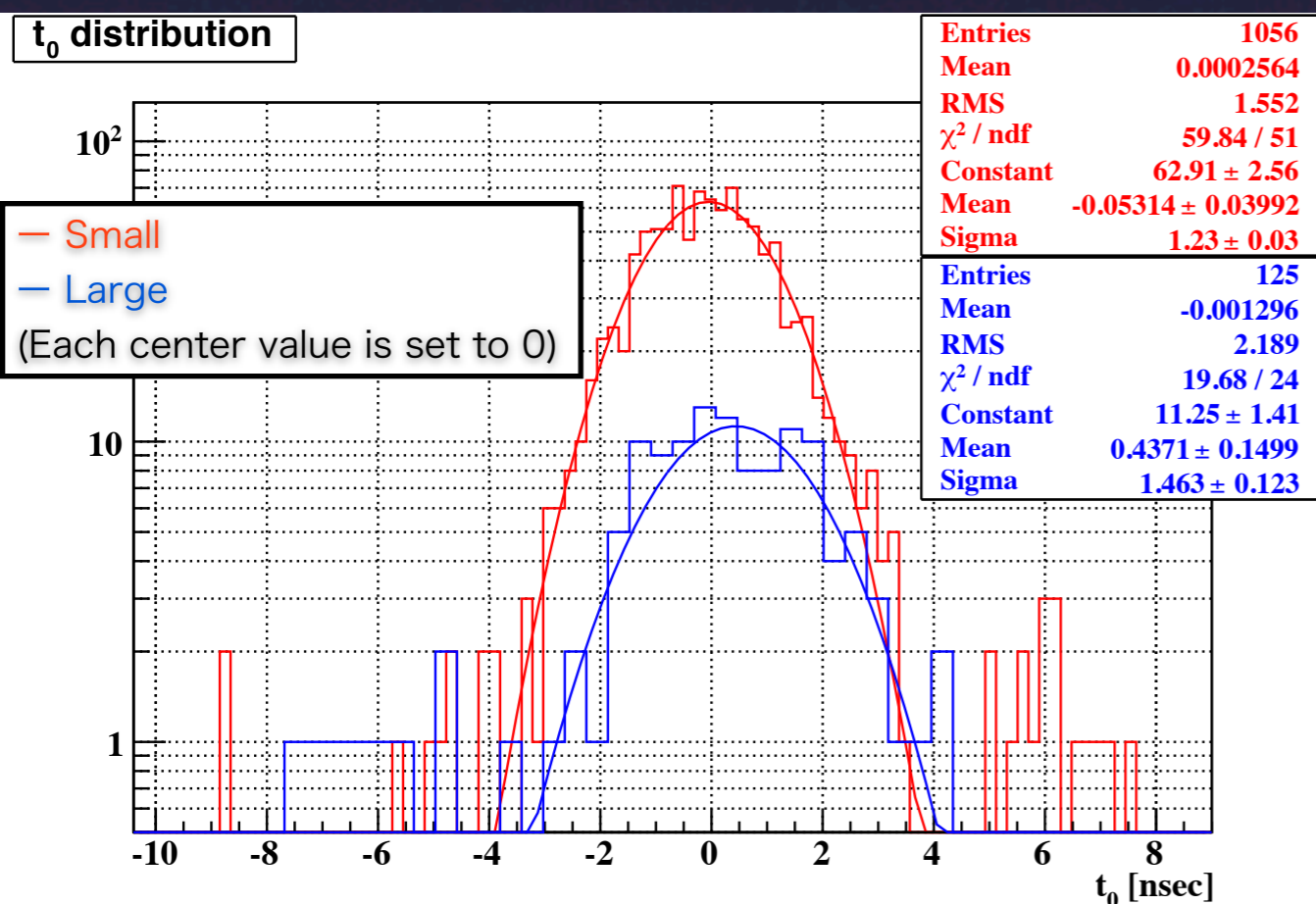
$$NDF > 10$$

$$0.5 < \frac{\chi^2}{NDF} < 1.5$$

$$MeanError < 5.0$$

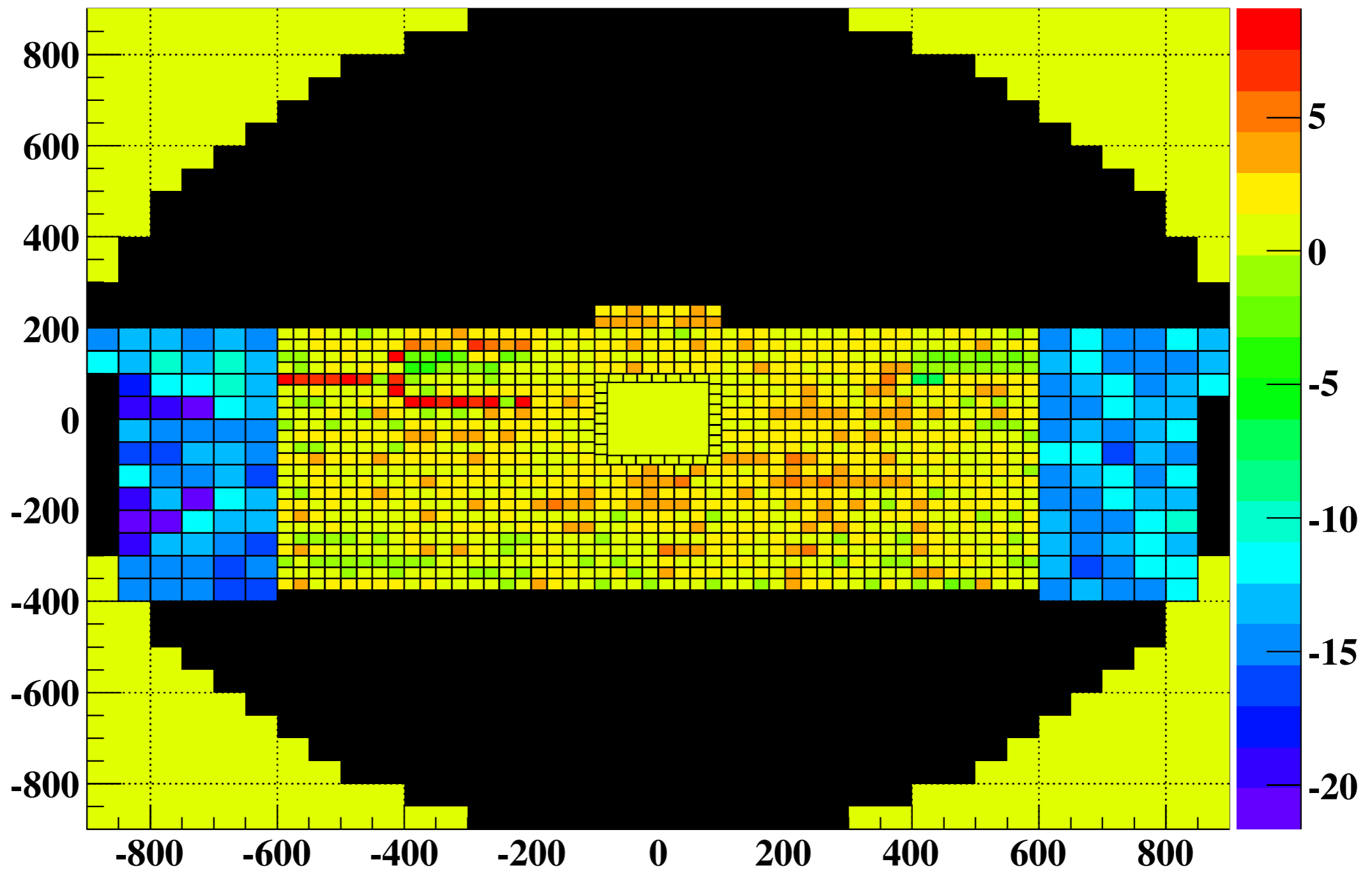
Timing offset distribution

- チャンネル毎の t_0 は以下の分布しており、その決定精度は $0.22\text{nsec}_{\text{rms}}$ である。
 - Sigma $\sim 1.2\text{ nsec}$ (small)
 - $\sim 1.5\text{ nsec}$ (large)

