

2011年度 課題演習A2

静磁場を用いた  
parapositroniumの寿命測定

岡崎	智久
小幡	一平
北尾	太市
萩原	亜子
古村	大樹

1. 実験目的
2. 実験における理論的事柄
3. 実験装置のセットアップ
4. 解析
5. 結果
6. 考察
7. 改善点

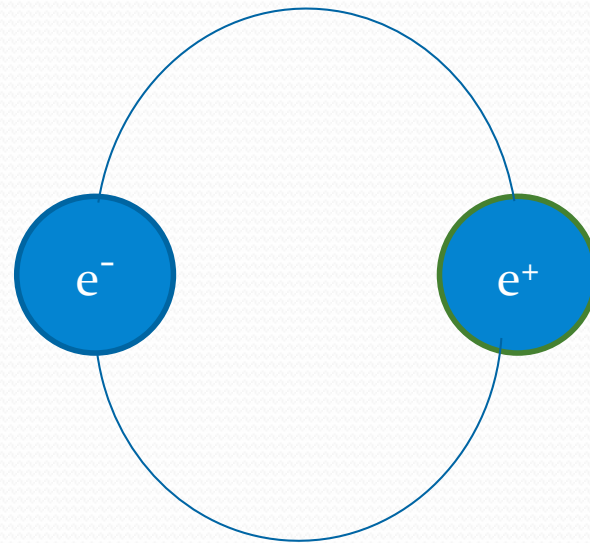
# 1. 実験の目的

- 静磁場の下でポジトロニウムの寿命を測り、そこから間接的にパラポジトロニウムの寿命を求める。

## 2. 実験における理論的事柄

ポジトロニウムとは？

- $e^-$ と $e^+$ の電磁相互作用による束縛系



- 短い寿命で数個の光子に崩壊する

# ポジトロニウムの崩壊

- o-Ps
  - 主に $3\gamma$ に崩壊
  - 寿命は142[ns]
  - エネルギーは511[keV]以下に分布
- p-Ps
  - 主に $2\gamma$ に崩壊
  - 寿命は125[ps]
  - エネルギーは511[keV]

p-Psの寿命は短いので直接測定することができない

p-Psの寿命は短いので直接観測することができない



磁場をかけてo-Psとp-Psの混合状態を作る



混合状態の寿命をはかる



p-Psの寿命を出す

# 磁場のないとき

- ポジトロニウム

$$\begin{aligned} & \dots e^- \text{ (スピン } 1/2) + e^+ \text{ (スピン } 1/2) \\ & = \text{(スピン } 0) + \text{(スピン } 1) \end{aligned}$$

- スピン0 : 固有状態  $|0,0\rangle$                       パラ
- スピン1 :  $|1,1\rangle$  ,  $|1,0\rangle$  ,  $|1,-1\rangle$               オルソ

# 磁場のあるとき

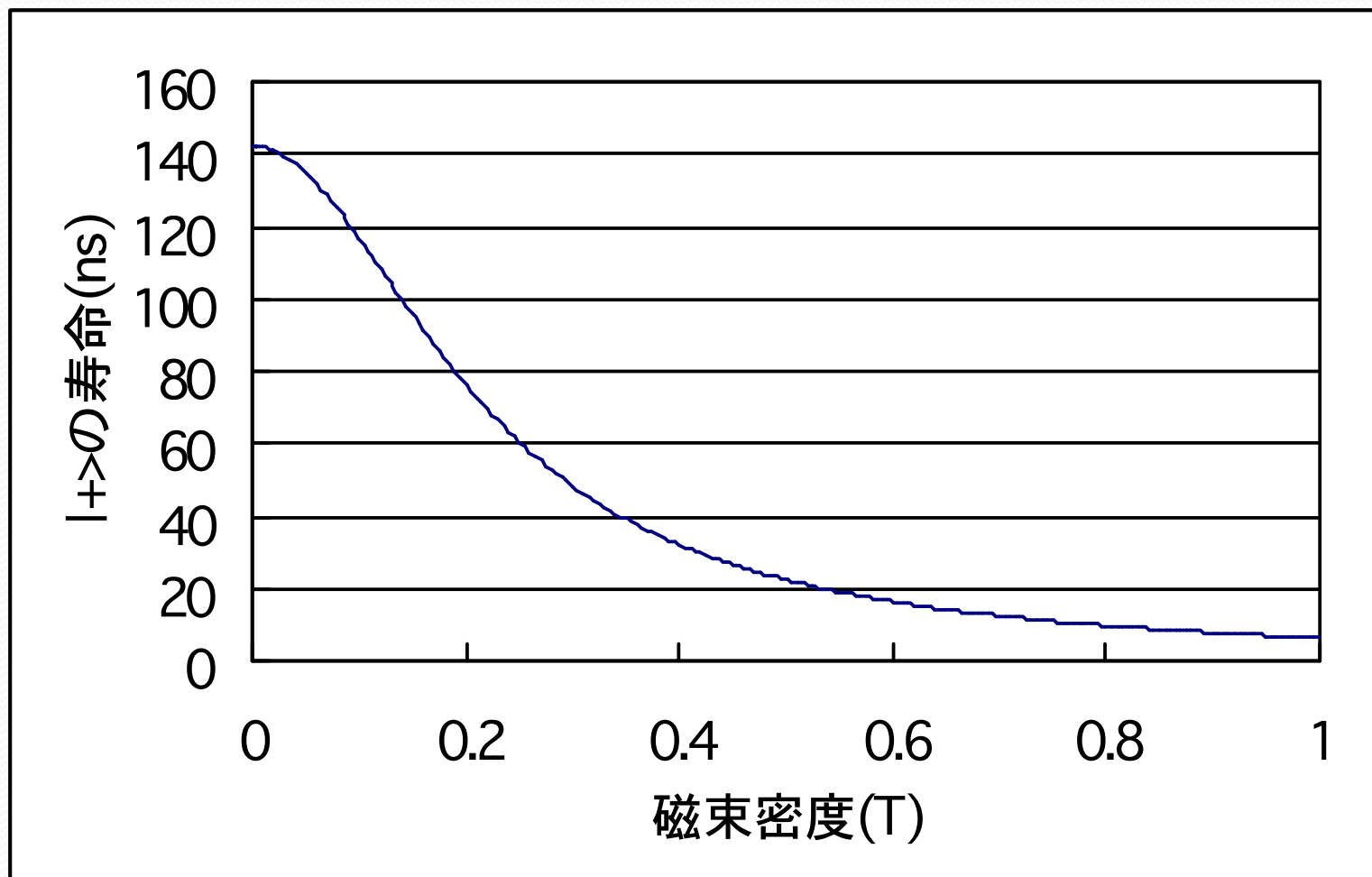
- $|1,1\rangle$  ,  $|1,-1\rangle$  . . . 固有状態のまま
- $|0,0\rangle$  ,  $|1,0\rangle$  . . . 混合して新たな固有状態  
 $|+\rangle$  ,  $|-\rangle$  になる

