

液体シンチレータによる反電子ニュートリノの方向検出のための研究

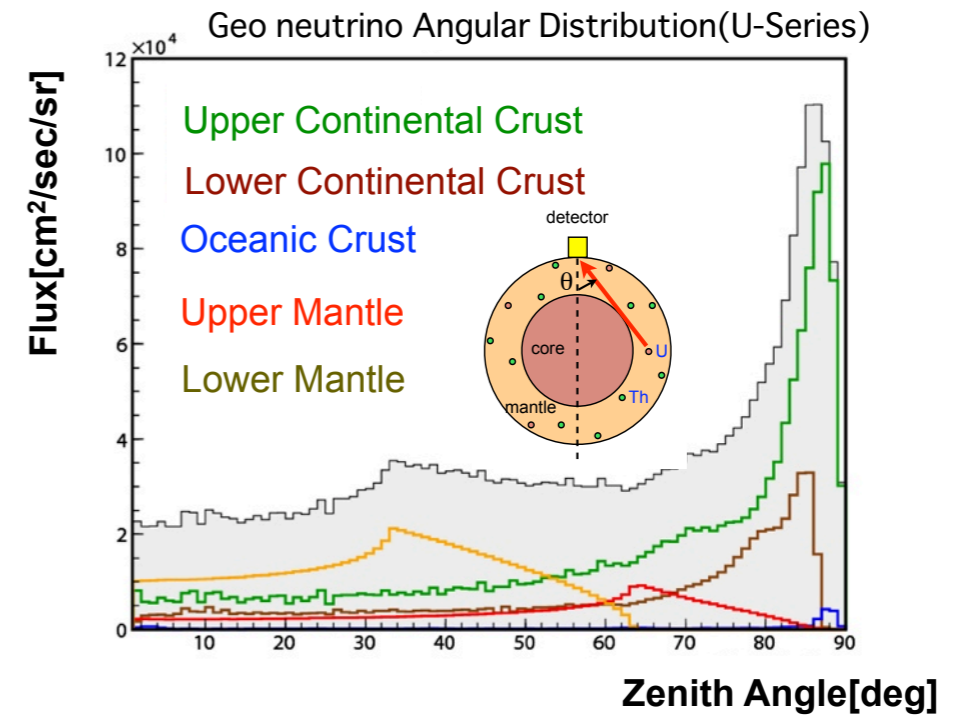
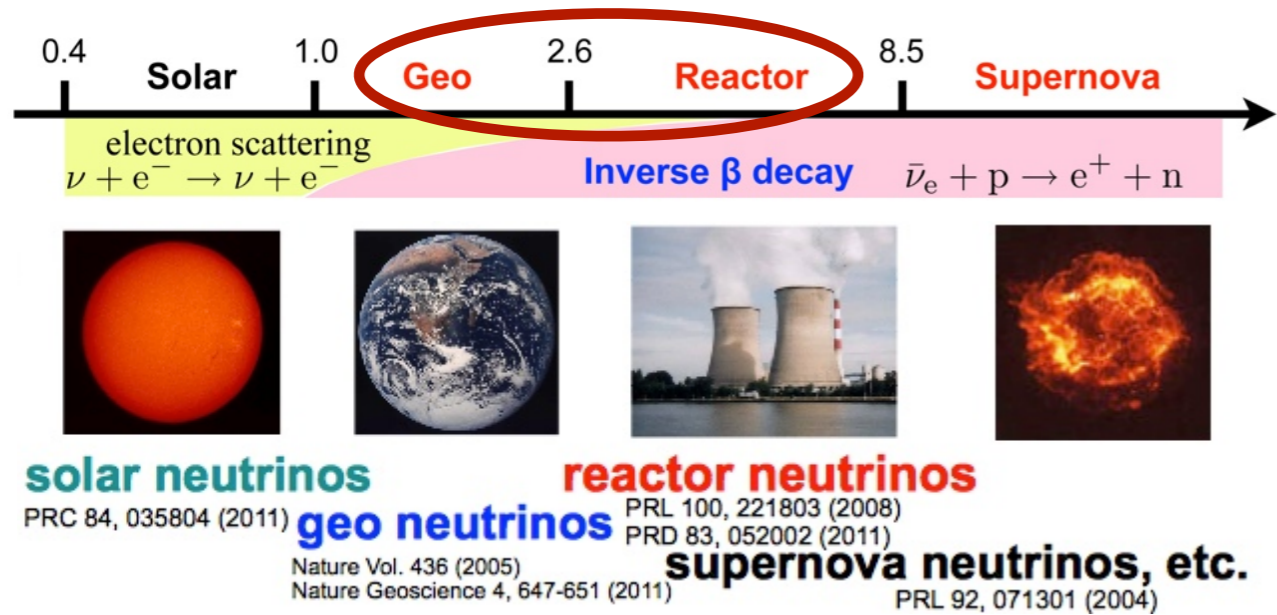
21ST ICEPP Symposium

東北大学 ニュートリノ科学研究センター, 白旗 豊

2015/02/10

1,モチベーション

- 液体シンチレータを用いた反ニュートリノの検出器では低エネルギーのニュートリノの飛来方向検出が出来ない



大型検出器

- 地球ニュートリノの飛来方向を知ることが出来るようになる
→地球の内部構造の理解が深まる(地球内部の放射性熱源の分布、マンツルの構成)
- 地球ニュートリノと原子炉ニュートリノとの区別がつけられ、運転状況に依存しない高精度データが得られるようになる

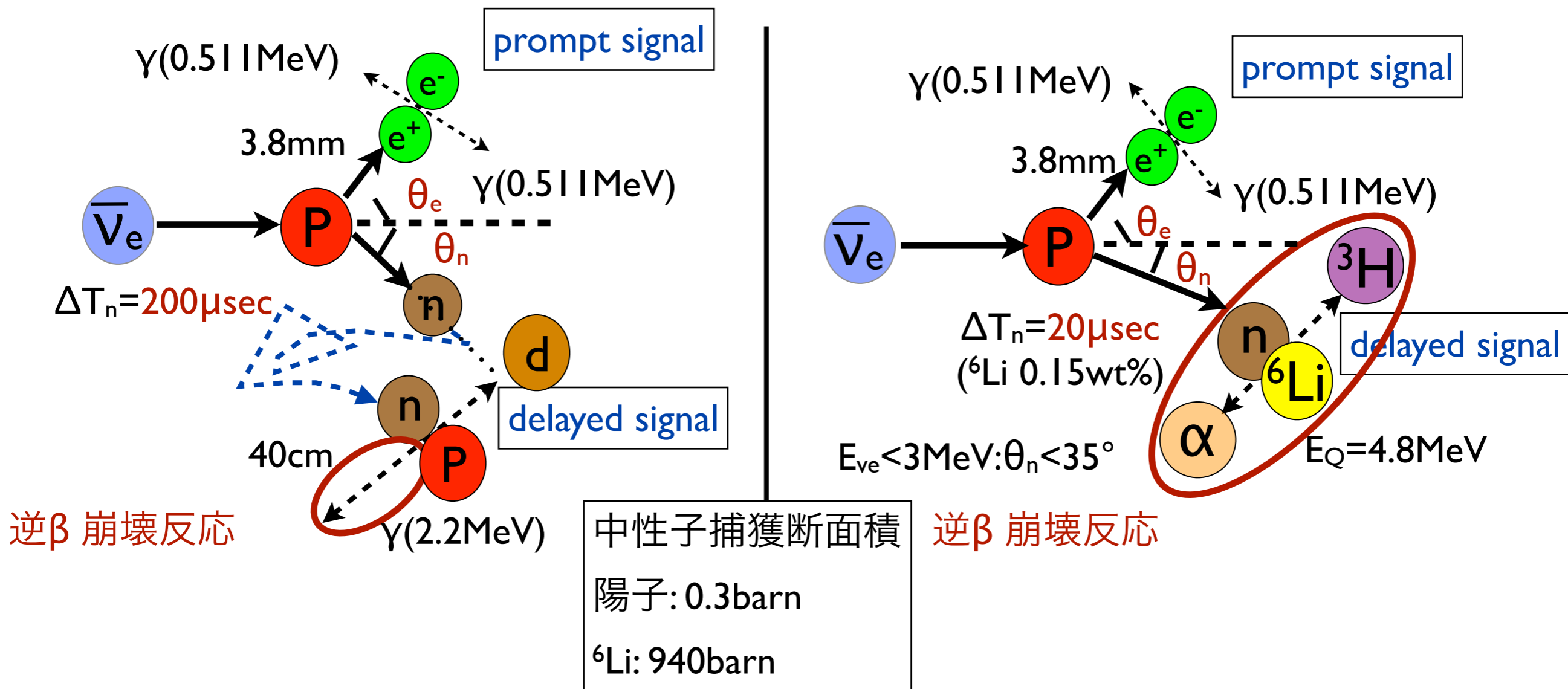
小型検出器(200L size)

- 方向検出の原理検証
- 原発の非破壊診断への応用

2, 検出原理

通常の液体シンチレータ

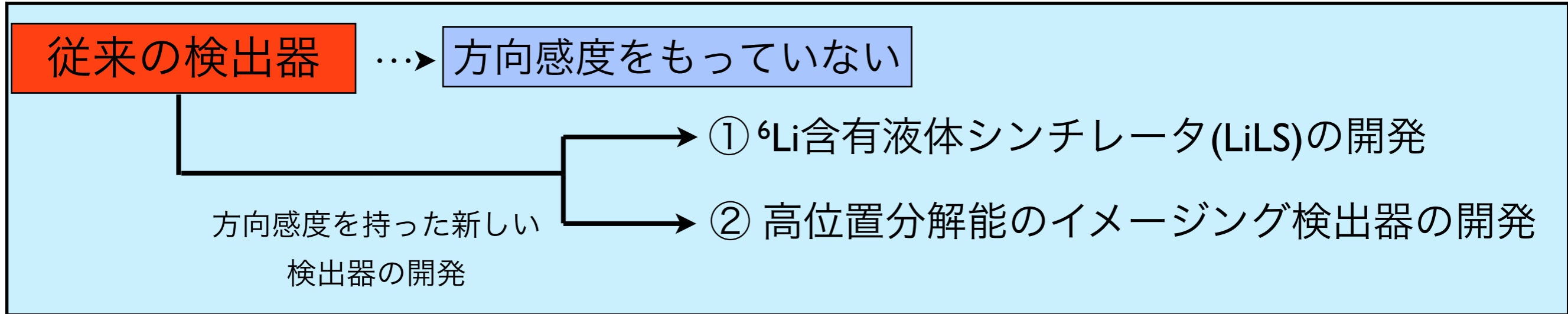
${}^6\text{Li}$ を含有した液体シンチレータ



- 陽子により中性子が捕獲される
- 中性子が長距離移動してしまうことで、反ニュートリノの方向情報を失う
- 捕獲点の特定が出来ない

- ${}^6\text{Li}$ により中性子が捕獲される
- 中性子捕獲断面積が大きいため、ニュートリノの方向情報を失う前に中性子を捕獲出来る
- 捕獲点の特定出来る

3,新しい検出器の開発



① LiLSの開発

LiLSの構成

PC:界面活性剤(TritonX-100)=83%:17%

PPO=5g/l, LiBr · H₂O(aqua)=37g/l, ^6Li =0.15wt%
(enrichを仮定(^6Li 95%))

- 性能評価
 - 発光量
 - 減衰長
- 測定
 - delayed energyのvisible energyの測定
 - 波形弁別(γ , α)

② イメージング検出器の開発

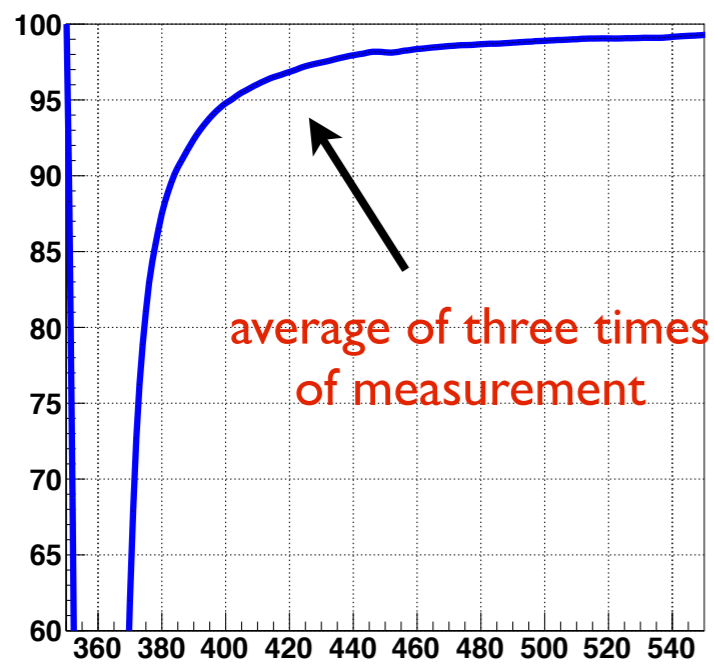
- レンズ+MultianodePMTによる撮像
 - レンズの設計
 - シミュレーションによる評価

3,新しい検出器の開発

～ 性能評価 ～

	Li[wt%] ⁶ Li[wt%]	減衰長[cm@400nm]	発光量[%] (N ₂ purging)
目標値	2.0 0.15	≧60	≧100(Kamland LS)
結果	2.0 0.15	167.9cm	110.3 (88.5)

透過率

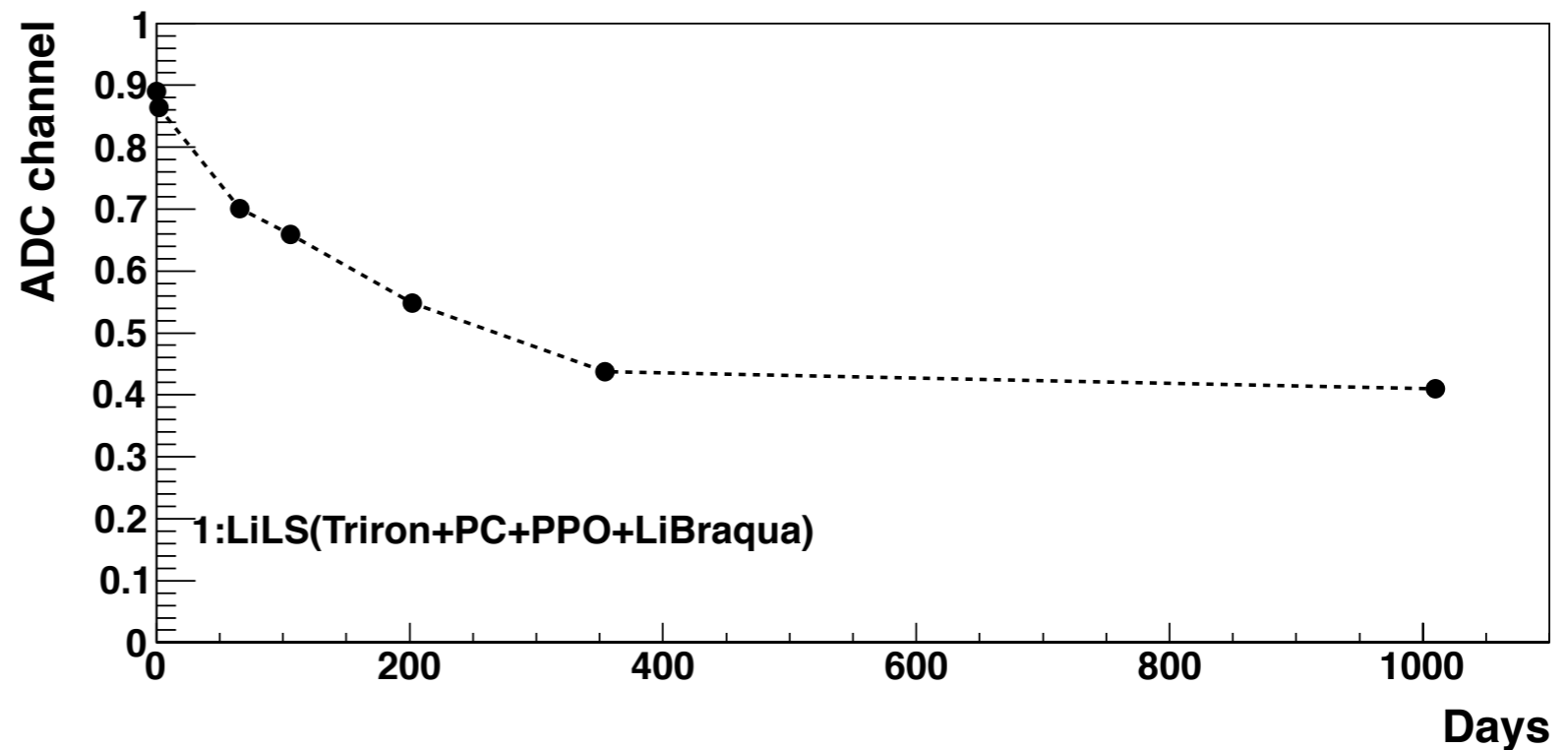


Base line : ***cyclohexane

***cyclohexane : 透過率 → about 100%

: 屈折率 → 液体シンチレータ (KamLAND LS) のものとほぼ同程度

長期安定性(ADC channel: 発光量)



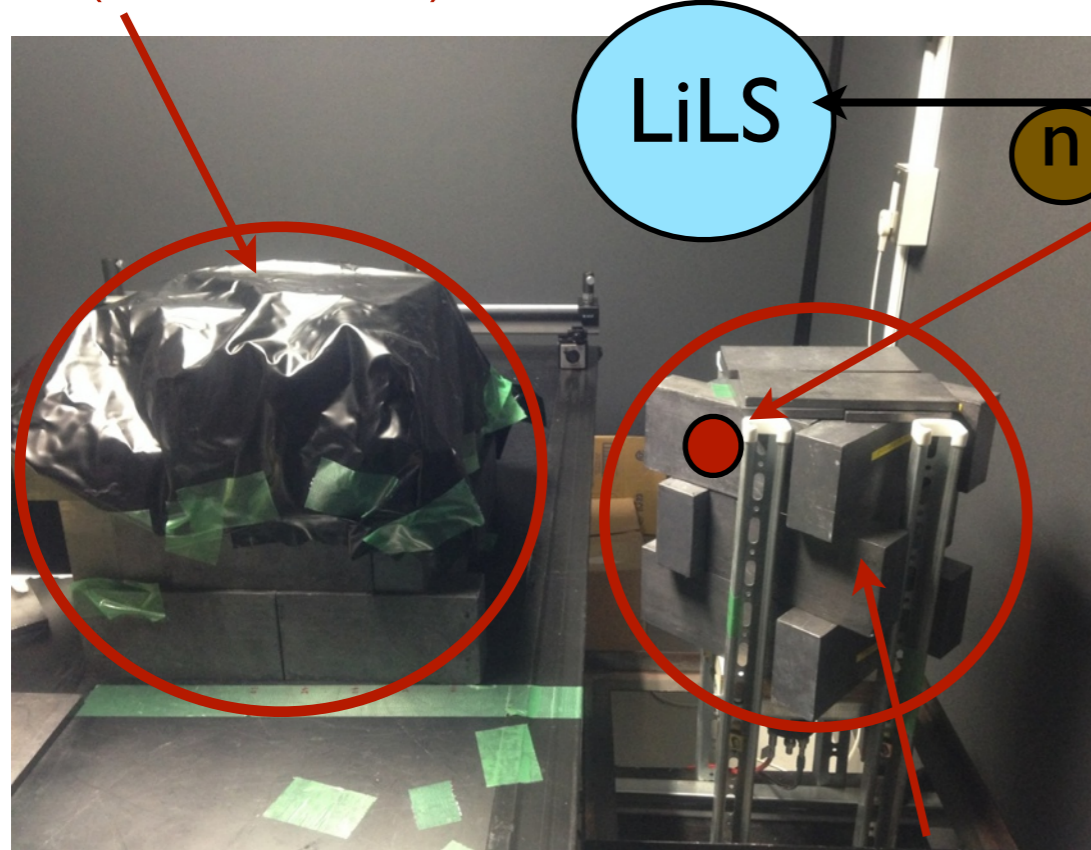
3,新しい検出器の開発

~Delayed energy~

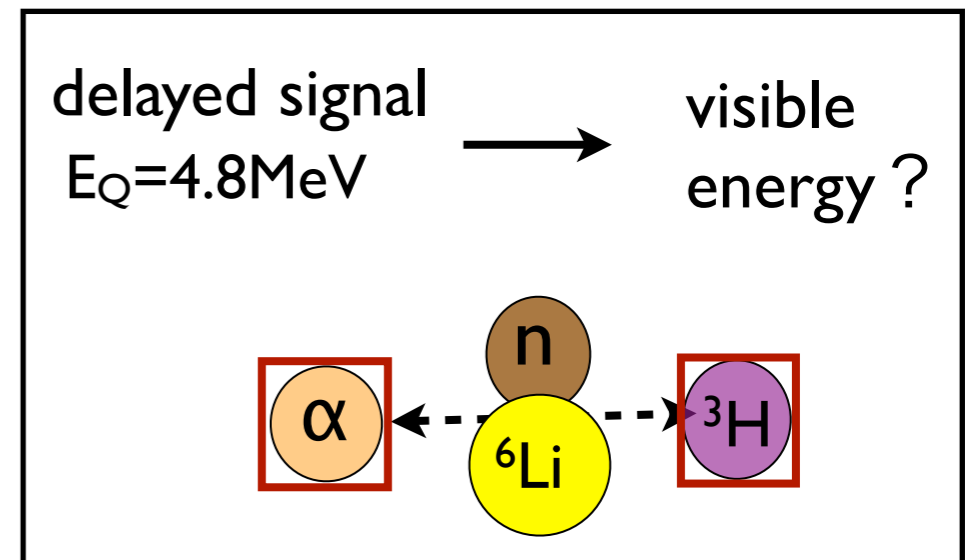
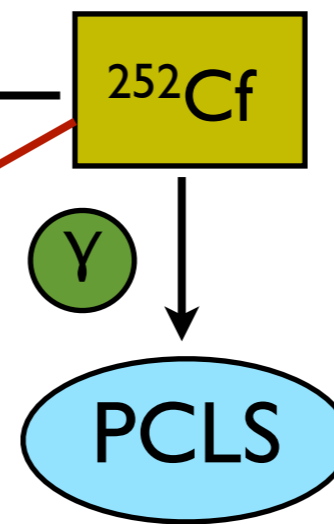
Delayed energy の測定

- α 線 や ^3H はクエンチングによって実際に見えるエネルギーはQ値より低くなる→実験によりエネルギーを見積もる

LiLS(Far Detector)



PCLS(Near Detector) ⁶

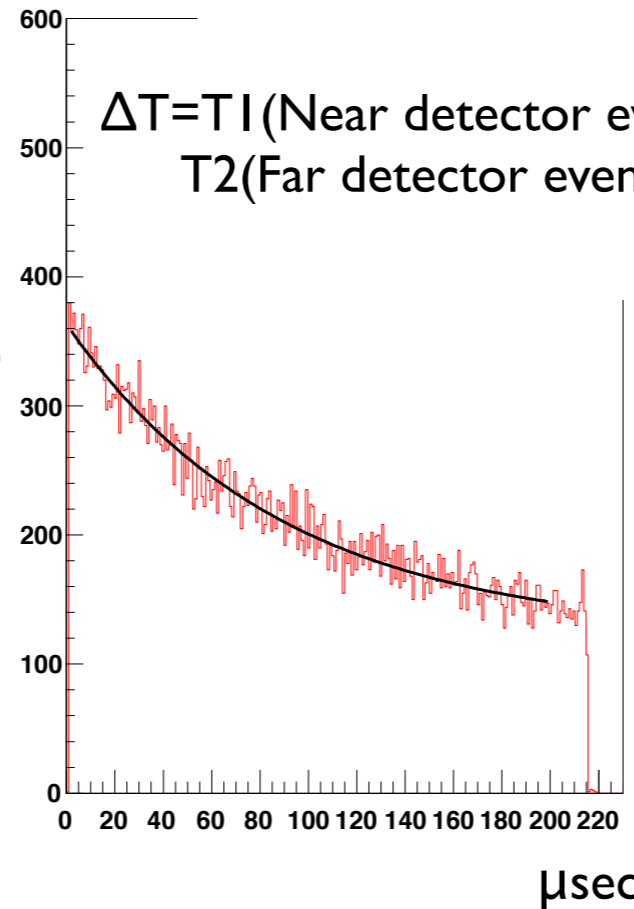
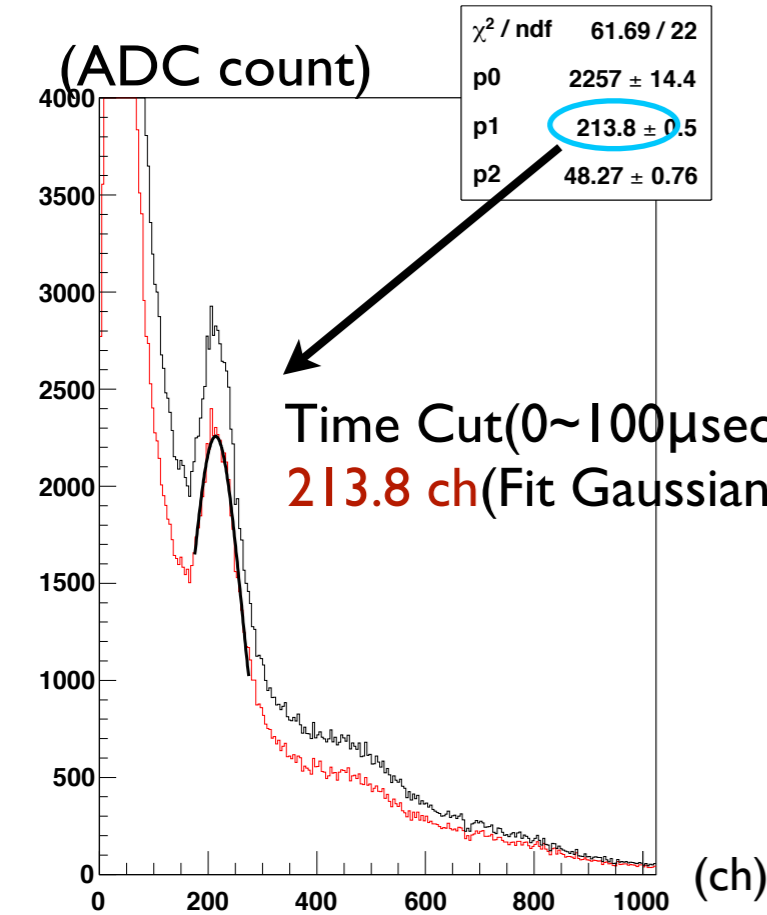