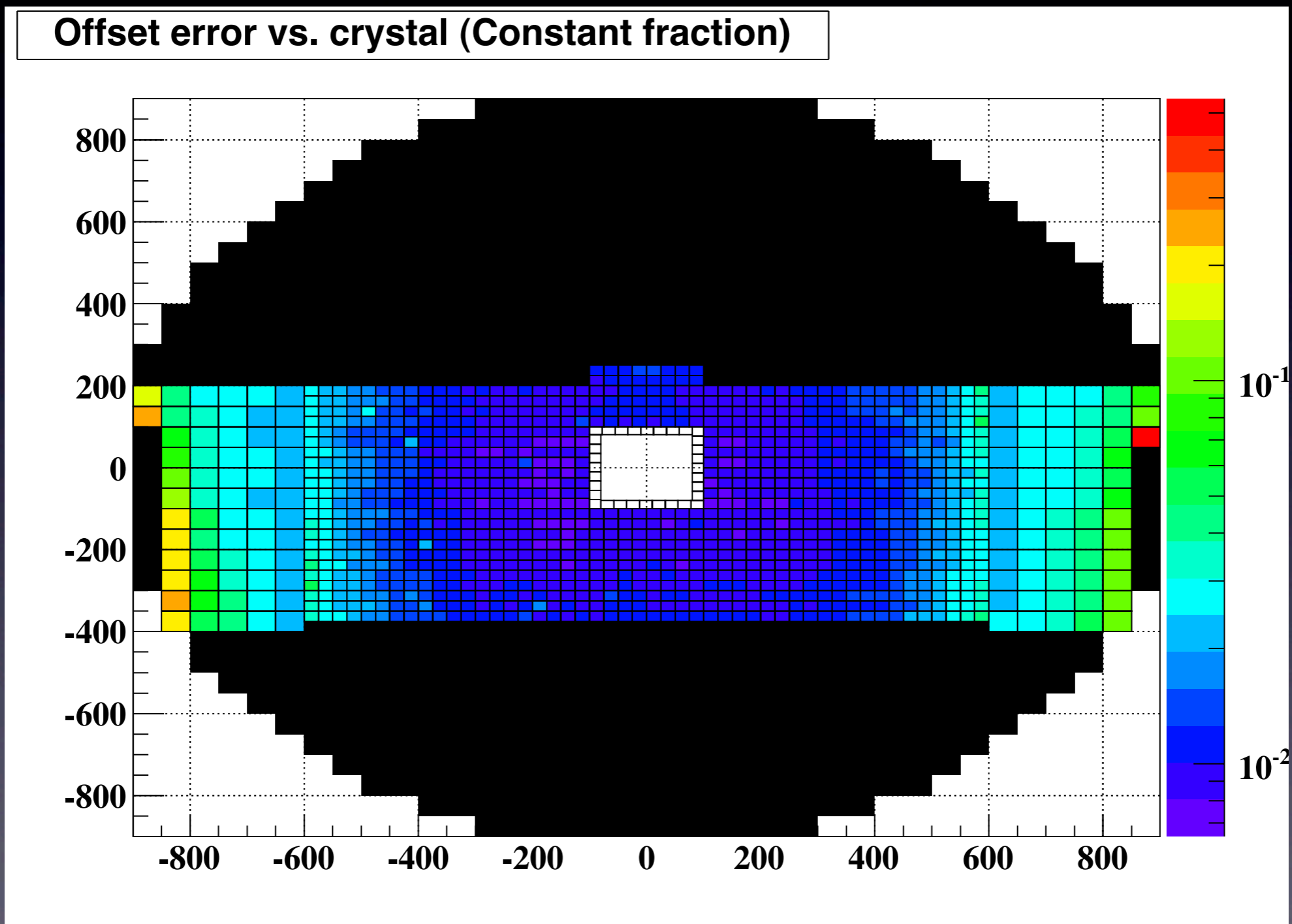


to distribution