$|+\rangle$  はオルソとパラが混合した状態

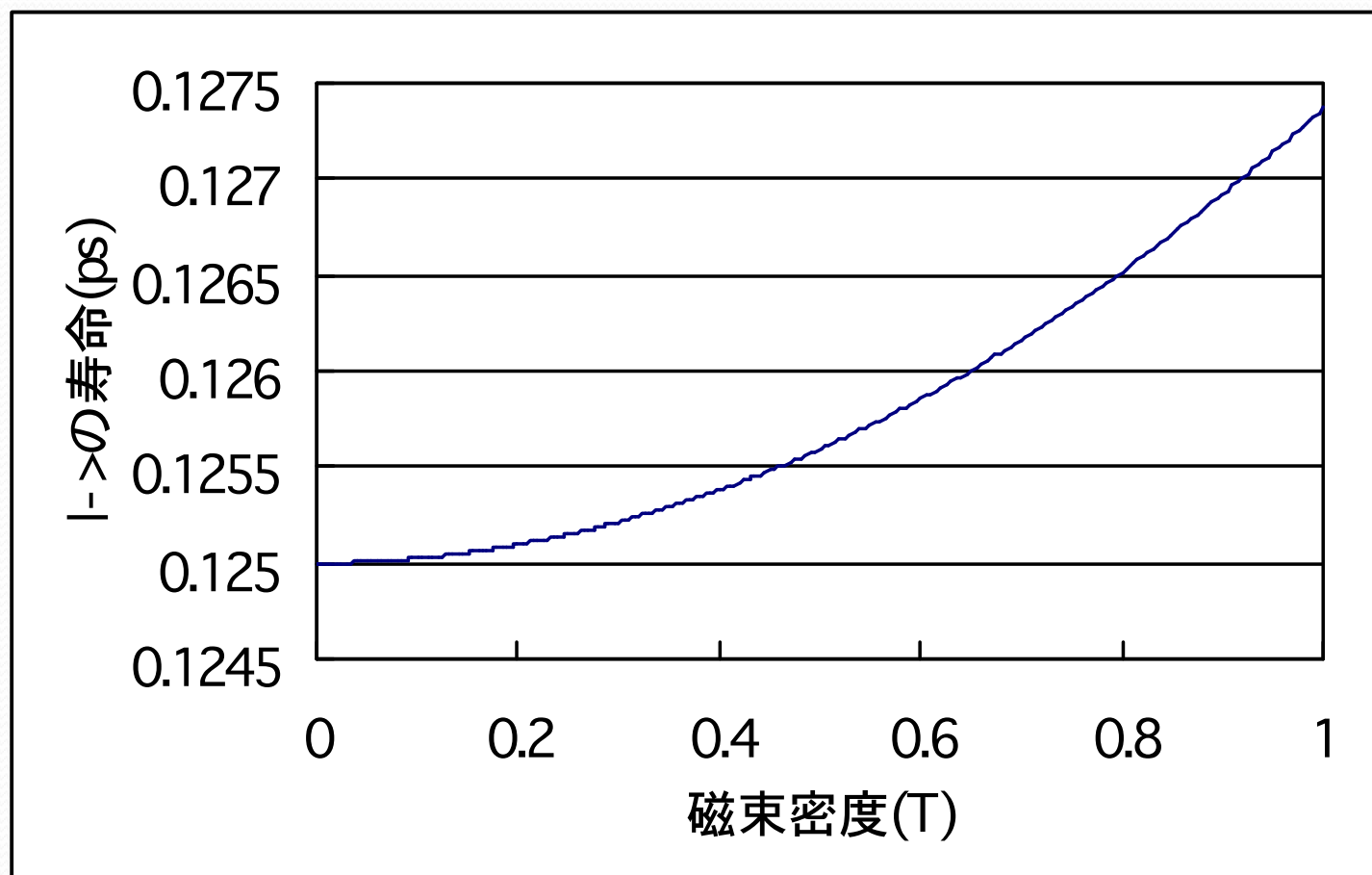
オルソと $|+\rangle$  の寿命  $\Rightarrow$  パラの寿命



# 磁場 — $|+\rangle$ の寿命



# 磁場 $|-\rangle$ の寿命



# 各状態の寿命と崩壊様式

- $|1,1\rangle$  ,  $|1,-1\rangle$  . . . 長い、 $3\gamma$
- $|+\rangle$  . . . 長い、 $2\gamma$ と $3\gamma$
- $|-\rangle$  . . . 短い、 $2\gamma$

