

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

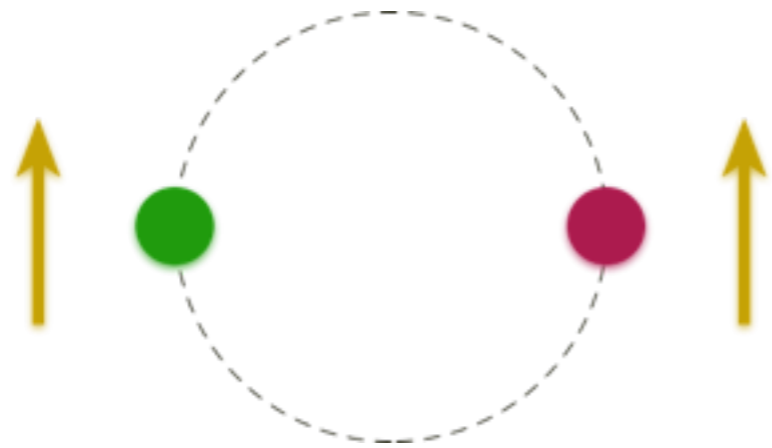
本実験の目的

- ・ 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 γ 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

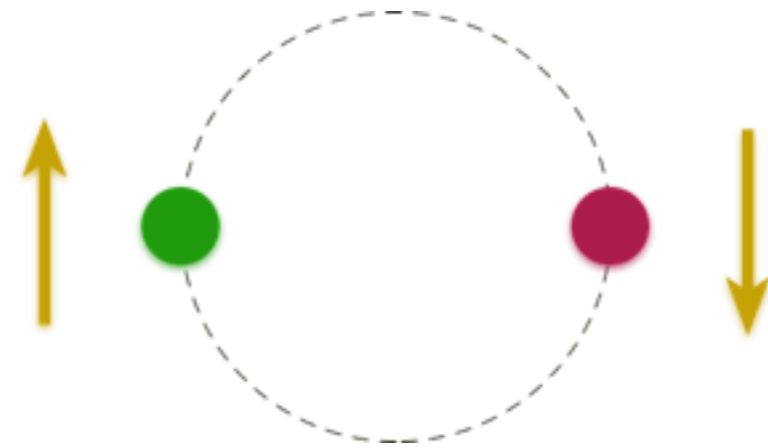
理論

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

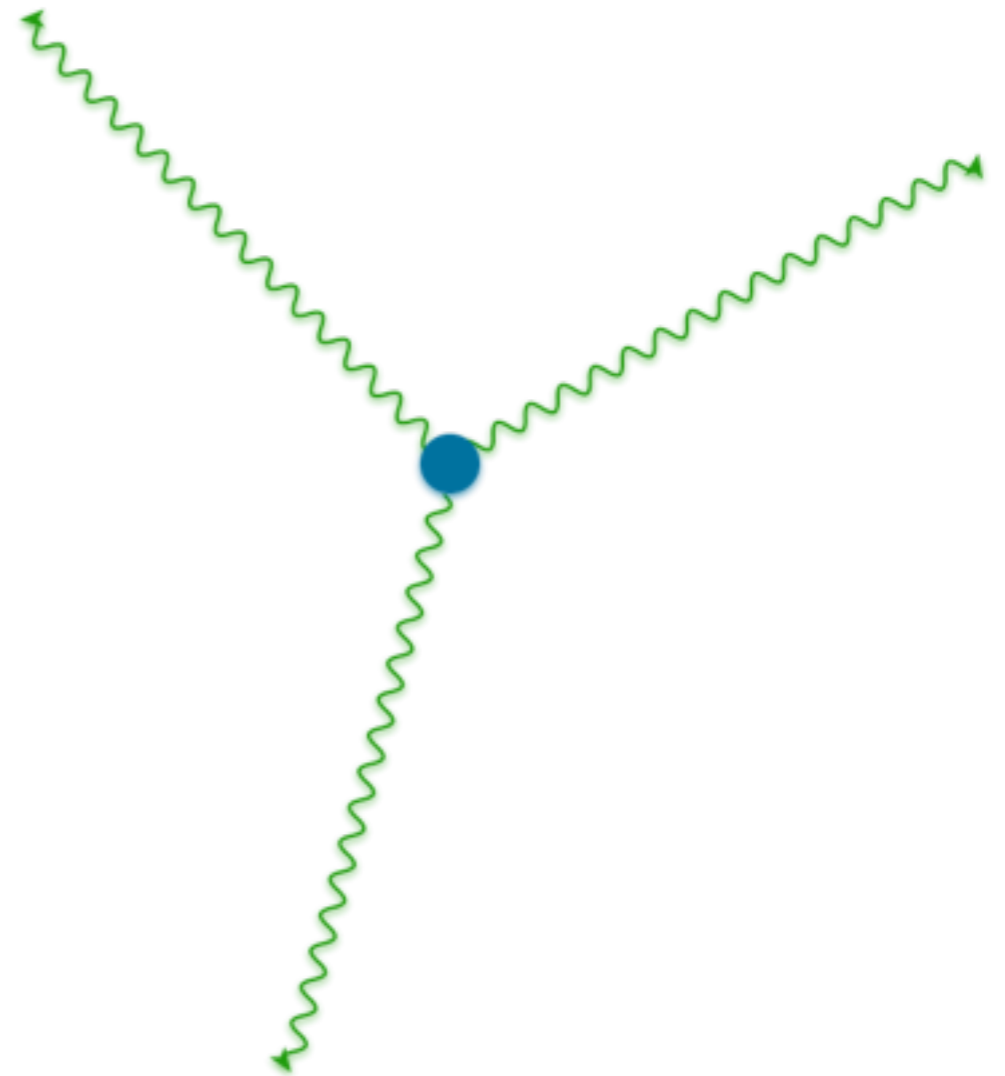


パラポジトロニウム

- 電子・陽電子対消滅により有限の寿命で γ 線に崩壊する準安定な状態

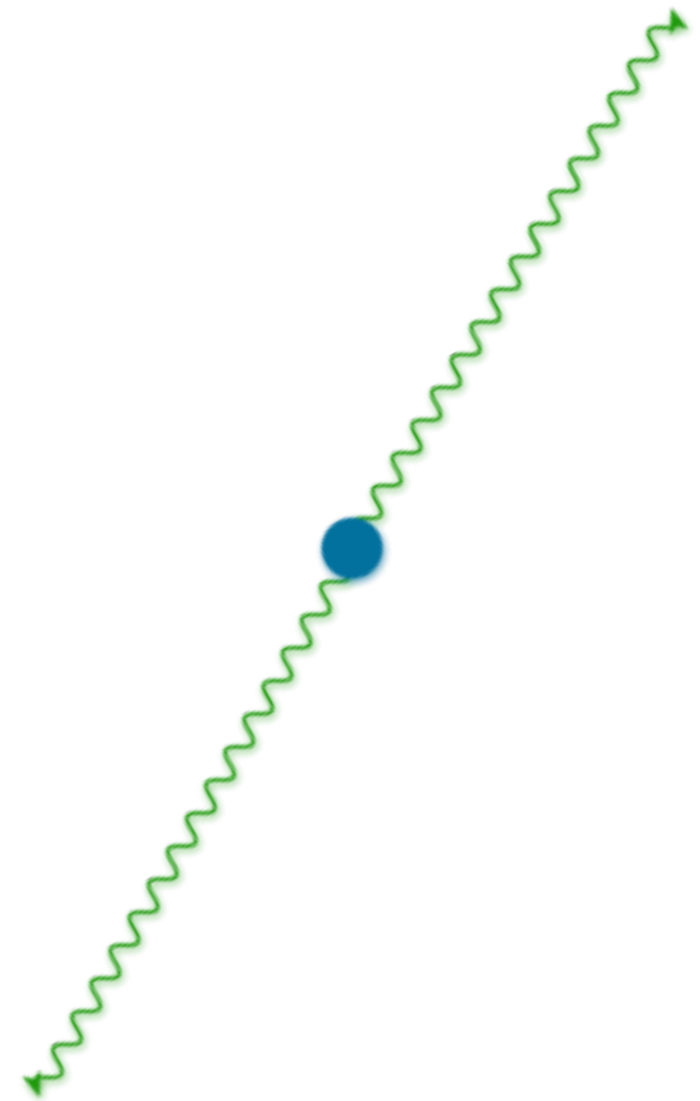
オルソポジトロニウムの崩壊

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

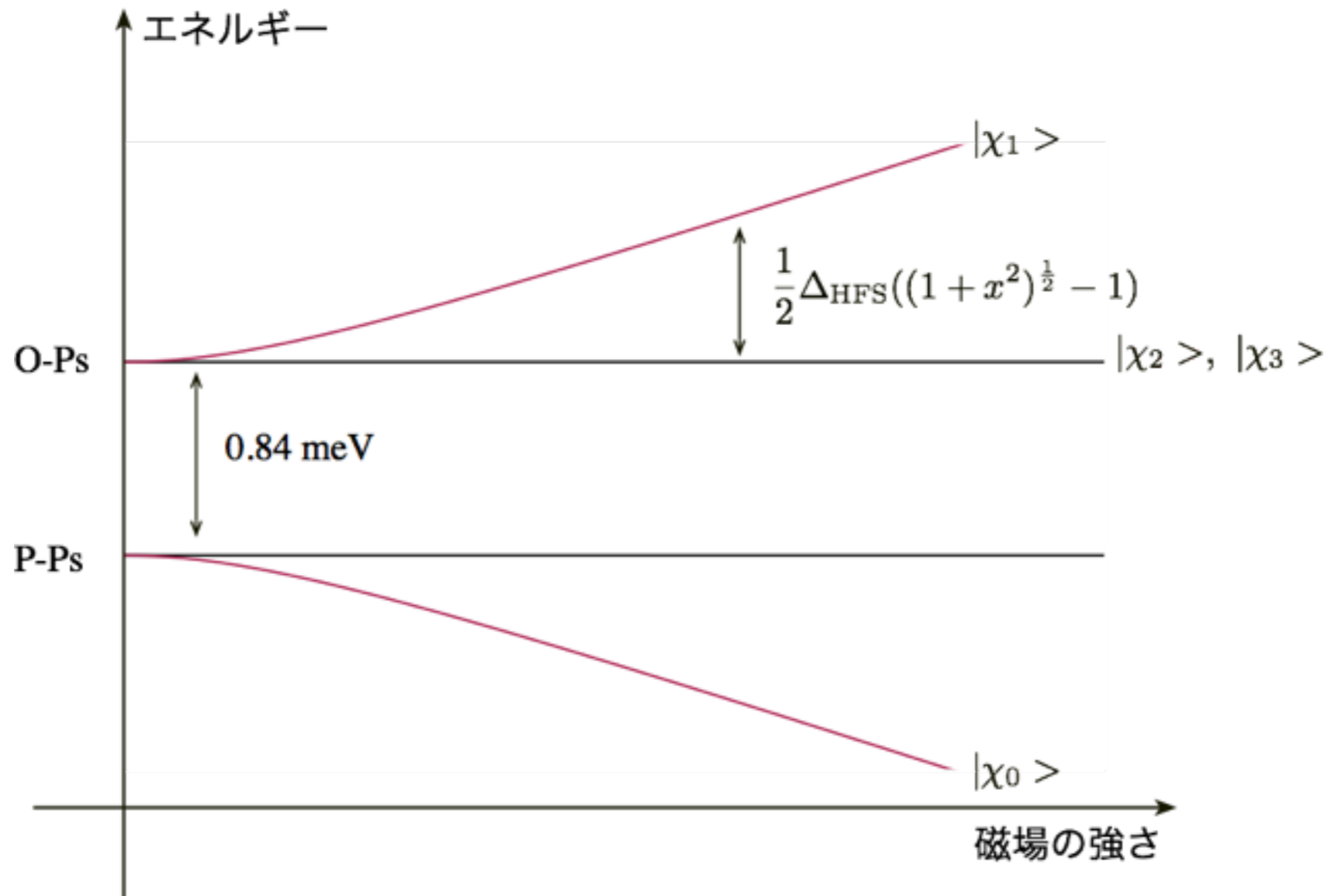


パラポジトロニウムの崩壊

- ・ 荷電共役対称性から、
偶数個の γ 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

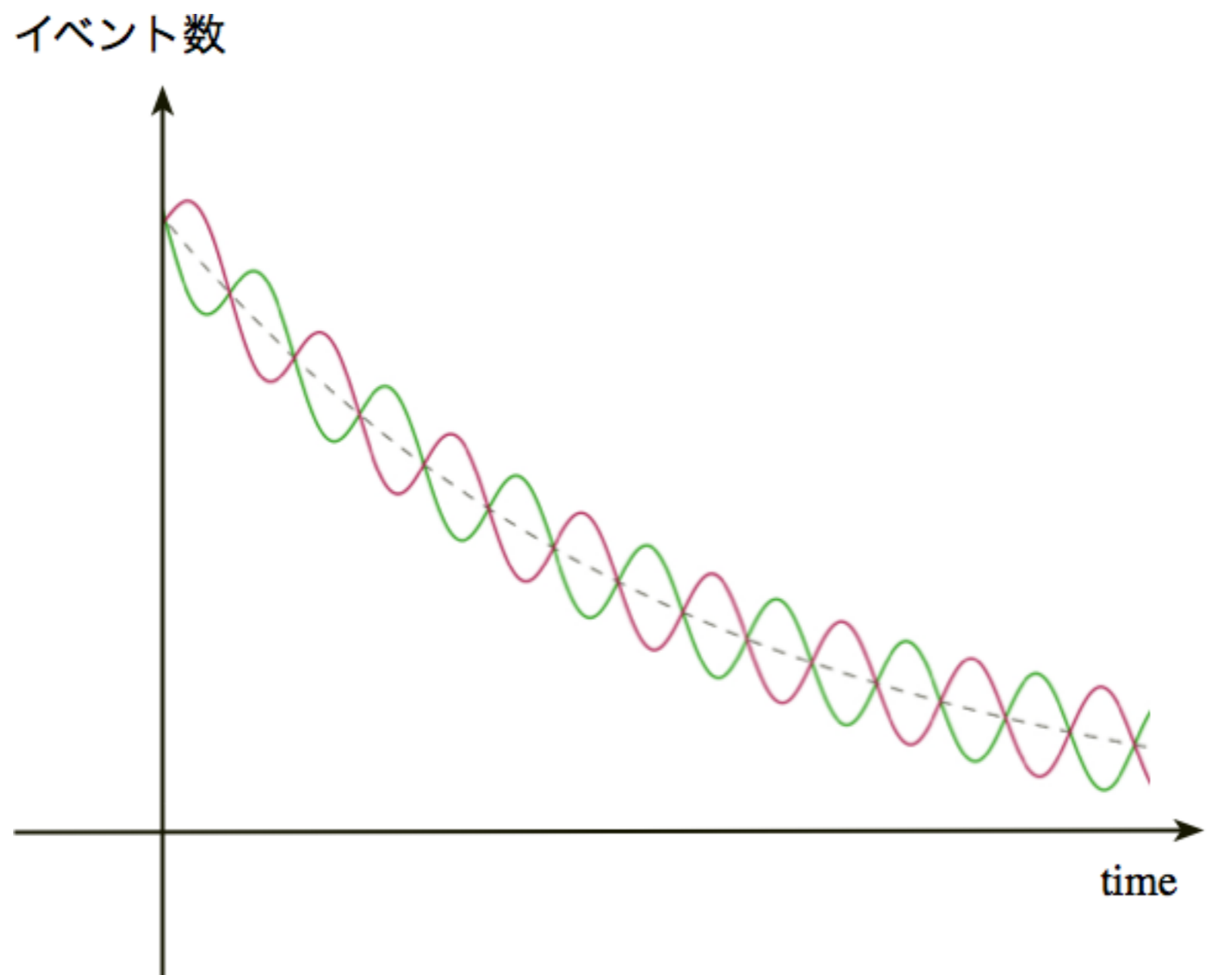


磁場の効果

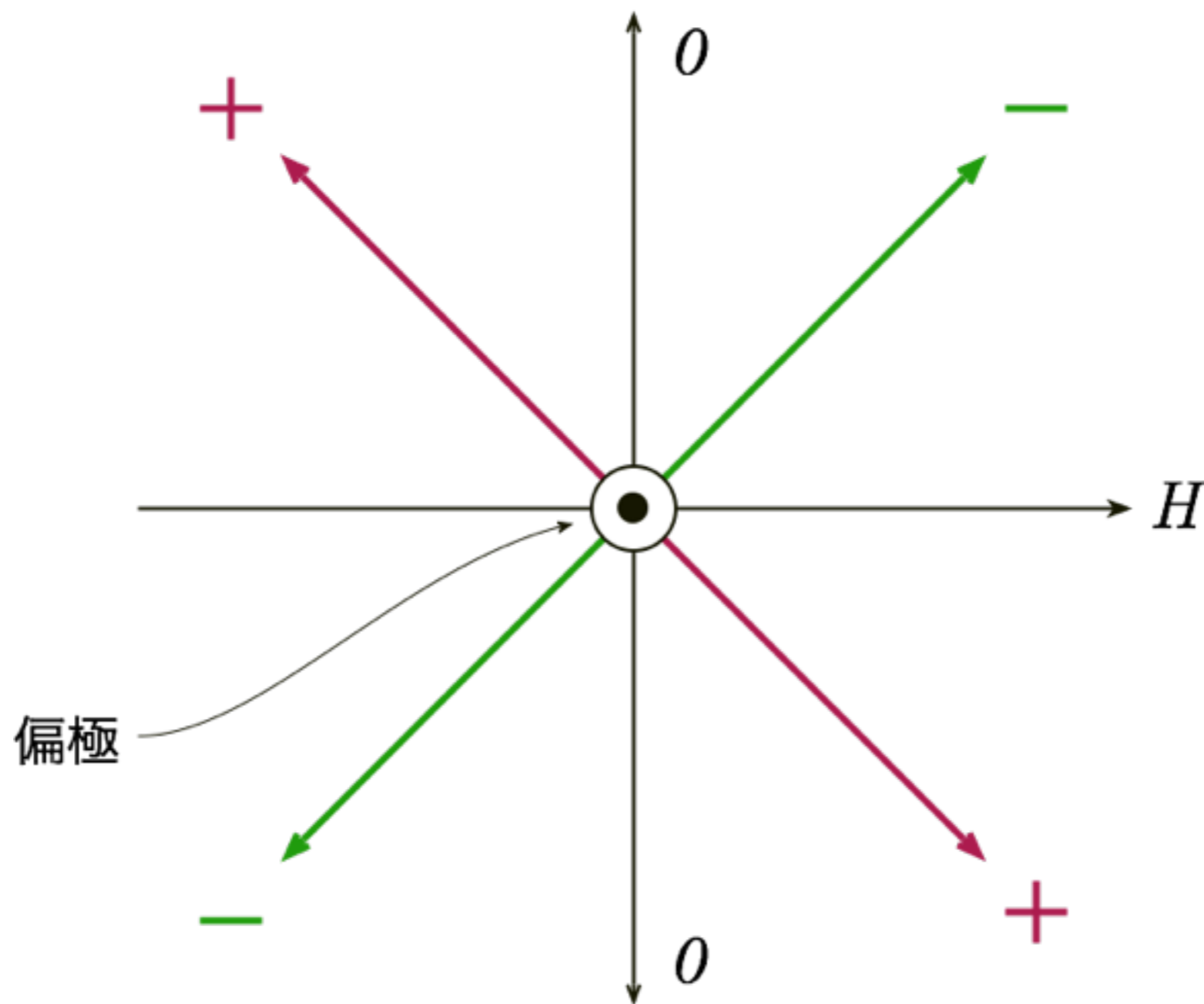


エネルギーのZeemanシフト

崩壊曲線の振動



崩壊曲線の振動

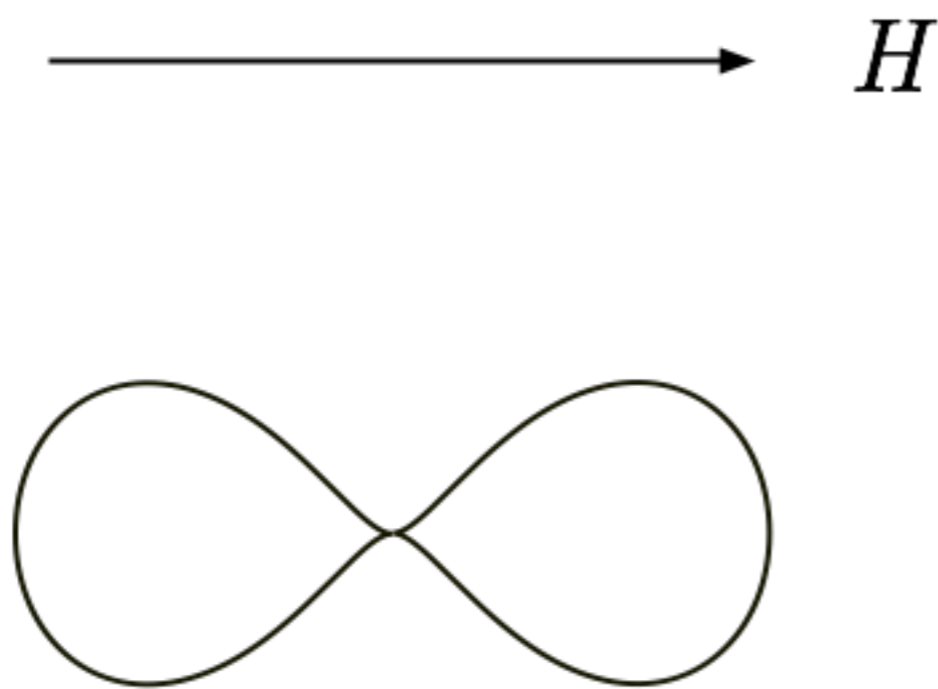


なぜ振動するのか | 時間

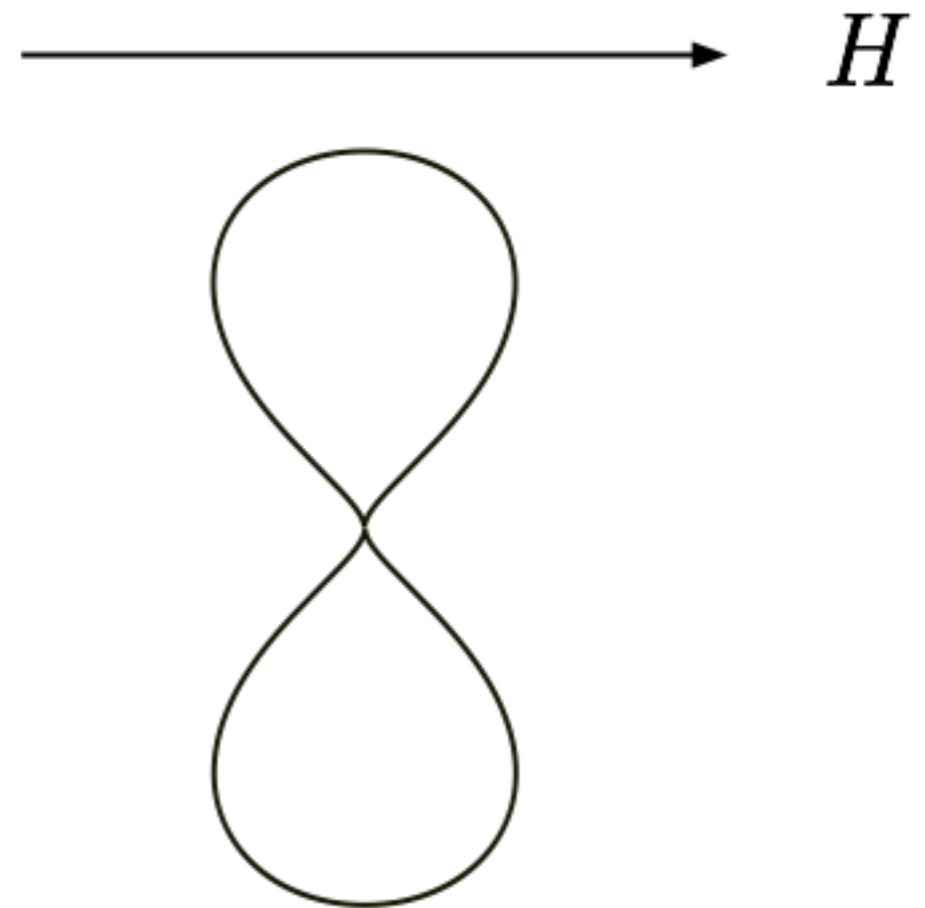
$$\begin{aligned}M(t) &= M_0 e^{-i\epsilon_0 t} + M_1 e^{-i\epsilon_1 t} + M_2 e^{-i\epsilon_2 t} \\|M(t)|^2 &= |M_0|^2 + |M_1|^2 + |M_2|^2 \\&\quad + M_0^* M_2 e^{i(\epsilon_0 - \epsilon_2)t} \\&\quad + M_0^* M_1 e^{i(\epsilon_0 - \epsilon_1)t} \\&\quad + M_2^* M_1 e^{i(\epsilon_2 - \epsilon_1)t} \\&\quad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

重ねあわせによる干渉が原因

なぜ振動するのか | 角度

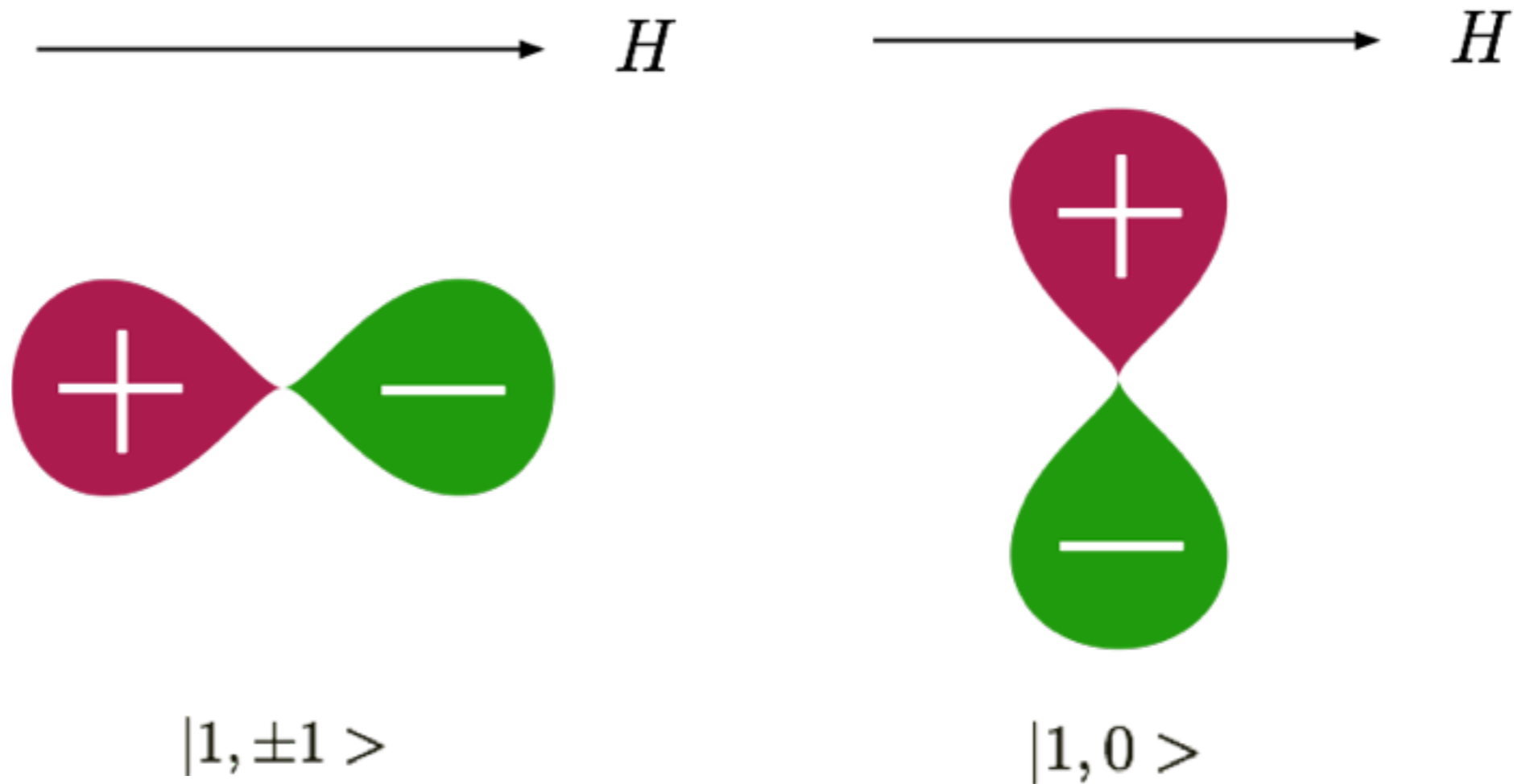


$|1, \pm 1 \rangle$



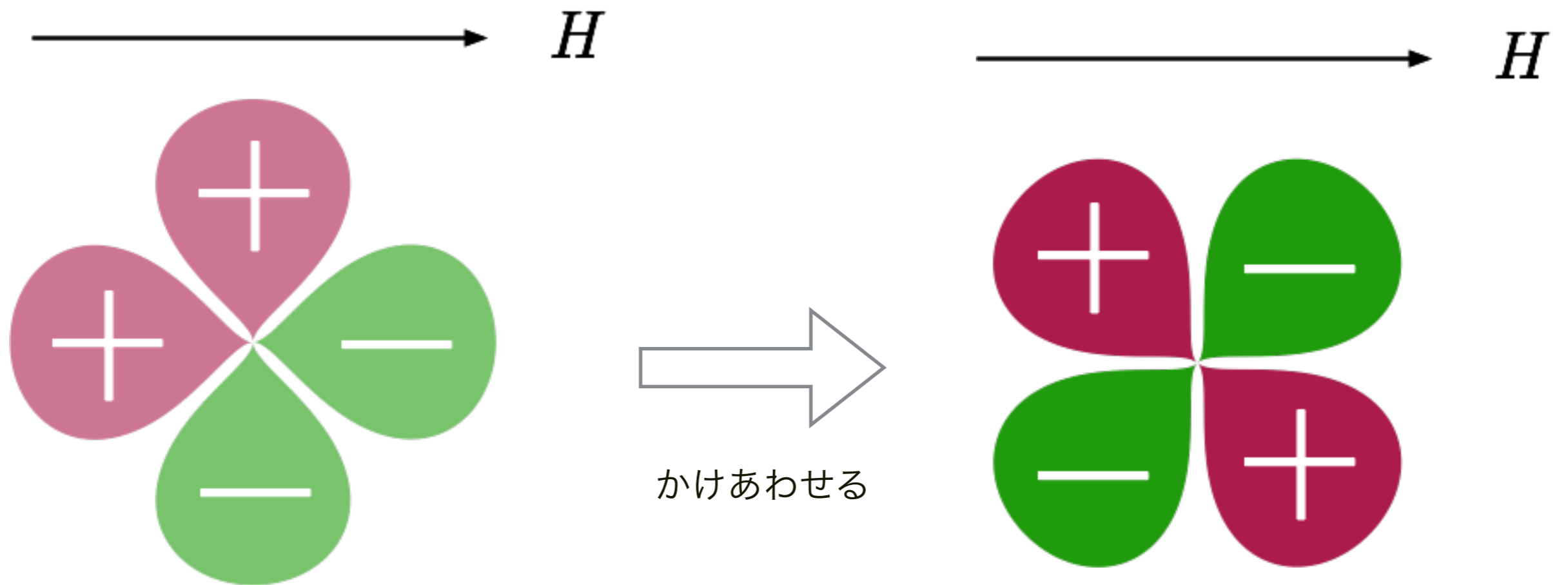
$|1, 0 \rangle$

なぜ振動するのか | 角度



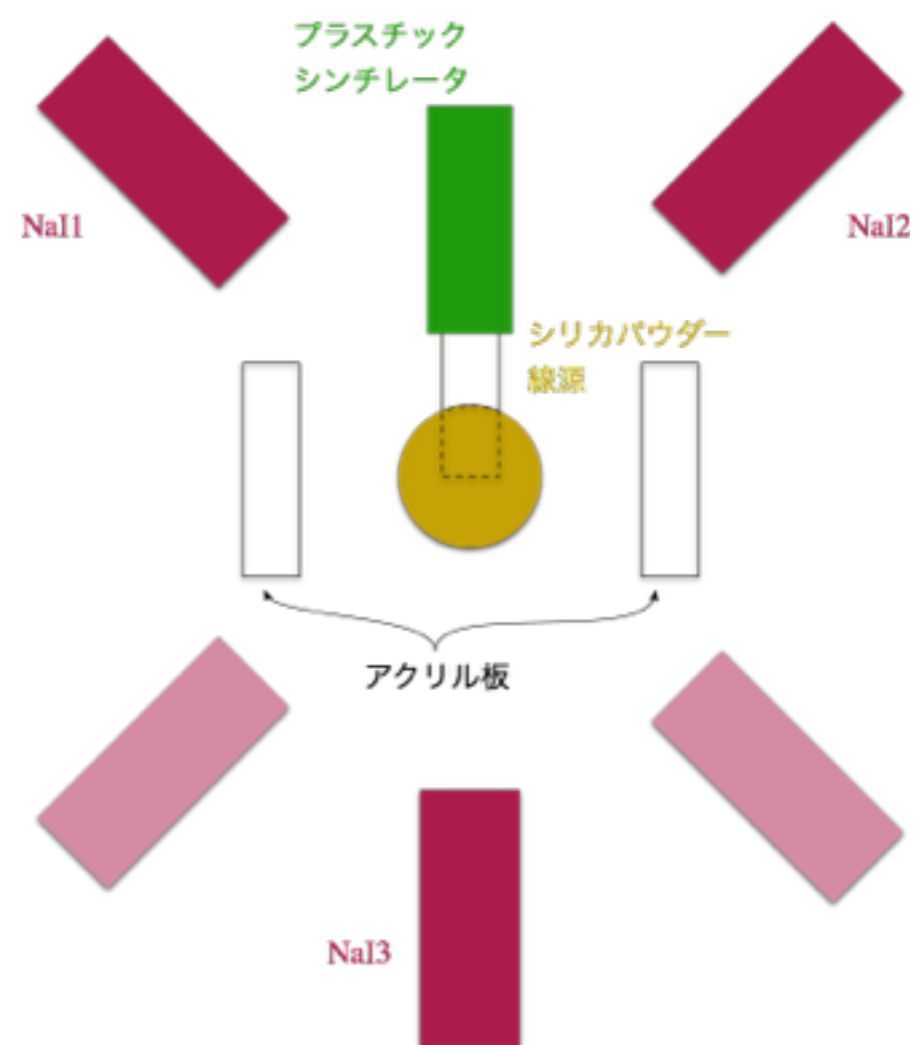
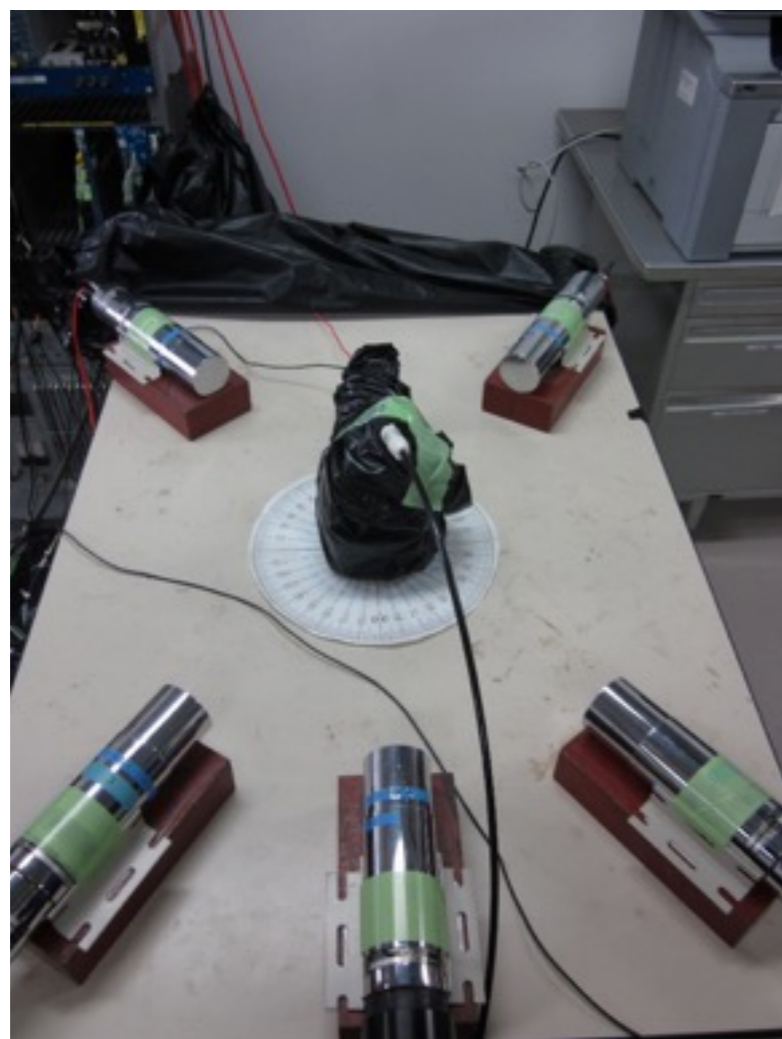
電子と陽電子の内部パリティの違い