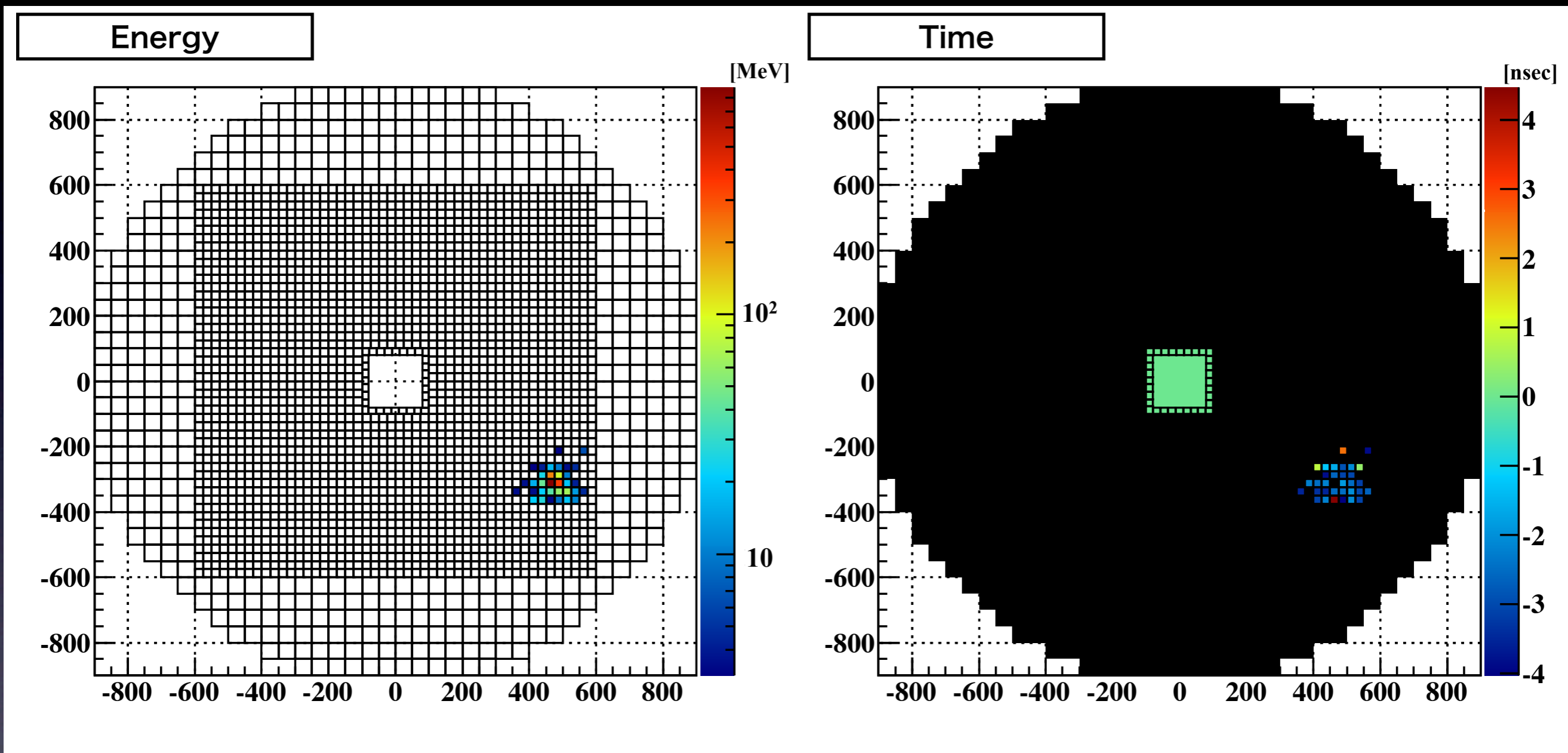
Offset vs. crystal (Constant fraction)