比較的寿命の長い範囲での $2\gamma$ は  
 $|+\rangle$  起源のものであると考えられる

# 混合状態 $|+\rangle$ の寿命 $(\Gamma_+)$ の求め方

$|+\rangle$ 起源のtailをexponentialでfittingすると

$$F(x) = p_0 \exp(-t/\Gamma_+) + p_1$$

となり、この $\Gamma_+$  が寿命となる

# p-Ps ( $\Gamma_p$ ) の寿命の求め方

$$\Gamma_p = (g\mu_B B / \hbar\omega_0)^2 / (1/\Gamma_+ - 1/\Gamma_0)$$

を用いて求める

以下のものは文献値を用いる

o-Psの寿命

$$\Gamma_0 = 142 \text{ (ns)}$$

g 因子

$$g = 2.0023193043622$$

ボーア磁子

$$\mu_B = 5.788381755(79) \times 10^{-5} \text{ (eV/T)}$$

O-Psとp-Psのエネルギー差

$$\hbar\omega_0 = 8.41306 \times 10^{-4} \text{ (eV)}$$

# 物質との反応

実際の実験は物質中で行われる

⇒ポジトロニウムが物質と反応して崩壊する

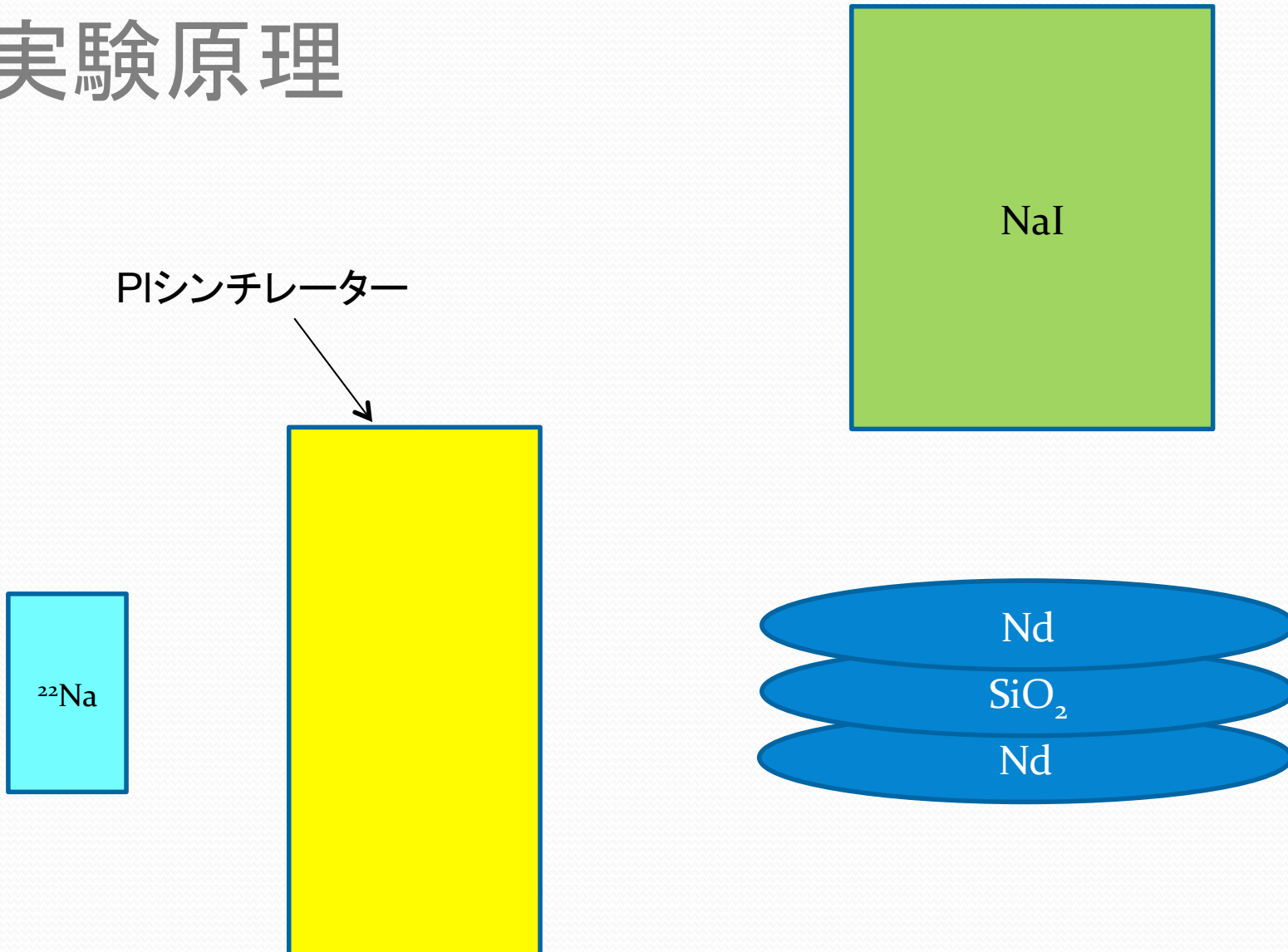
⇒寿命が短くなる

## 《主な反応》

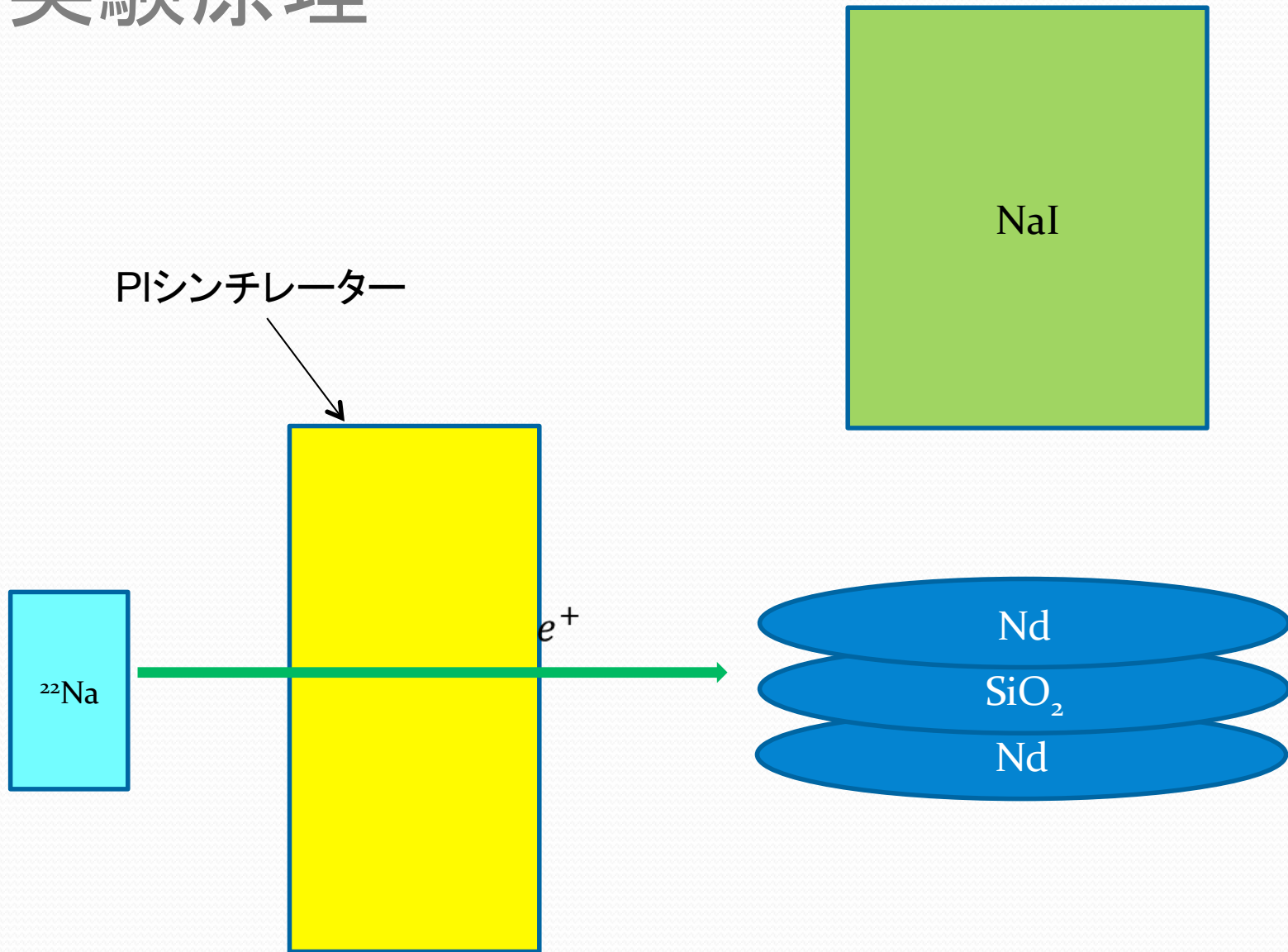
- Pick-off . . . Ps中の $e^+$ と物質中の $e^-$ が対消滅する
- スピン交換 . . . o-Ps中の $e^-$ が物質中の不対電子とスピンを交換してp-Psになる
- 化学反応 . . . Psは水素に似ていて、酸化反応などを起こす