3,新しい検出器の開発

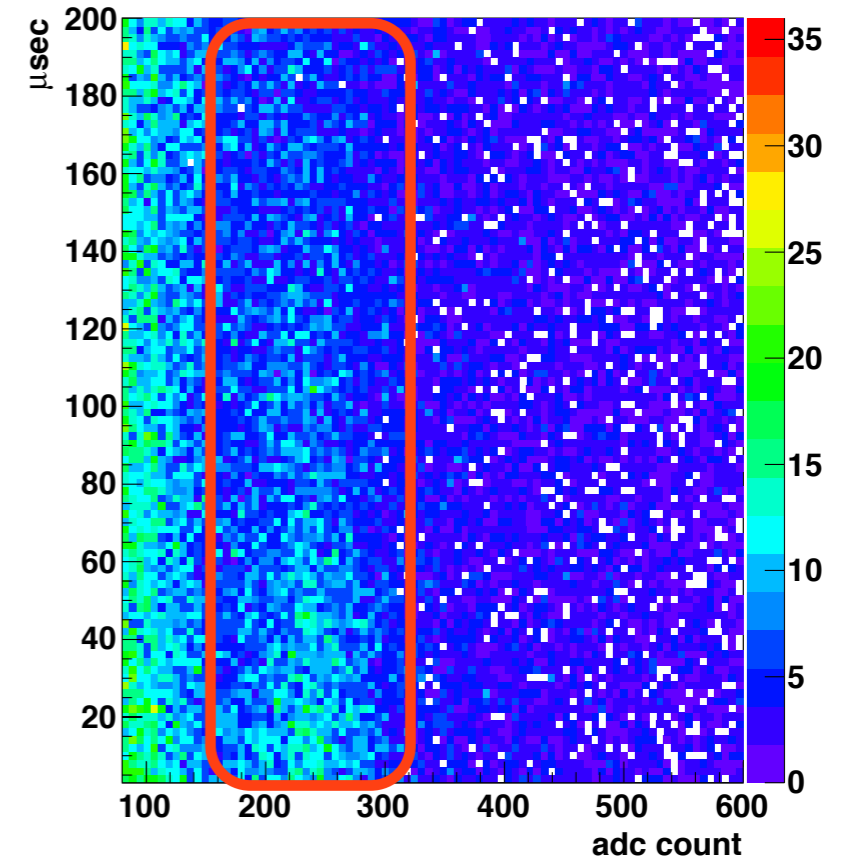
~Delayed energy~

時間分布

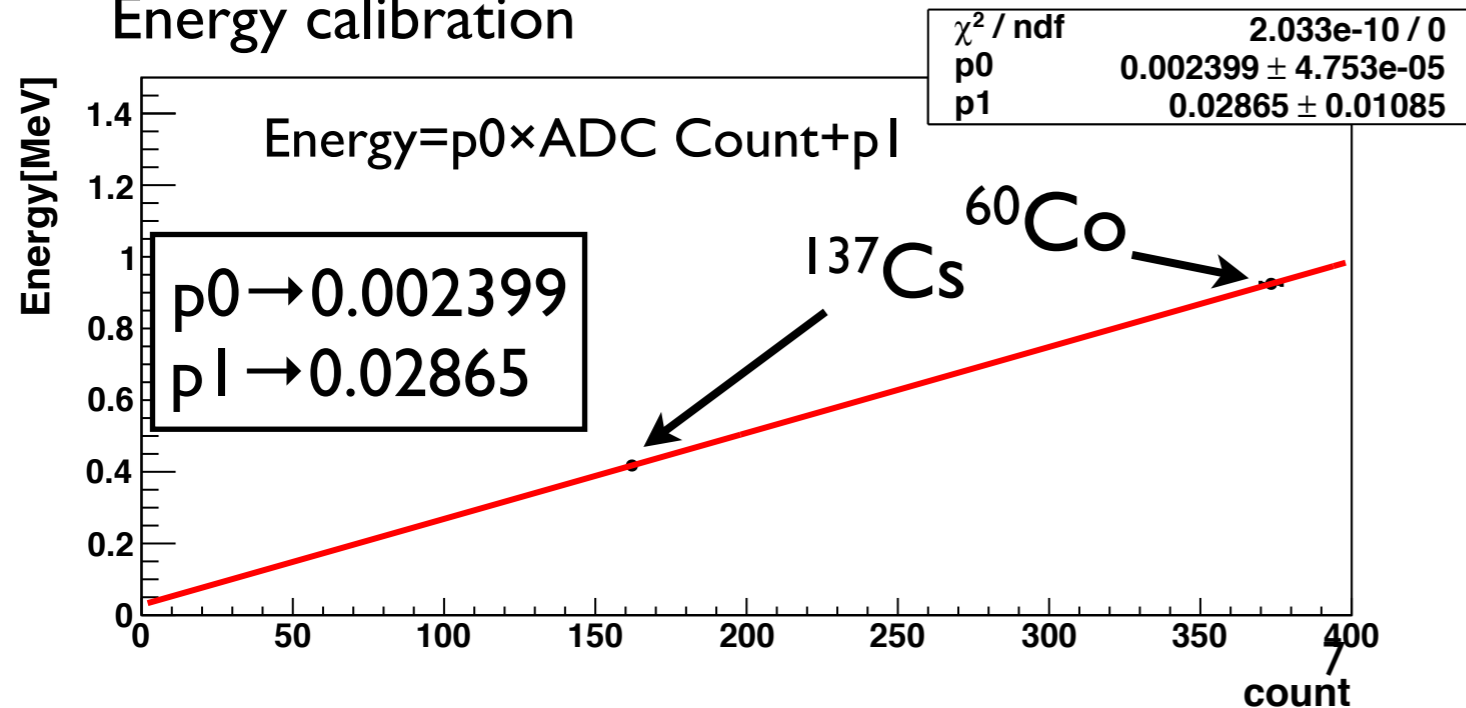
エネルギー分布



Energy vs Time



Energy calibration



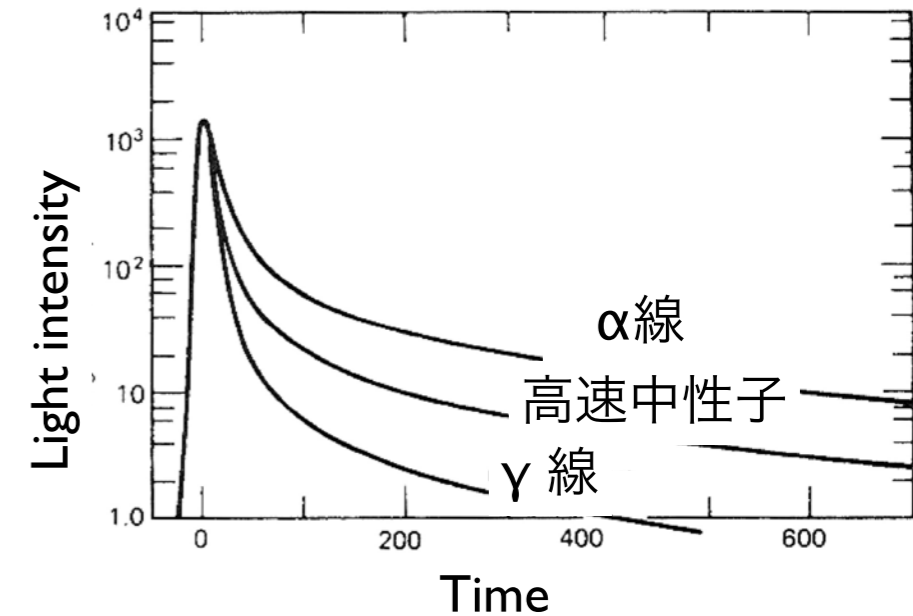
Delayed Energy : 541.6keV
(visible energy ($E_{\text{real}}=4.8\text{MeV}$))
Capture Time : 88.8 μsec

3,新しい検出器の開発

～ 波形弁別～

波形弁別のモチベーション

- α 線と γ 線の波形は異なっている
- Delayed signalを検出する際のBackgroundを削減するために波形弁別性能を知りたい



LiLS → PC:界面活性剤(TritonX-100)=83%:17%,PPO=5g/l,
LiBr · H₂O(aqua)=37g/l,⁶Li=0.15wt%(enrichを仮定(⁶Li 95%))

例.... KamLANDで使われている液体シンチレータ(KamLS)

→ Dodecane:80%, PC:20%, PPO:1.36g/l

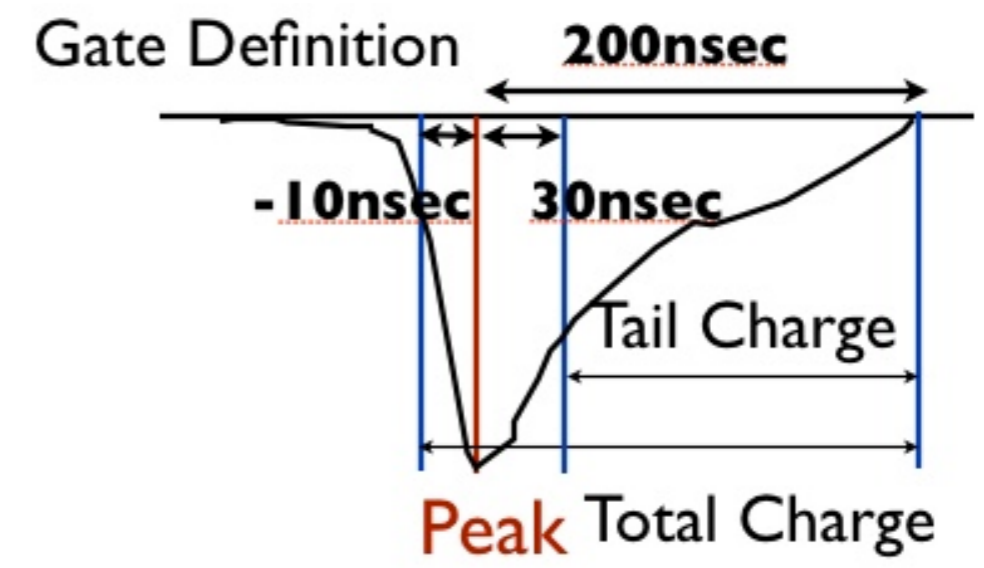
KamLS 波形弁別能力

β 除去効率: ~40% (α 取得率: 90%)

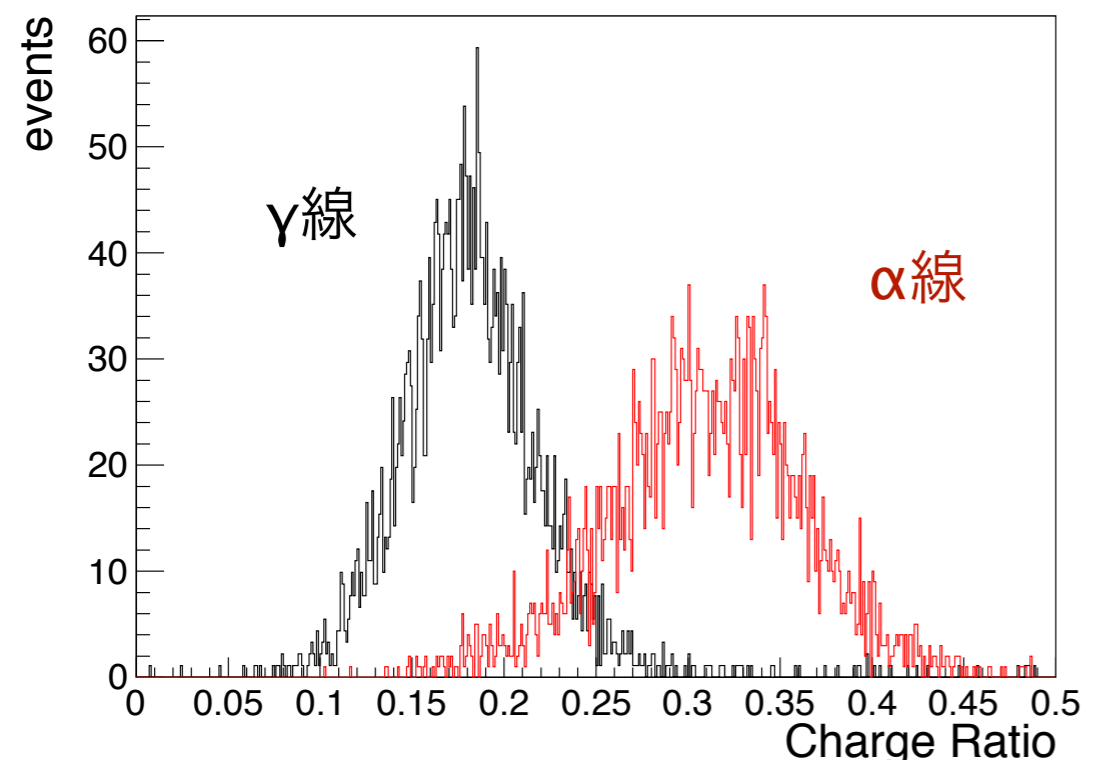
3,新しい検出器の開発

~ 波形弁別 ~

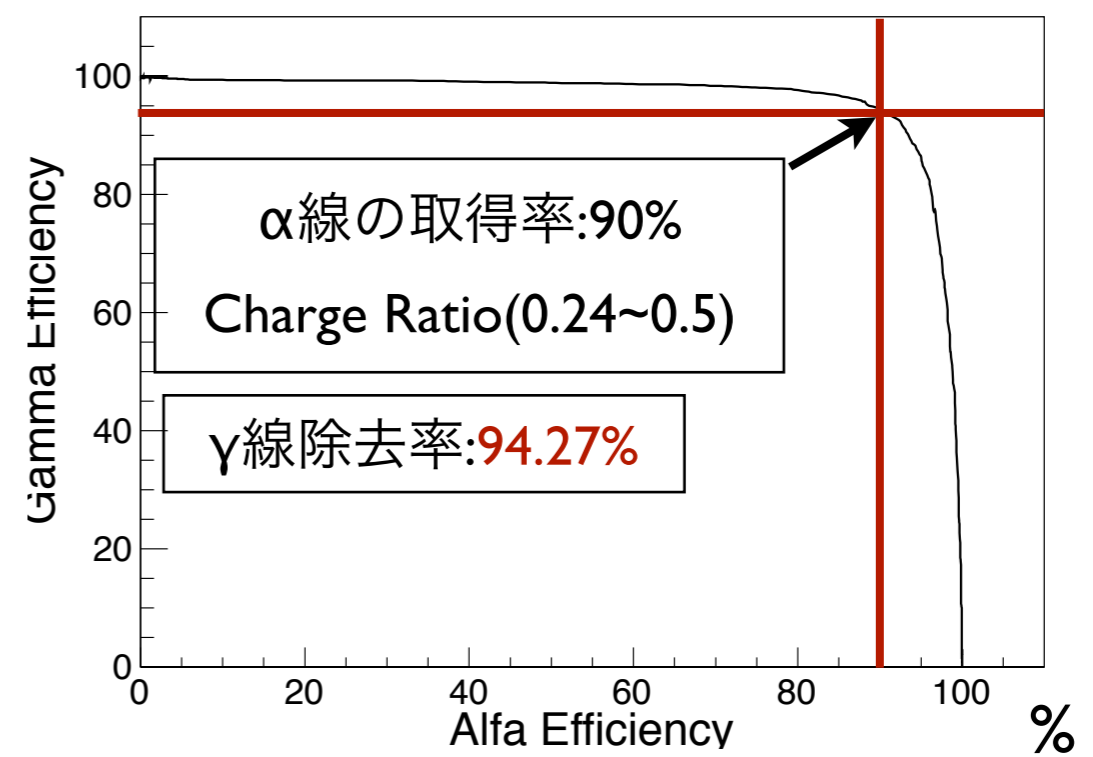
- Double Gate 法を使用
 - α 線と γ 線のcharge ratioを比較
- Charge ratio: Tail Charge/Total Charge



Charge Ratio



Efficiency-Efficiency Curve

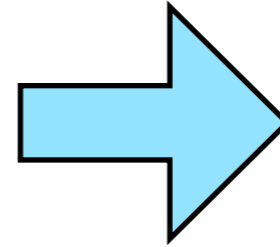


LiLSは優れた波形弁別能力を持っている

3,新しい検出器の開発

~イメージング検出器(目標性能)~

prompt signalとdelayed signalを分離するために
高位置分解能のイメージング検出器が必要



レンズと1 p.e.を識別可能な
multianodePMTを使用

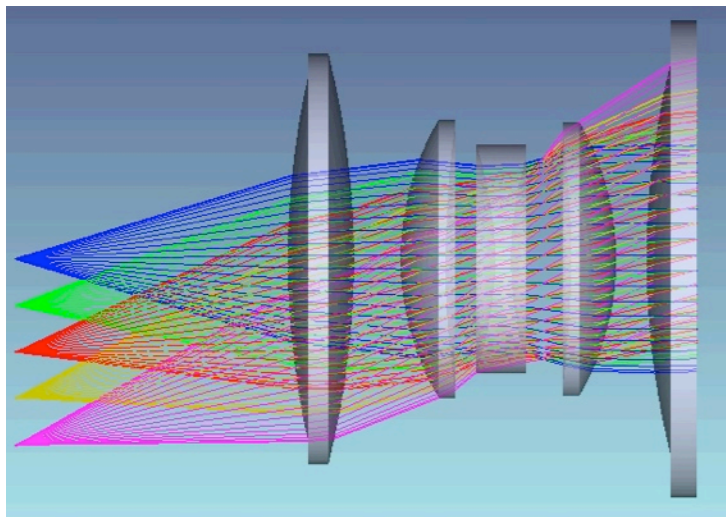
レンズの目標性能

位置分解能 $\rightarrow \leq 4\text{cm}$

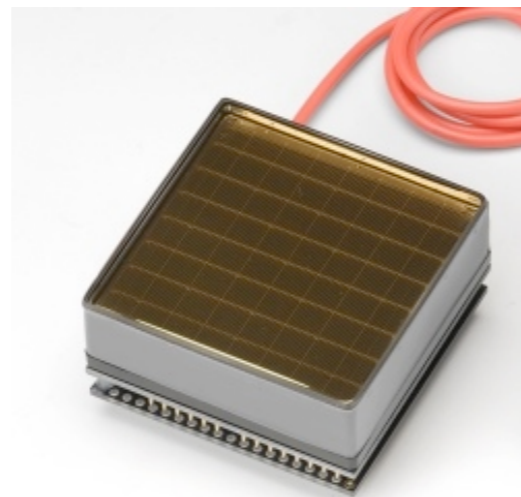
光子数(delayed signal) $\rightarrow \geq 1\text{p.e.}$

被写界深度 $\rightarrow \geq 50\text{cm}$

(200L sizeの検出器を一つのレンズで見ることを想定)



レンズ



64ch multianode PMT(5cm角)

これらの目標値を元に光
学解析設計ソフトのZemax
によりレンズを設計

3,新しい検出器の開発

~イメージング検出器(設計)~

新しく設計したレンズの性能

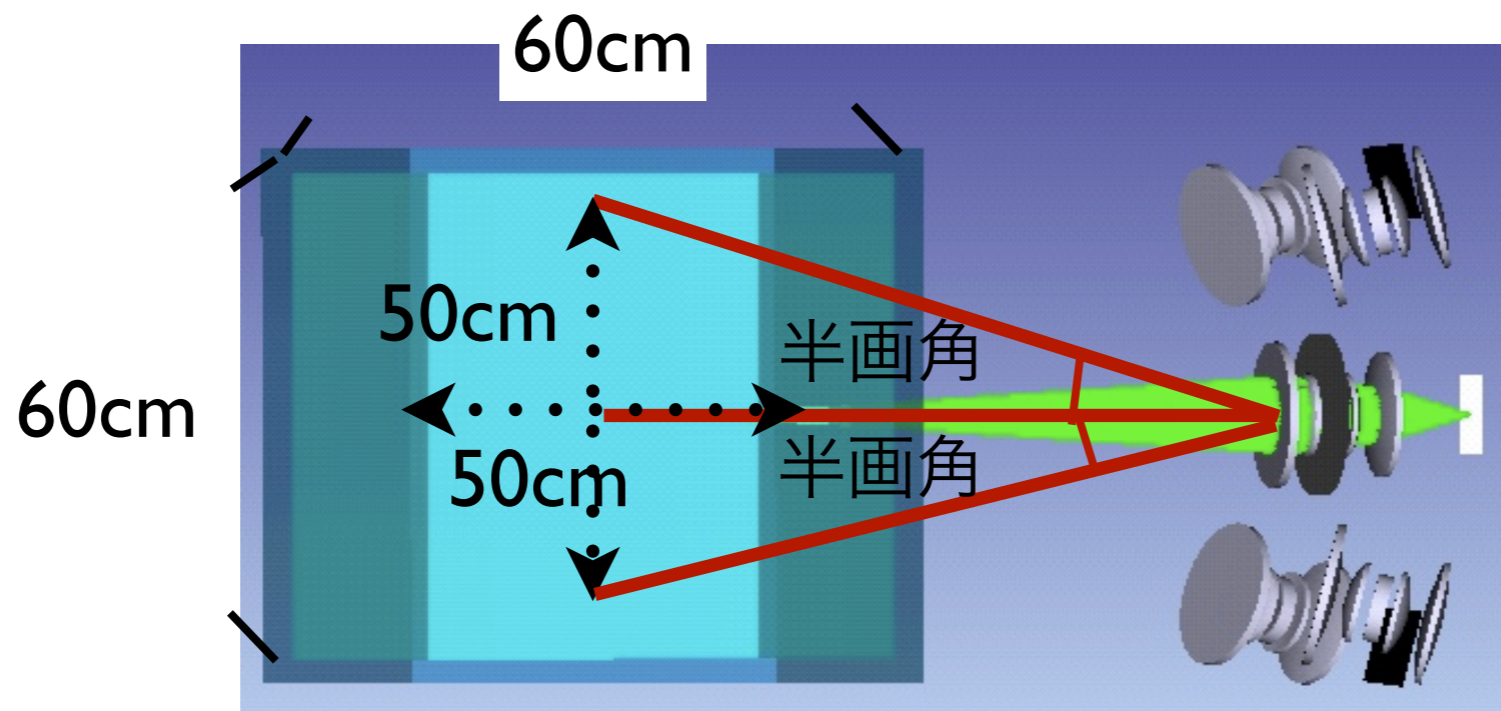
位置分解能 $\rightarrow \leq 4\text{cm}$ (次のスライド以降で確認)

フォトン数(delayed signal) $\rightarrow \geq 1\text{p.e.}$

(レンズを5set組み合わせる事により達成)

