

# ポジトロニウム

感謝のスライド100連発

赤塚駿一・中川裕也・松本滉平・向井大智・山本貴宏

# 目次

- ・ イントロダクション
- ・ 理論
- ・ 装置・回路
- ・ シミュレーション
- ・ # 歩み
- ・ 補正・解析
- ・ 考察

イントロダクション

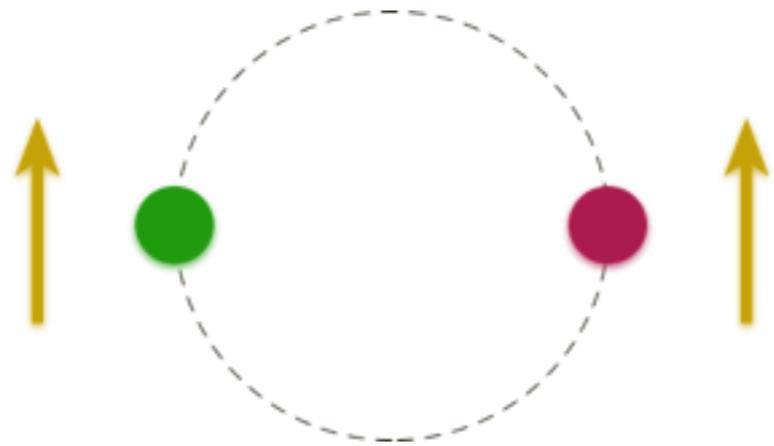
# 本実験の目的

- ・ 磁場中のポジトロニウムの崩壊を観測し、超微細分裂を測定しようとするも**失敗**
- ・ 電子と陽電子の対消滅によるポジトロニウムの $\gamma$ 線への崩壊を観察する
- ・ オルソポジトロニウムの寿命を計算し、理論と比較する

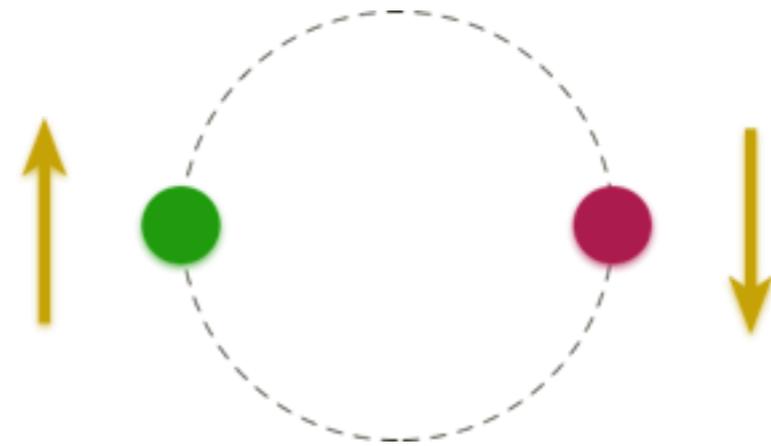
# 理論

# ポジトロニウムとは

- 電子と陽電子の束縛状態



オルソポジトロニウム

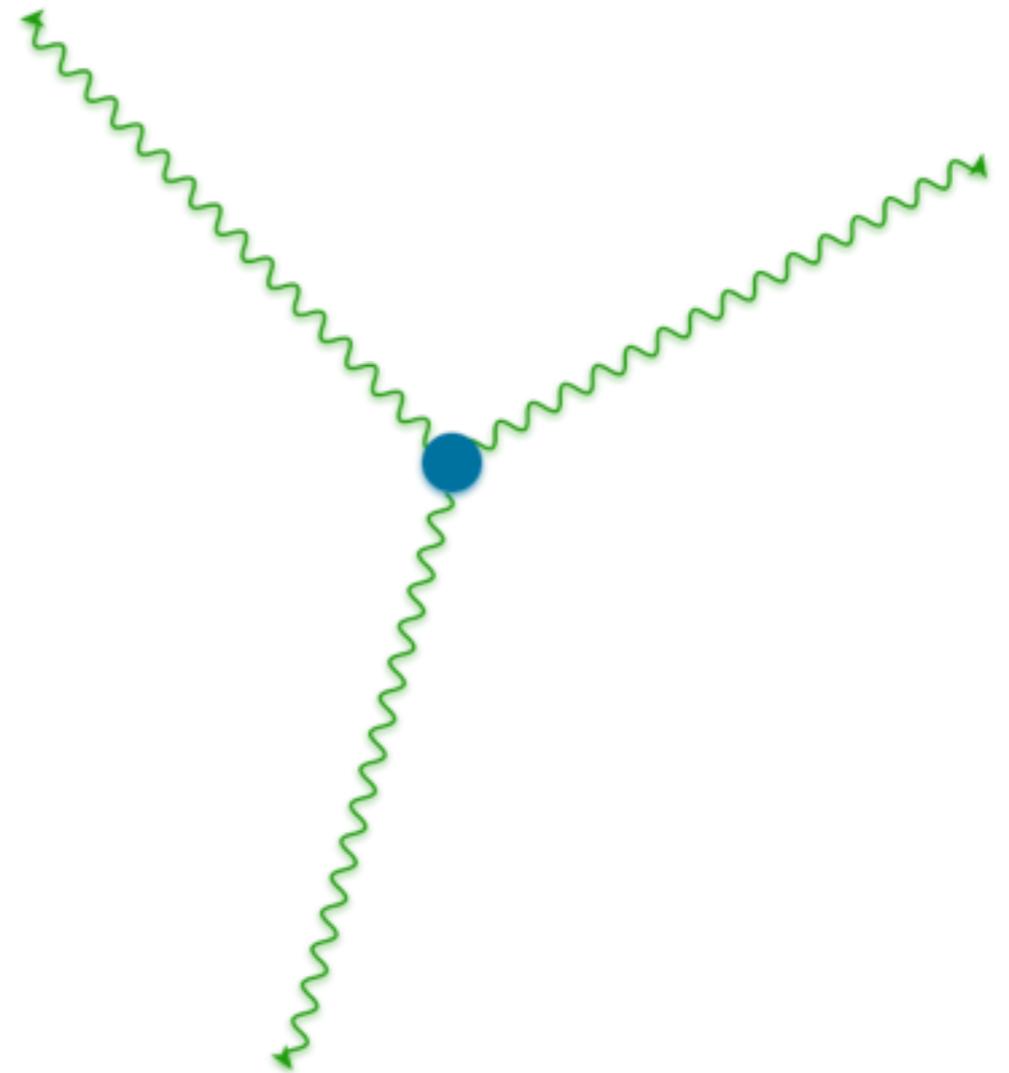


パラポジトロニウム

- 電子・陽電子対消滅により有限の寿命で $\gamma$ 線に崩壊する準安定な状態

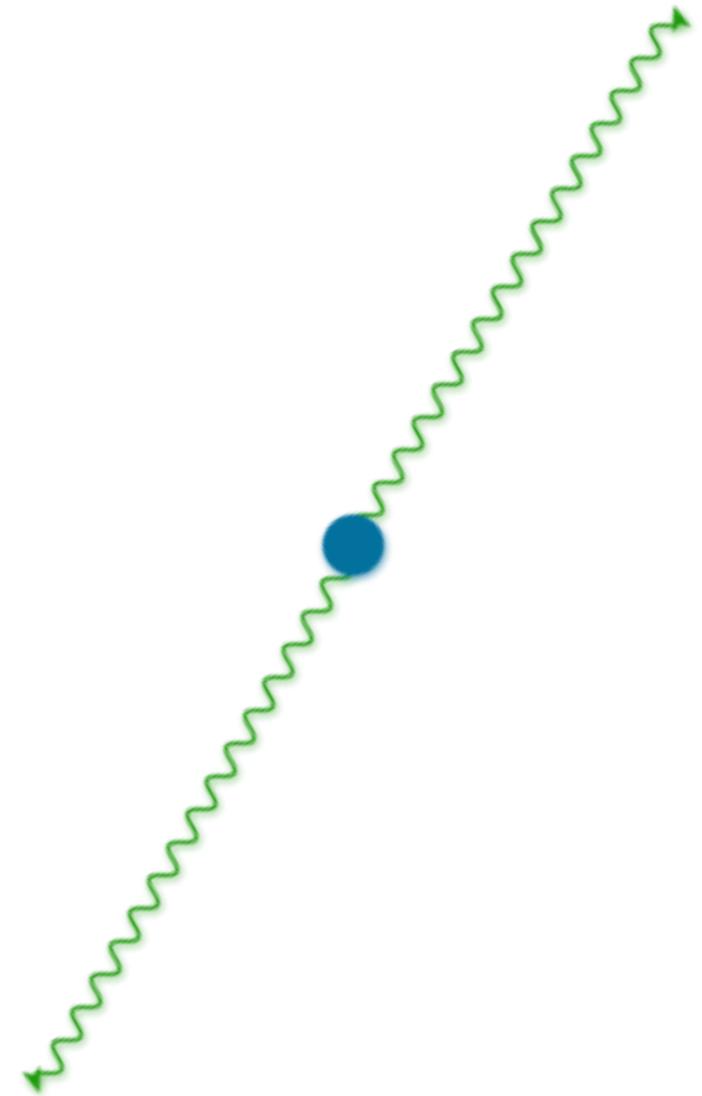
# オルソポジトロニウムの崩壊

- ・ 荷電共役対称性から、  
奇数個の $\gamma$ 線に崩壊
- ・ 寿命は 142 ns
- ・ 1個の $\gamma$ 線への崩壊は  
エネルギー-運動量保存則から  
不可能

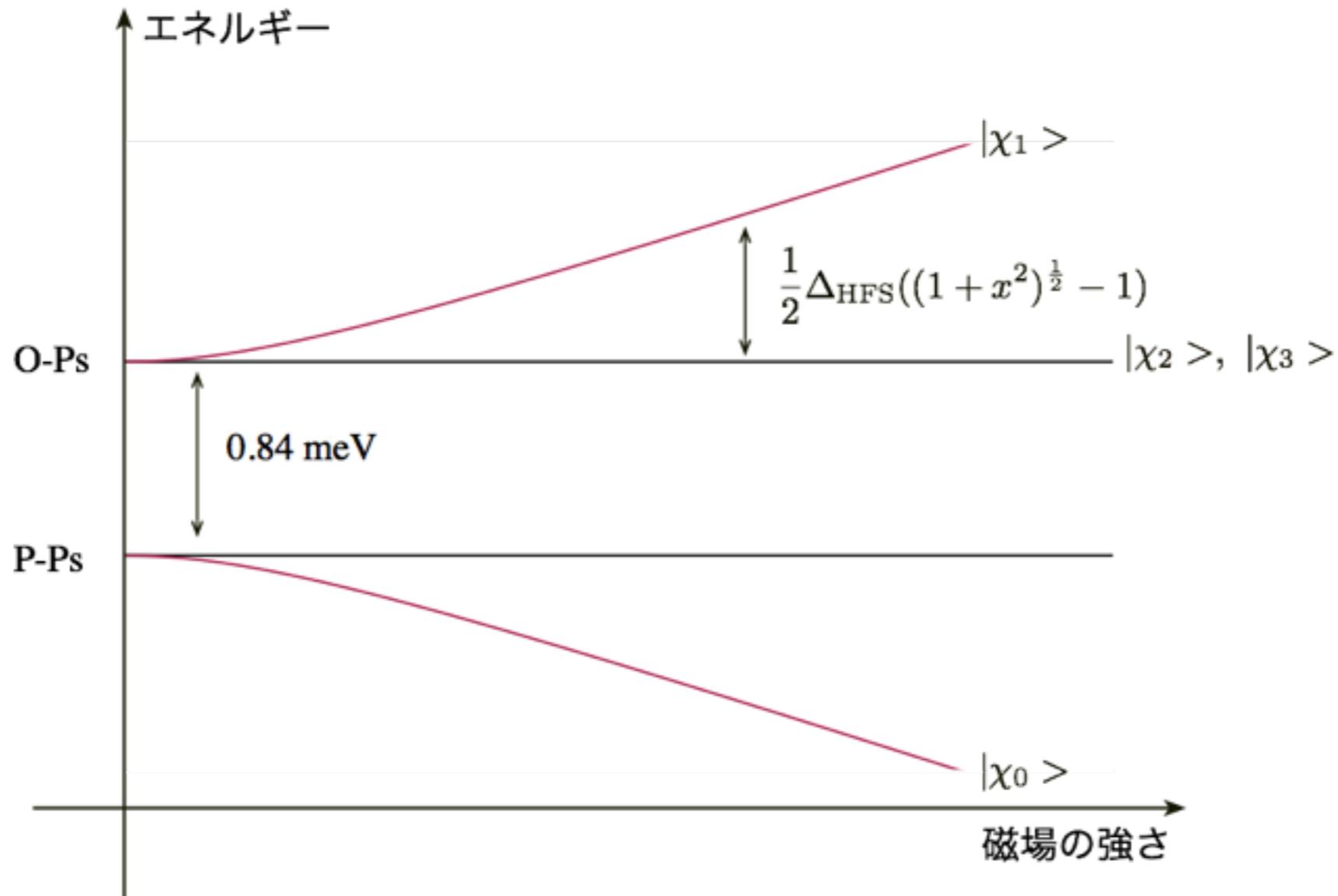


# パラポジトロニウムの崩壊

- ・ 荷電共役対称性から、  
偶数個の $\gamma$ 線に崩壊
- ・ 寿命は 0.125 ns
- ・ 寿命はオルソポジトロニウム  
よりも非常に短い

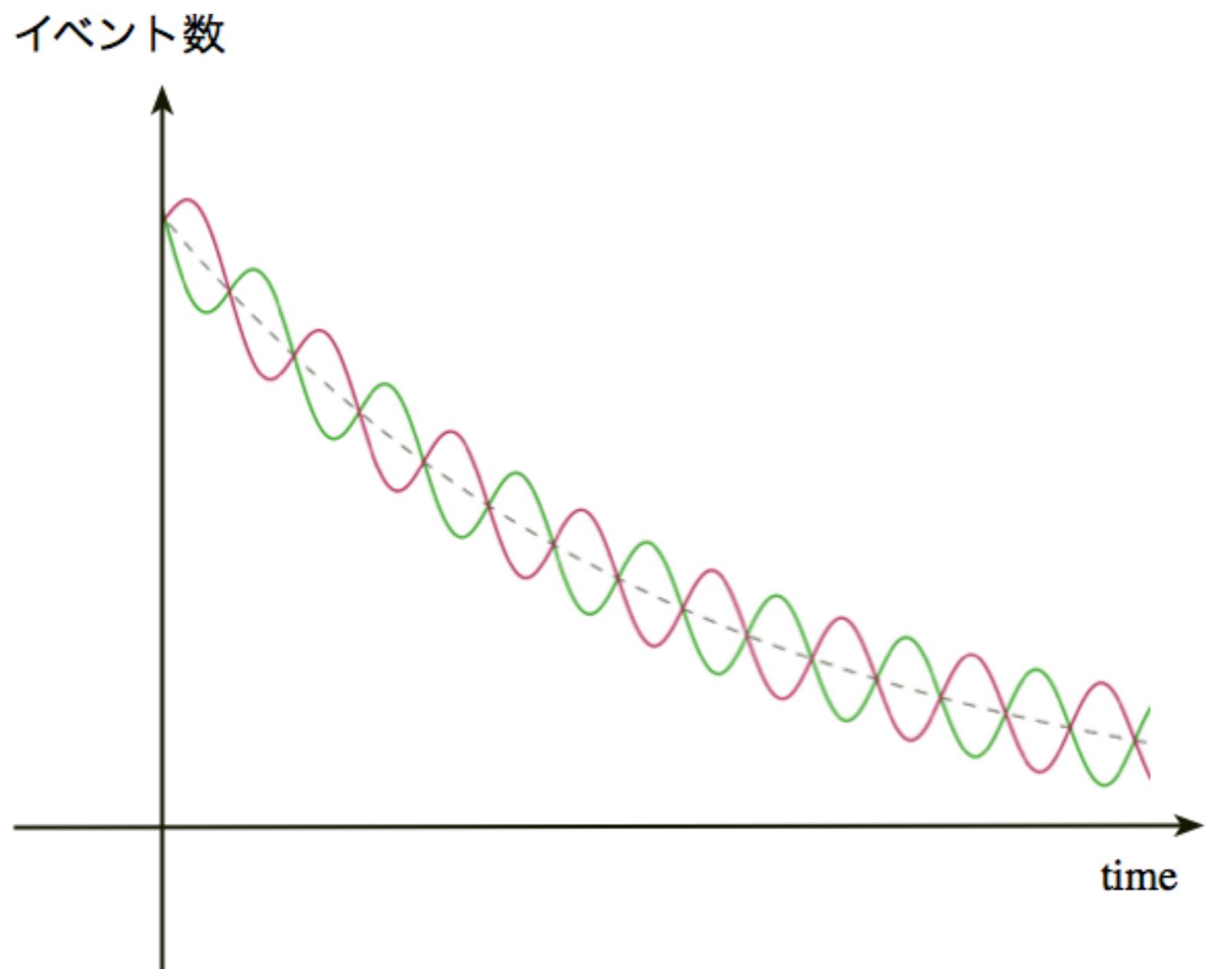


# 磁場の効果

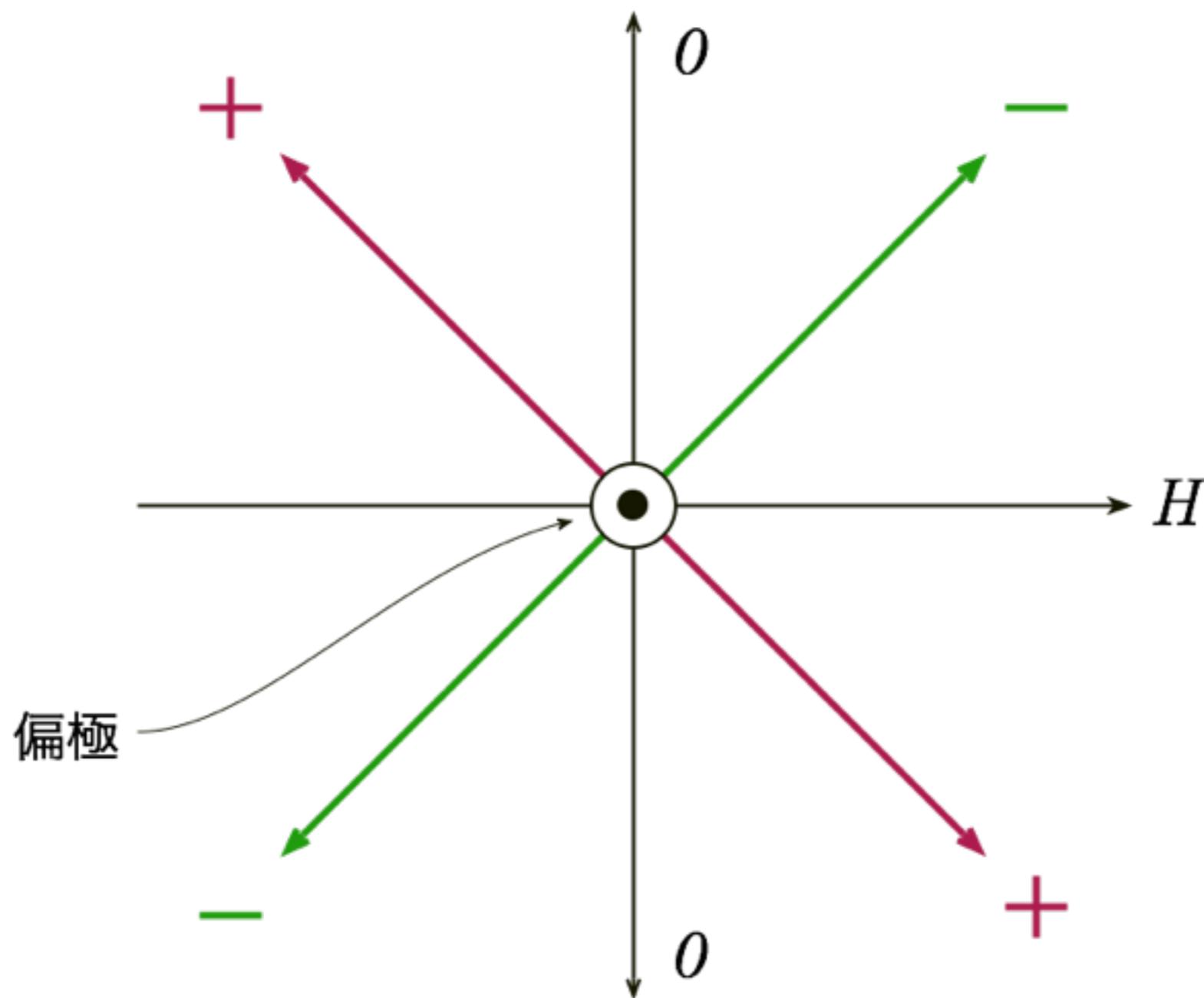


エネルギーのZeemanシフト

# 崩壊曲線の振動



# 崩壊曲線の振動

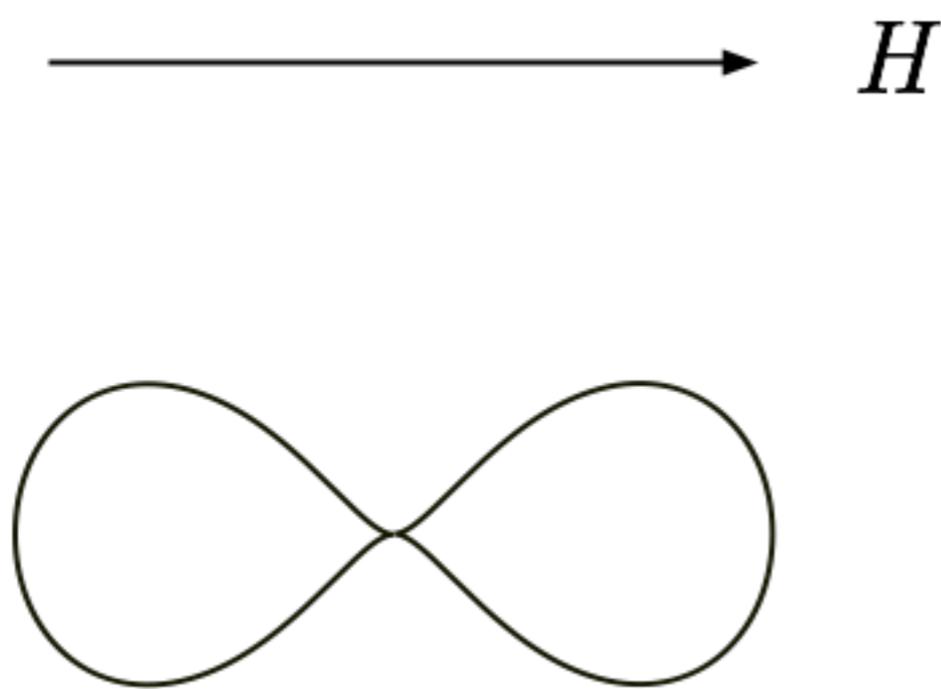


# なぜ振動するのか | 時間

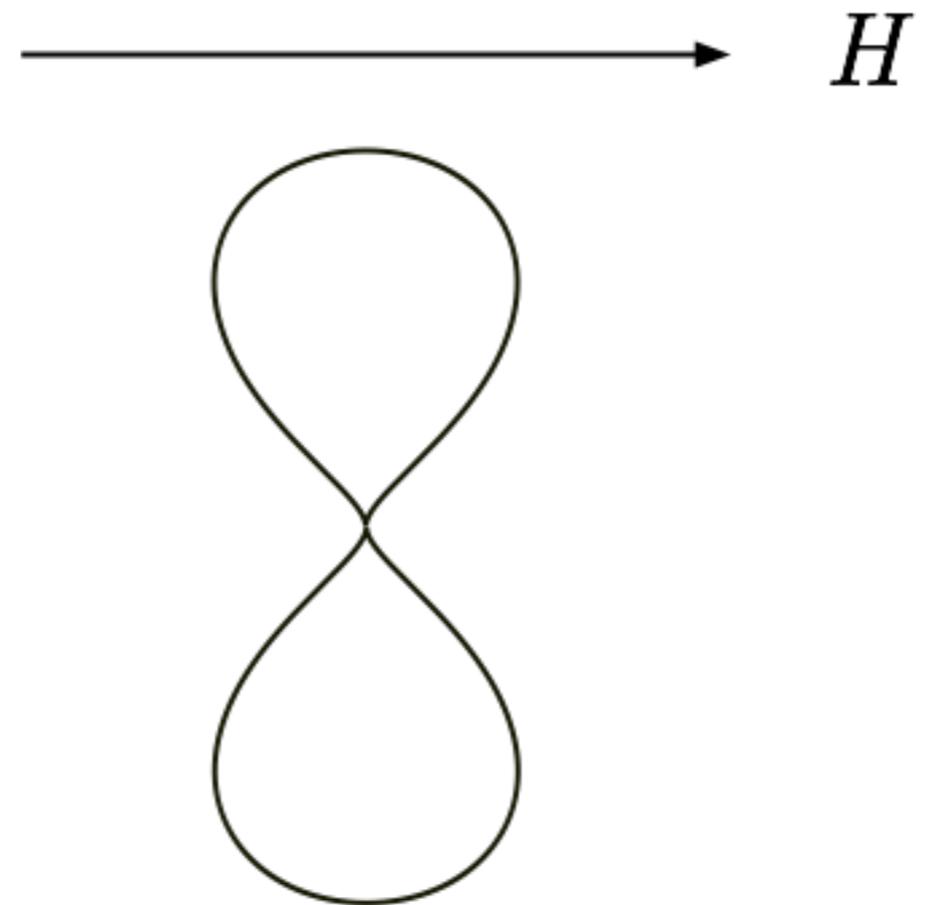
$$\begin{aligned}M(t) &= M_0 e^{-i\epsilon_0 t} + M_1 e^{-i\epsilon_1 t} + M_2 e^{-i\epsilon_2 t} \\|M(t)|^2 &= |M_0|^2 + |M_1|^2 + |M_2|^2 \\&\quad + M_0^* M_2 e^{i(\epsilon_0 - \epsilon_2)t} \\&\quad + M_0^* M_1 e^{i(\epsilon_0 - \epsilon_1)t} \\&\quad + M_2^* M_1 e^{i(\epsilon_2 - \epsilon_1)t} \\&\quad + \dots\end{aligned}$$

重ねあわせによる干渉が原因

# なぜ振動するのか | 角度

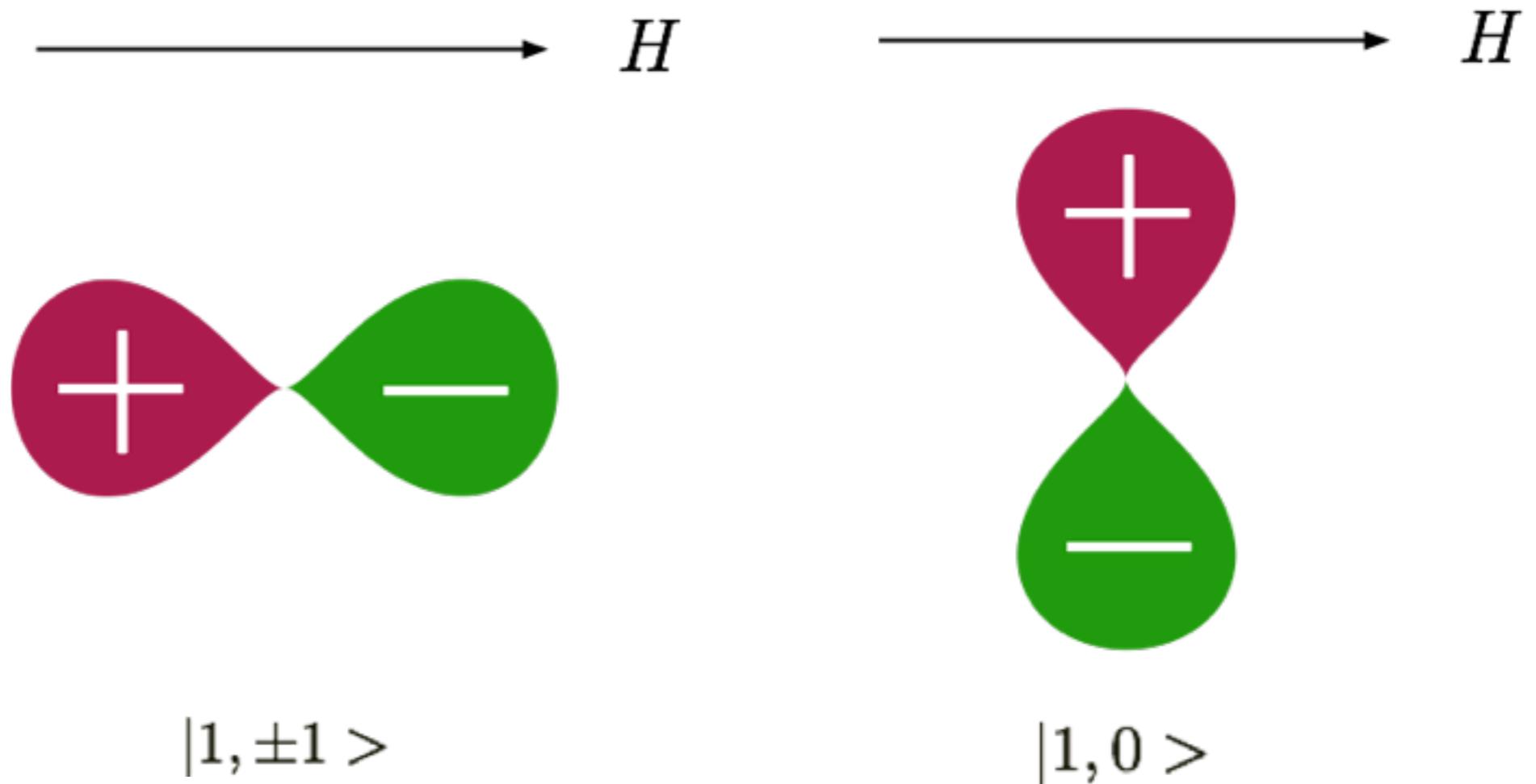


$|1, \pm 1 \rangle$



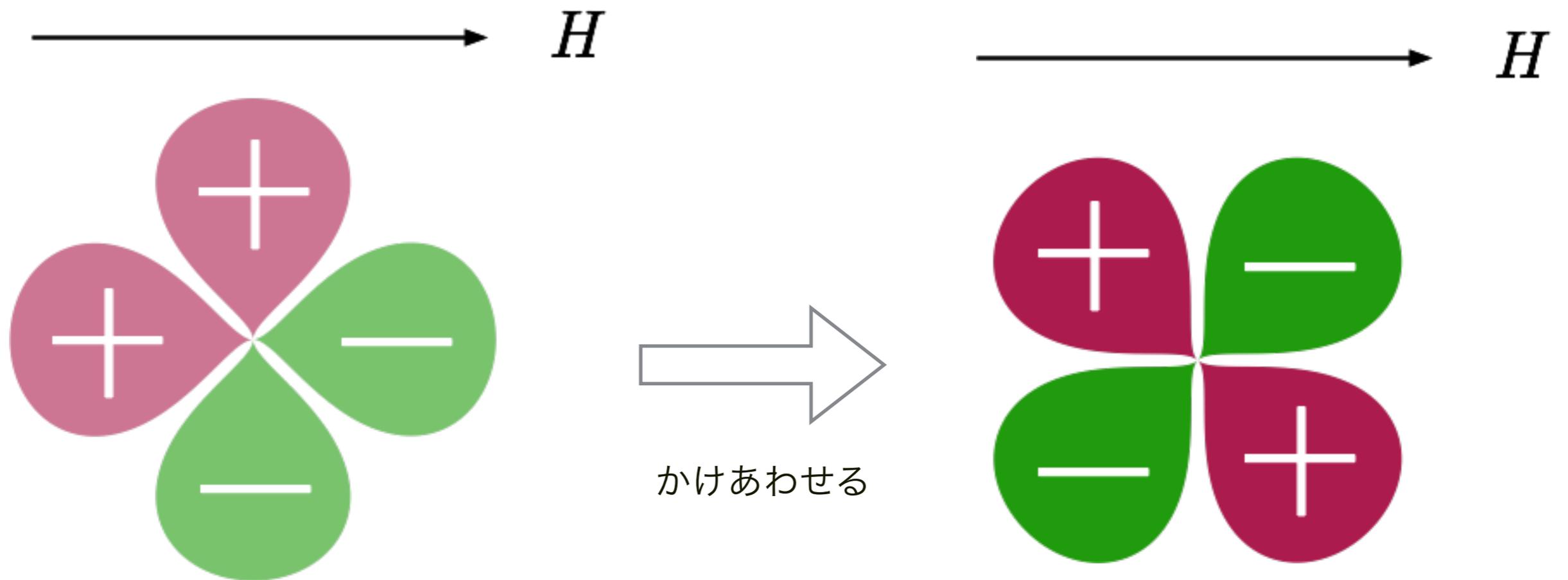
$|1, 0 \rangle$

# なぜ振動するのか | 角度



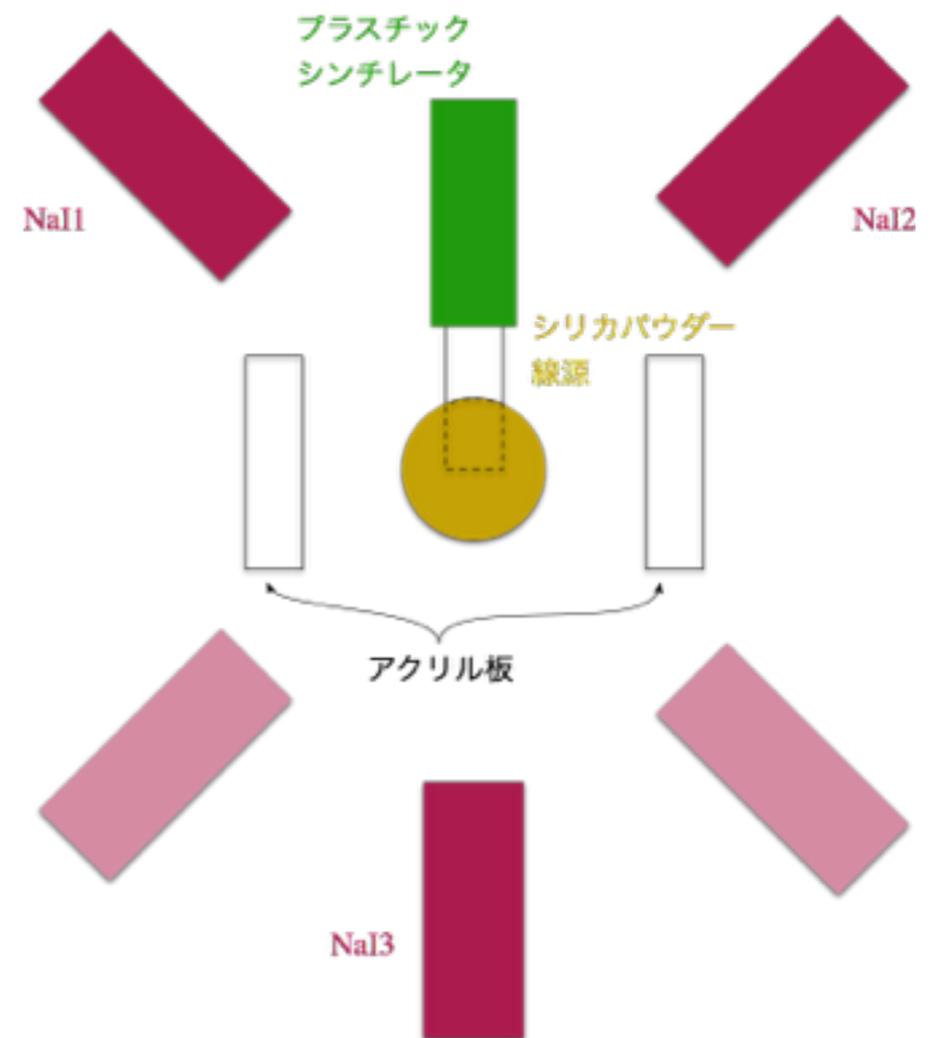
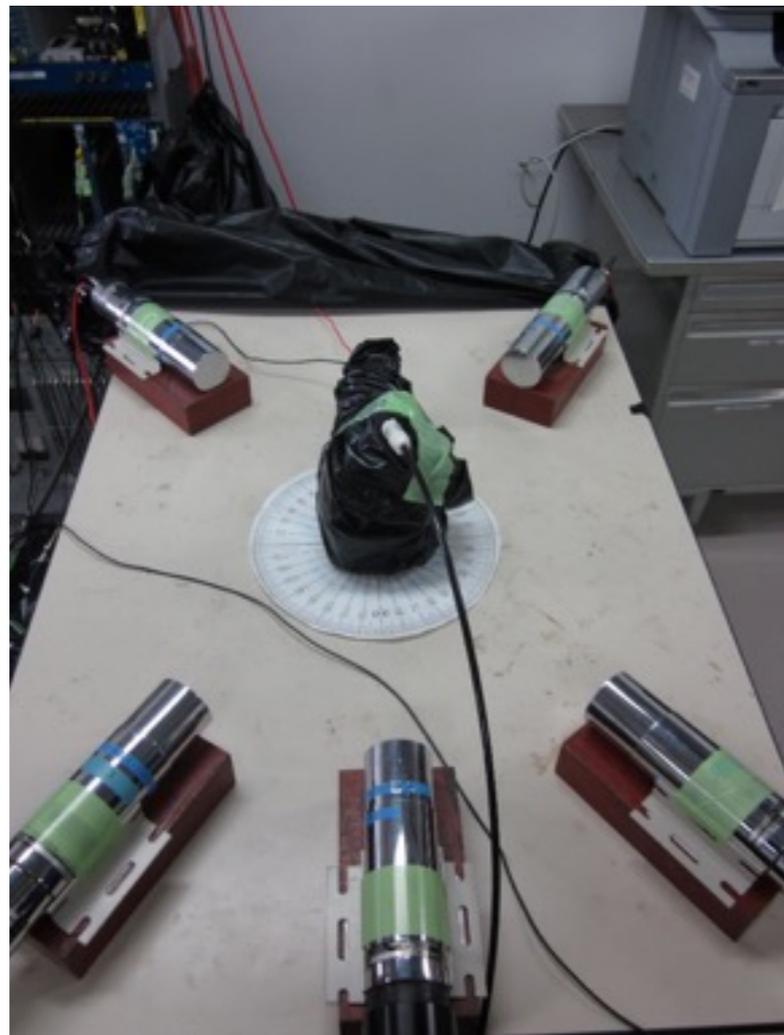
電子と陽電子の内部パリティの違い