to error distribution

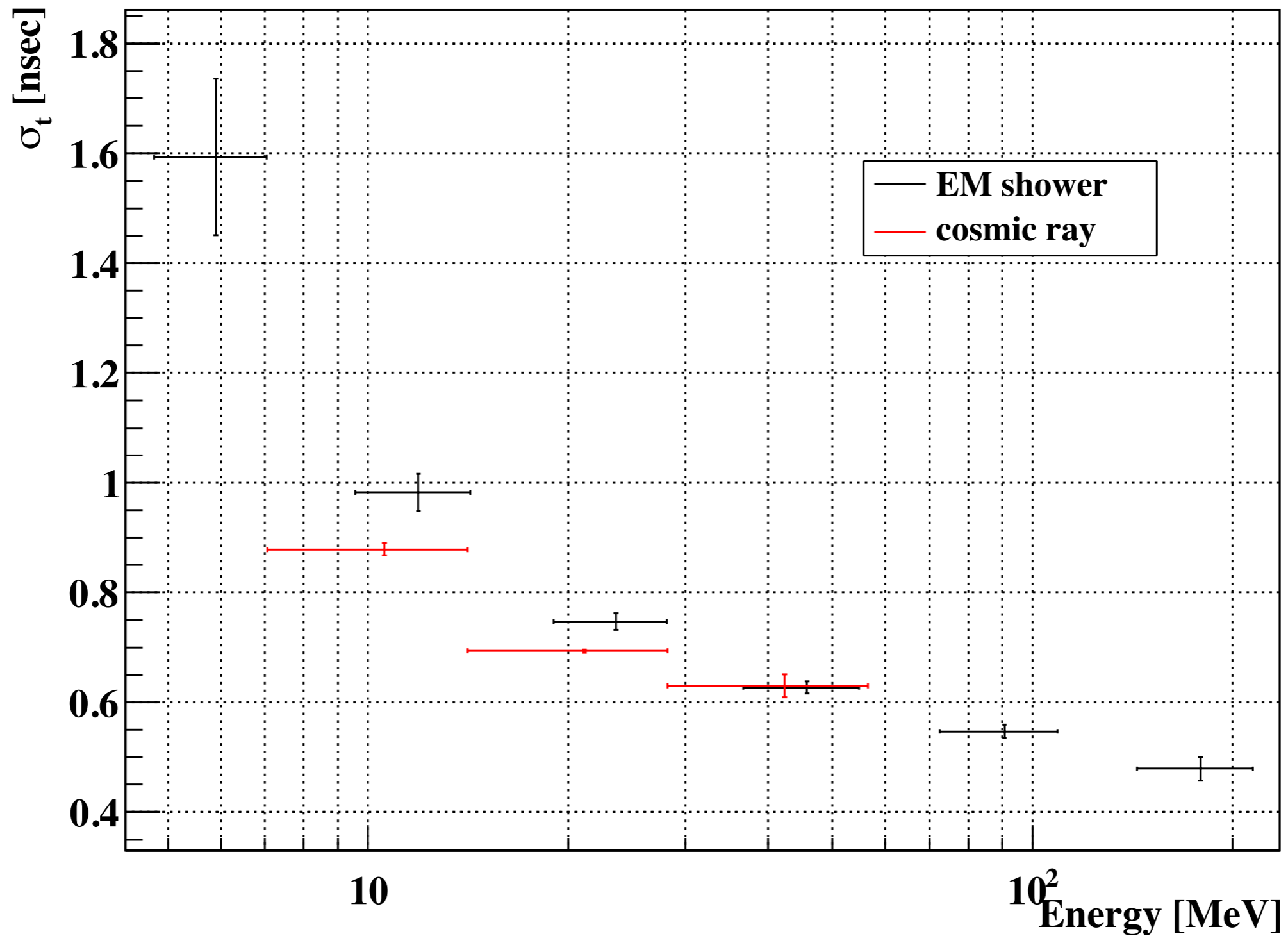


e^\pm cluster



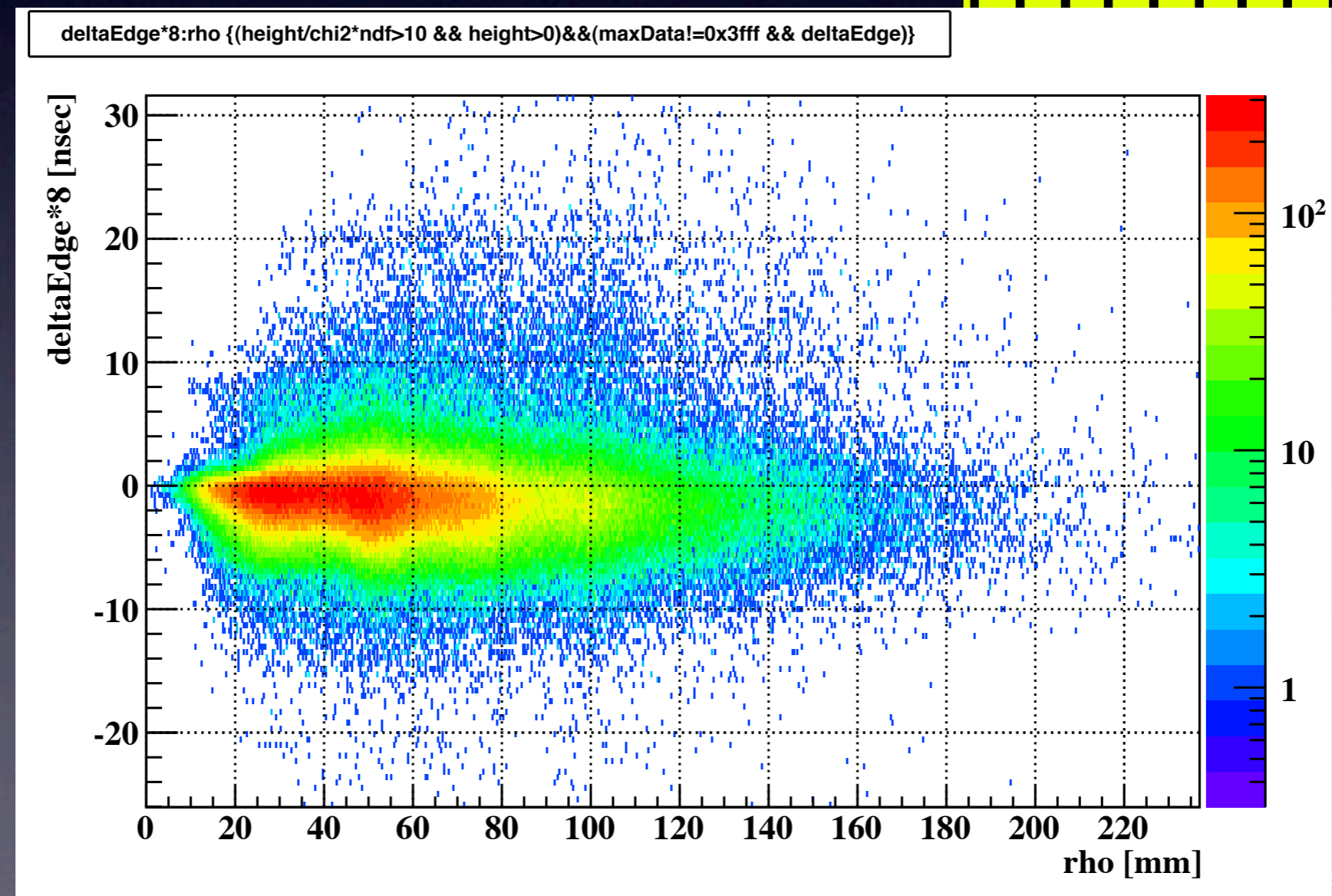