被写界深度 $\rightarrow 50\text{cm}$

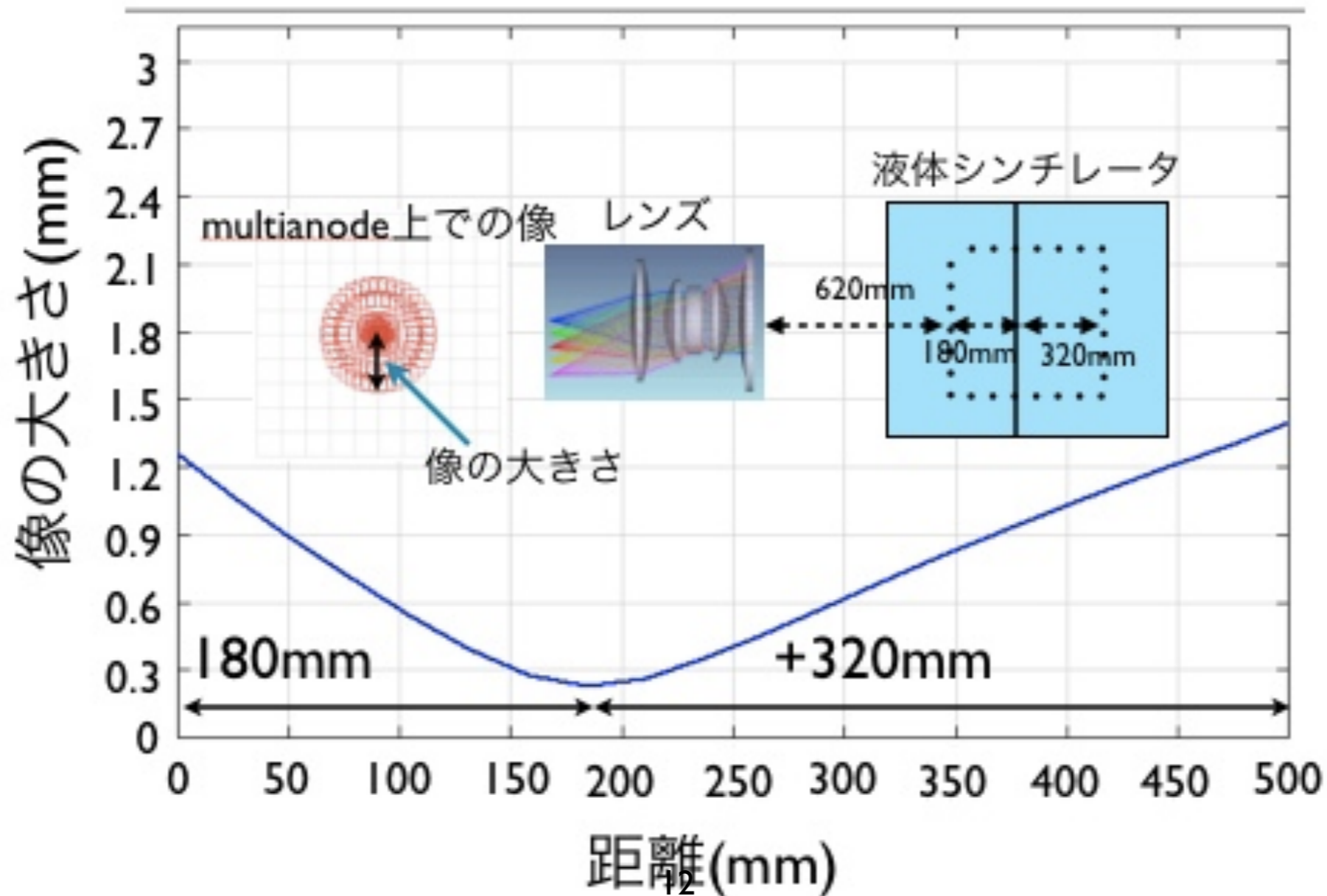
半画角 $\rightarrow 17^\circ$



3,新しい検出器の開発

~イメージング検出器(分解能)~

距離(被写界深度)と結像面での像の大きさの関係

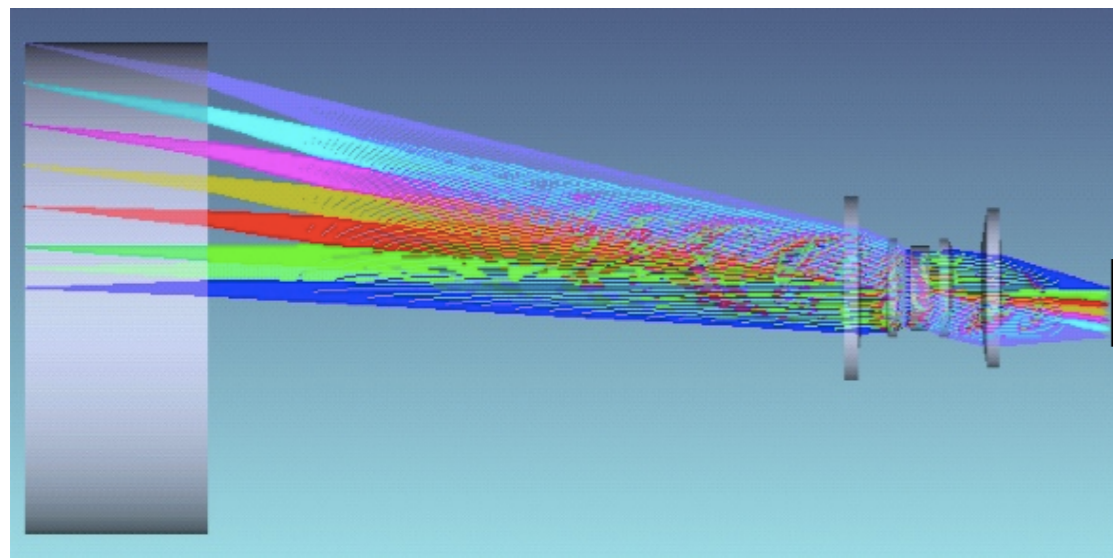


3,新しい検出器の開発

~イメージング検出器 (分解能) ~

MA-PMT上で見える像の分布

4cm間隔で光を出しMA-PMT
上での像の様子を調べた

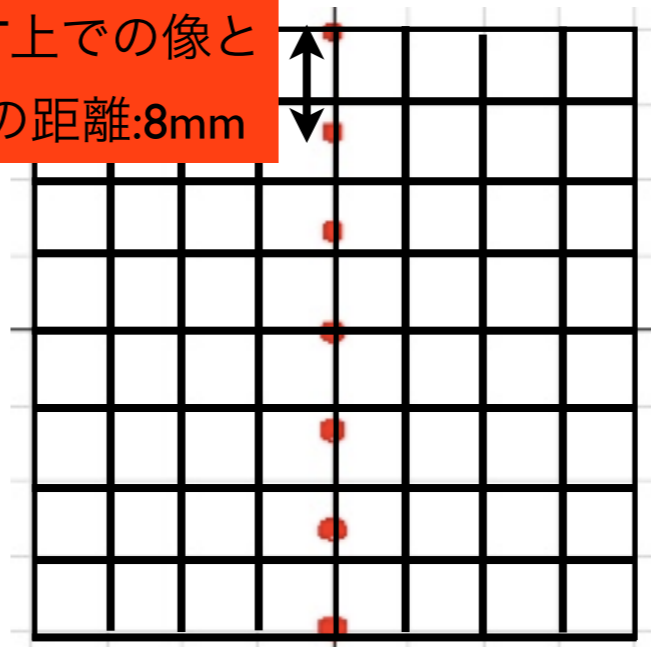


最もピントが合ってる点

最もピントがずれている点

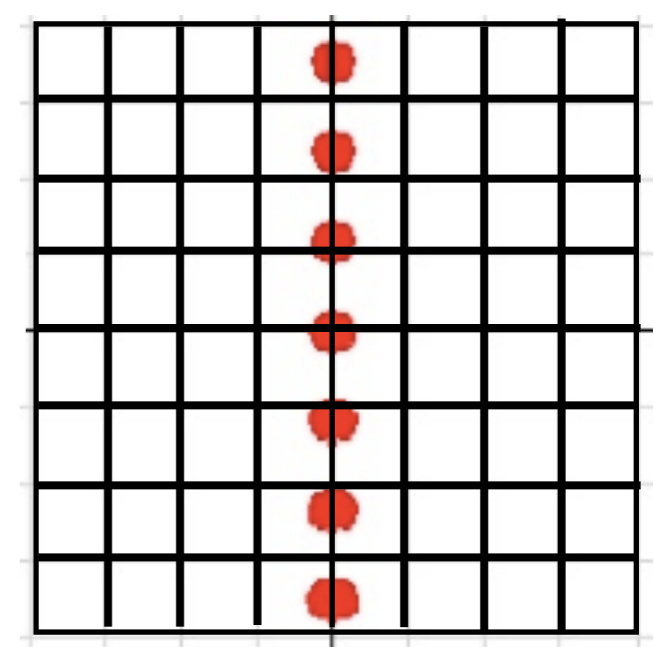
PMT上での像と
像の距離:8mm

49mm



49mm

49mm



49mm

光源:点光源を使用

MA-PMTは1pixelが約6mm

→ 4cm以下の分解能が達成されている事を確認

今後、geant4+Zemaxを使ったフォトンシミュレーションにより現実的な実験に即した評価を行っていく予定

4,まとめ

- 反電子ニュートリノの方向検出は反ニュートリノ観測の精度向上のための有効な手段である
- 方向検出のための新しい検出器の開発・評価を行った
 - (1) ${}^6\text{Li}$ を含有した液体シンチレータ(完成)
 - (2) 高位置分解能の光検出器(デザインは完成、geant4とZemaxを使ったフォトンシミュレーションによる性能評価中)

5,今後

Source: muon, ${}^{252}\text{Cf}$ source

① 実験室系での測定

開発したイメージング検出器でdelayed signalを撮像する事が出来るかのテスト(1年以内)

Source: neutrino source

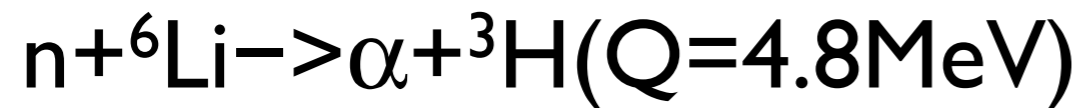
- #### ② 小型検出器を作成し高レートのニュートリノ源の近くに置き方向検出の原理検証を行う(数年内)

Backup

Candidate

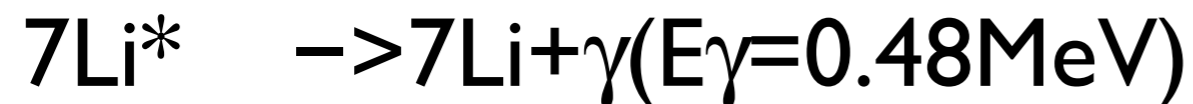
Candidate ① \rightarrow ${}^6\text{Li}$ (940 barn)

${}^6\text{Li}$ (n, α) reaction



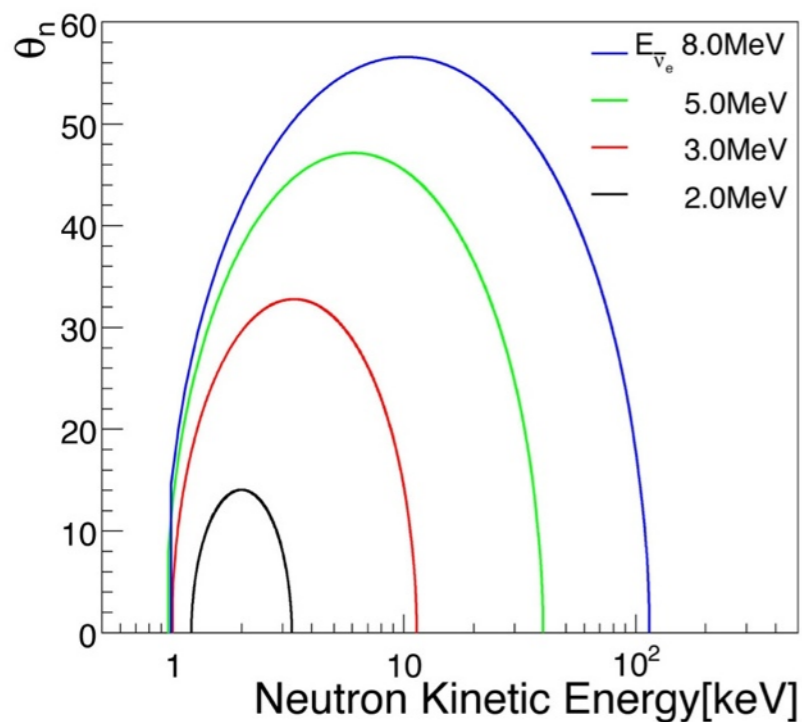
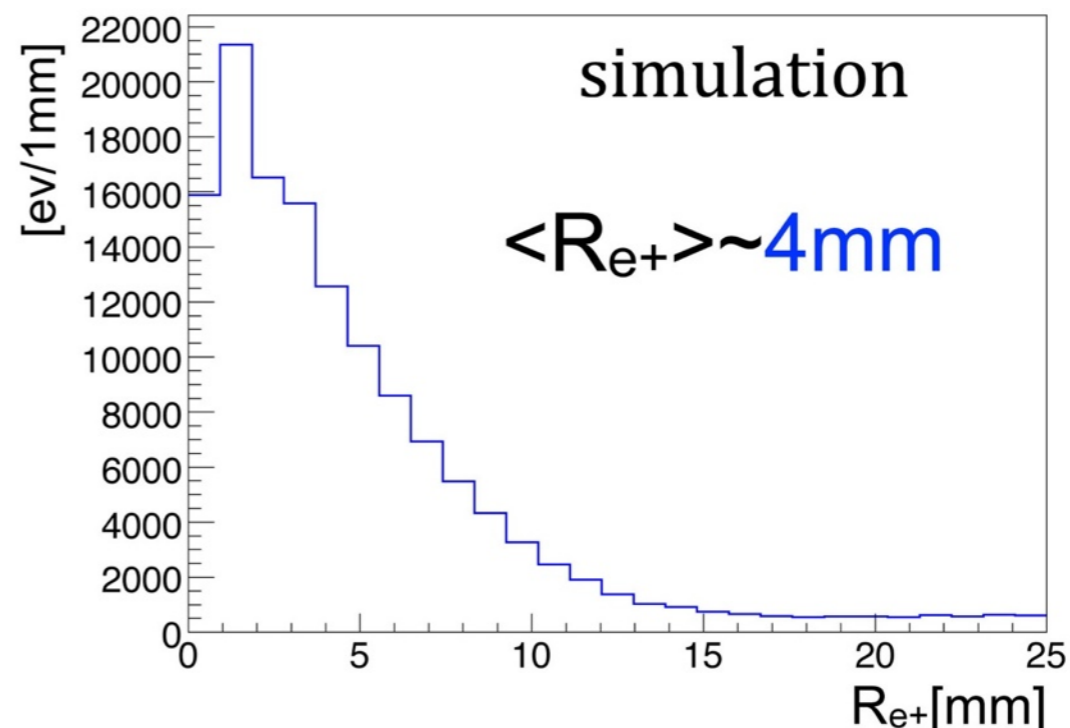
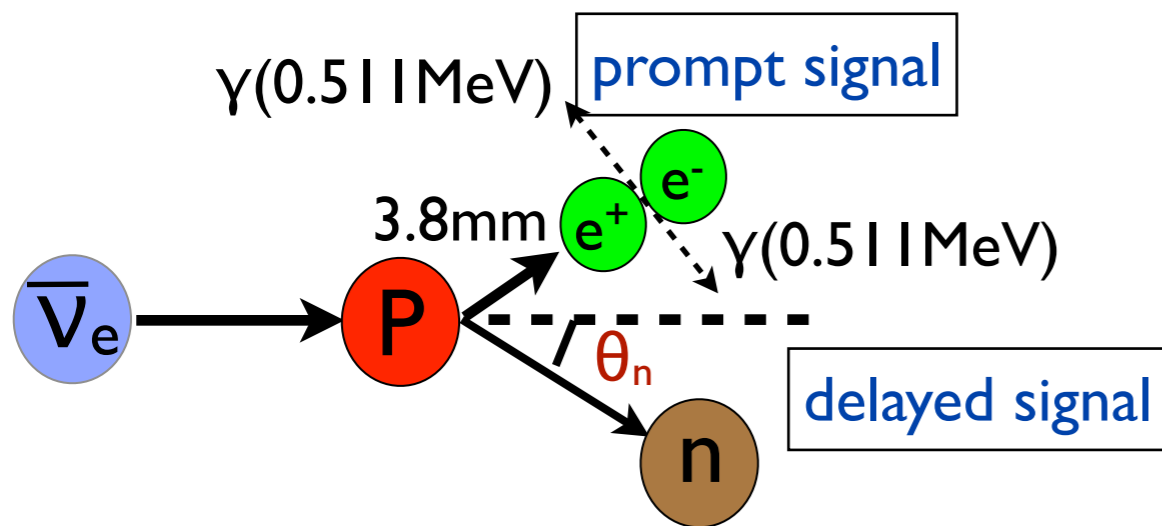
Candidate ② \rightarrow ${}^{10}\text{B}$ (3835 barn)

${}^{10}\text{B}$ (n, α) reaction



2,検出原理 ~逆β崩壊~

逆β崩壊反応

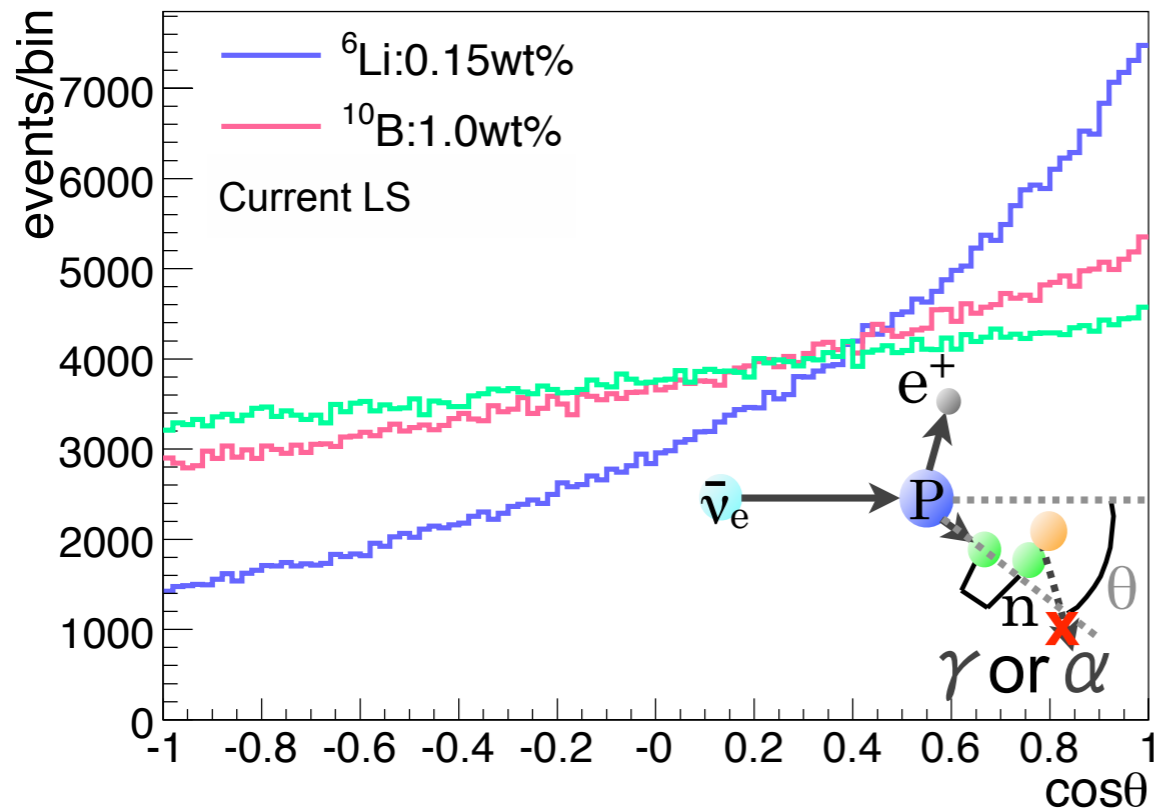


$$E_{\bar{\nu}_e} < 3.0\text{MeV} \rightarrow \theta_n < 35^\circ$$

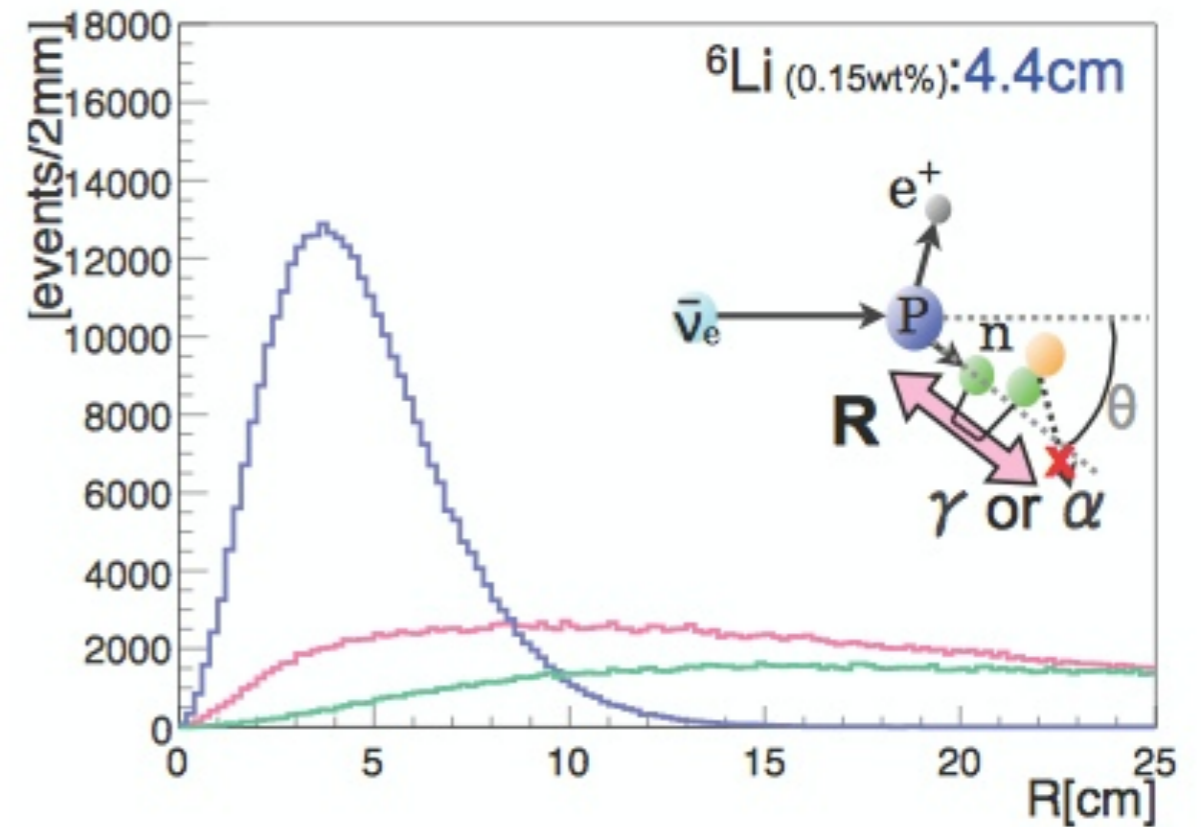
① 陽電子は短い距離しか進まず、中性子発生点の情報を保持している

② 低エネルギーニュートリノからの中性子放出角は小さく、ニュートリノの方向情報を保持している

Resolution(LiLS)



Angular resolution



Vertex reconstruction

$|\sigma$ in this histogram

${}^6\text{Li}$ 90.1°

${}^{10}\text{B}$ 114.1°

current LS 118.6°

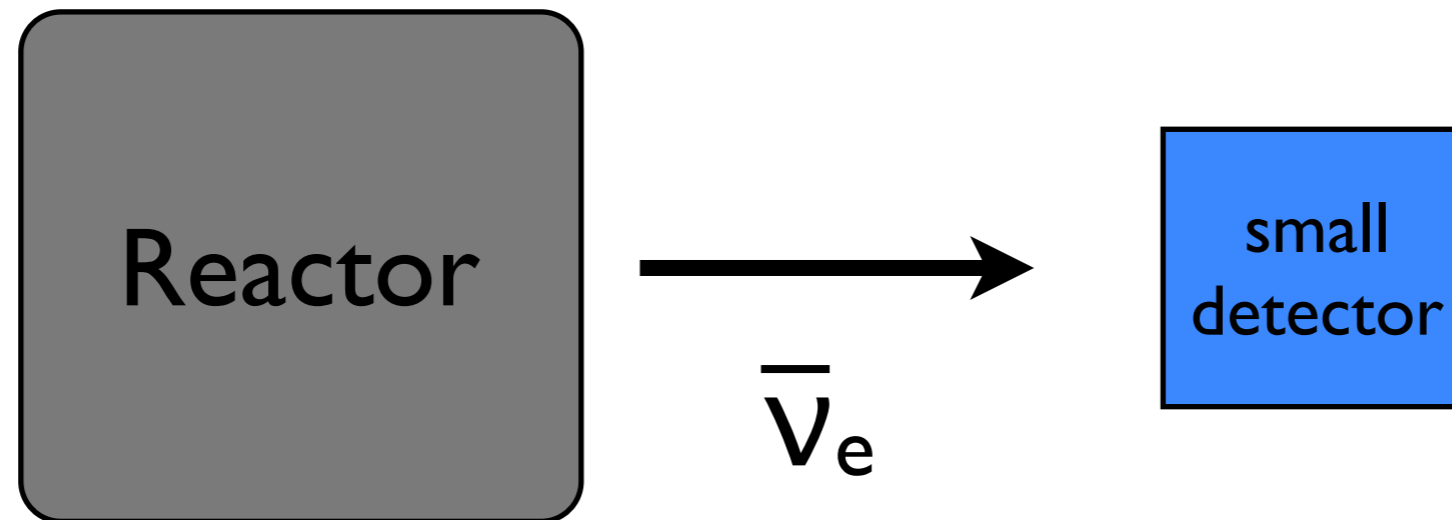
vertex reconstruction and angular resolution of ${}^6\text{Li}$ are best because ${}^{10}\text{B}$ emits γ ray when ${}^{10}\text{B}$ captured neutron.

Anti-neutrino event number

Heat capacity 3.3 GW

distance 100m

Volume 200L



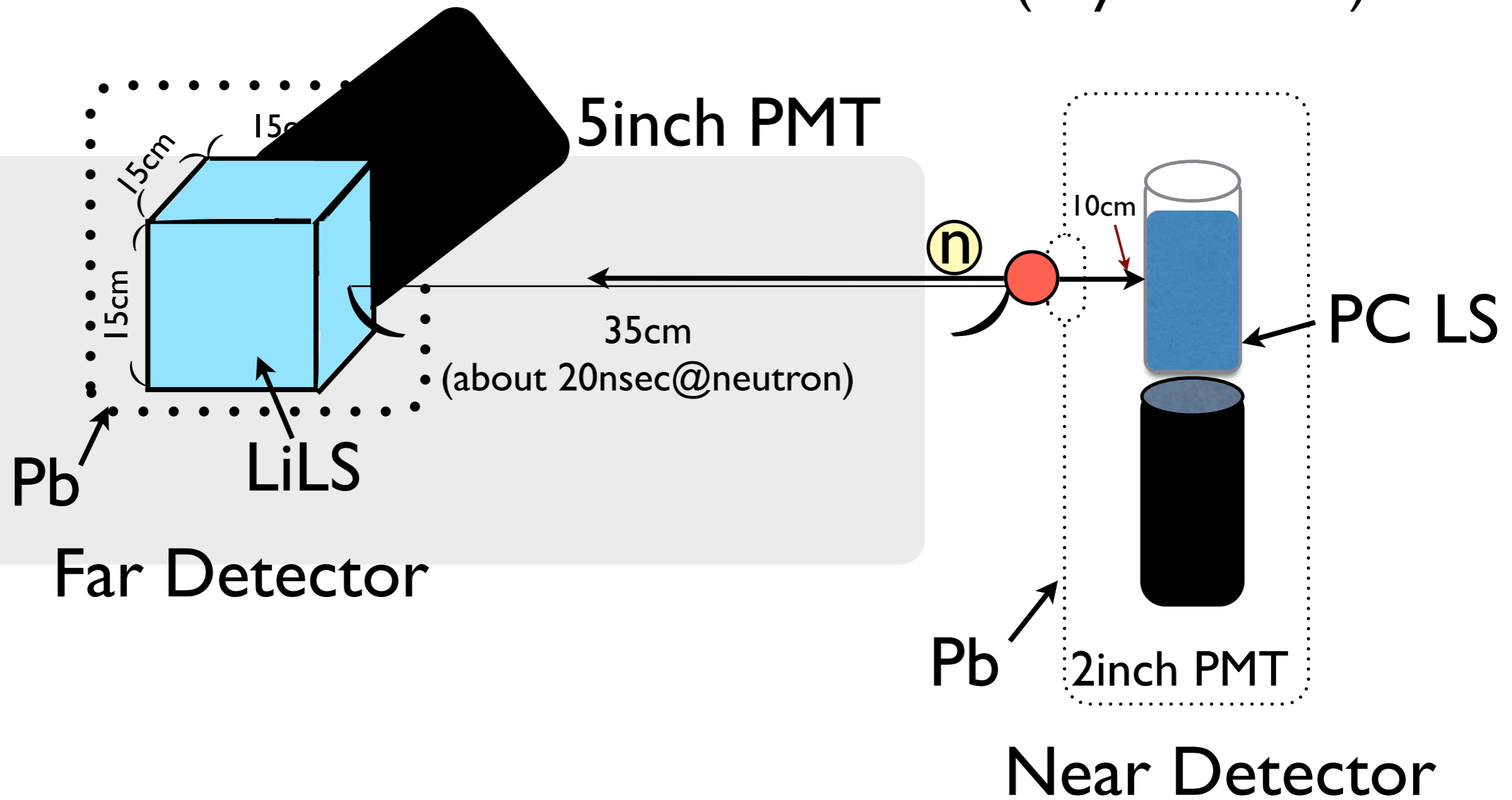
$\bar{\nu}_e$: 200 event/month

Set up

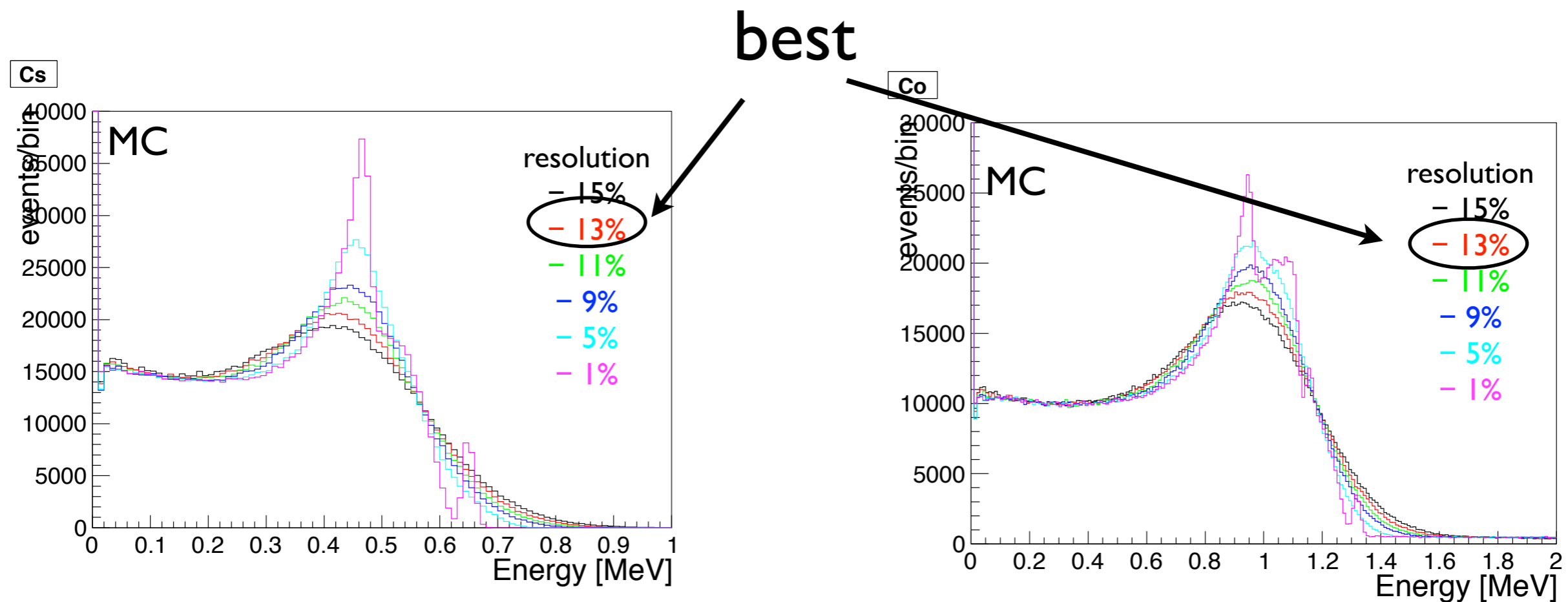
${}^6\text{Li} \rightarrow 0.017\text{wt}\%$