なぜ振動するのか | 角度

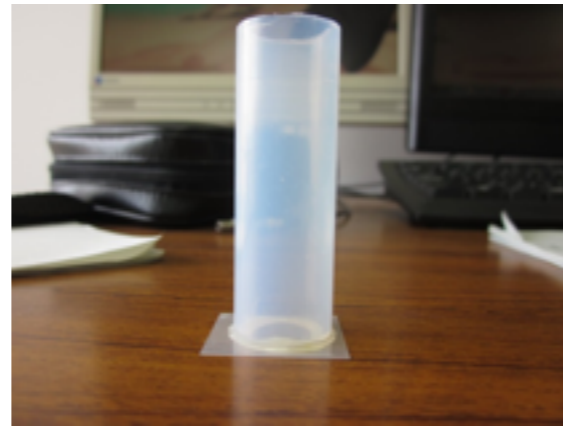
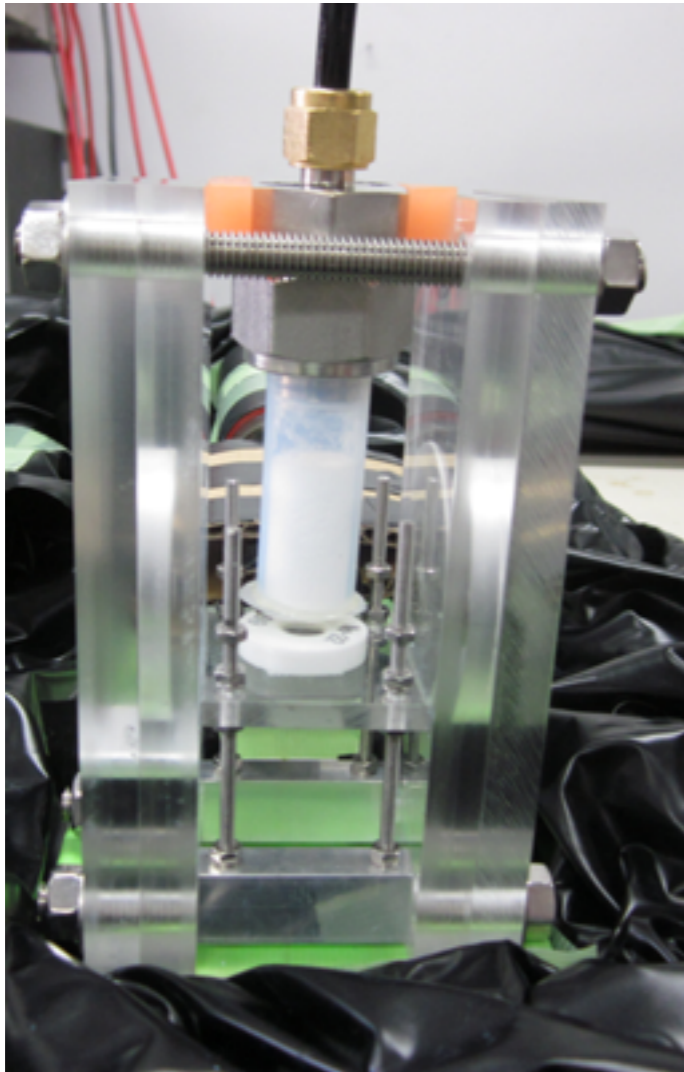


装置・回路

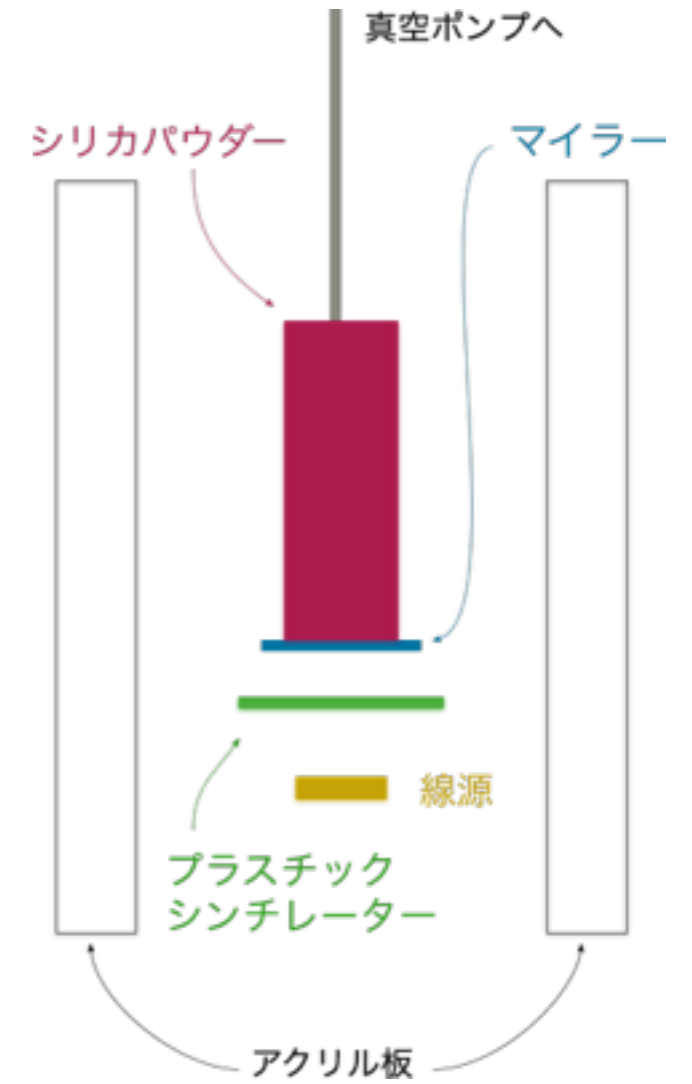
外観



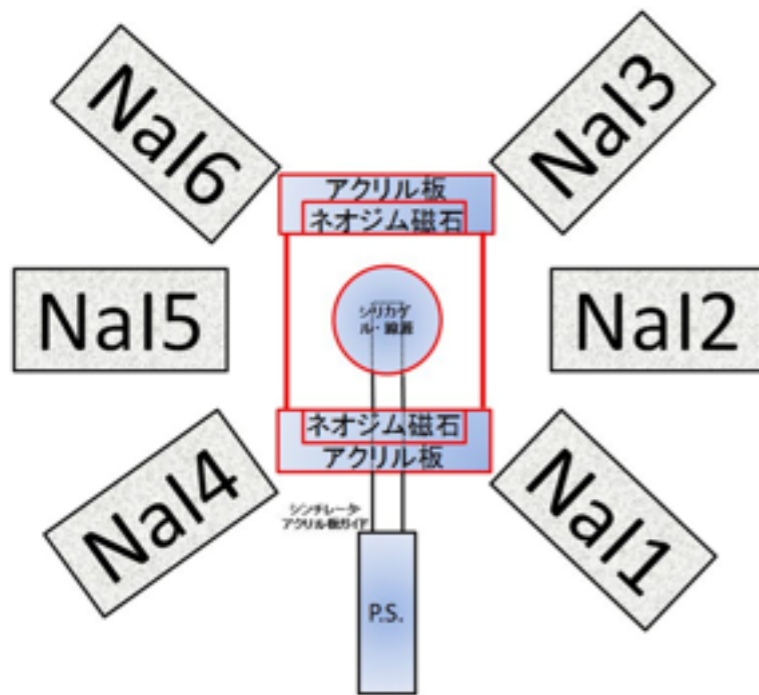
装置



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。



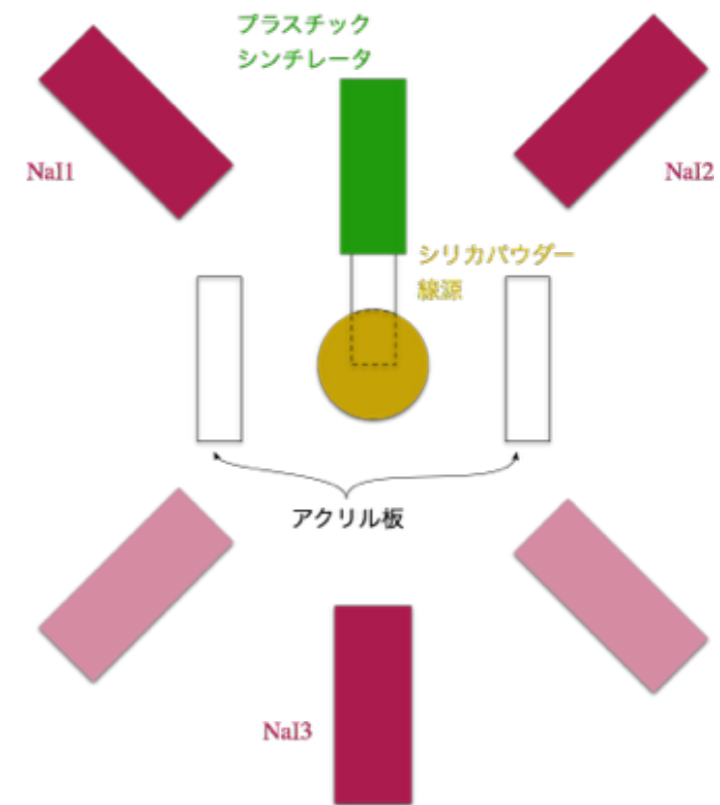
前年度との違い | 装置



※前年度P1発表資料より引用

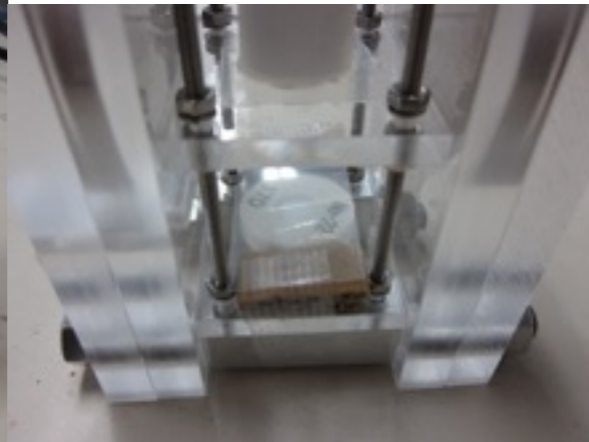
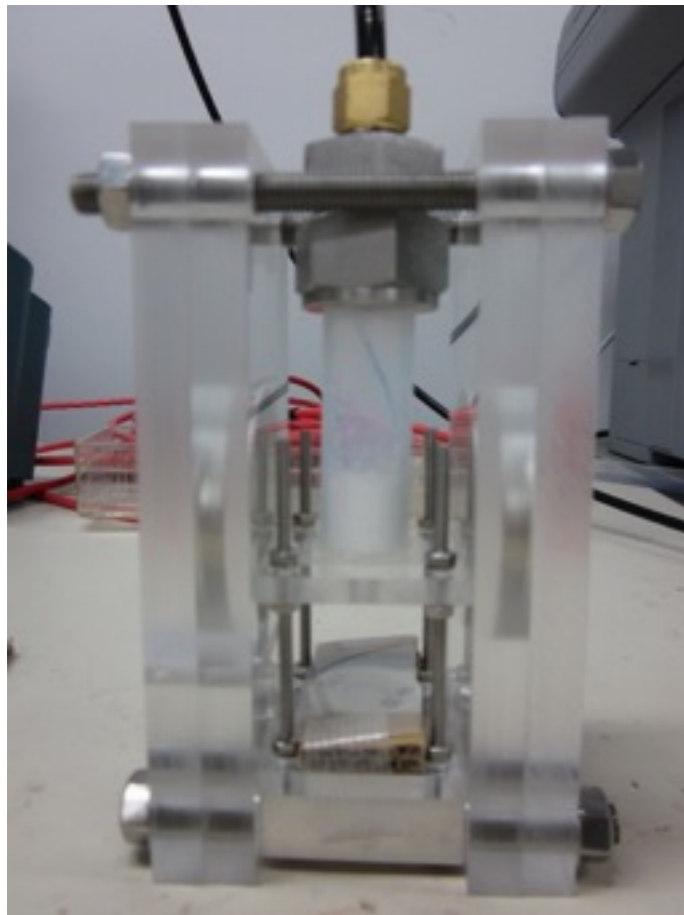
前年度

NaIの本数
磁場の向き



今年度

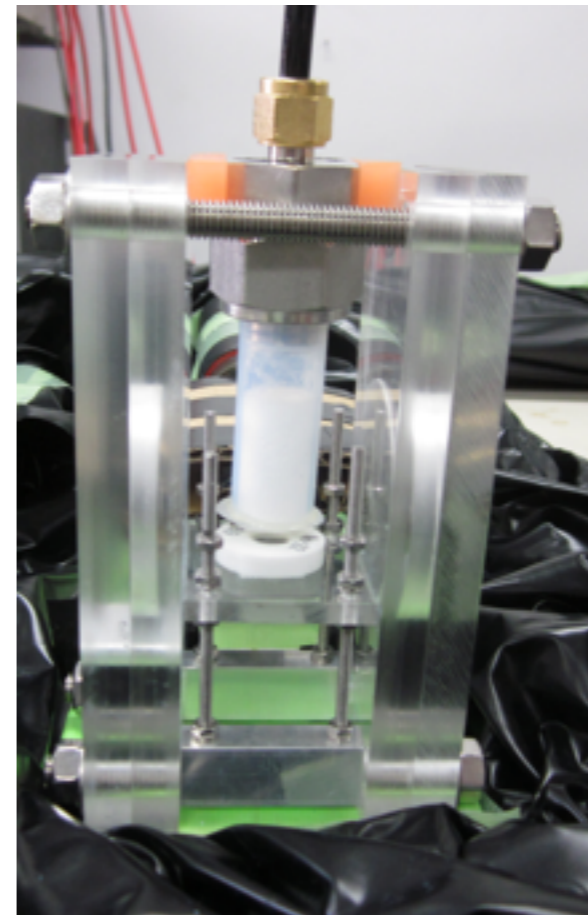
前年度との違い | 装置



線源と容器との距離



シリカ容器

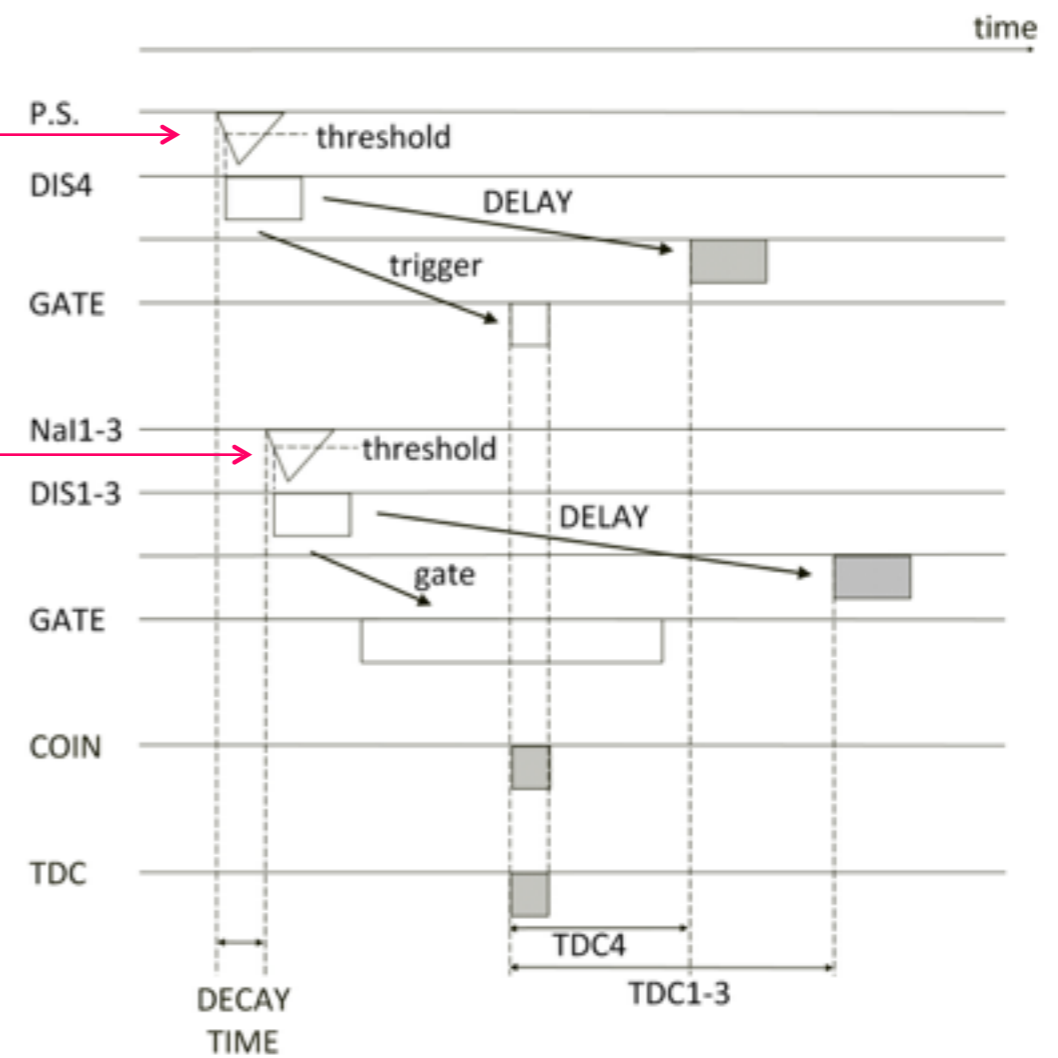
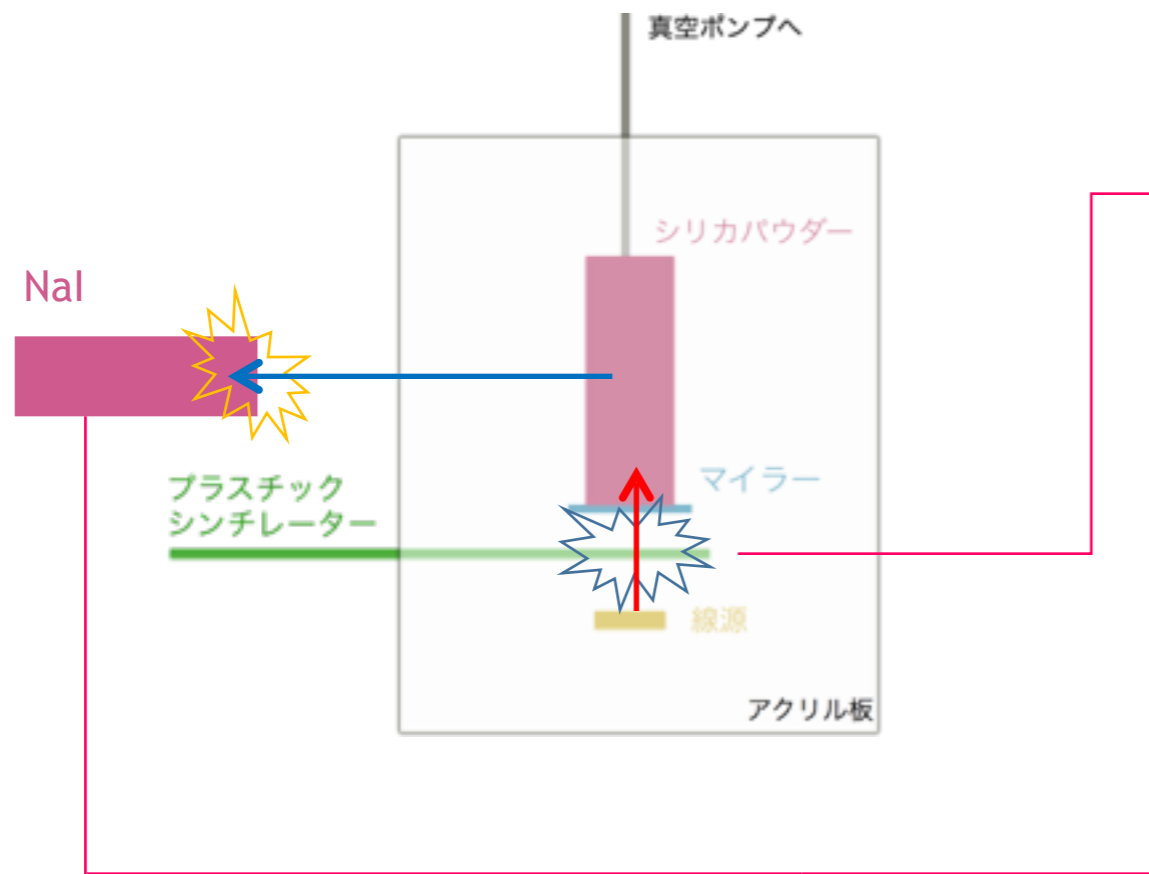


※前年度P1発表資料より引用

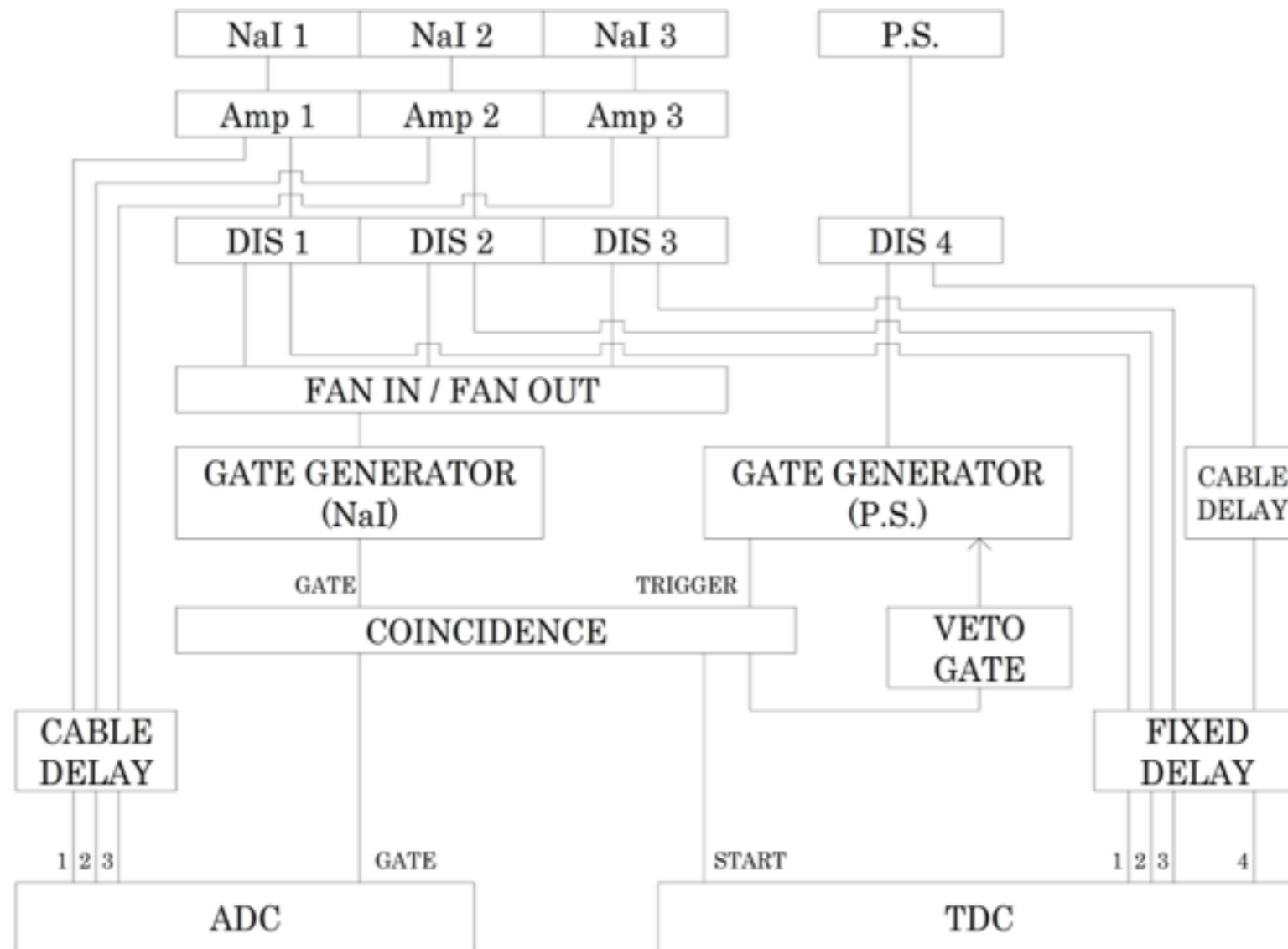
前年度

今年度

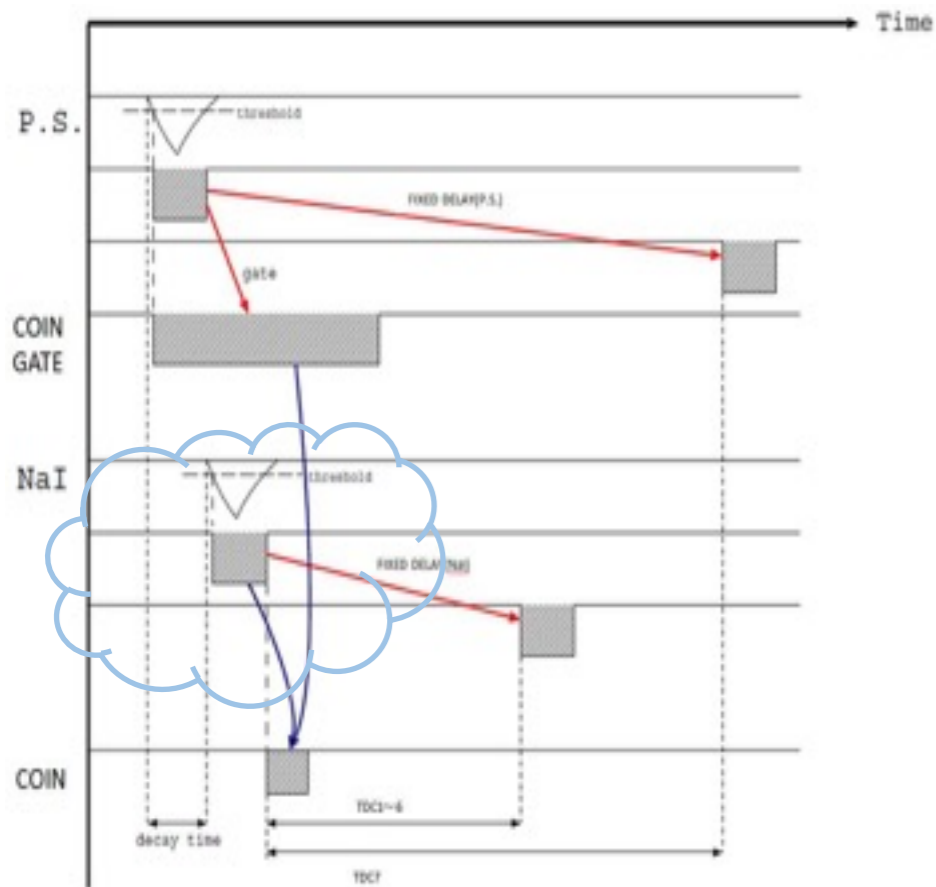
信号の時間関係



論理回路

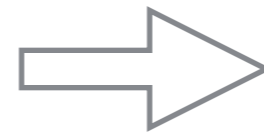


前年度との違い | 回路

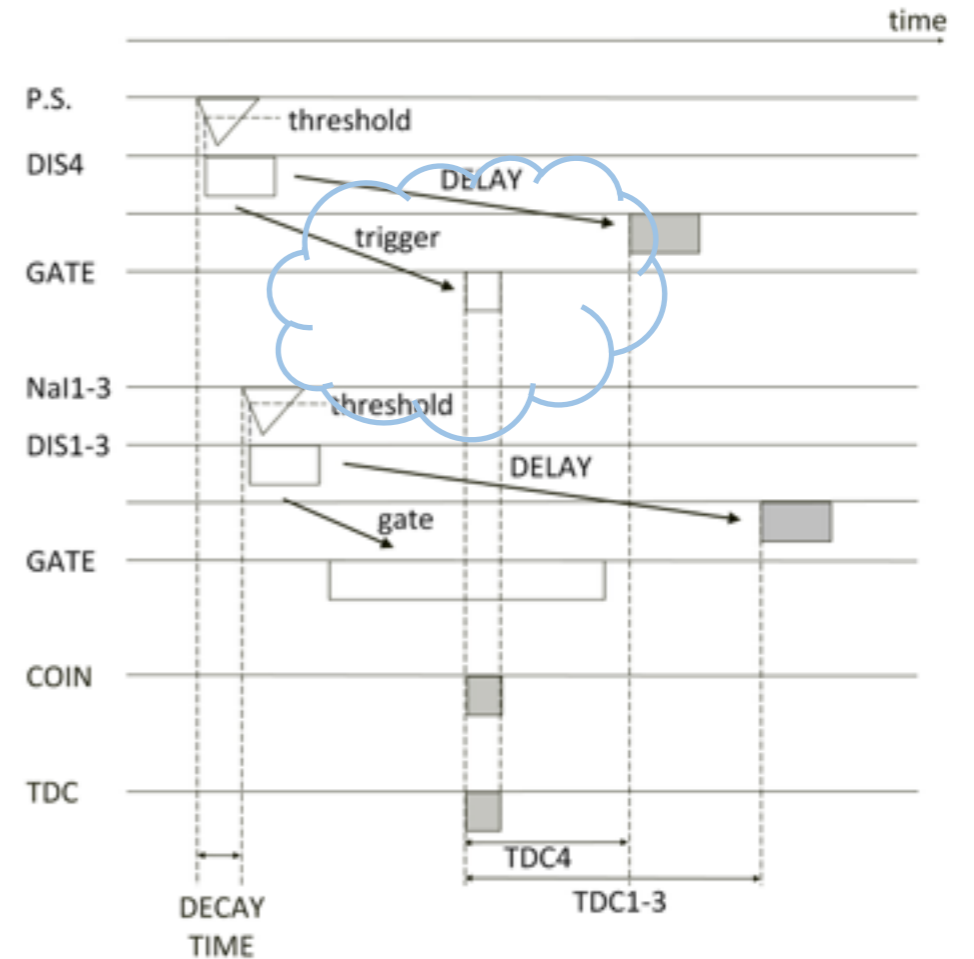


※前年度P1発表資料より引用

前年度



COINCIDENCEの
トリガー



今年度

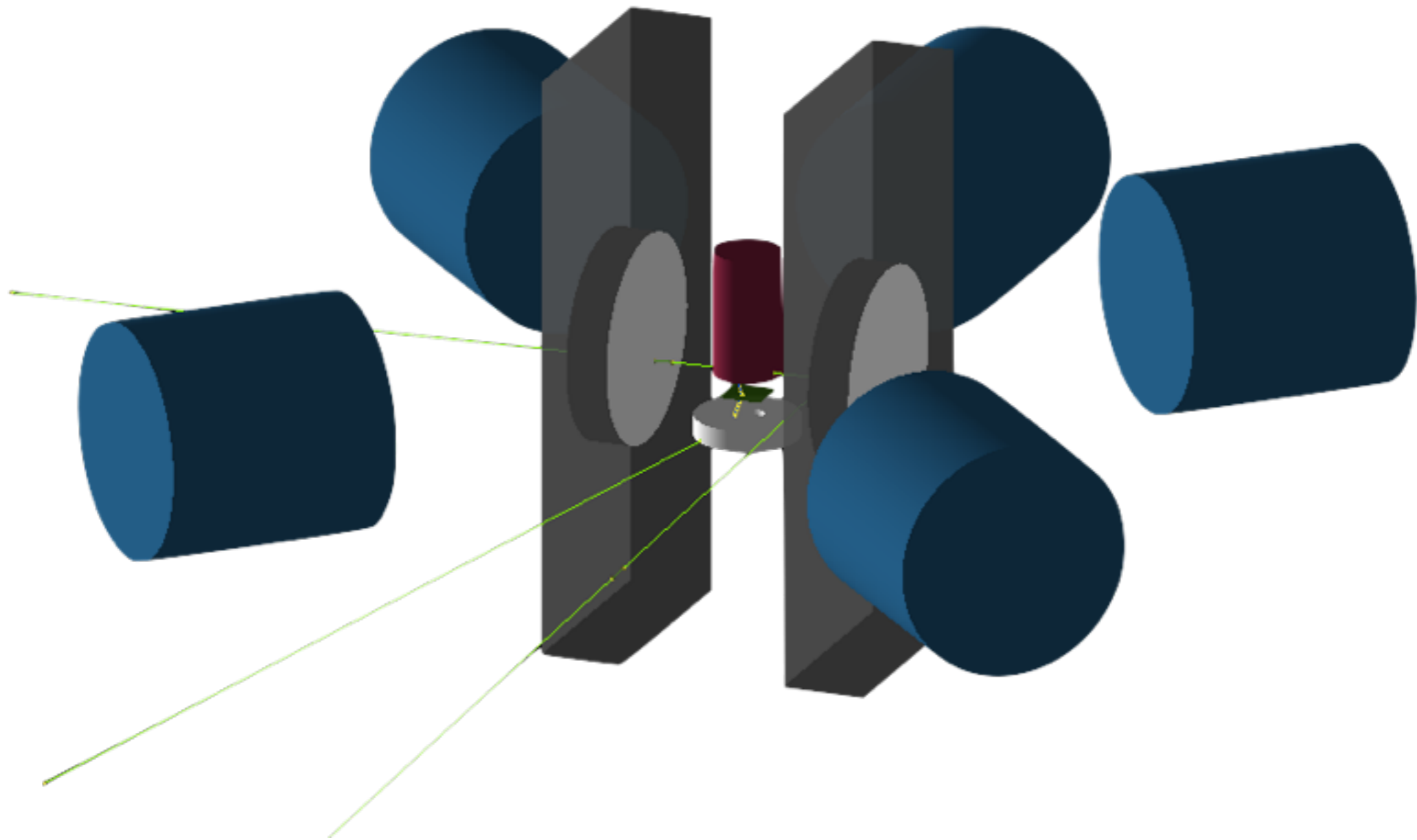
シミュレーション

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

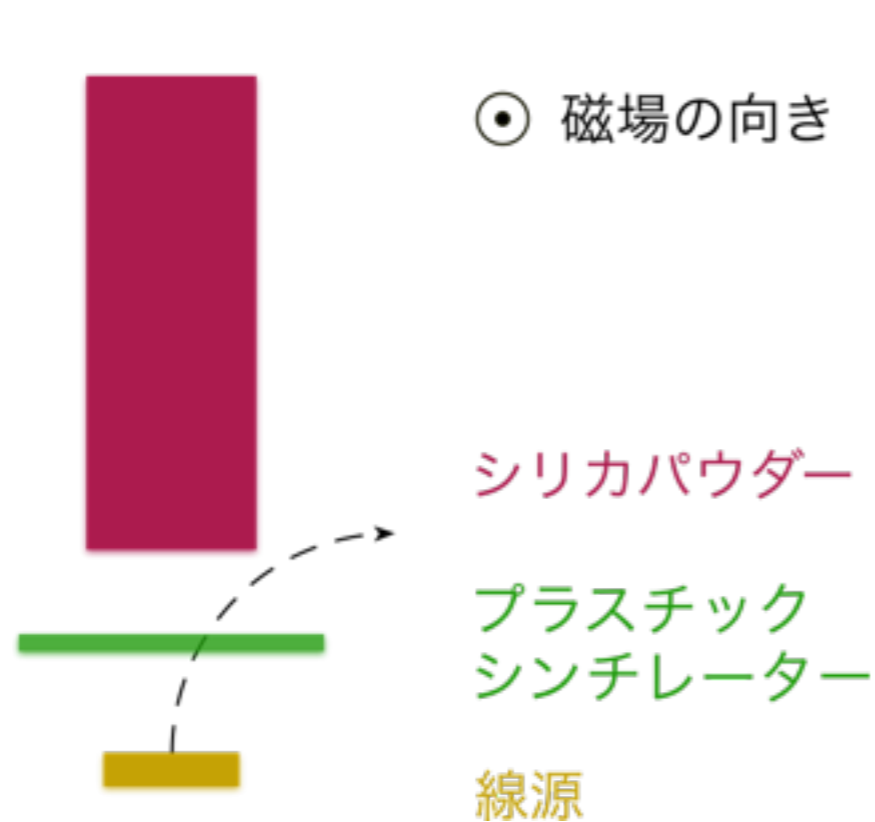


デモ

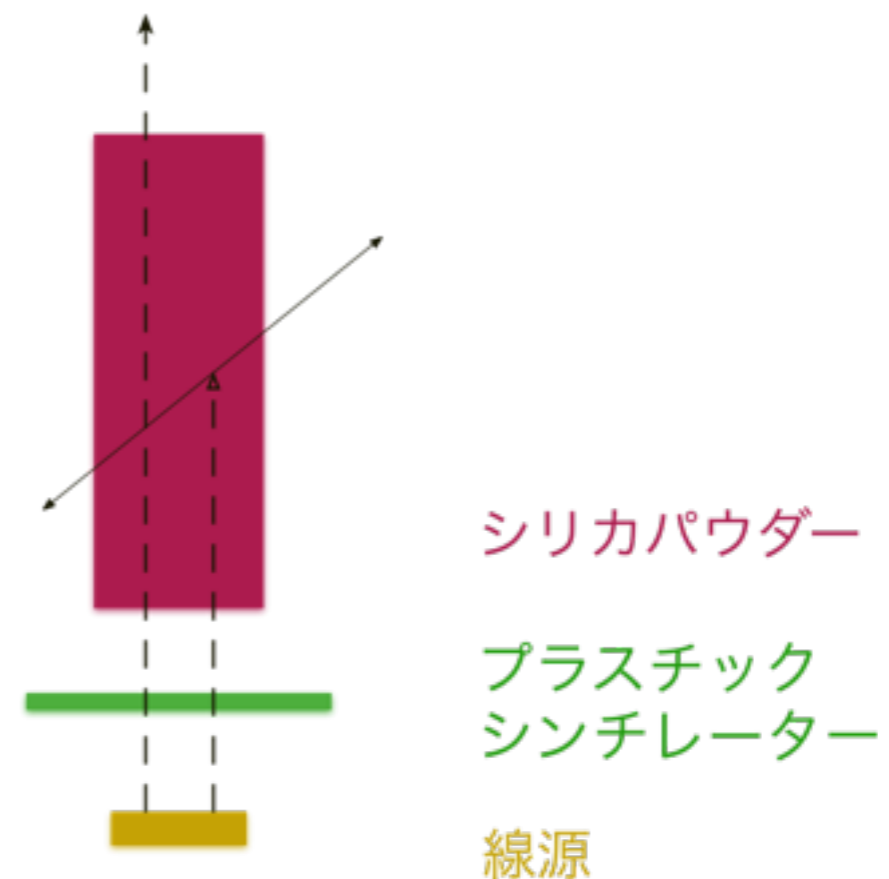
現実とちょっと違うこと

- ・ 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 γ 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