# なぜ振動するのか | 角度

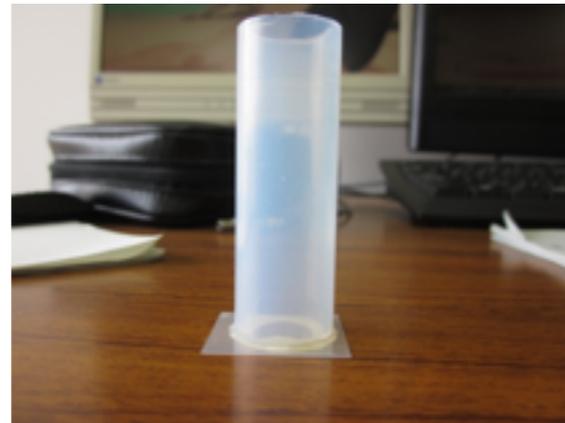
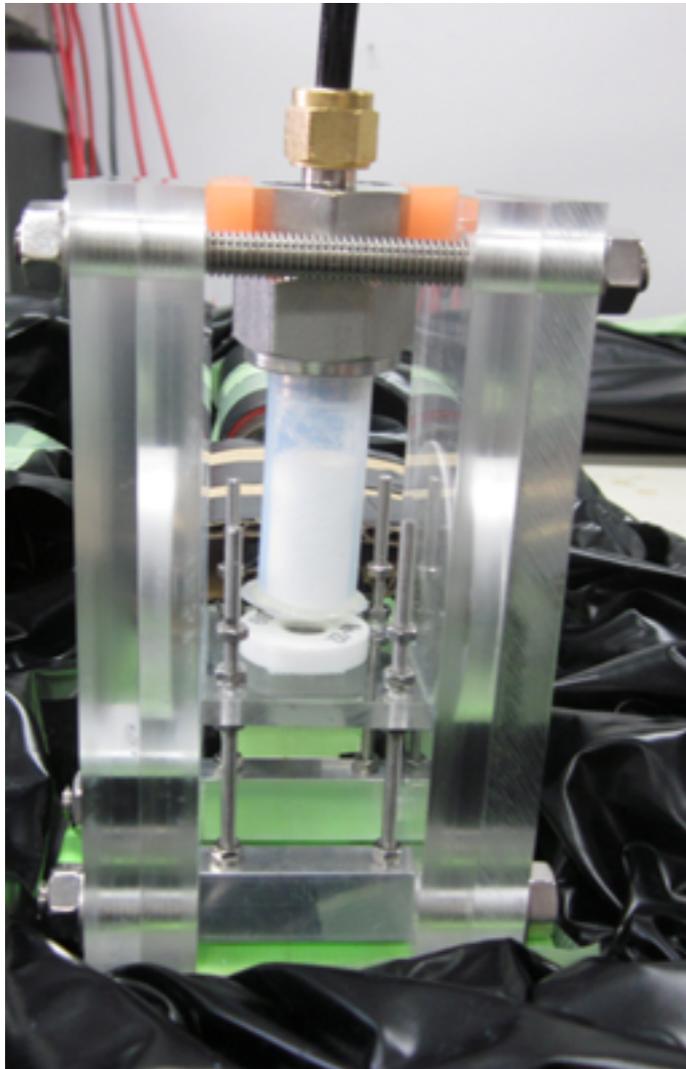


# 装置・回路

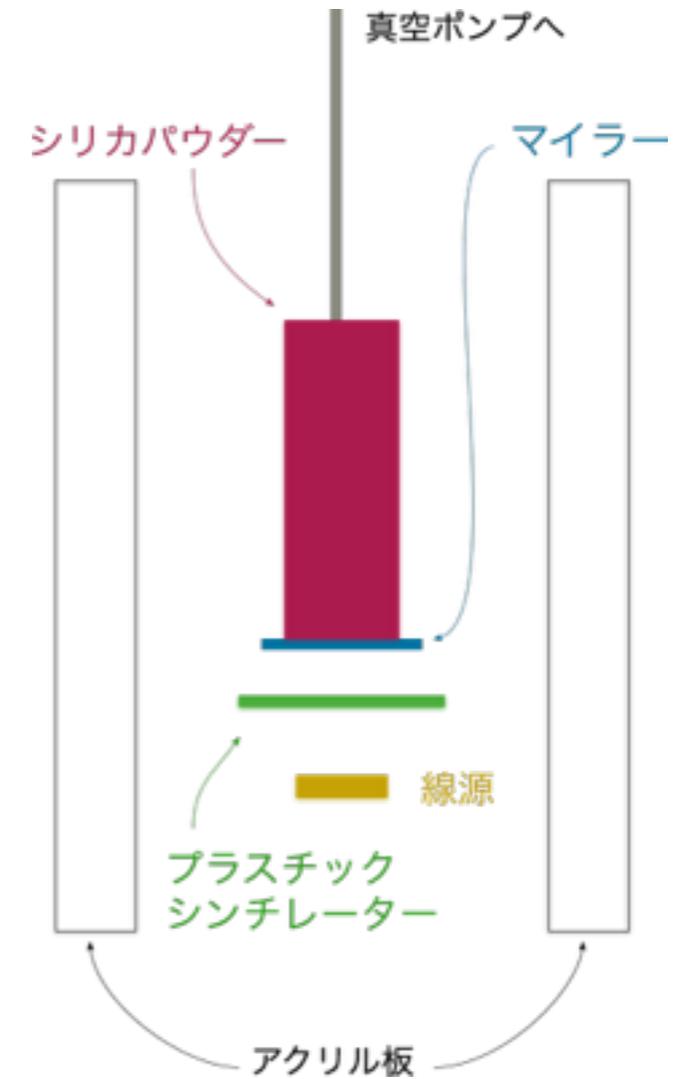
# 外観



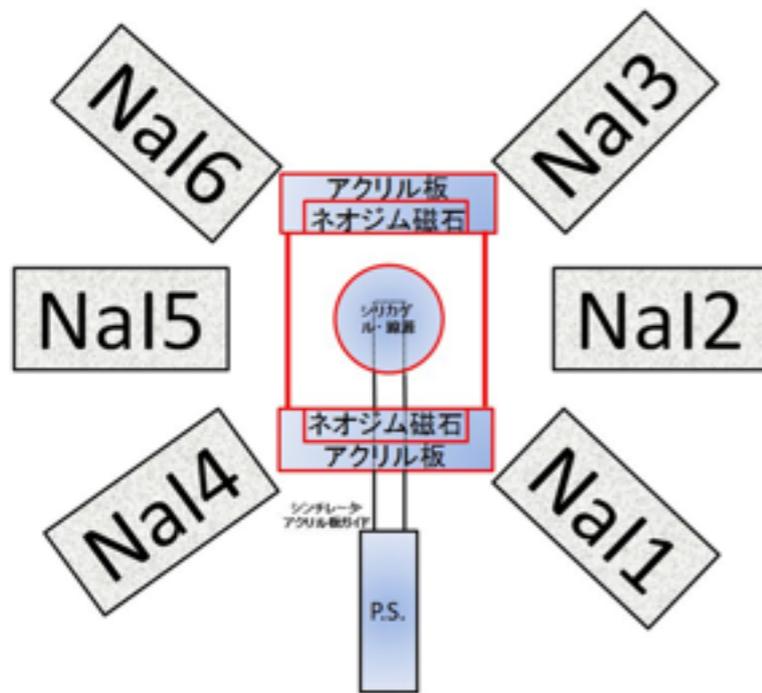
# 装置



シリカ容器は真空チューブで直接真空を引いており、上部で固定し吊られている。



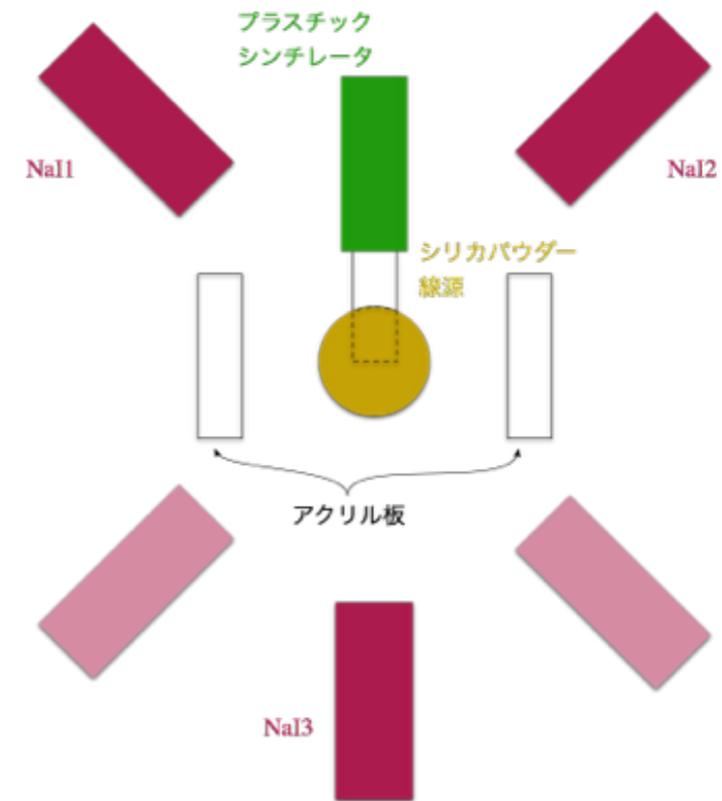
# 前年度との違い | 装置



※前年度P1発表資料より引用

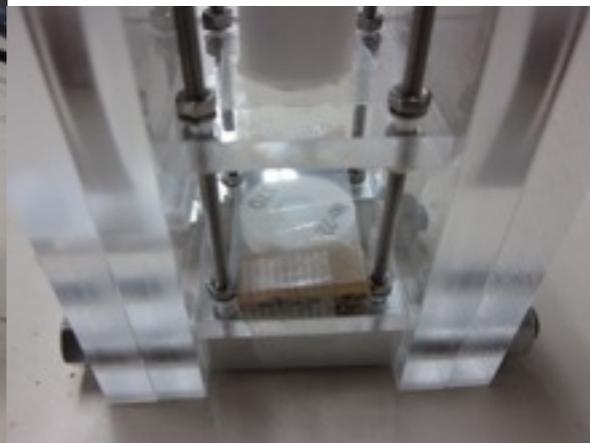
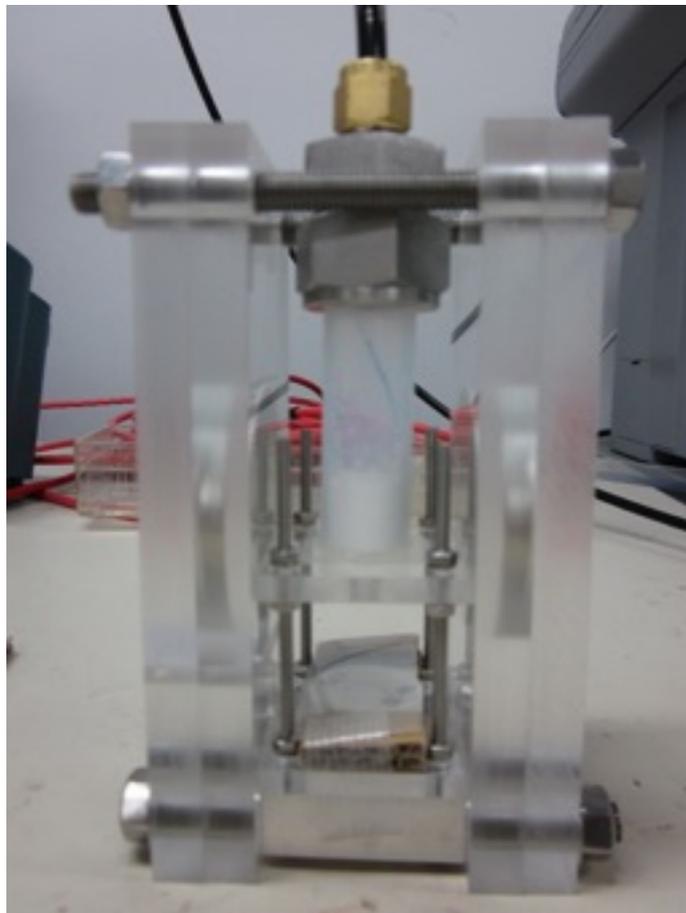
前年度

NaIの本数  
磁場の向き



今年度

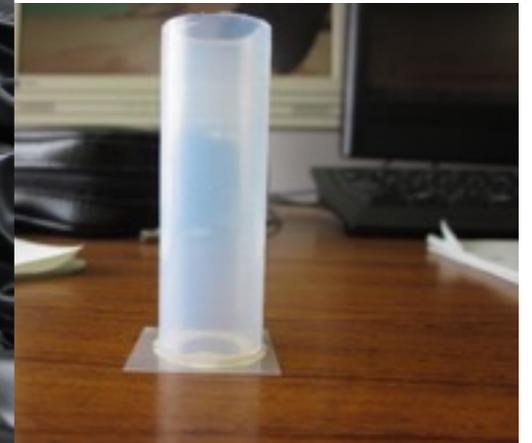
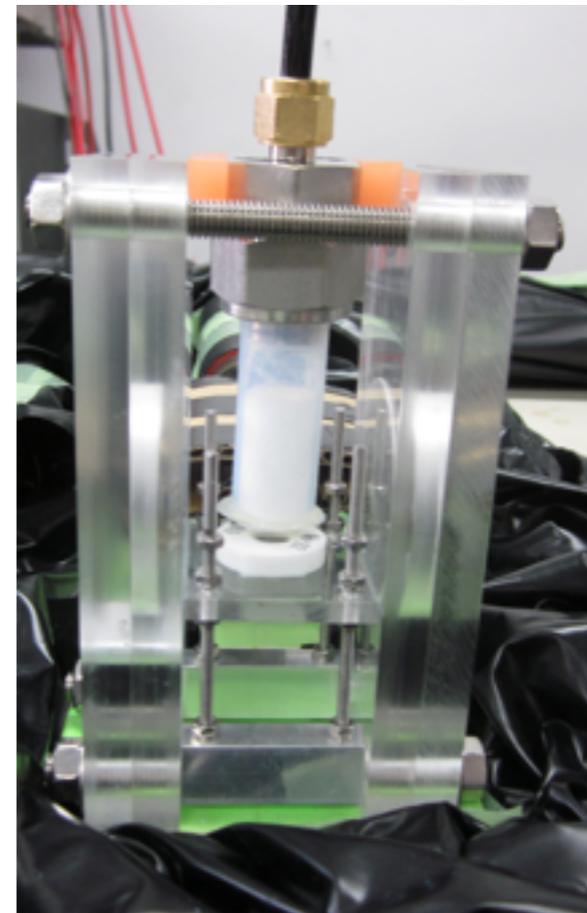
# 前年度との違い | 装置



線源と容器との距離



シリカ容器

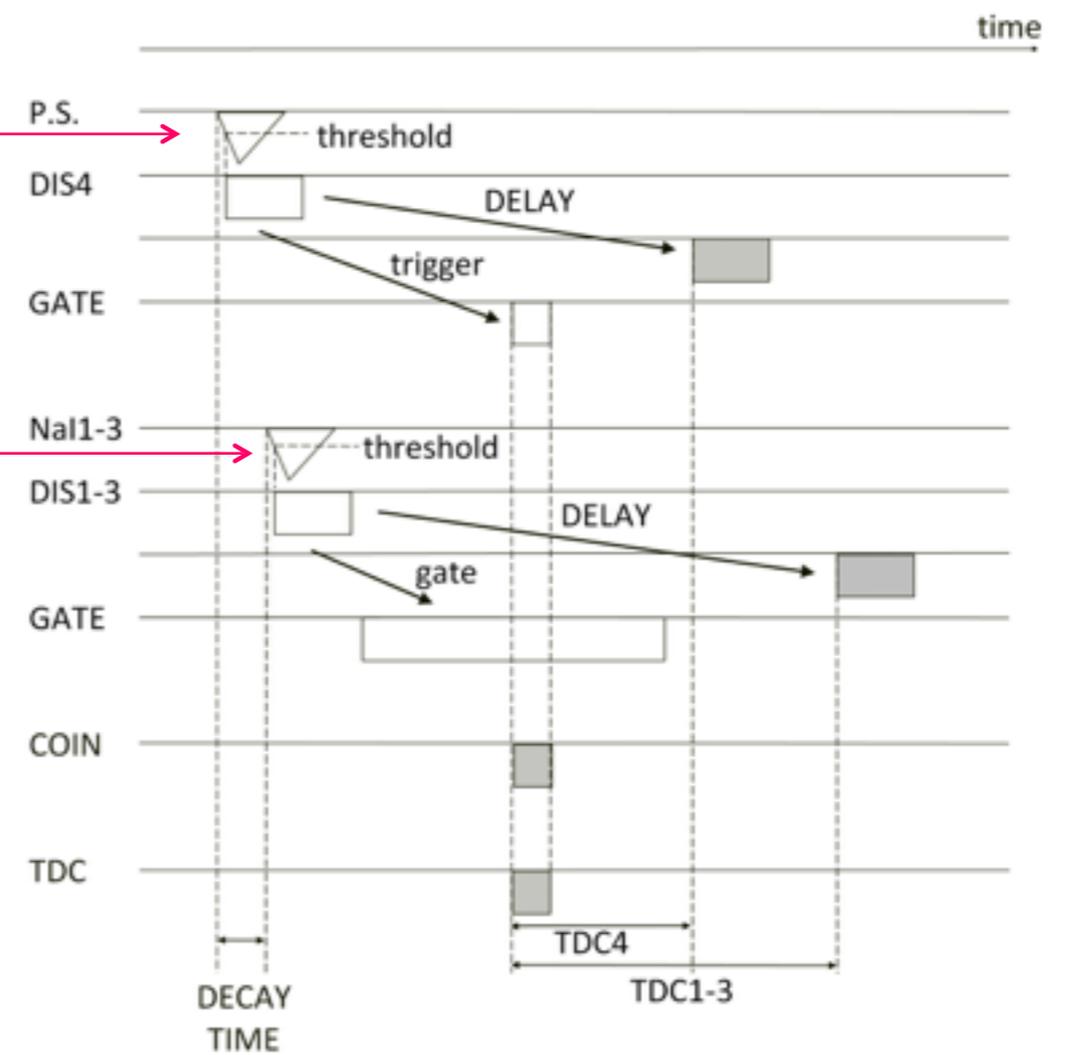
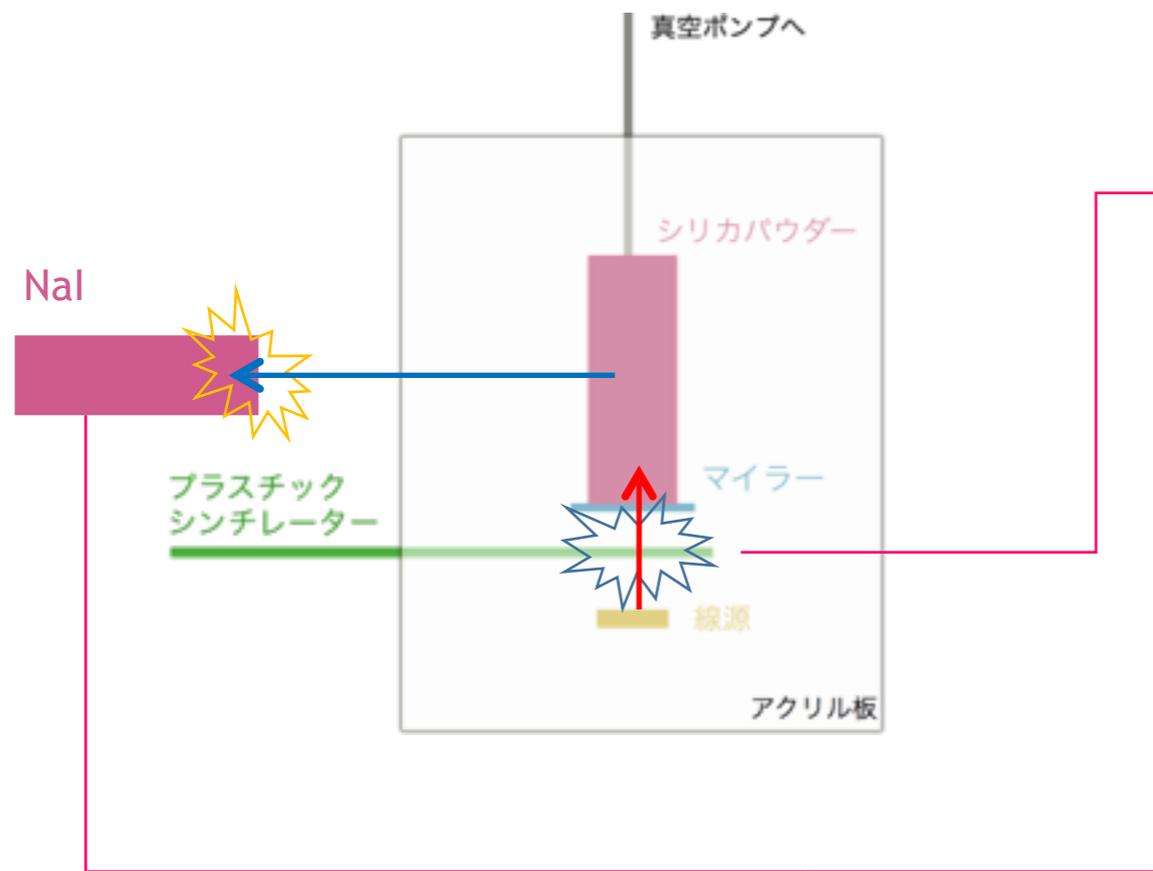


※前年度P1発表資料より引用

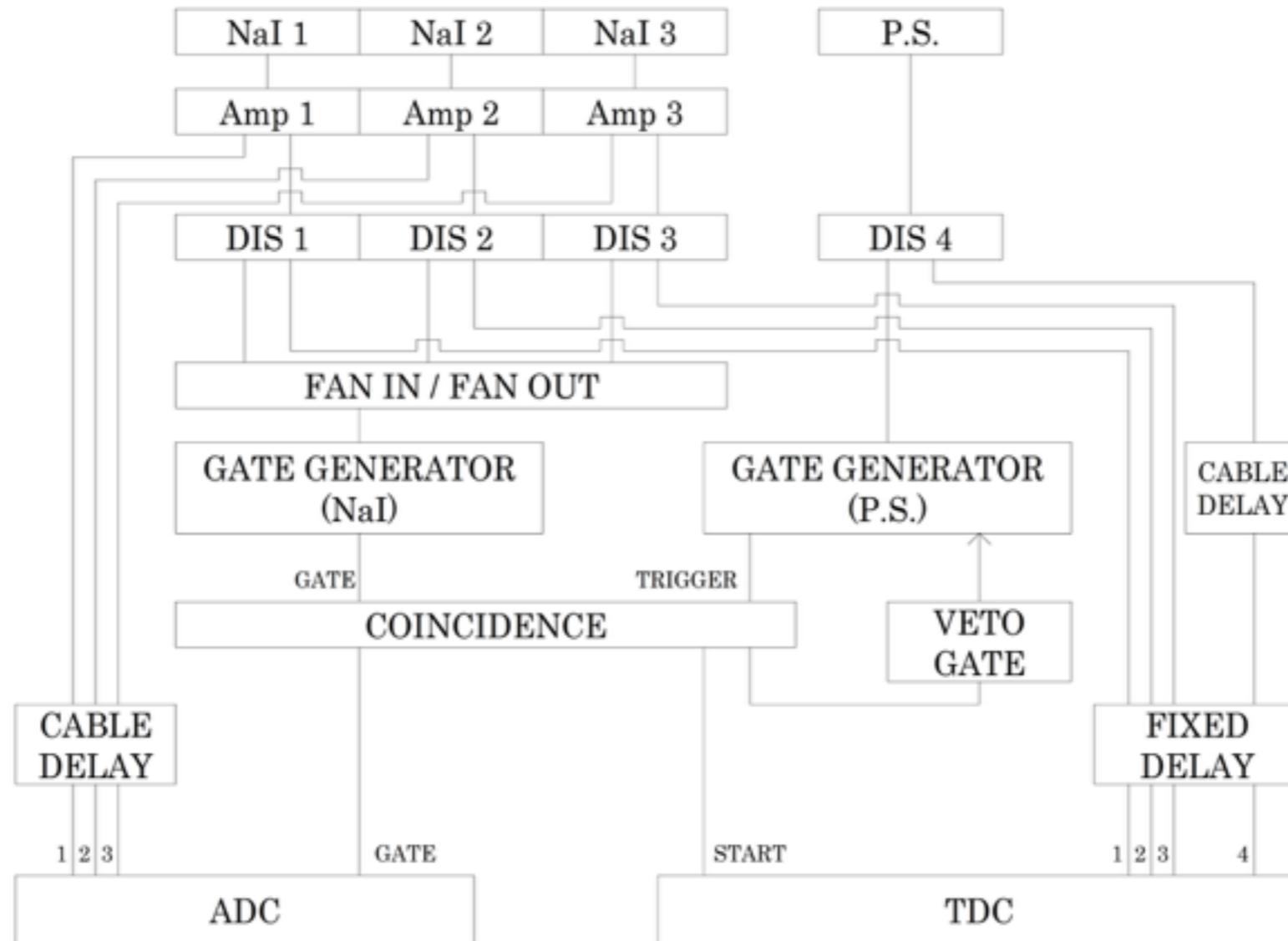
前年度

今年度

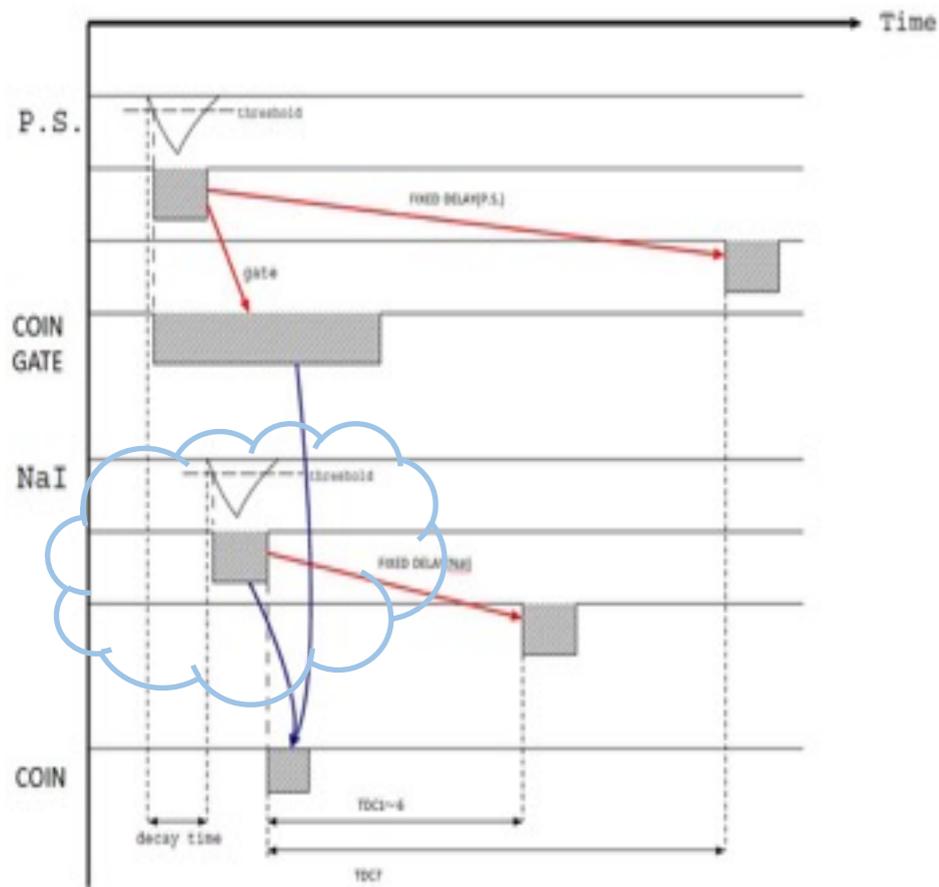
# 信号の時間関係



# 論理回路

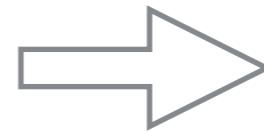


# 前年度との違い | 回路

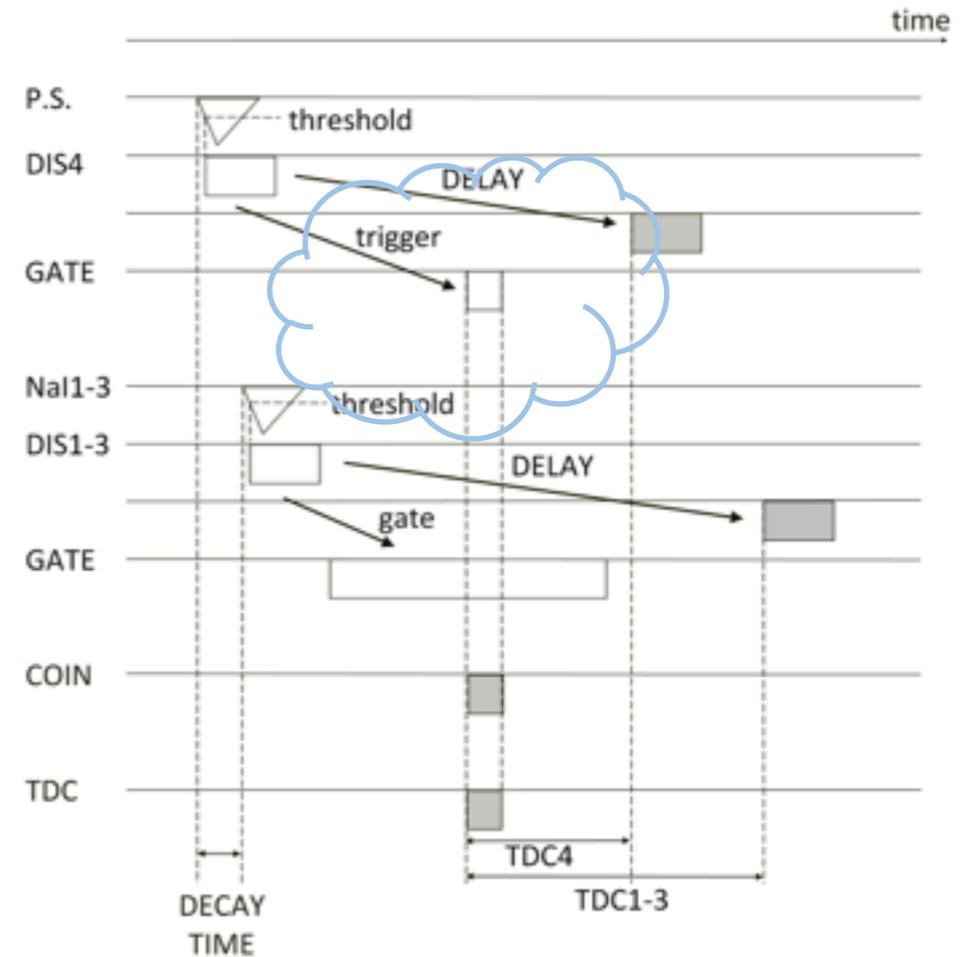


※前年度P1発表資料より引用

前年度



COINCIDENCEの  
トリガー



今年度

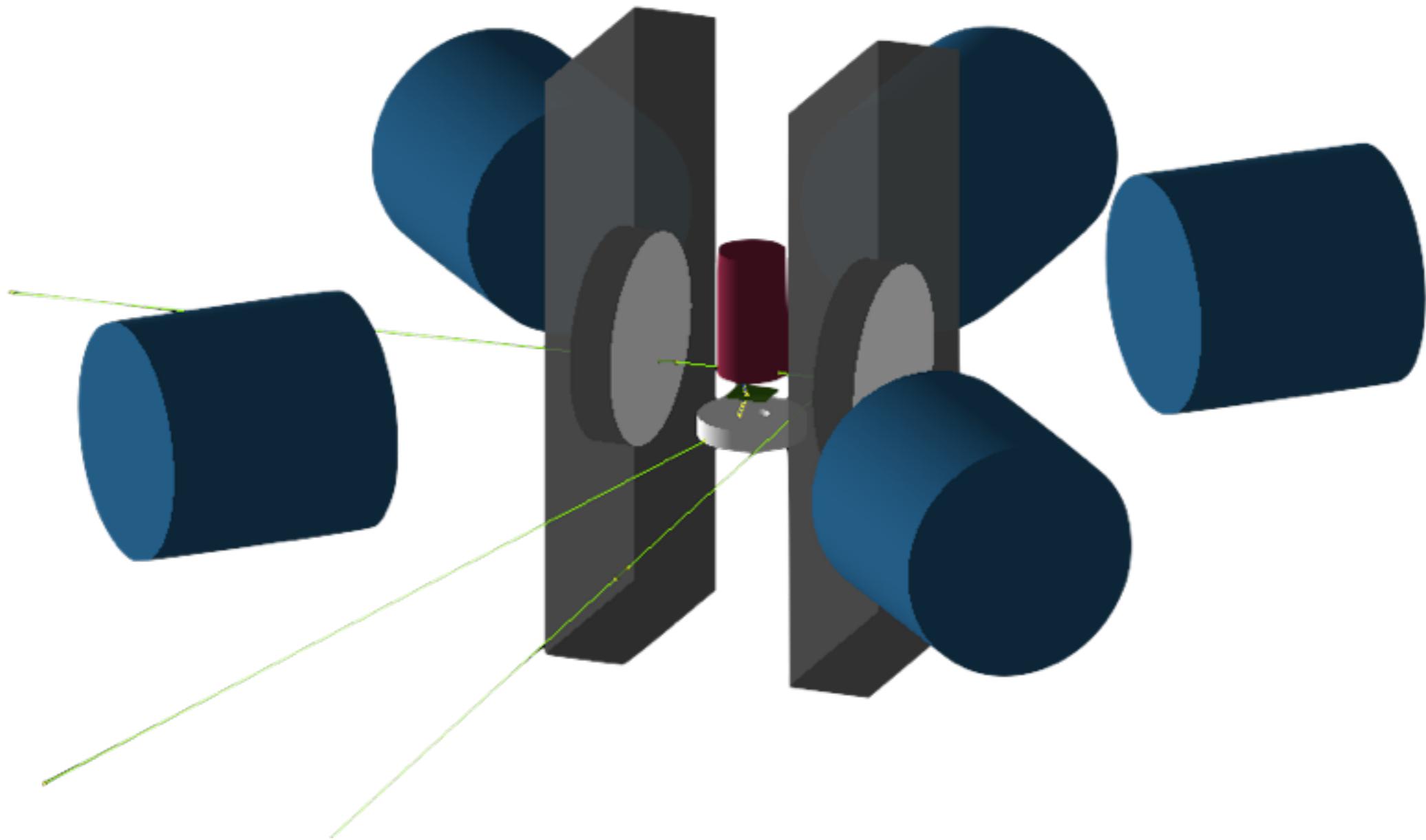
シミュレーション

powered by **Geant 4**

# Geant4について少し

- **Geant4**は粒子と物質の相互作用過程を正確にシミュレートするソフトウェア・パッケージ
- **CERN**などが開発
- 広範なユーザーの要求に耐えうる高い機能と柔軟性を持つ（かわりにすこし取っ付きづらい）