● : Cf source

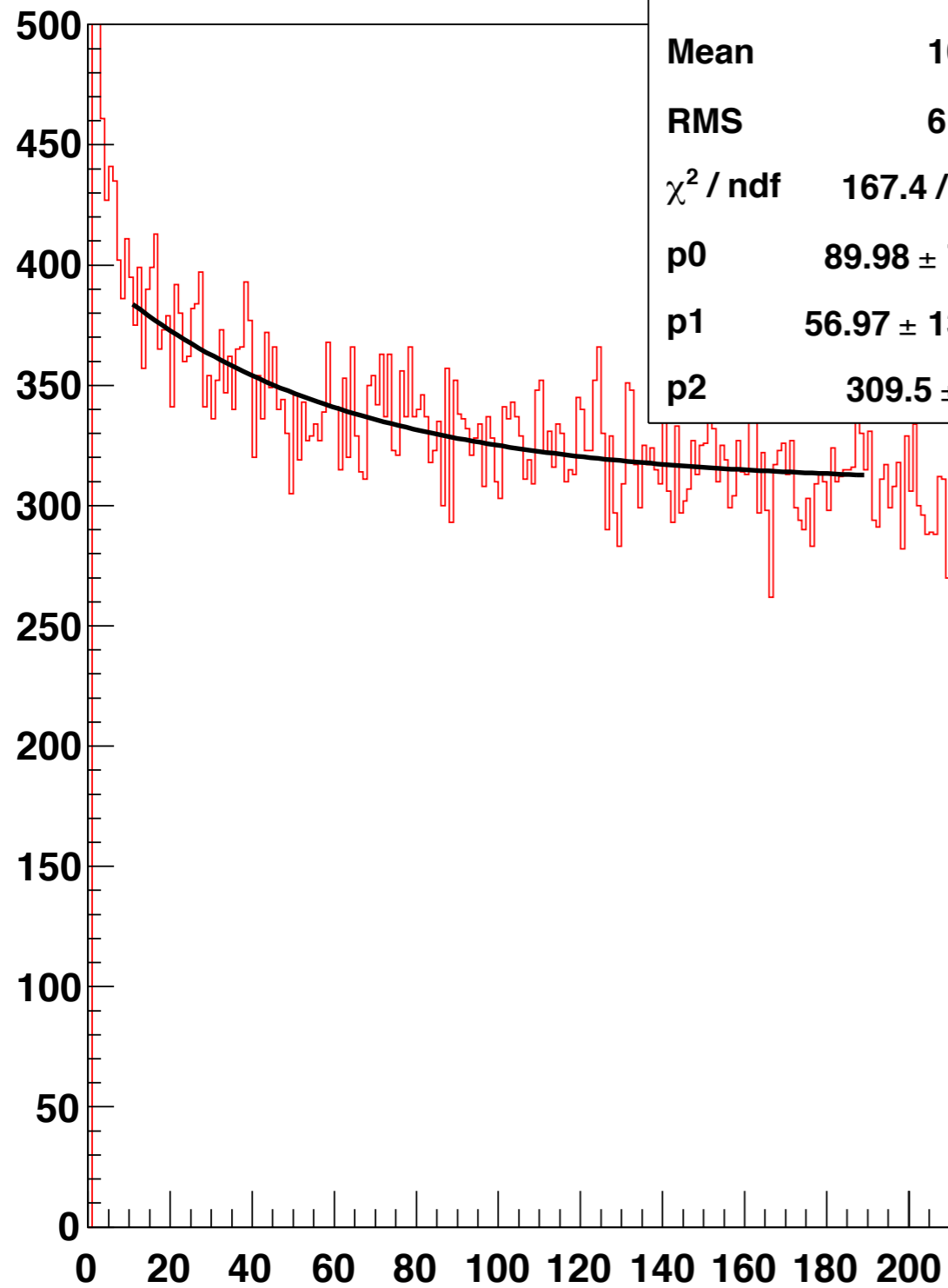
$3.589\text{M}\beta\text{q} \rightarrow 1.89 \times 10^4\beta\text{q}$
(20 years later)



MC Simulation



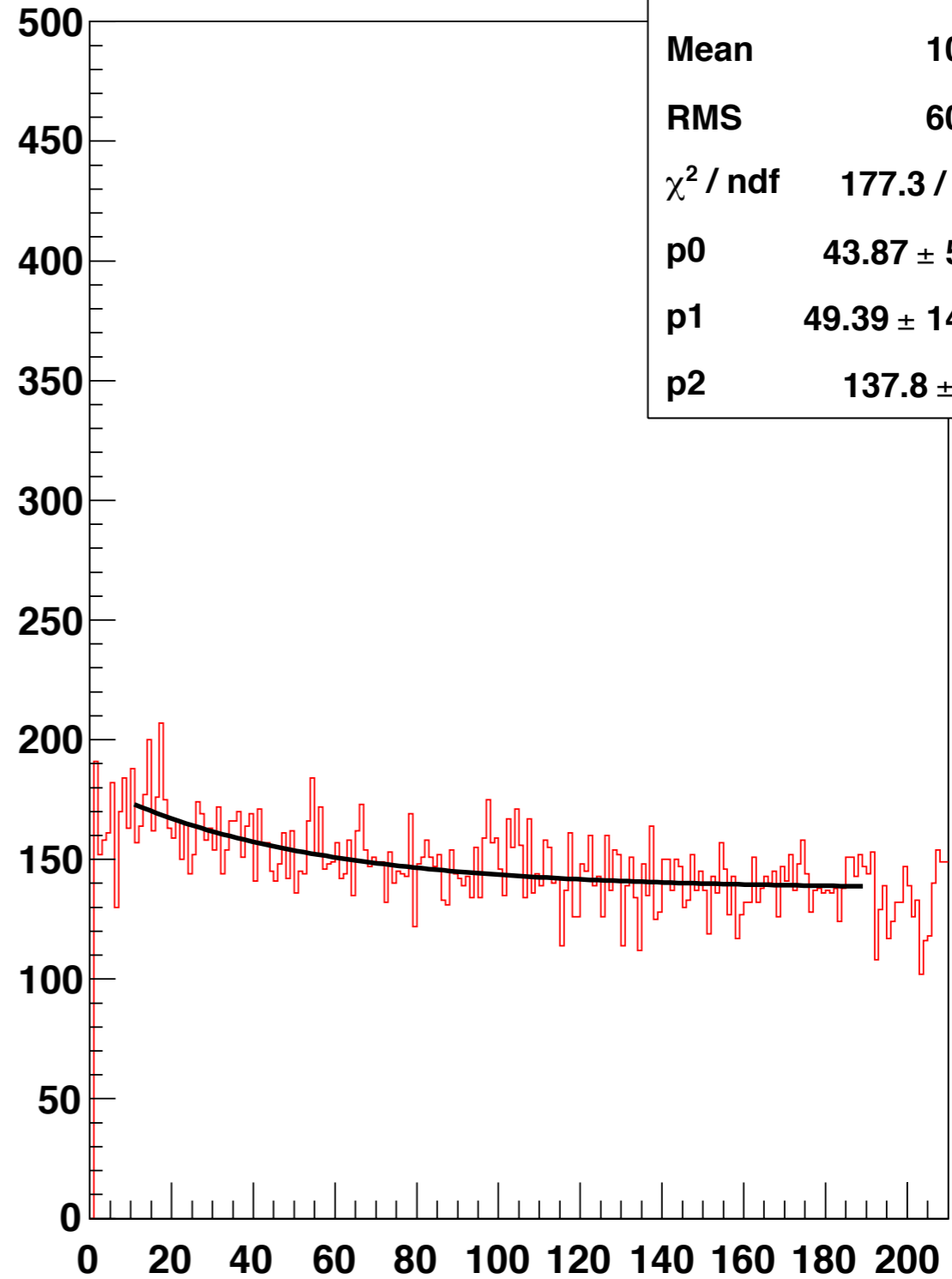
time (400~500ch)



h_tdc_fcute

Entries	72056
Mean	100.3
RMS	61.29
χ^2 / ndf	167.4 / 177
p0	89.98 ± 7.57
p1	56.97 ± 13.57
p2	309.5 ± 5.1

time (700~900ch)



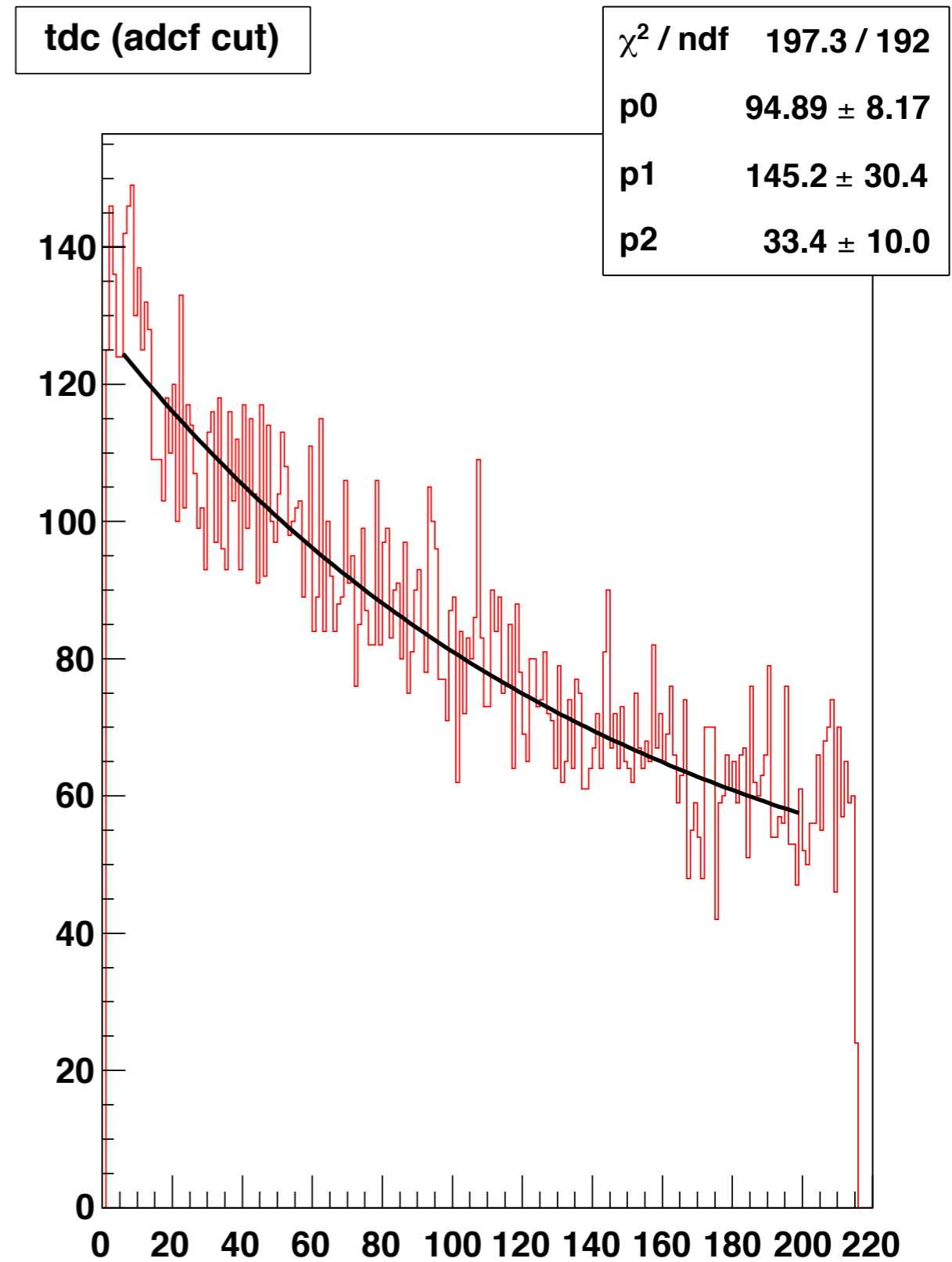
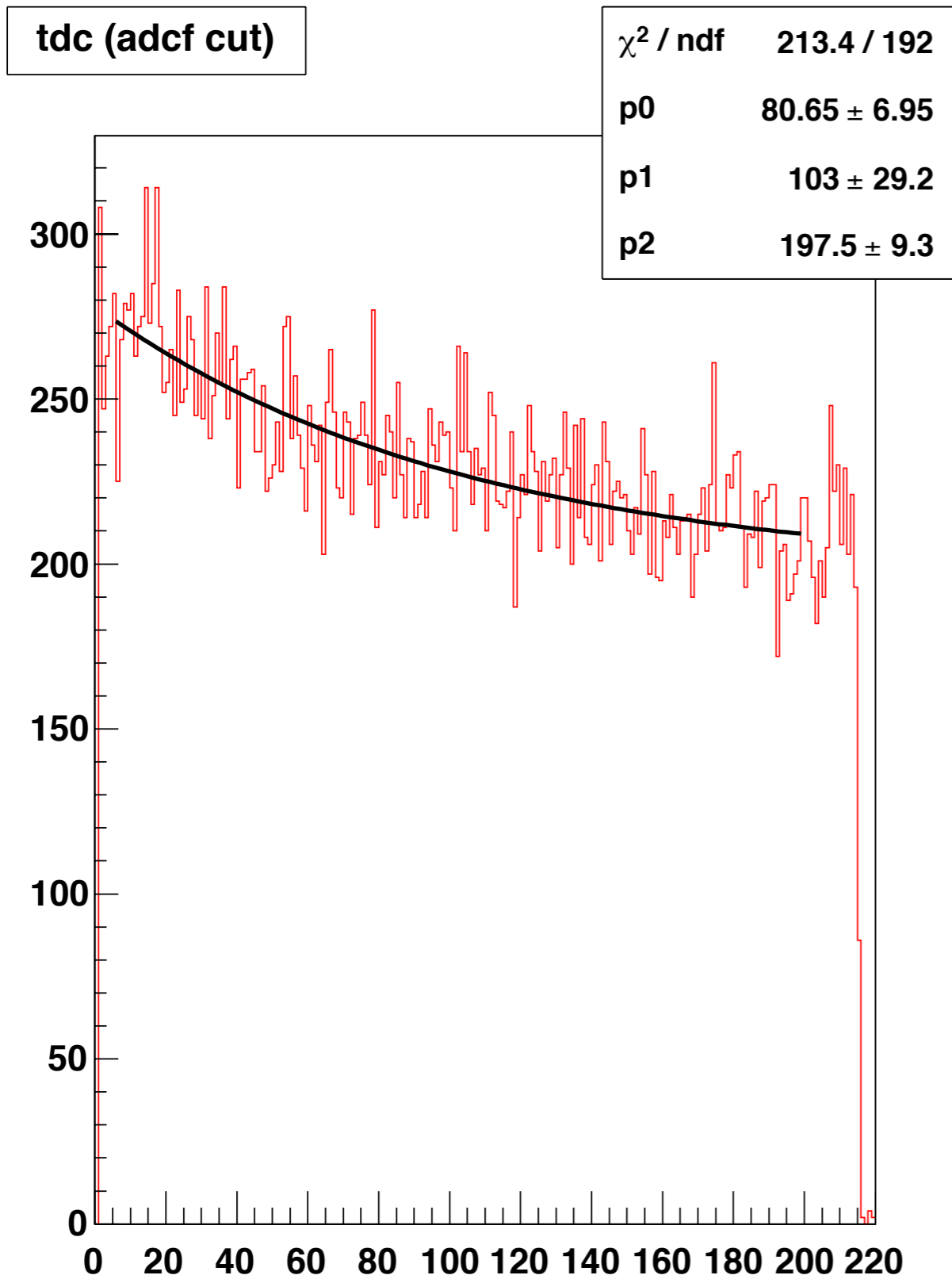
h_tdc_fcute

Entries	31556
Mean	101.4
RMS	60.67
χ^2 / ndf	177.3 / 177
p0	43.87 ± 5.77
p1	49.39 ± 14.44
p2	137.8 ± 2.6

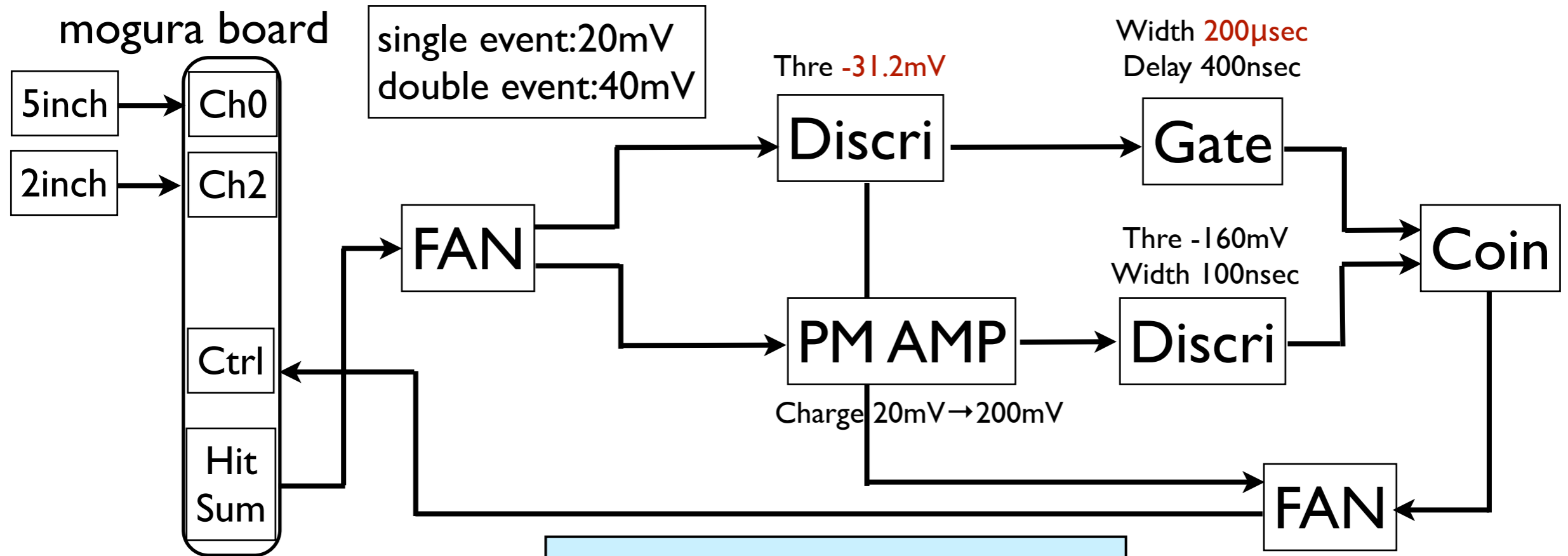
Delayed Energy Measurement

300~600ch ADC Cut

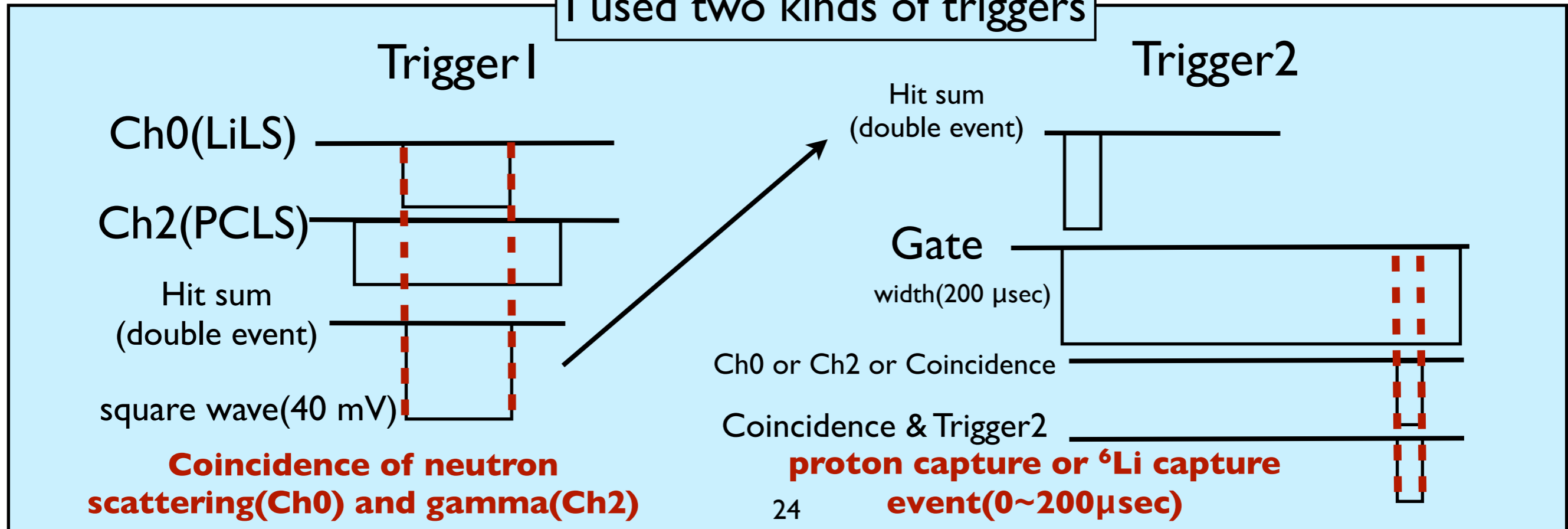
600~1000ch ADC Cut



Circuit diagram and Timing Correlation Diagram



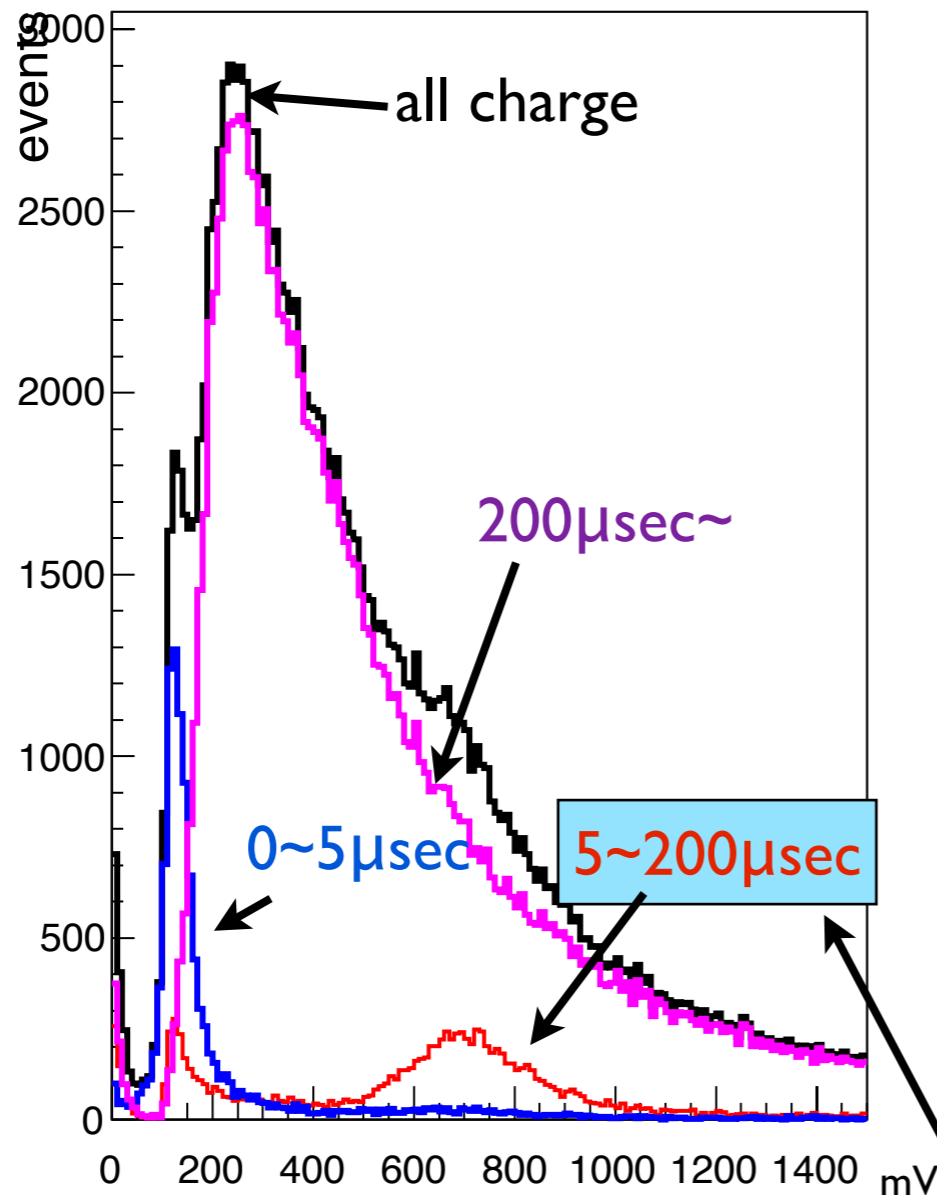
I used two kinds of triggers



Charge(Cf Source)