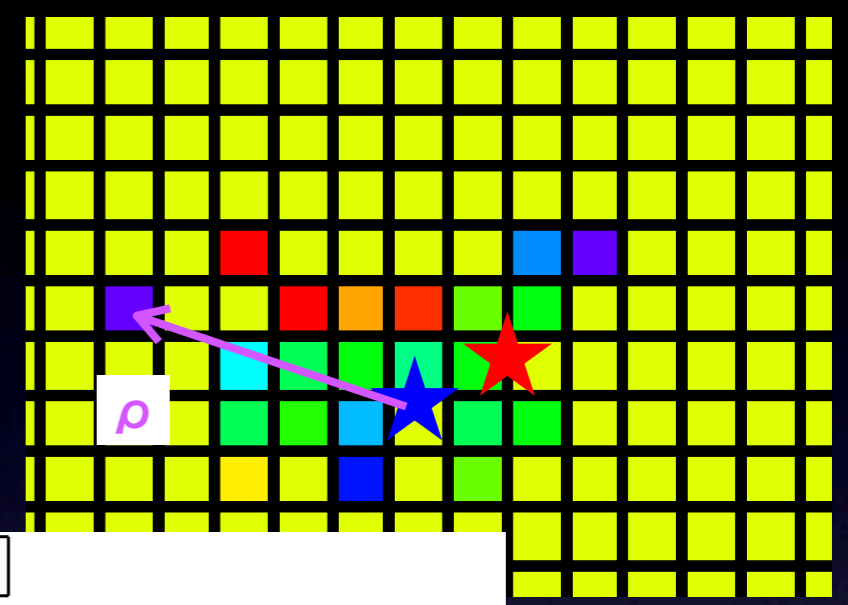
- constant fractionで各結晶の時間を算出し、最もエネルギーの大きい結晶との差を取る
 - 各結晶の t_0 は補正済み