# 3. 実験装置のセットアップ

## ・実験原理

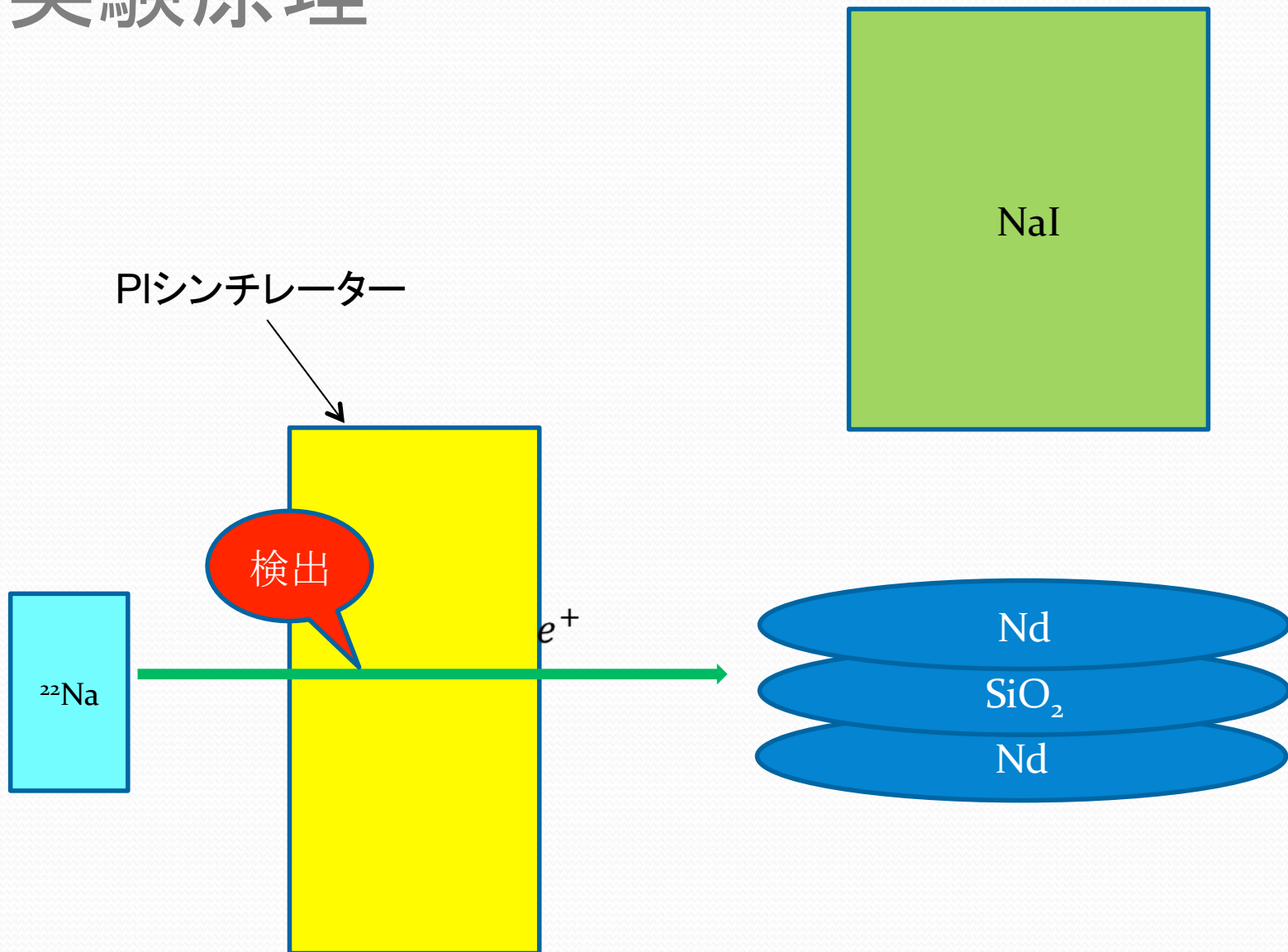


# 実験原理

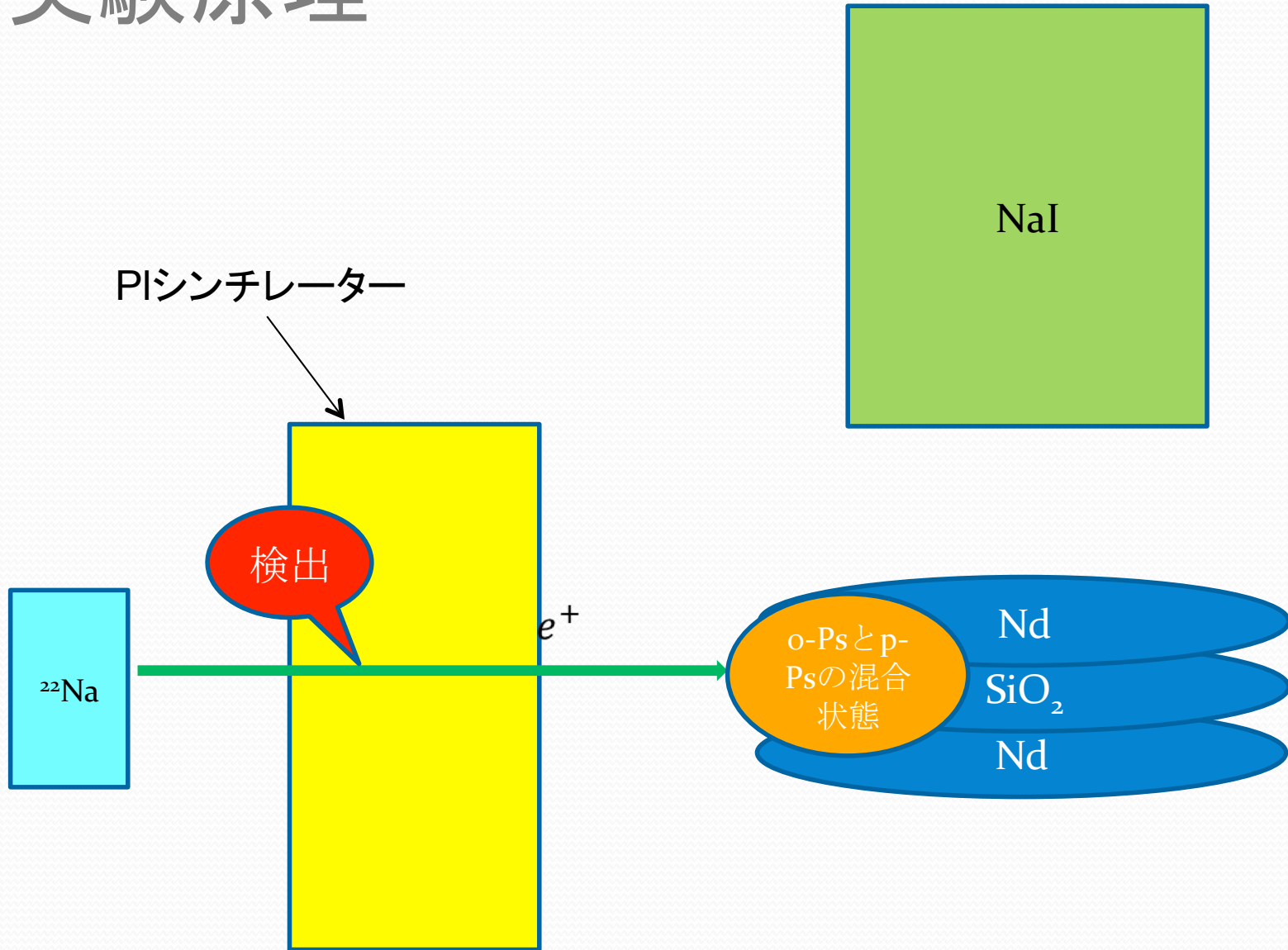




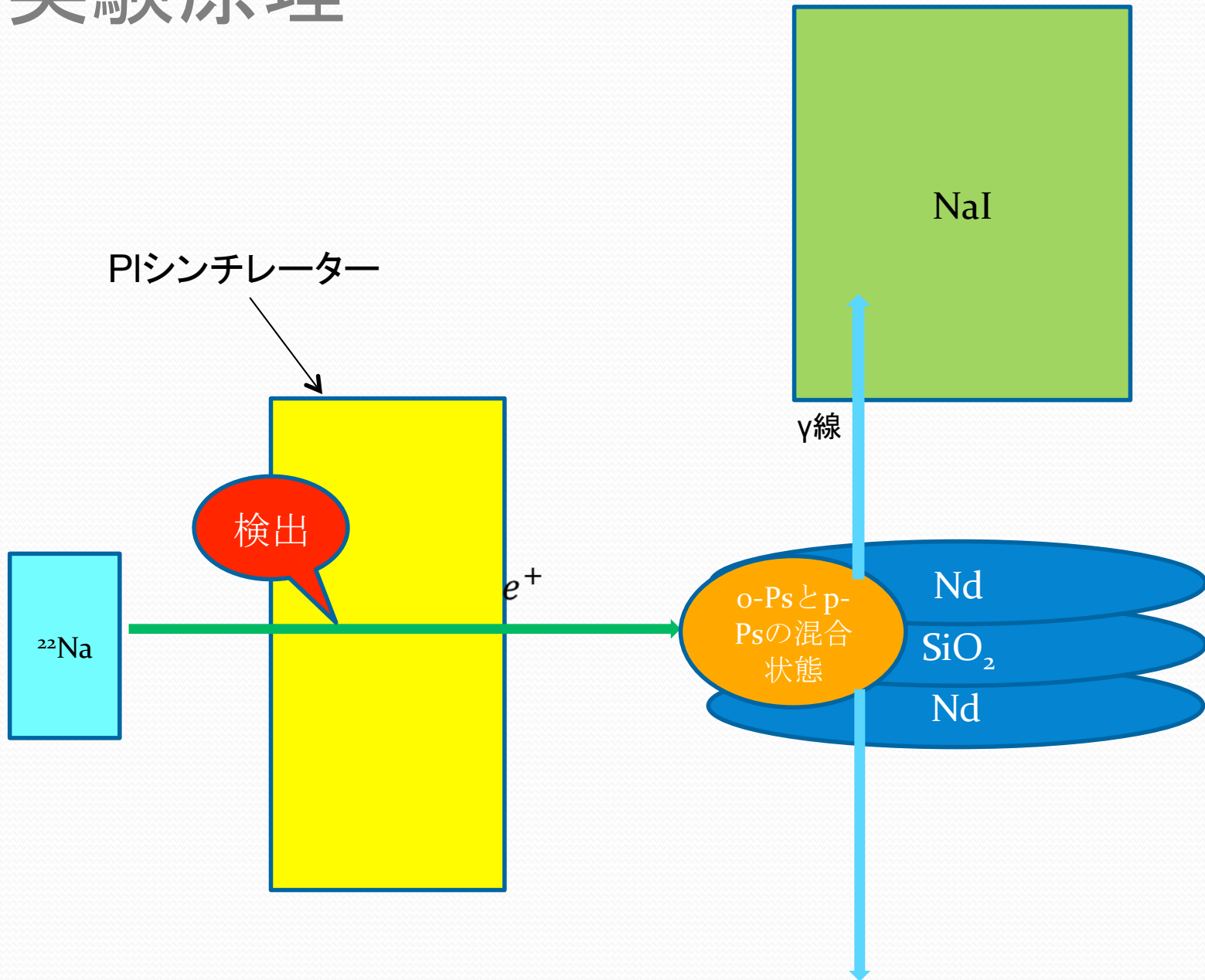