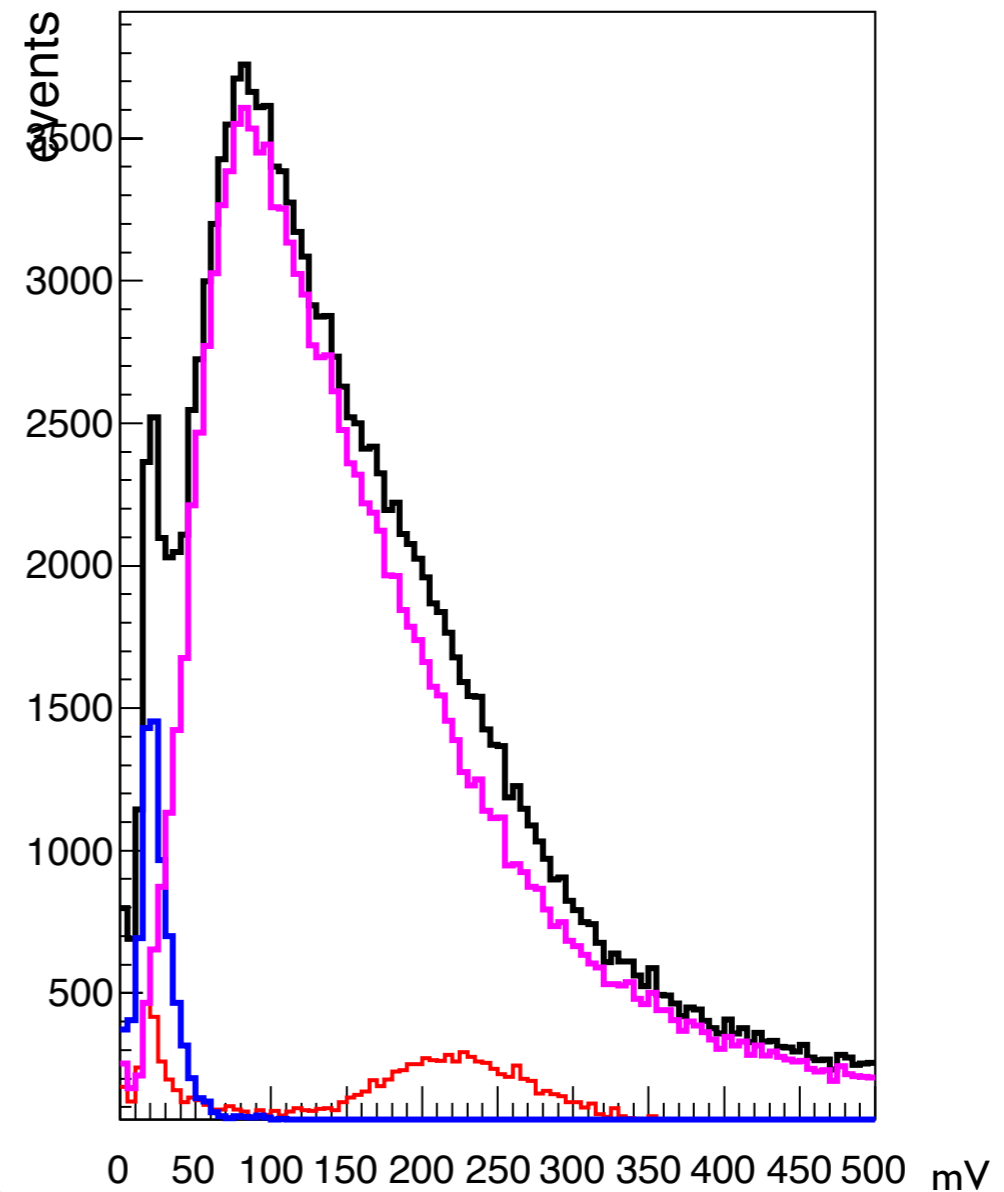
Total Charge

Peak: -10nsec~Peak+200nsec



Tail Charge

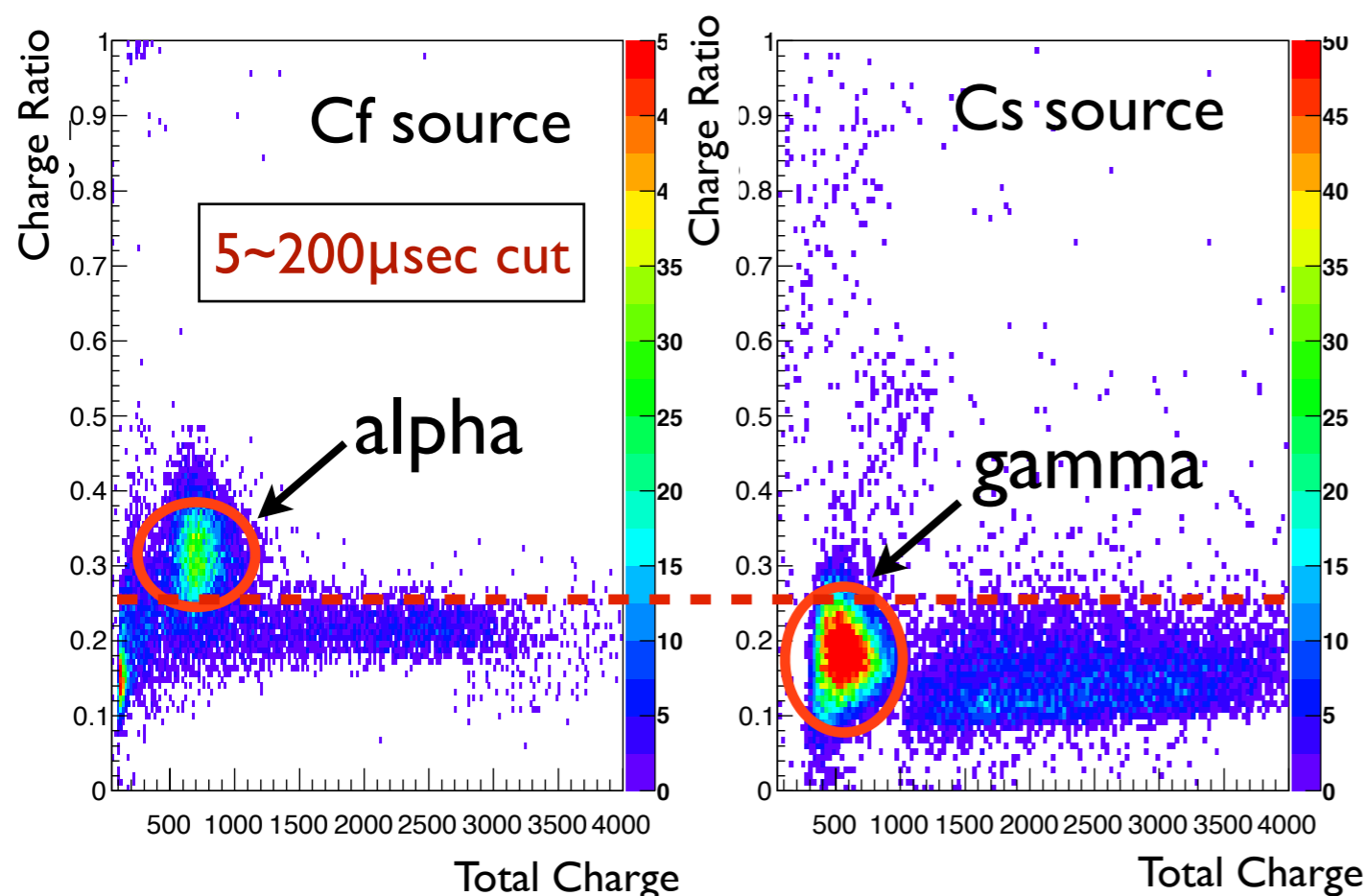
Peak: +30nsec~Peak+200nsec



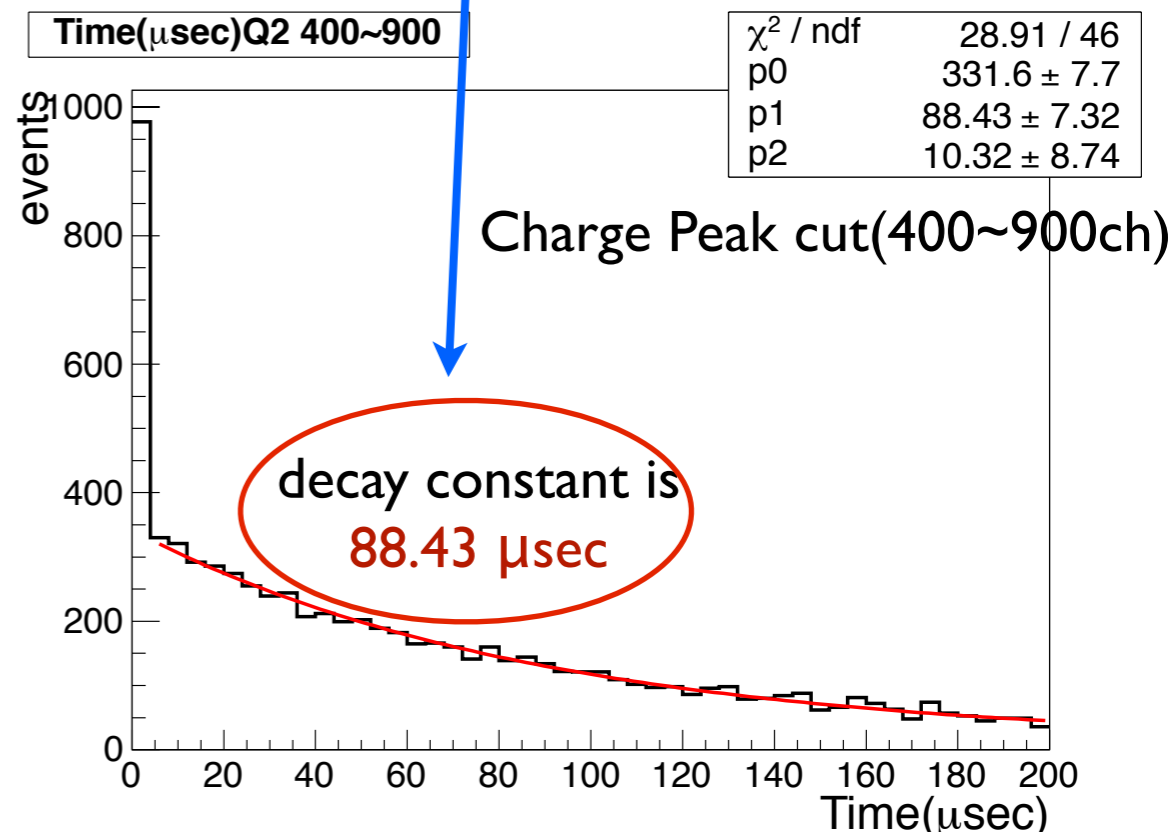
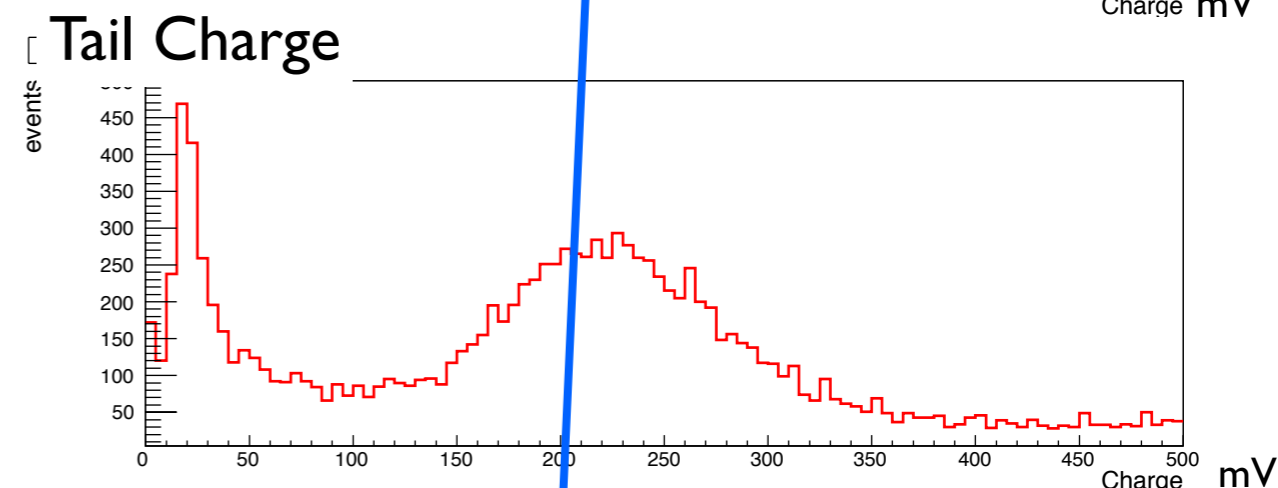
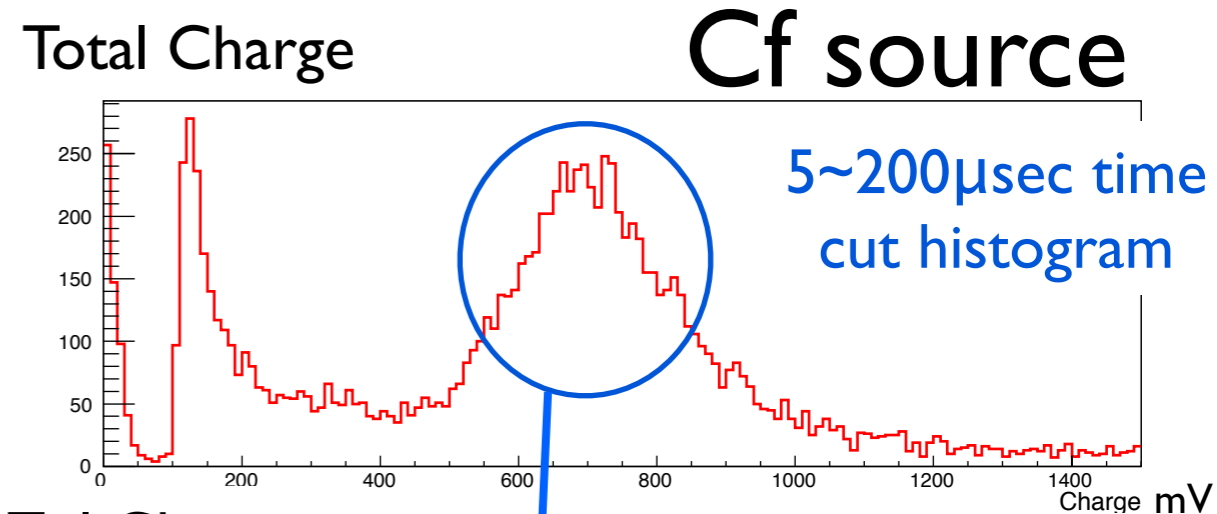
Use 5~200μsec time cut area in my study

Selection of ($\alpha+^3\text{H}$) event

1. Charge \rightarrow Time cut 5~200 μsec
2. Charge peak cut \rightarrow Confirm time dependence and decay constant
3. Confirm position of gamma Charge Ratio by Cs source
4. α event will be **high charge** peak area



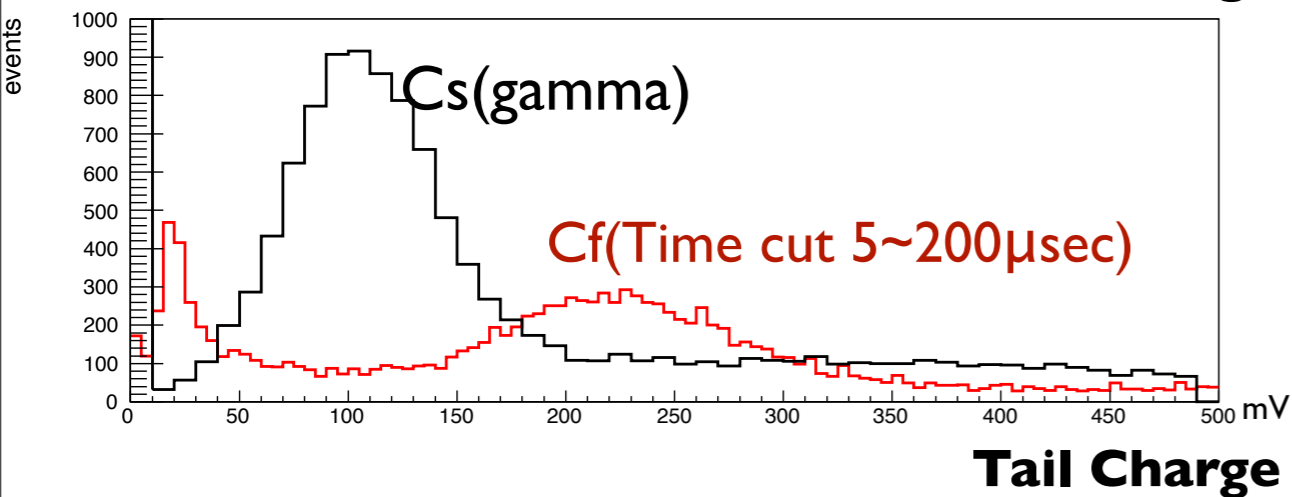
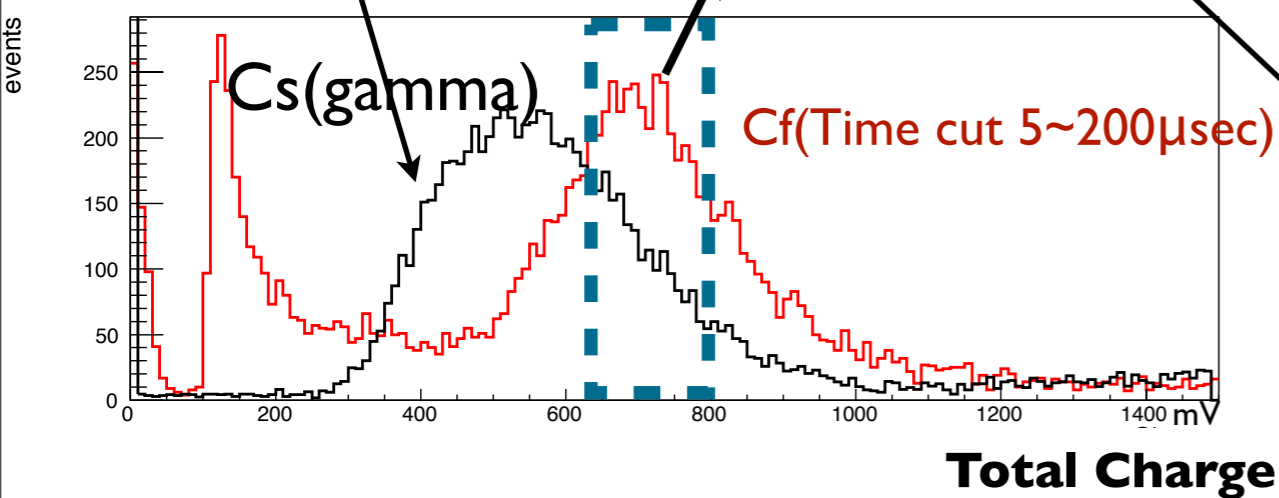
Charge Ratio vs Total Charge



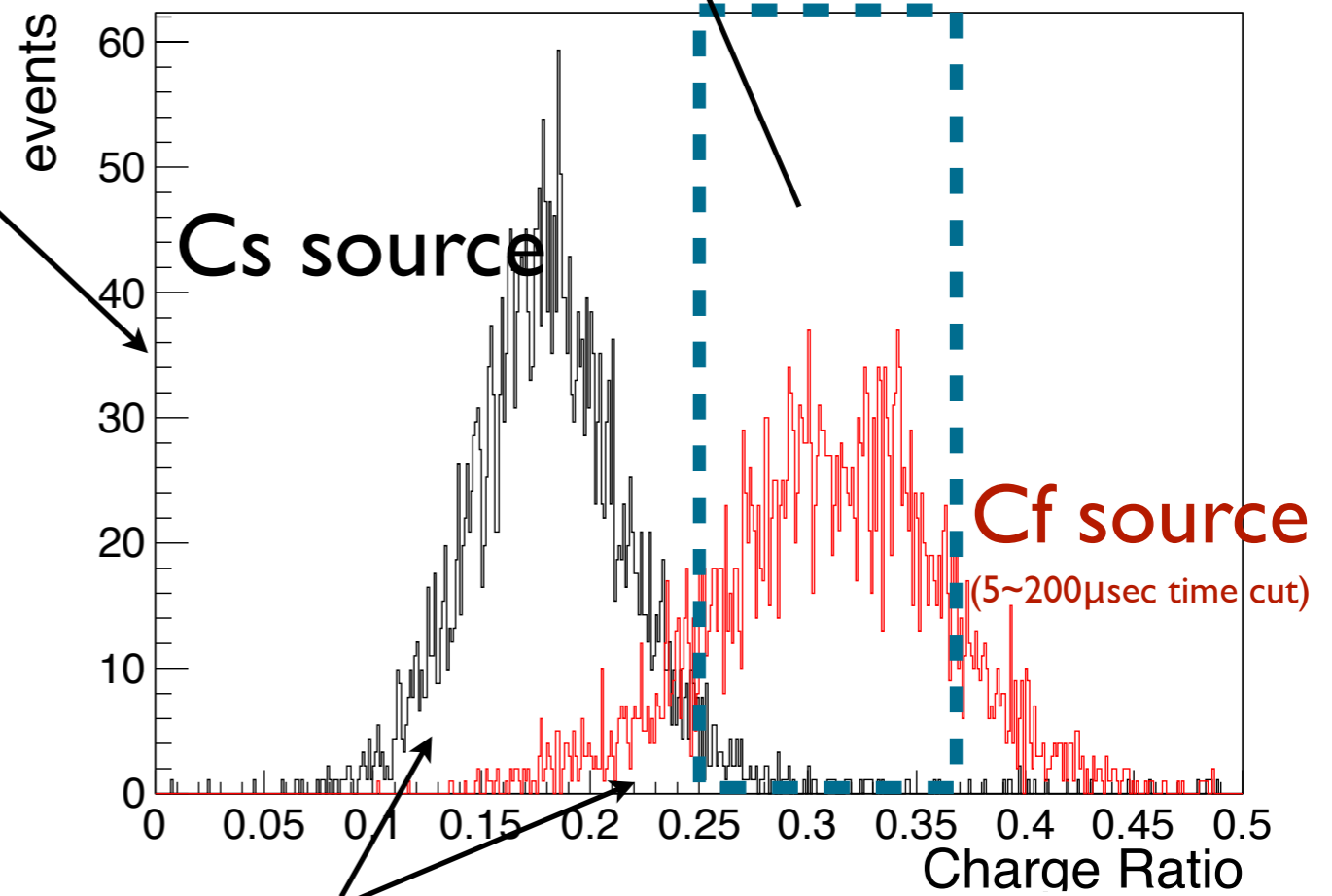
Comparison between Cf and Cs source data (5~200 μ sec)

Cs source event is normalized($\times 6/10$)
to make look better in this figure

Use this area in Charge Ratio analysis



Used this area(0.25~0.37) to
reject background(next slide)



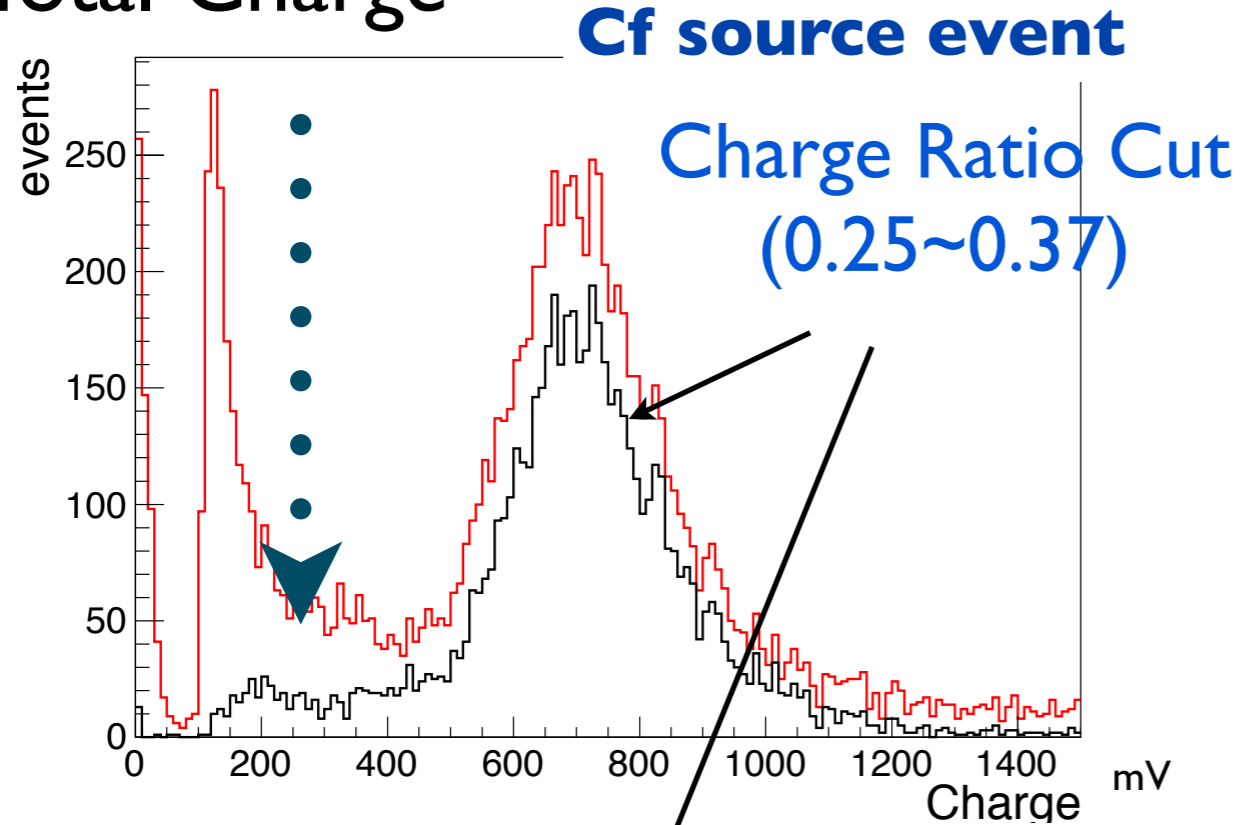
Integral value of two histogram is same
Total Charge(630ch~800ch) Cut