# 例 | 今回の実験のセットアップ

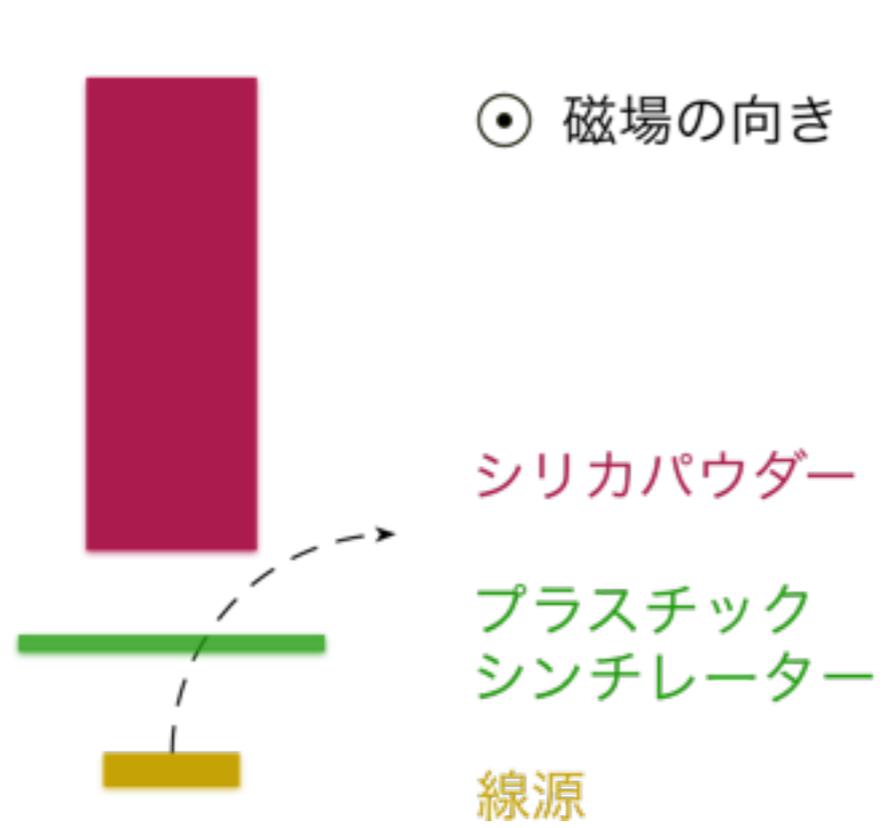


デモ

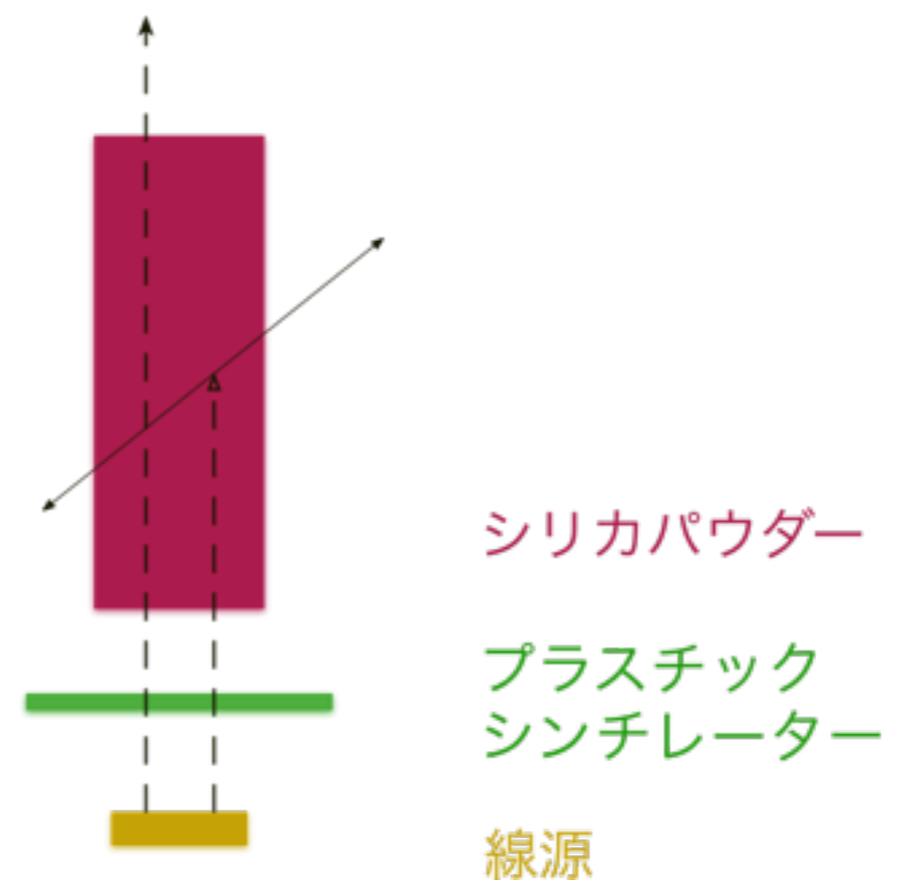
# 現実とちょっと違うこと

- ・ 磁場は2つの磁石の間**だけ**に**一様**に存在する
- ・ ニュートリノは生まれた後は**相互作用しない**
- ・ **ポジトロニウムはできず**、止まった陽電子は2つの $\gamma$ 線に崩壊
- ・ 宇宙線なんかも飛んでこない、など

# シミュレーションで 検証してみたいこと



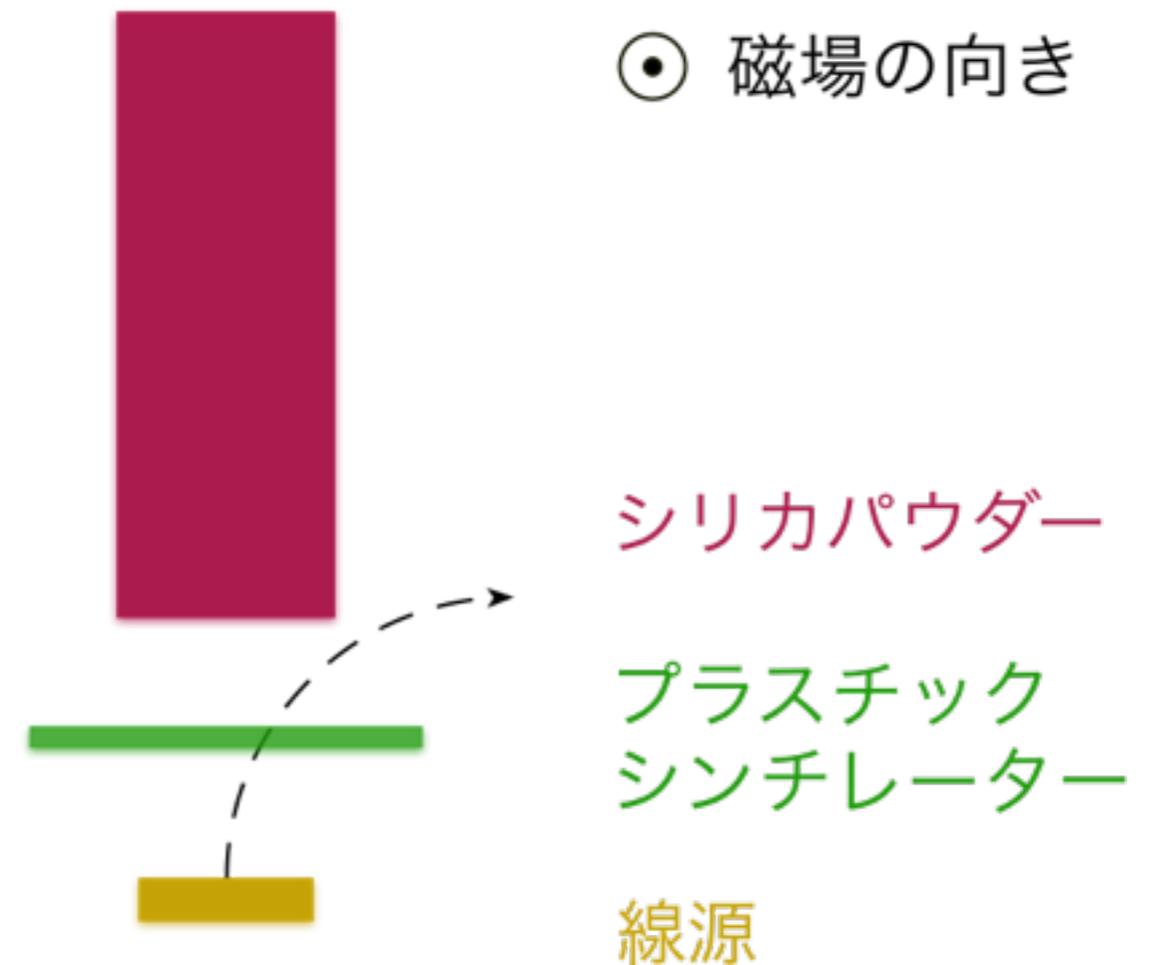
磁場中の陽電子



陽電子のエネルギー

# 検証1 | 磁場中の陽電子

磁場に曲げられてしまい、  
シリカパウダーに到達する  
陽電子が減少することで  
イベントレートが  
低下してしまうのでは？



# 検証1 | 磁場中の陽電子

- ・ 磁場がある場合と磁場がない場合でシミュレーションの結果を比べてみる
- ・ 線源の崩壊する回数を同じにして、そのうちのいくつかがプラスチックシンチレータを通過して、さらにシリカパウダーで止まっているか調べる

$\gamma$ 線が磁気モーメントを持っています

# 検証1 | 磁場中の陽電子

```
$ ./p1_simulation 10,000,000
```

```
#{good events} :      30,543
```

磁場なしの場合

```
$ ./p1_simulation 10,000,000
```

```
#{good events} :      28,958
```

磁場ありの場合

good event

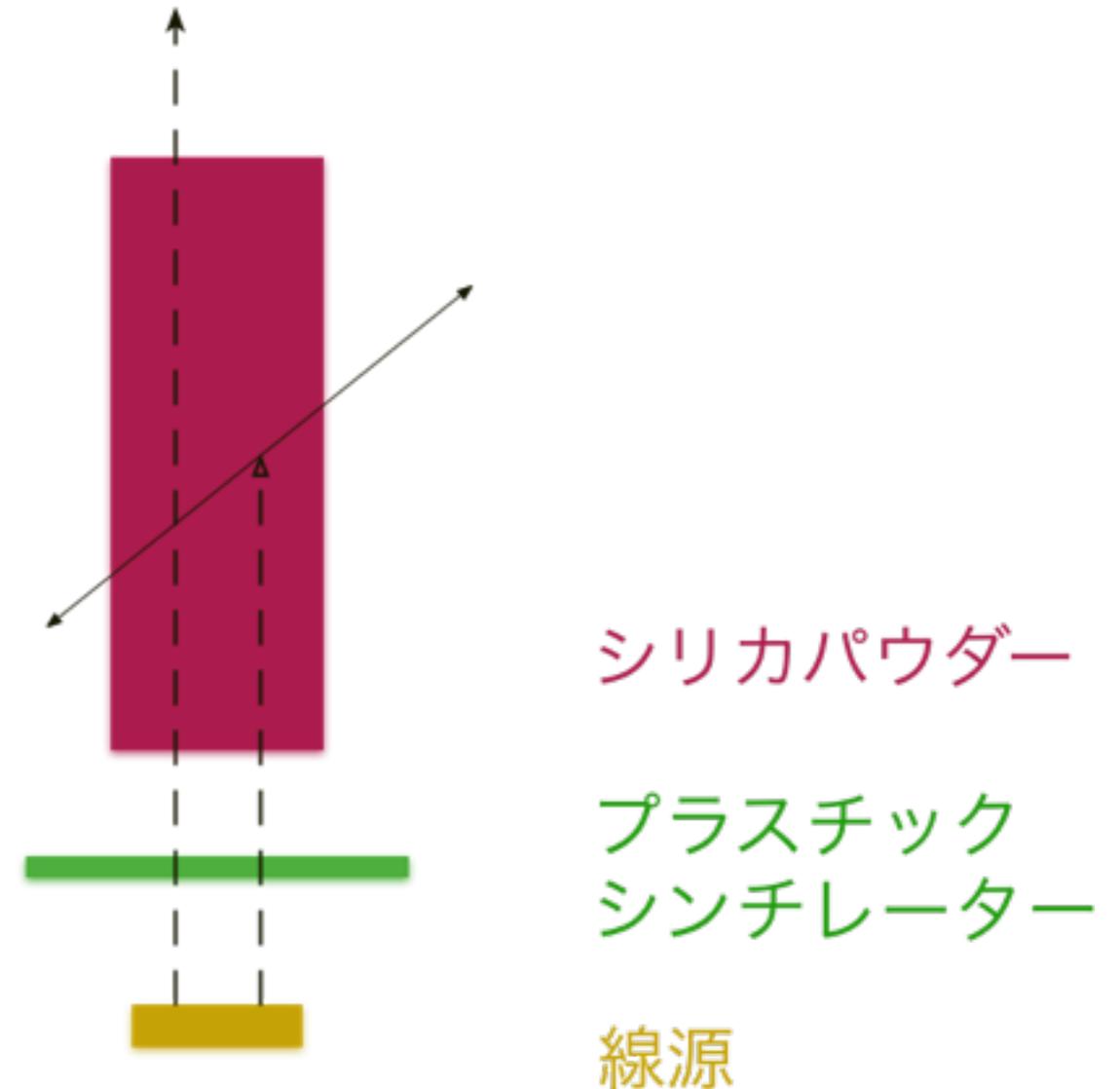
陽電子がプラスチックシンチレータを通過して、シリカパウダーで止まったイベント

結果

これが原因で実験に失敗する、ということはない

# 検証2 | 陽電子のエネルギー

偏極が陽電子のエネルギーで決まっているので、高いエネルギーの陽電子もシリカパウダーで止めたいが、このセットアップで十分か？

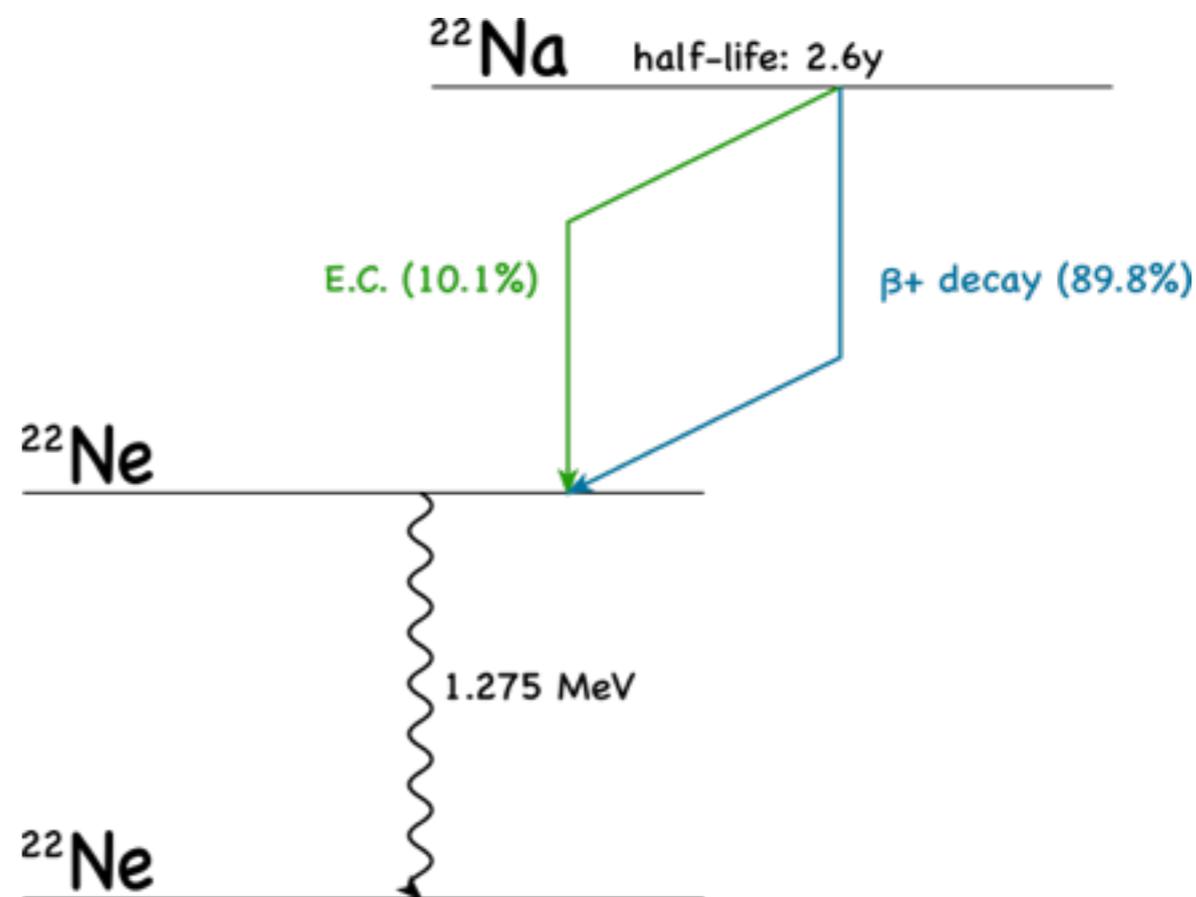


# 検証2 | 陽電子のエネルギー

- ・ 「検証1」の「**磁場あり**」の場合と同じ  
セットアップでシミュレーション
- ・ 線源の崩壊で生まれた陽電子が持てるエネルギーの  
最大値は 546 keV なので、ここでは **400 keV 以上**  
の運動エネルギー持つ陽電子は**エネルギーが高い**  
ものとみなす

# 検証2 | 陽電子のエネルギー

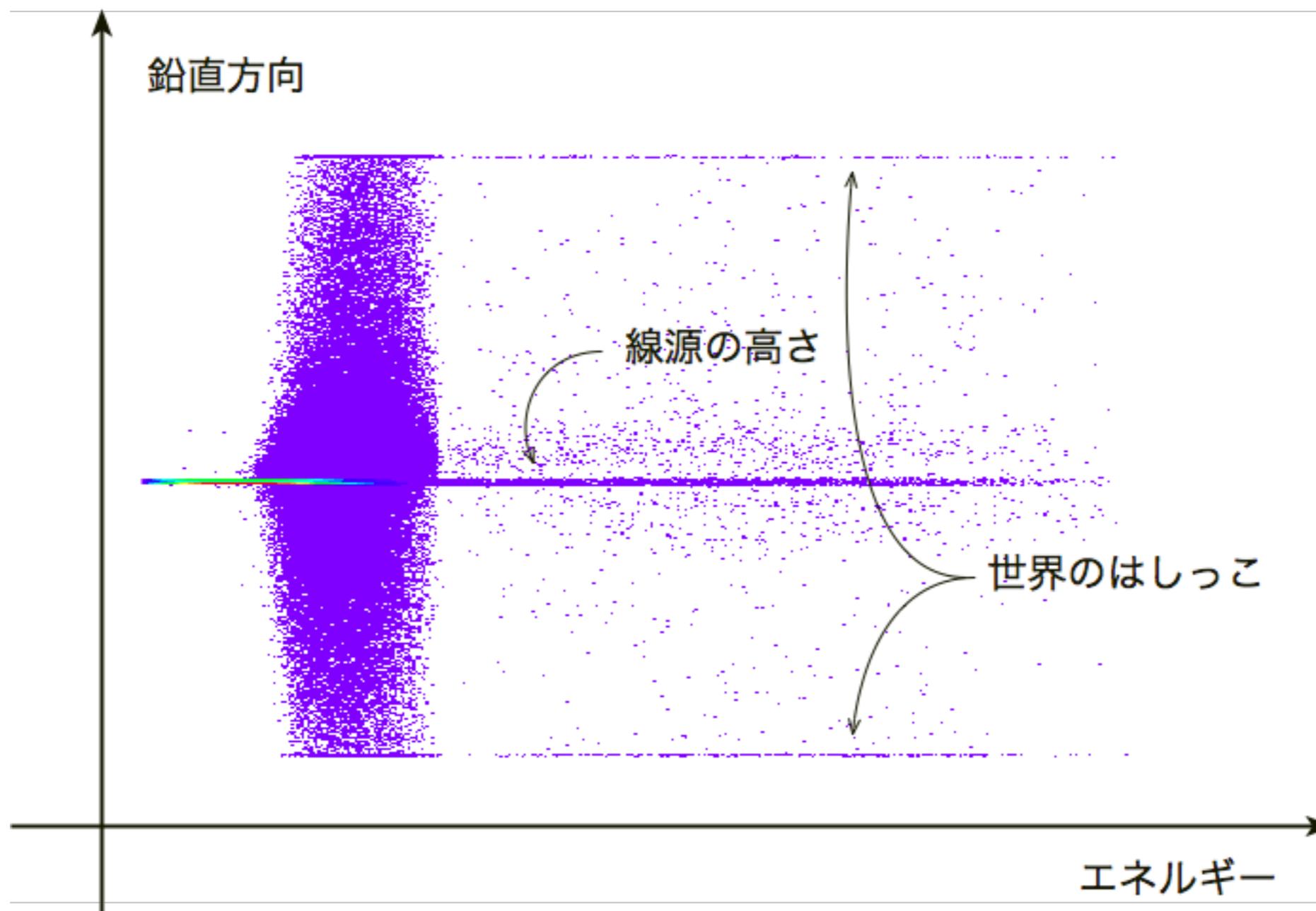
```
$ ./p1_simulation 10,000,000
#{decay events}: 10,000,000
#{beta decay} : 9,029,305
#{E.C.} : 970,695
#{good events} : 28,958
```



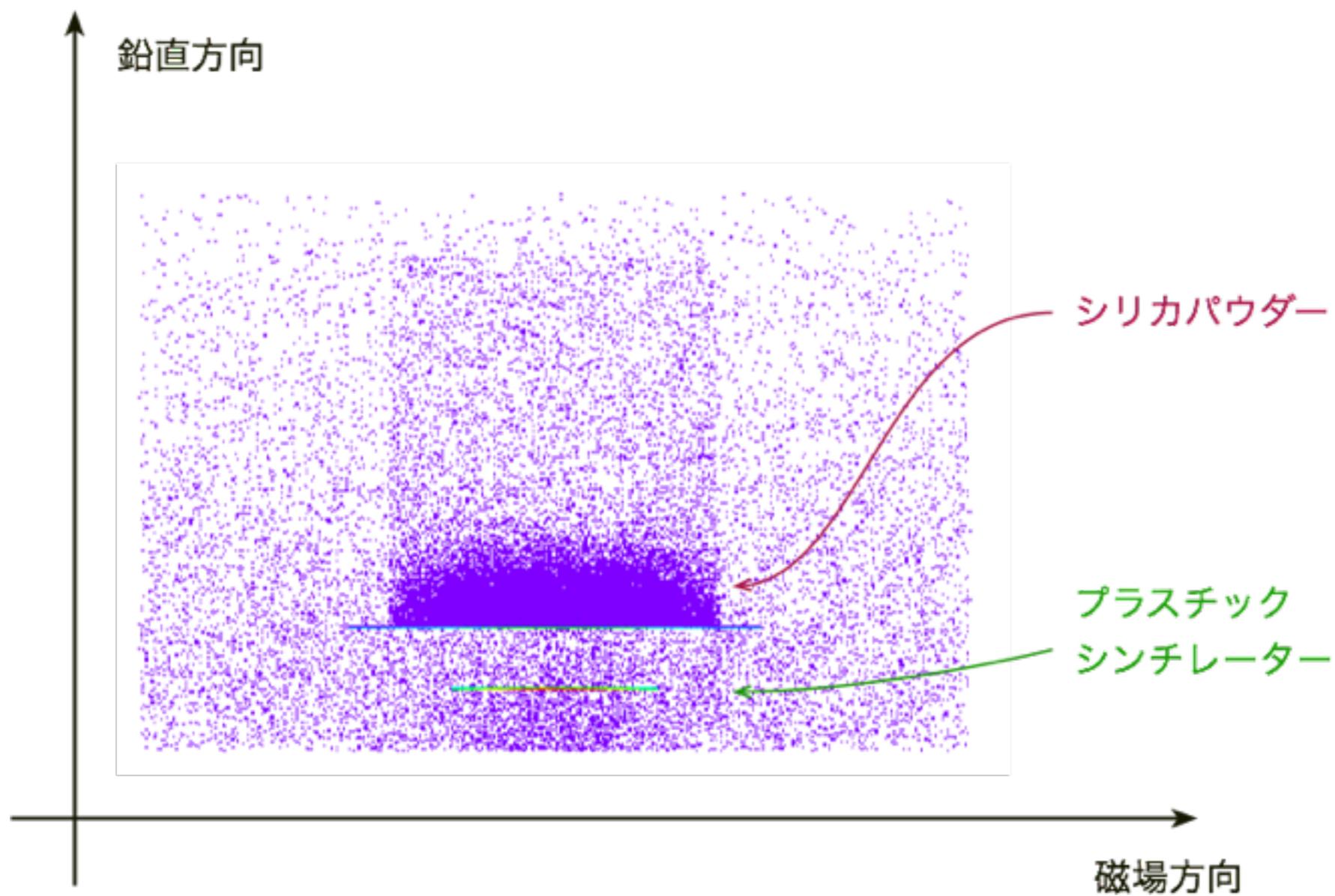
good event

陽電子がプラスチックシンチレータを通過して、シリカパウダーで止まったイベント

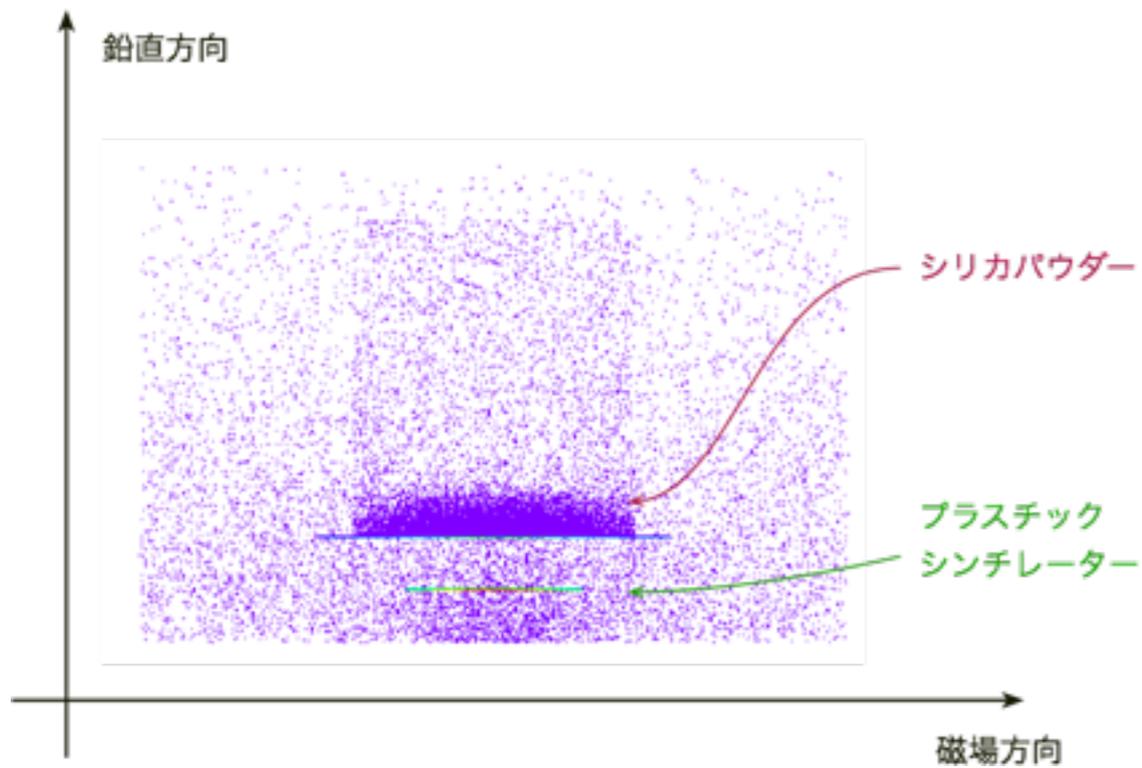
# 検証2 | 陽電子のエネルギー



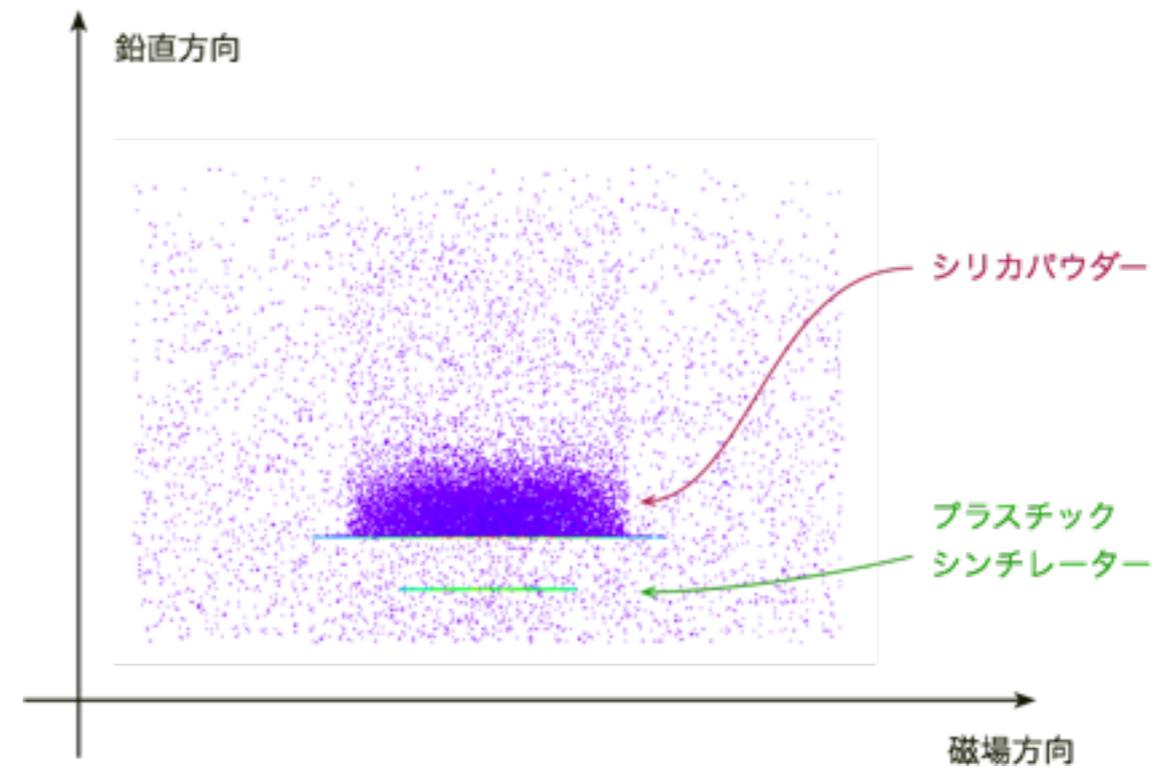
# 検証2 | 陽電子のエネルギー



# 検証2 | 陽電子のエネルギー

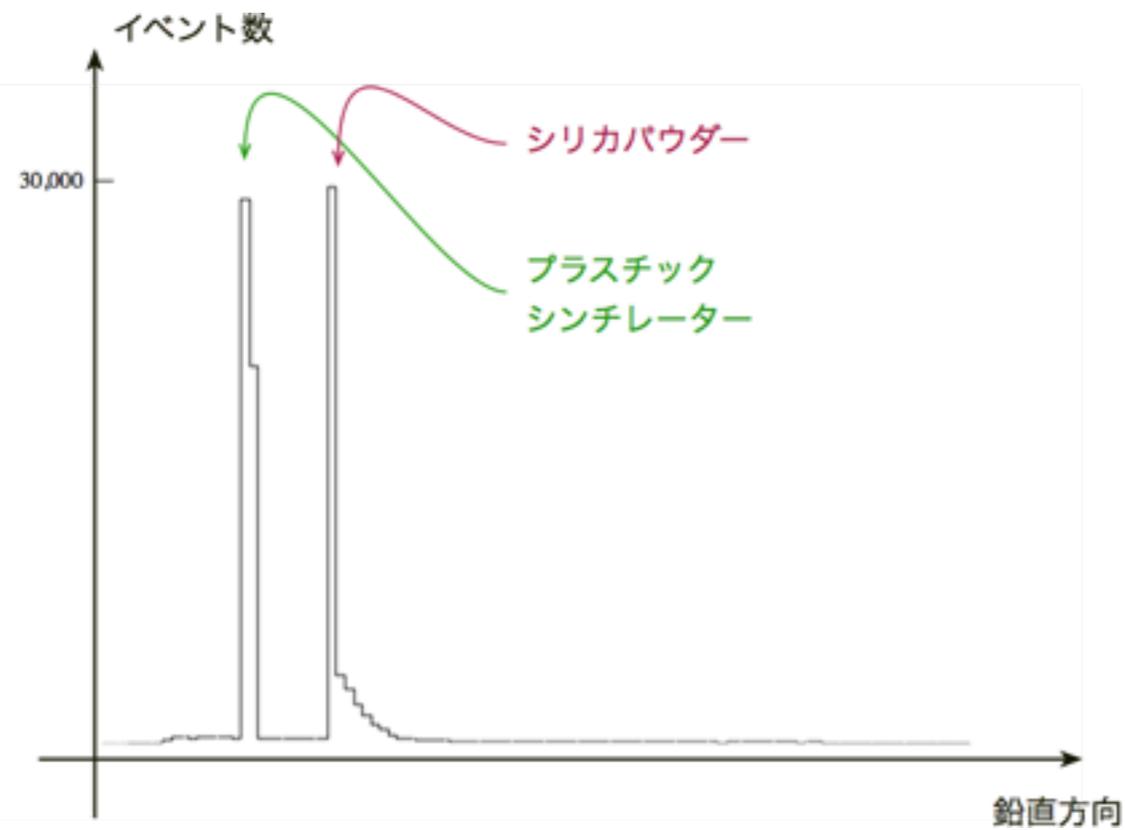


400 keV 未満

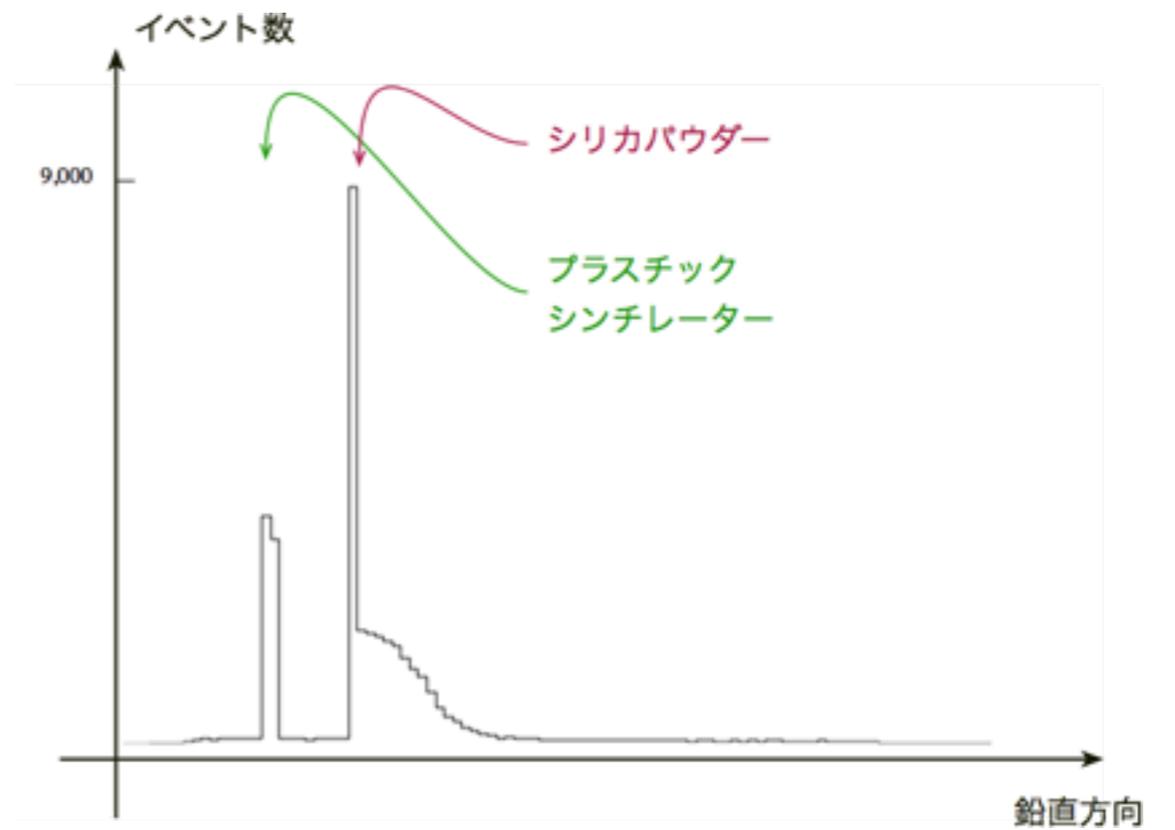


400 keV 以上

# 検証2 | 陽電子のエネルギー



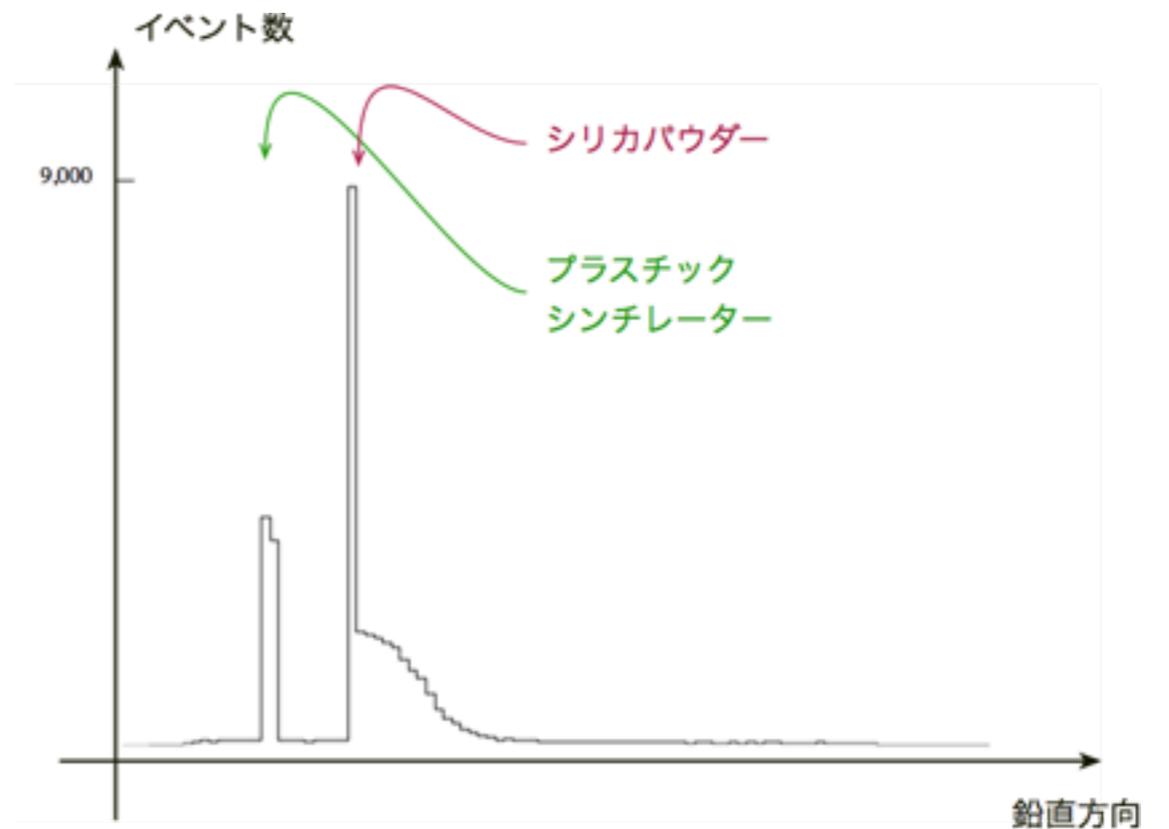
400 keV 未満



400 keV 以上

# 検証2 | 陽電子のエネルギー

- ・ プラスチックシンチレータで止まりにくくなっている
- ・ シリカパウダーを通り過ぎるほどではない
- ・ 結果、シリカパウダーで止まるものの数が増えていると考えられる