Timing resolution



Timing dist. in cluster

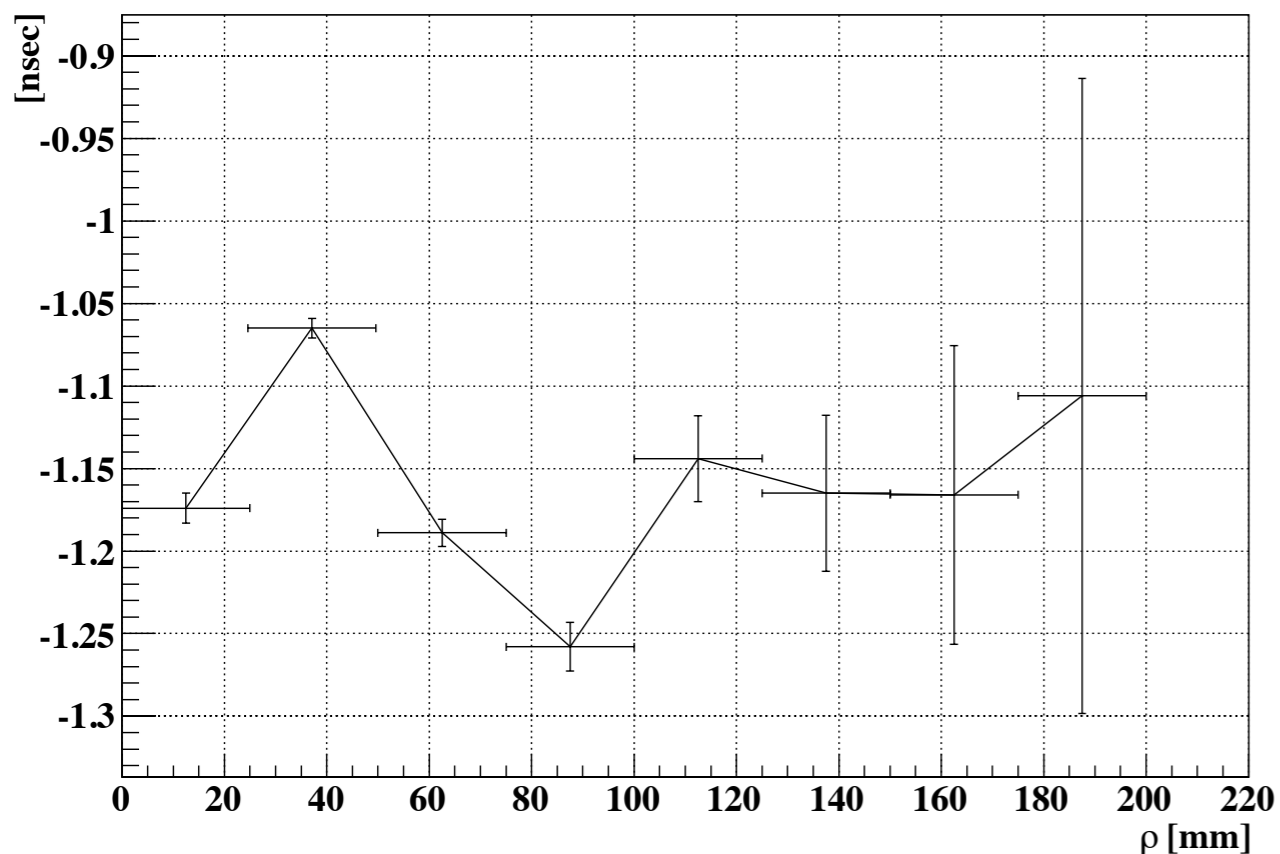
- Timing distribution along the distance from hit point



Timing dist. in cluster

- Mean time is about 1nsec earlier than hit crystal
- RMS increases along ρ

Mean of timing



RMS of timing