* Cs source event \rightarrow w/o Time Cut

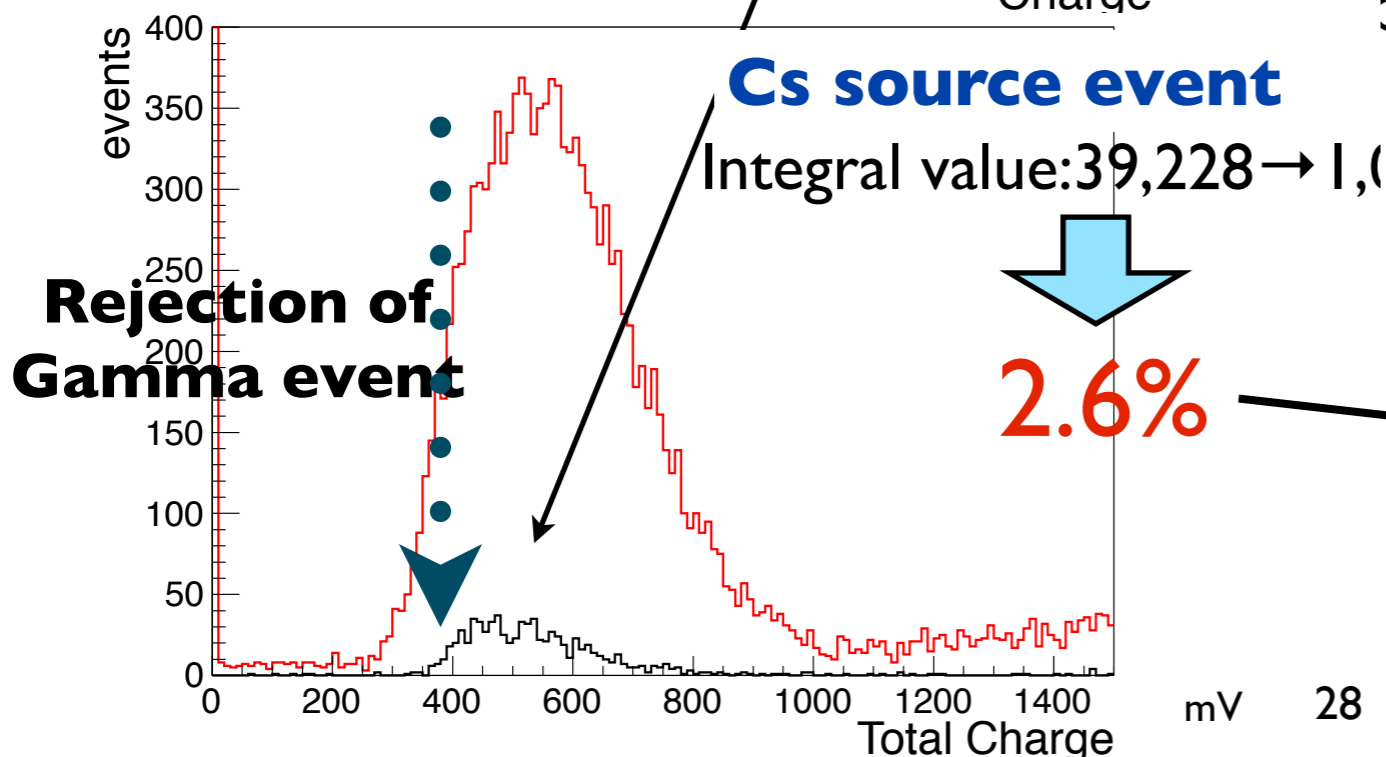
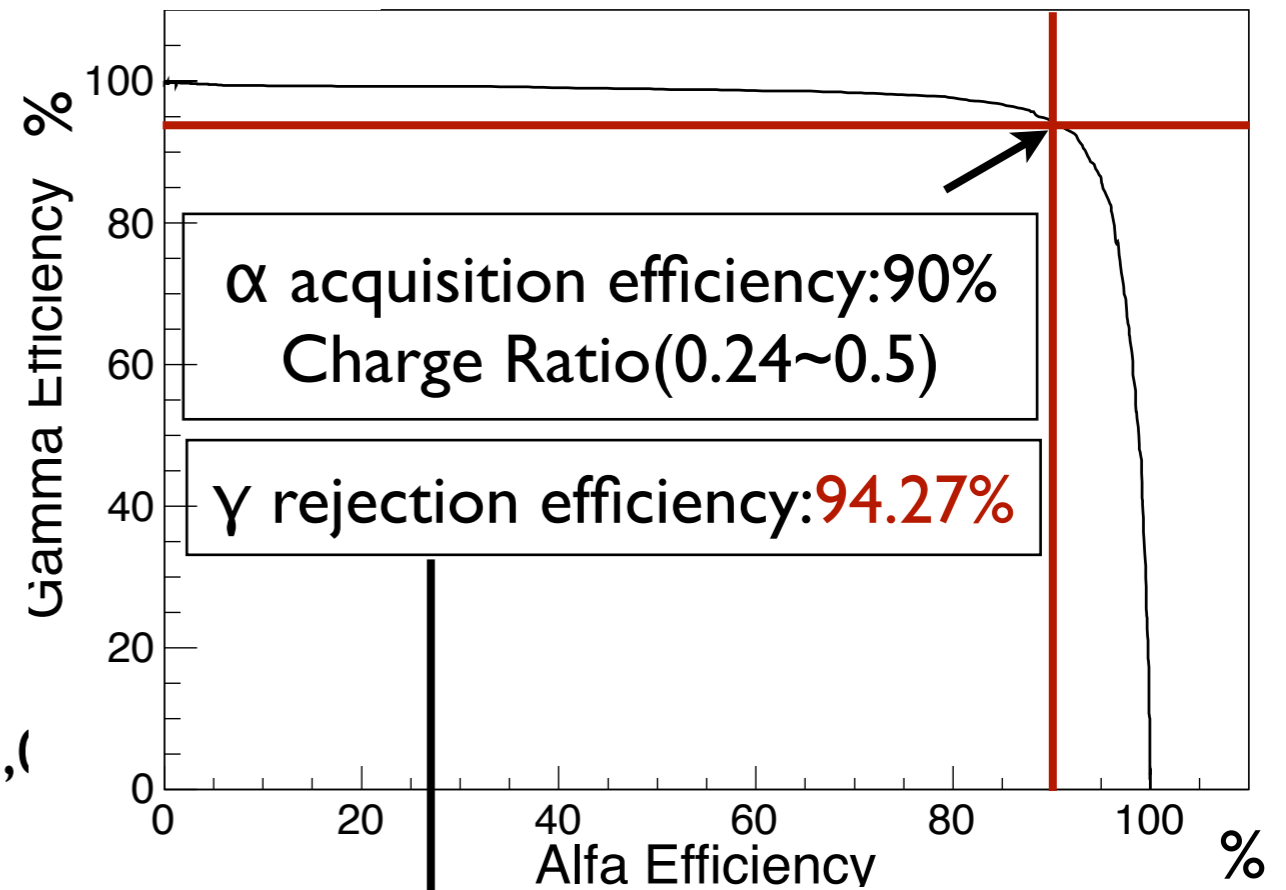
Charge Ratio

BackGround Rejection and γ Rejection Efficiency (Charge Ratio Cut 0.25~0.37)