400 keV 以上

# シミュレーションのまとめ

- ・ 磁場を入れても、陽電子が曲がりすぎて実験が進まなくなることにはなさそう
- ・ 高いエネルギーの陽電子もシリカパウダーで止まっている

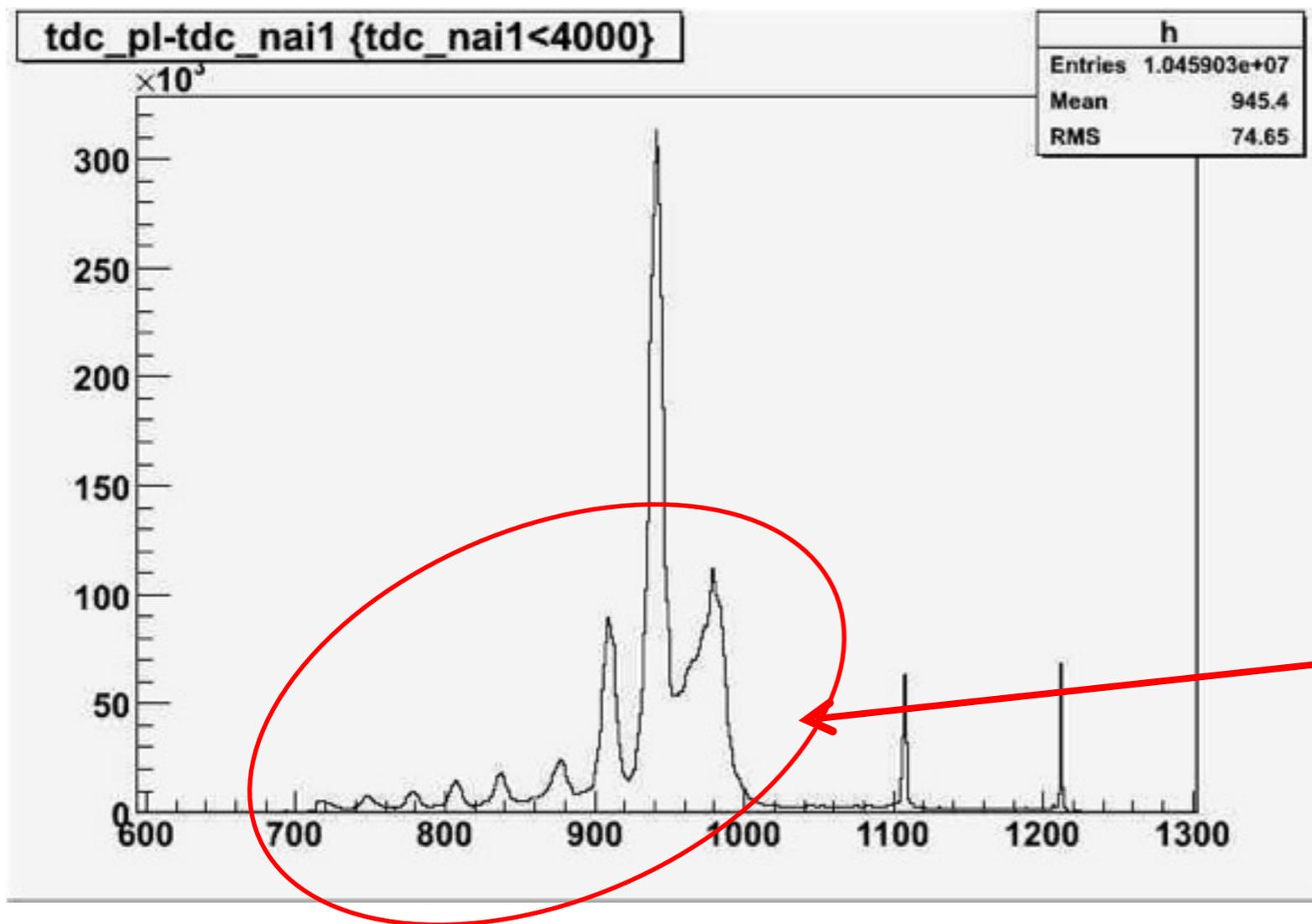
ここまで理想

ここから現実

# 歩み

# 事の始まり

## TDCヒストグラム



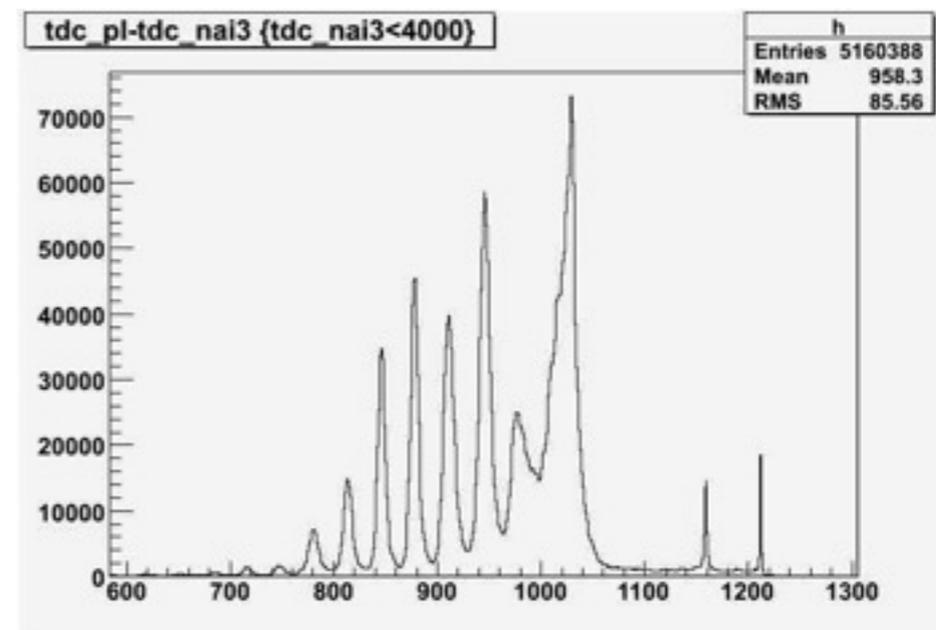
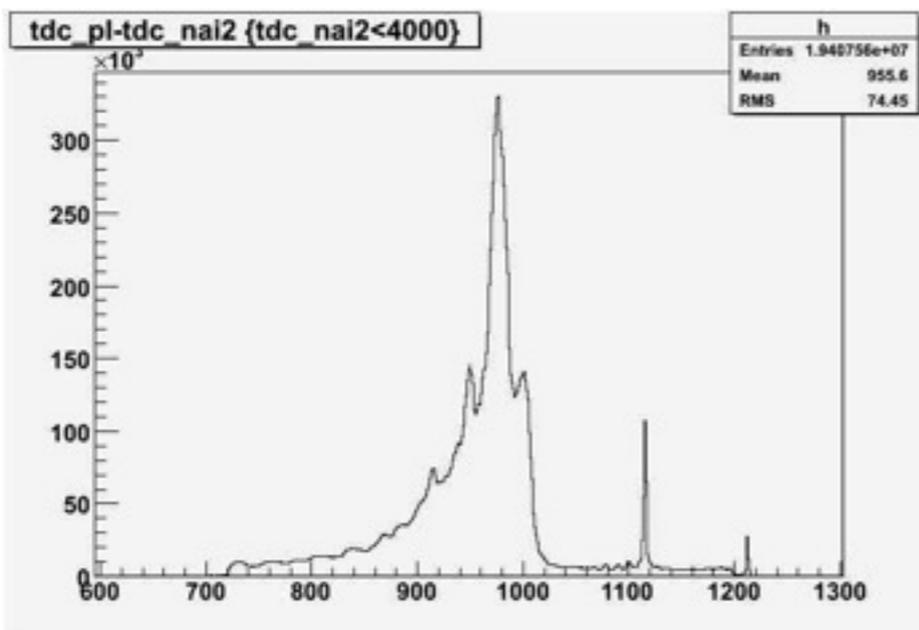
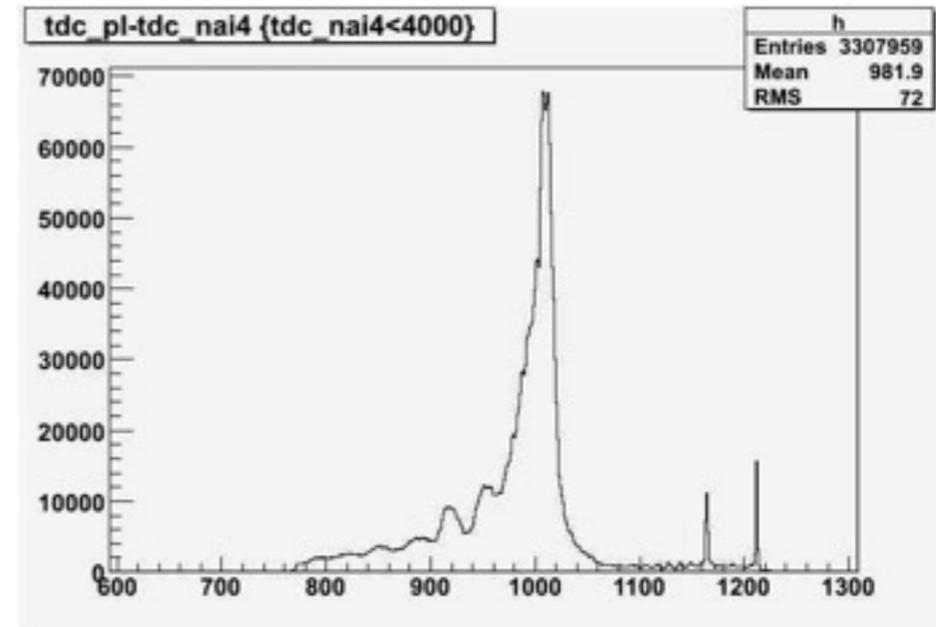
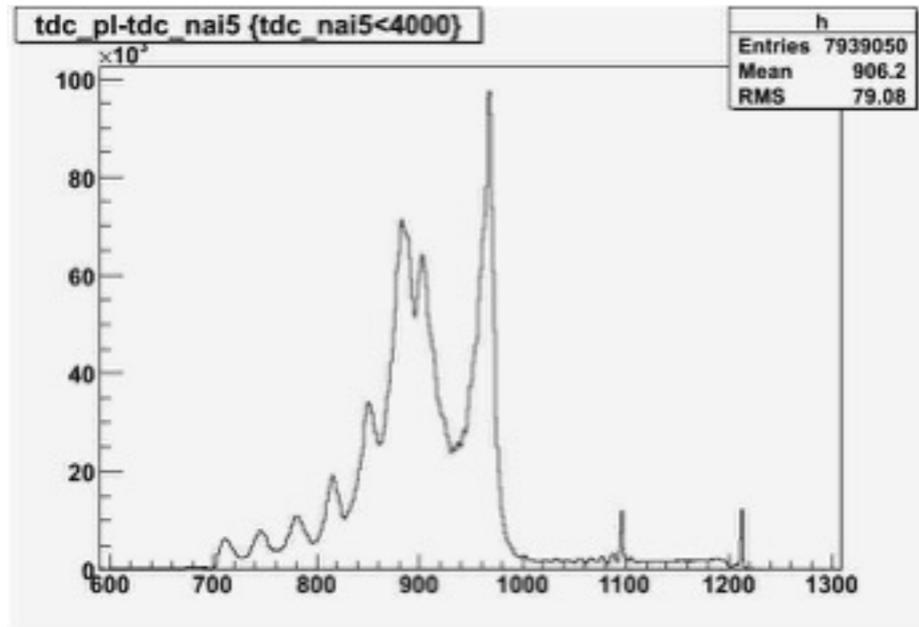
NaI5本

磁場ありで測定

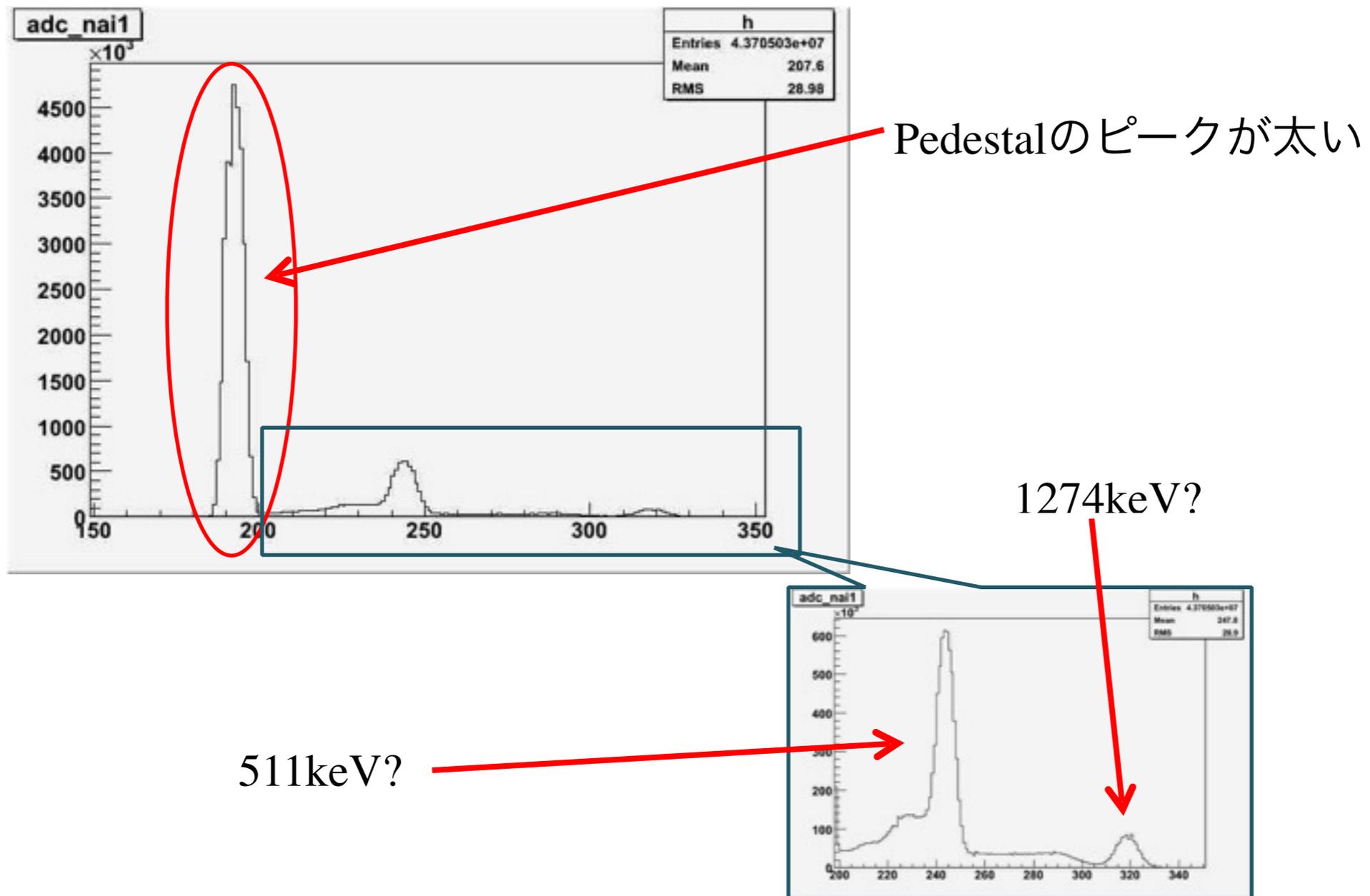
量子振動...じゃない!

後の測定で磁場をなくしても  
このギザギザは現れた

# 他のTDCチャンネルも同様に



# 対応するADCヒストグラム

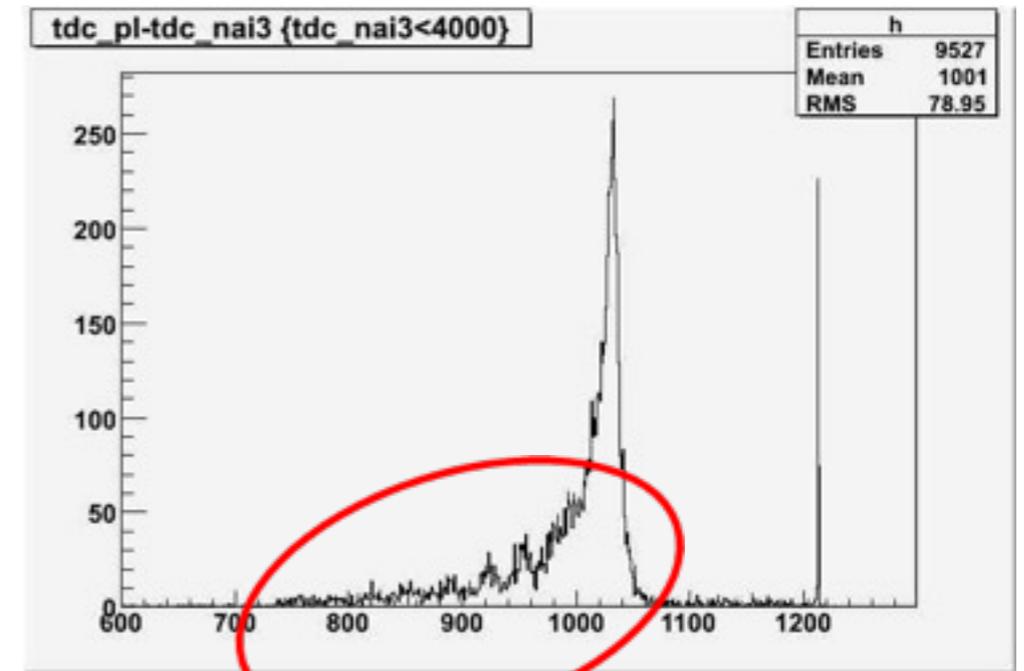
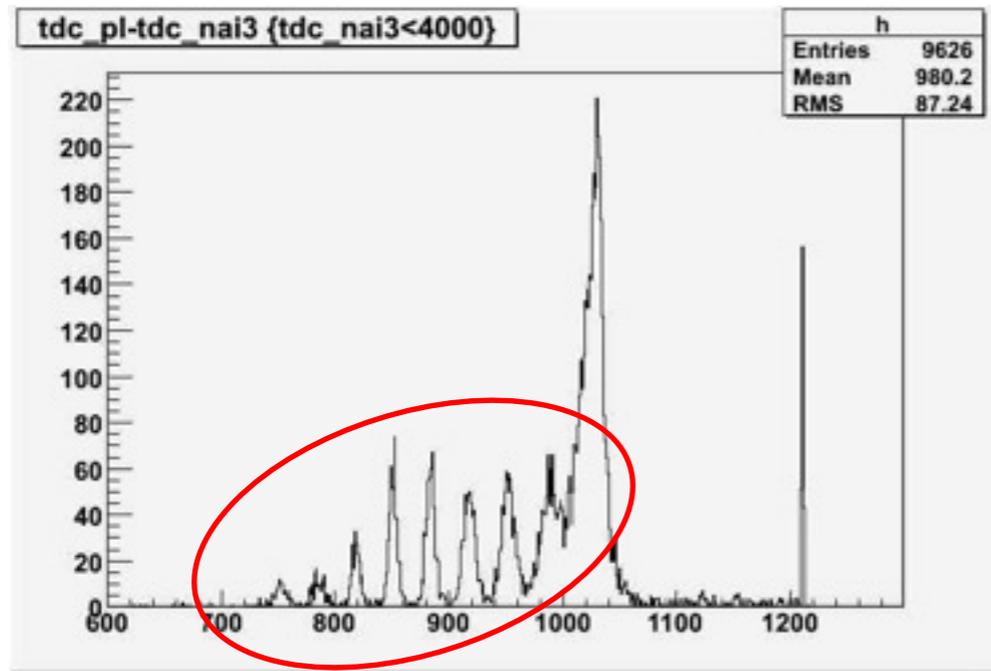


# 課題1

TDCヒストグラムのギザギザをなくすことが急務！

磁場のないときは量子振動が起こらないので、  
まずは磁場なしでまともな寿命曲線を得ることが  
当面の目標

# P.S.のDIS幅

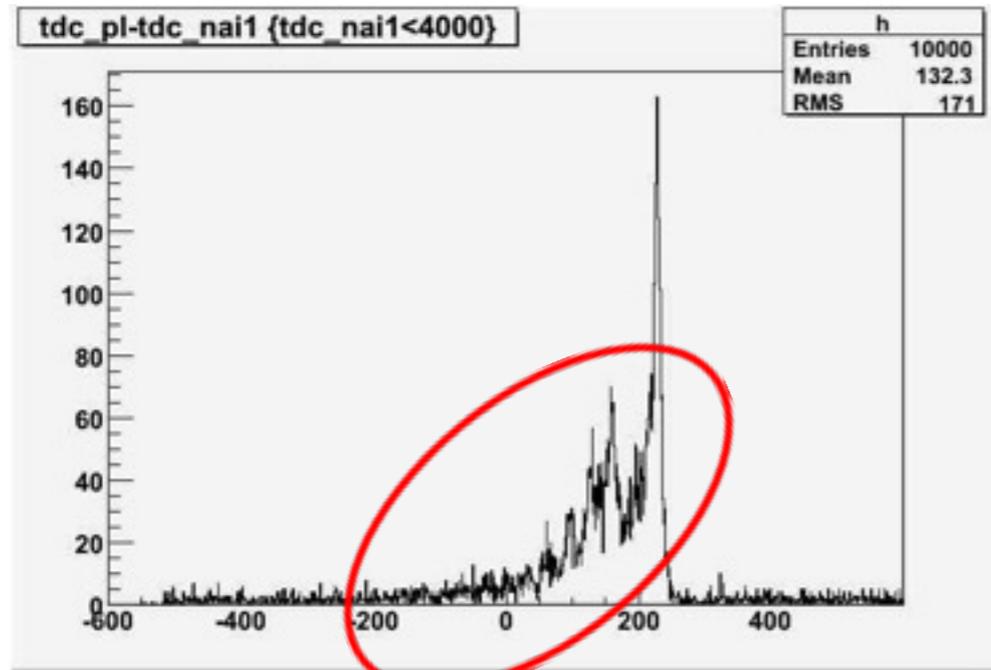


P.S.のディスクリ幅を  
max(160ns)に

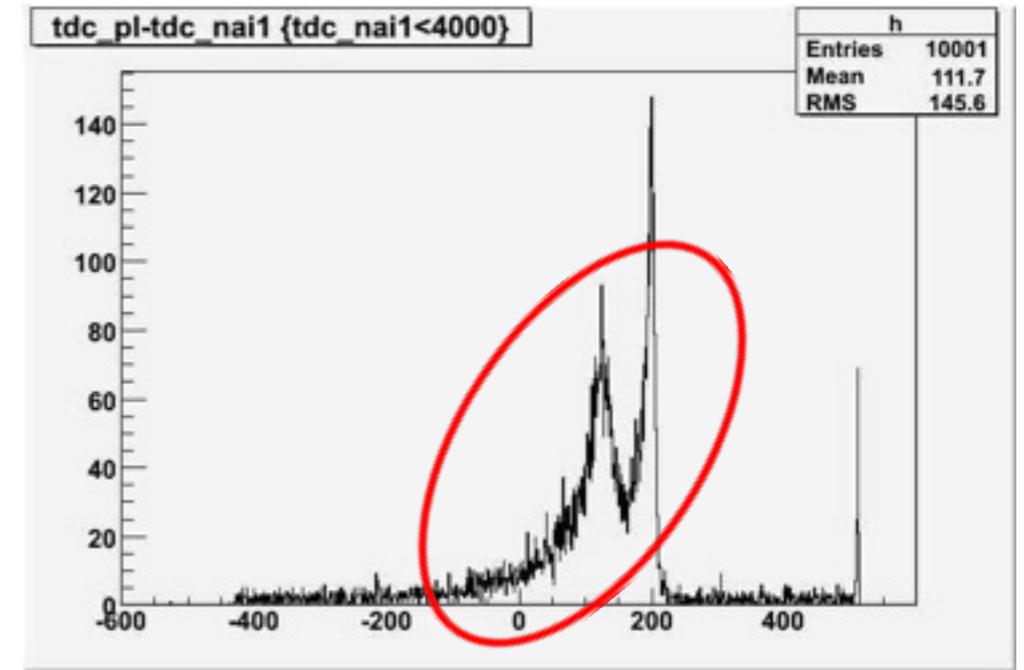
ましになった！

プラシンの信号ひとつに対して  
複数のNIMが出ることが多少抑  
えられた？

# COINのTRIGGER



細かいギザギザ

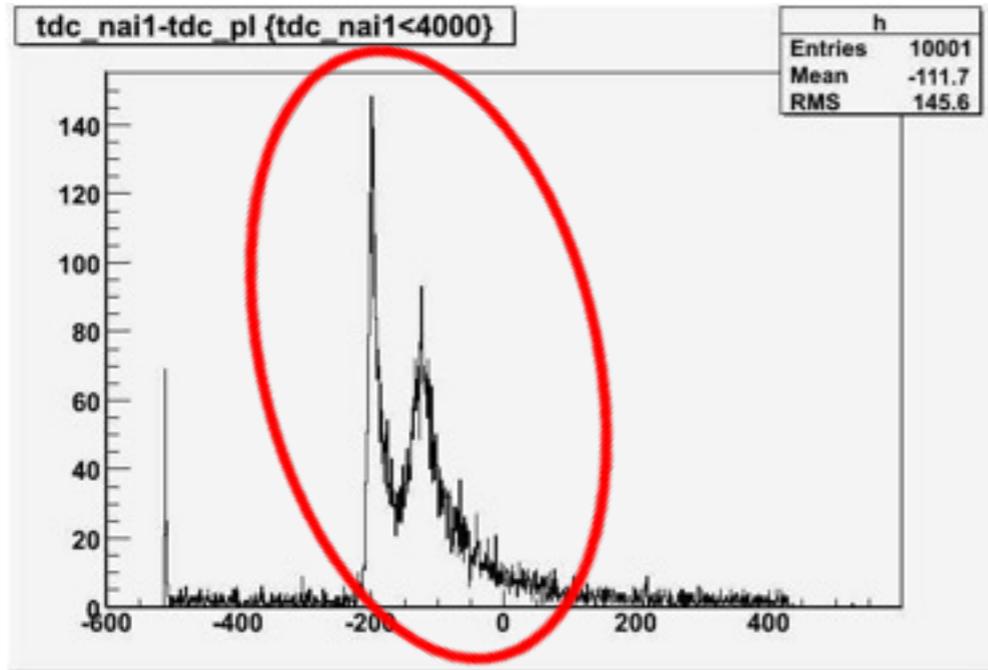


2つの山(悪化?)

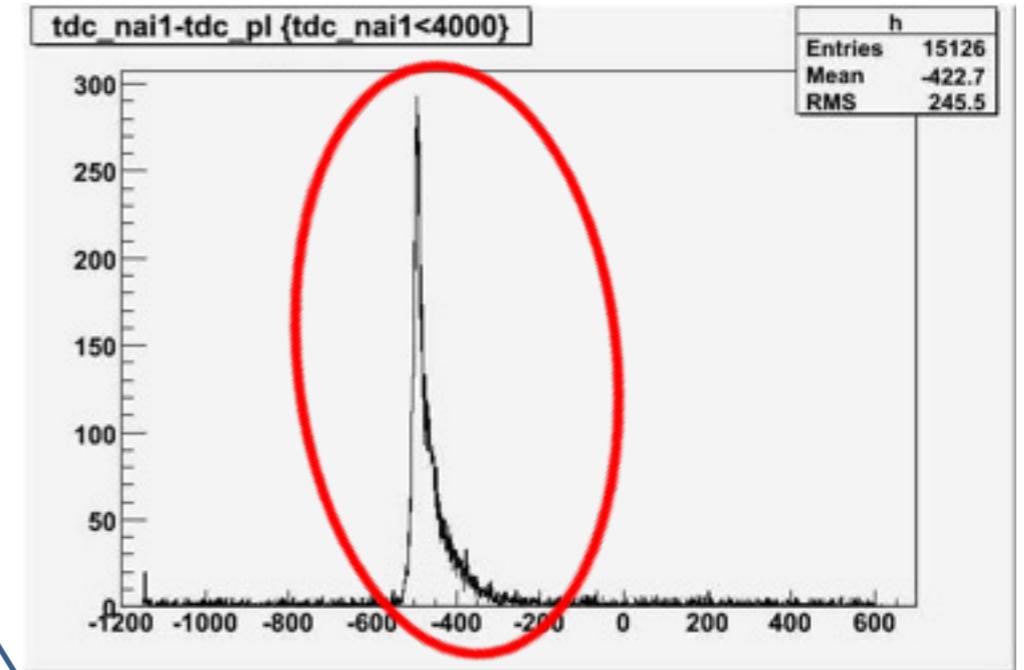
COINのTRIGGERを  
NaIからP.S.に

寿命測定なのでTDCは  
プラシンスタートにする方が自然

# TDCモジュールの変更



2つの山



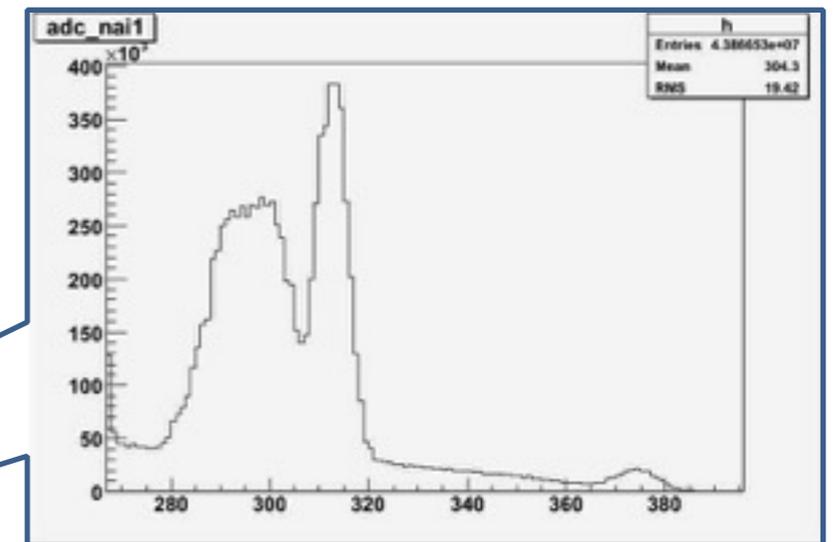
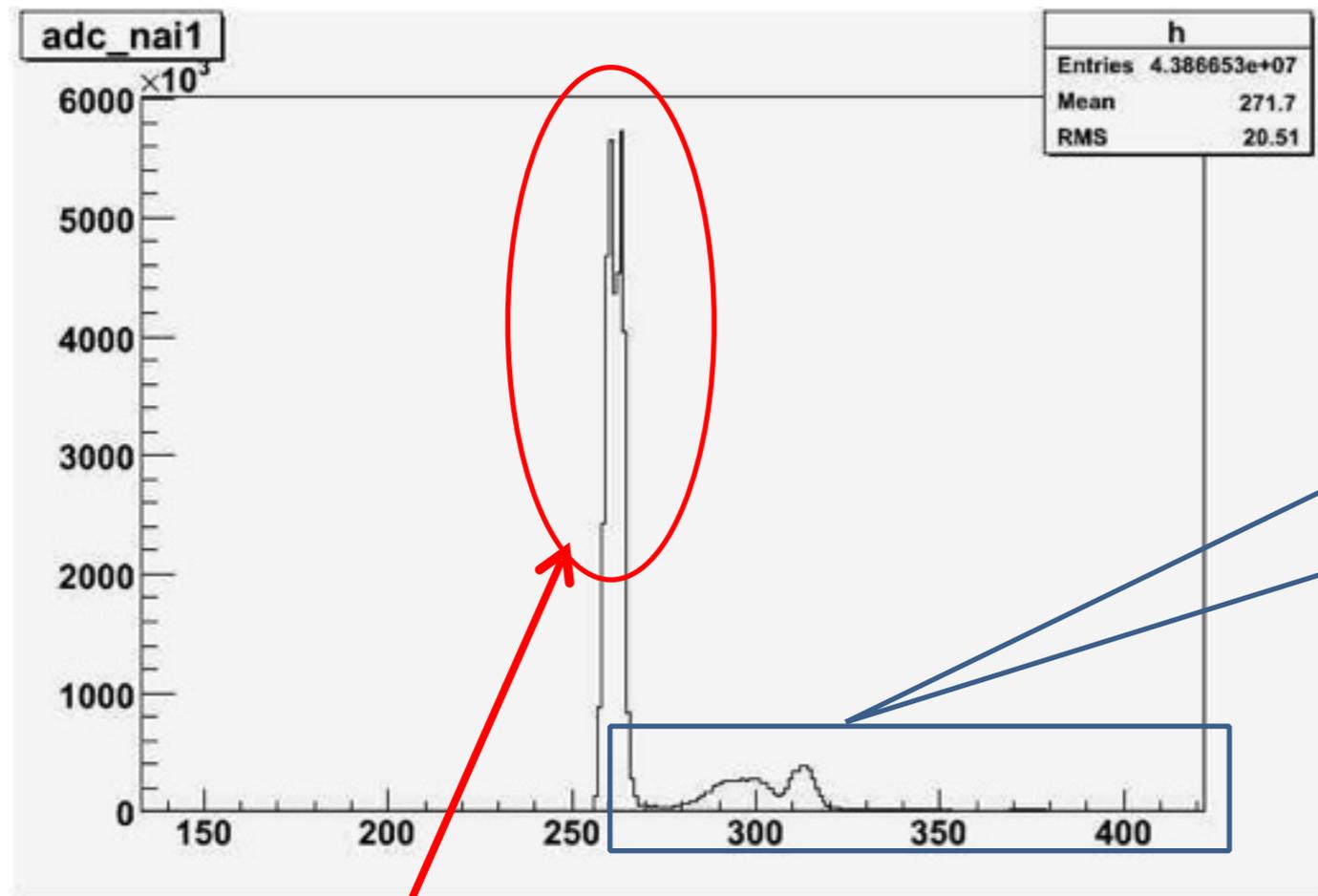
山が消えた！