# 実験原理



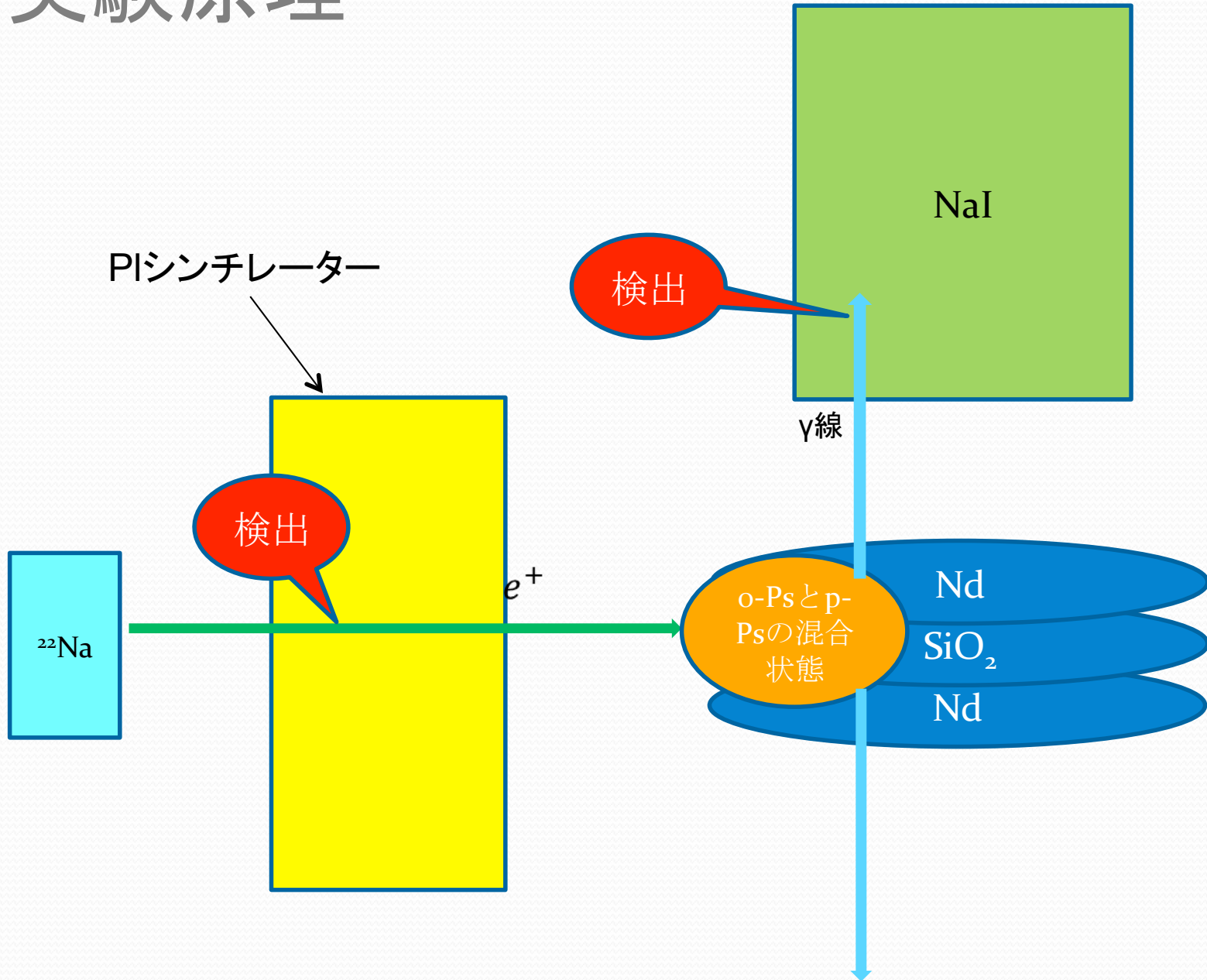
# 実験原理



# 実験原理



# 実験原理




# 実験装置

- 線源 Na
- Na I シンチレーター
- プラスチックシンチレーター
- ネオジム磁石