Total Charge



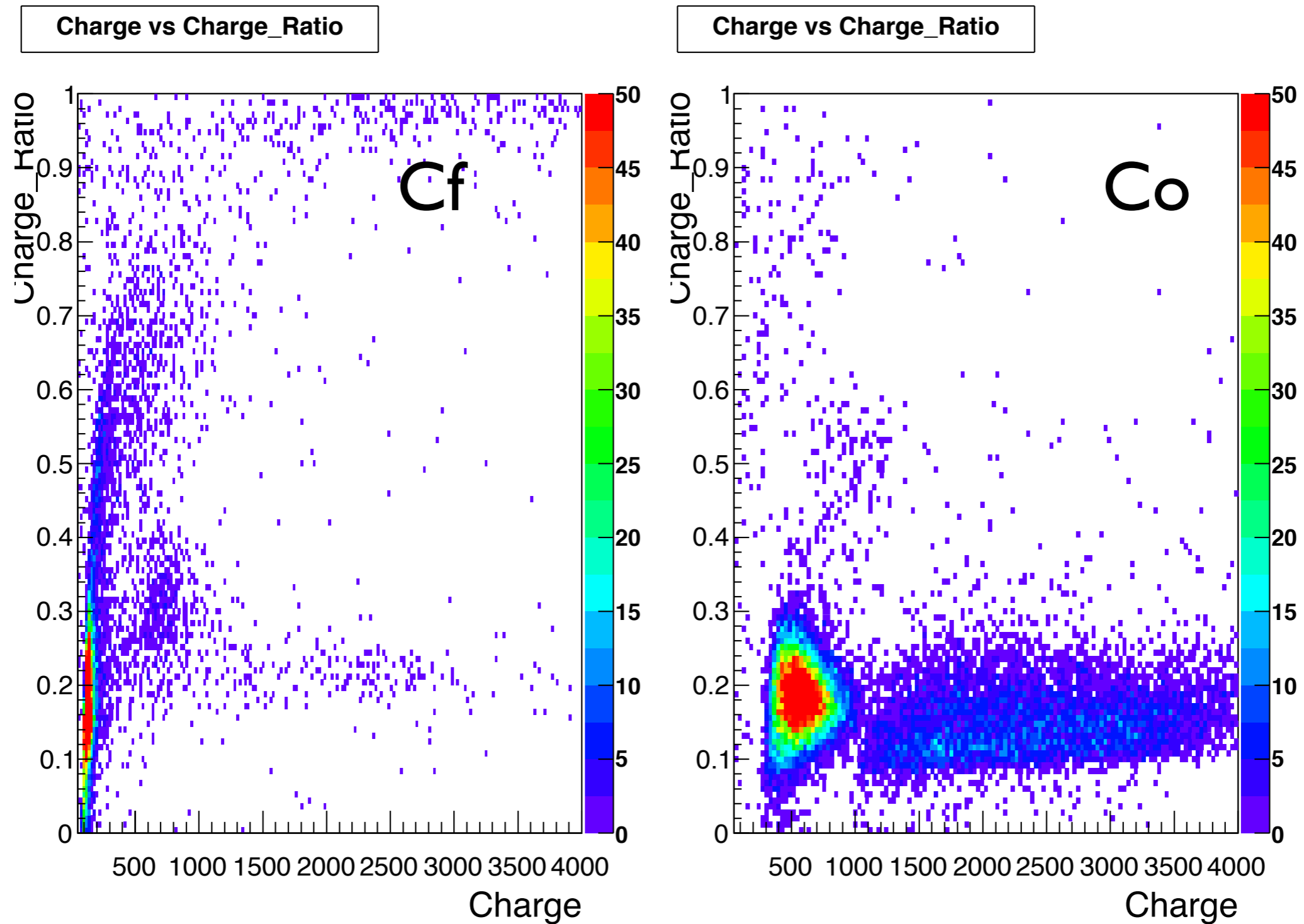
Efficiency-Efficiency Curve



2.6%

We could reduce gamma background effectively and LiLS has good PSD ability

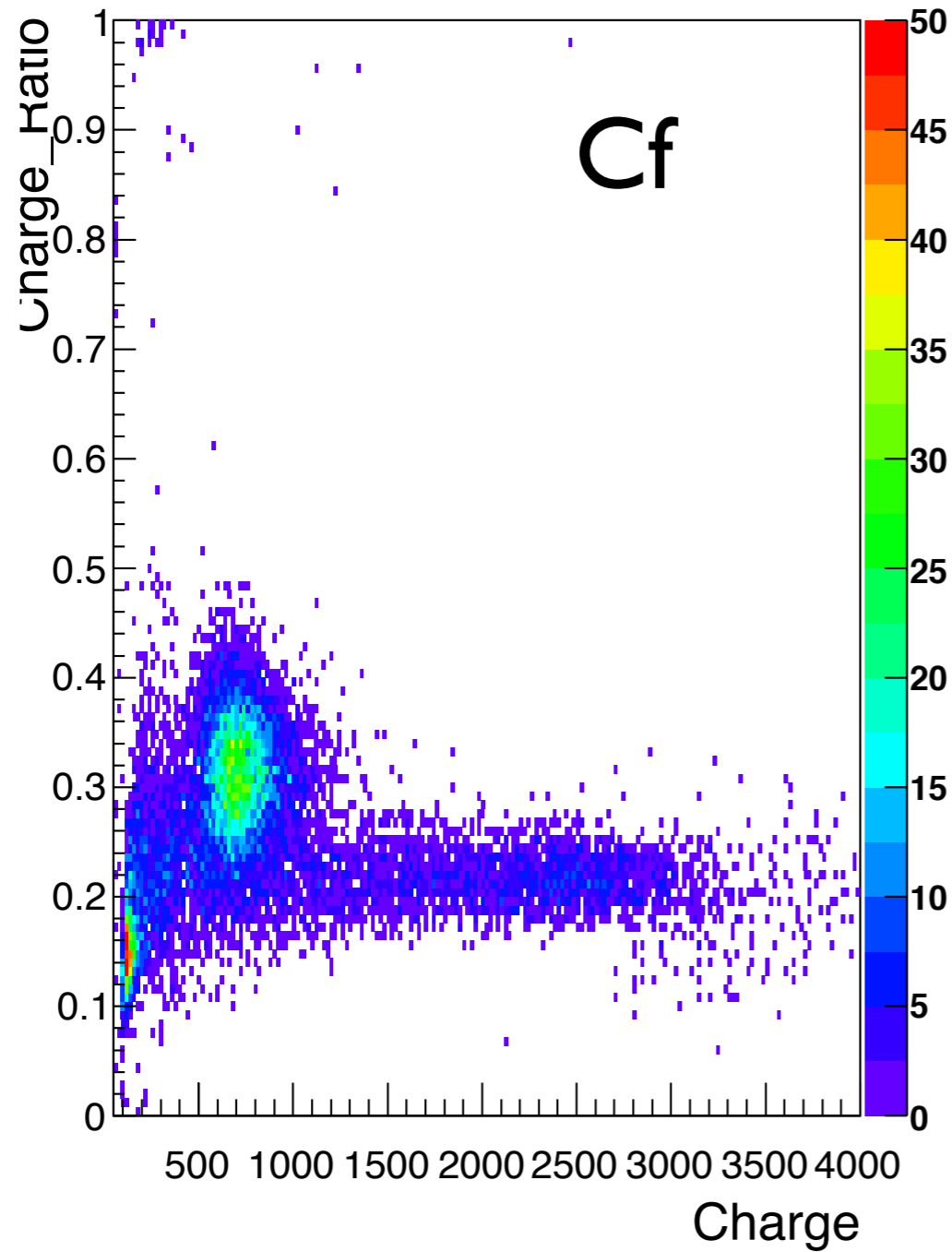
Total Charge vs Charge Ratio



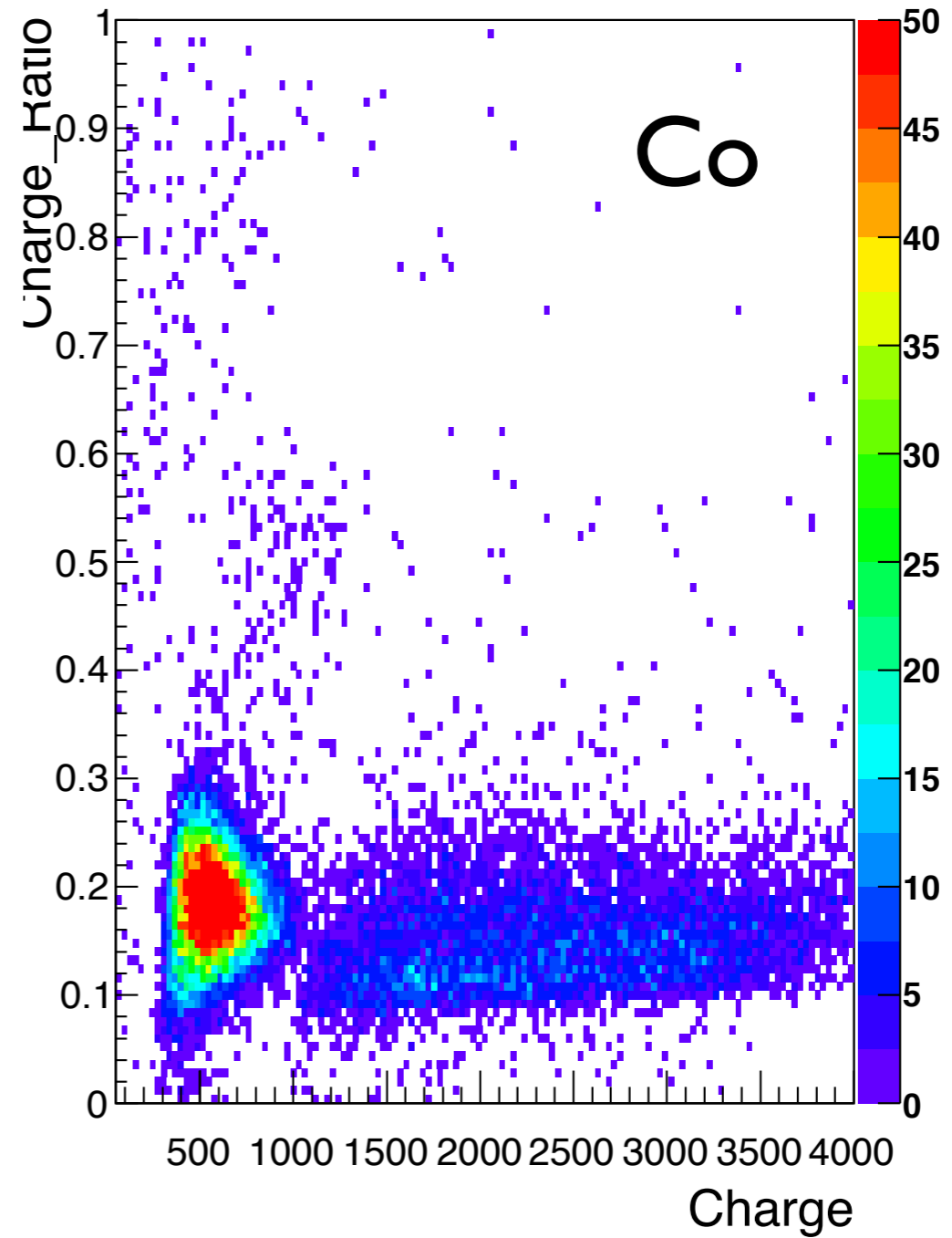
0~5 μ sec cut

Total Charge vs Charge Ratio

Charge vs Charge_Ratio

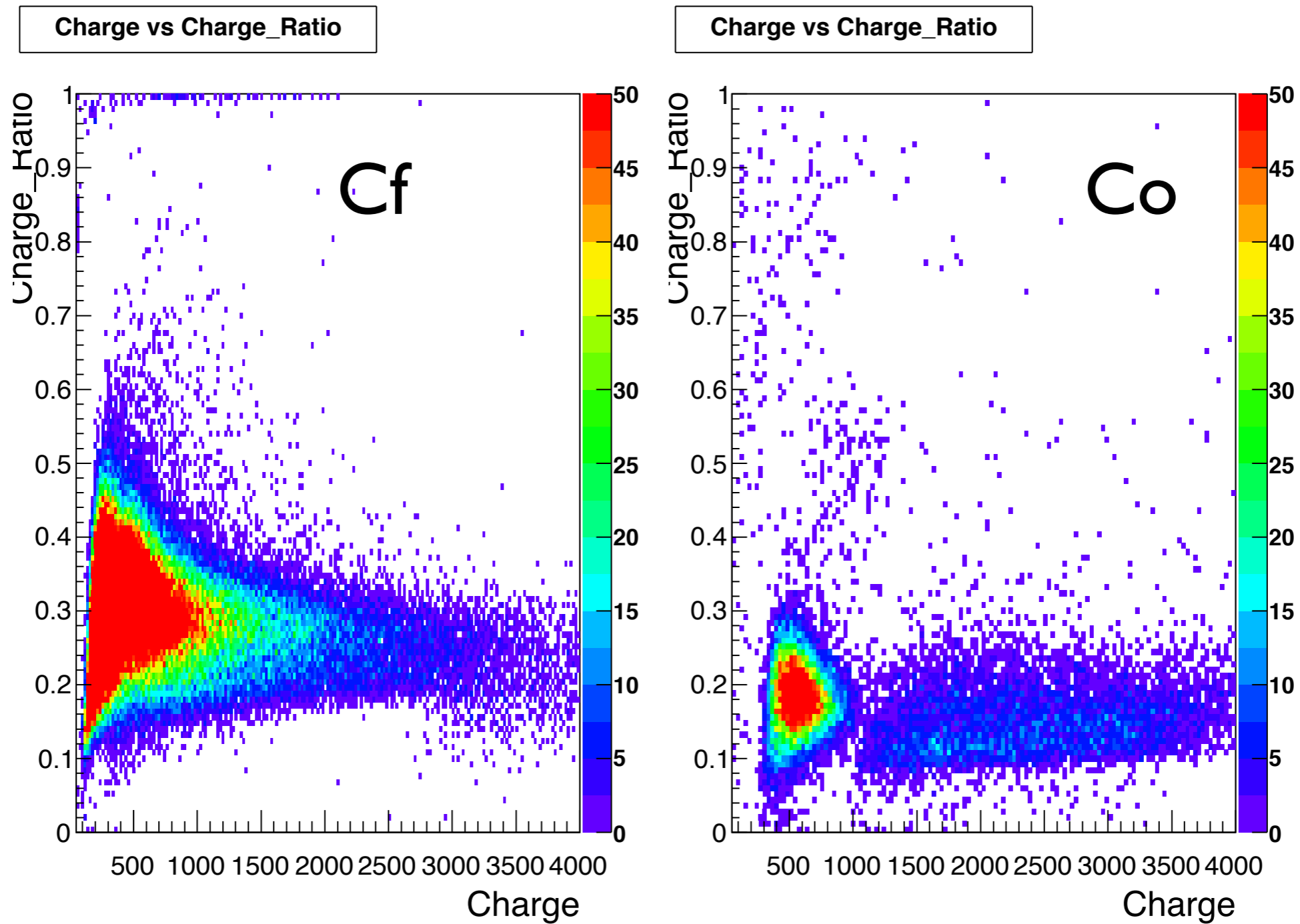


Charge vs Charge_Ratio



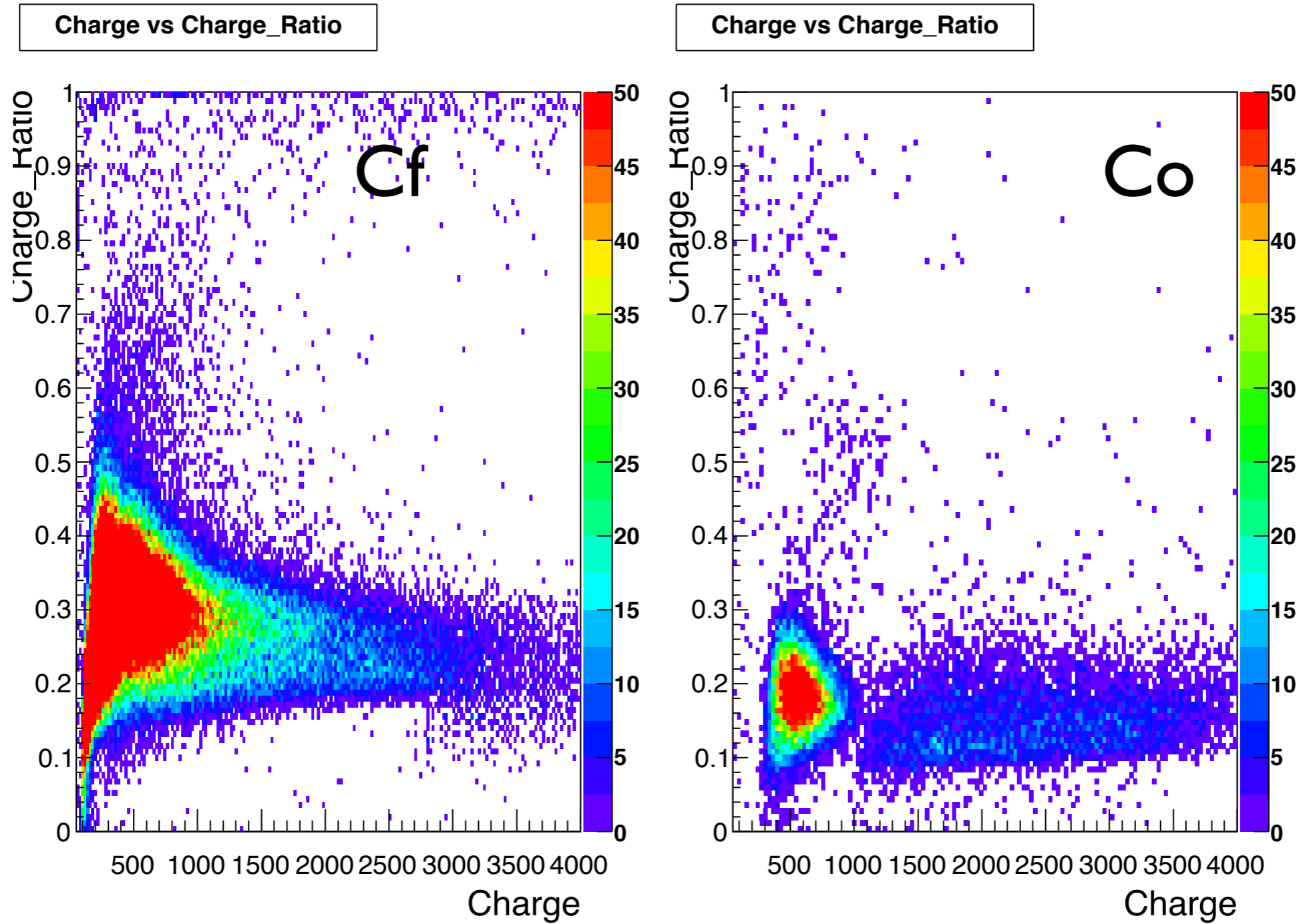
5~200 μ sec cut

Total Charge vs Charge Ratio



200 μ sec \sim cut

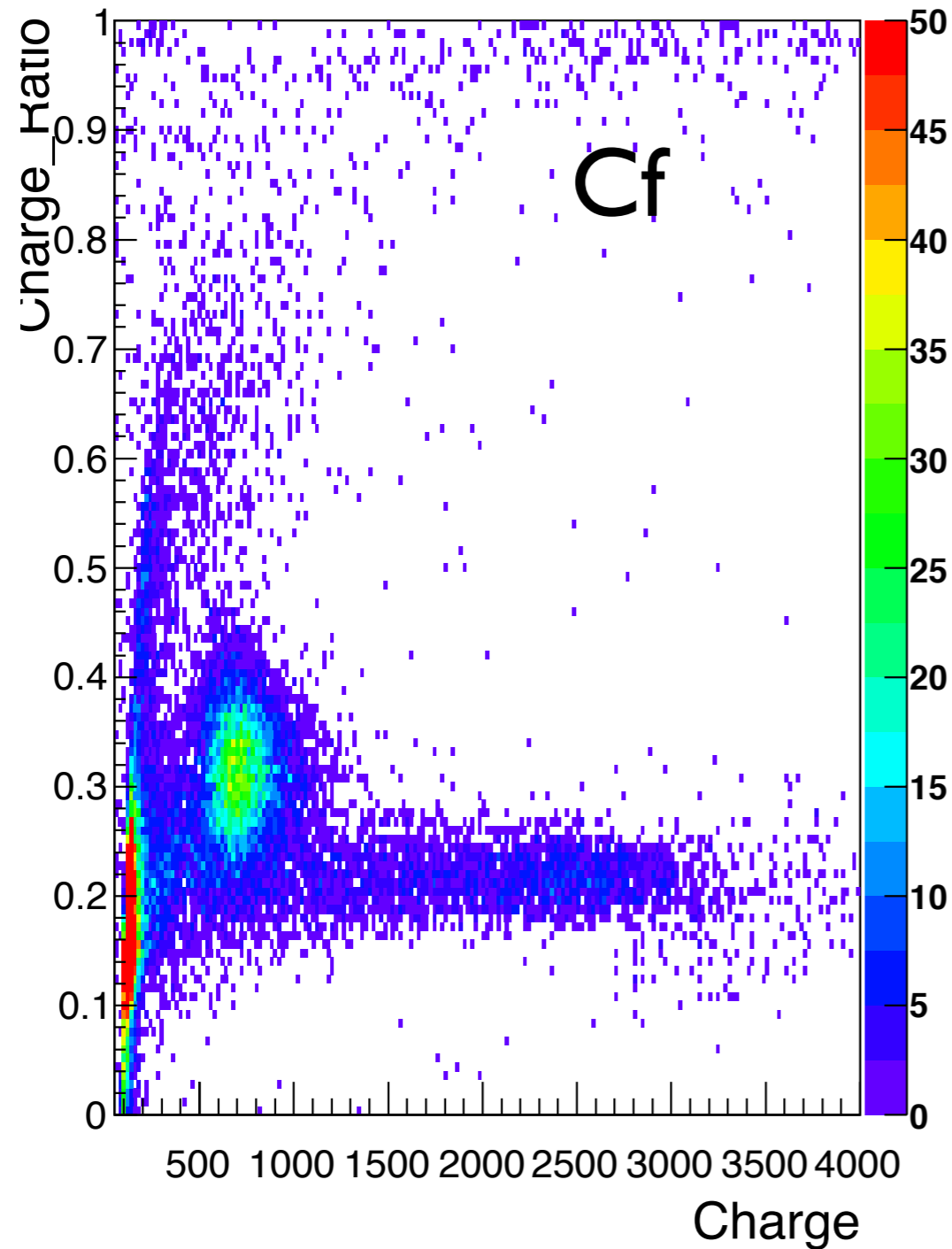
Total Charge vs Charge Ratio



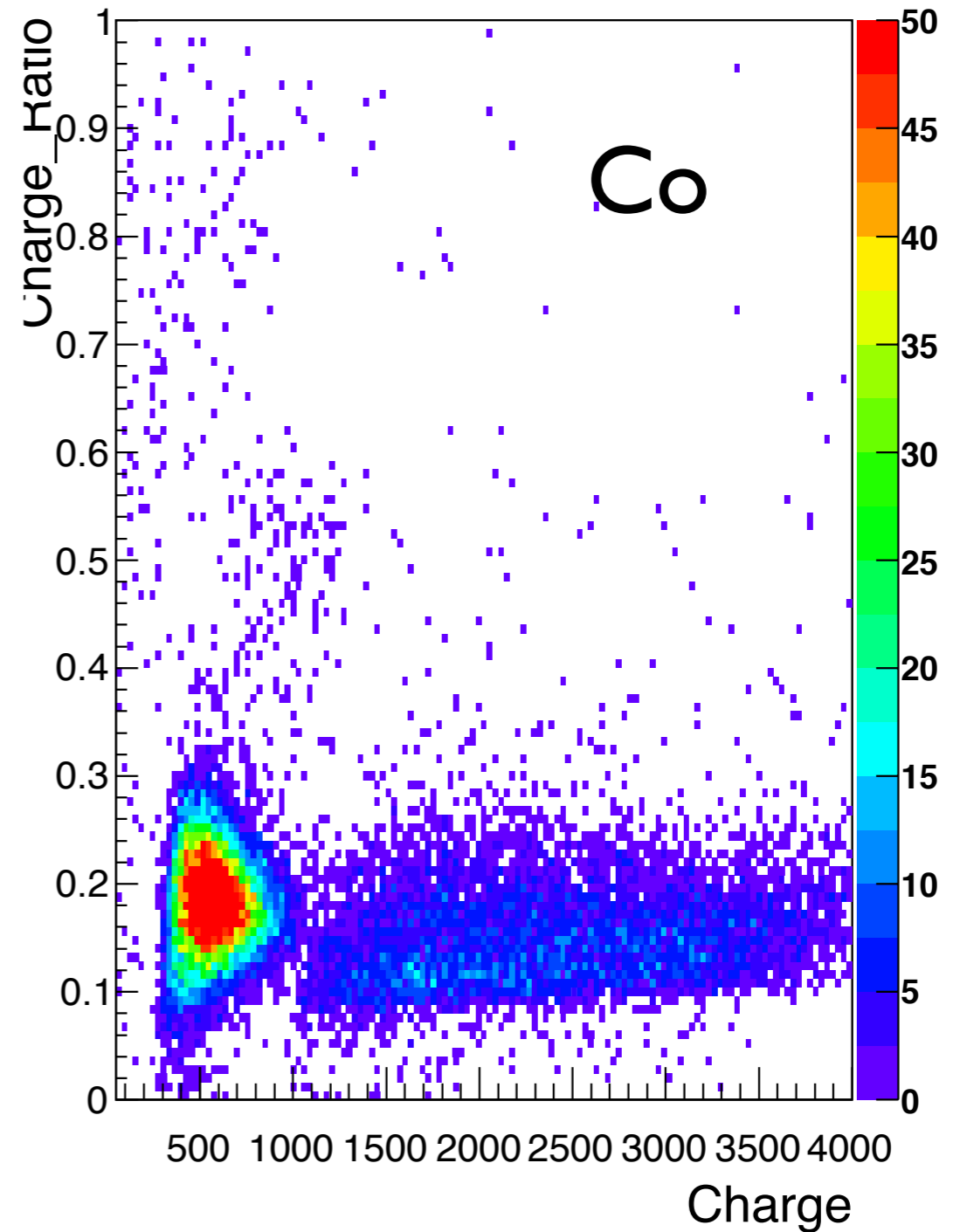
all Charge

Total Charge vs Charge Ratio

Charge vs Charge_Ratio

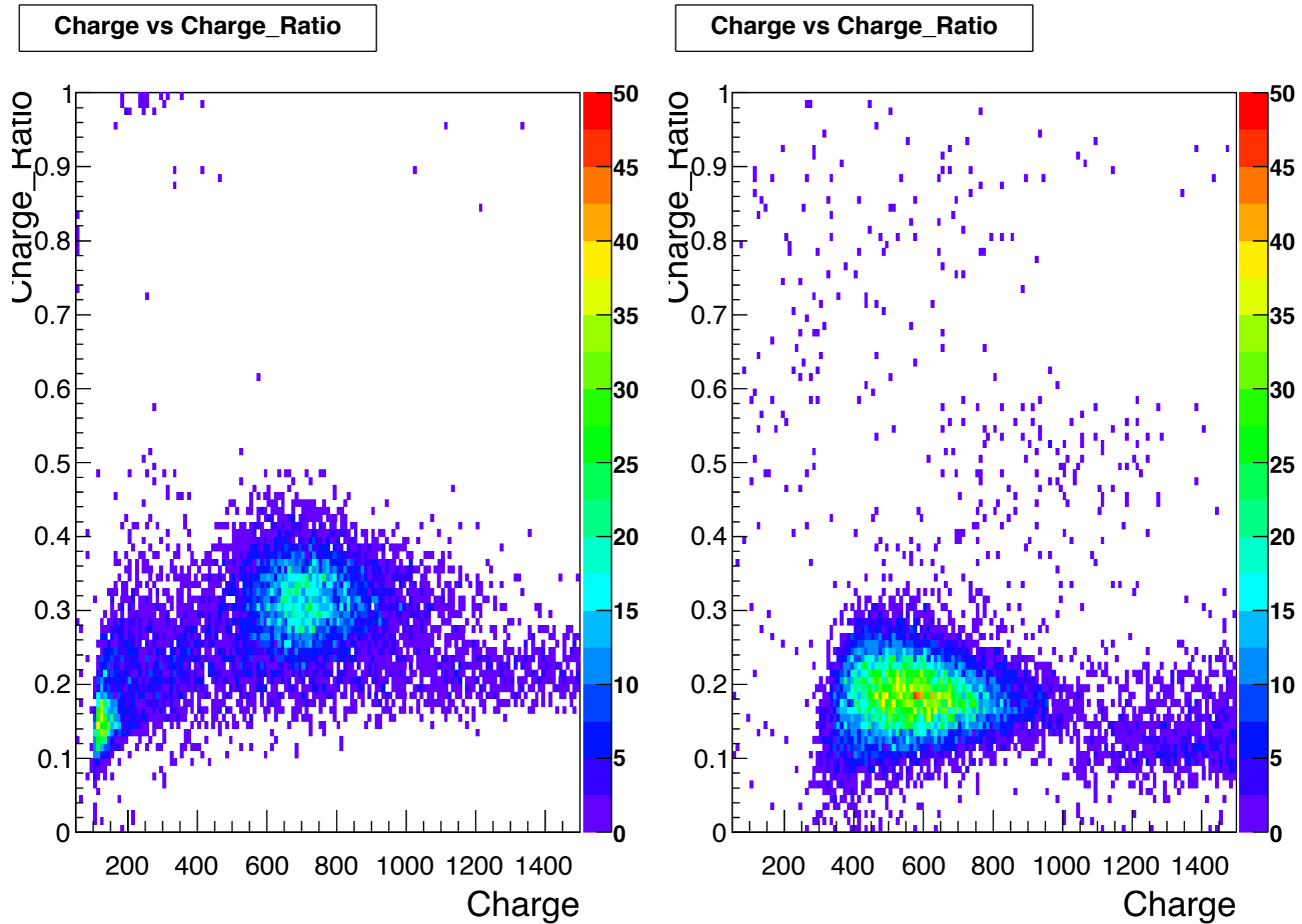


Charge vs Charge_Ratio



0~200 μ sec cut

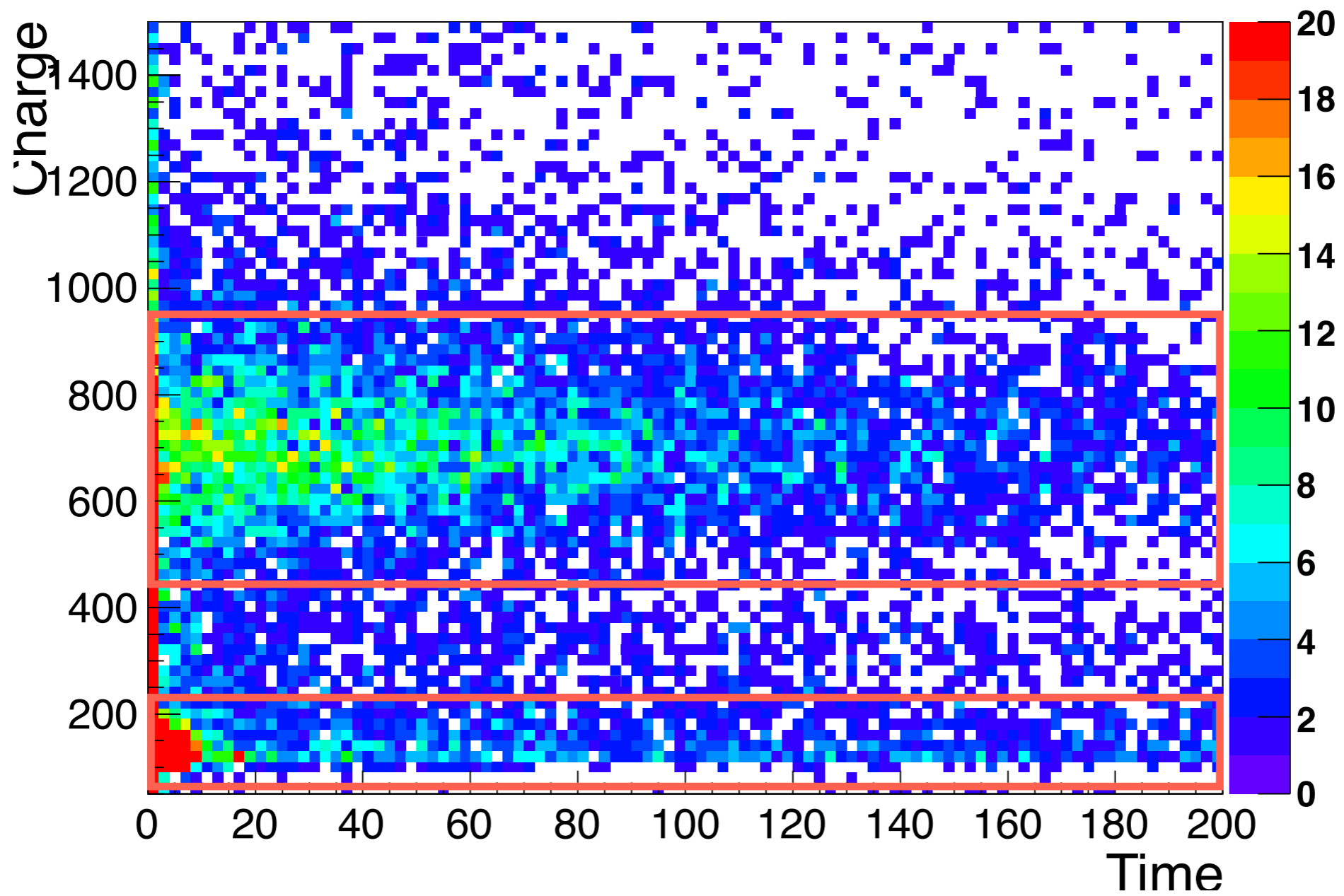
Total Charge vs Charge Ratio(different range)



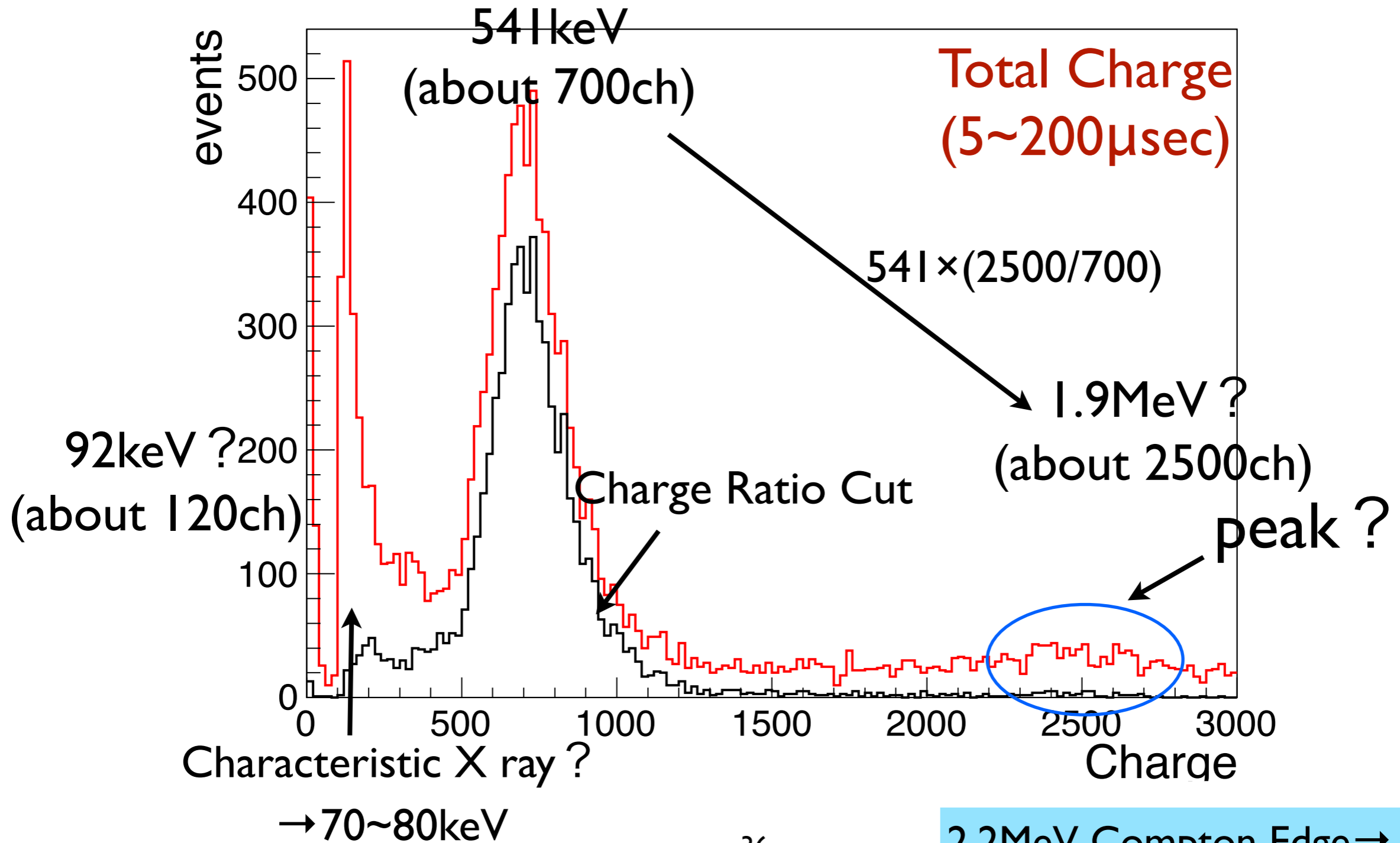
5~200 μ sec cut

Time vs Charge

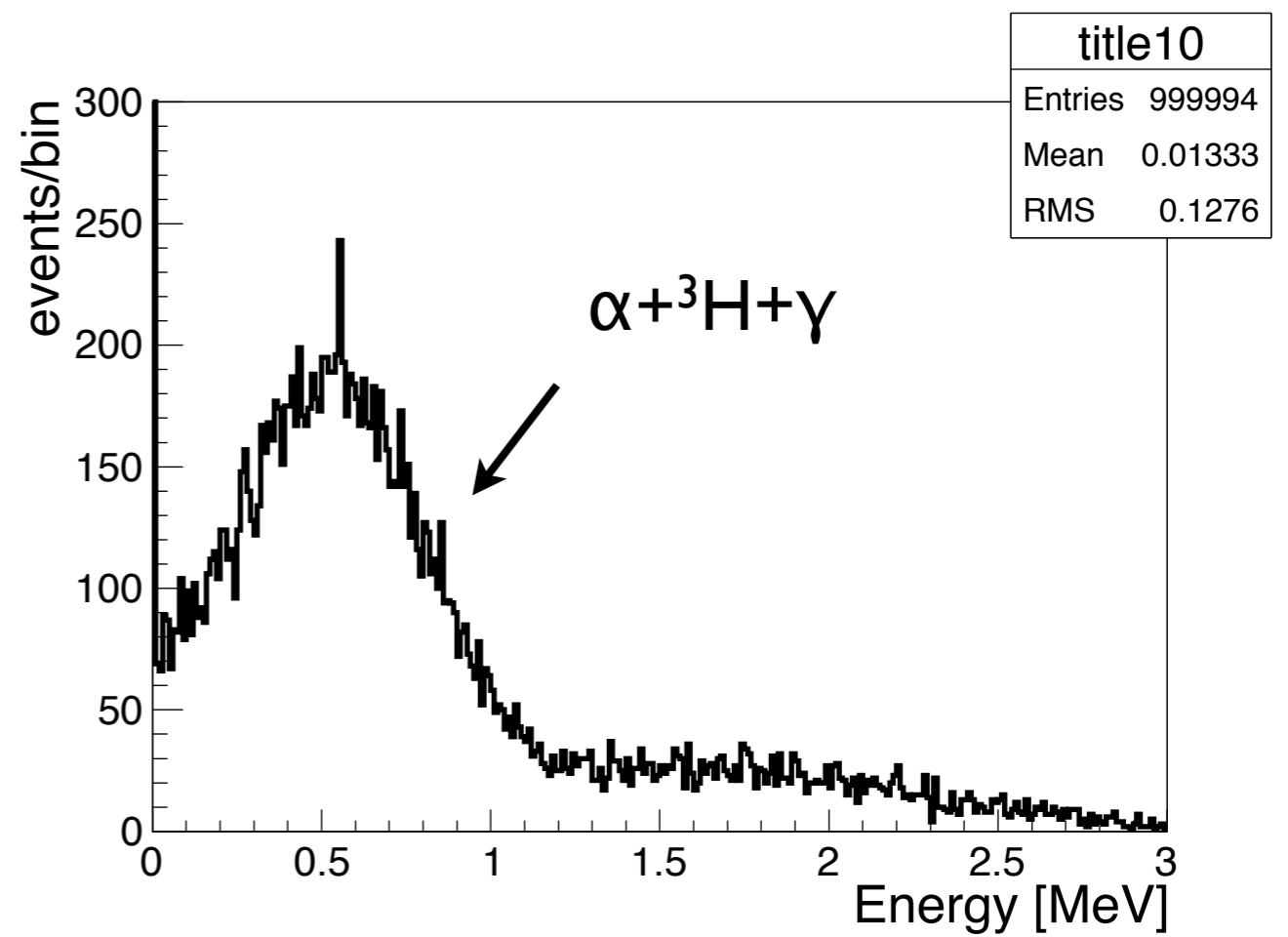
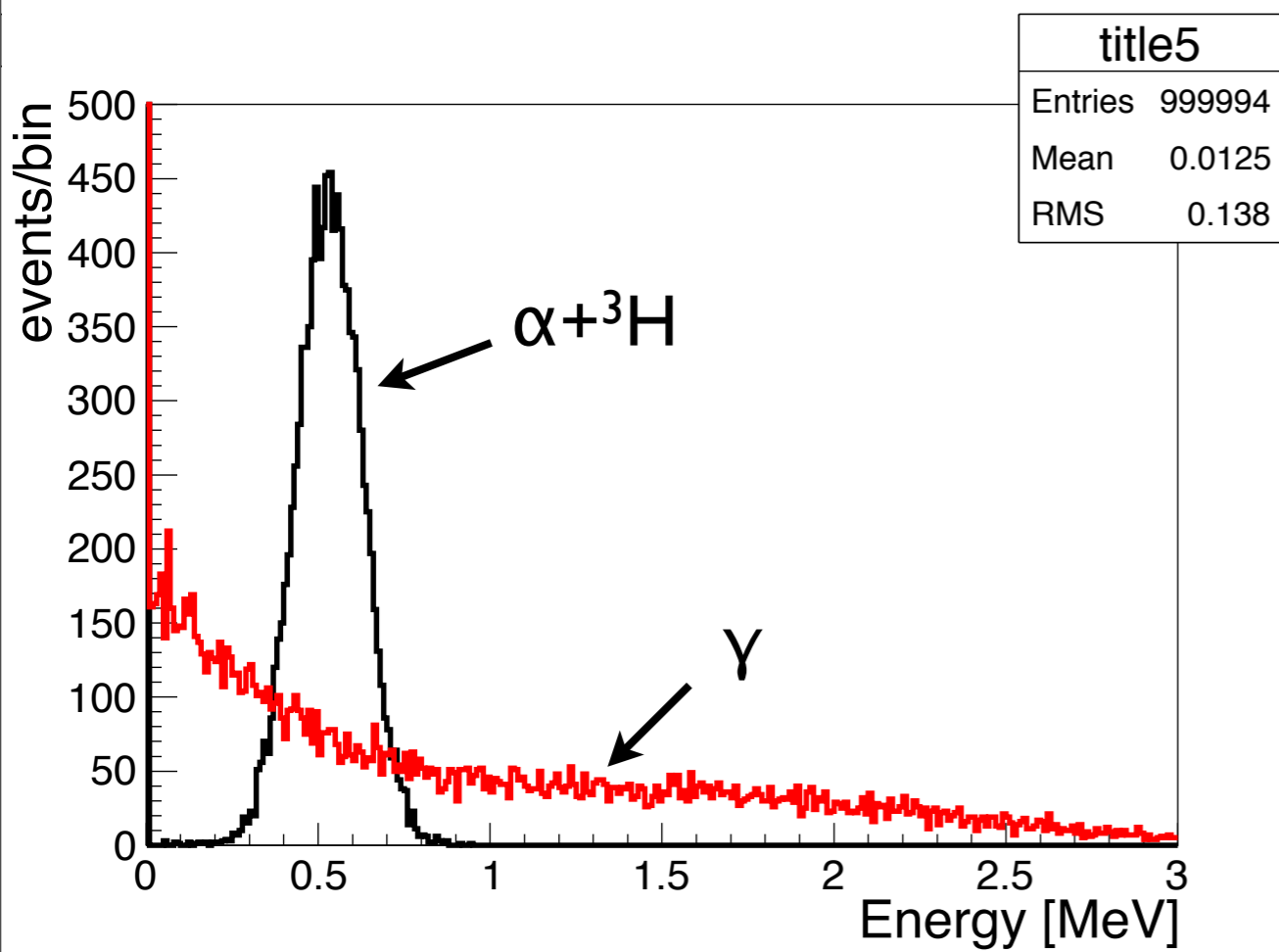
Time vs Charge