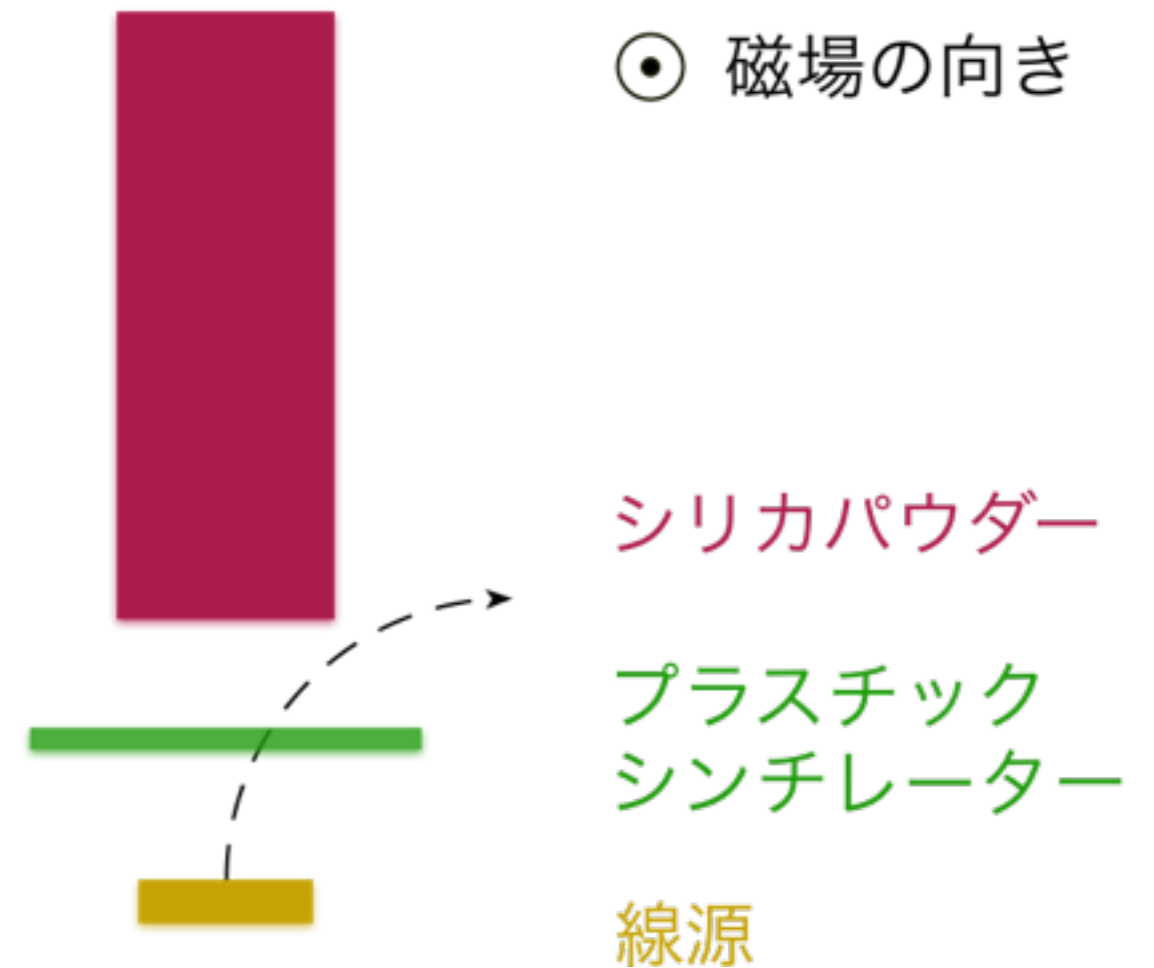
磁場中の陽電子



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

γ 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

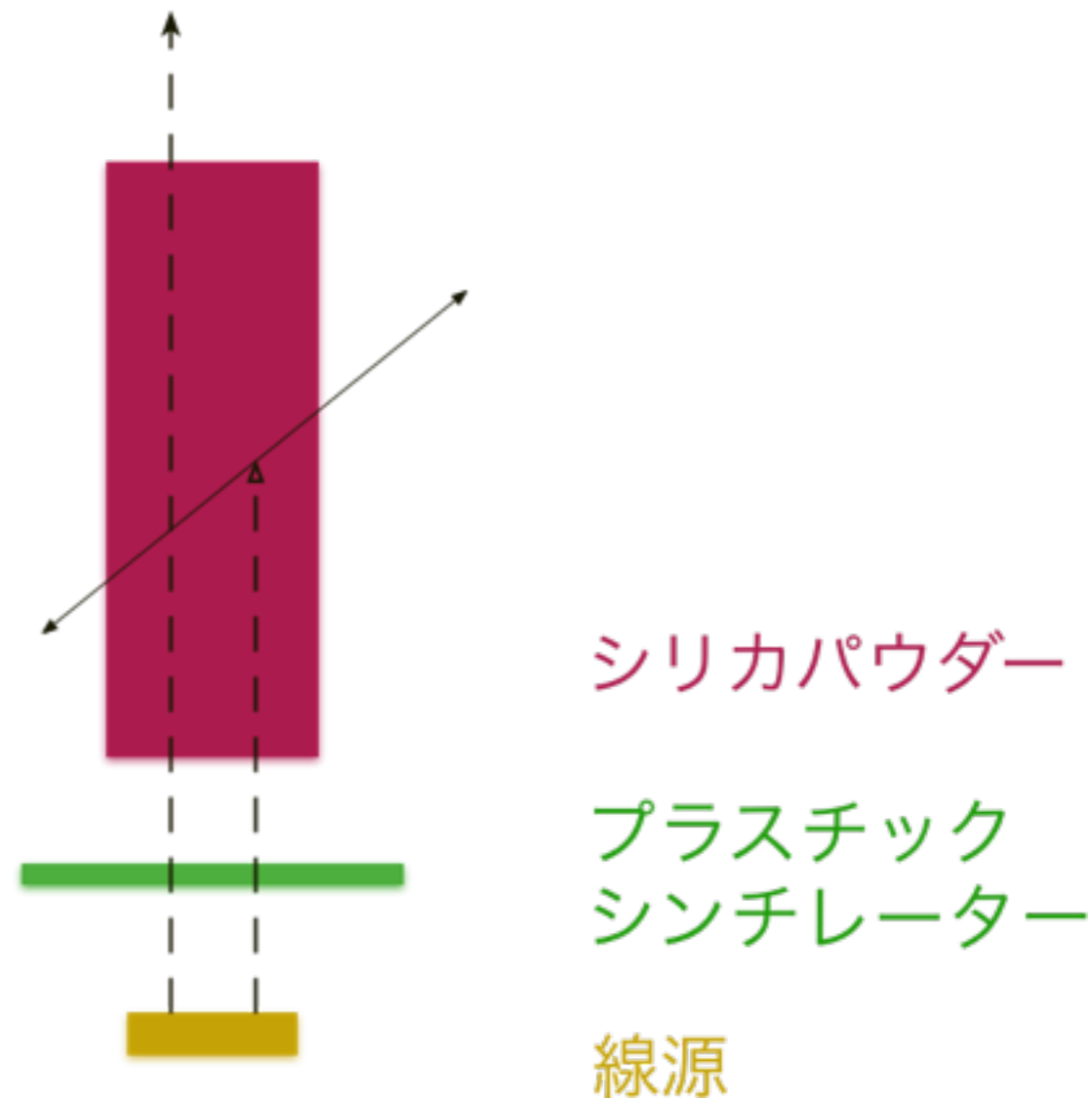
陽電子がプラスチックシンチレータを通過して、シリカパウダーで止まったイベント

結果

これが原因で実験に失敗する、ということはなさそう

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？

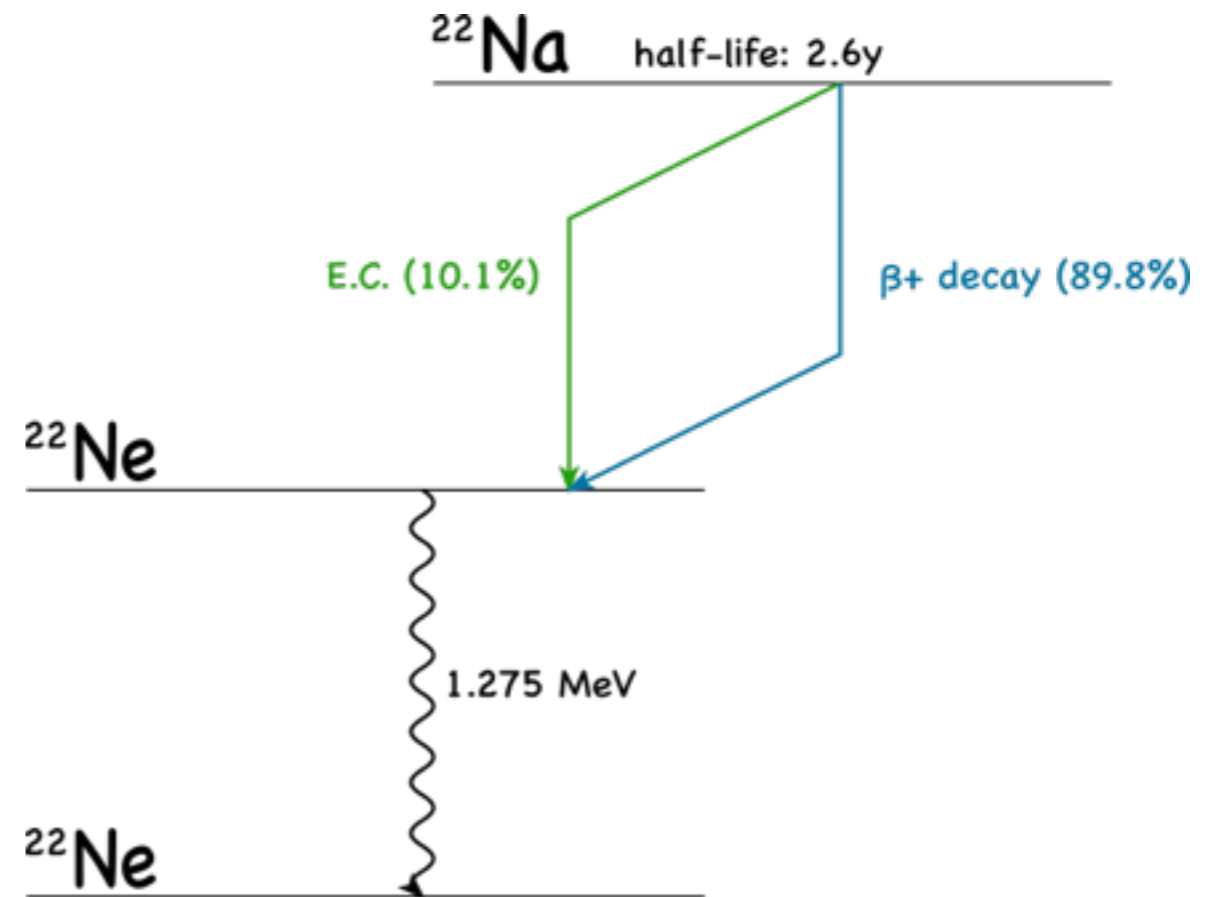


検証2 | 陽電子のエネルギー

- ・ 「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

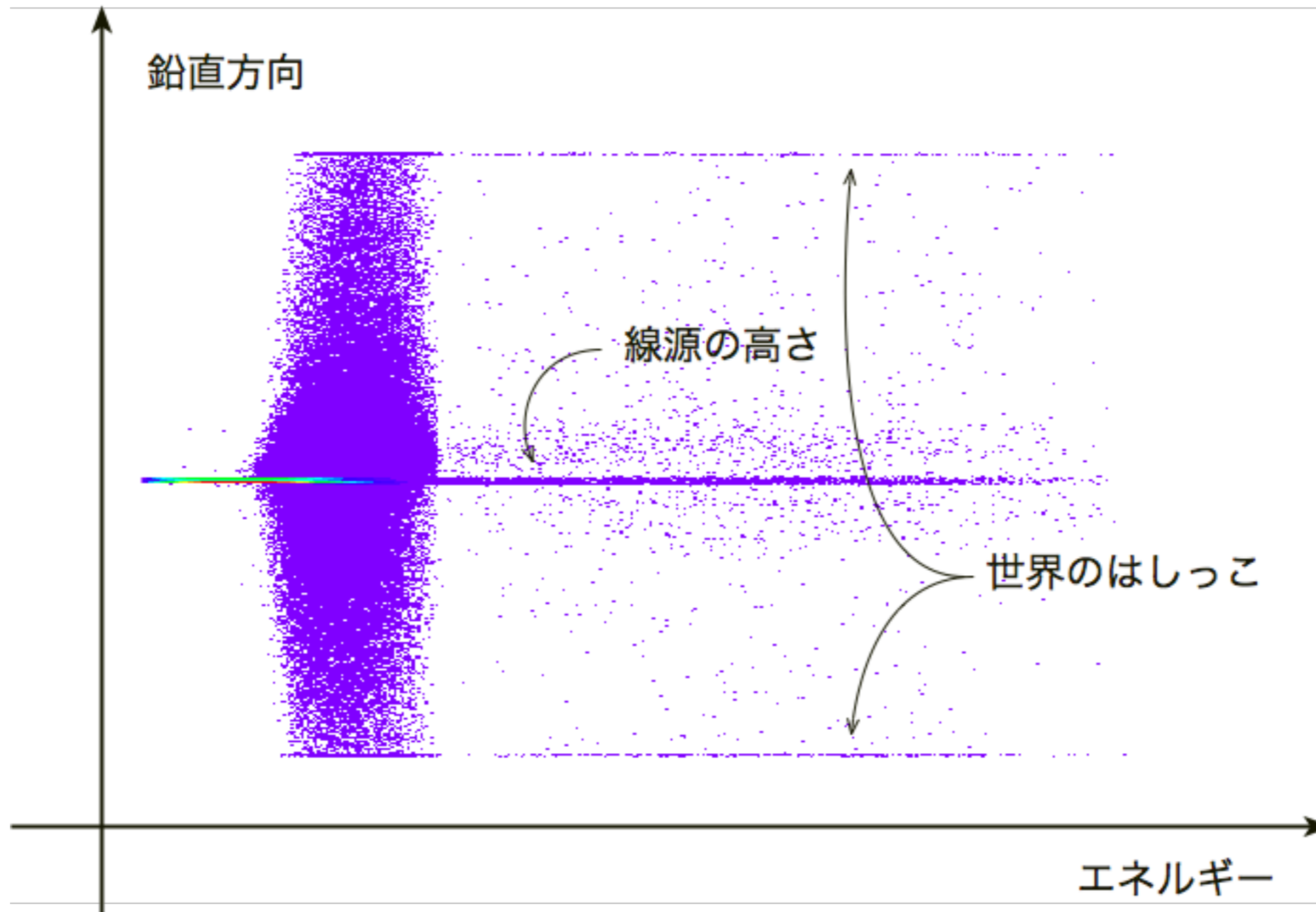
```
$ ./p1_simulation 10,000,000
#{decay events}: 10,000,000
#{beta decay} : 9,029,305
#{E.C.} : 970,695
#{good events} : 28,958
```