- シリカパウダー
- 真空ポンプ
- 暗箱、暗幕


# • 実験の流れ



• 磁場の設定



• 装置のセットアップ



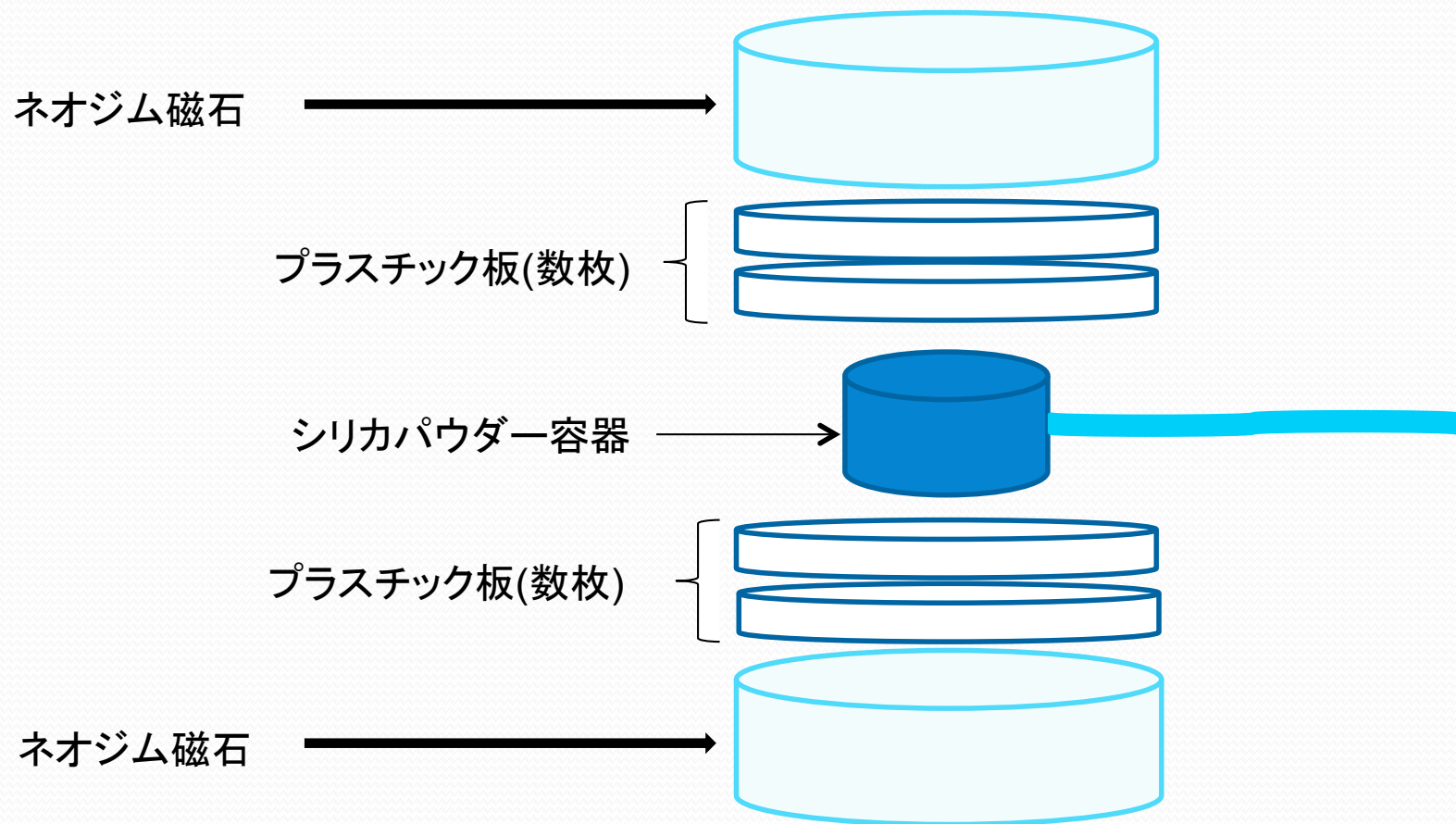
• P1シンチレーターとNaIシンチレーターの時間差と $\gamma$ 線のエネルギーを測定