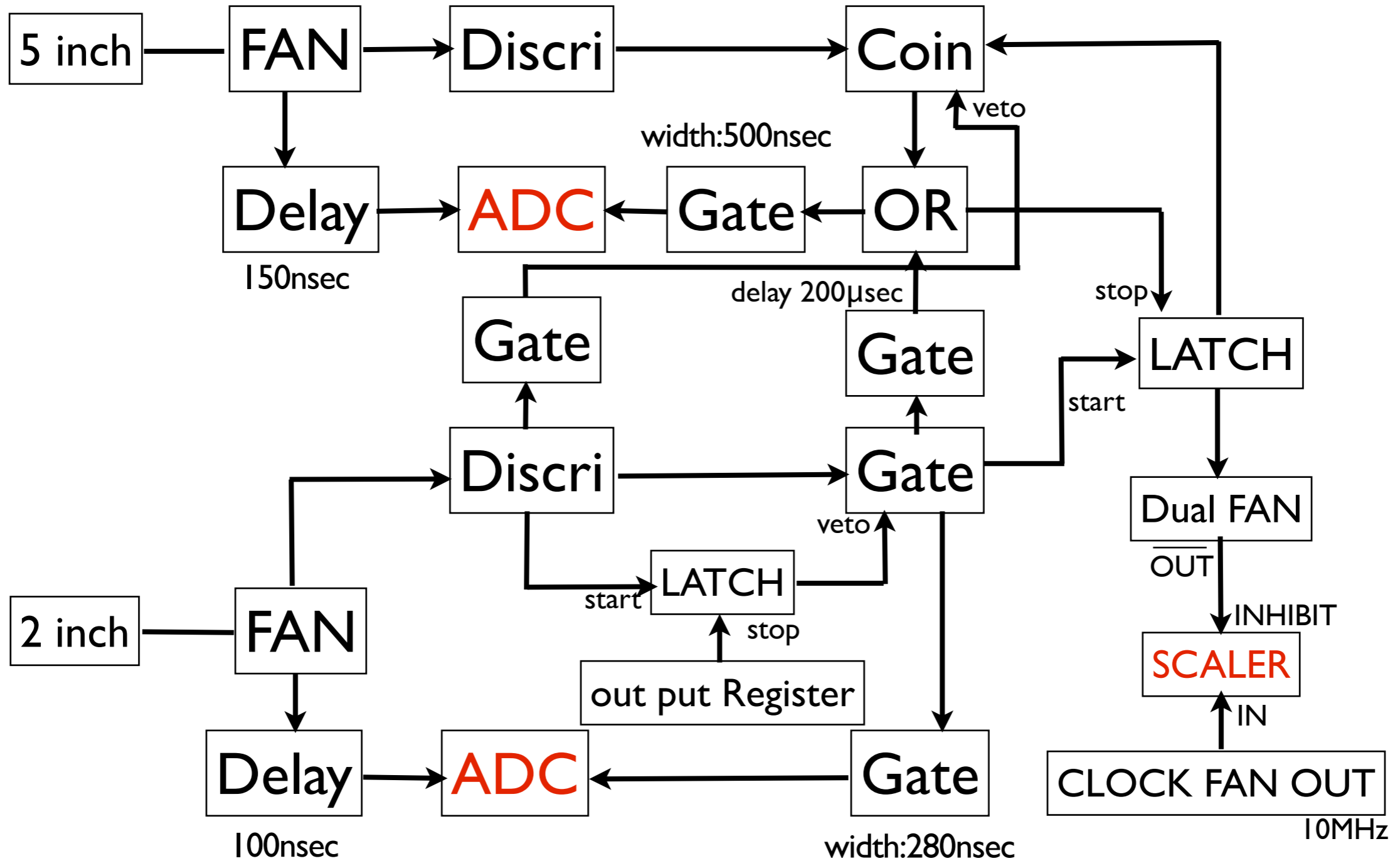
Charge Ratio Cut



simulation



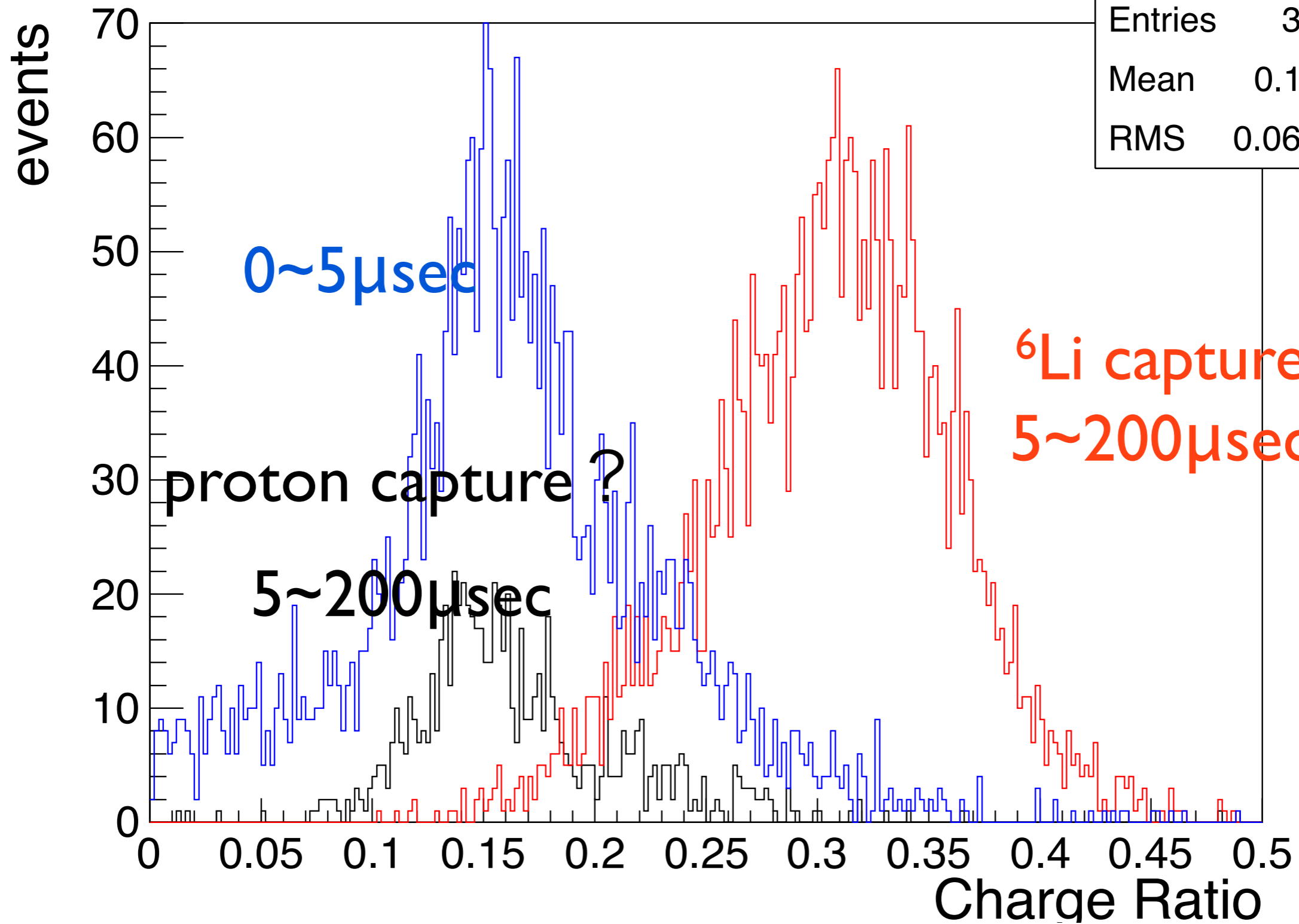
Circuit diagram



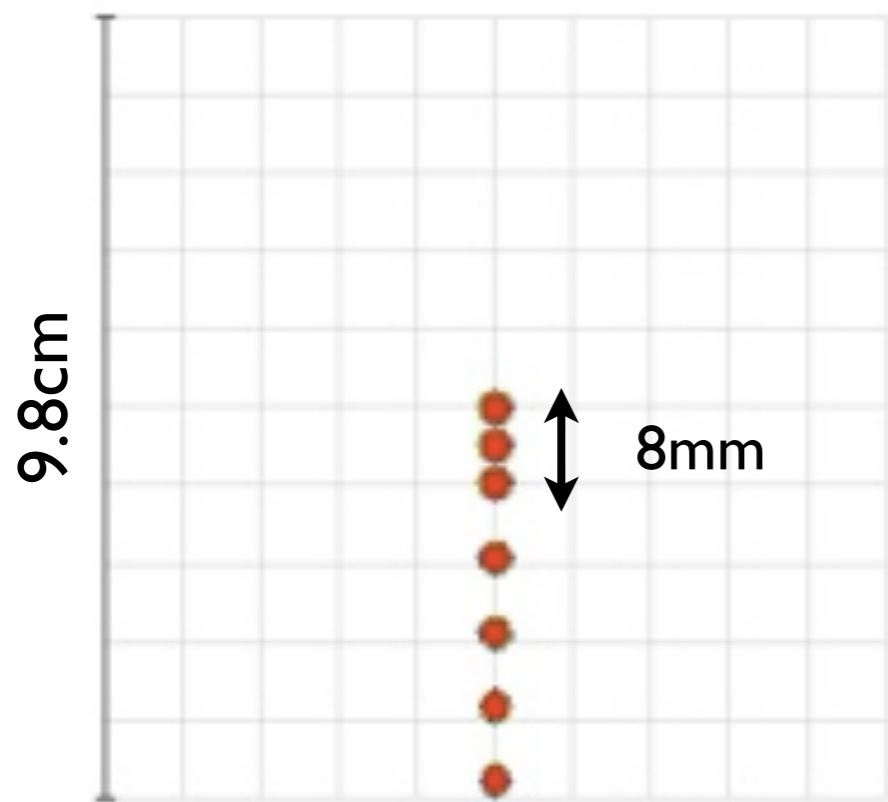
Q3/Q2(Q2 50~200) Time 5~200

h11

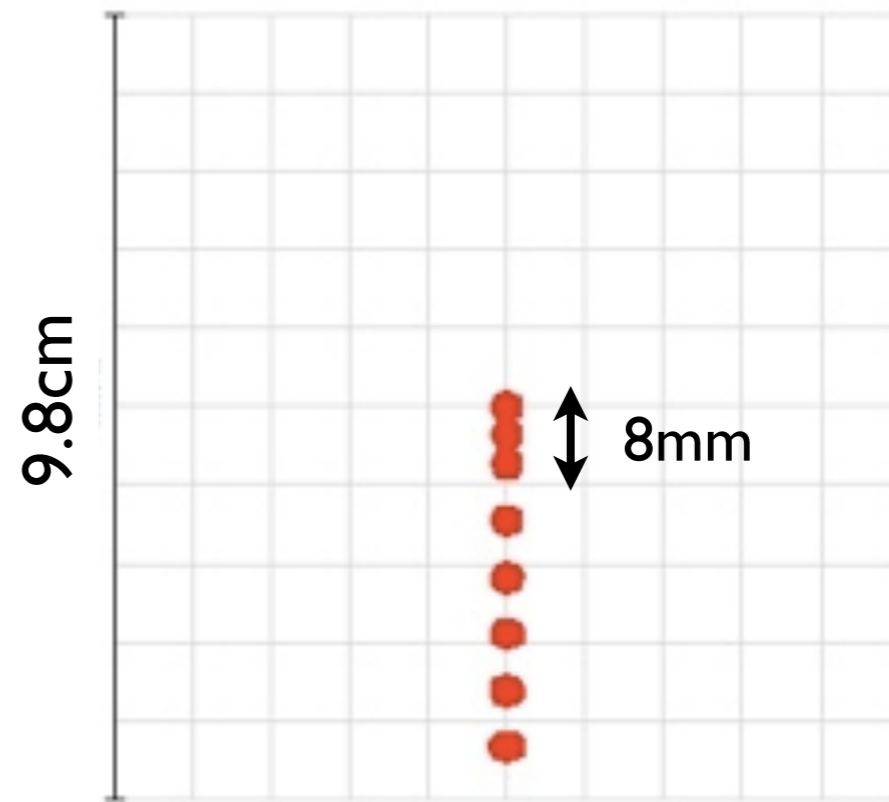
Entries	3758
Mean	0.1635
RMS	0.06835



64ch multianode PMT上で
見える像の分布



180cm

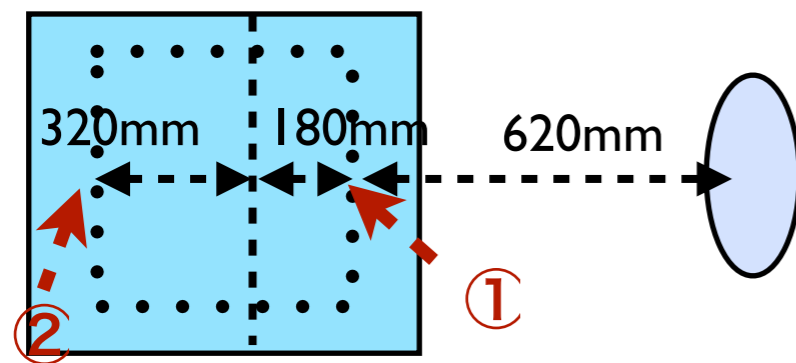


-320cm

フォトン数の見積もり

(p.e.)=(フォトン数(4000[/MeV]))×(delayed energy(540keV))×(減衰長(167cm))×(coverage)
×(レンズの透過率(97%))×(量子効率(34%))×5(レンズを5set使用)

液体シンチレータ



①と②のそれぞれの
位置でのフォトン数

$$\textcircled{1} = 4.67 \text{ p.e.}$$

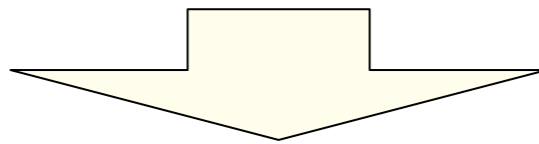
$$\textcircled{2} = 1.06 \text{ p.e.}$$

4,将来的な見通し

Source: muon, ^{252}Cf source

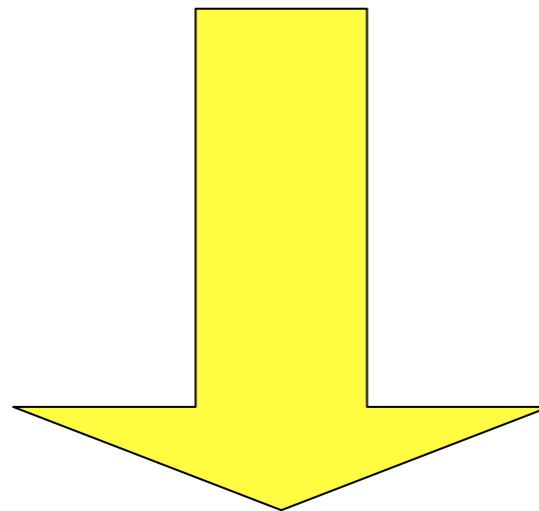
① 実験室系での測定

開発した光検出器でdelayed signalを撮像する事が出来るかのテスト(1年以内)



Source: neutrino source

② 小型検出器を作成し高レートの新ニュートリノ源の近くに置き方向検出の原理検証を行う(数年内)



dream

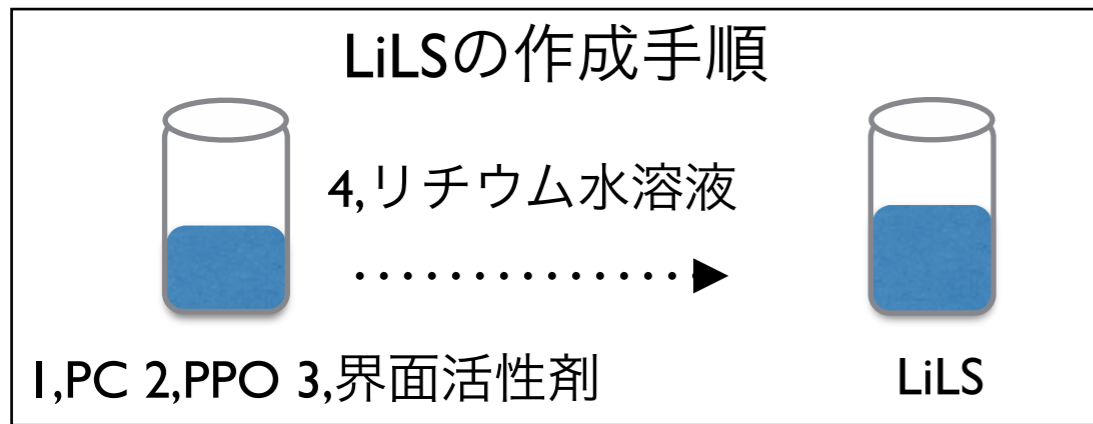
③ 大型検出器にLiLSと光検出器を実装し地球ニュートリノの観測を行う

3,新しい検出器の開発

~ LiLS ~

リチウム化合物は水に溶けやすく油に溶けにくい →

界面活性剤を使用し水溶液にしてから油に溶かす



発光量、減衰長が良くなる界面活性剤を選定

	Li[wt%] ⁶ Li[wt%]	減衰長[cm@400nm]	発光量[%]
目標値	2.0 0.15	≧70	≧100(kamland liquid scintillator)

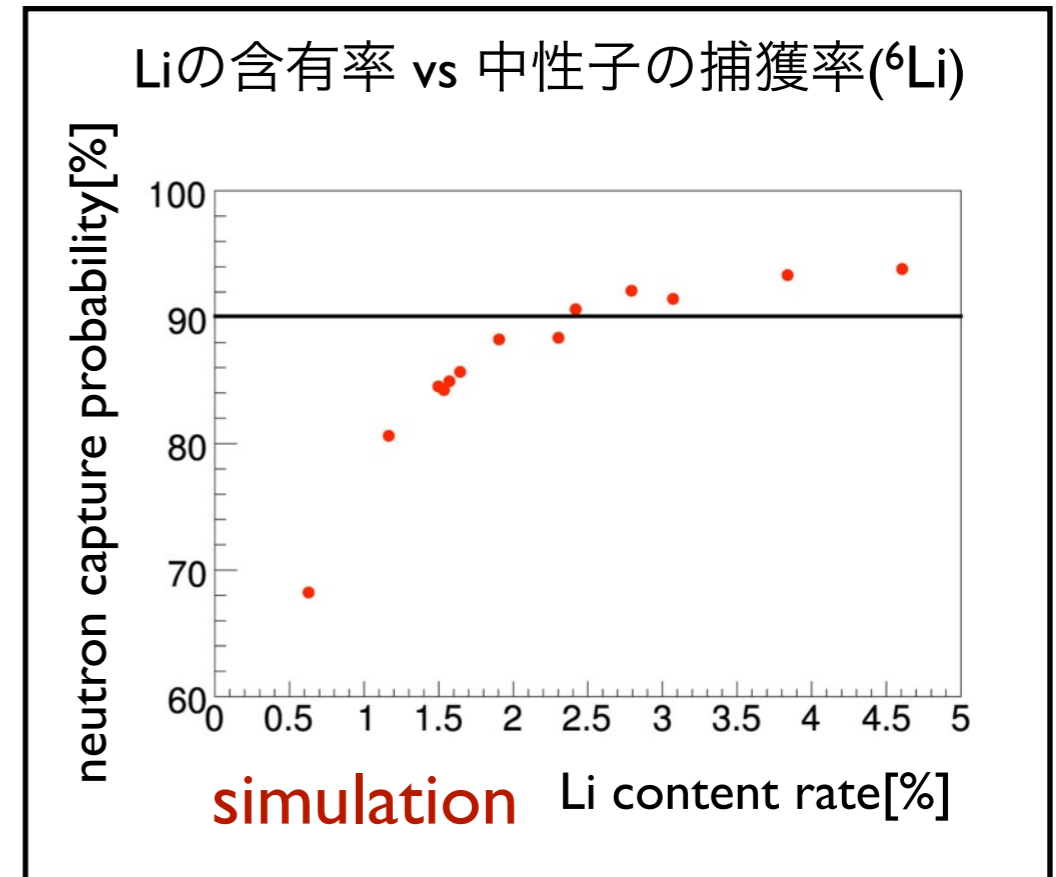
LiLSの最終レシピ

PC:界面活性剤(TritonX-100)=83%:17%

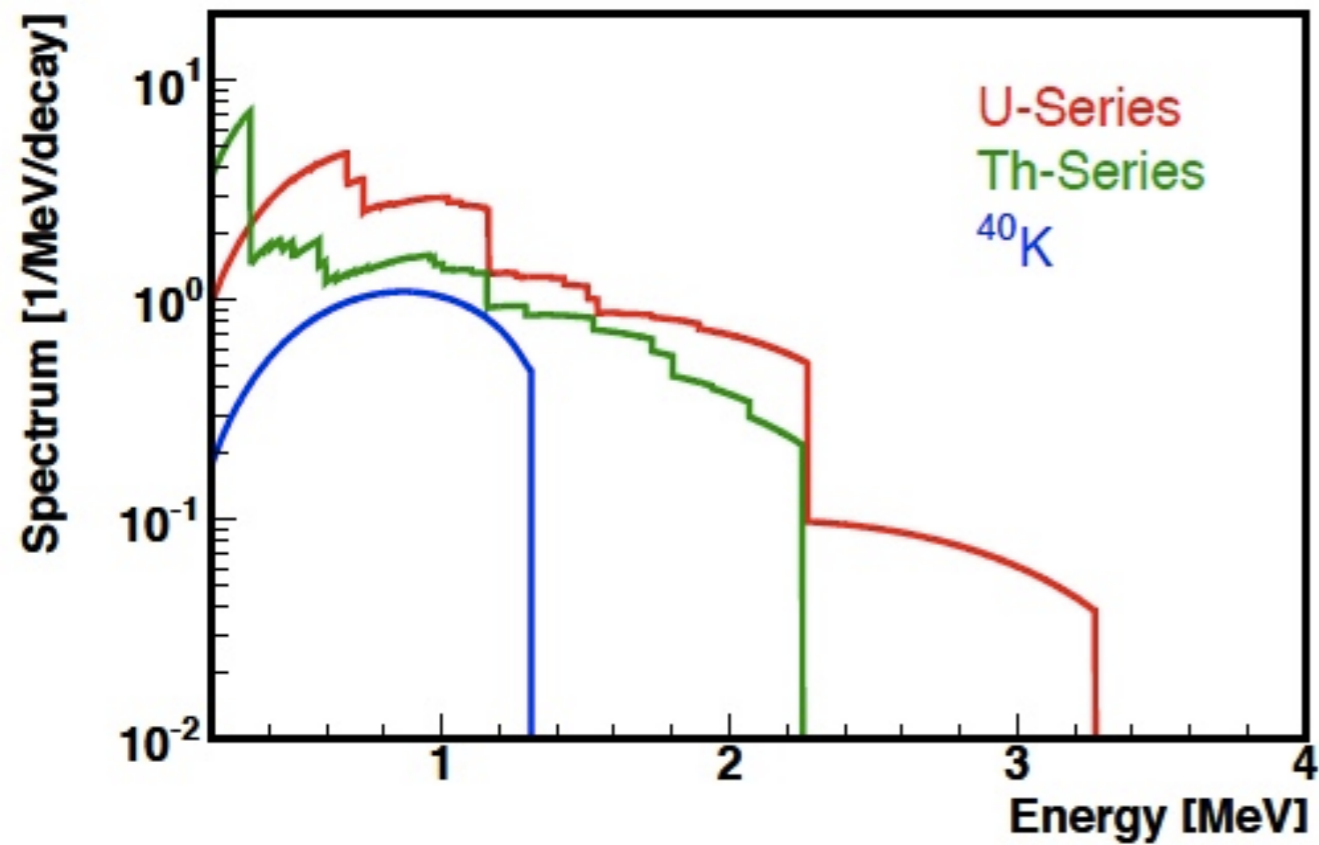
PPO=5g/l, LiBr · H₂O(aqua)=37g/l,

⁶Li=0.15wt%(enrichを仮定(⁶Li 95%))

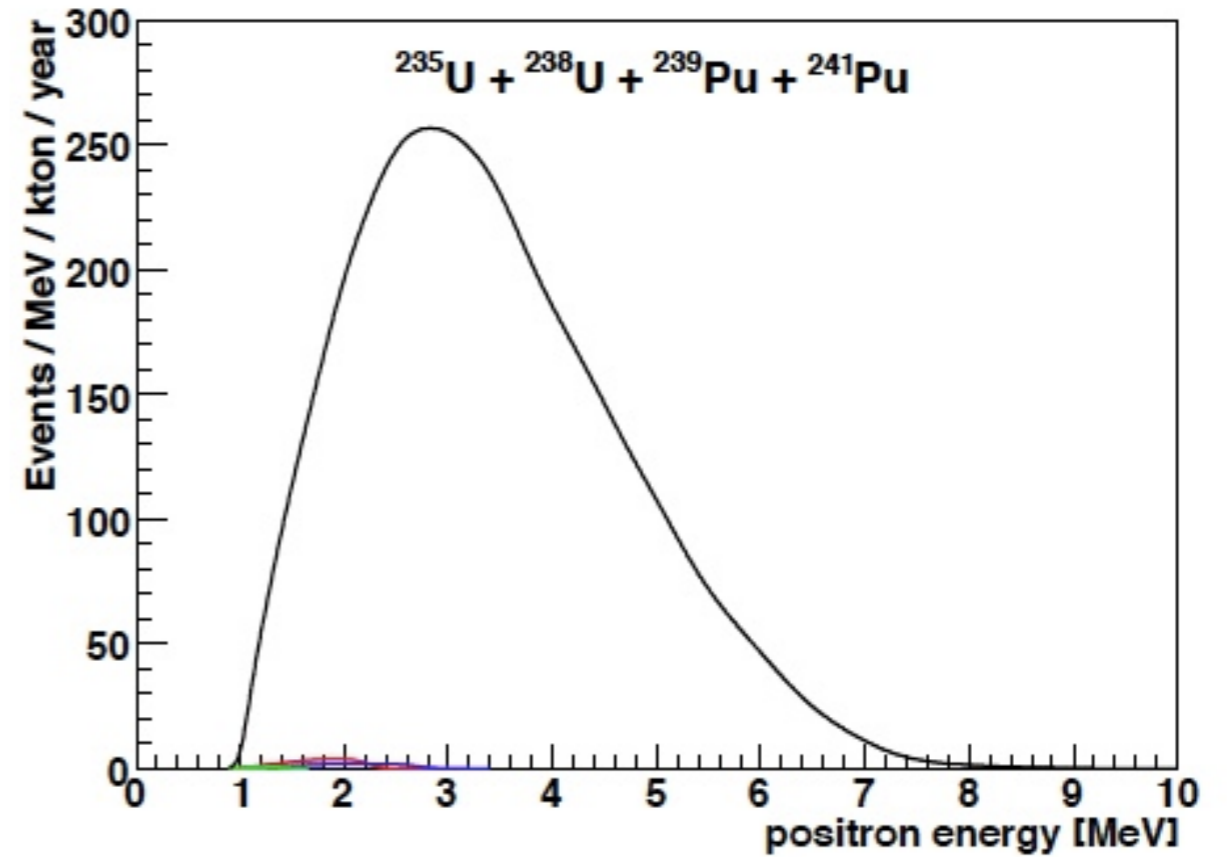
Not Enrichment	⁶ Li:7.59%, ⁷ Li:92.41%
Enrichment	⁶ Li:95%, ⁷ Li:5%



Neutrino Energy



geo-neutrino



positron energy
(reactor-neutrino)