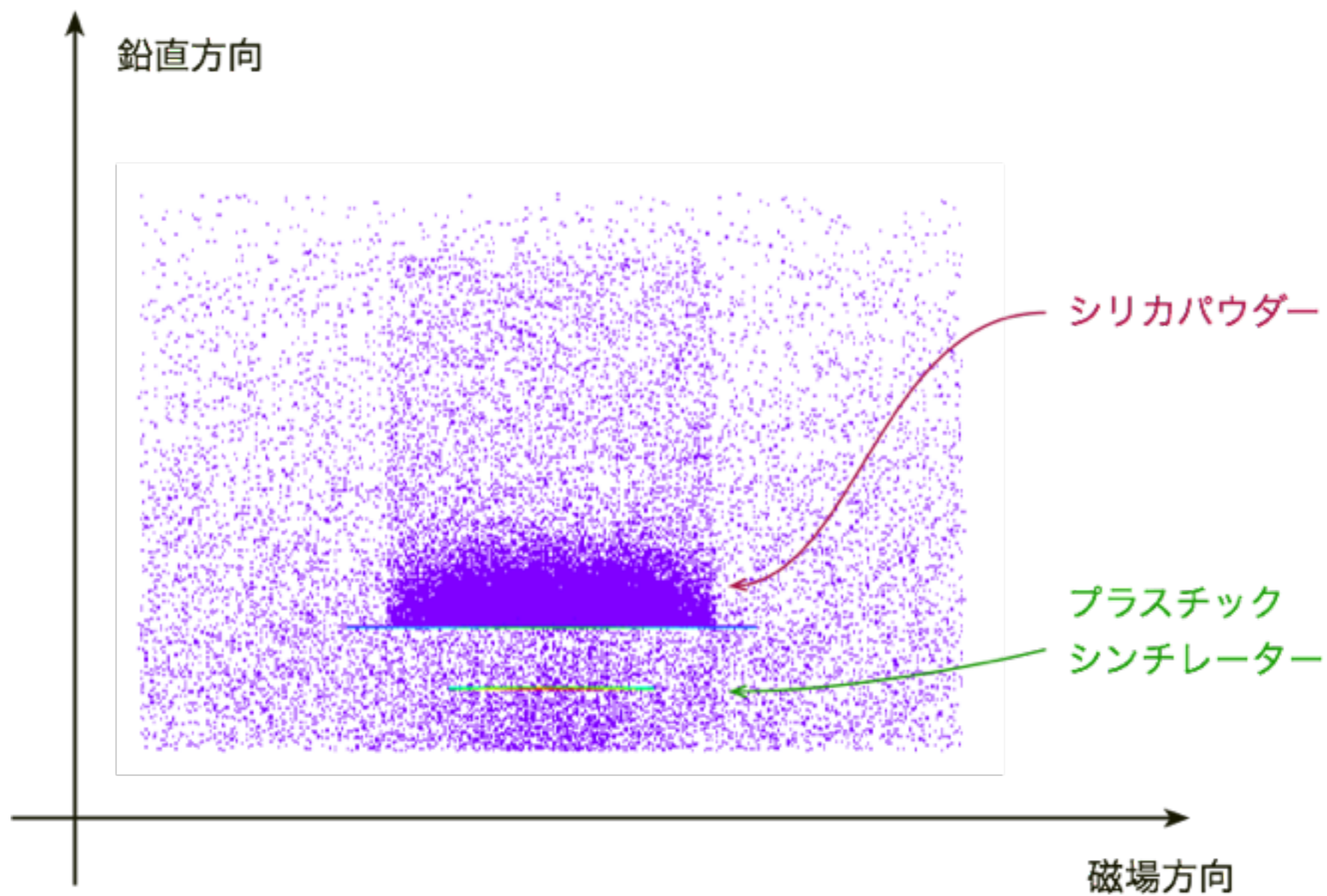
good event

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

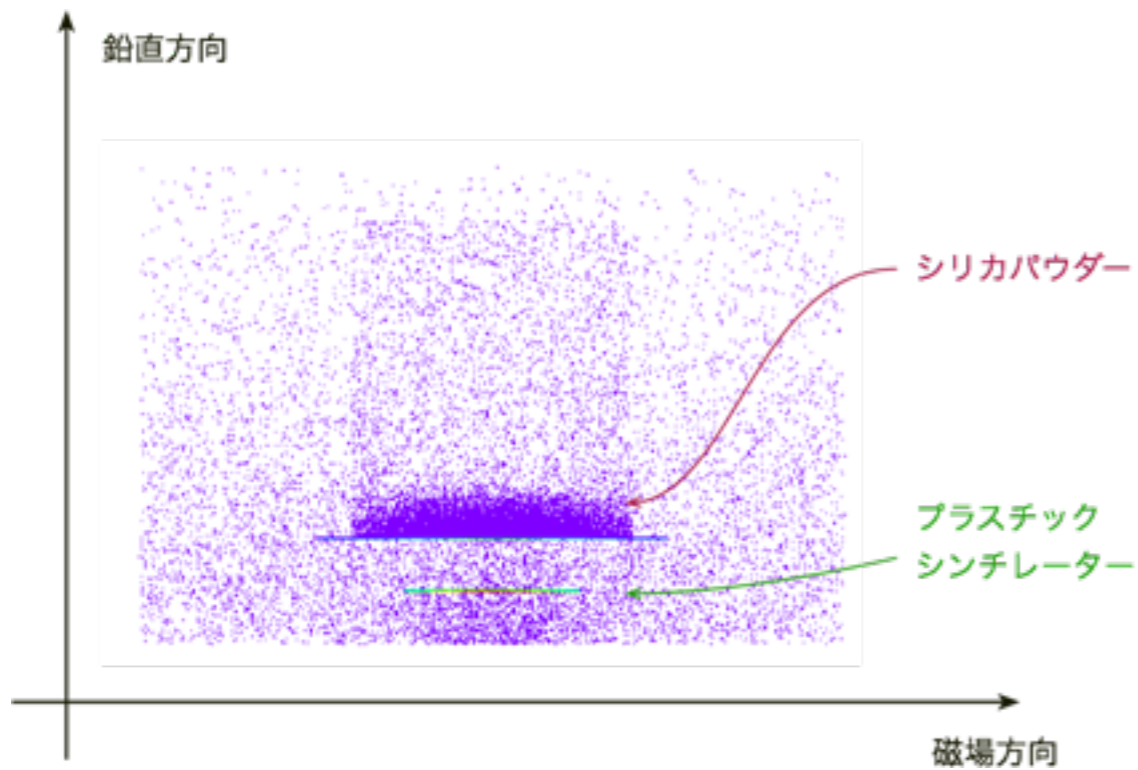
検証2 | 陽電子のエネルギー



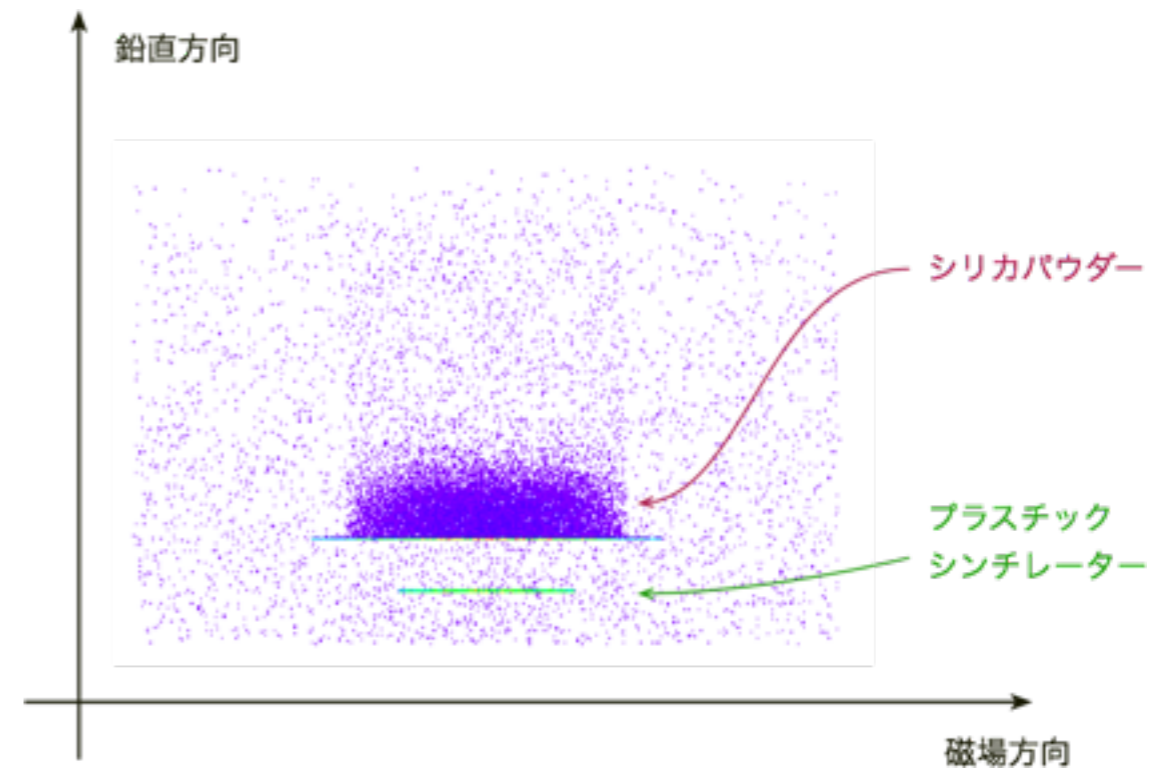
検証2 | 陽電子のエネルギー



検証2 | 陽電子のエネルギー

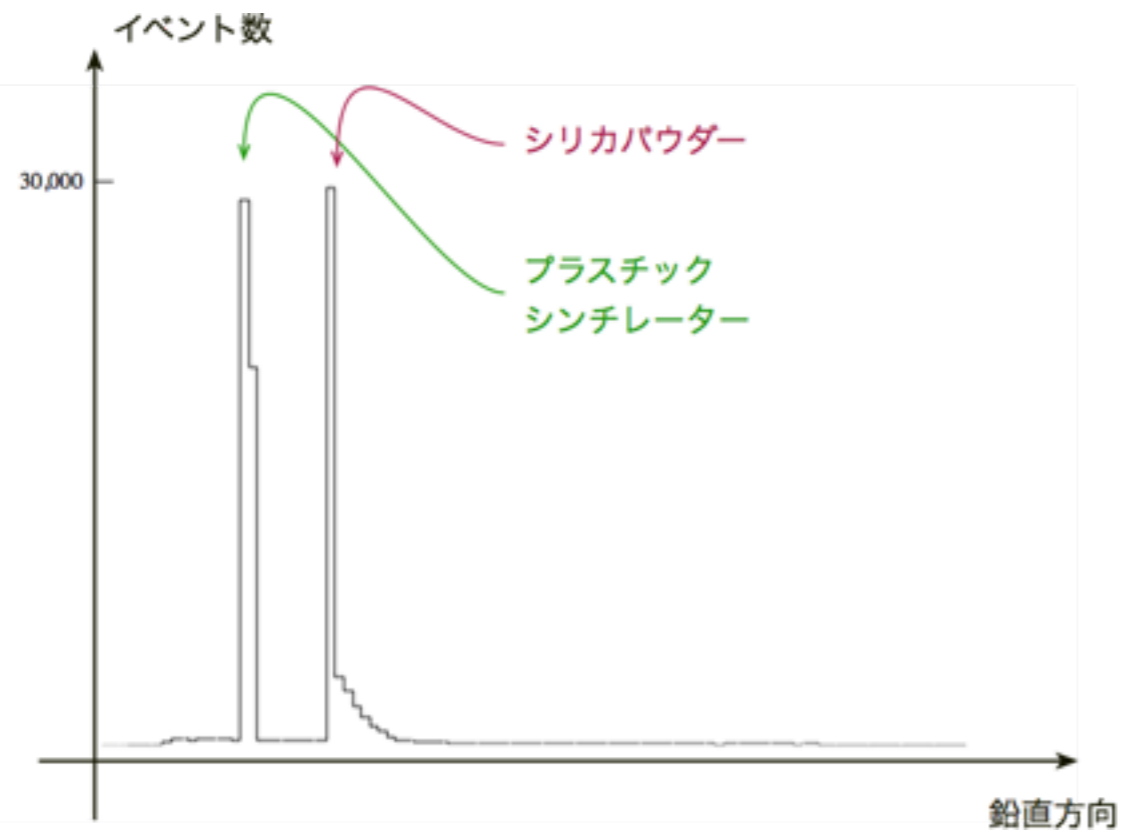


400 keV 未満

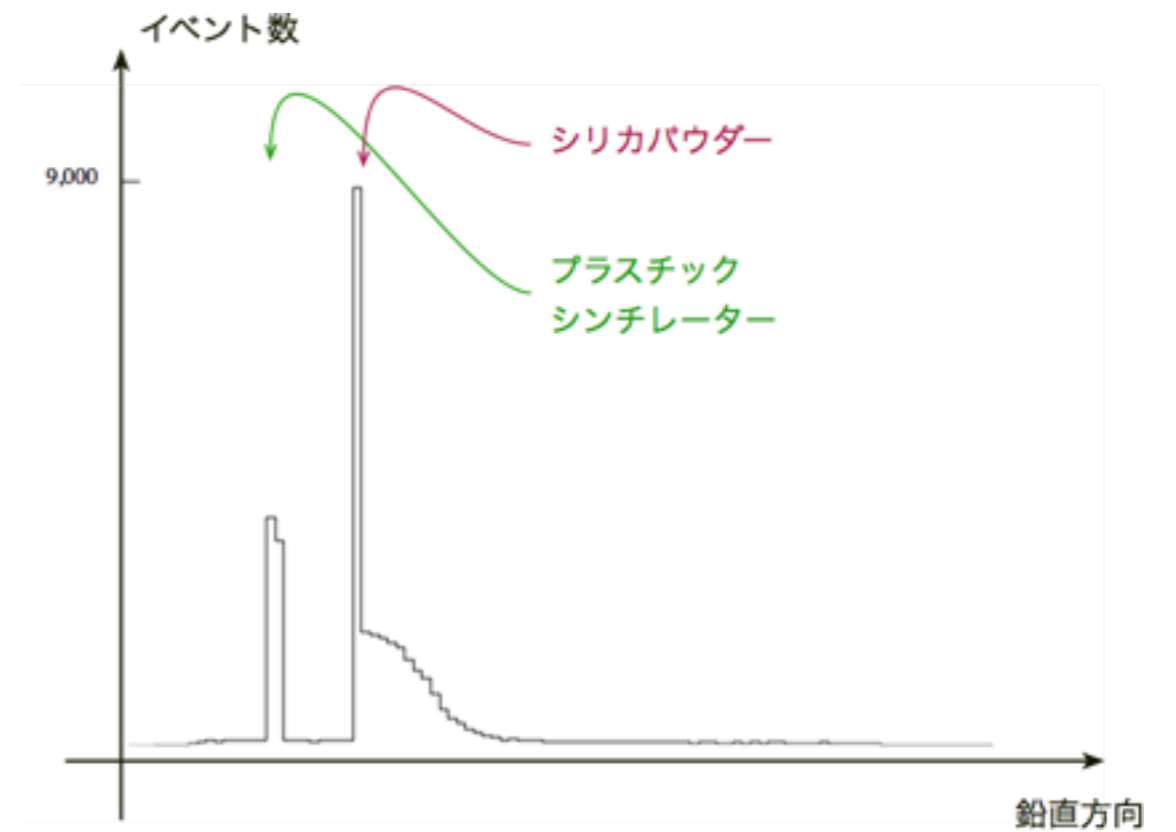


400 keV 以上

検証2 | 陽電子のエネルギー



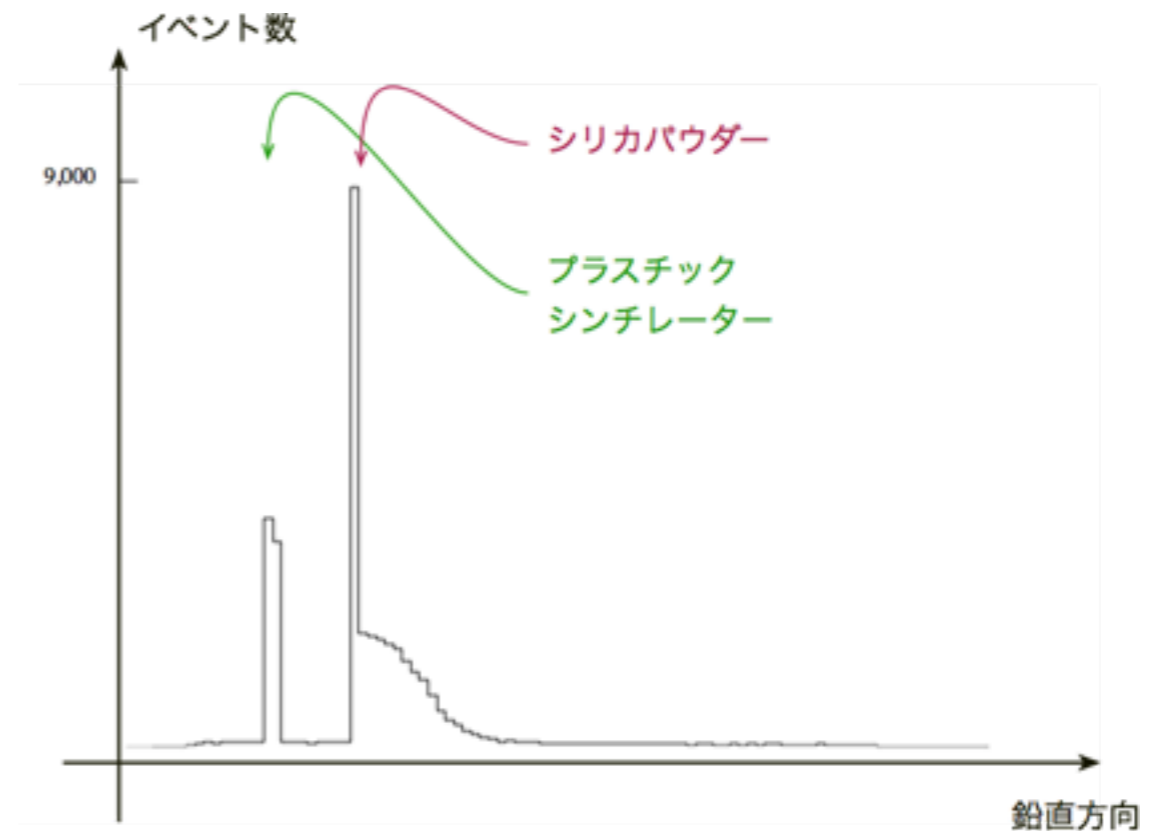
400 keV 未満



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

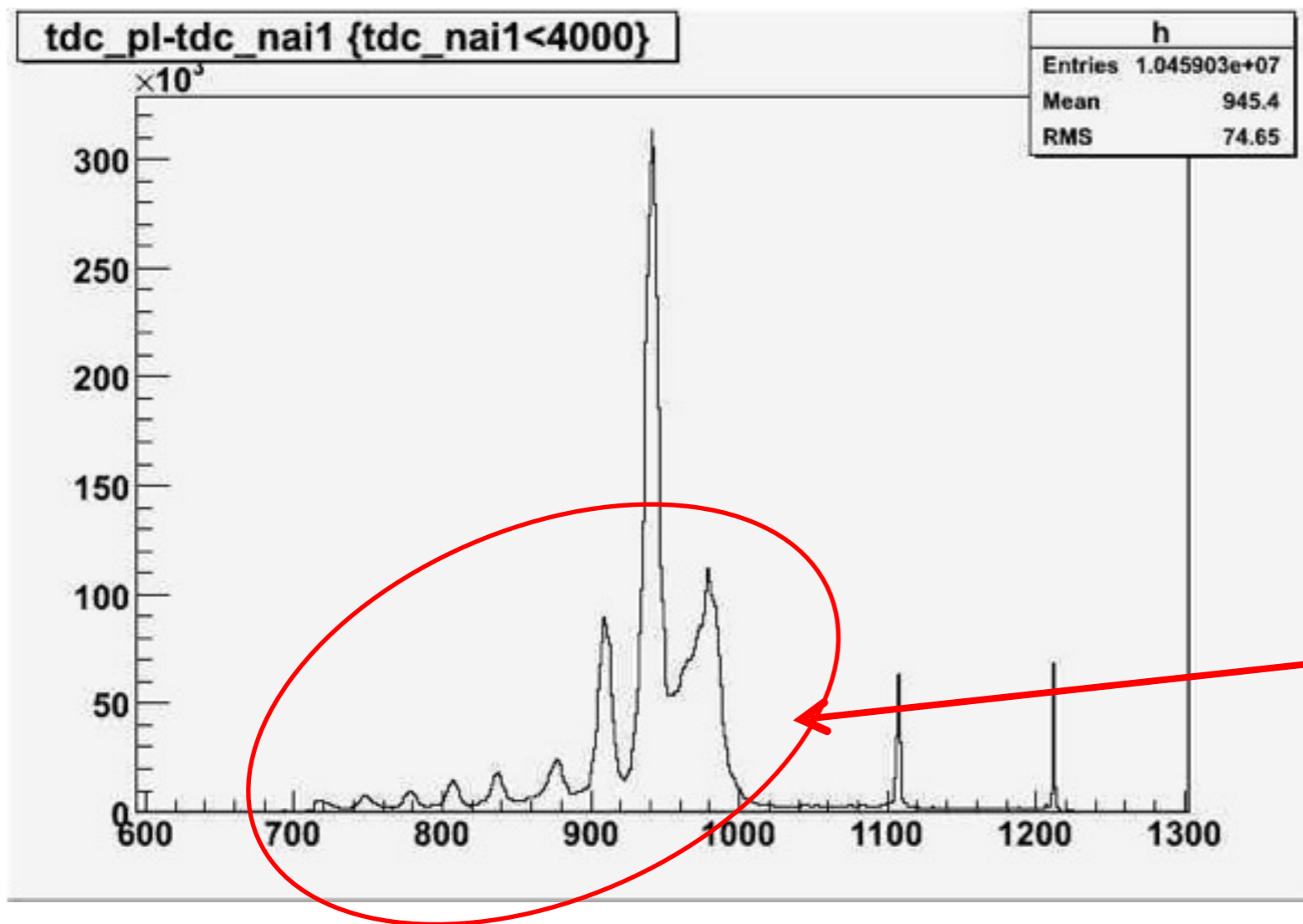
ここまで理想

ここから現実

歩み

事の始まり

TDCヒストグラム



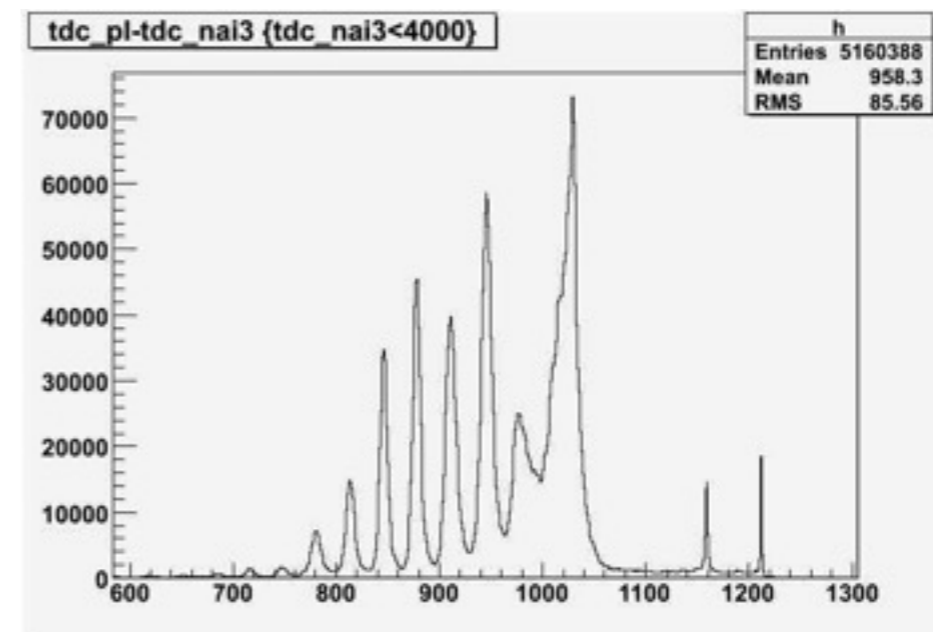
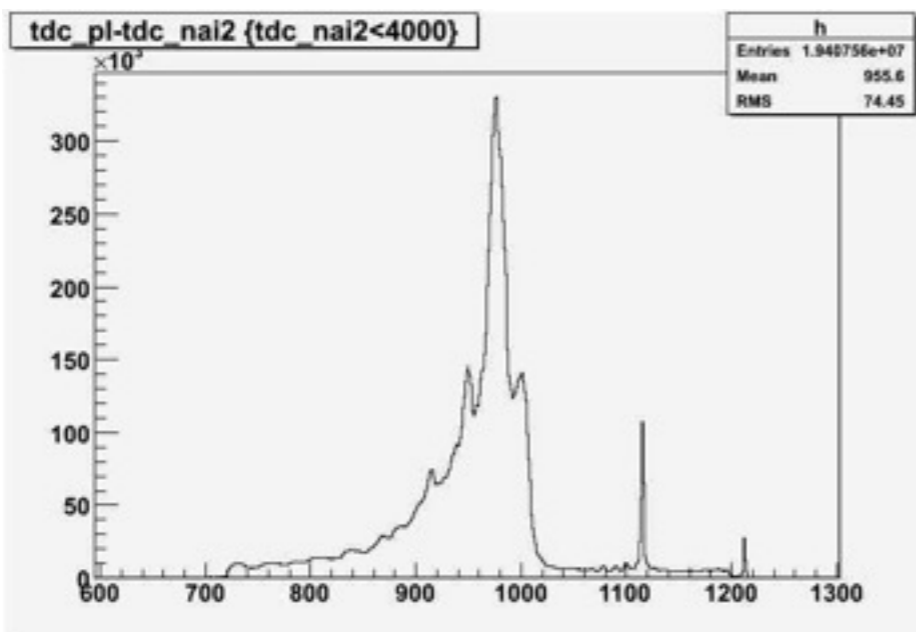
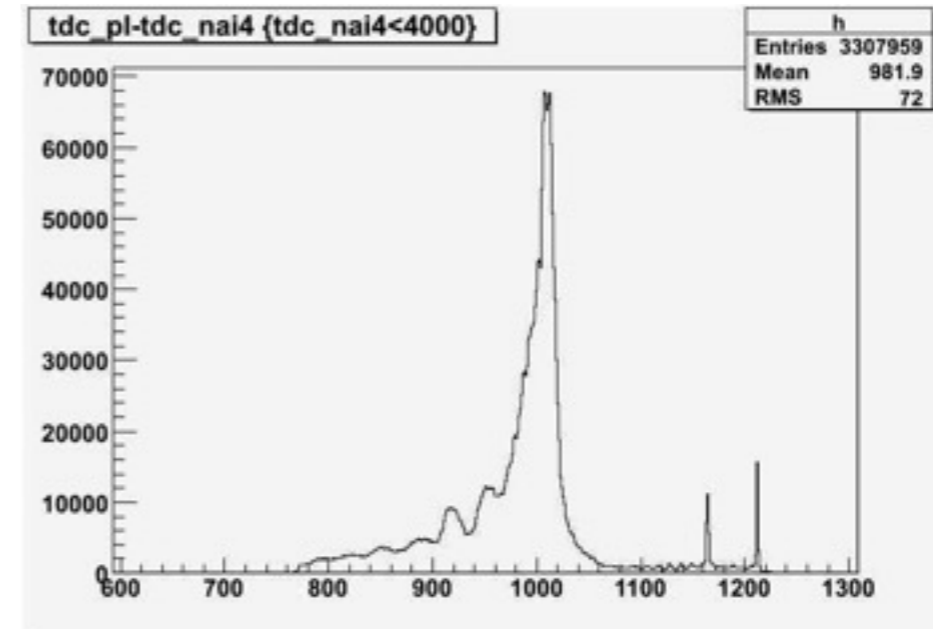
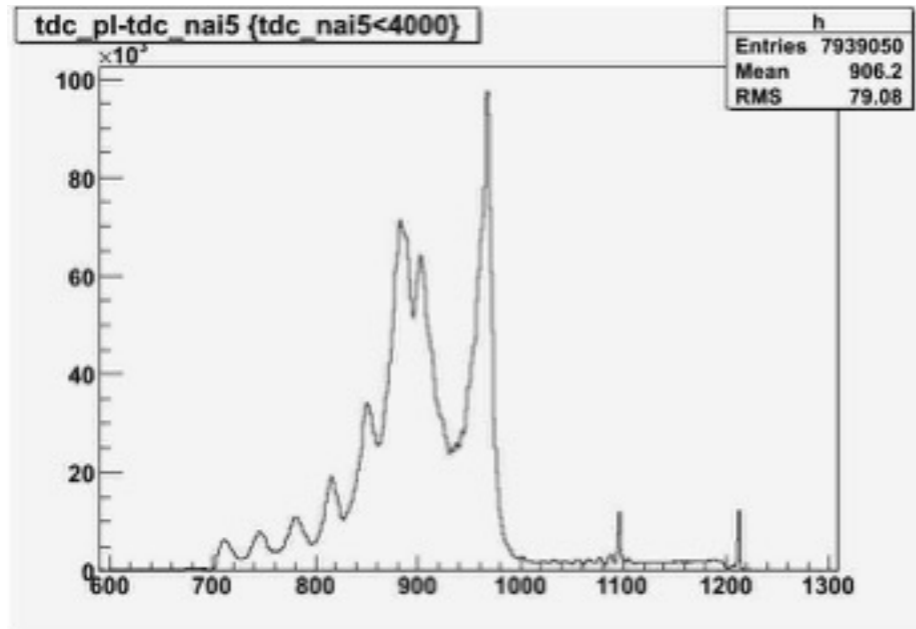
NaI5本

磁場ありで測定

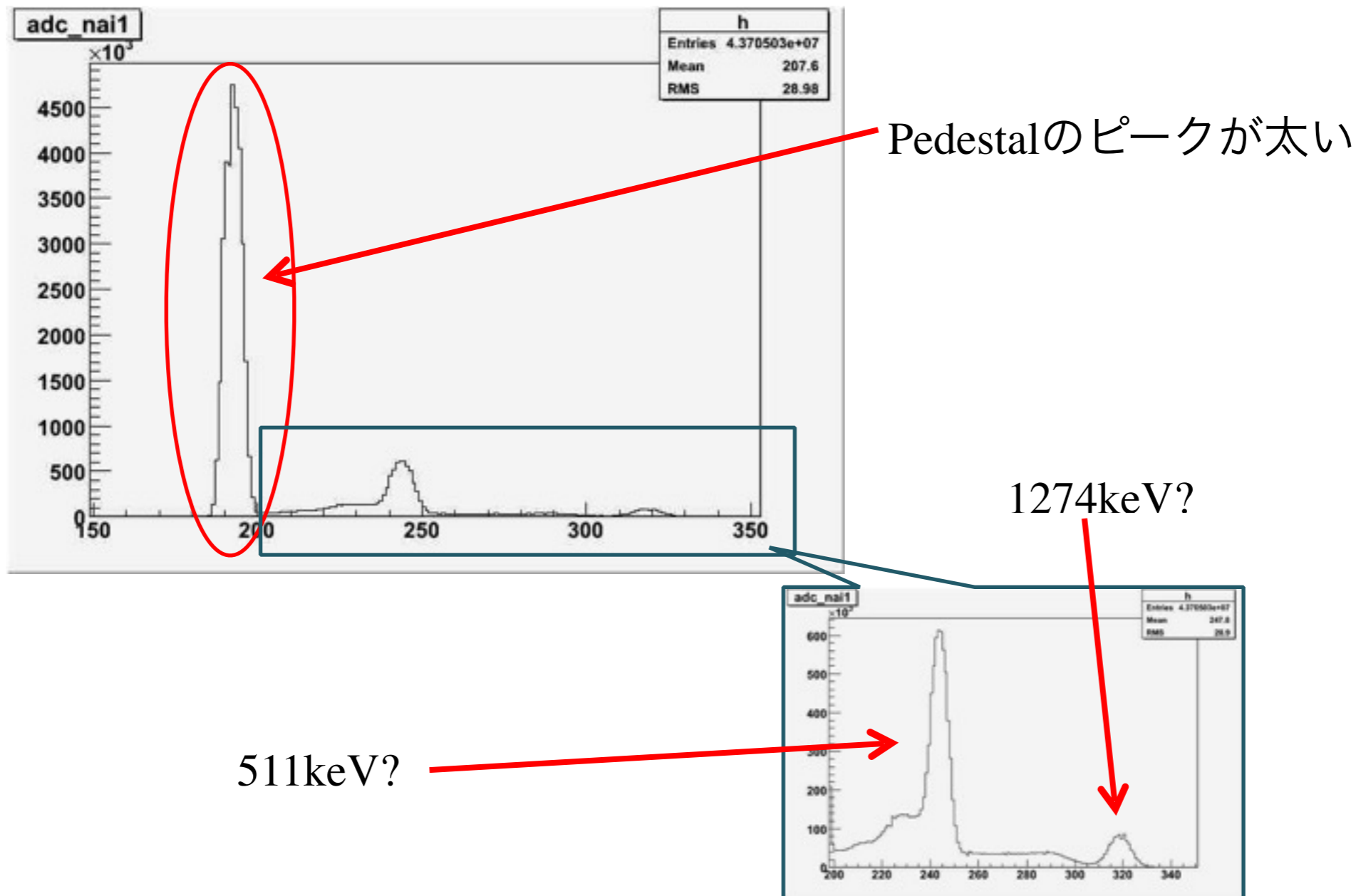
量子振動...じゃない!

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

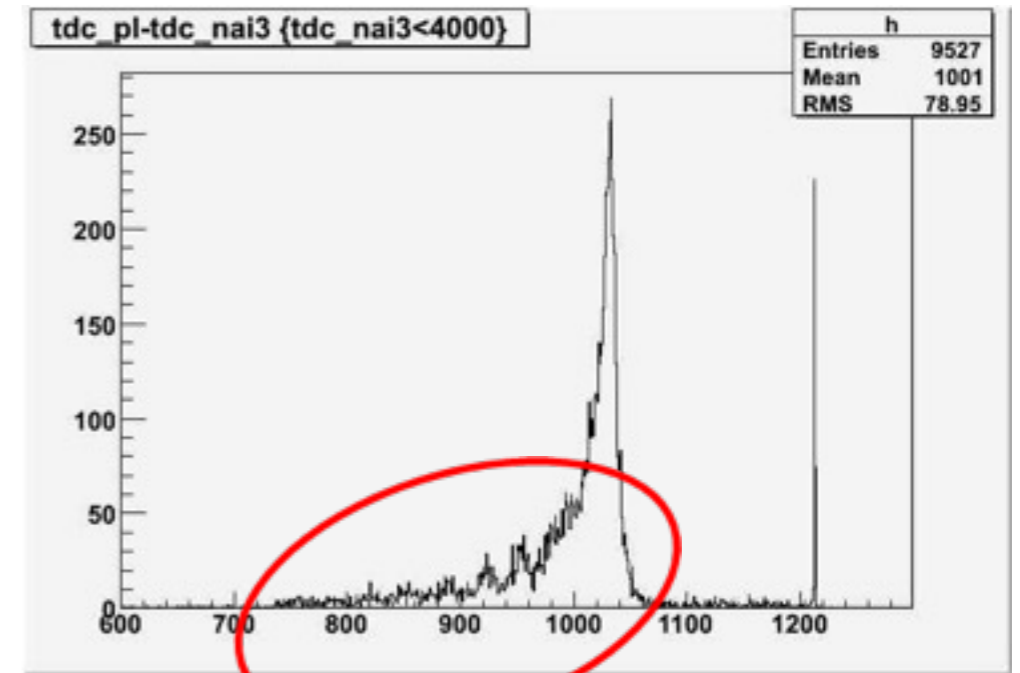
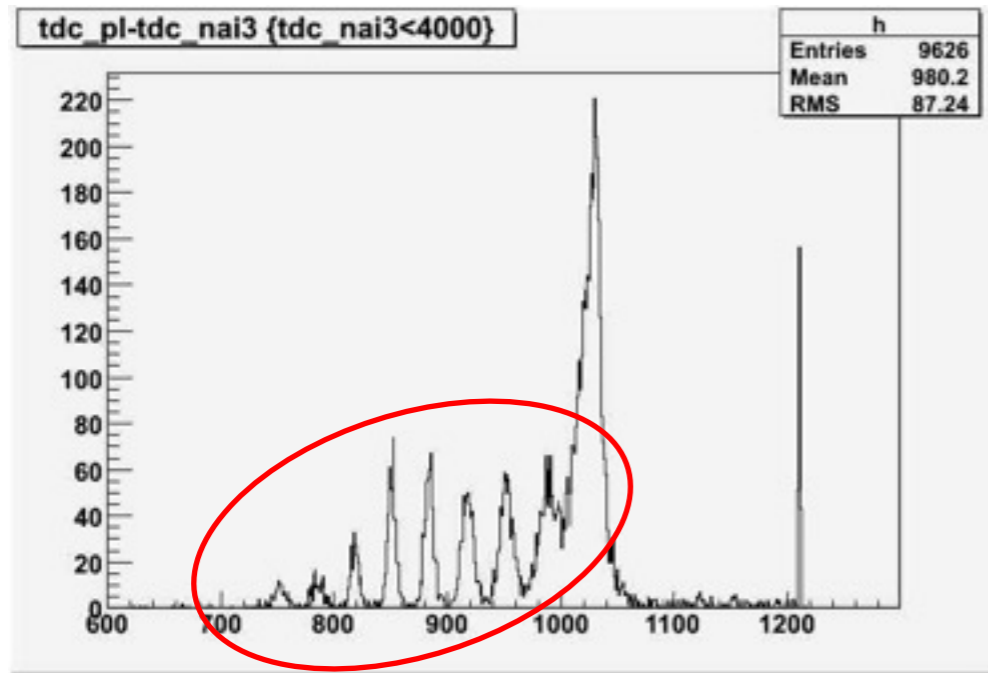


課題1

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

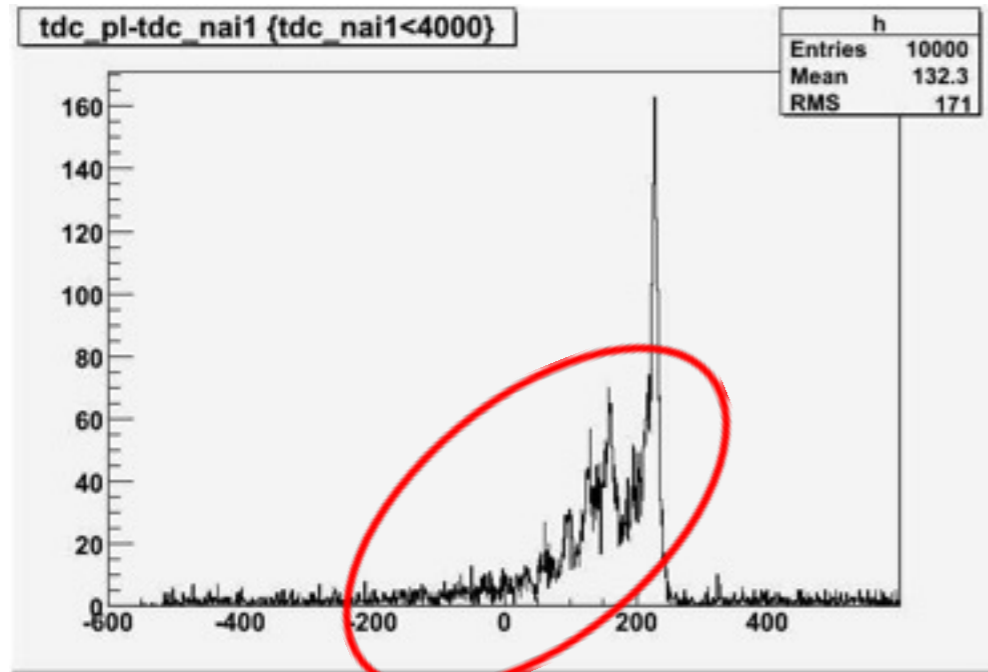


P.S.のディスクリ幅を
max(160ns)に

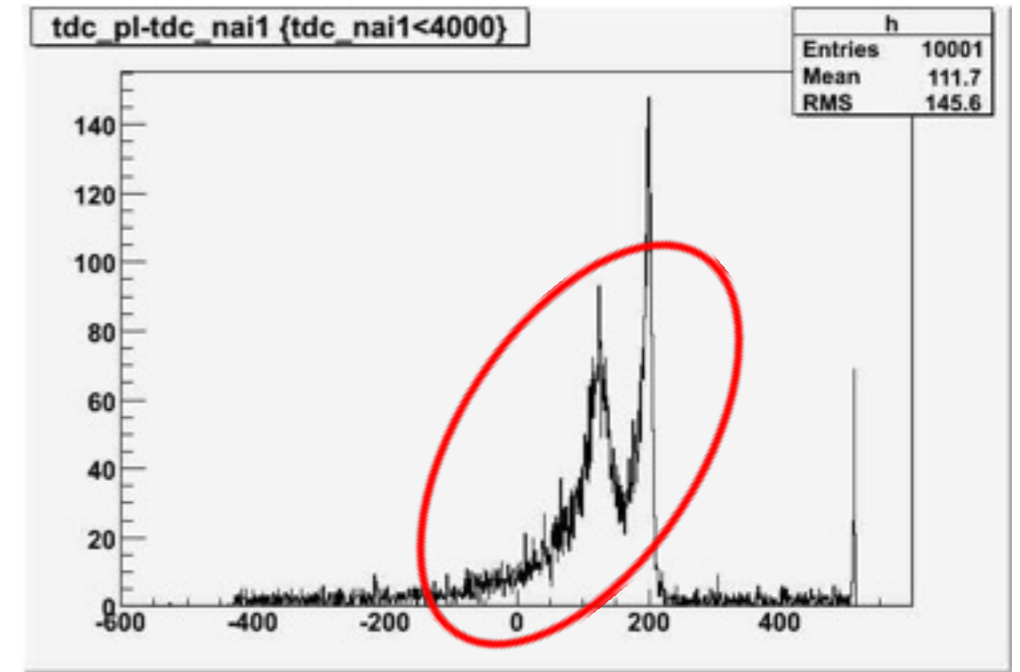
ましになった！

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

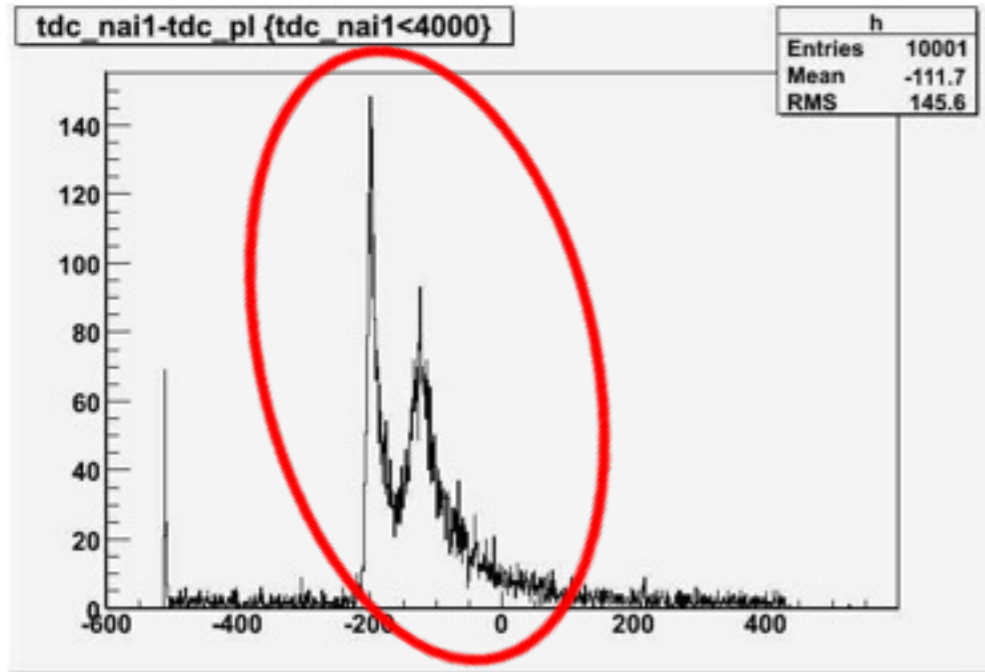


2つの山(悪化?)

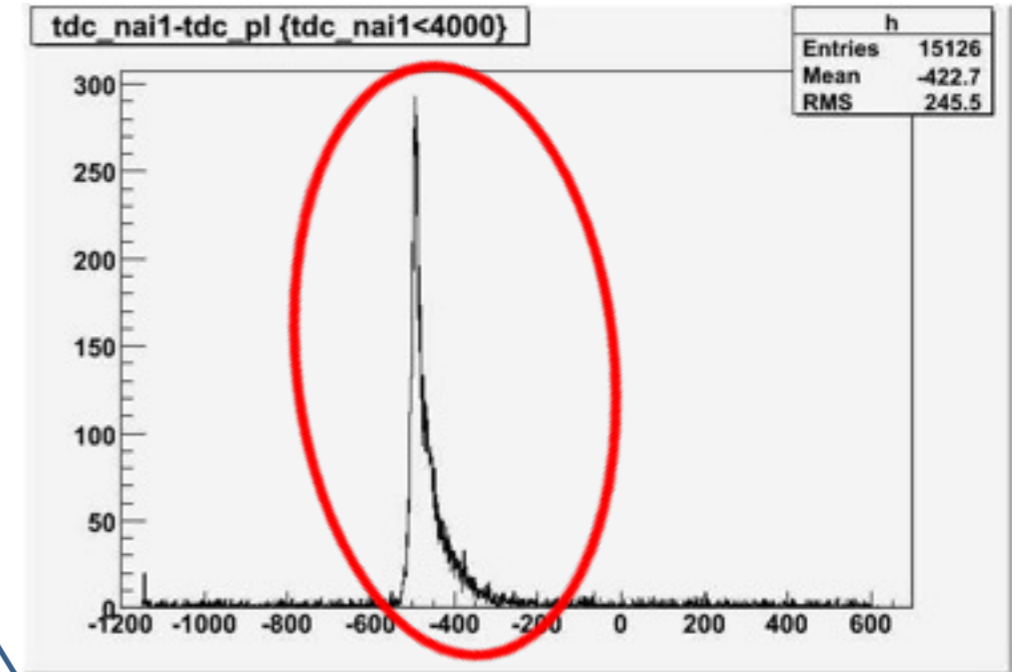
COINのTRIGGERを
NaIからP.S.に

寿命測定なのでTDCは
プラシニスタートにする方が自然

TDCモジュールの変更



2つの山



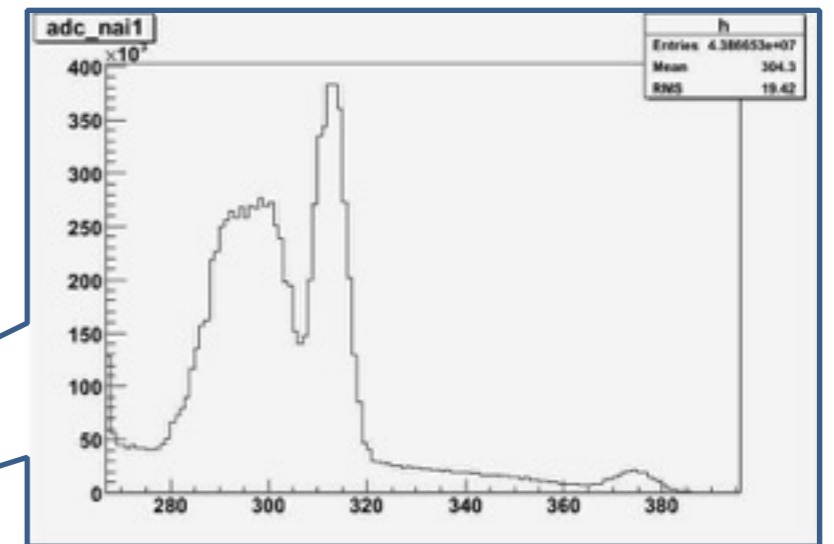
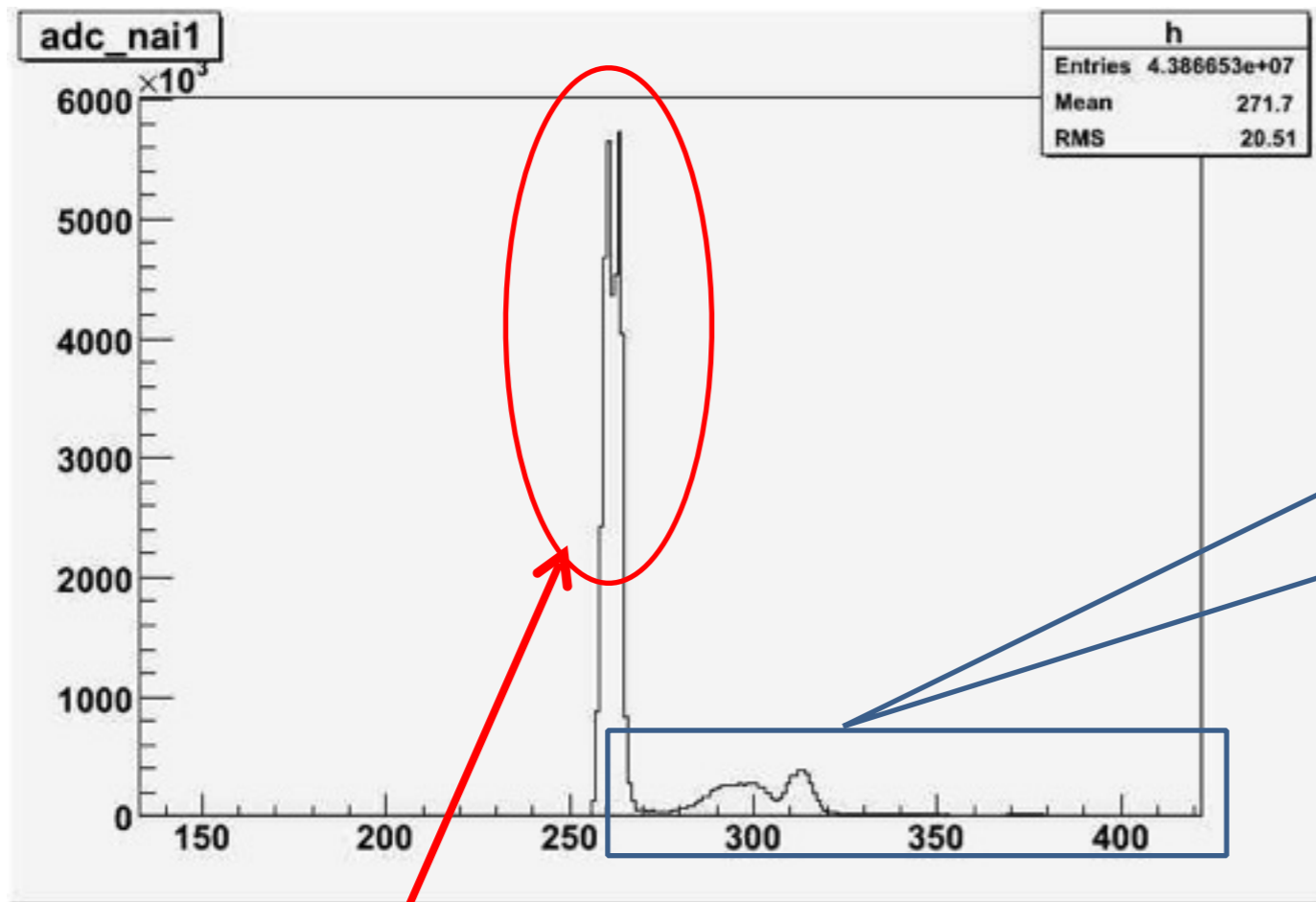
山が消えた！