TDCモジュールを  
REPIC RPC-170から  
REPIC RPC-180に変更

TDCモジュールに不具合があったようだ

# 課題2

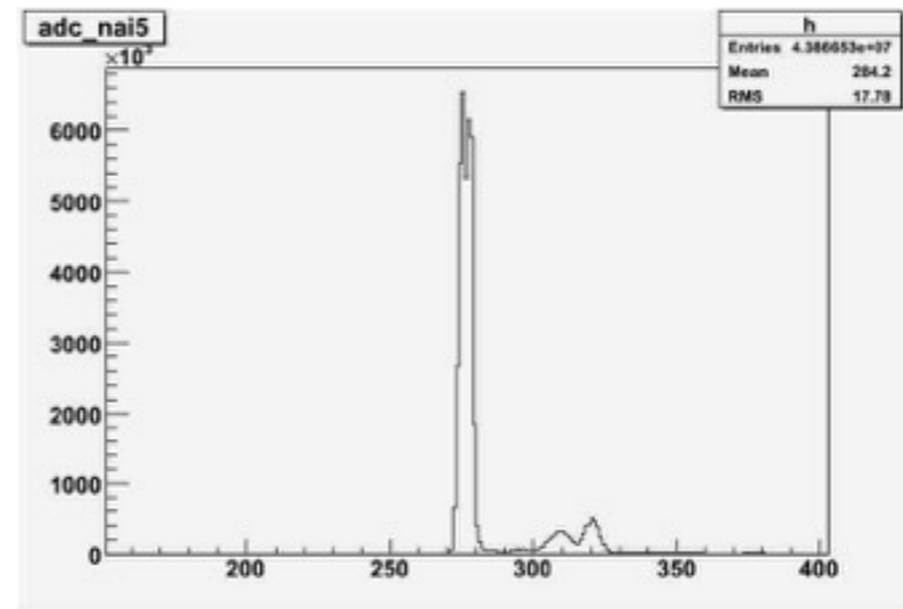
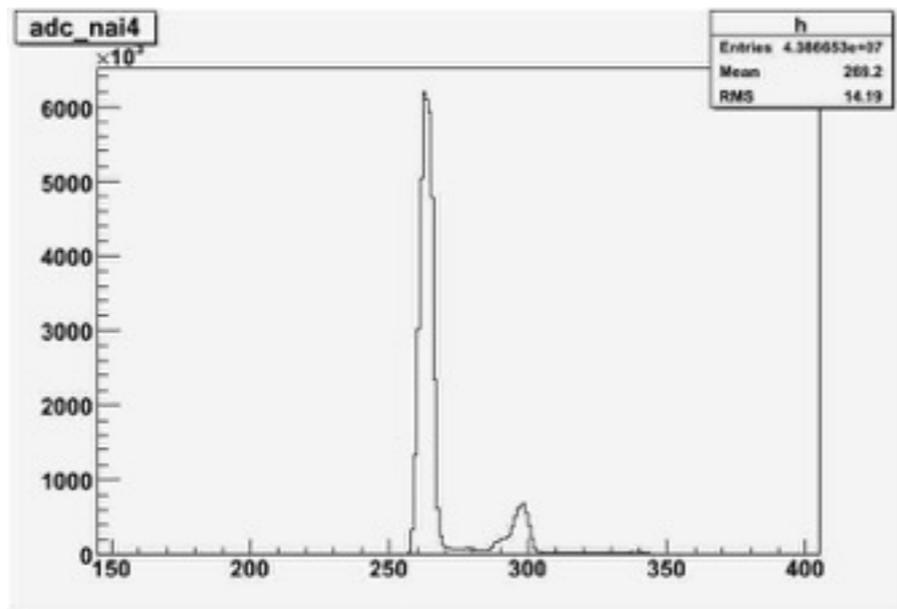
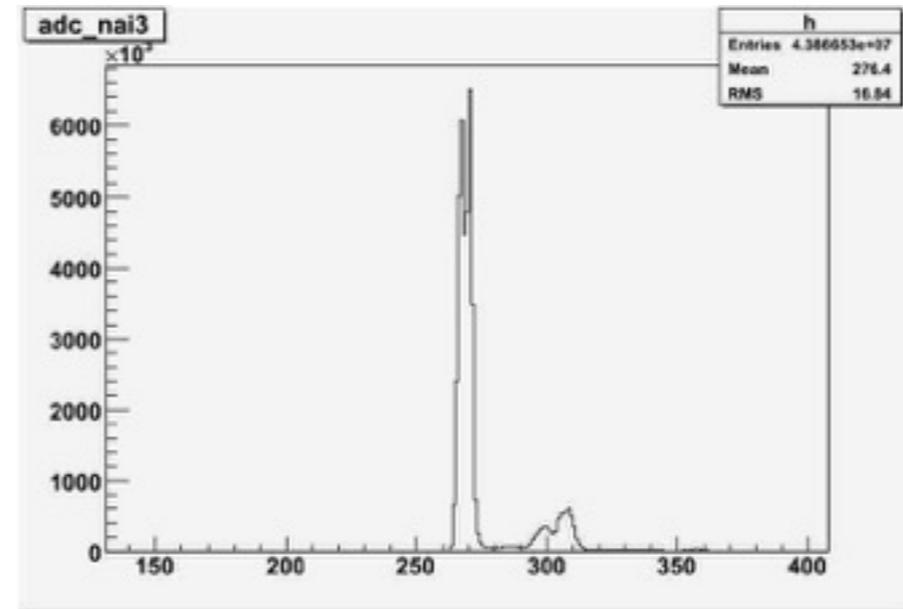
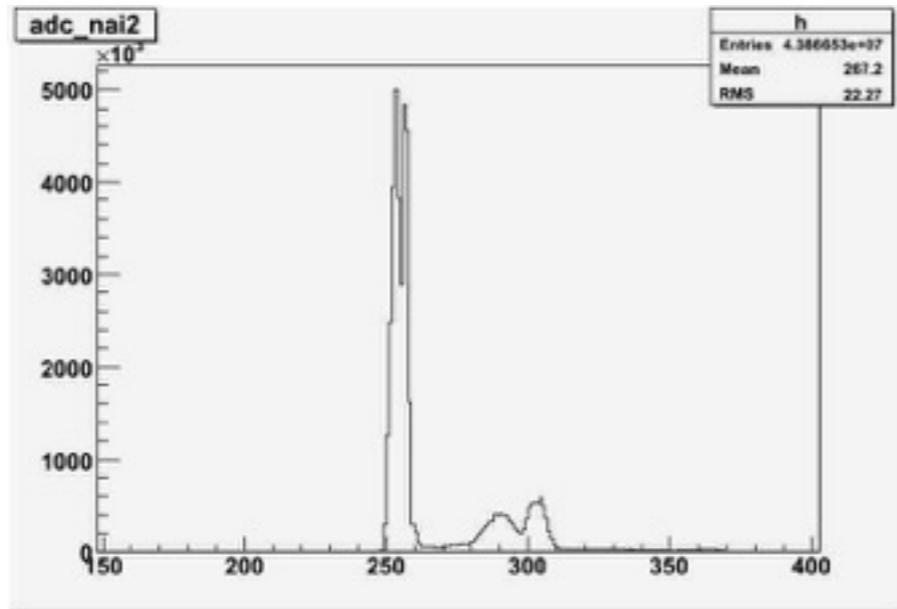
## ADCヒストグラム



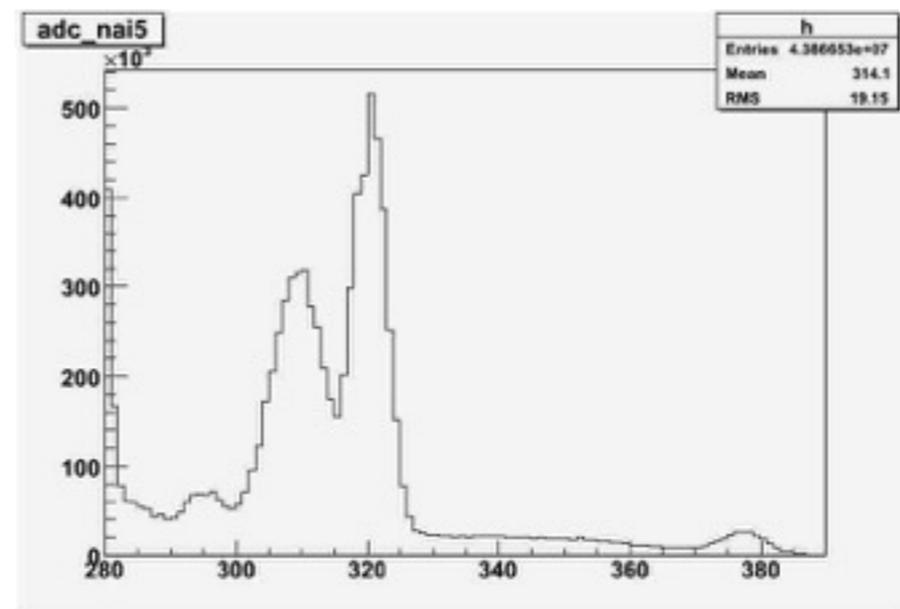
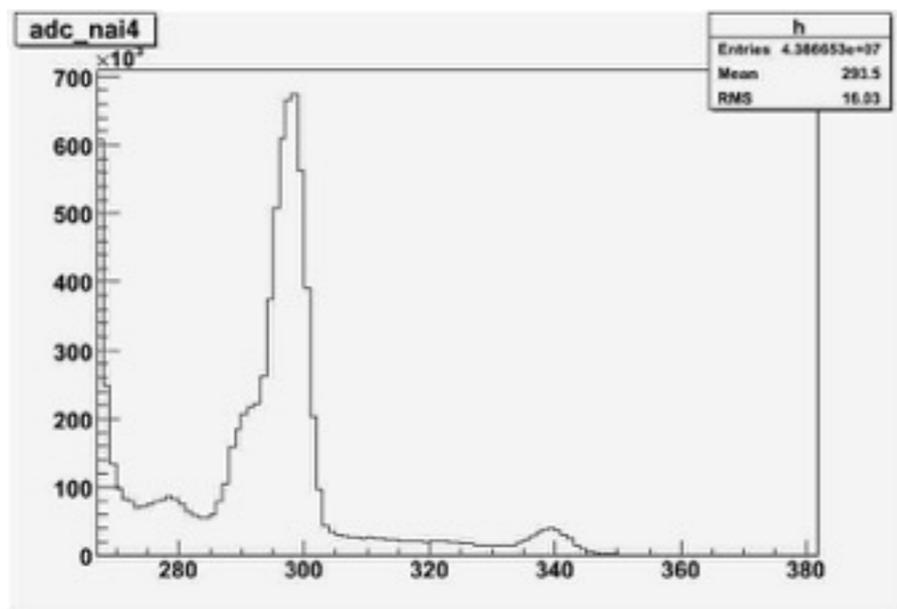
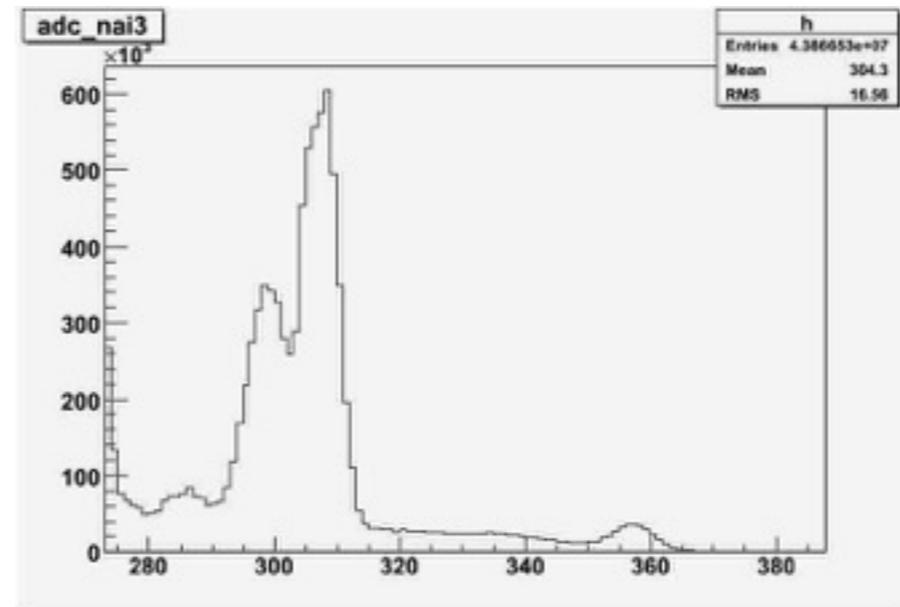
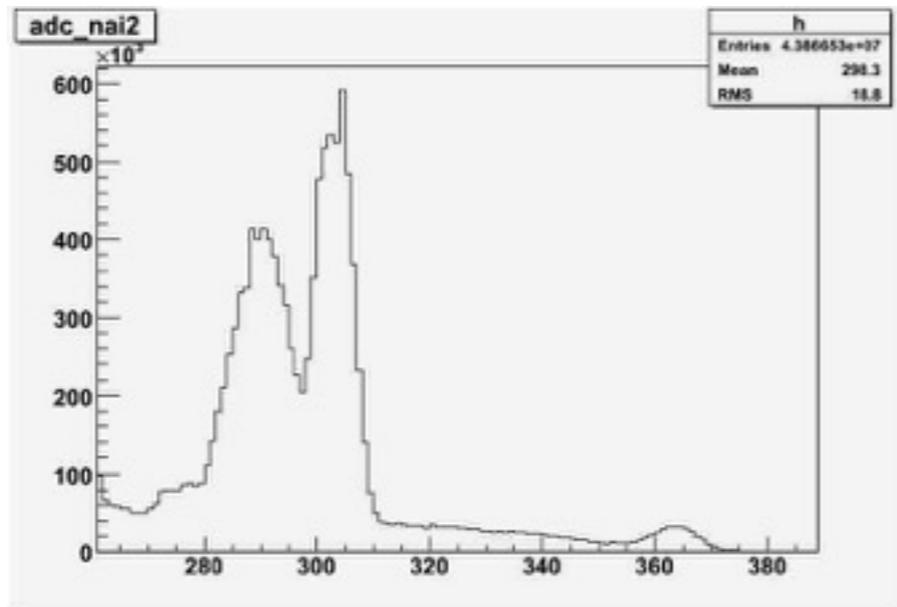
あまりきれいでない...

Pedestalが2つに割れている

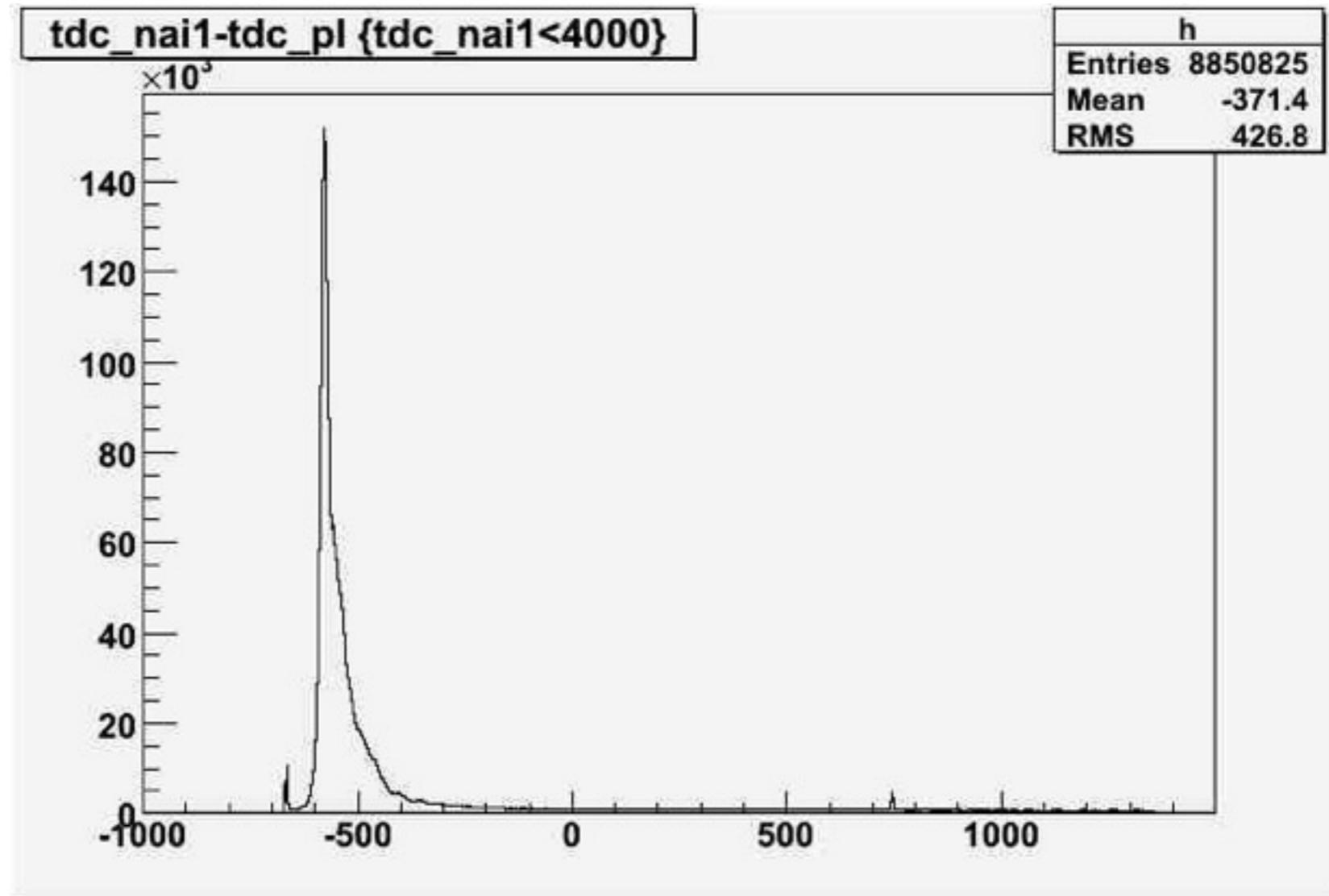
# 他のADCチャンネルも同様に



# Pedestalより上では

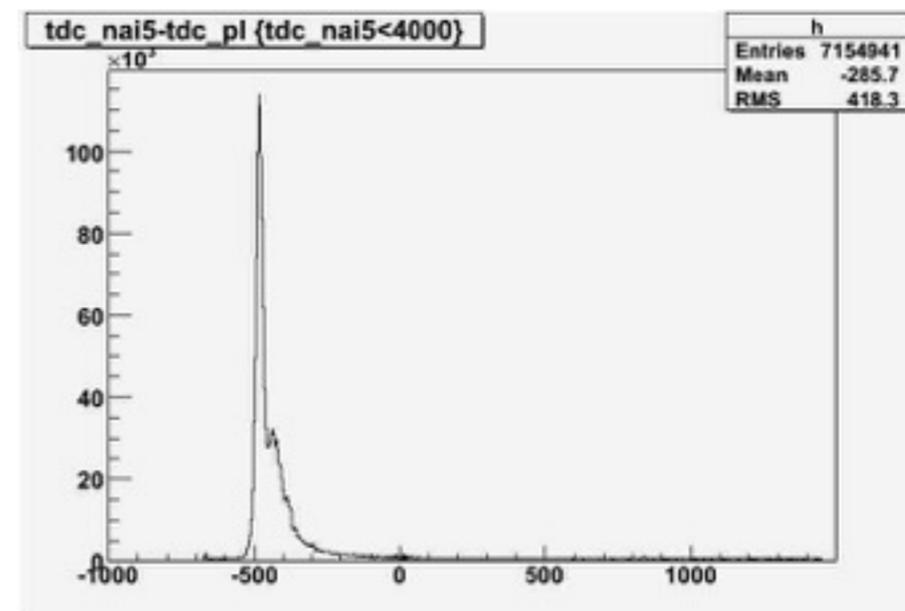
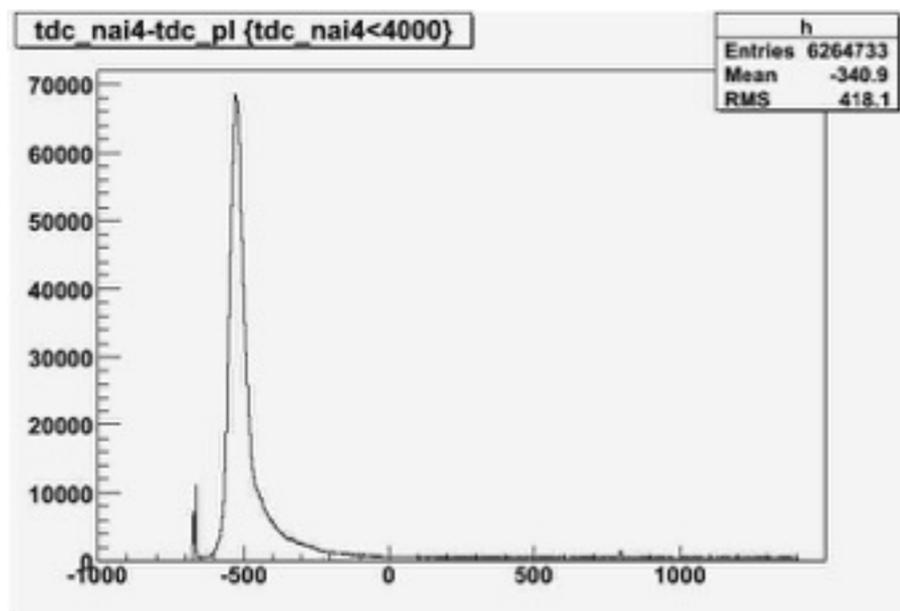
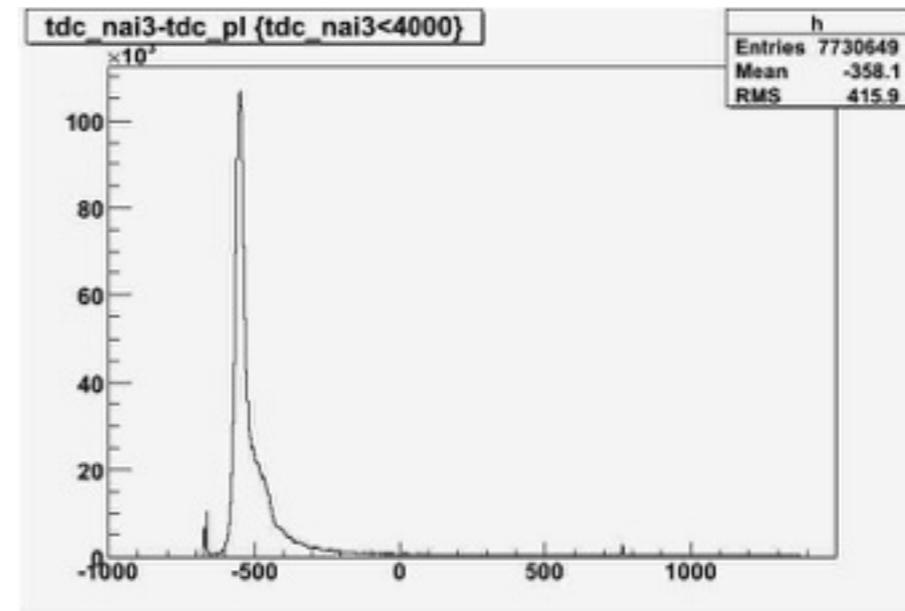
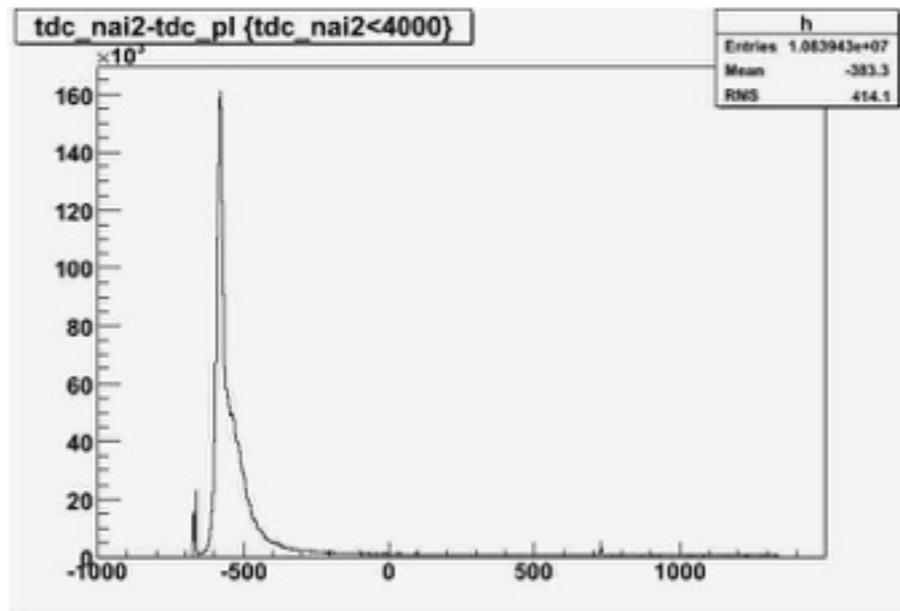


一方、TDCヒストグラムは



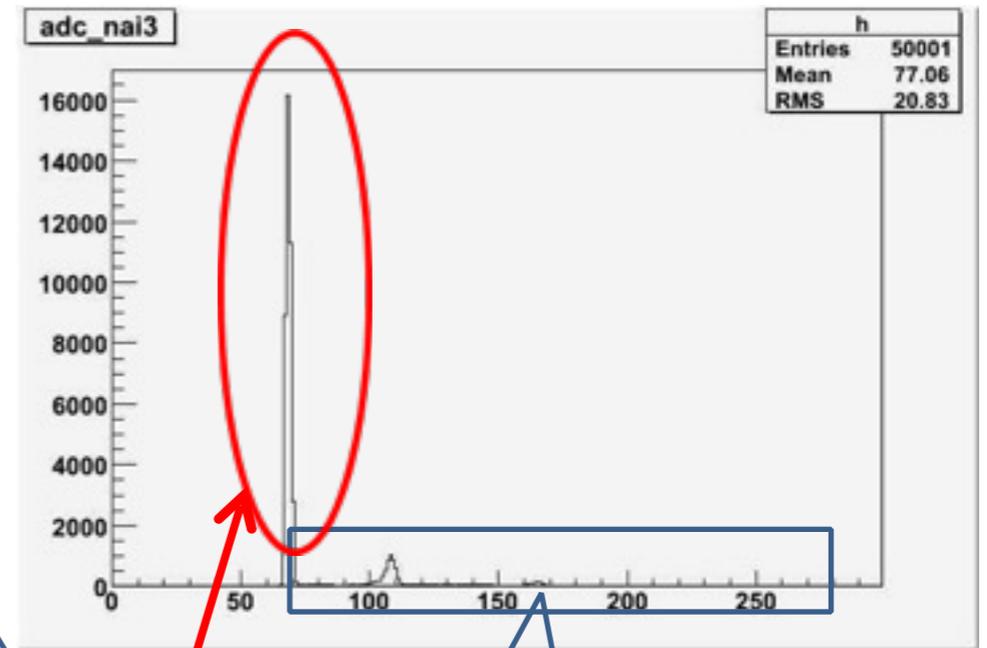
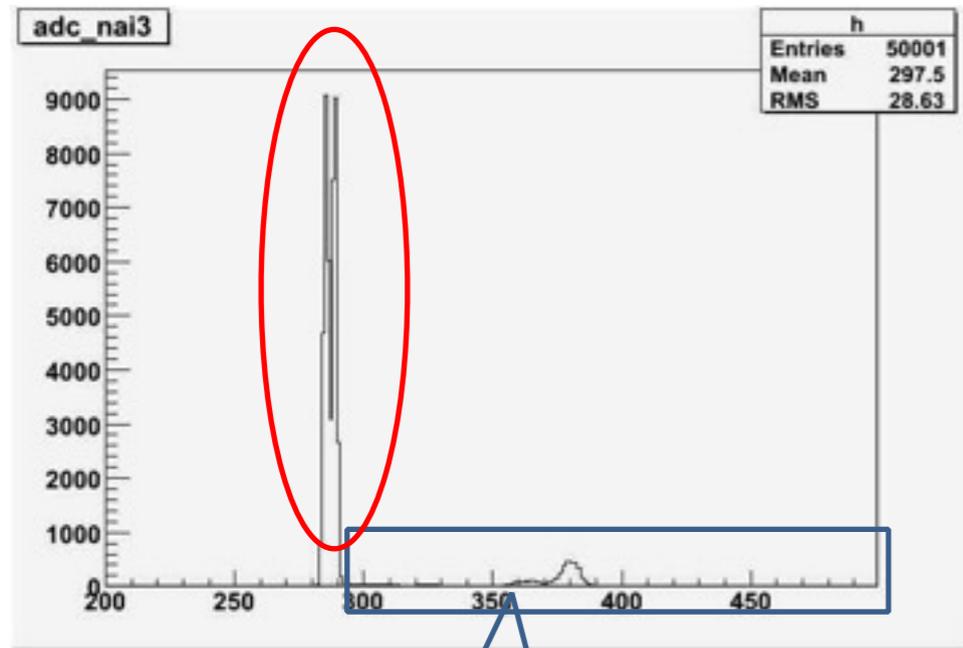
ある程度ましになった！

# 他のTDCチャンネルは



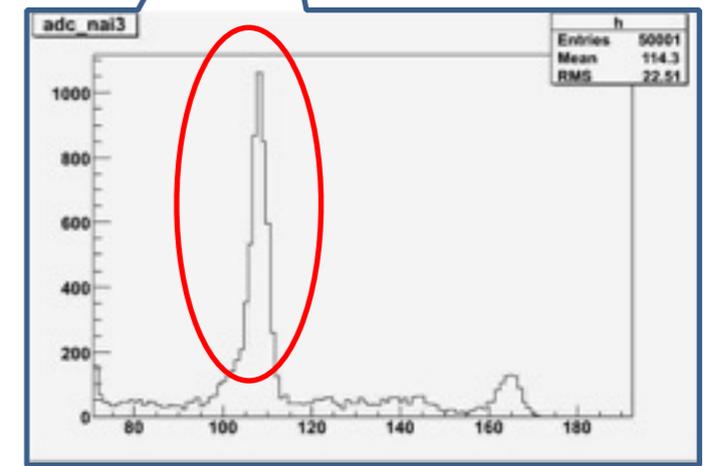
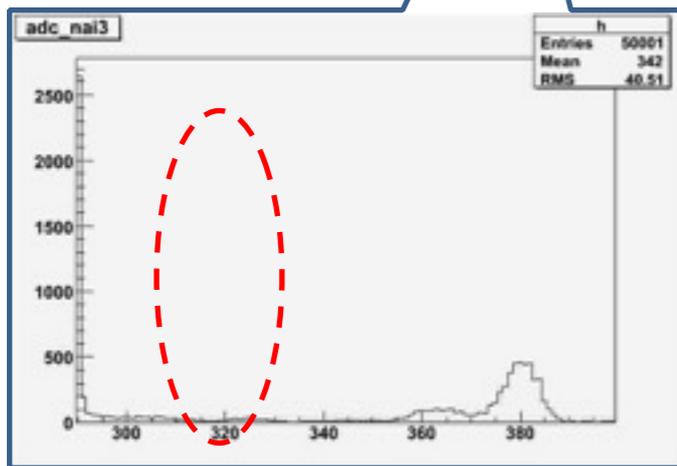
TDCはある程度ましになったので、  
今度はADCのヒストグラムを  
きれいにしたい

# ADCモジュールの変更



ADCモジュールを  
C009(豊伸電子)から  
C1113-027(同)に変更

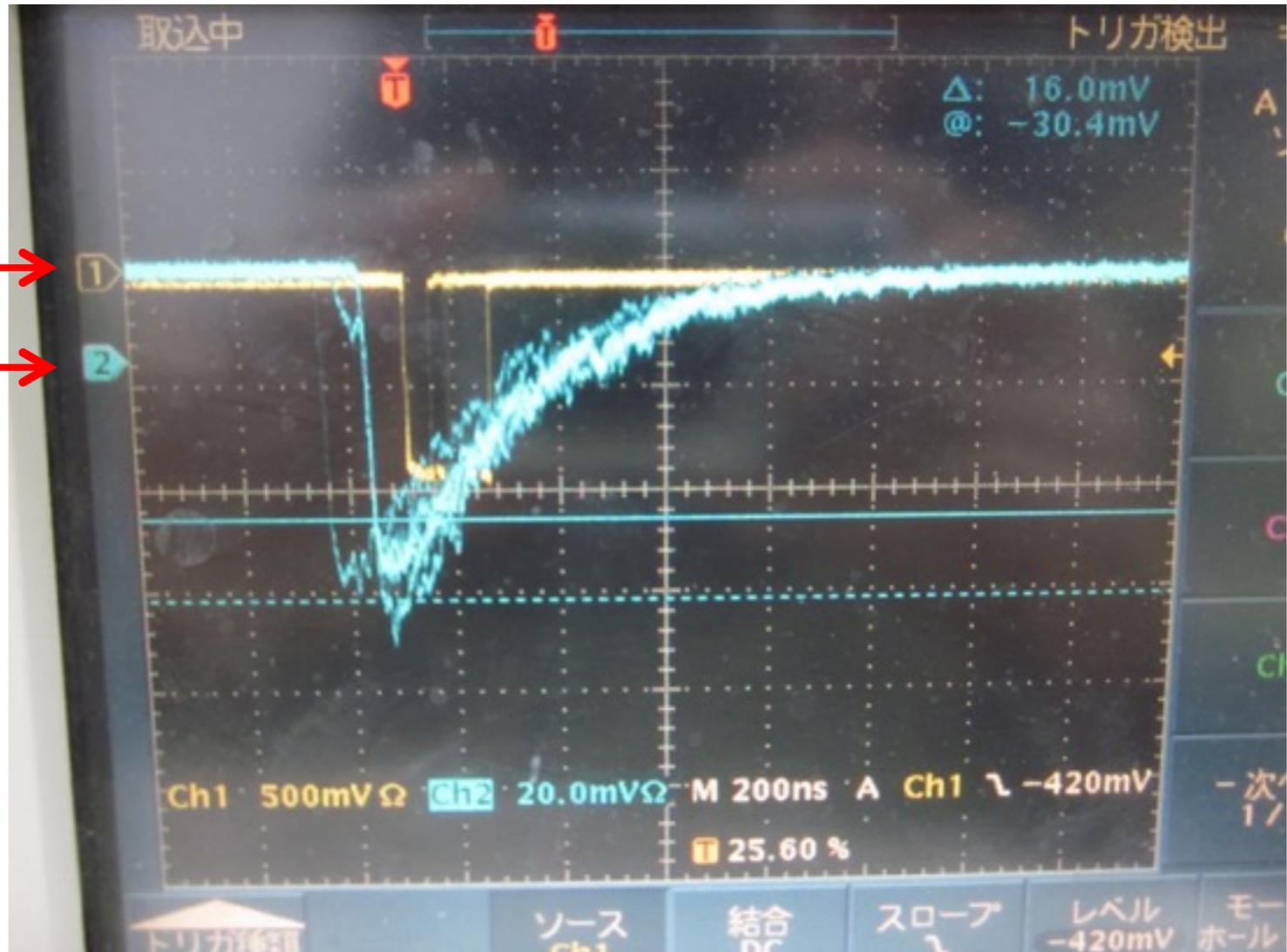
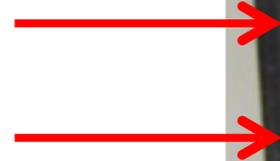
割れてない！