# 磁場の設定

- ・ o-Psとp-Psの混合状態を作るため、磁場中にシリカパウダーを設置する必要がある。

⇒乾燥させたシリカパウダーを容器に入れ、その容器の上下にネオジウム磁石を設置。

# 磁場の設定





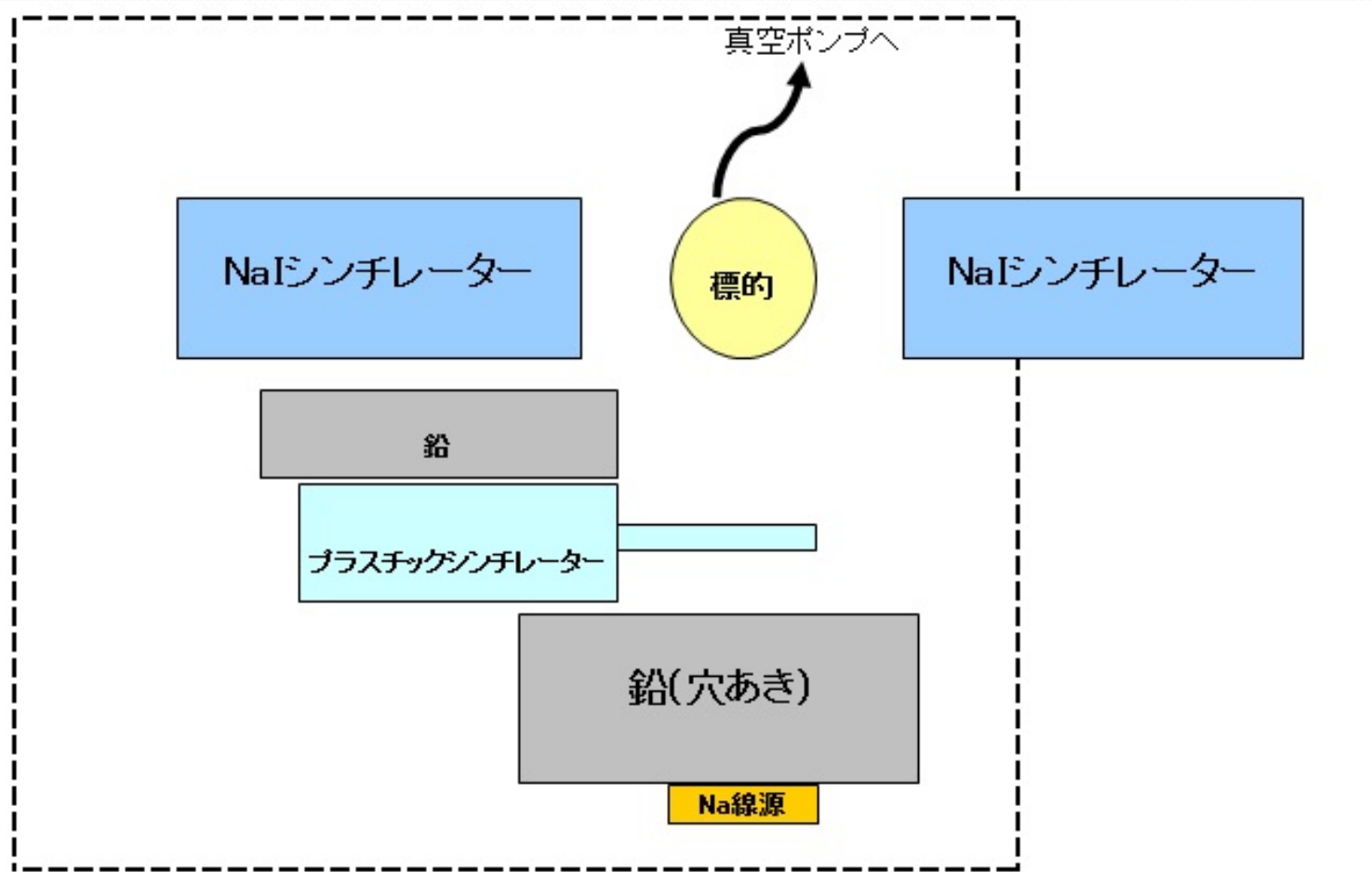
ネオジム磁石



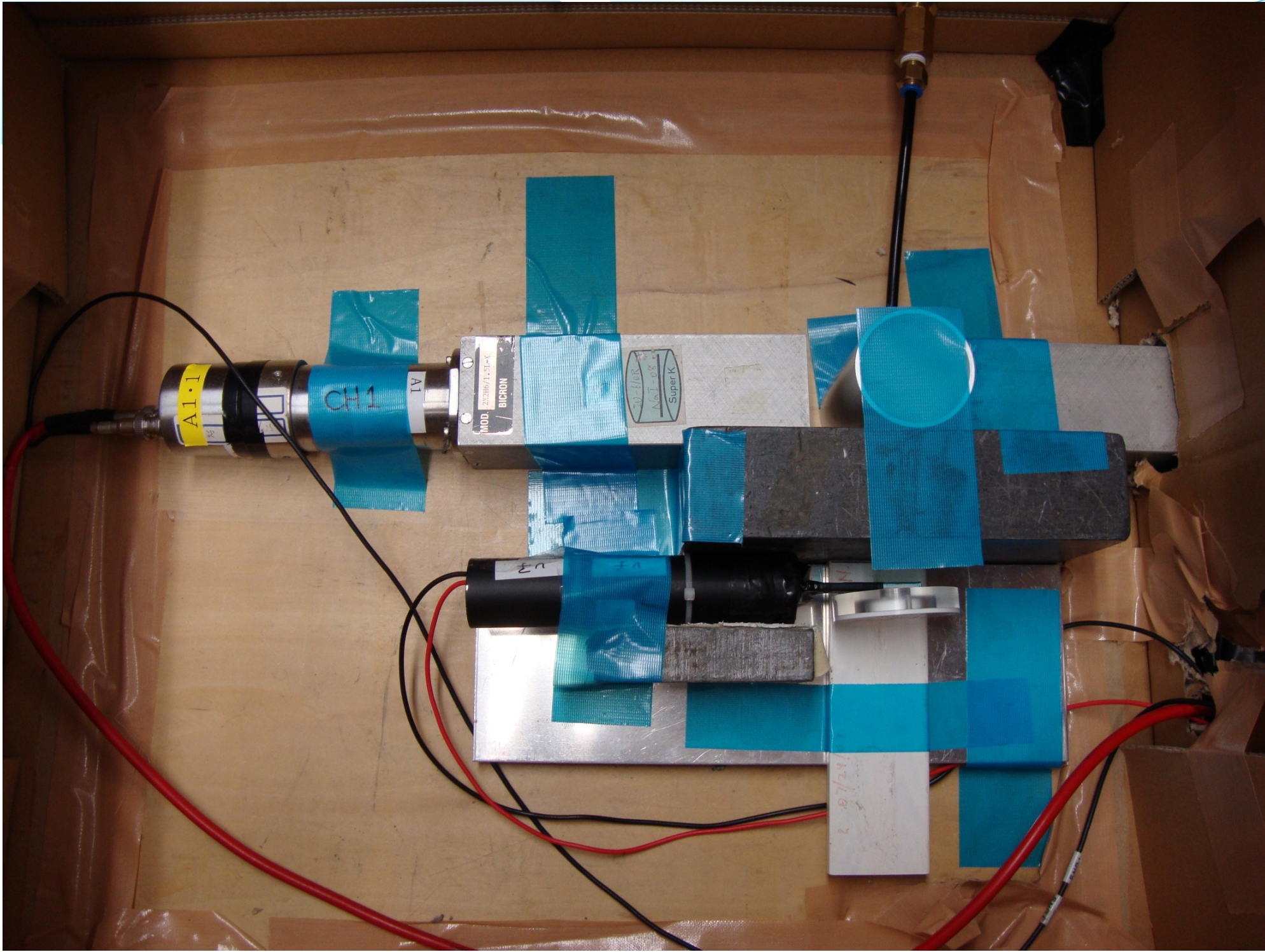
真空ポンプへ



# 実験装置の配置



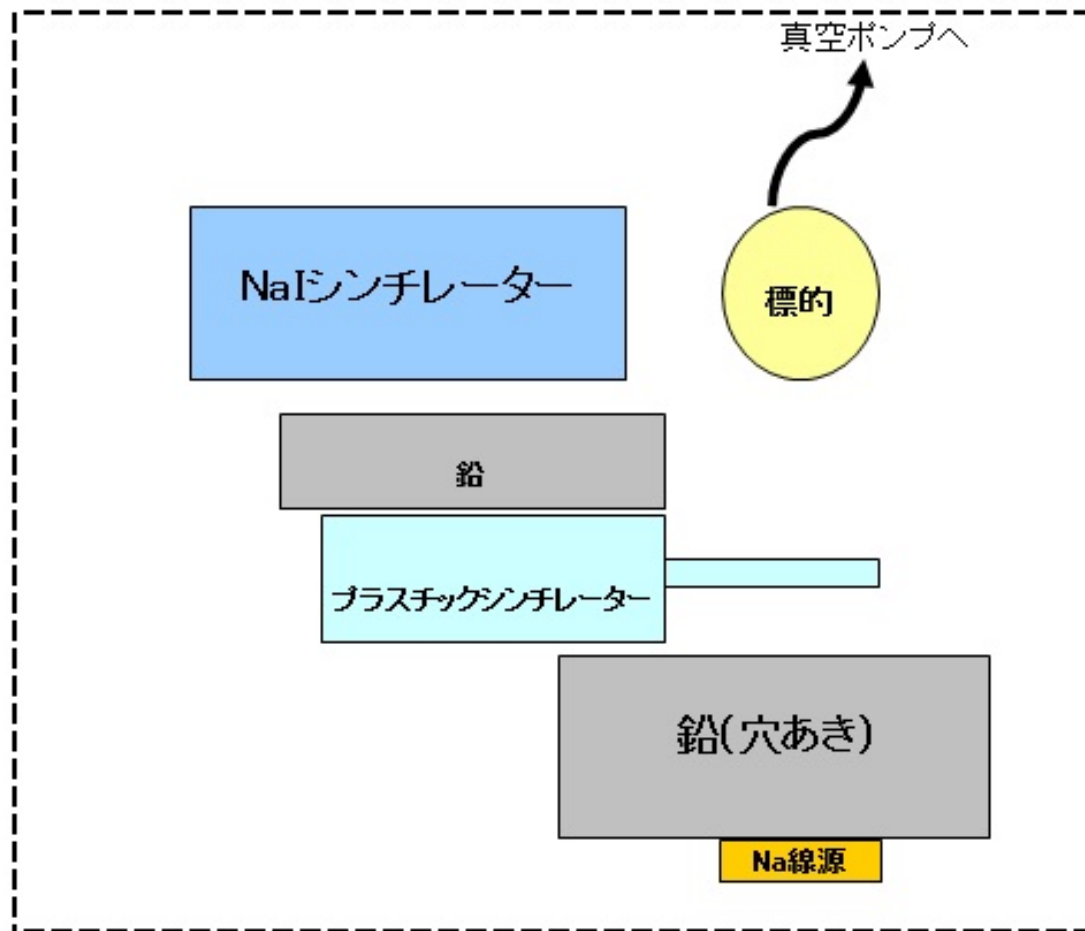
※点線は暗箱をあらわす



- 当初、NaIシンチレーター2つとプラスチックシンチレーターの3つのCoincidenceを取って測定を行ったが、解析の結果ポジトロニウムのデータが測定できていなかった。