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

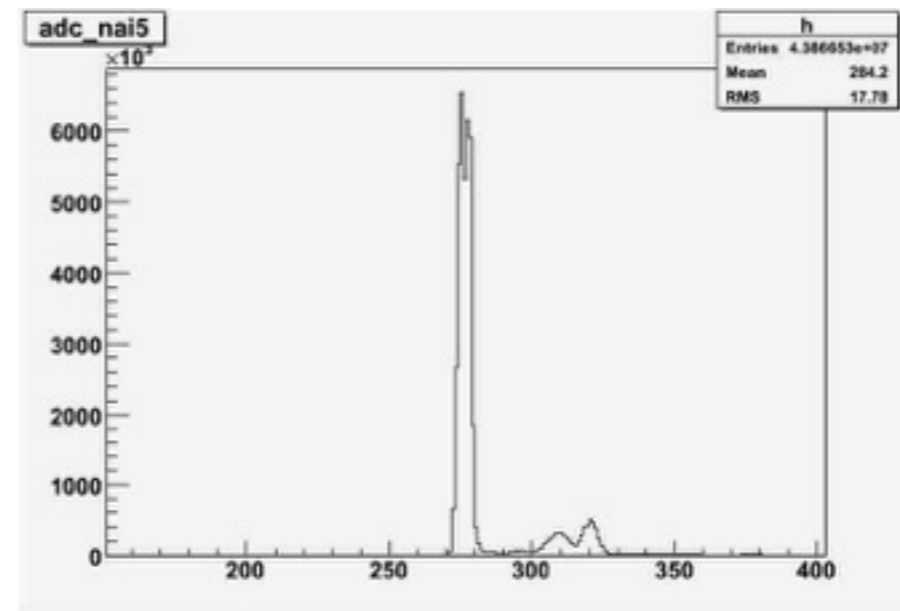
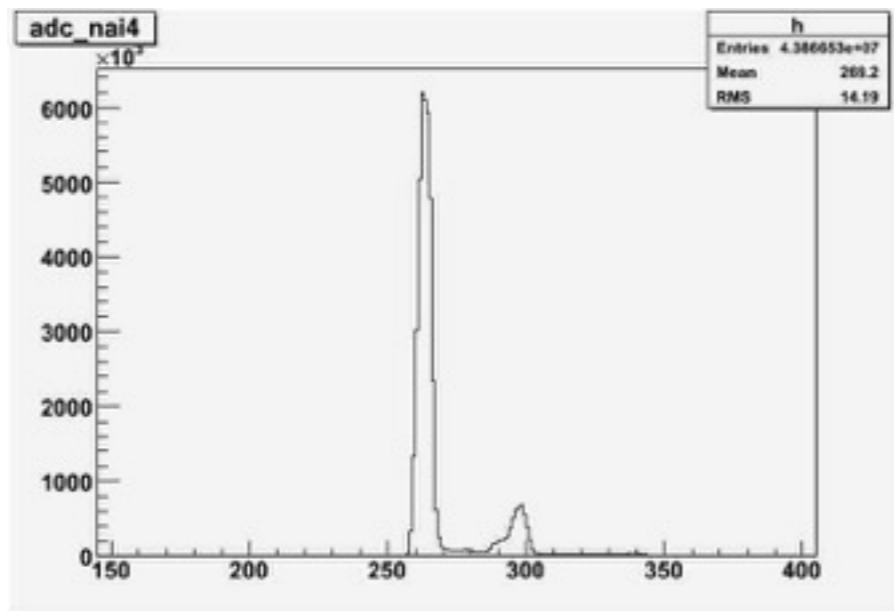
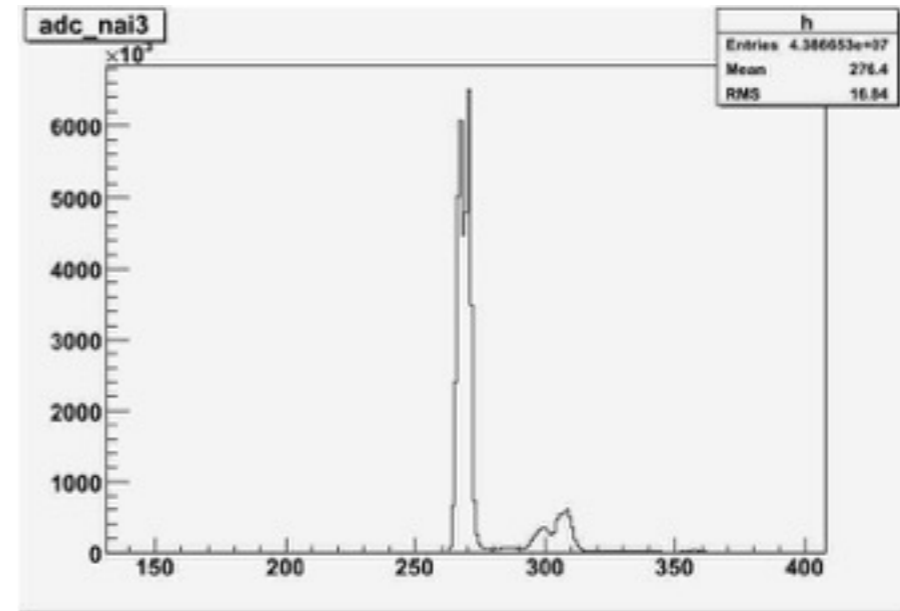
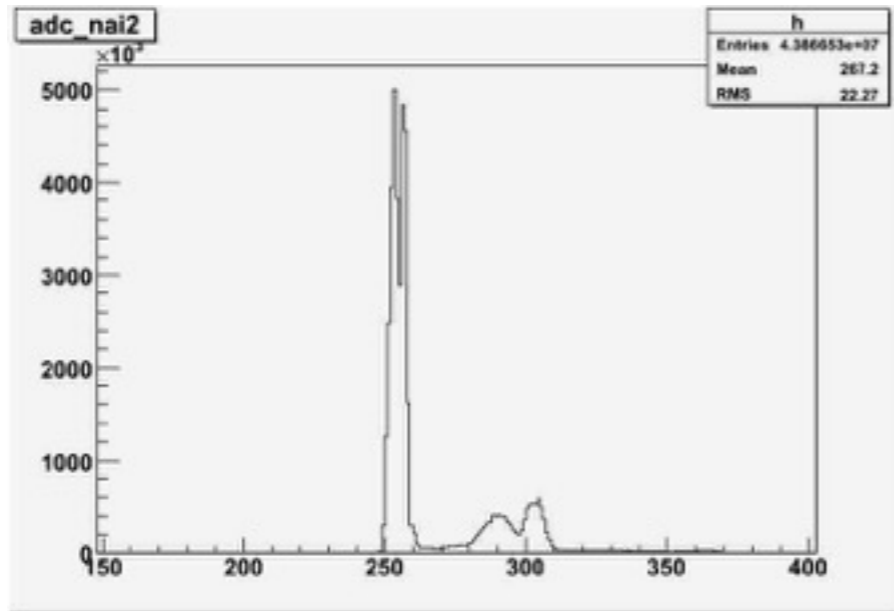
ADCヒストグラム



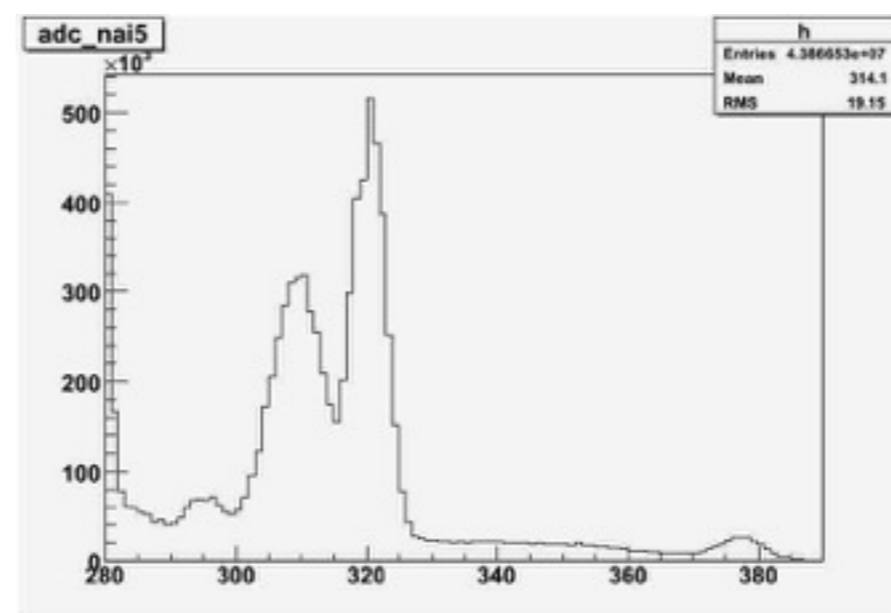
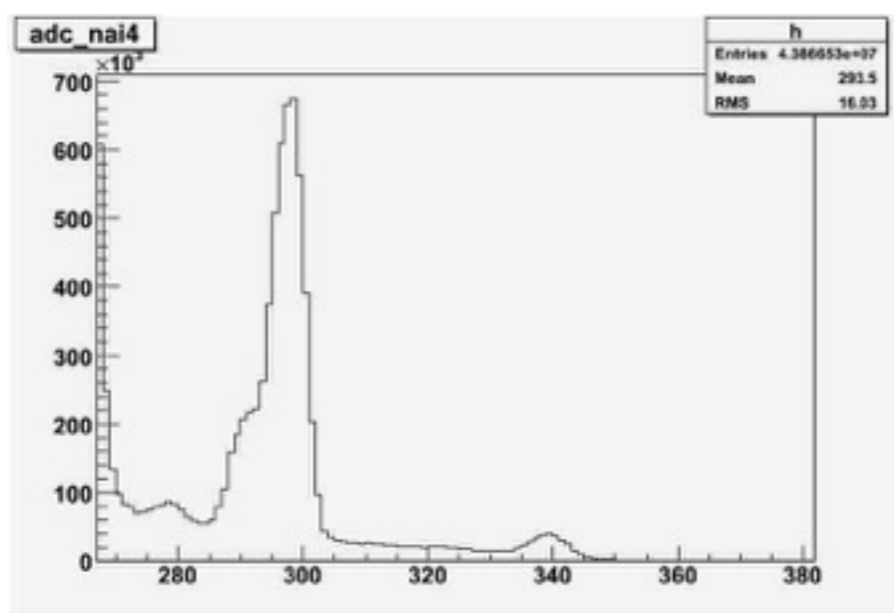
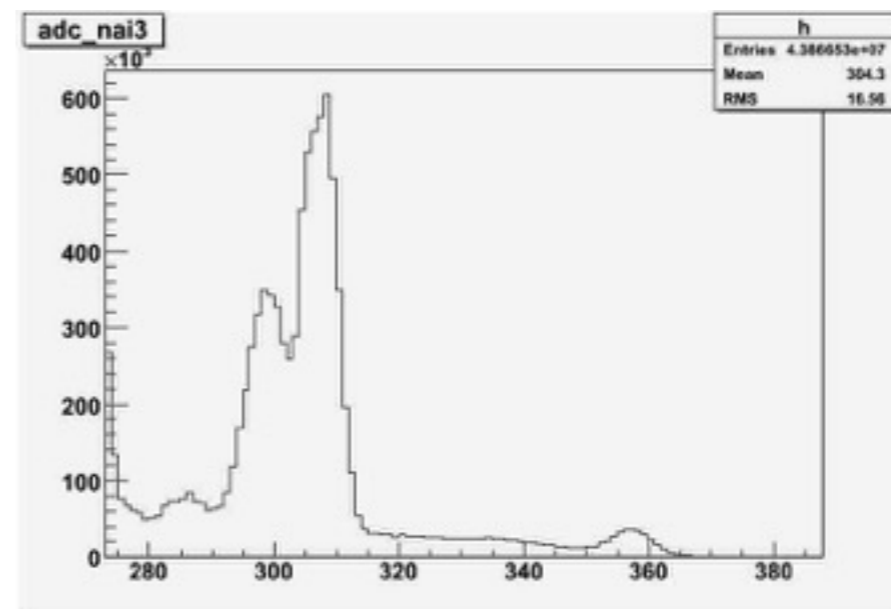
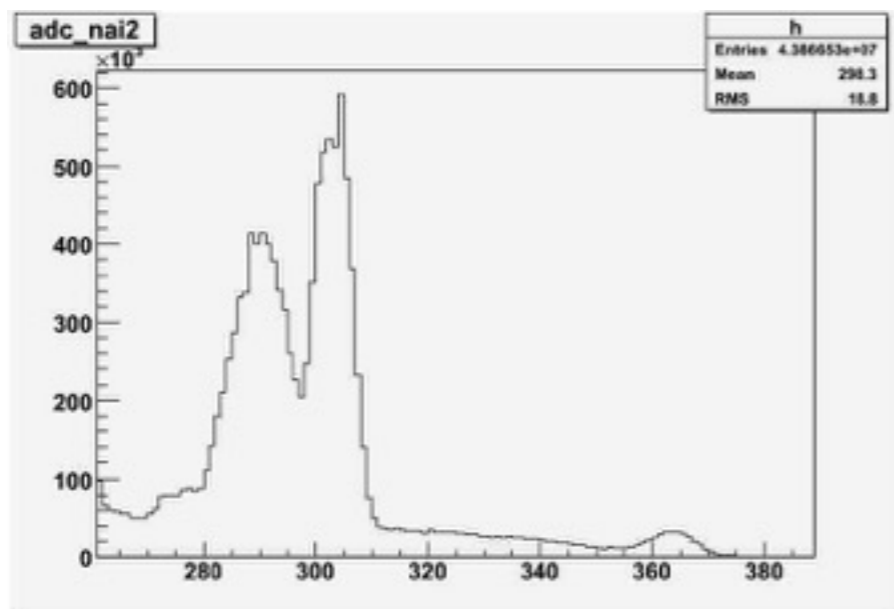
あまりきれいでない...

Pedestalが2つに割れている

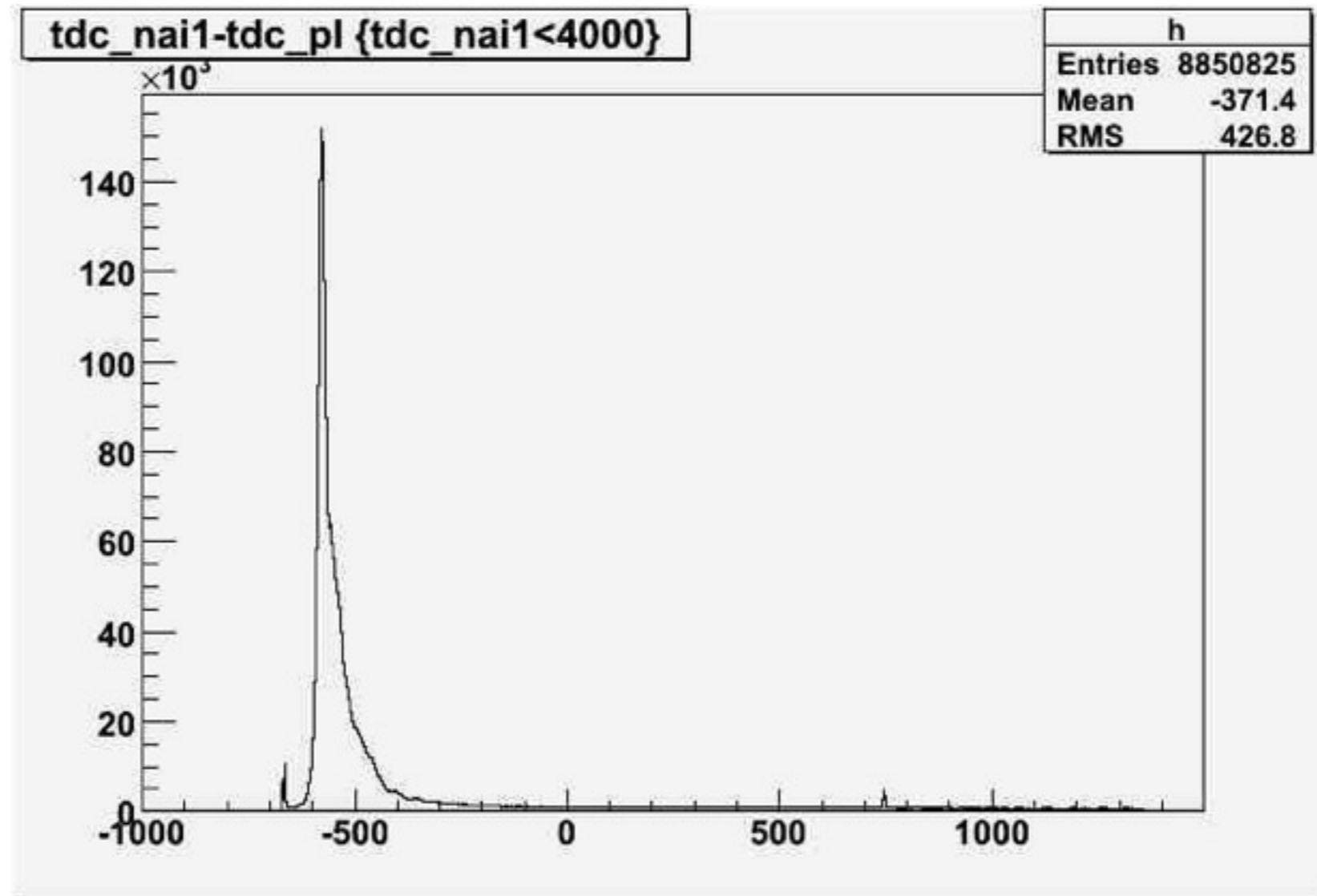
他のADCチャンネルも同様に



Pedestalより上では

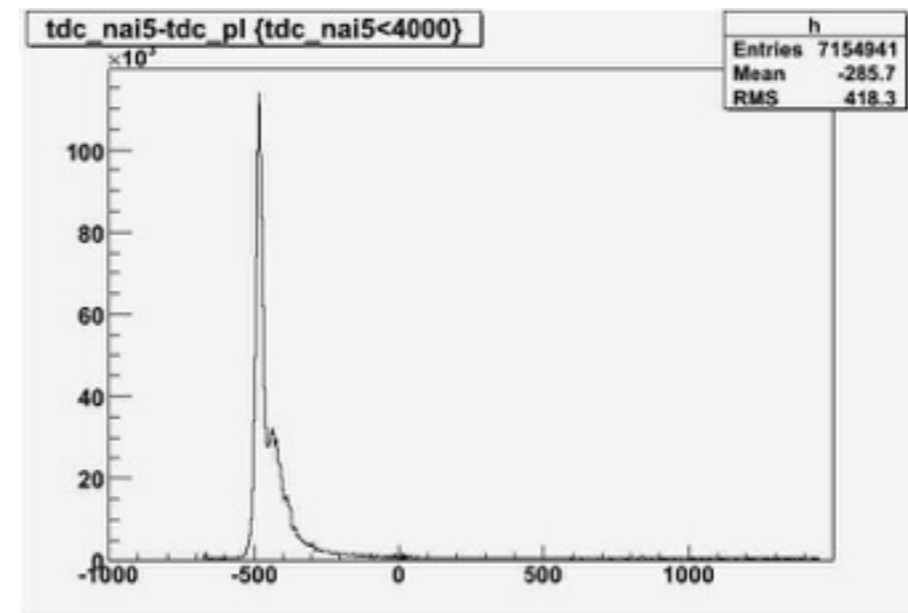
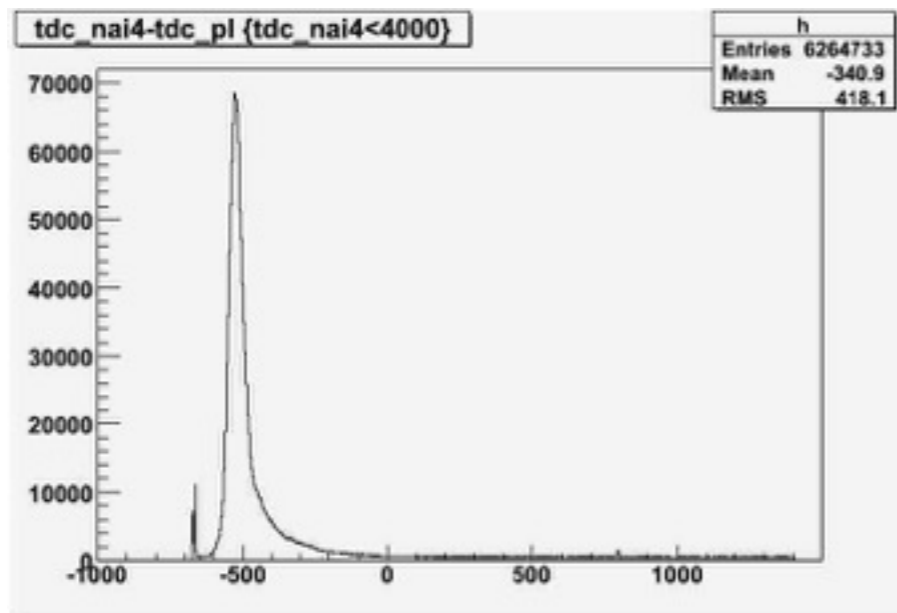
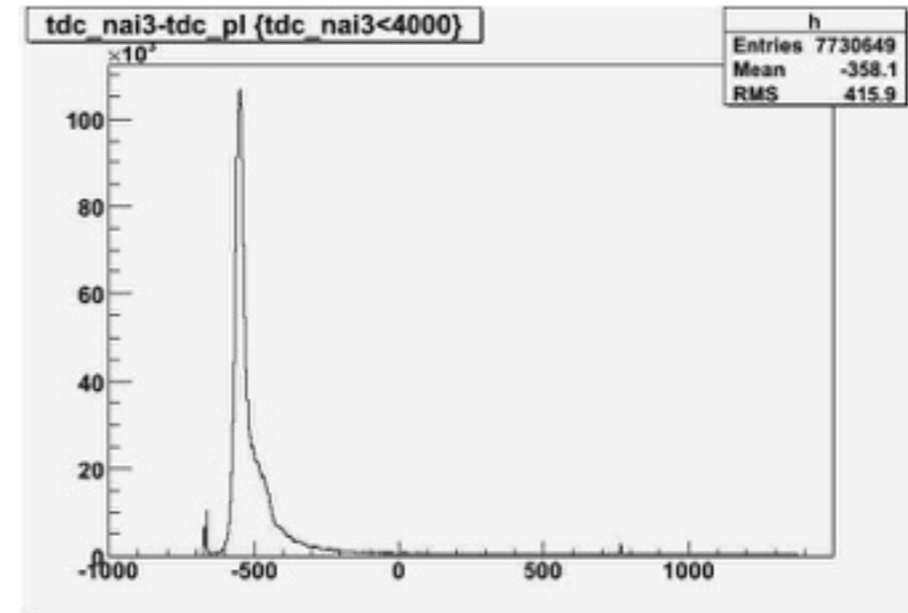
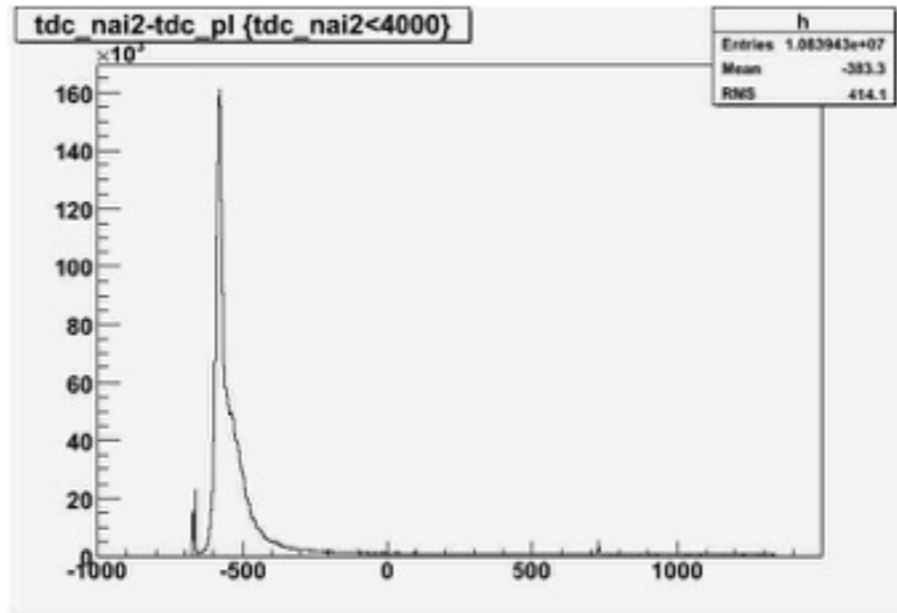


一方、TDCヒストグラムは



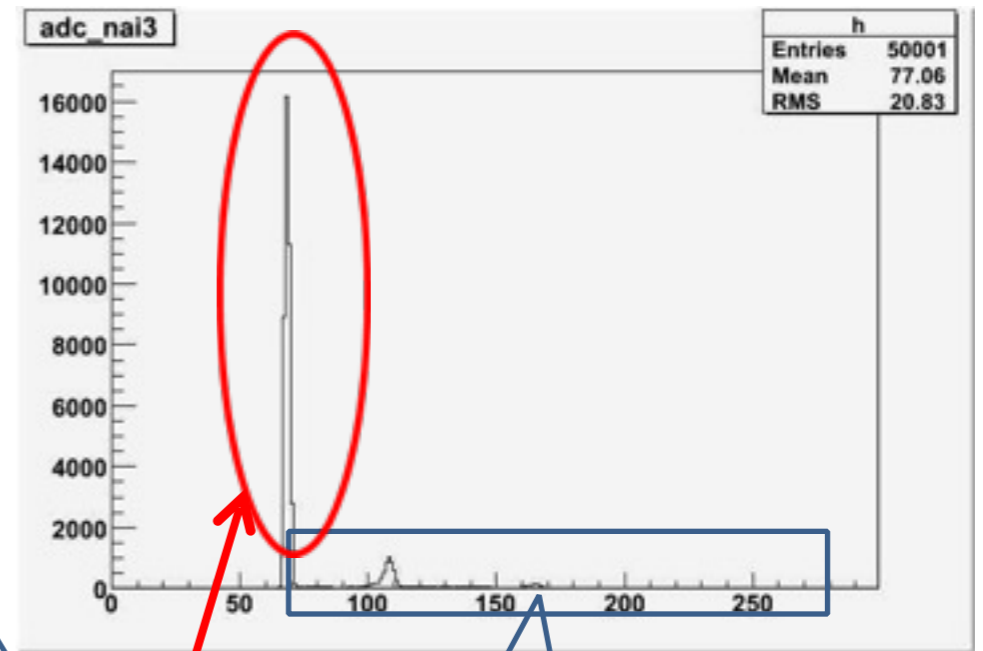
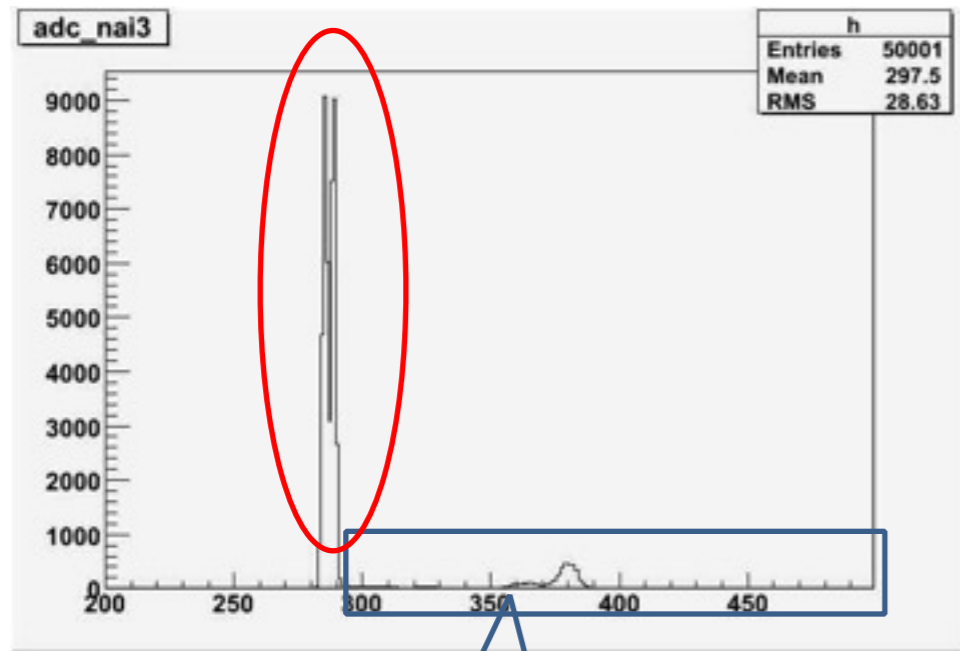
ある程度ましになった！

他のTDCチャンネルは



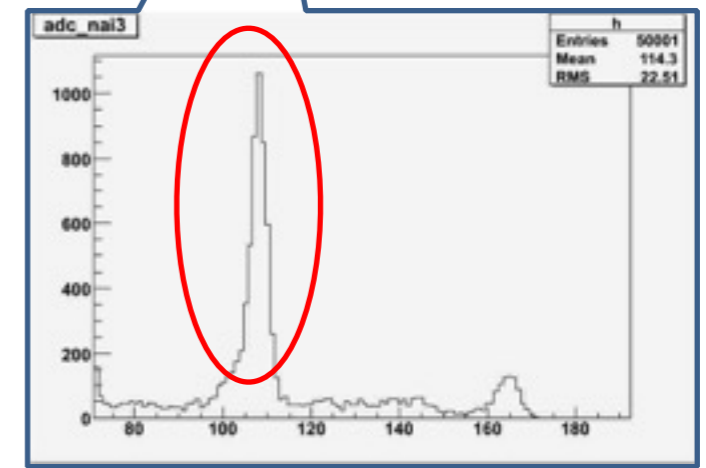
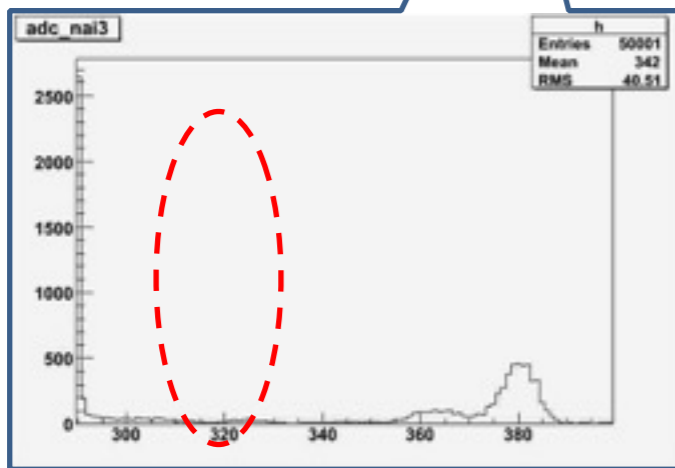
TDCはある程度ましになったので、
今度はADCのヒストグラムを
きれいにしたい

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

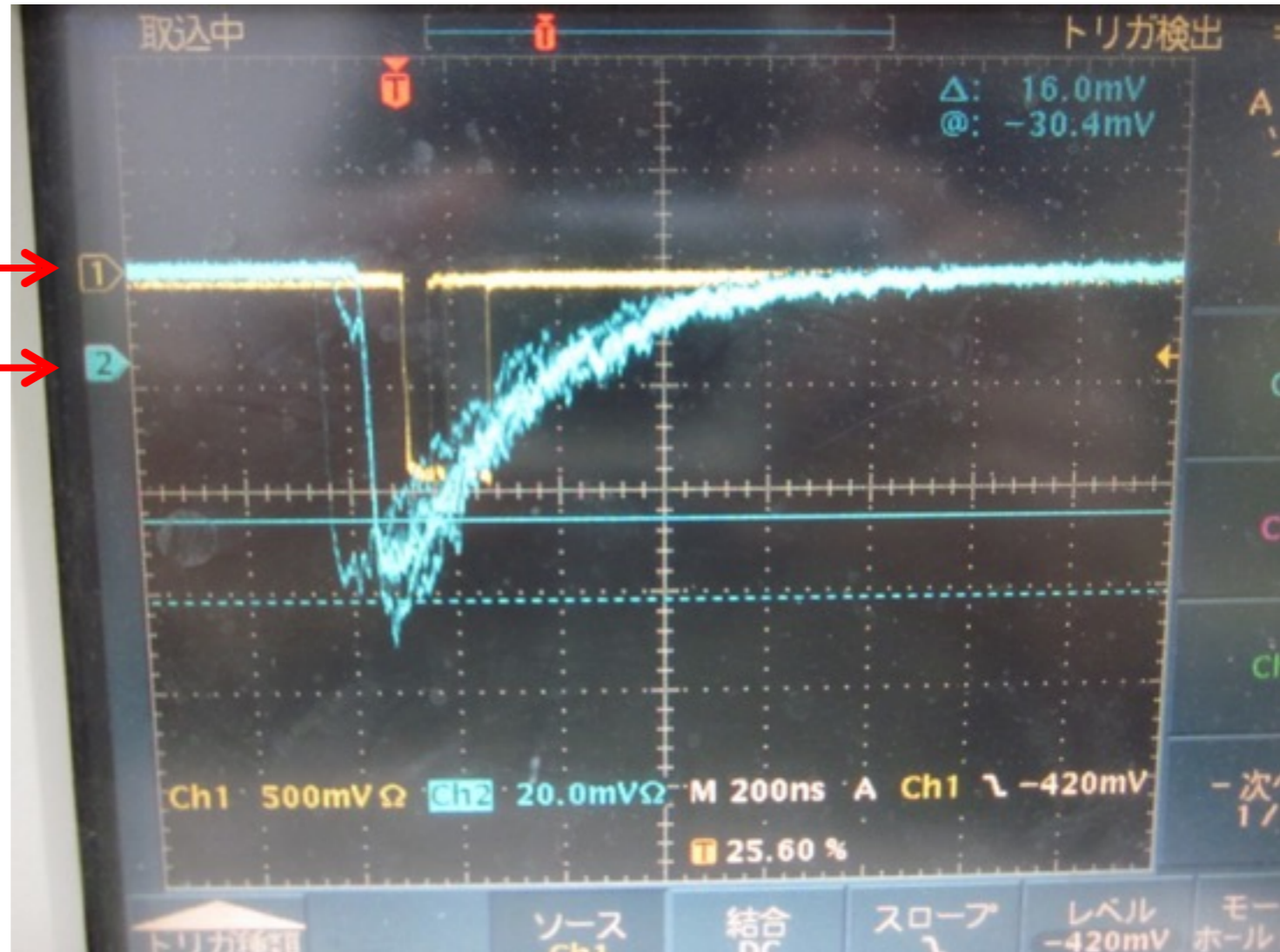
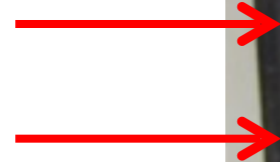
割れてない!