511keV?出現

# Offset 問題

Offset  
ground



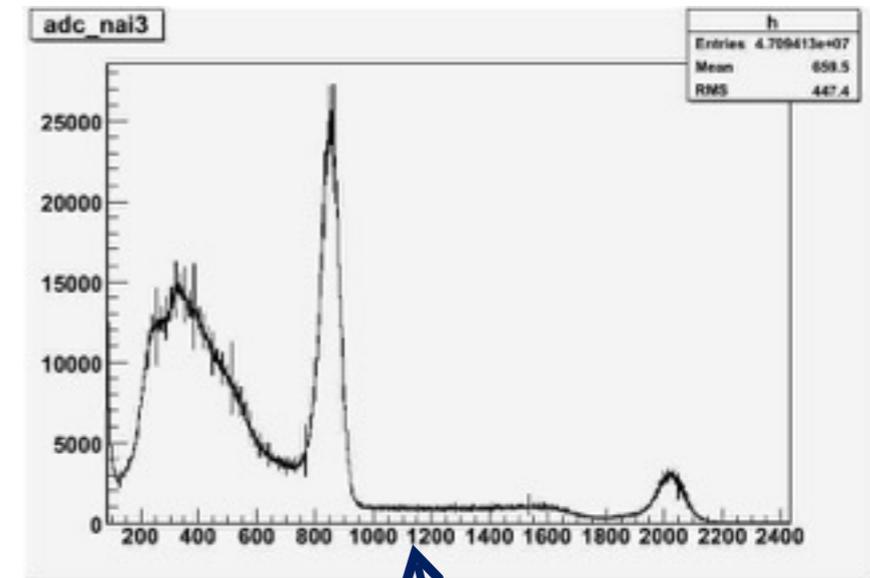
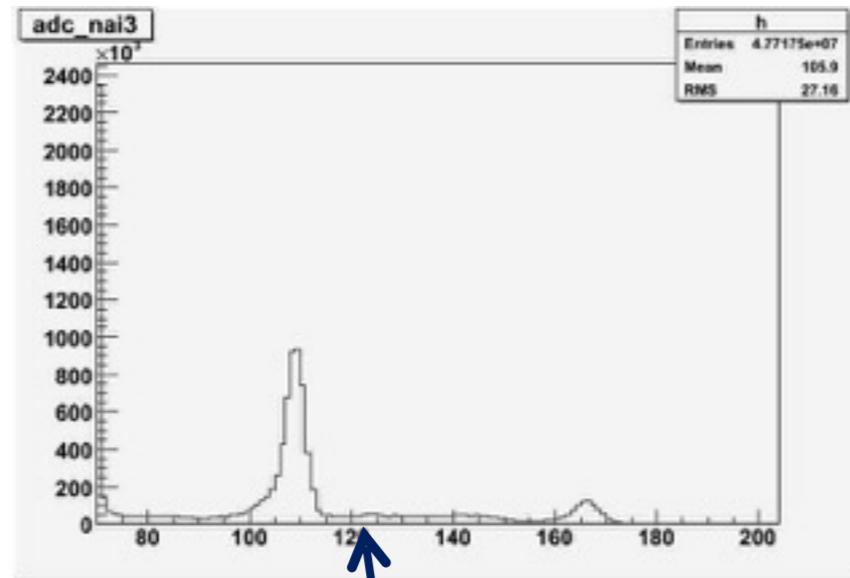
実はかねてから、  
offsetの値がground  
よりも高いという  
問題があった…

DISのthresholdは  
groundから測る

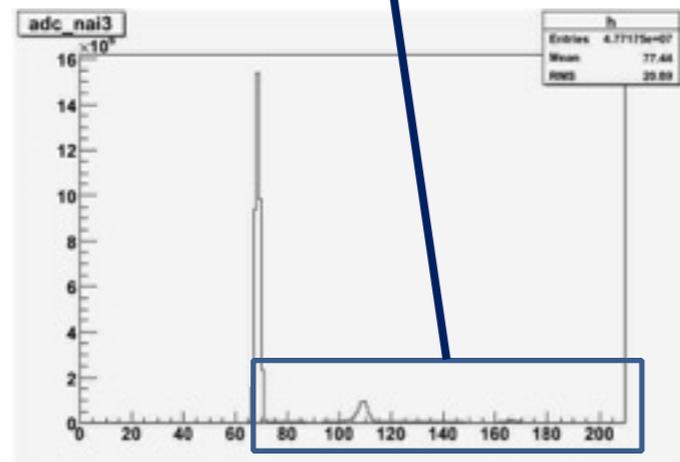


Offsetをgroundに合わせないと、  
正確にthresholdをかけられない！

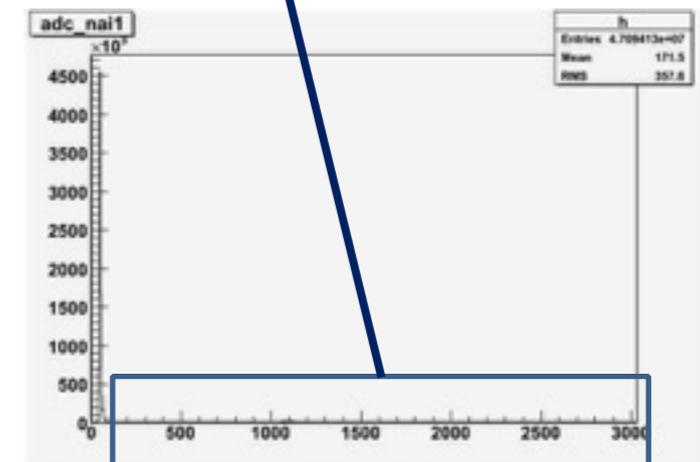
# アンプの変更



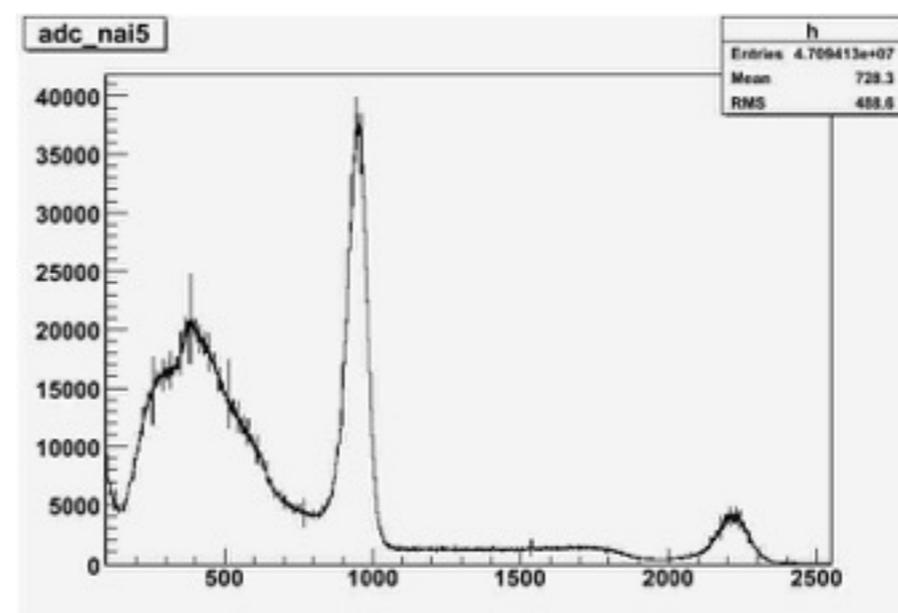
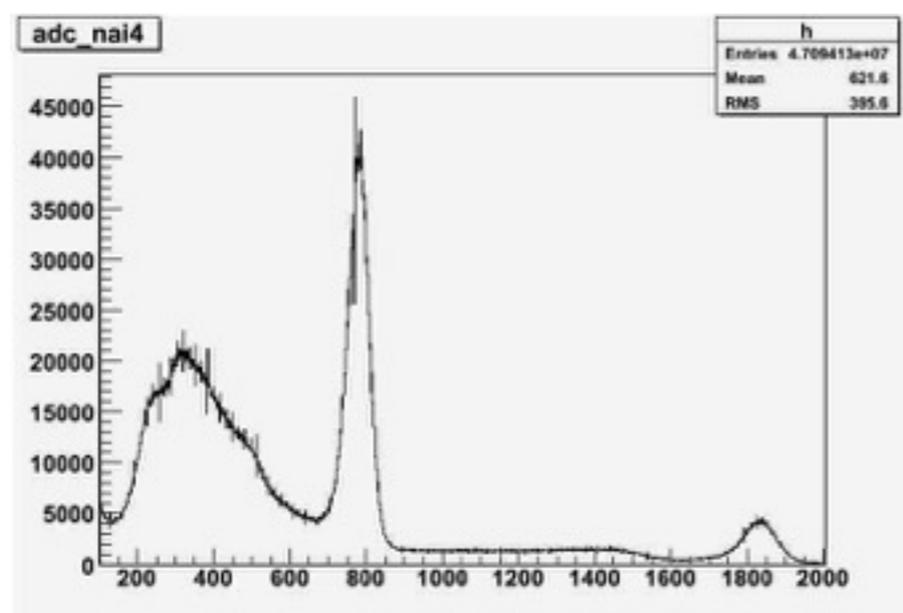
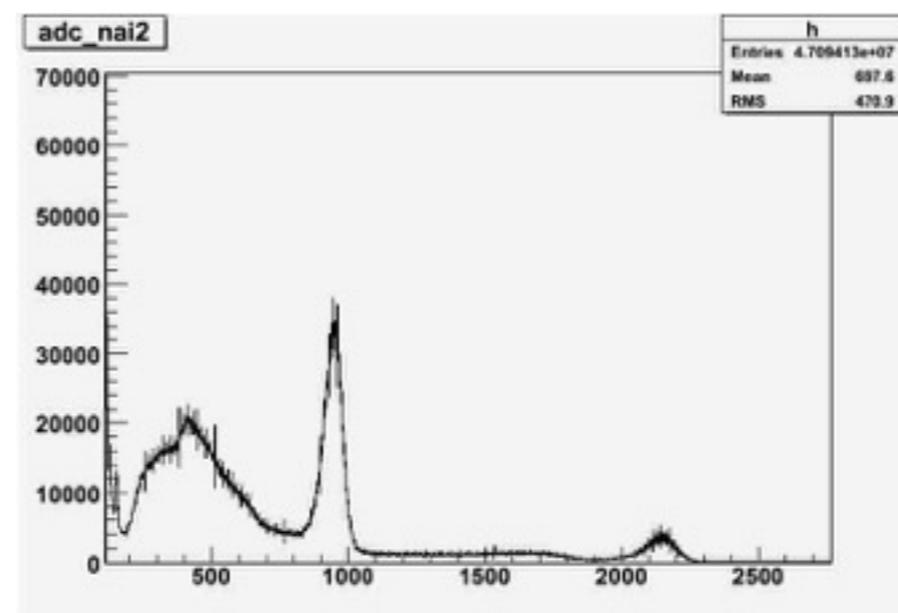
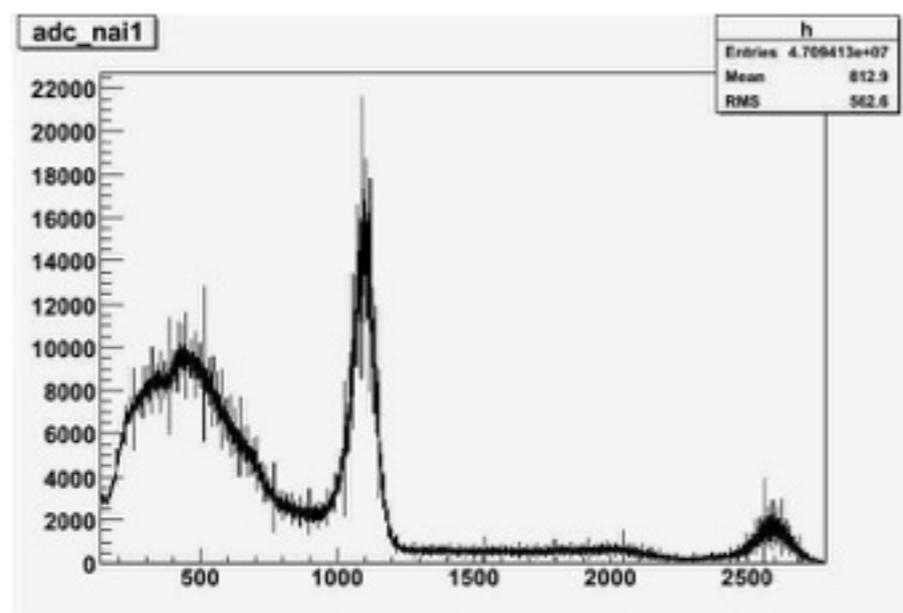
アンプのモジュールを  
REPIC RPN-090から  
TKY-0351に変更



新しいアンプはoffsetを  
調節できるので、offsetを  
groundの値にadjustした

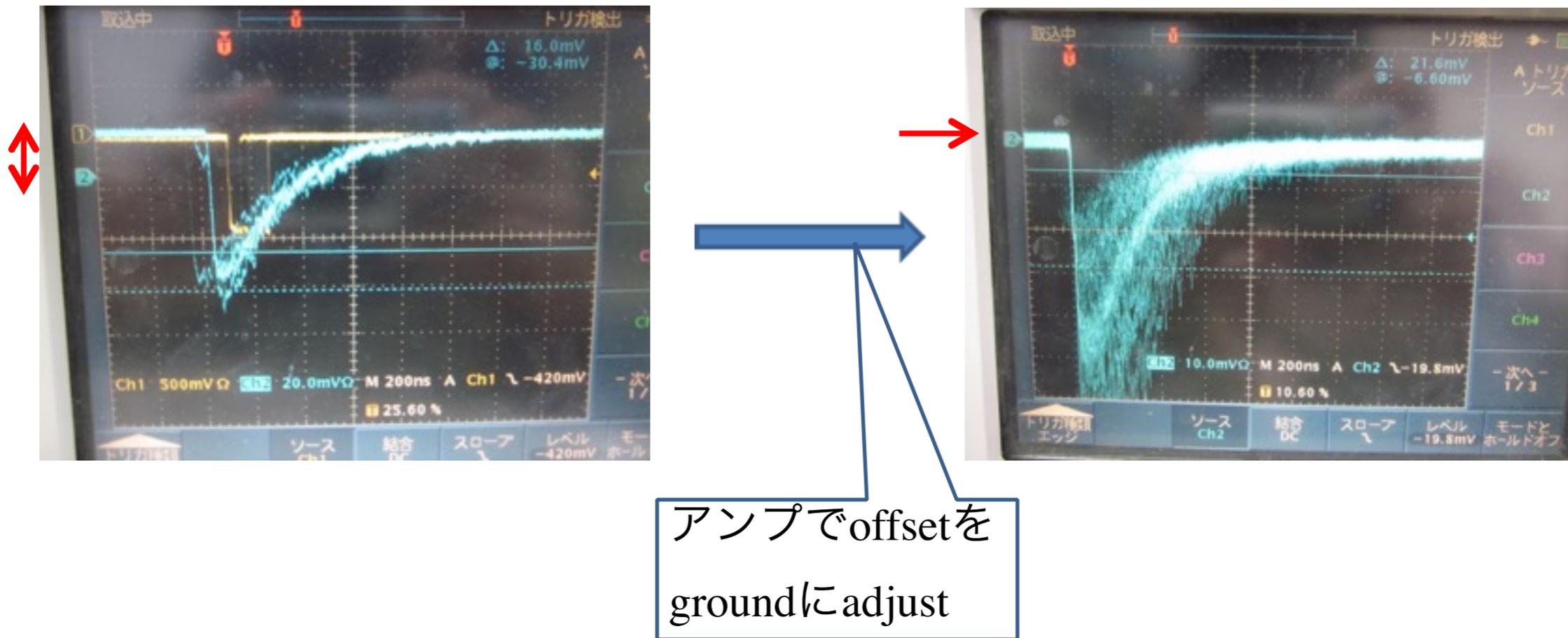


# 他のADCチャンネルも同様に...



きれいになった！

# 一方このときoffsetは...



これでthresholdがちゃんとかけられることに

→ ADCがきれいになった！

# ADC、TDCの値が対応しない

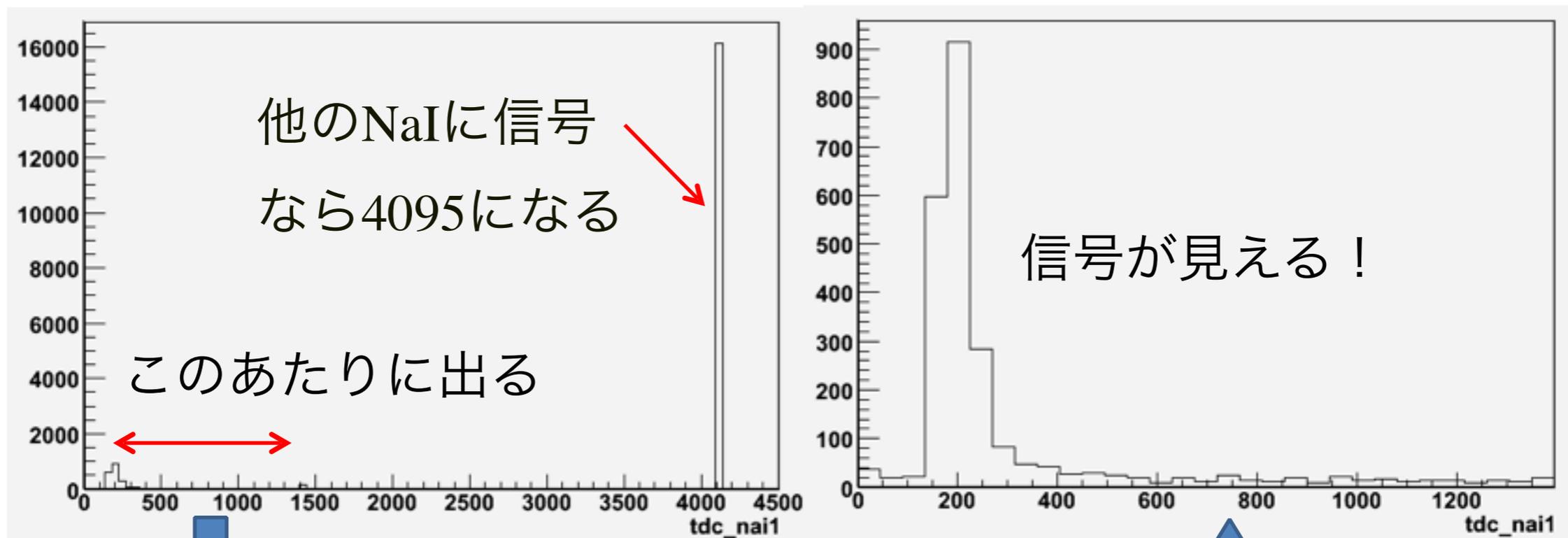
ヒストグラムの形はきれいになったが、  
ADC、TDCの値が対応していない

→ つまり、ADCに信号が来ているのに  
TDCに信号が来ていないときがある！

→ Coincidenceのトリガーにvetoを入れて解決

# veto入れる前

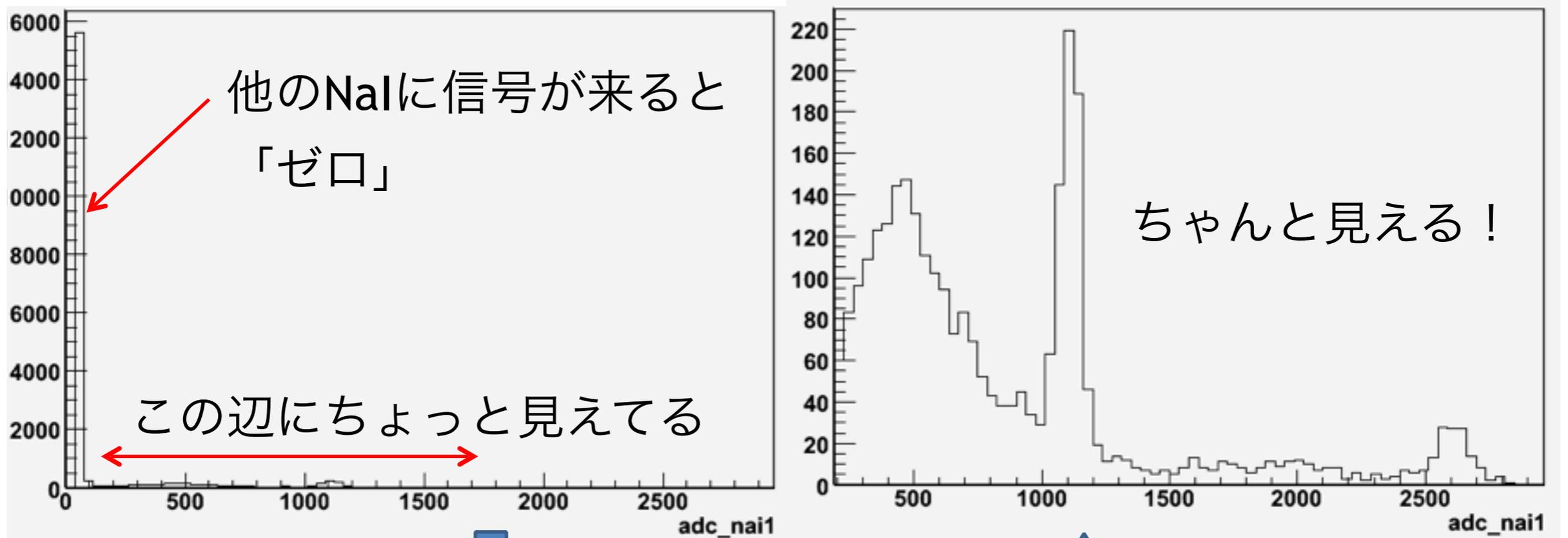
## TDCの生のデータ



拡大すると

# veto入れる前

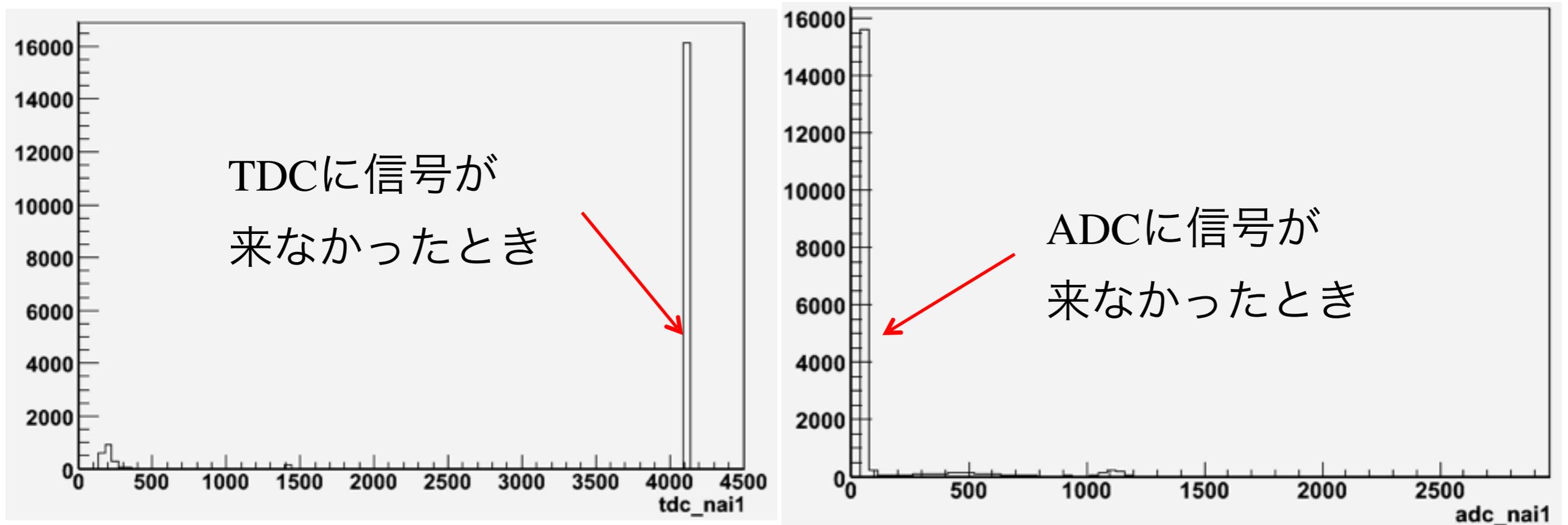
## ADCの生のデータ



拡大すると

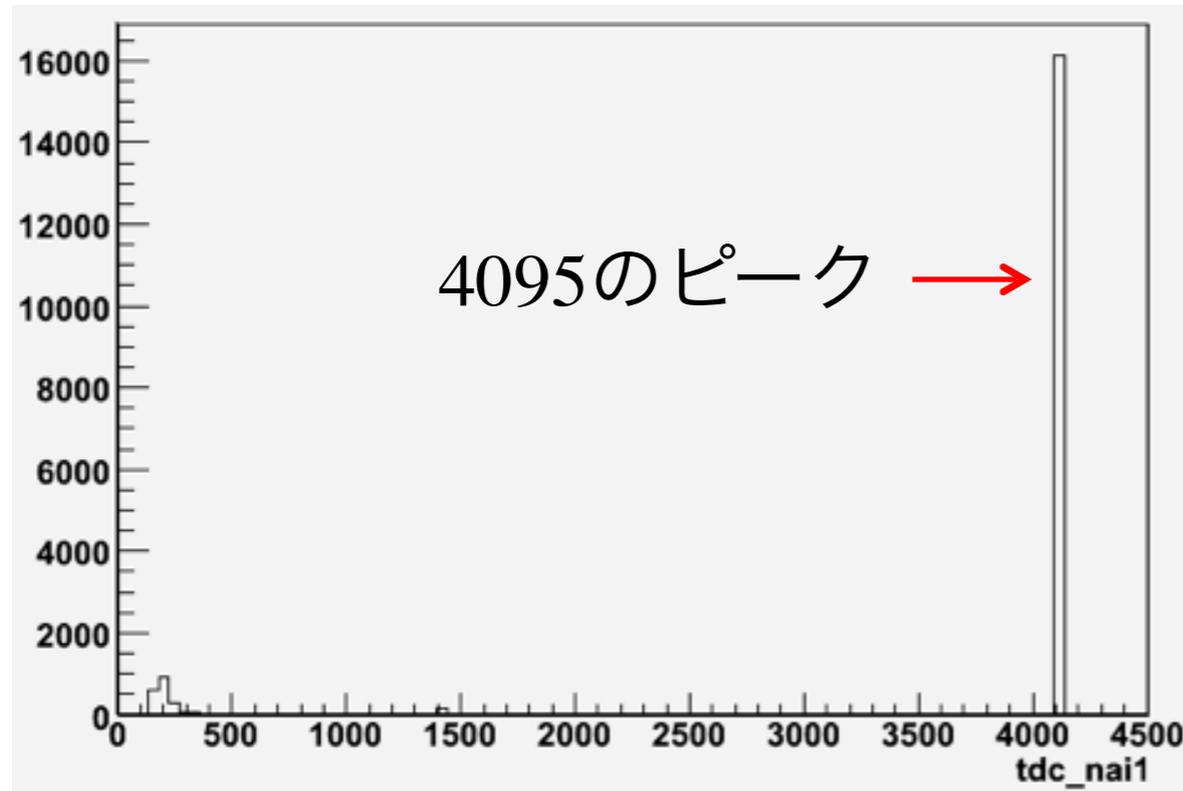
# veto入れる前

- ・ TDCの「ゼロ」とADCの「ゼロ」は一致しているはず！



- ・ ADCがゼロでないの時のデータのみでヒストグラム  
→TDCの「4095」のピークは消えるはず

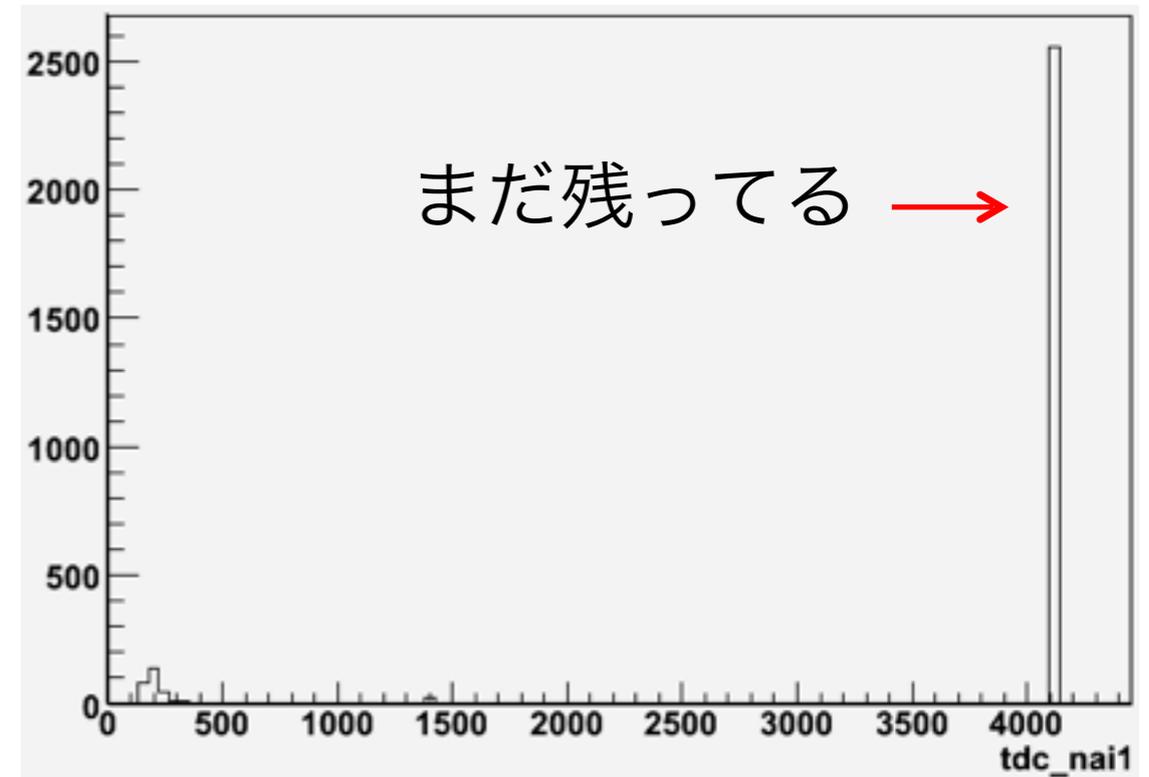
# veto入れる前



消えなかった！

→ADC来てないのに、  
TDC来てる時がある??

信号が混ざってる！

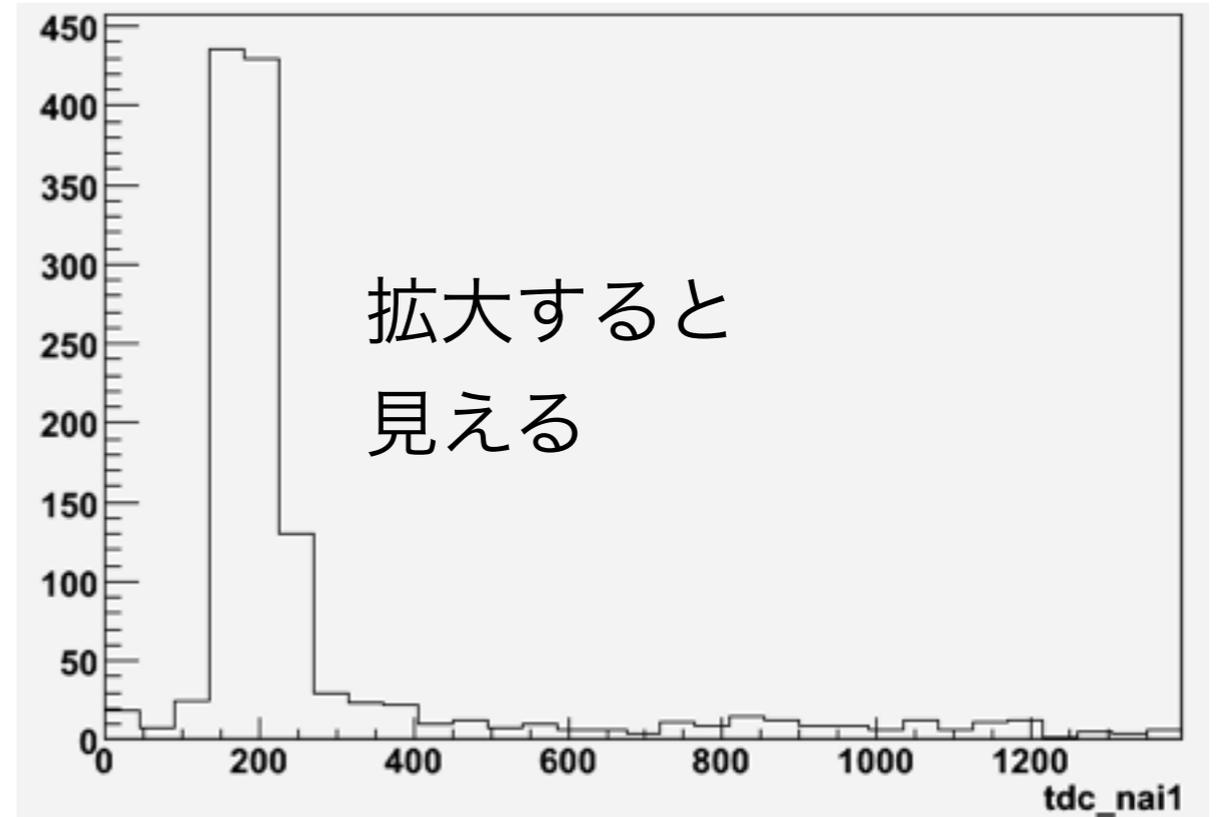
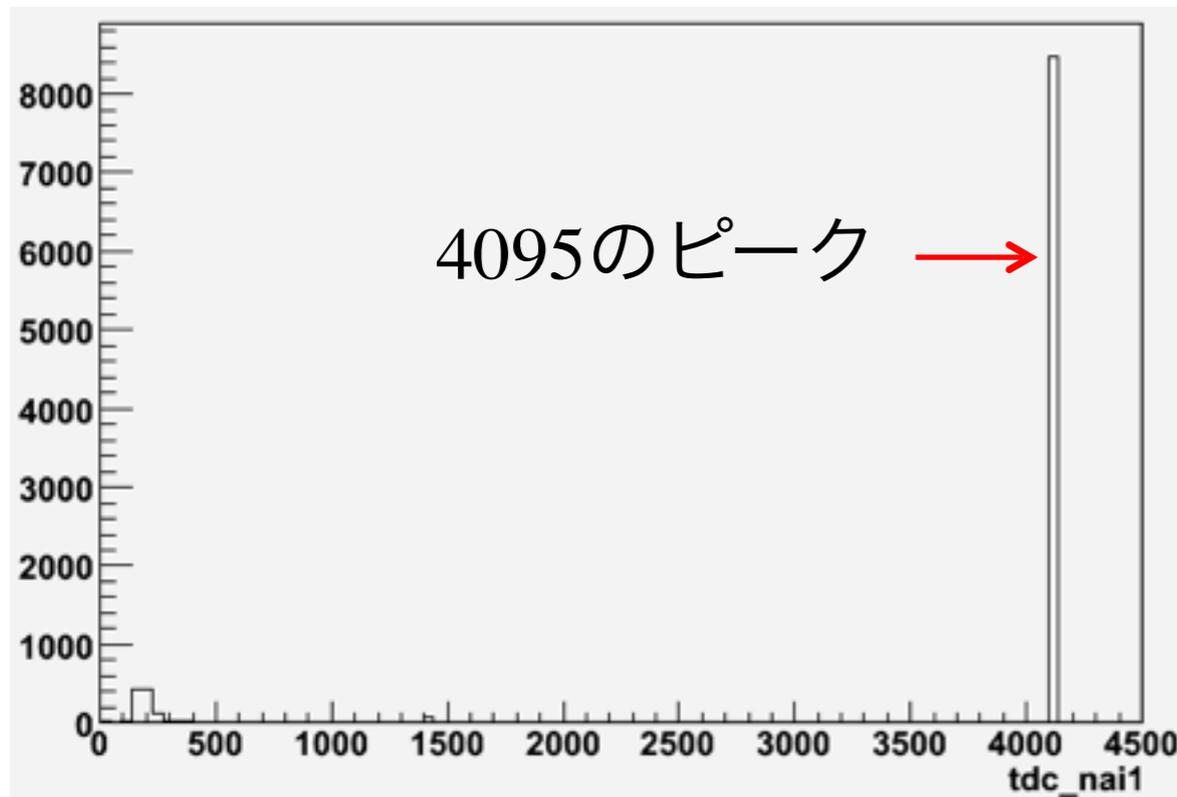