511keV?出現

Offset 問題

Offset
ground



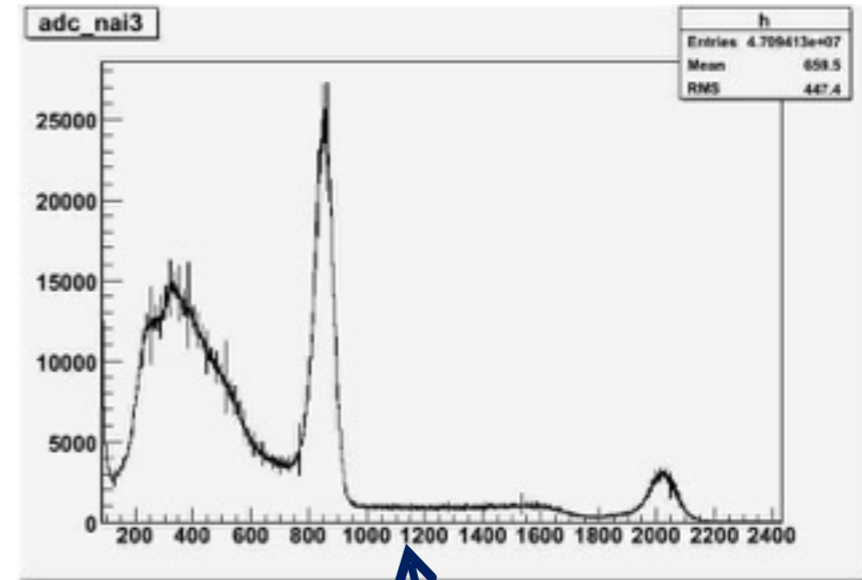
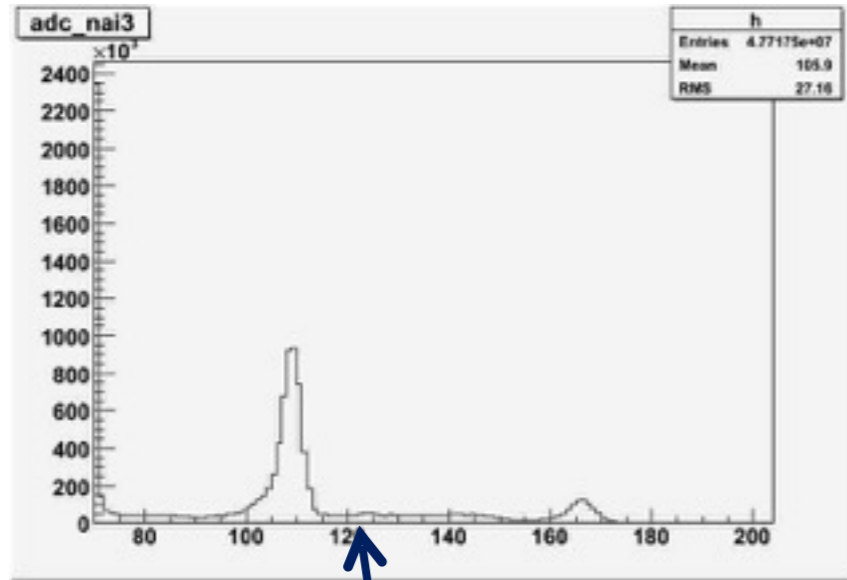
実はかねてから、
offsetの値がground
よりも高いという
問題があった…

DISのthresholdは
groundから測る

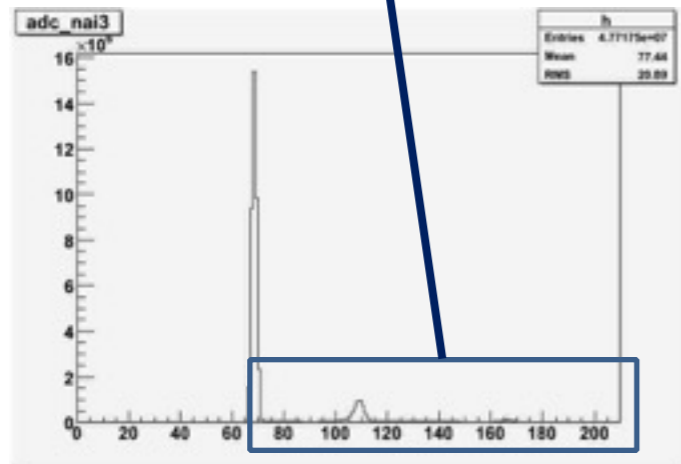


Offsetをgroundに合わせないと、
正確にthresholdをかけられない！

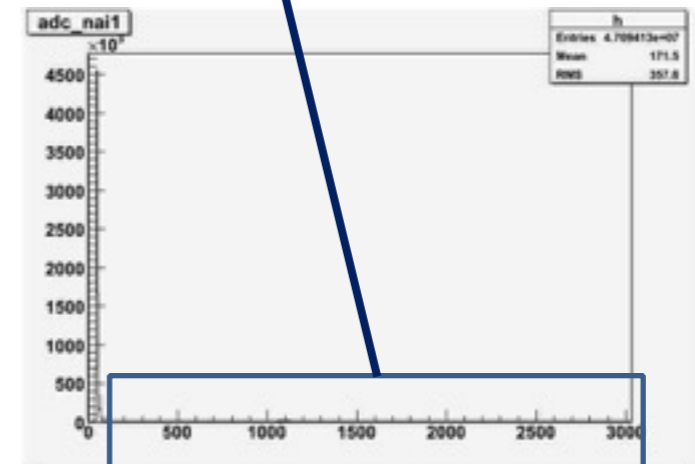
アンプの変更



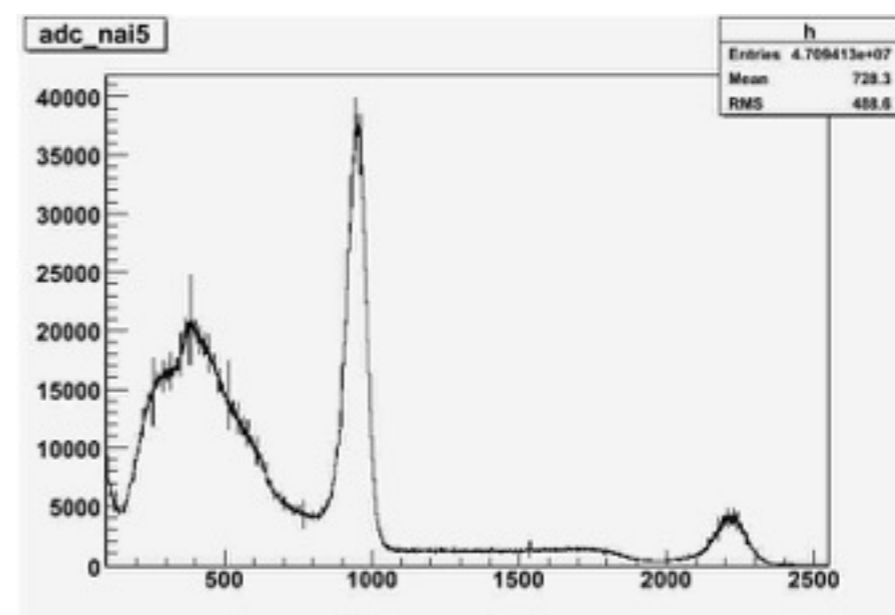
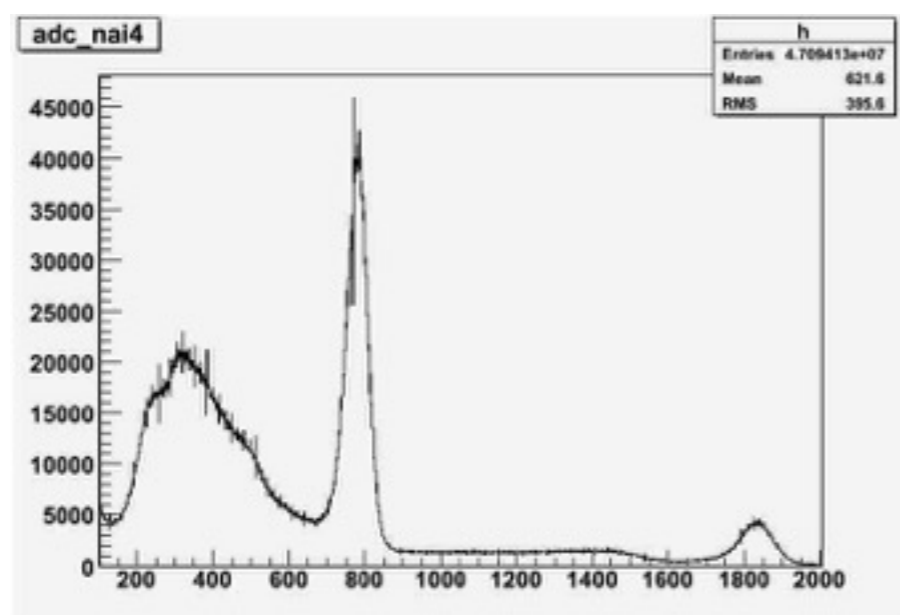
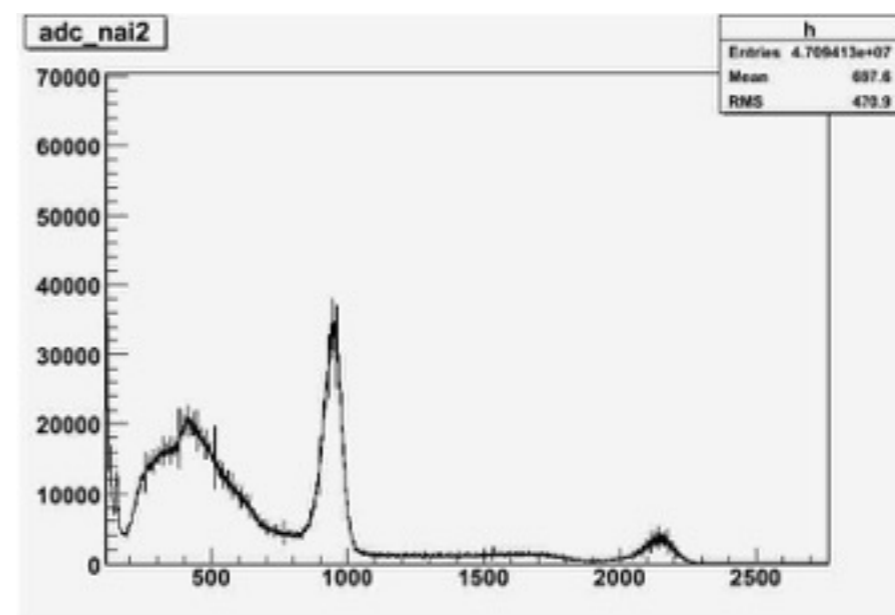
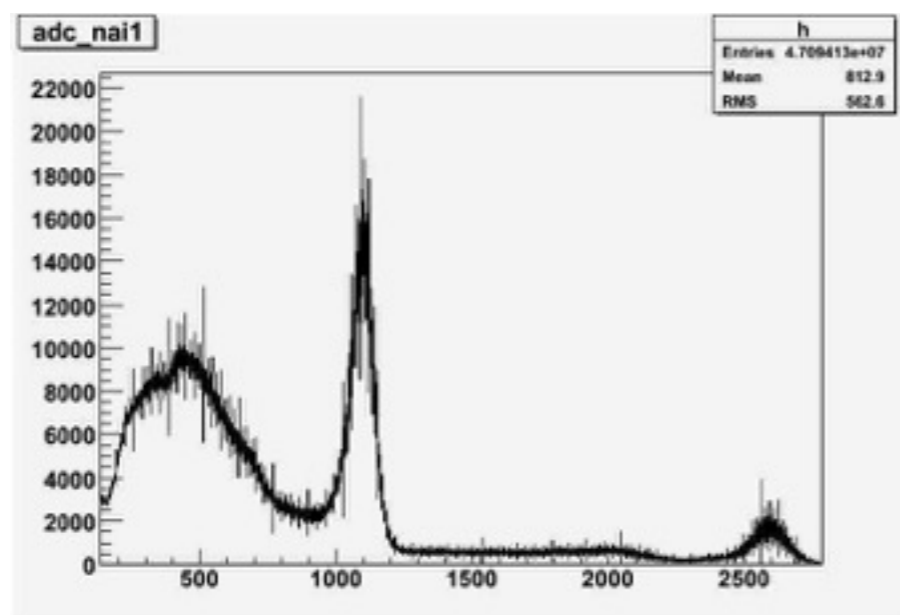
アンプのモジュールを
REPIC RPN-090から
TKY-0351に変更



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

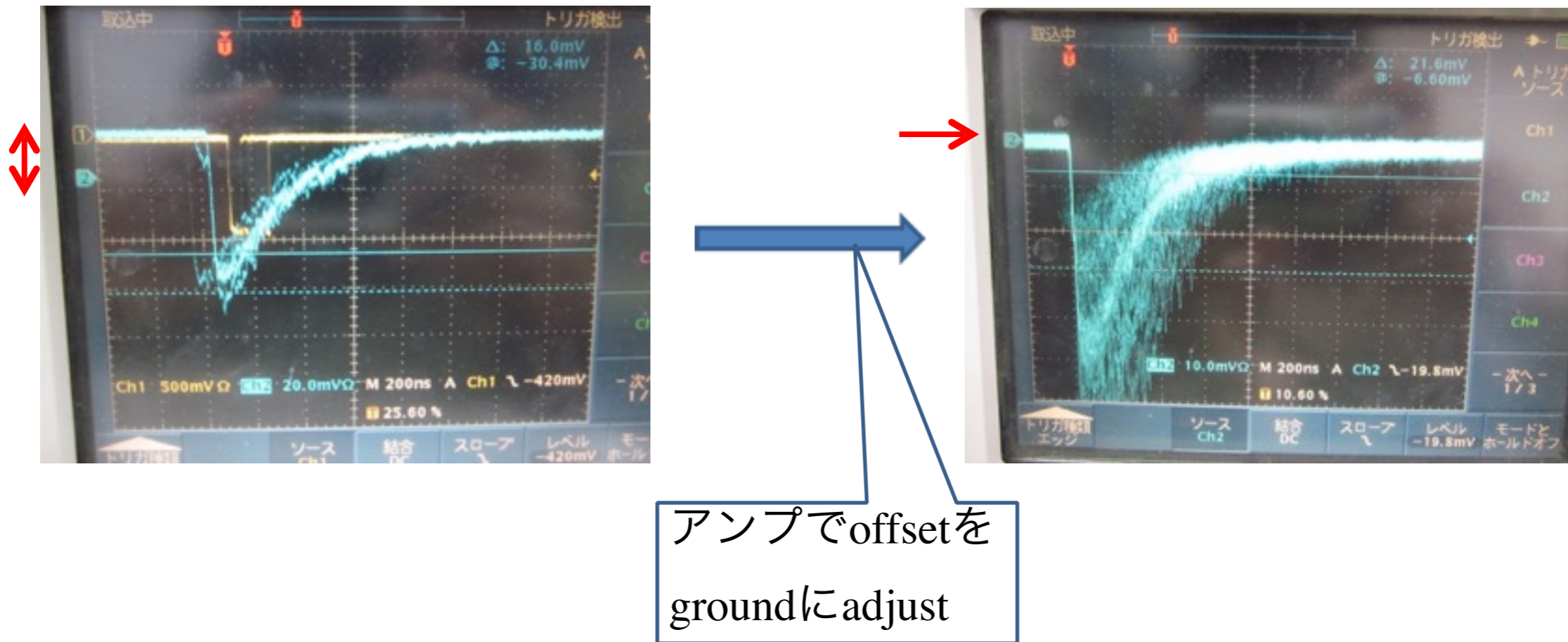


他のADCチャンネルも同様に...



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

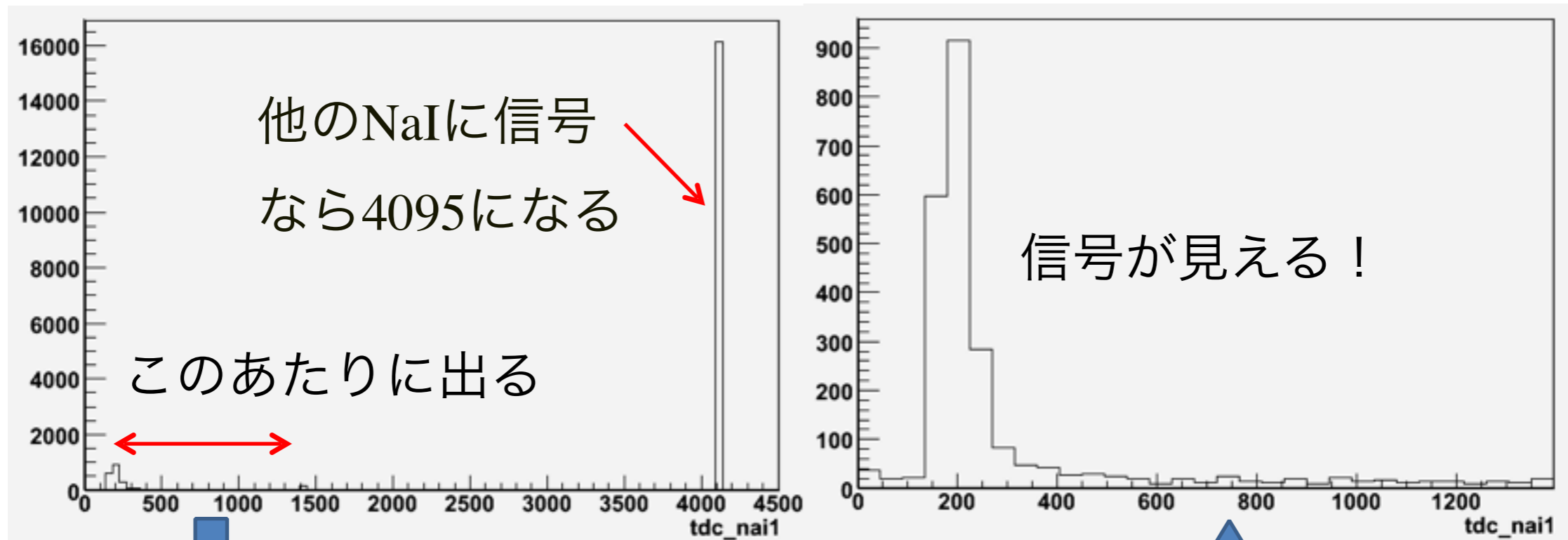
ヒストグラムの形はきれいになったが、
ADC、TDCの値が対応していない

→ 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

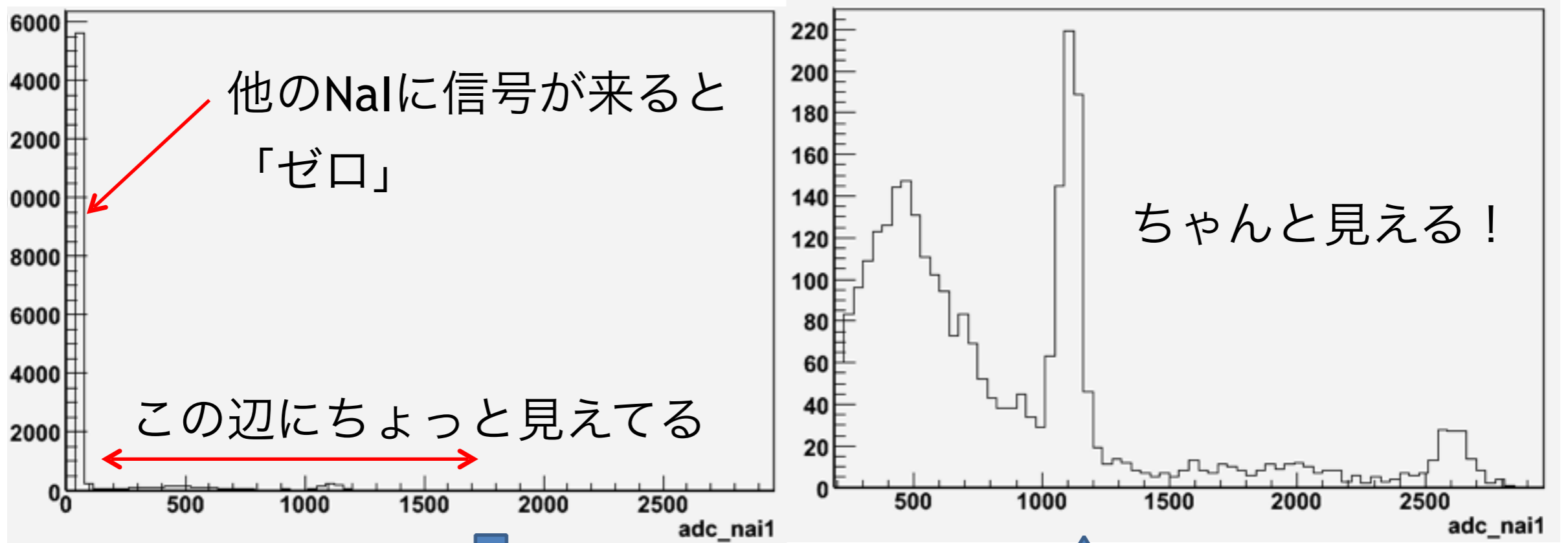
TDCの生のデータ



拡大すると

veto入れる前

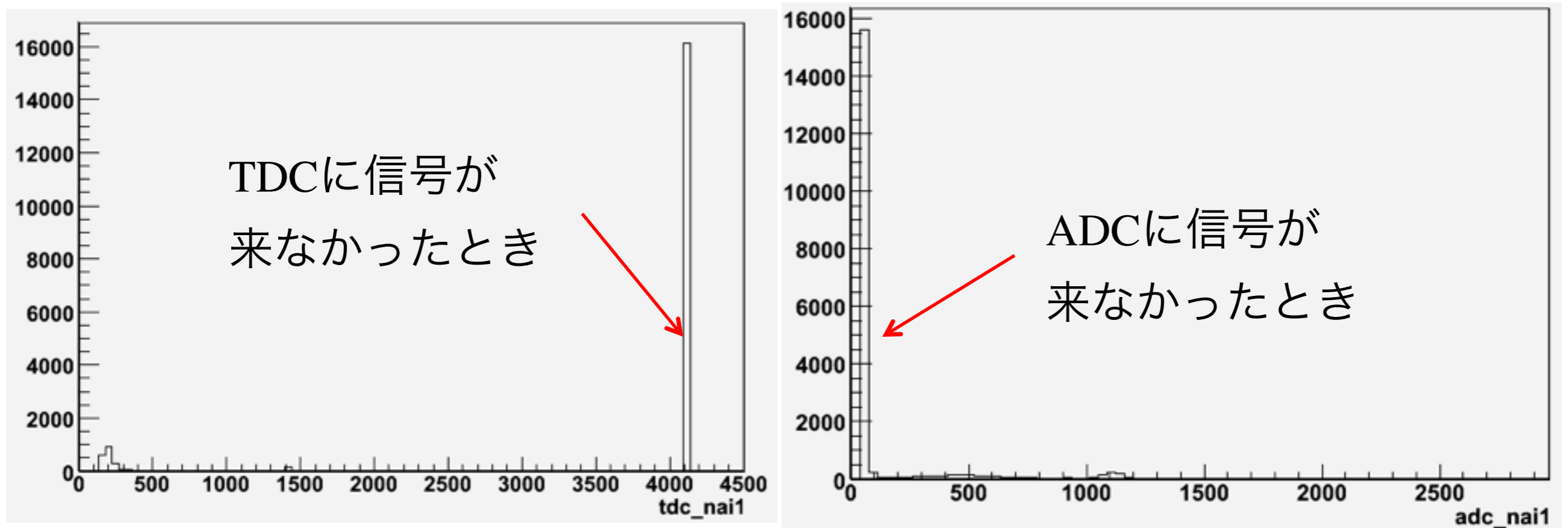
ADCの生のデータ



拡大すると

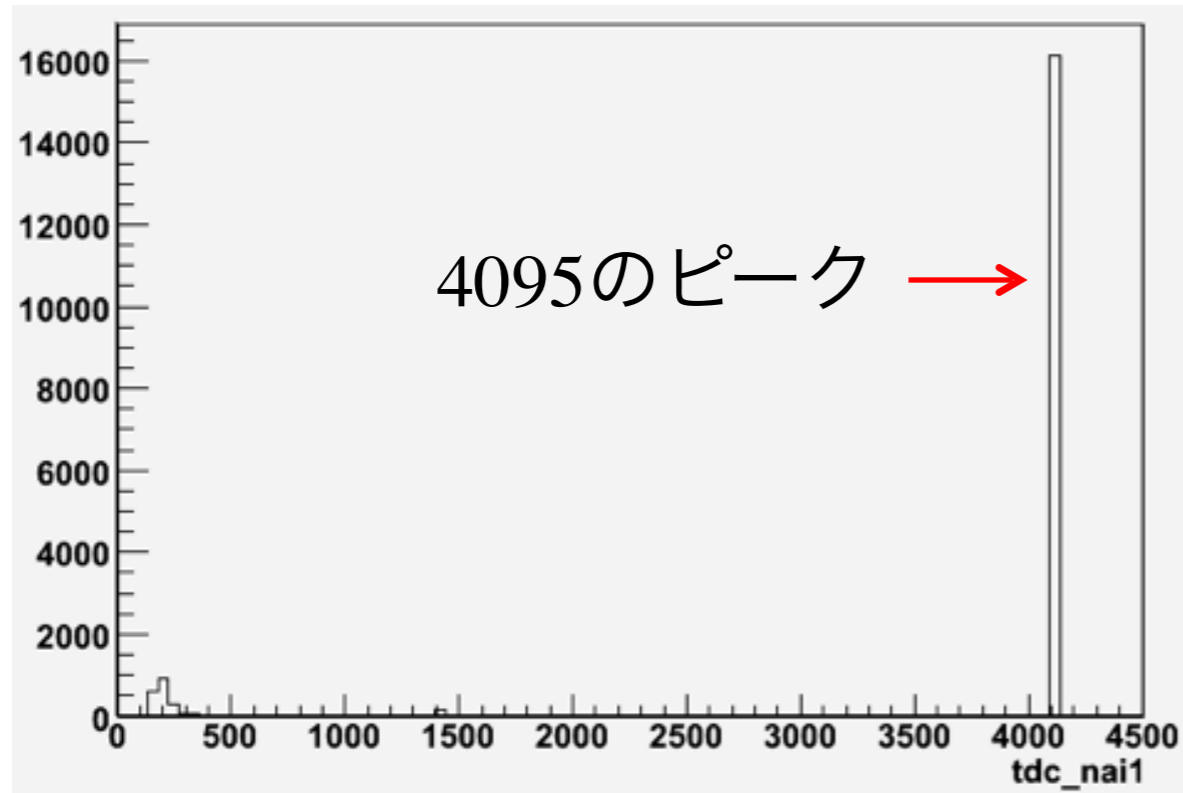
veto入れる前

- ・ 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

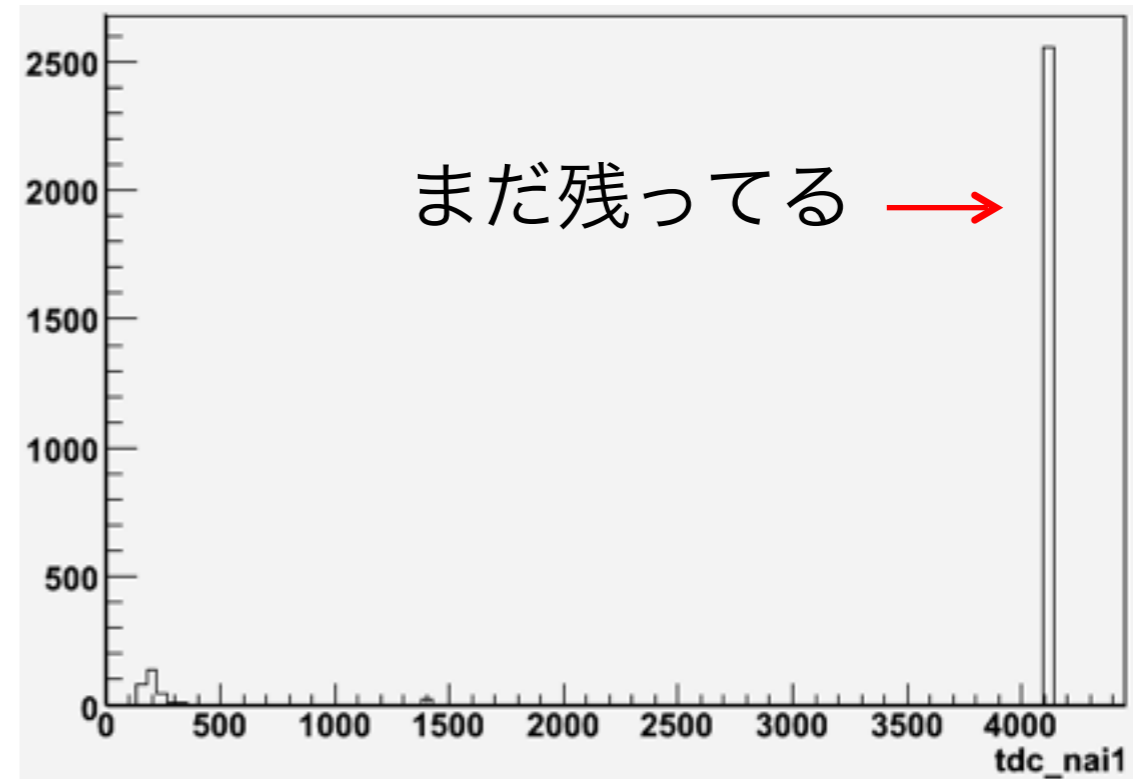
veto入れる前



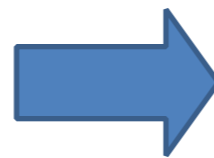
消えなかった！

→ADC来てないのに、
TDC来てる時がある??