「ADC>150」の条件で  
ヒストグラムを書く

# 原因は？

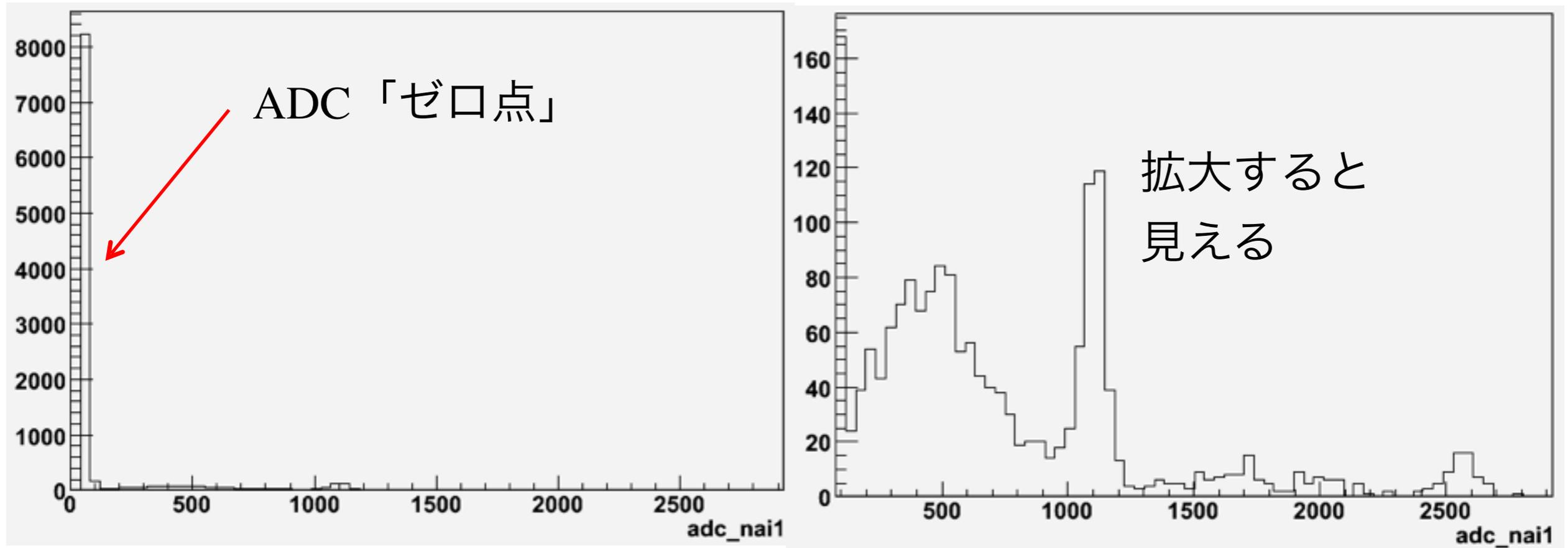
- ・ どうやら、信号のレートが高すぎる  
→PCで読み出す際に混ざってしまう！
- ・ Coincidenceのトリガーにvetoを入れることでレートを下げる
- ・ Coincidenceの信号を自らのトリガーのvetoに入れることで、一度Coincidenceから信号が出るとその後一定期間トリガーを出さなくなる。

# veto入れた後



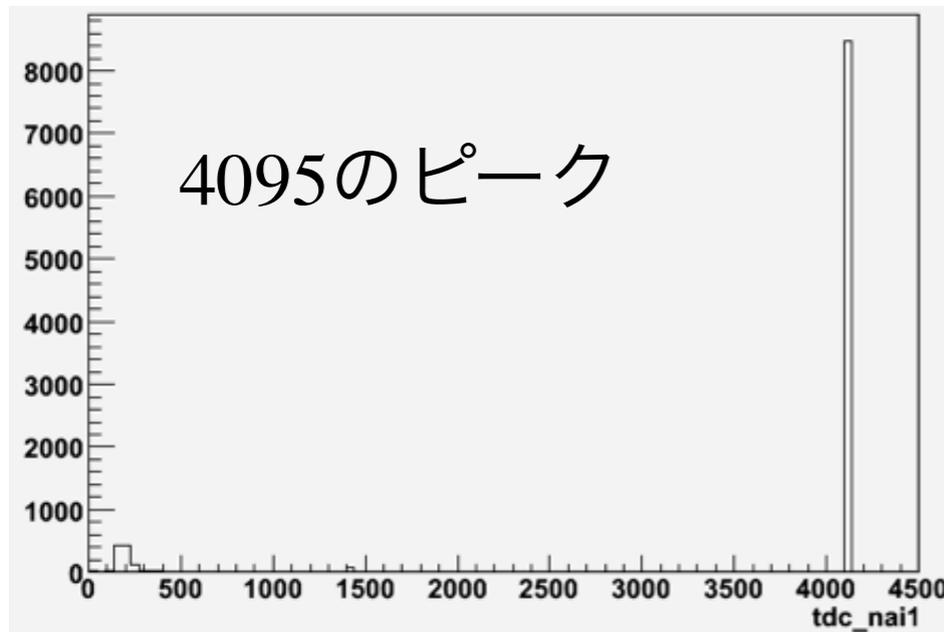
TDC生データ→見た目はほぼ一緒

# veto入れた後



ADC生データ→これもほぼ一緒

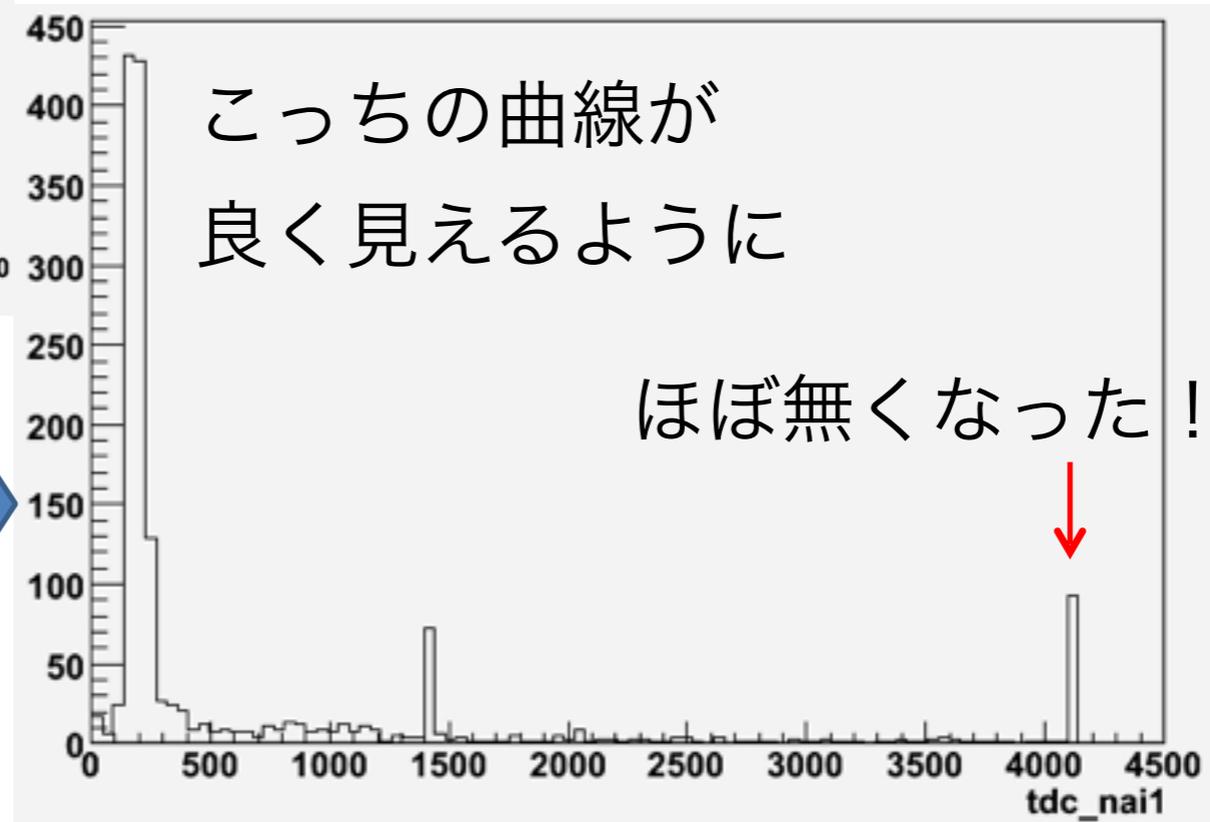
# veto入れた後



TDCとADCの値が対応！

→後述のADC-cut、t-Q補正等が  
可能になった！

「ADC>150」の条件で  
ヒストグラムを書く

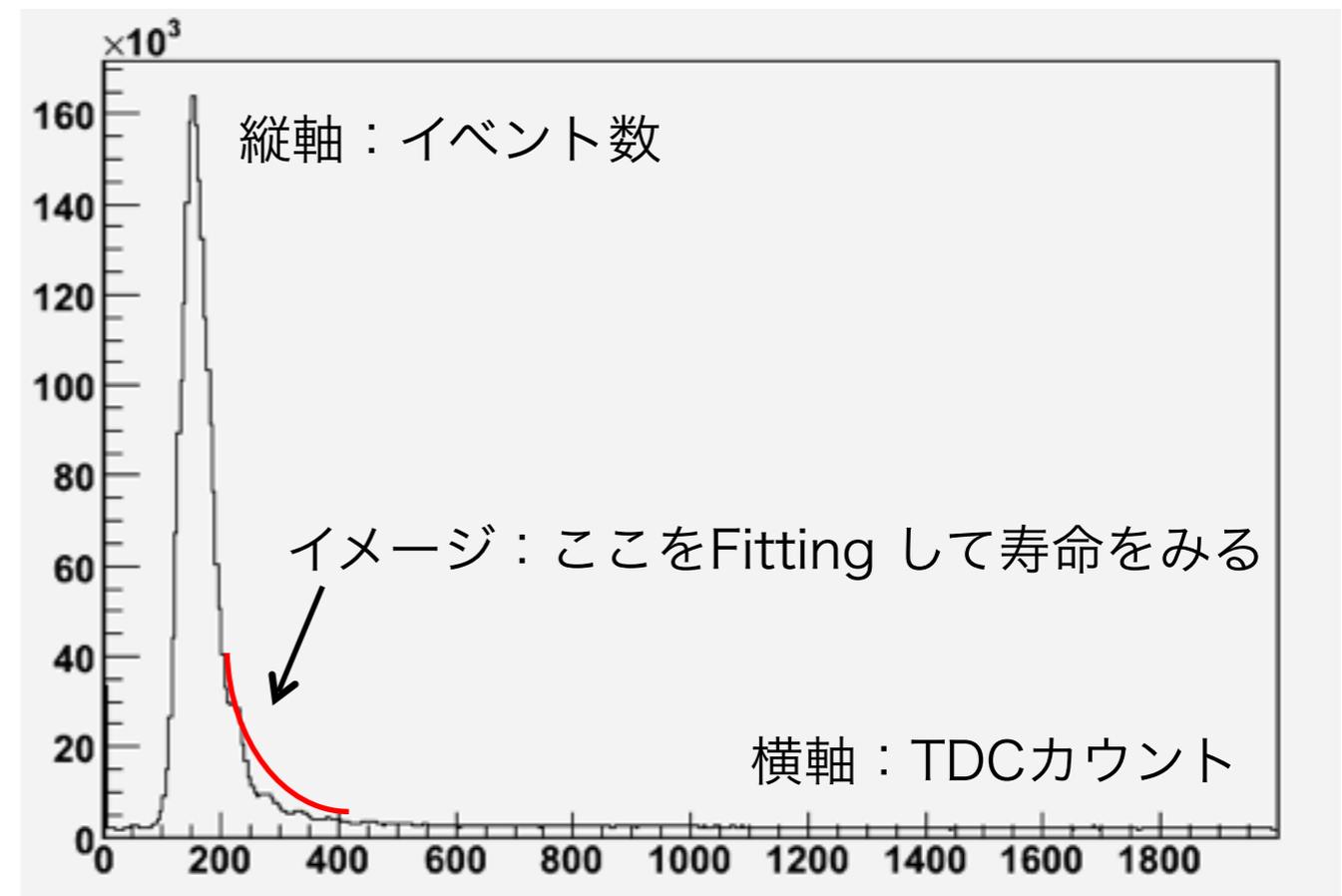


# 補正・解析

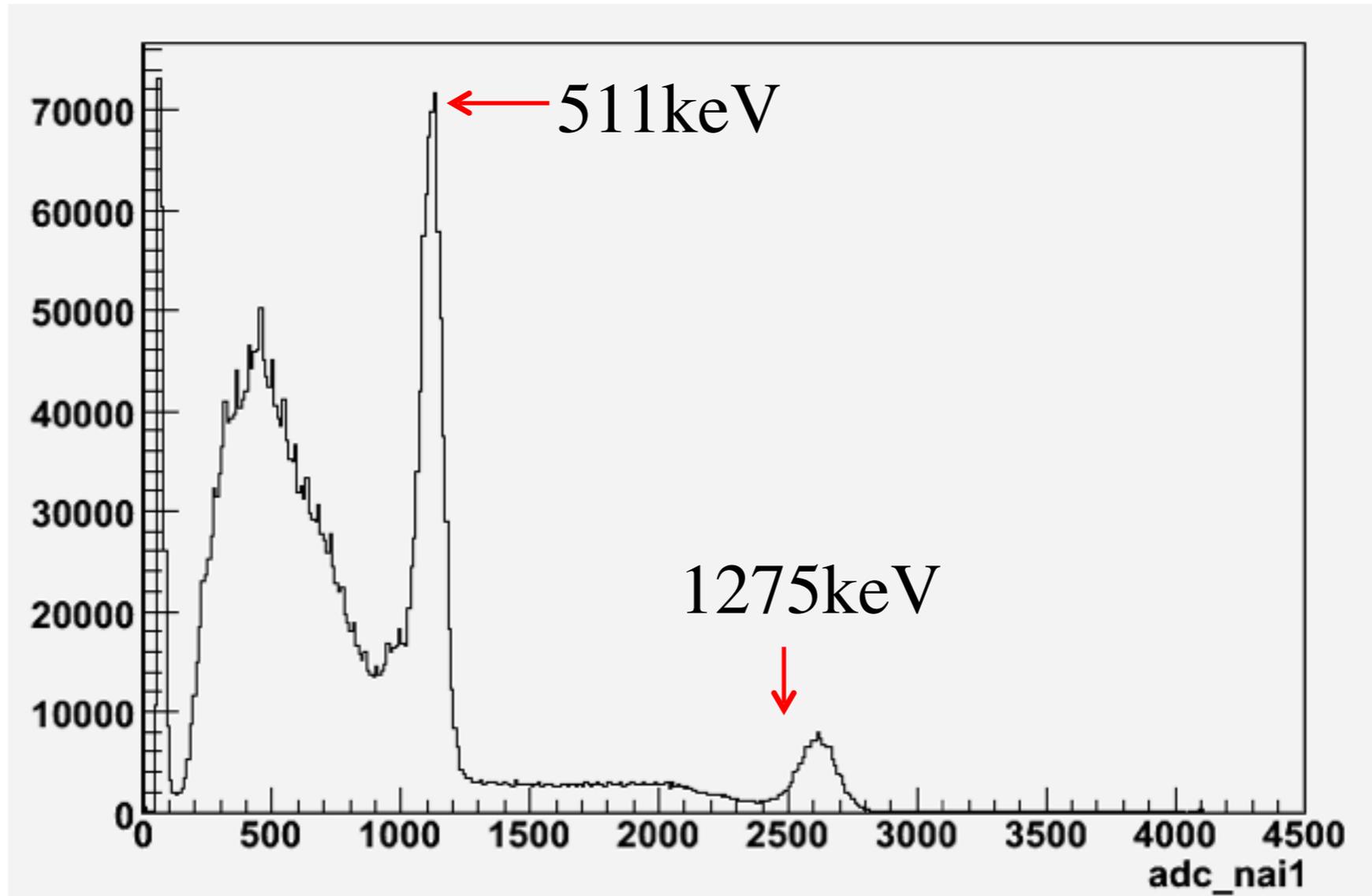
powered by  **ROOT**  
Data Analysis Framework

# 解析

- ・ 得られた生データ、1,000万イベント
- ・ このままでは $3\gamma$ の寿命が見えないので、データを処理

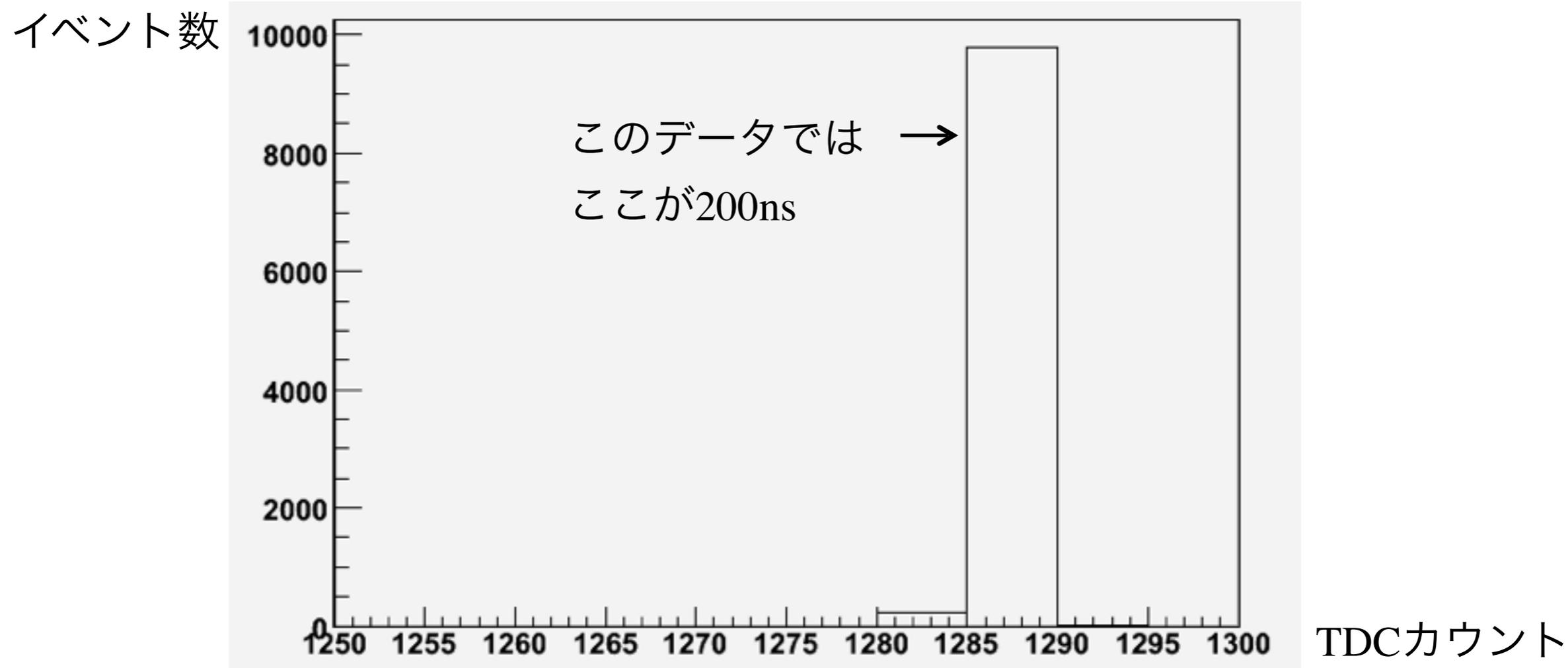


# ADCキャリブレーション



ADCの返す値がどのエネルギーに対応するか

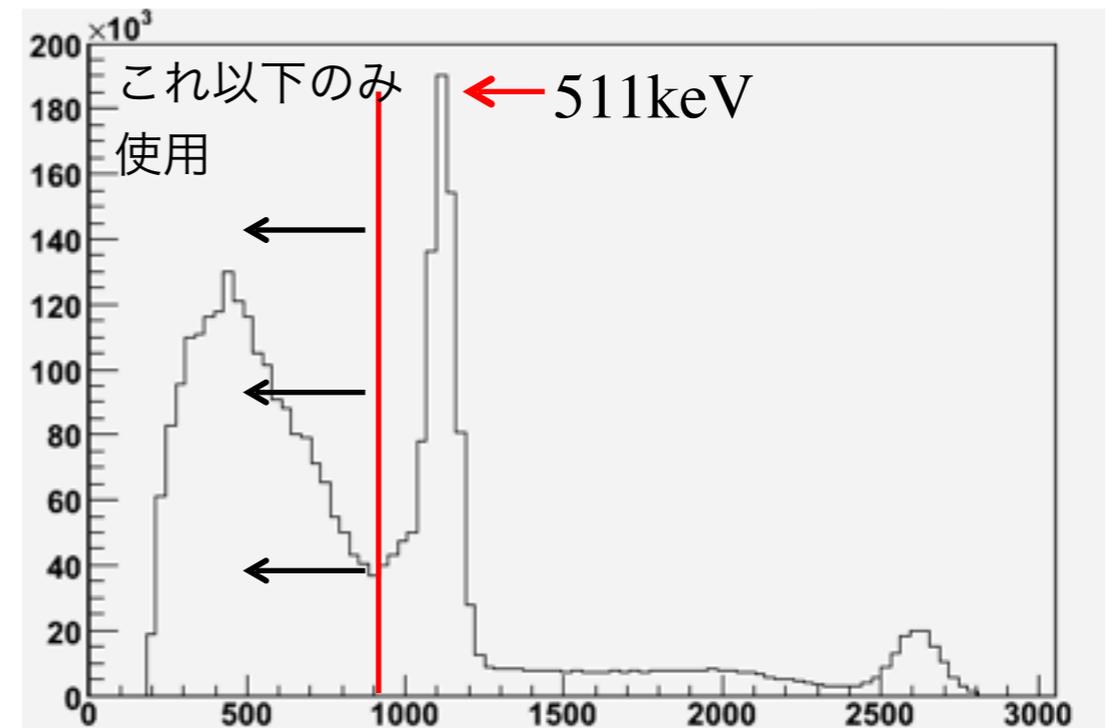
# TDCキャリブレーション



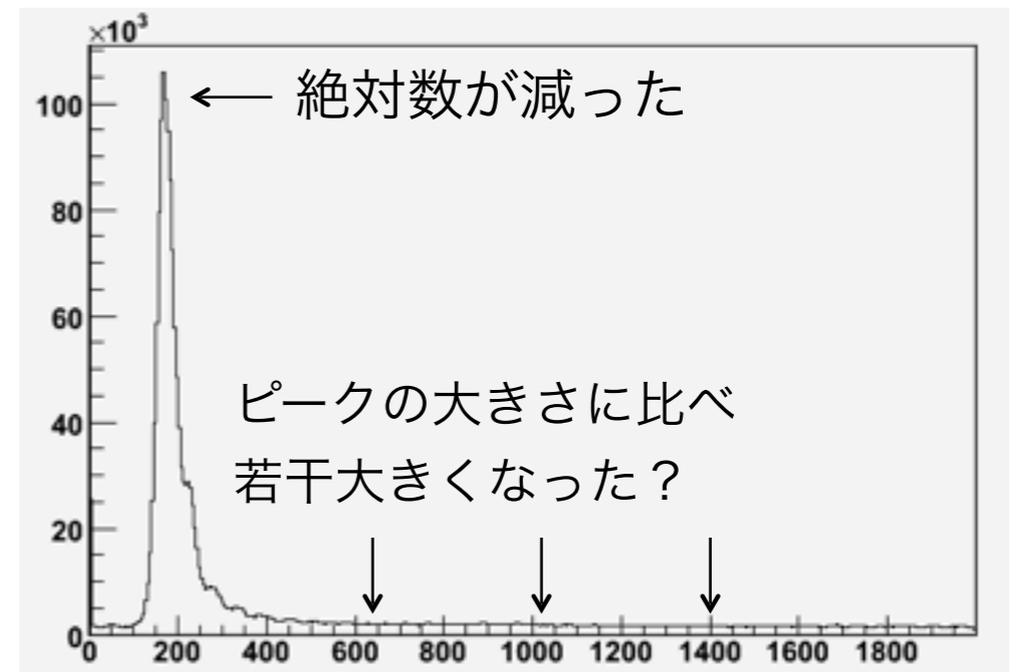
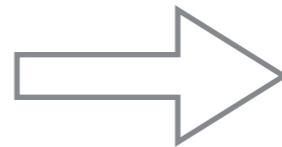
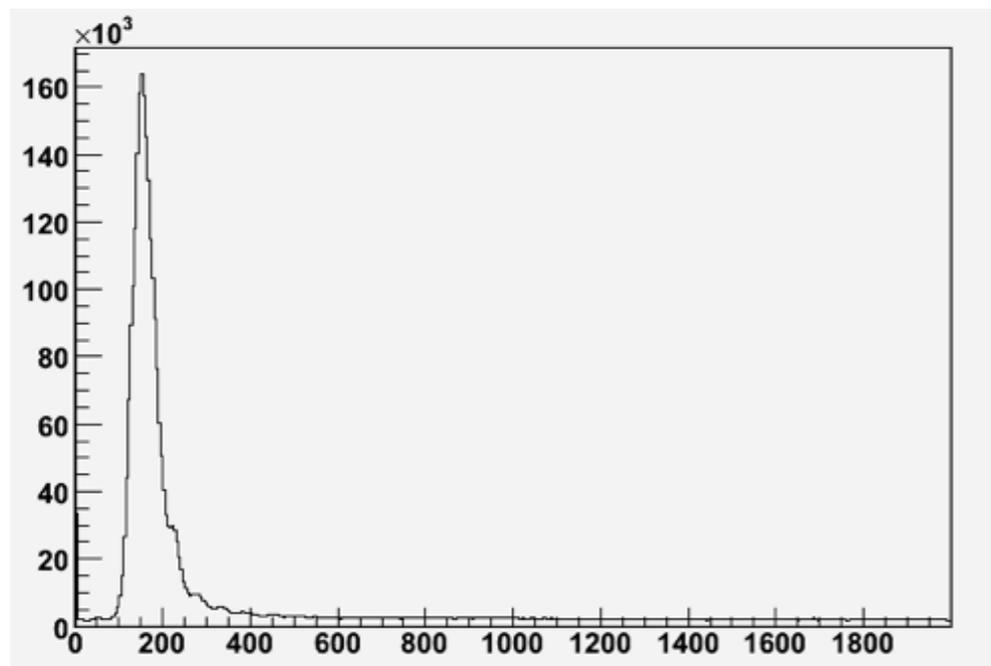
TDCカウントが何nsに対応するか

# データカット | ADC cut

- ・  $2\gamma$ 崩壊のエネルギーは 511 keV
- ・  $3\gamma$ 崩壊のエネルギーは 511 keV以下なので、ADCの値でcut



# データカット | ADC cut



Cut 前

Cut 後

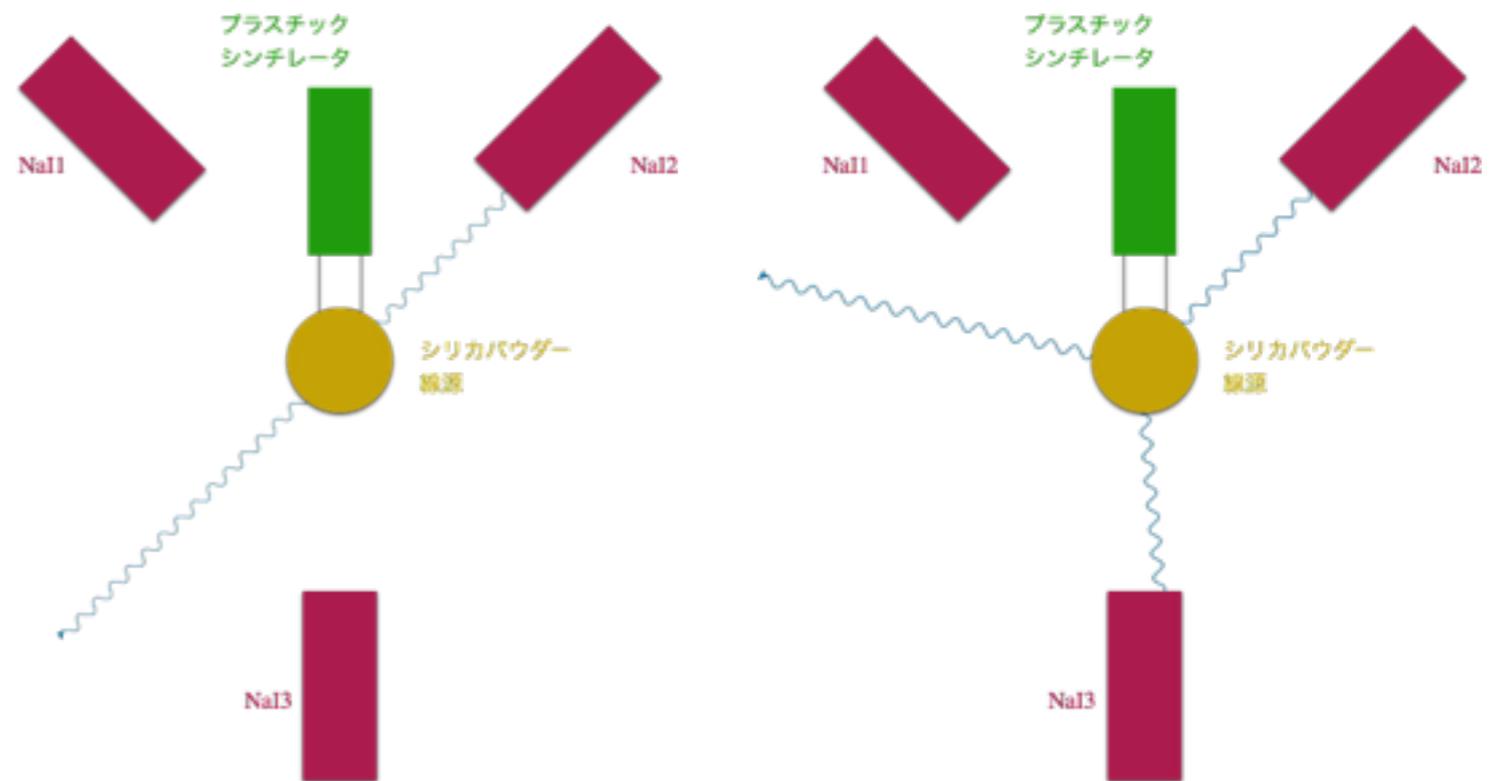
# データカット | TDC cut

- ・ (対角ではない)2つのNaIに同時に信号

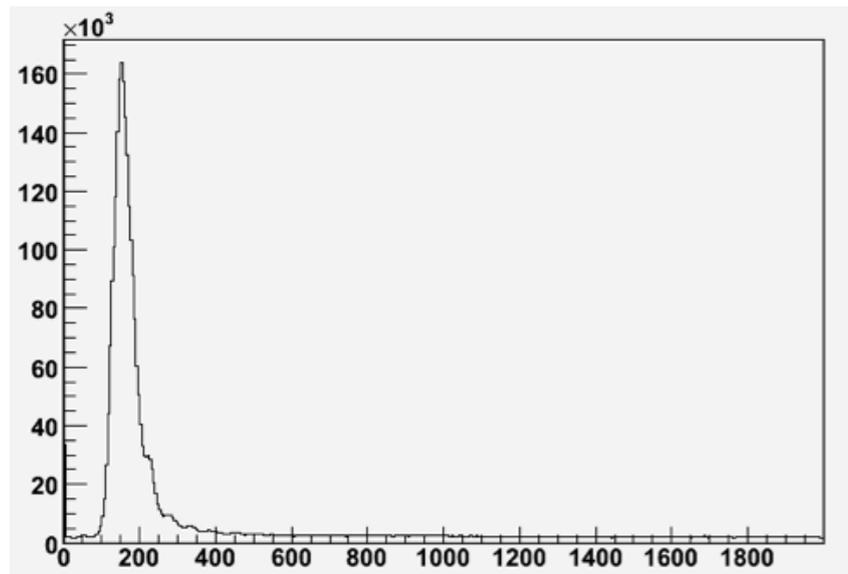
→ $3\gamma$ の確率高くなる

- ・ 3つ同時

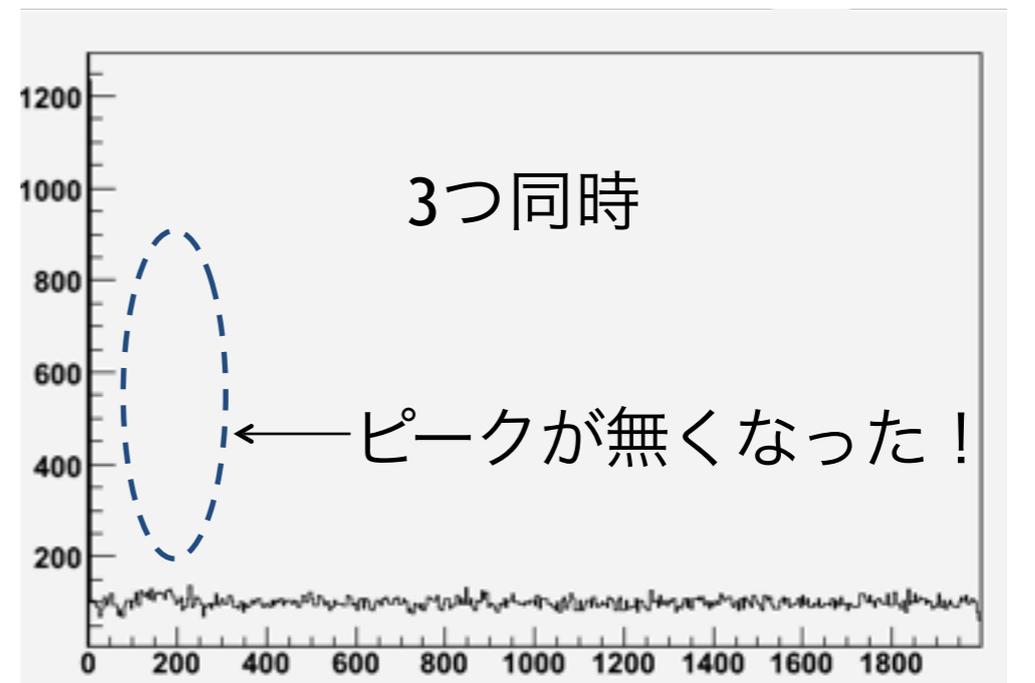
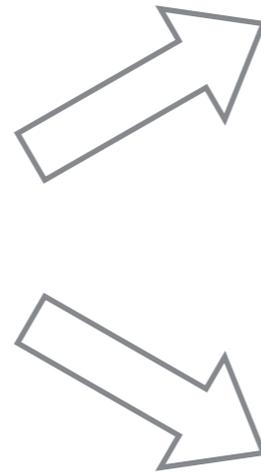
→ほぼ $3\gamma$ 崩壊か？