信号が混ざってる！



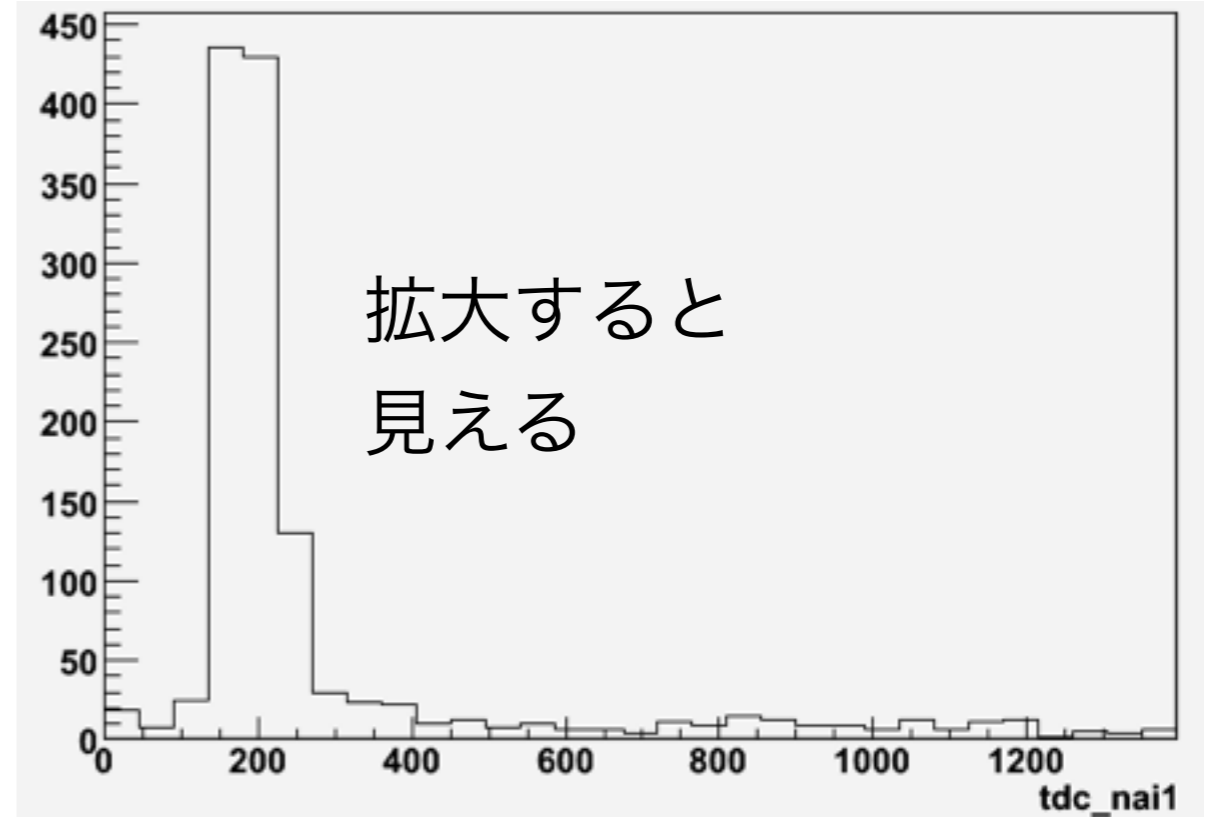
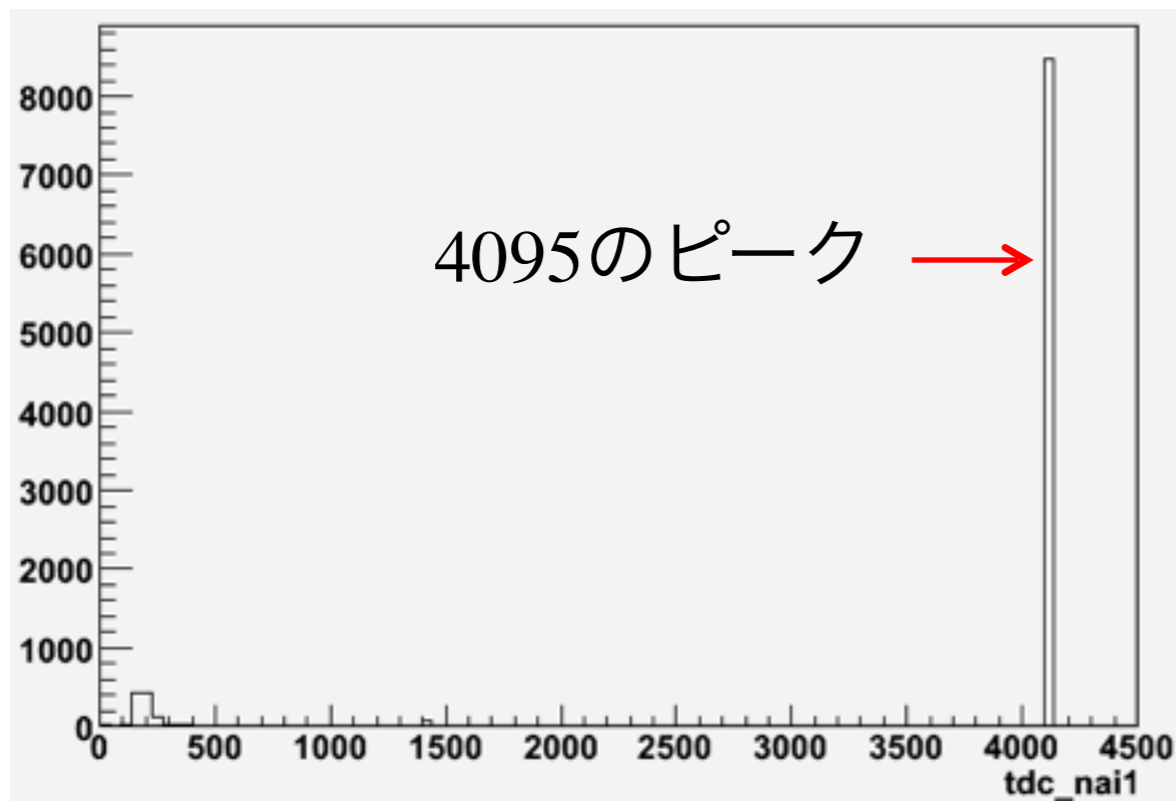
「ADC>150」の条件で
ヒストグラムを書く



原因は？

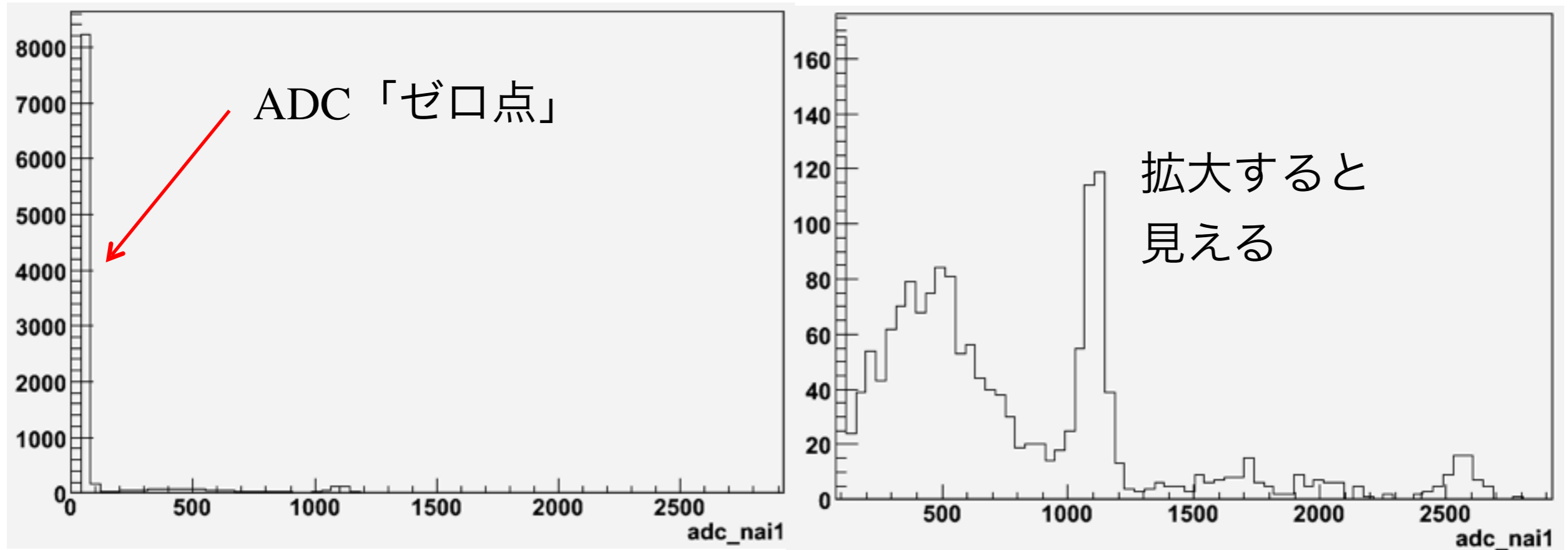
- ・ どうやら、信号のレートが高すぎる
 - PCで読み出す際に混ざってしまう！
- ・ Coincidenceのトリガーにvetoを入れることでレートを下げる
- ・ Coincidenceの信号を自らのトリガーのvetoに入れることで、一度Coincidenceから信号が出るとその後一定期間トリガーを出さなくなる。

veto入れた後



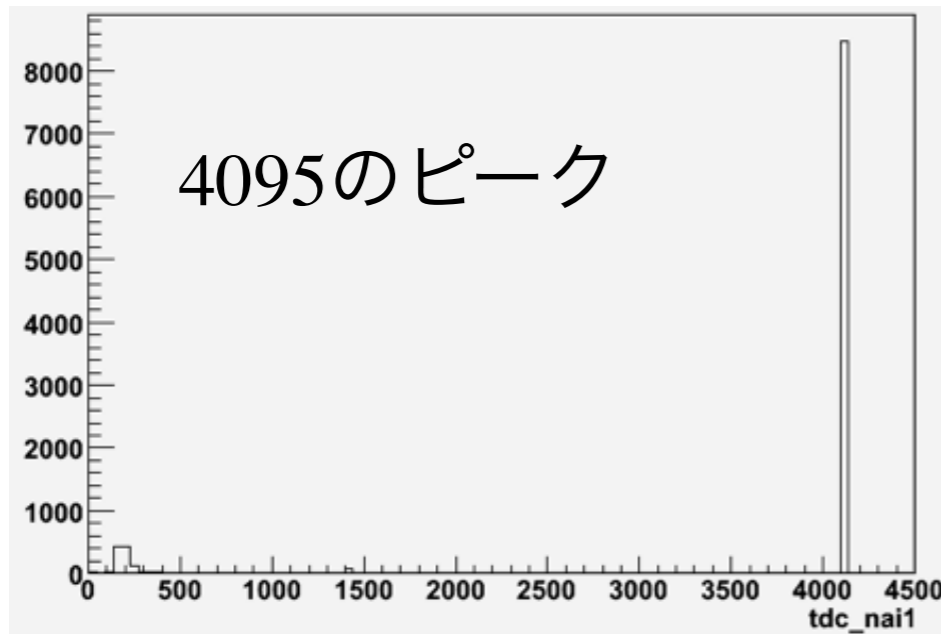
TDC生データ→見た目はほぼ一緒

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

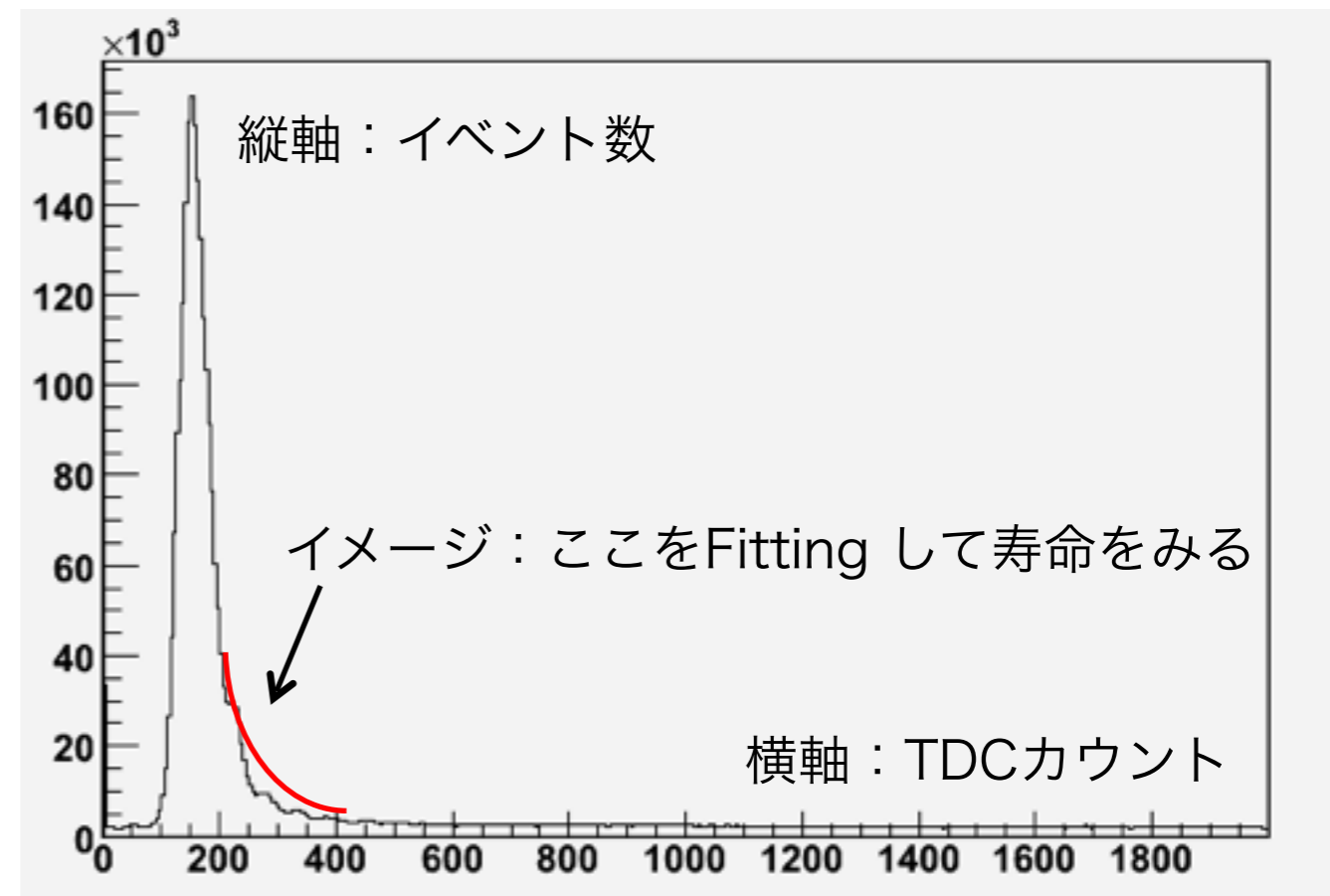


補正・解析

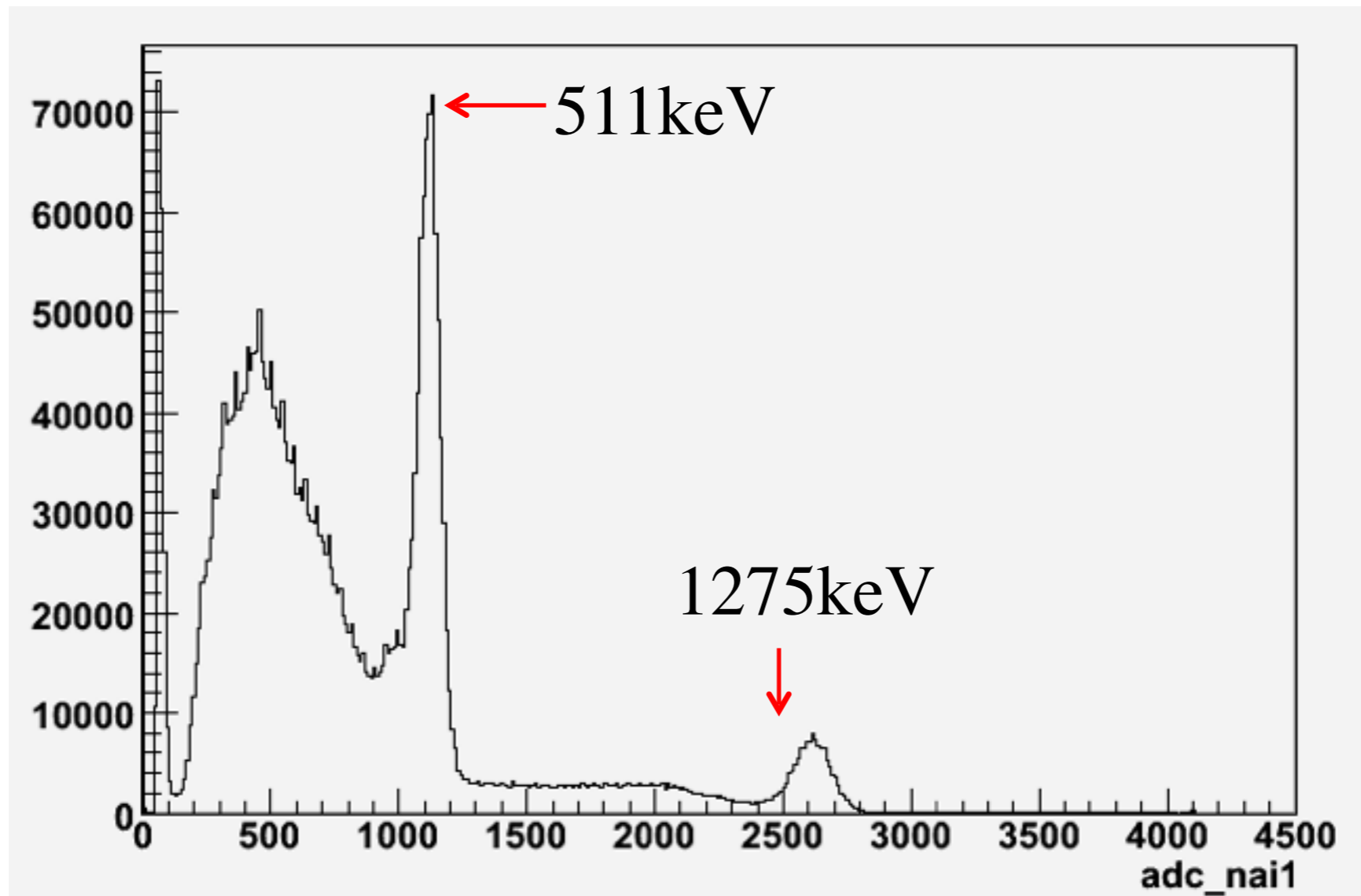
powered by  **ROOT**
Data Analysis Framework

解析

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



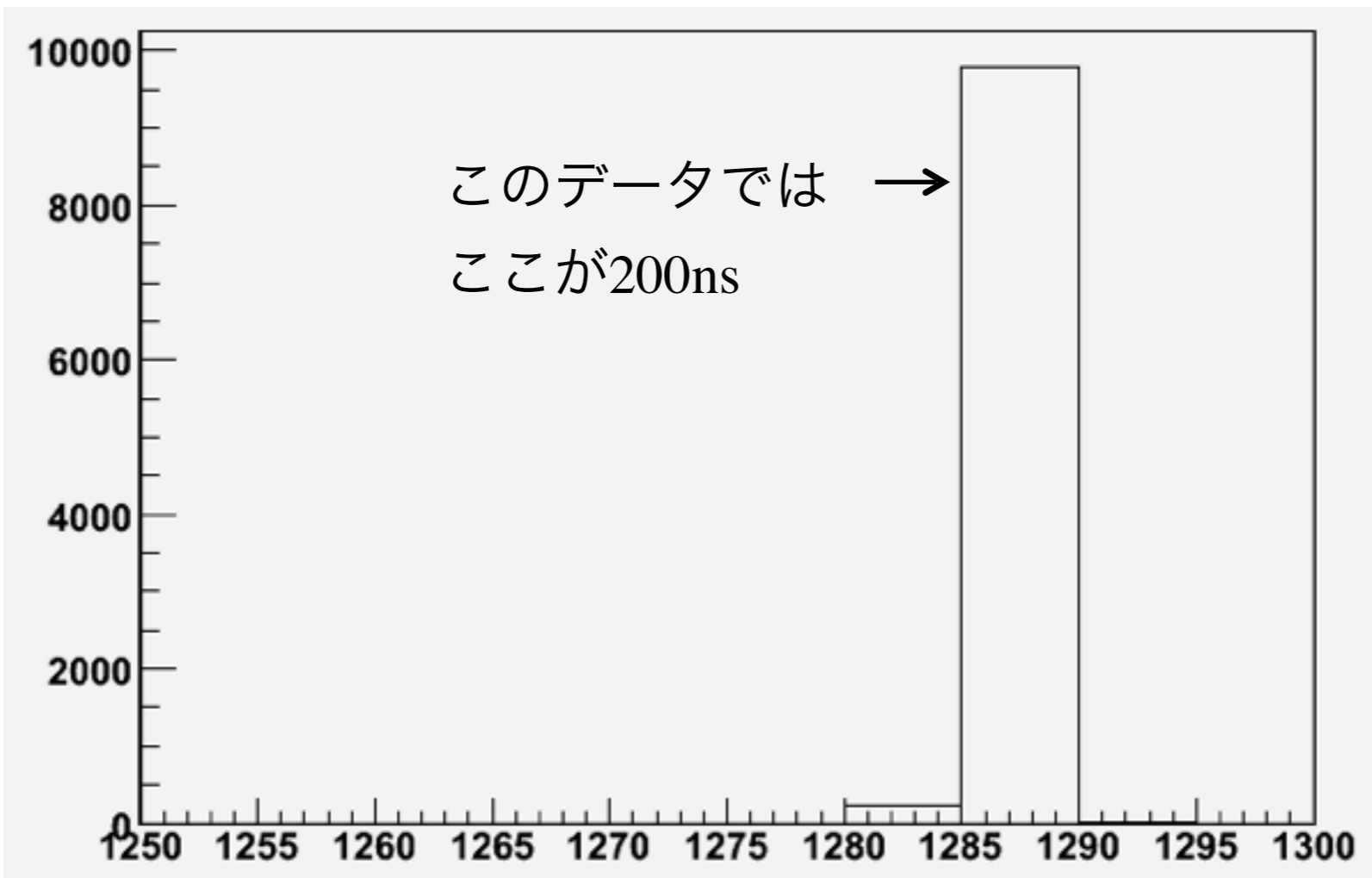
ADCキャリブレーション



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

イベント数

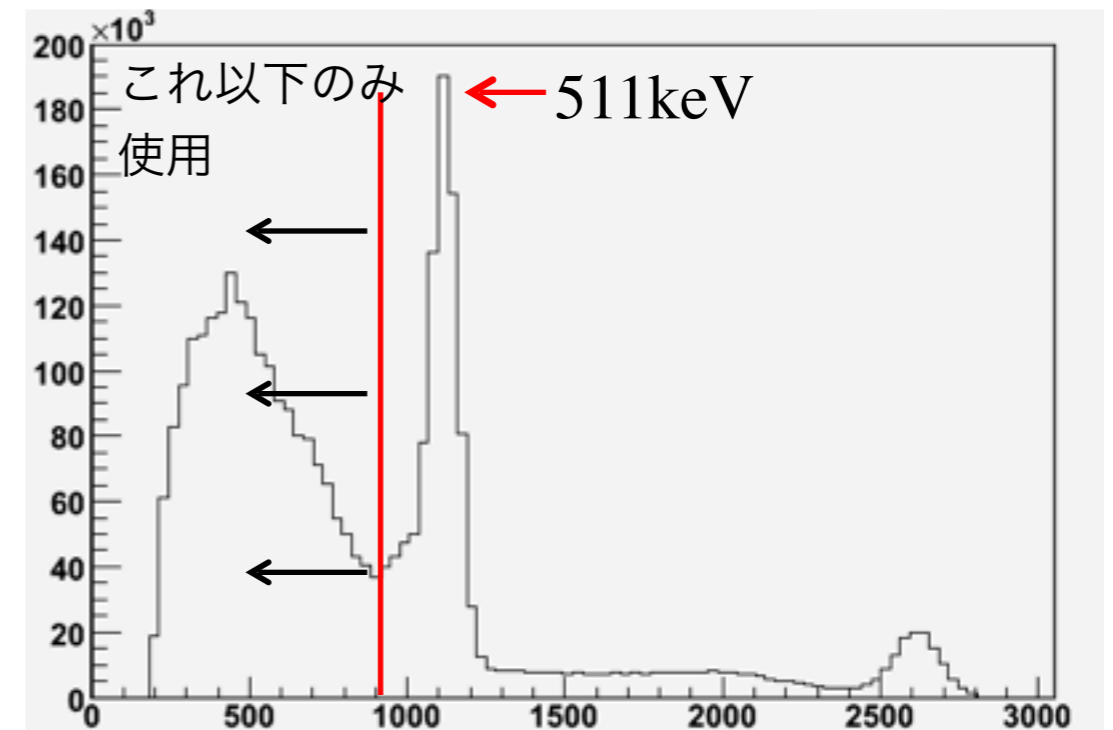


TDCカウント

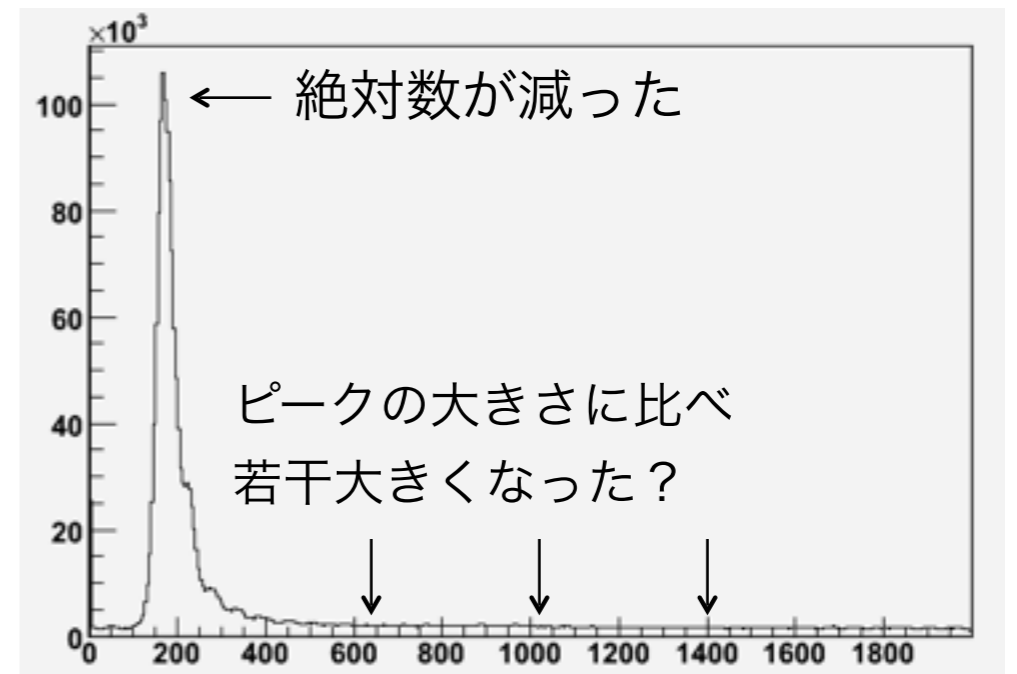
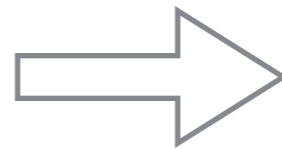
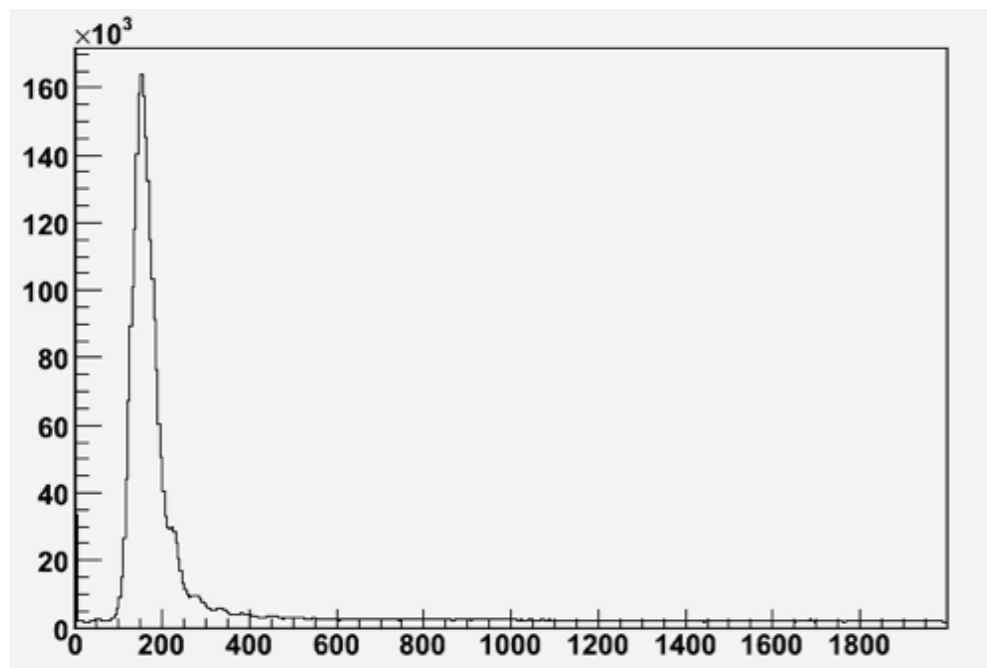
TDCカウントが何nsに対応するか

データカット | ADC cut

- ・ 2γ 崩壊のエネルギーは 511 keV
- ・ 3γ 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

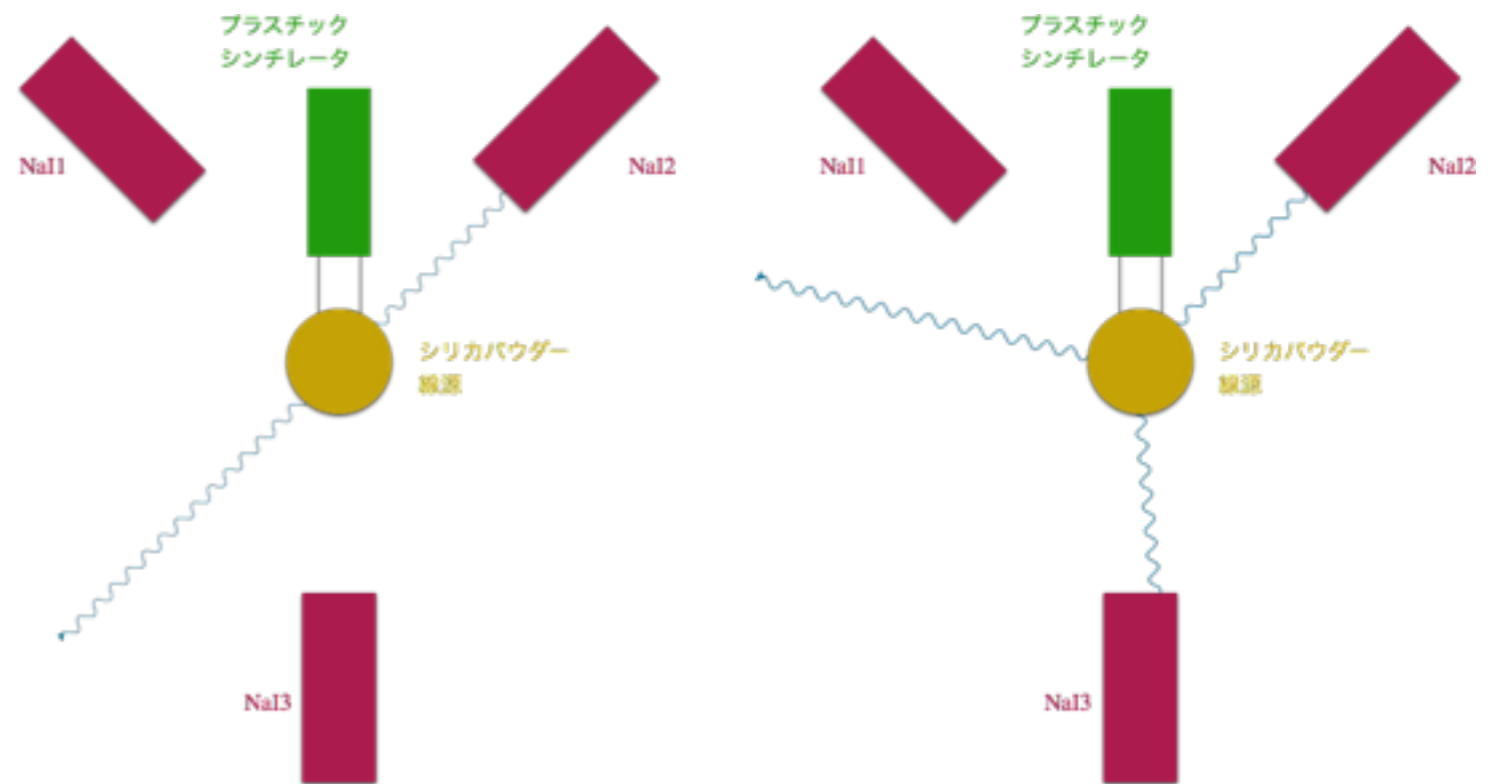
データカット | TDC cut

- ・ (対角ではない)2つのNaIに同時に信号

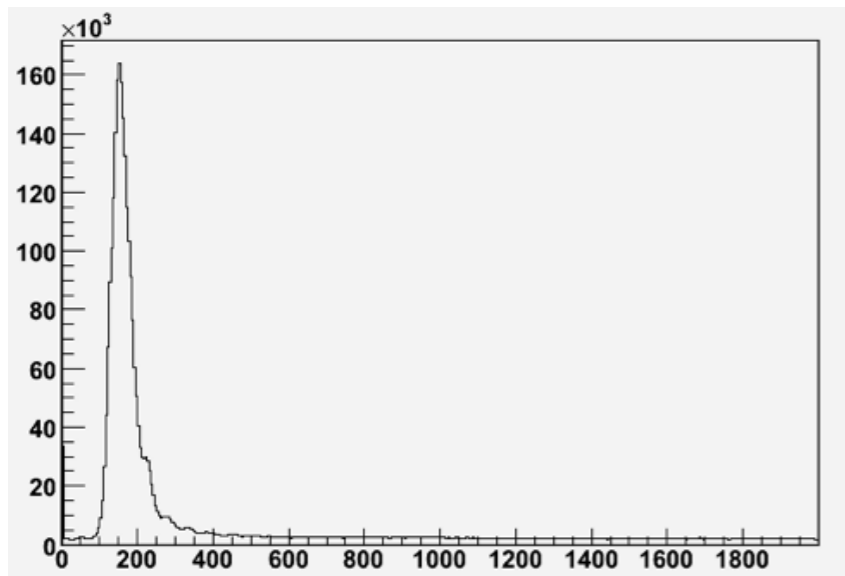
→ 3γ の確率高くなる

- ・ 3つ同時

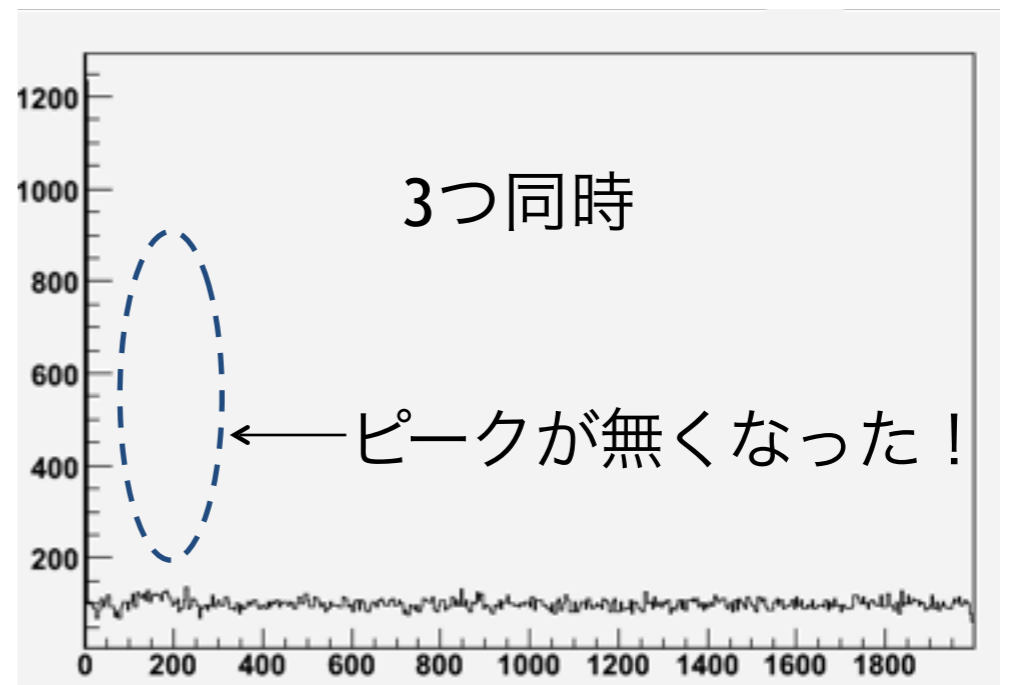
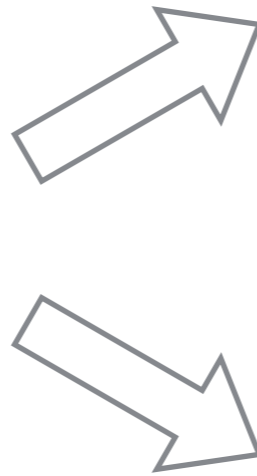
→ほぼ 3γ 崩壊か？