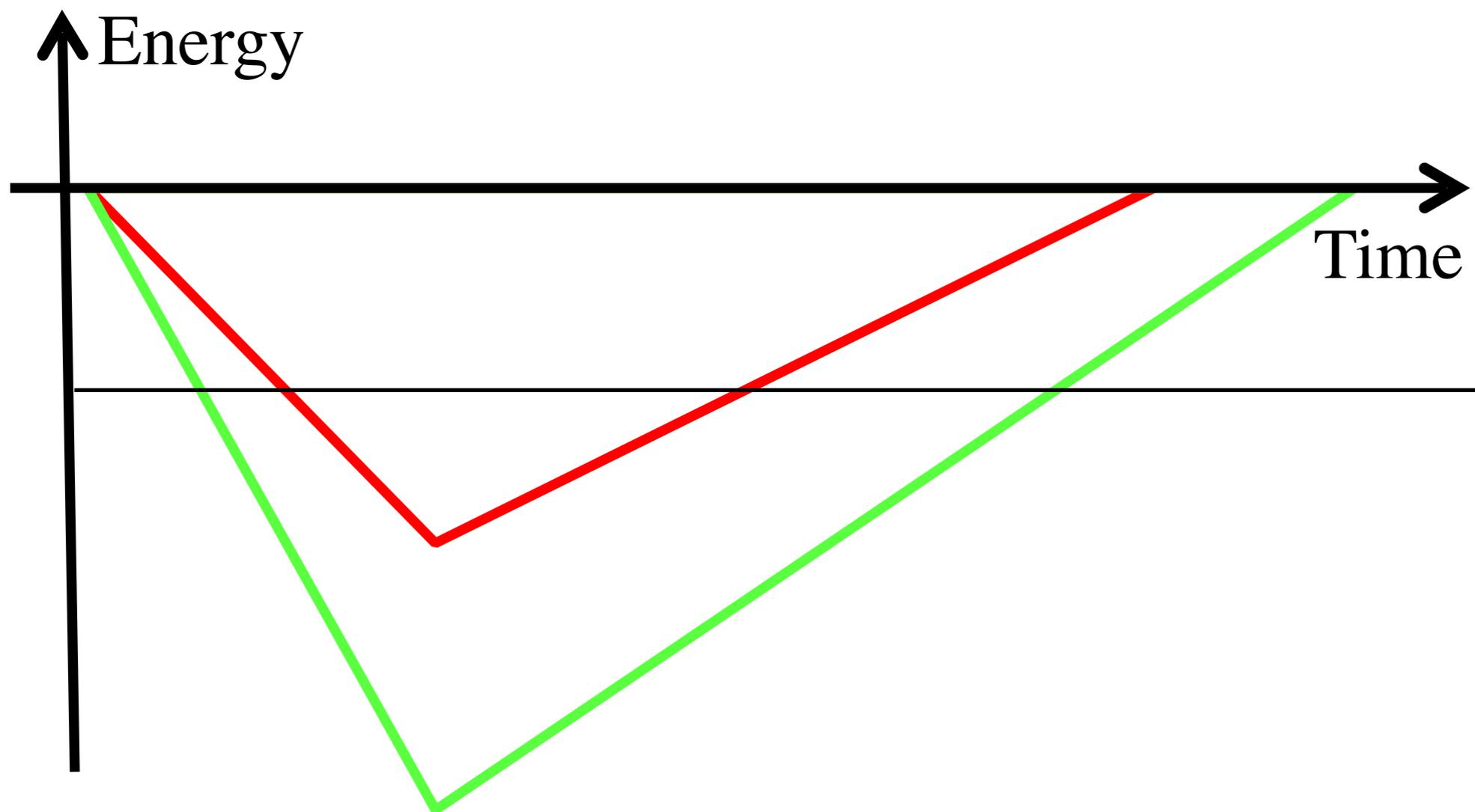
# データカット | TDC cut



Cut 前

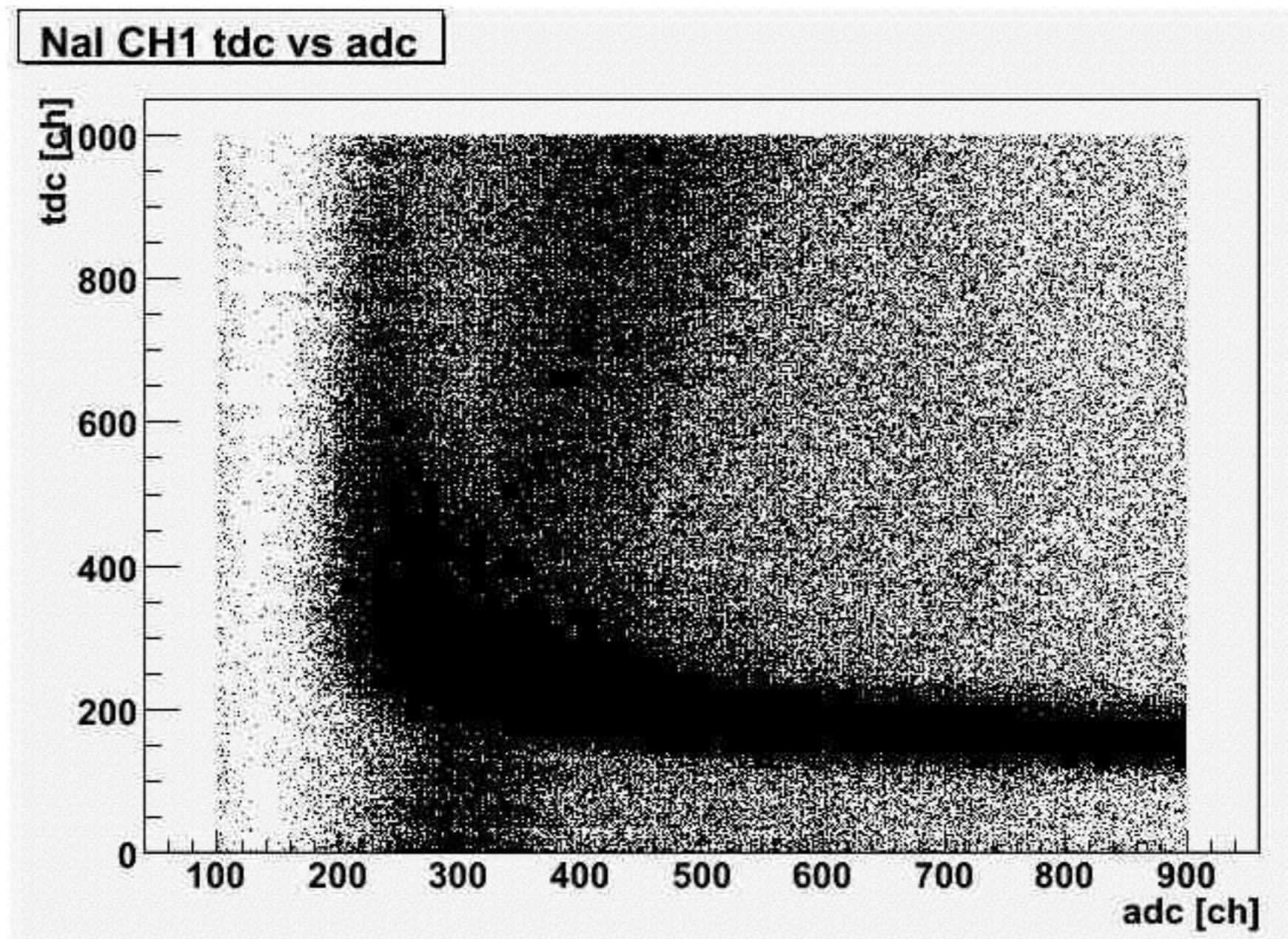


# t-Q 補正



エネルギー依存性を除去

# t-Q 補正前



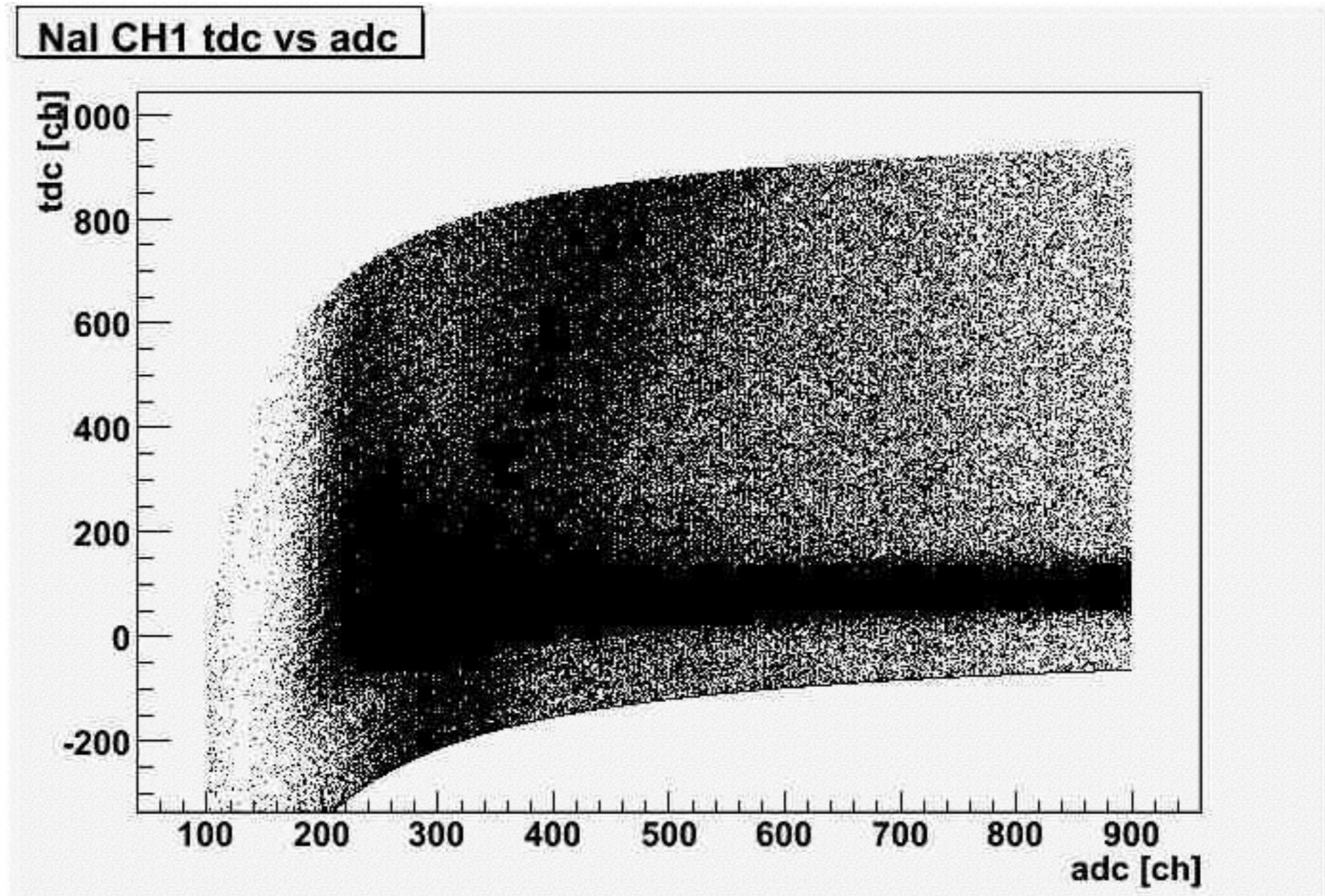
# t-Q 補正

フィット関数

$$y = \frac{a_0}{x + a_1} + a_2$$

y:tdc\_ch    x : adc\_ch

# t-Q 補正後



# 崩壊曲線

フィット関数 1

$$y = a_0 e^{-\frac{x}{a_1}} + a_2 e^{-\frac{x}{a_3}} + a_4$$

↑

パラ

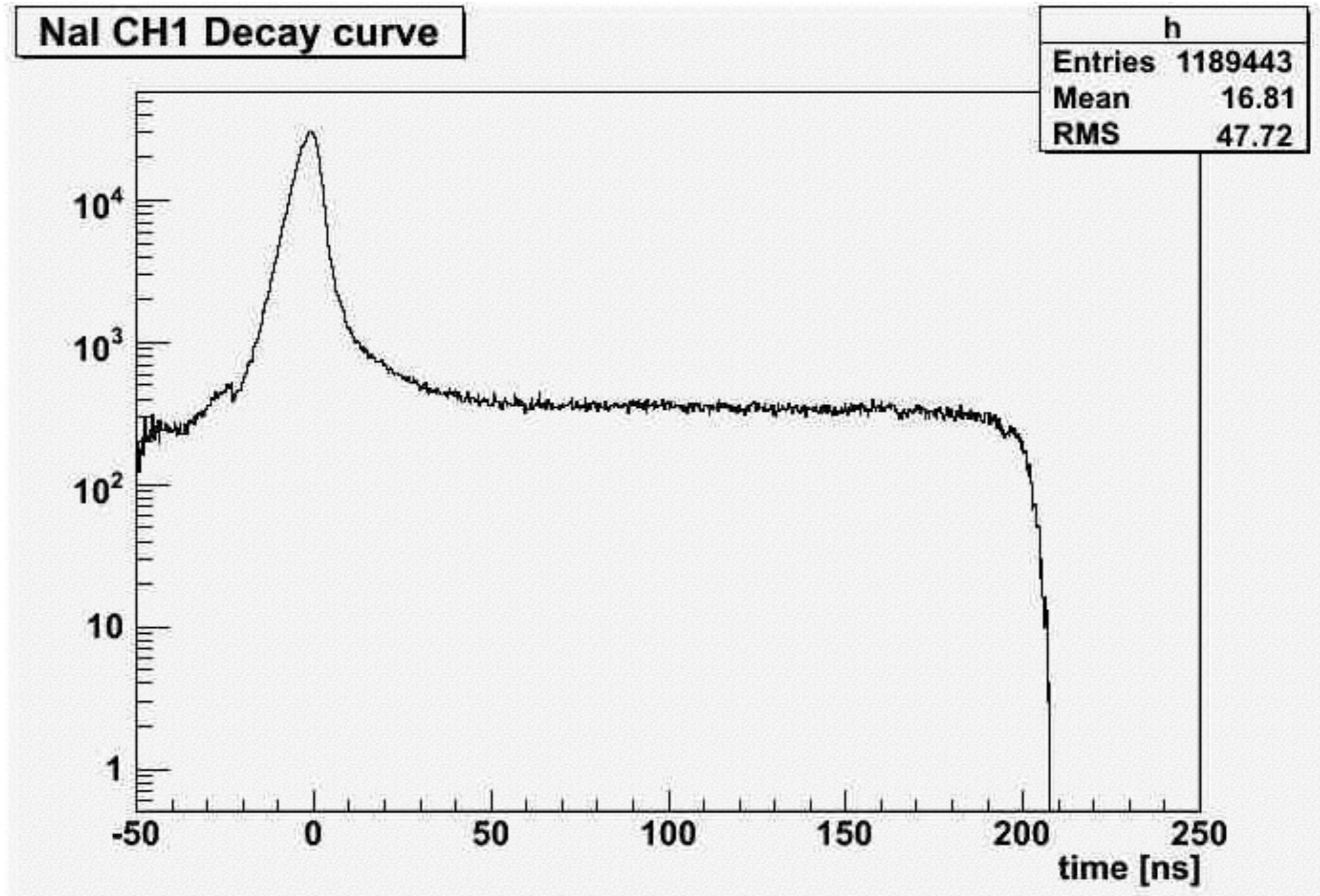
↑

オルソ

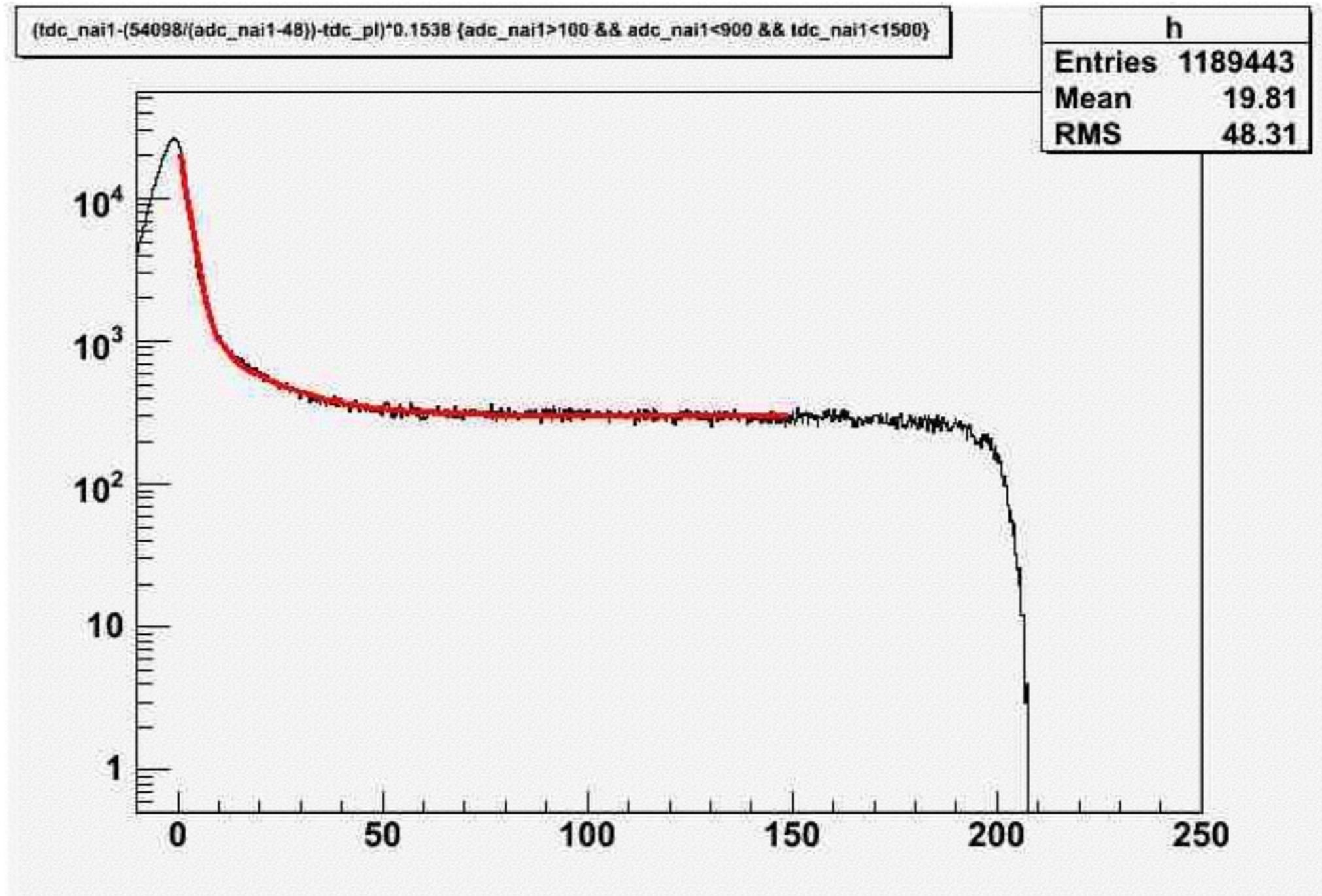
$a_1$  がパラポジトロニウムの寿命

$a_3$  がオルソポジトロニウムの寿命

# 崩壞曲線 | NaI Ch1



# 崩壞曲線 | NaI Ch1



# パラメータ

	値	誤差
<b><math>a_1</math></b>	<b><math>2.03628e+0</math></b>	<b><math>7.10552e-3</math></b>
<b><math>a_3</math></b>	<b><math>1.52488e+1</math></b>	<b><math>2.53817e-1</math></b>

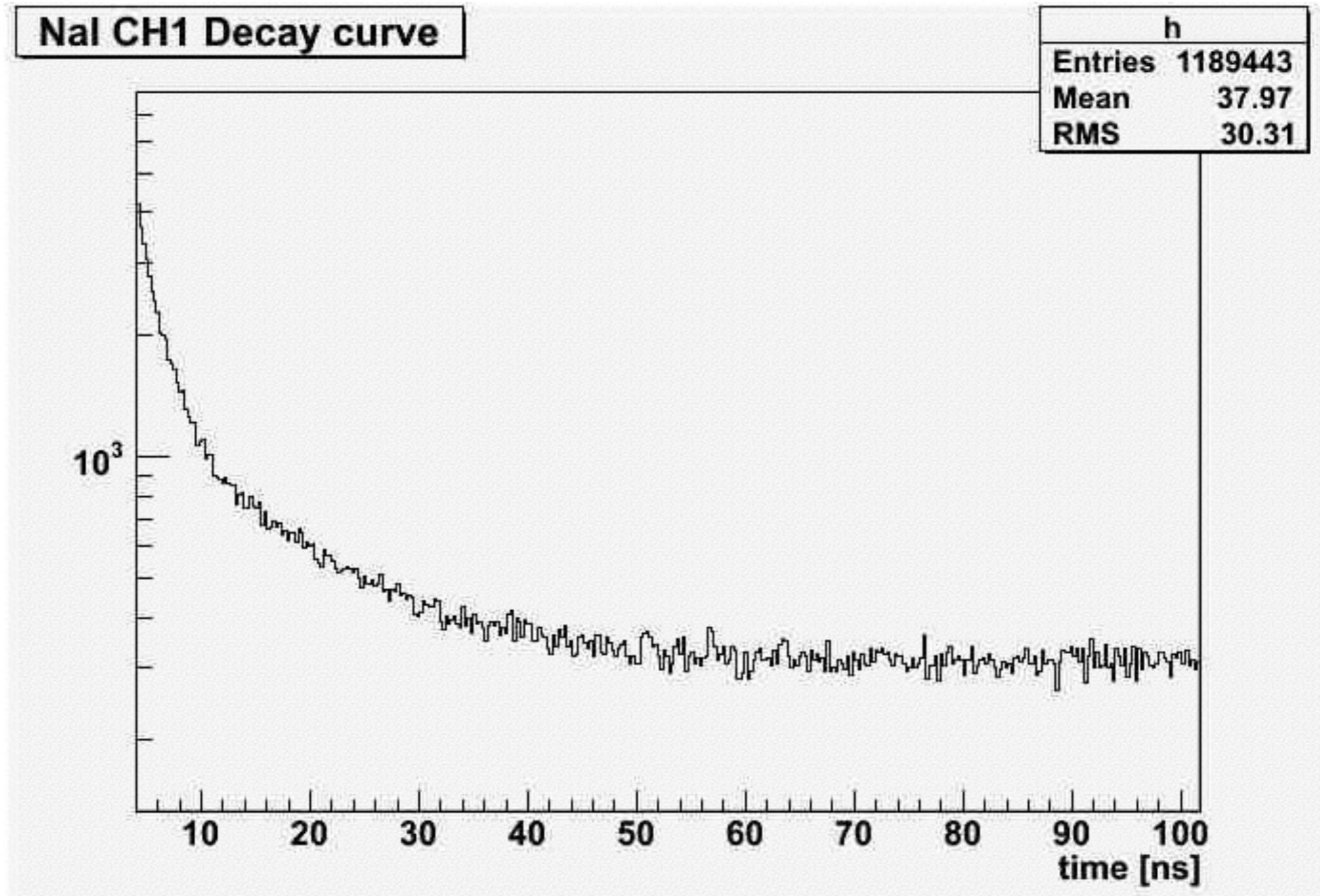
# 崩壊曲線

フィット関数

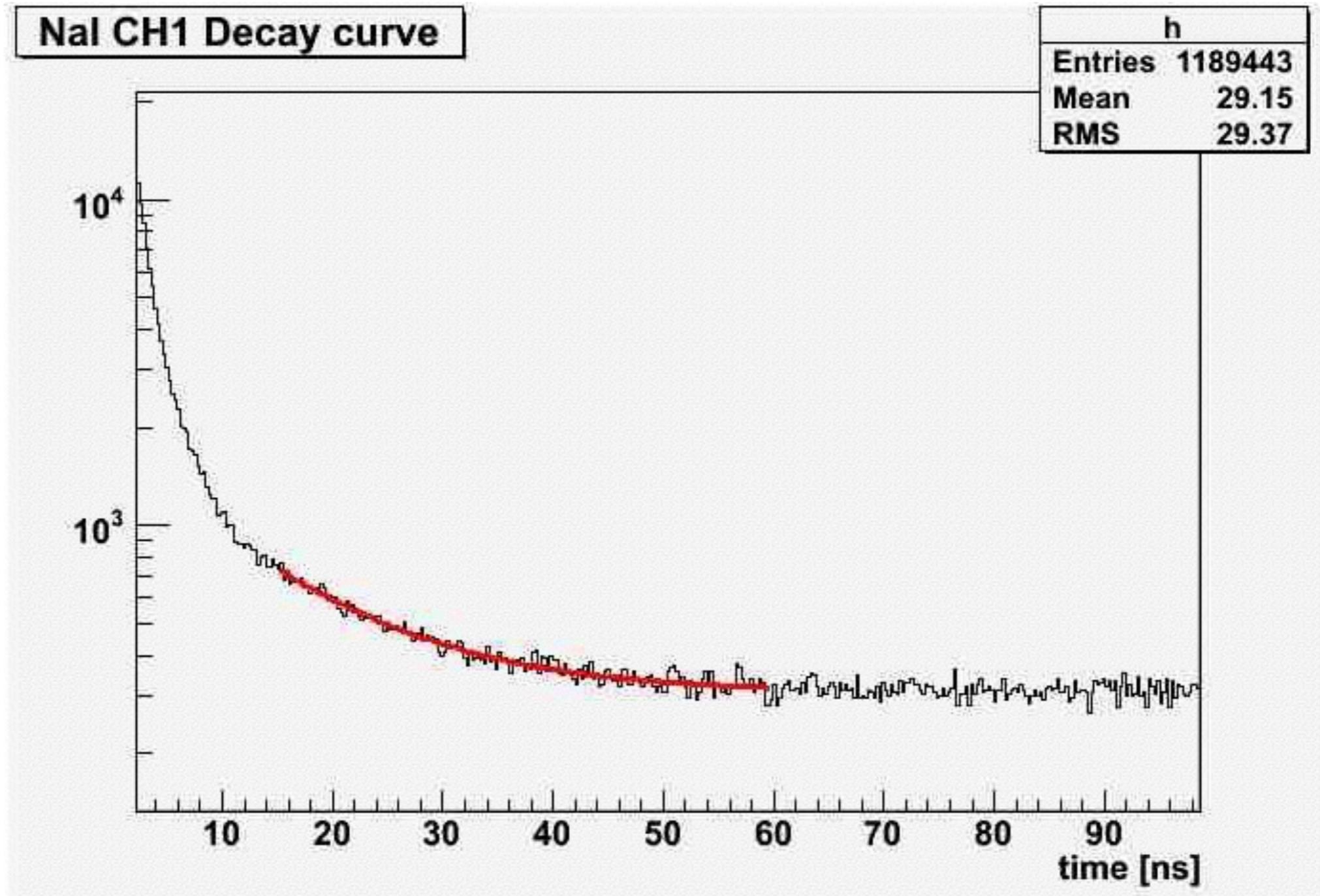
$$y = a_0 e^{-\frac{x}{a_1}} + a_2$$

$a_1$  がオルソポジトロニウムの寿命

# 崩壞曲線 | NaI Ch1



# 崩壞曲線 | NaI Ch1



# パラメータ

	値	誤差
<b><i>a1</i></b>	<b><i>1.21963e+1</i></b>	<b><i>4.98304e-1</i></b>

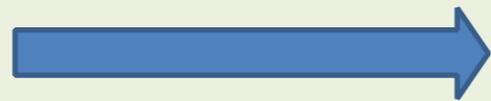
# 結果 | 寿命はいくらか？

<b>NaI</b>	<b>値</b>	<b>誤差</b>
<b>1</b>	<b><math>1.21963e+1</math></b>	<b><math>4.98304e-1</math></b>
<b>2</b>	<b><math>1.46564e+1</math></b>	<b><math>2.24006e-1</math></b>
<b>3</b>	<b><math>1.11985e+2</math></b>	<b><math>2.41116e+1</math></b>

考察

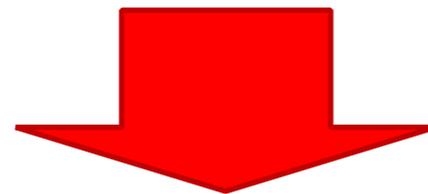
# まとめ

磁場中での寿命曲線の振動



観測できず

目標を



変更

真空中でのO-Psの寿命測定



満足な結果得られず

# 考察 | 寿命

3 $\gamma$  decayの寿命が短く測定された…

## 原因

2 $\gamma$  decayのeventをカットしきれなかった？

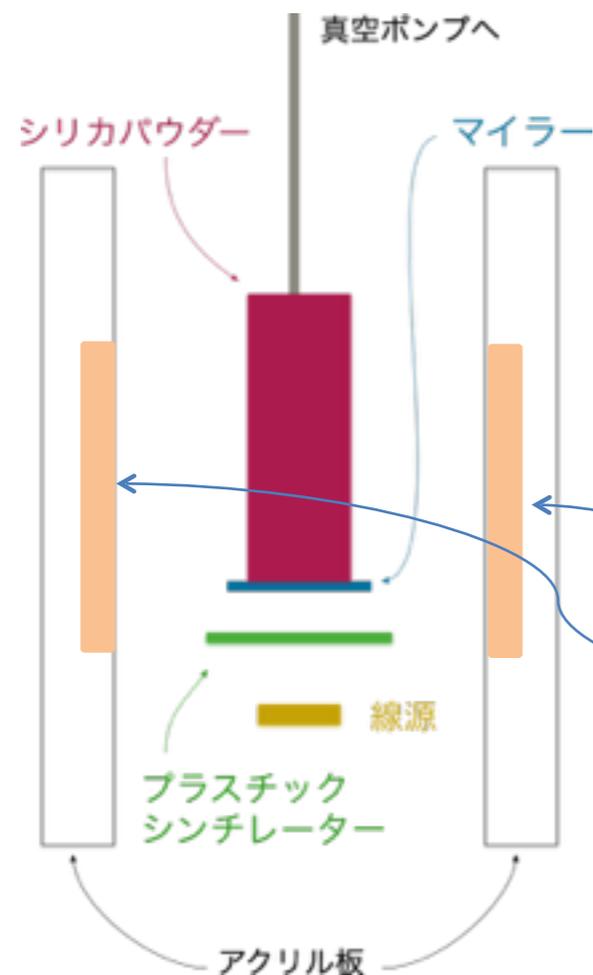
〔 Compton散乱でエネルギーを失った2 $\gamma$ 由来の  
 $\gamma$ 線が511keV以下に含まれているかも 〕

膨大な数のデータをとってNaIが3本同時に $\gamma$ 線を検出するeventだけを抽出すれば3 $\gamma$ の割合が多くなるだろう（ただし、event数は相当減る）

# 考察 | 振動

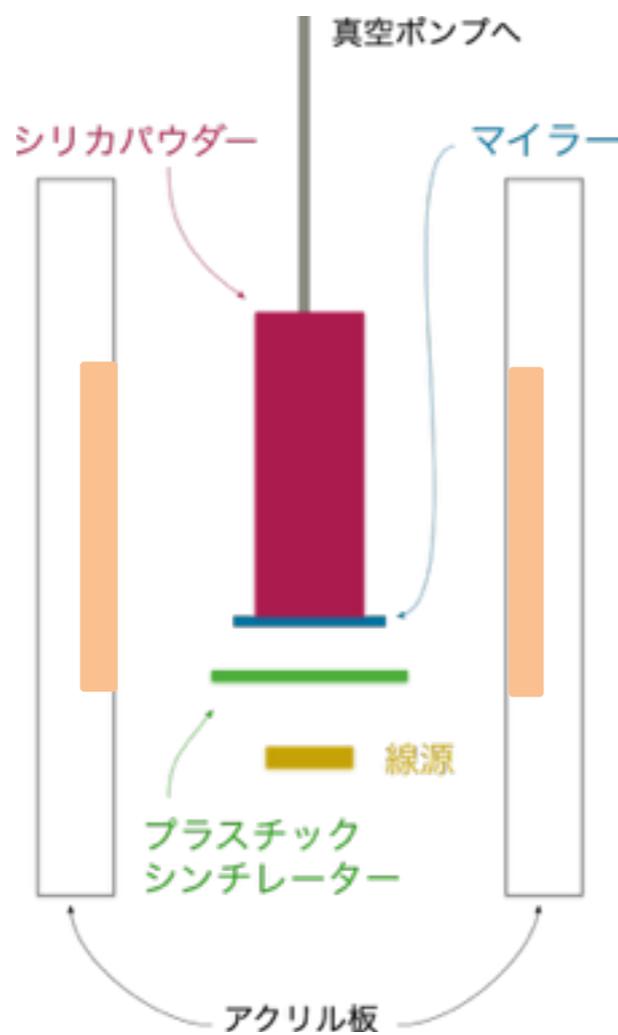
磁場中での寿命曲線が振動しなかった…

そもそもこのセットアップで測れるのだろうか？



元々この位置に  
NdFeB磁石(Φ50×5mm)を  
入れる予定であった

# 考察 | 振動



磁石の作る磁場を測定

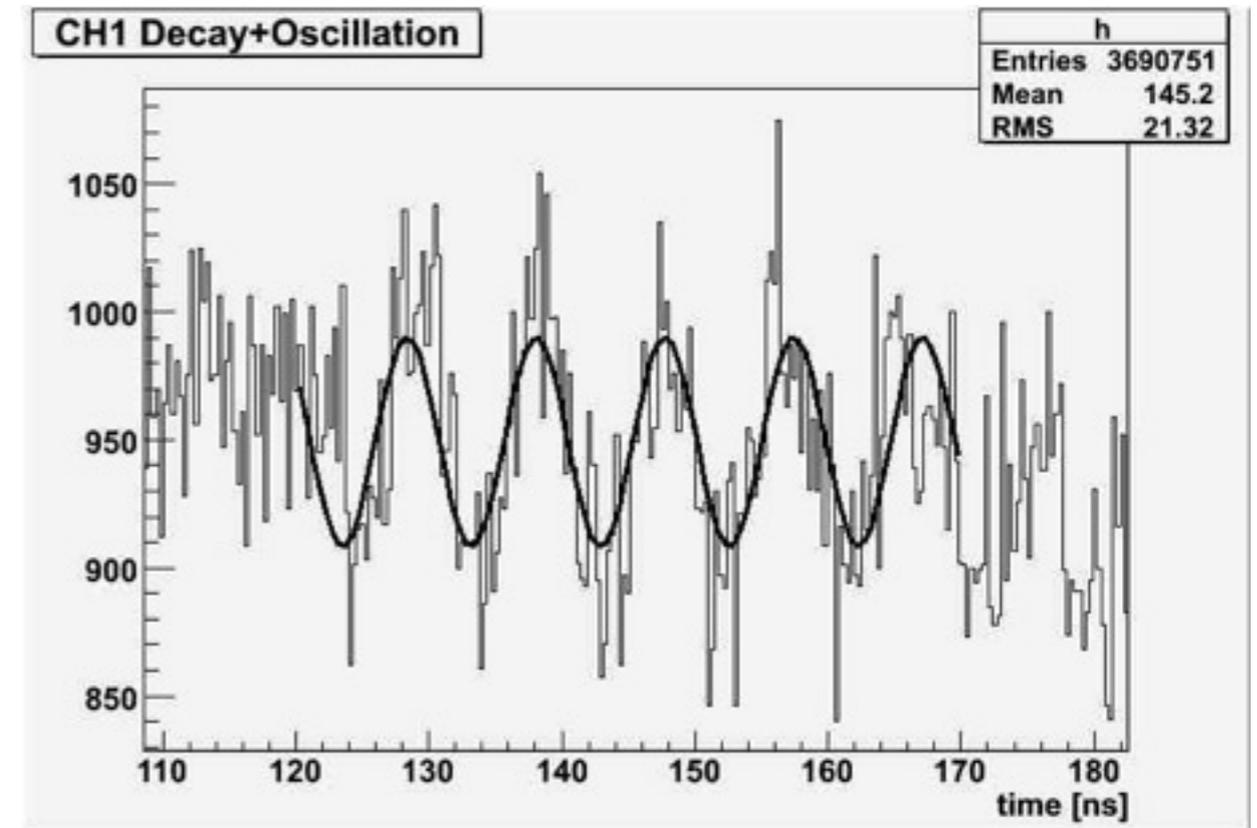
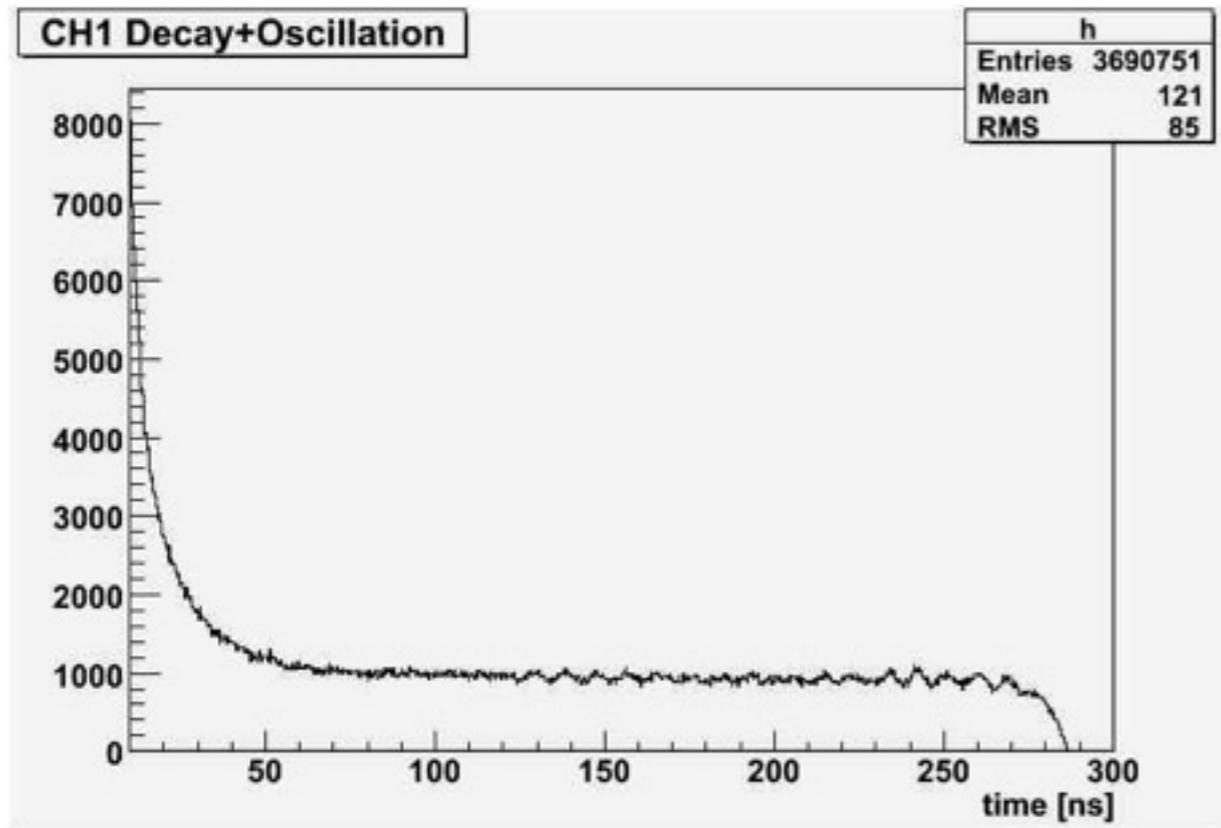
→  $\sim 10\text{mT}$

このときの振動周期は  
 $\sim 2.6\mu\text{s}$  (理論値)

一方、この回路では  
 $\sim 300\text{ns}$ まで測定可能

.....振動がゆるやかすぎて見えない！

# 考察 | 振動



いかにもそれっぽいが、振動の周期が10nsくらいなので  
実は関係ない

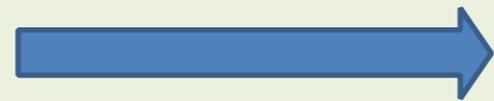
# 考察 | 全体として

モジュールの不具合が多数！

これは悲劇である

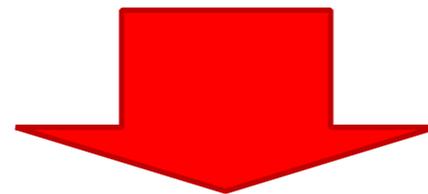
# まとめ

磁場中での寿命曲線の振動



観測できず

目標を



変更

真空中でのO-Psの寿命測定



満足な結果得られず