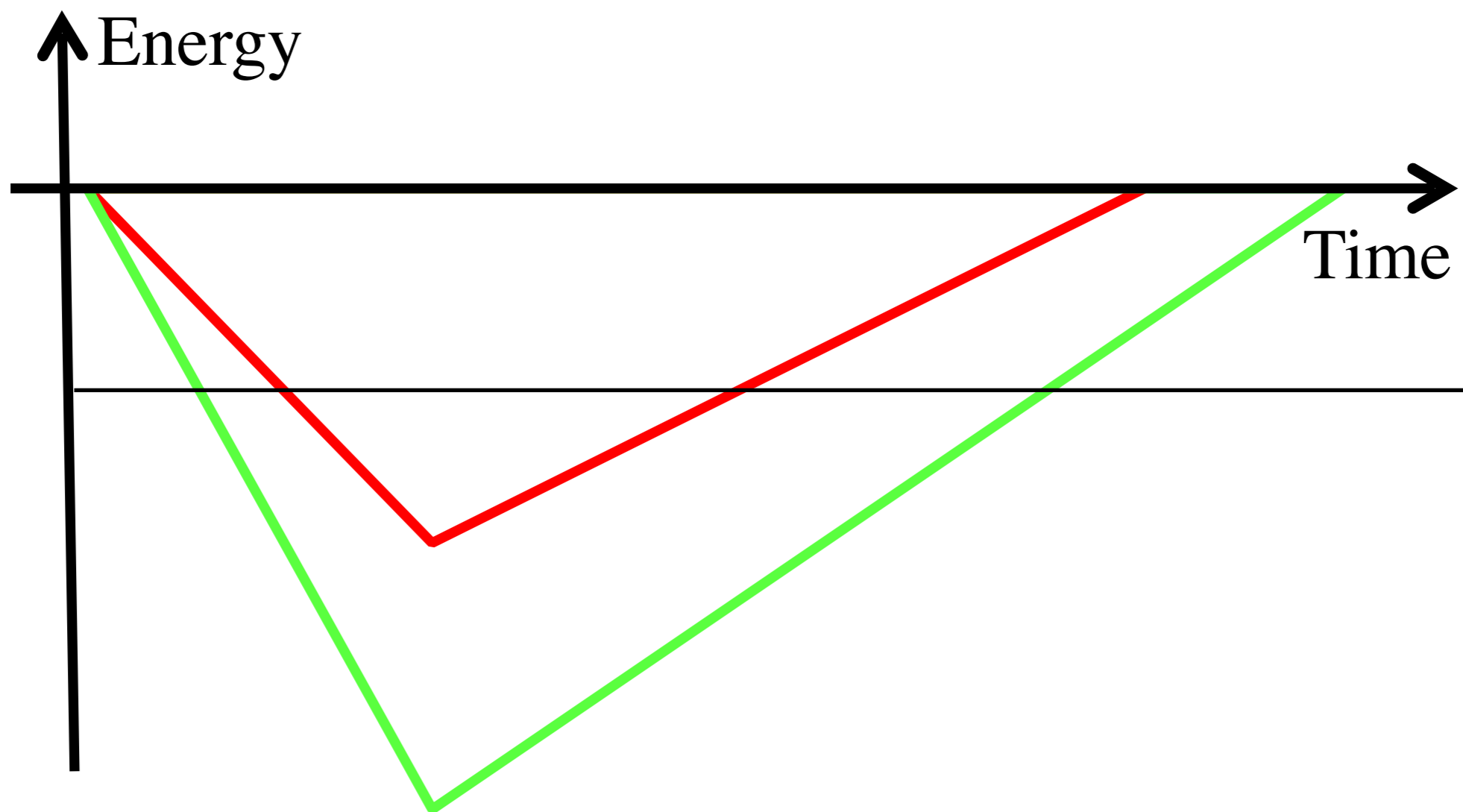
データカット | TDC cut



Cut 前

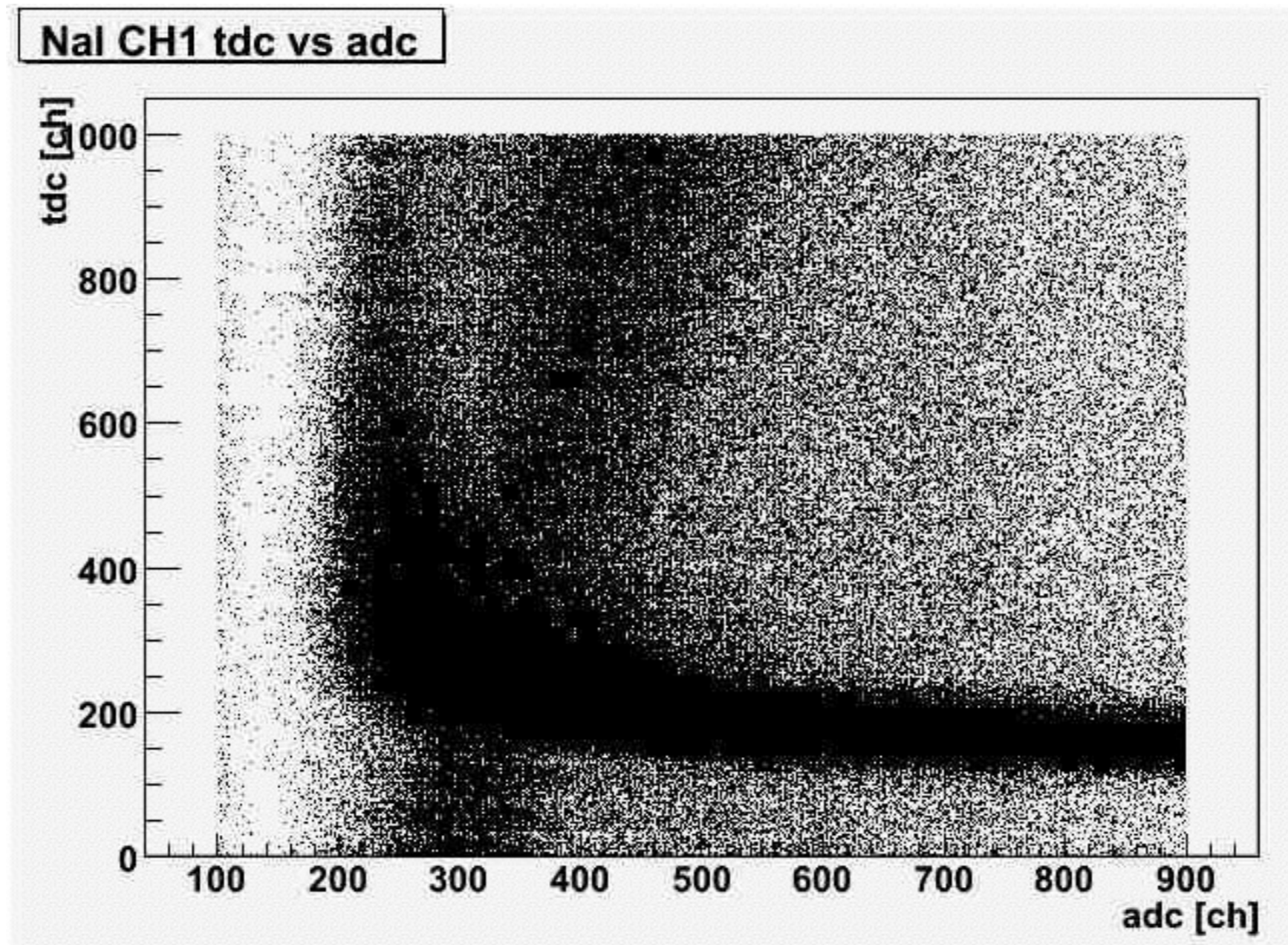


t-Q 補正



エネルギー依存性を除去

t-Q 補正前



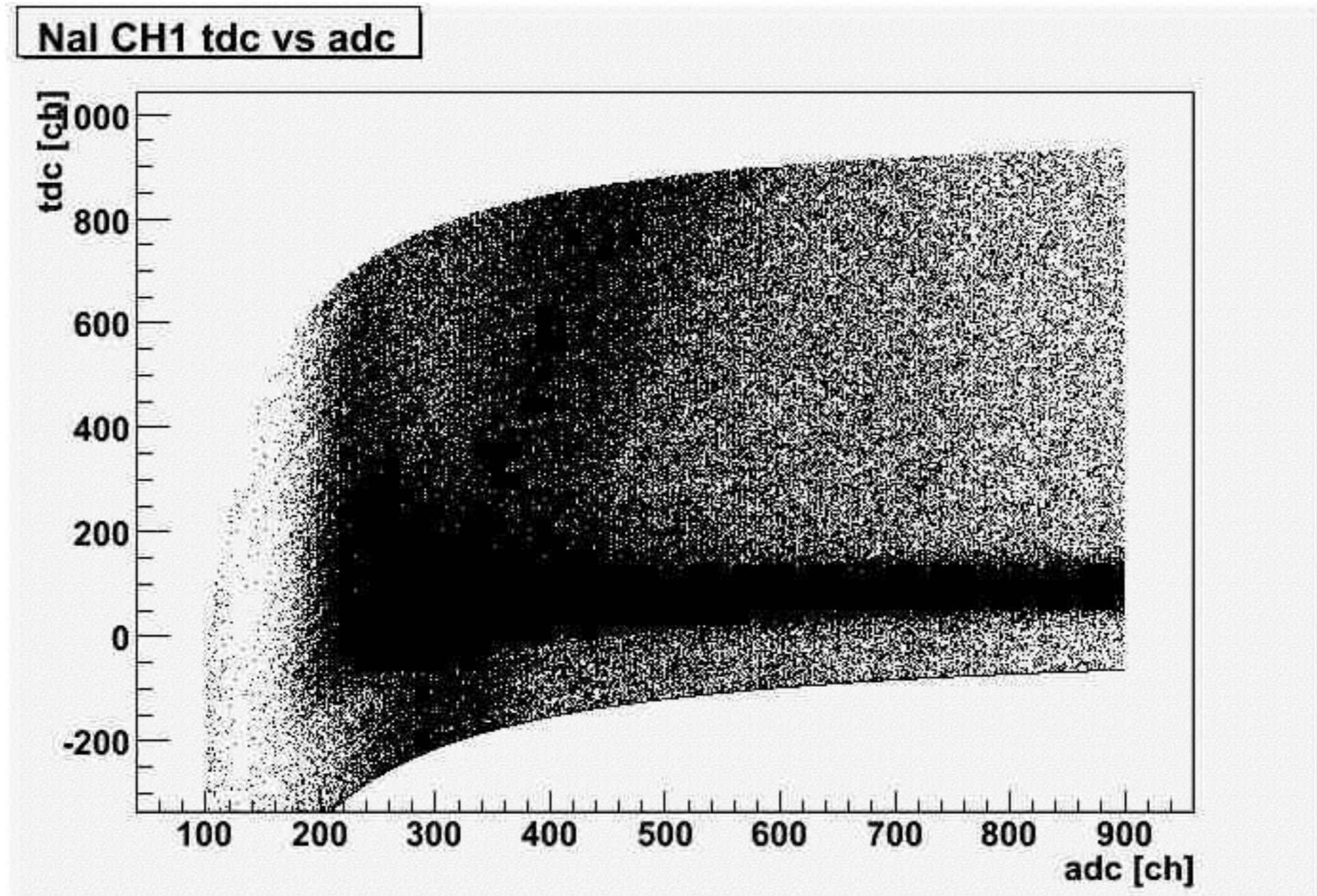
t-Q 補正

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

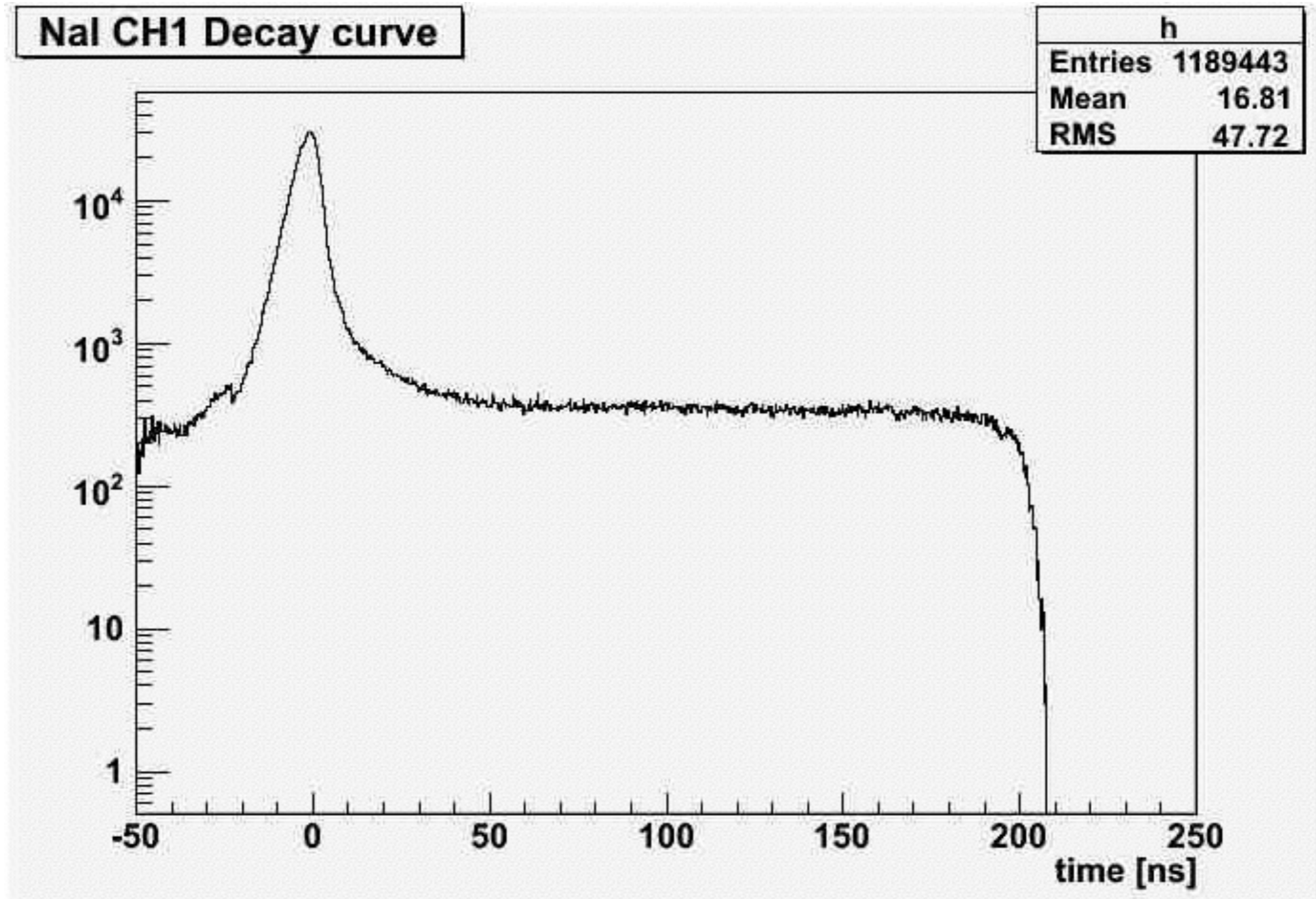
↑

オルソ

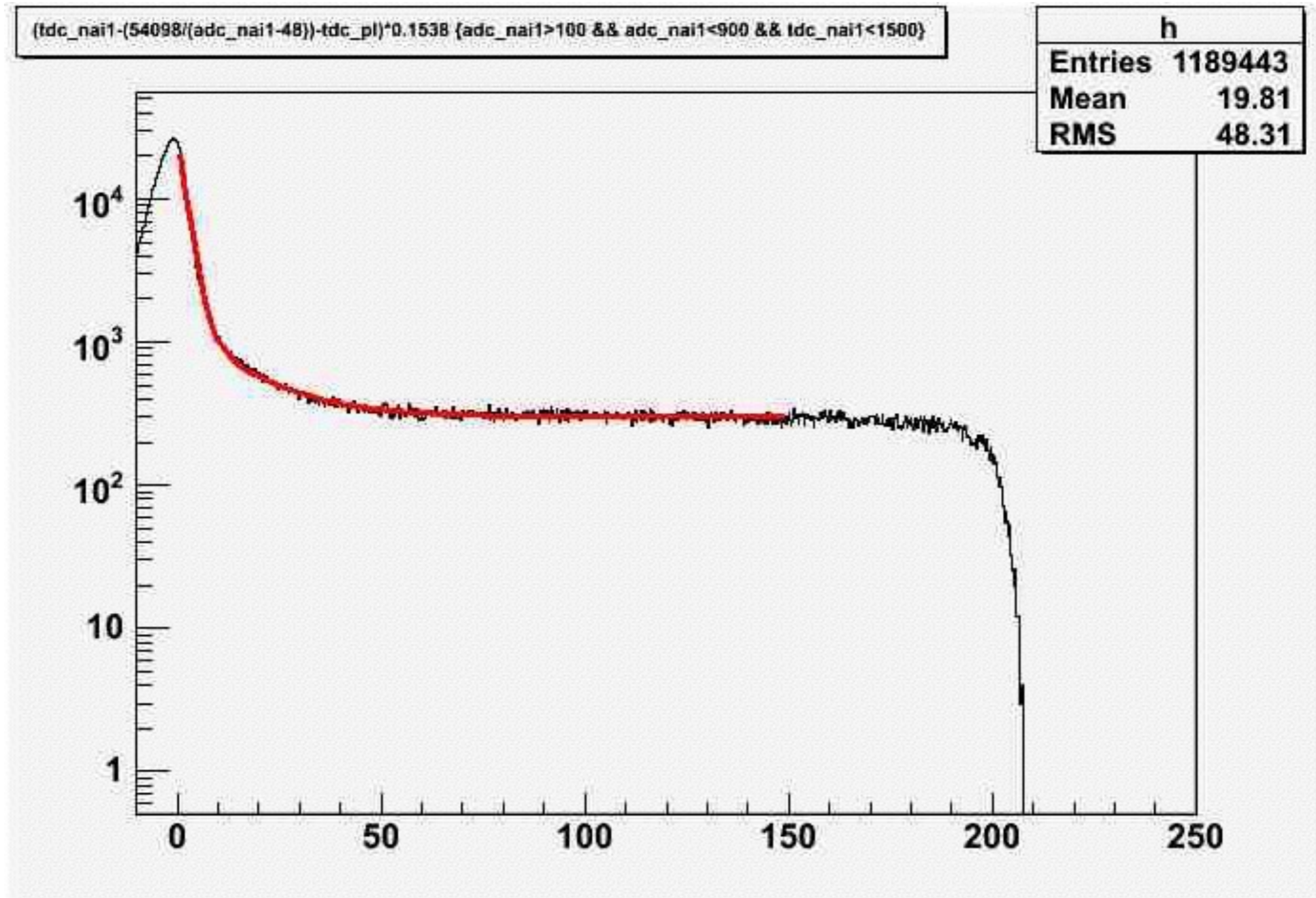
a_1 がパラポジトロニウムの寿命

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
a_1	$2.03628e+0$	$7.10552e-3$
a_3	$1.52488e+1$	$2.53817e-1$

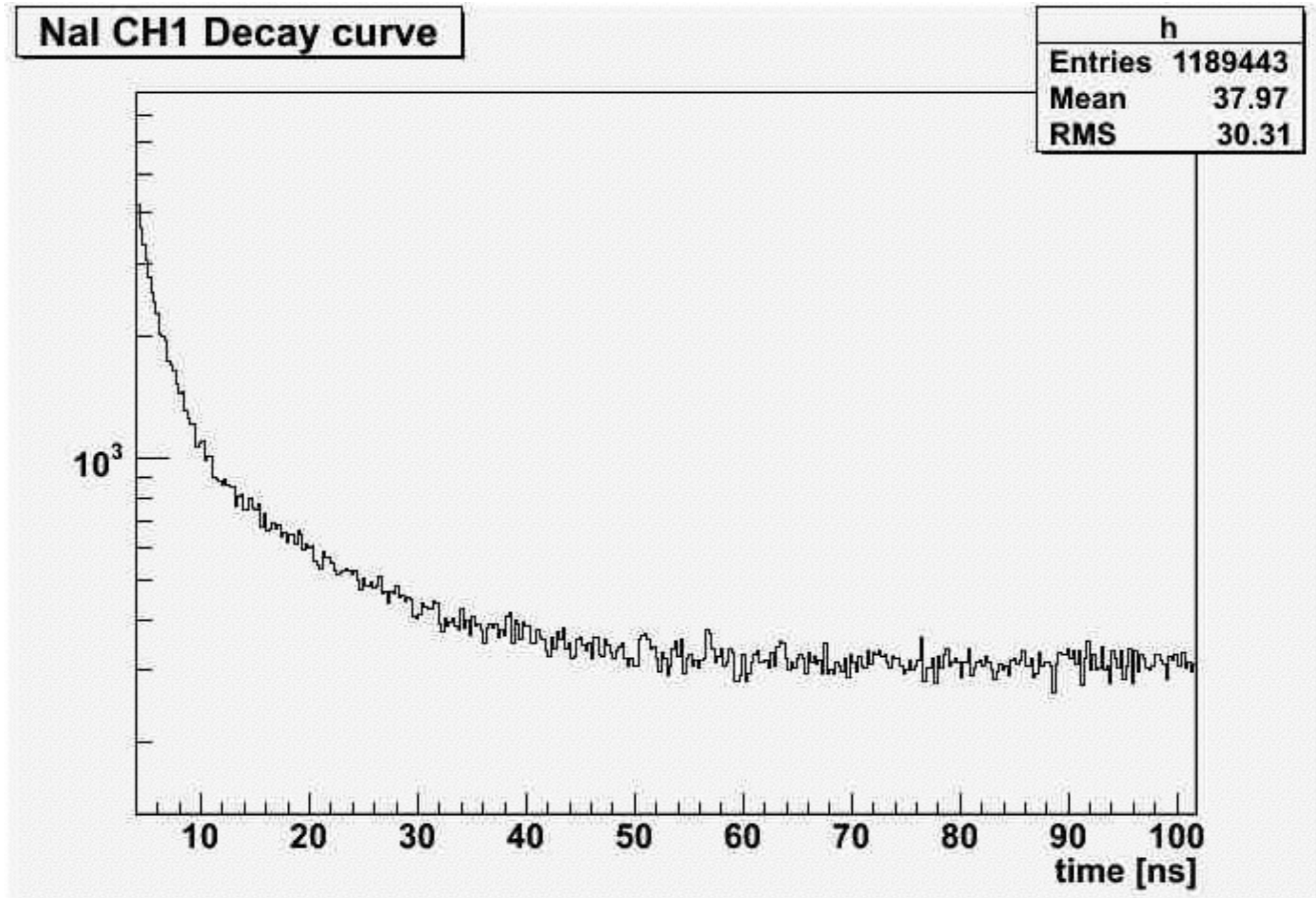
崩壊曲線

フィット関数

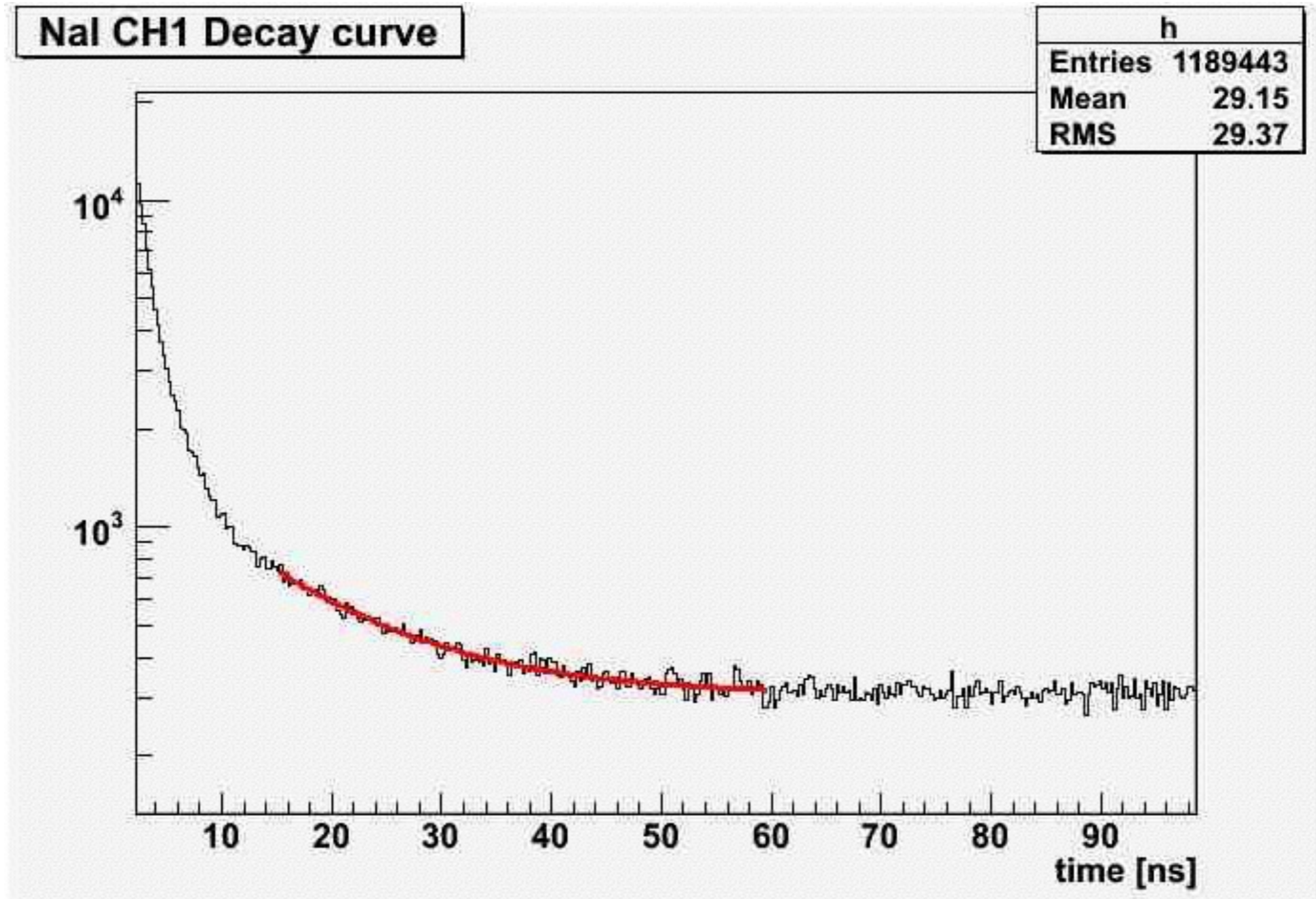
$$y = a_0 e^{-\frac{x}{a_1}} + a_2$$

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
<i>a1</i>	<i>1.21963e+1</i>	<i>4.98304e-1</i>

結果 | 寿命はいくらか？

NaI	値	誤差
1	$1.21963e+1$	$4.98304e-1$
2	$1.46564e+1$	$2.24006e-1$
3	$1.11985e+2$	$2.41116e+1$

考察

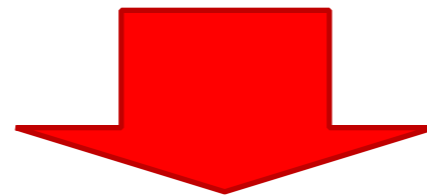
まとめ

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- P_s の寿命測定



満足な結果得られず

考察 | 寿命

3 γ decayの寿命が短く測定された…

原因

2 γ decayのeventをカットしきれなかった？

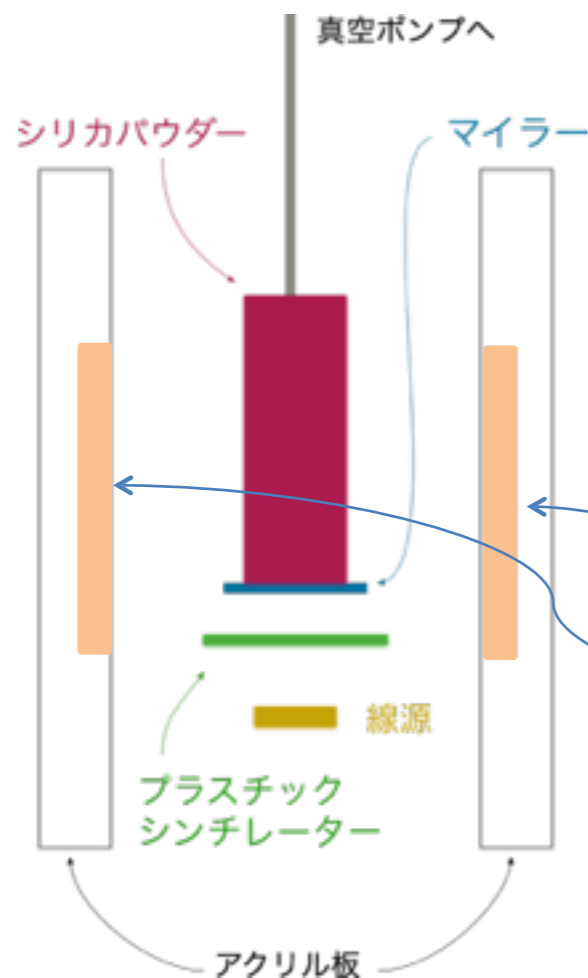
〔 Compton散乱でエネルギーを失った2 γ 由来の
 γ 線が511keV以下に含まれているかも 〕

膨大な数のデータをとってNaIが3本同時に γ 線を検出するeventだけを抽出すれば3 γ 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

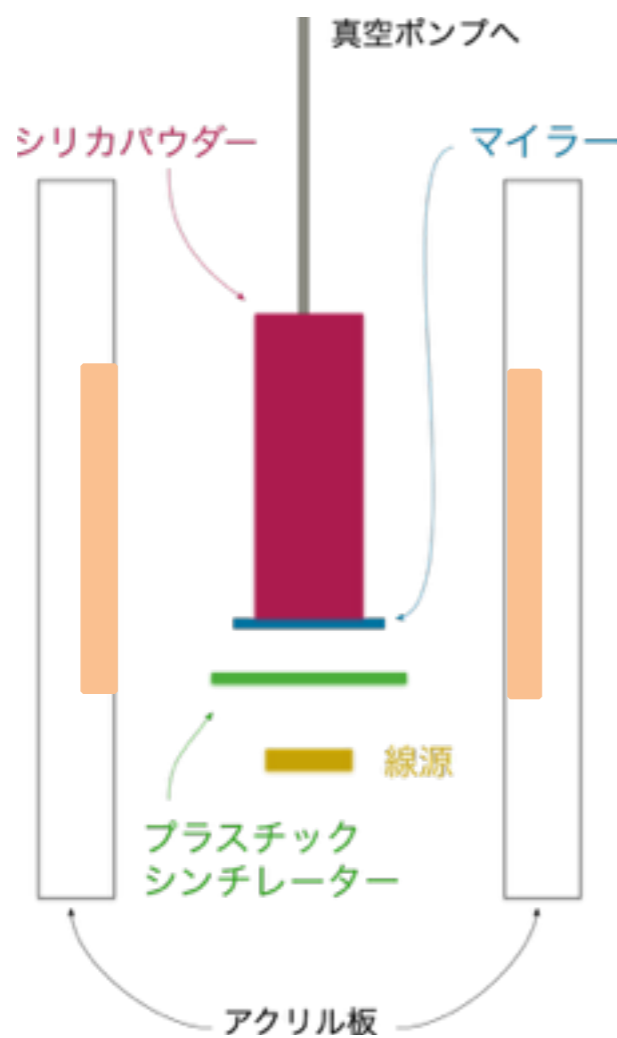
磁場中での寿命曲線が振動しなかった…

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 ($\Phi 50 \times 5 \text{mm}$) を
入れる予定であった

考察 | 振動



磁石の作る磁場を測定

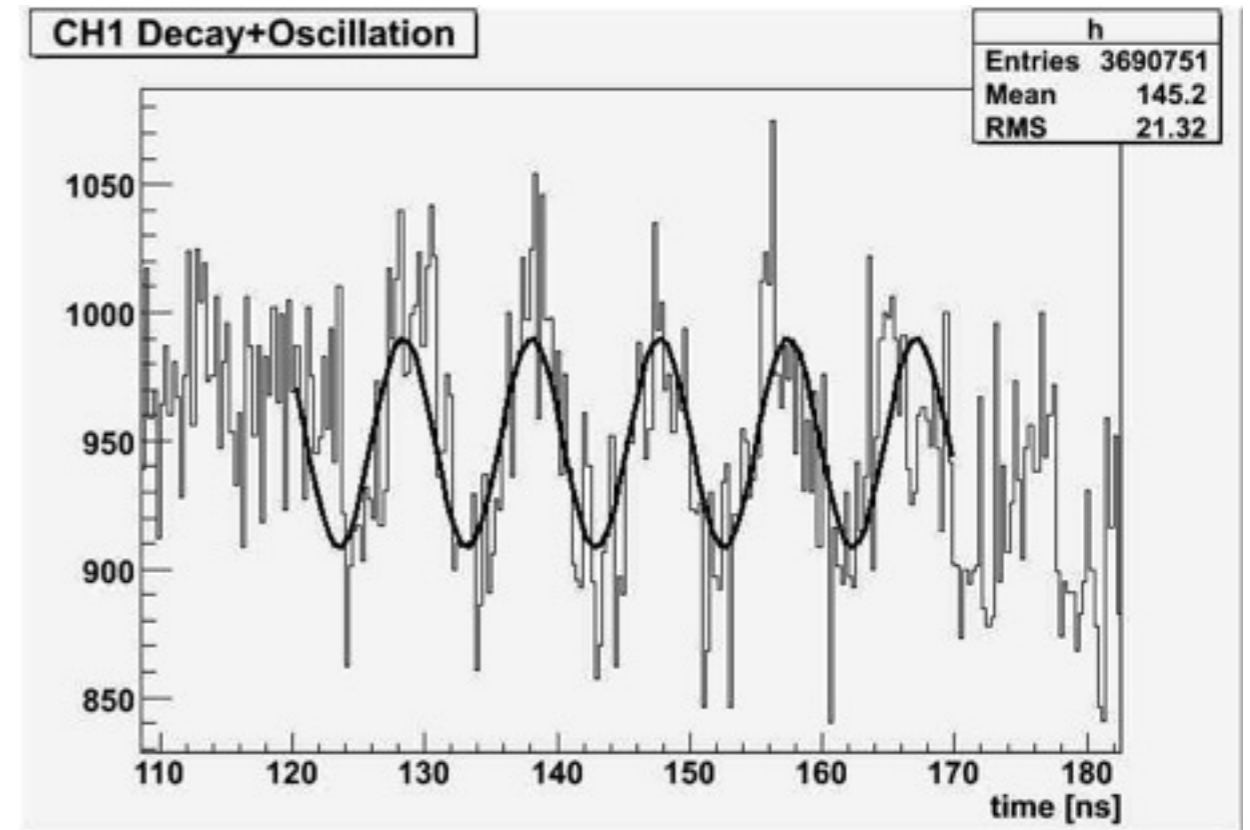
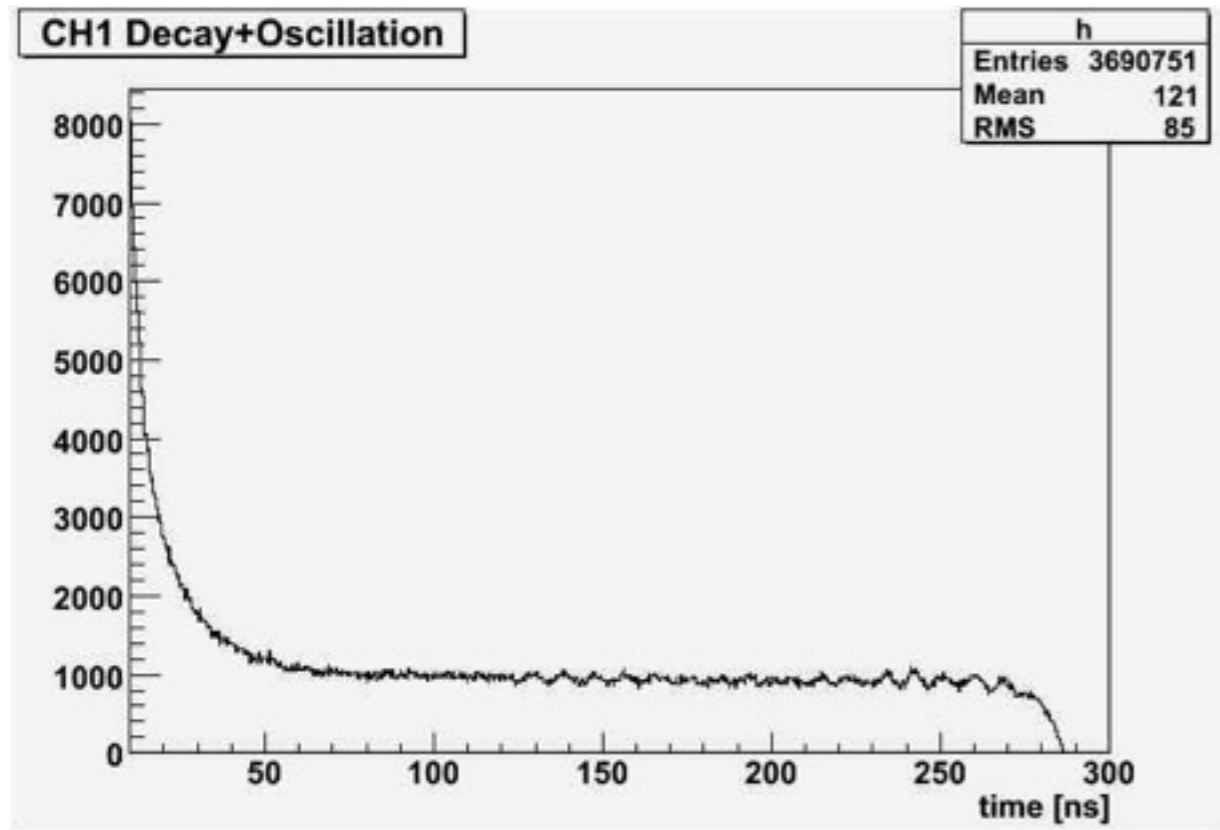
→ $\sim 10\text{mT}$

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

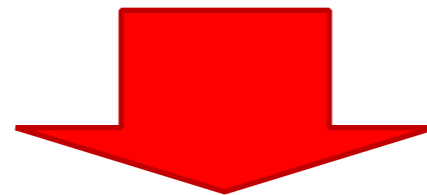
まとめ

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