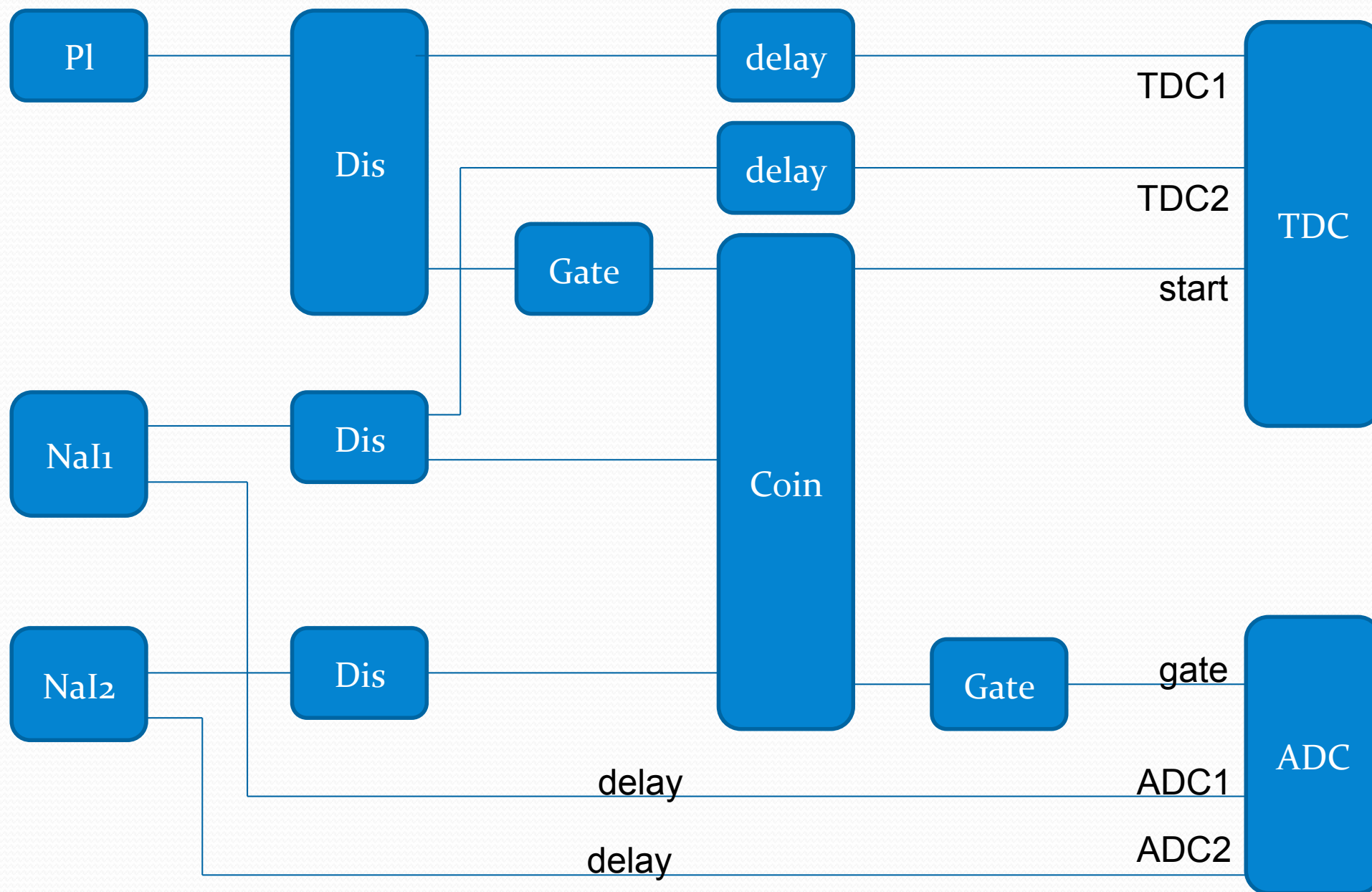
⇒ NaIシンチレーター1つとプラスチックシンチレーターの2つのCoincidenceを取るように変更。

# 実験装置の配置

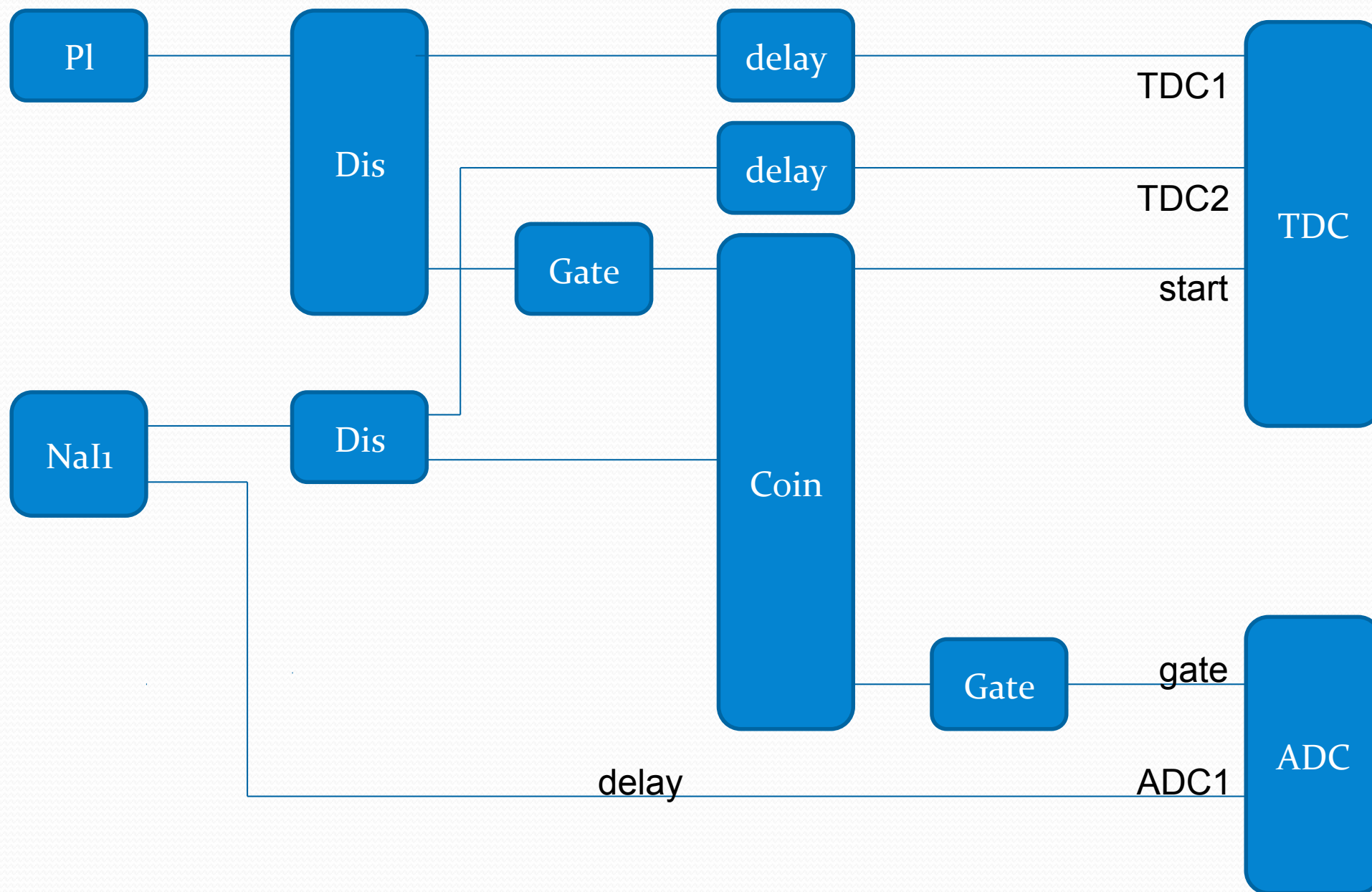


※点線は暗箱をあらわす

# 回路图



# 回路图



# 4. 解析

- 補正など
  - キャリブレーション
  - T-Q補正
  - カッティング
- 寿命の測定方法
  - Fittingする関数
  - Fittingする範囲
  - Fittingするときのヒストグラムの幅



# キャリブレーション

- キャリブレーションとは  
ADCやTDCで出力される値は実際のエネルギーや時間ではないので、それらを変換する必要がある。

- 変換式

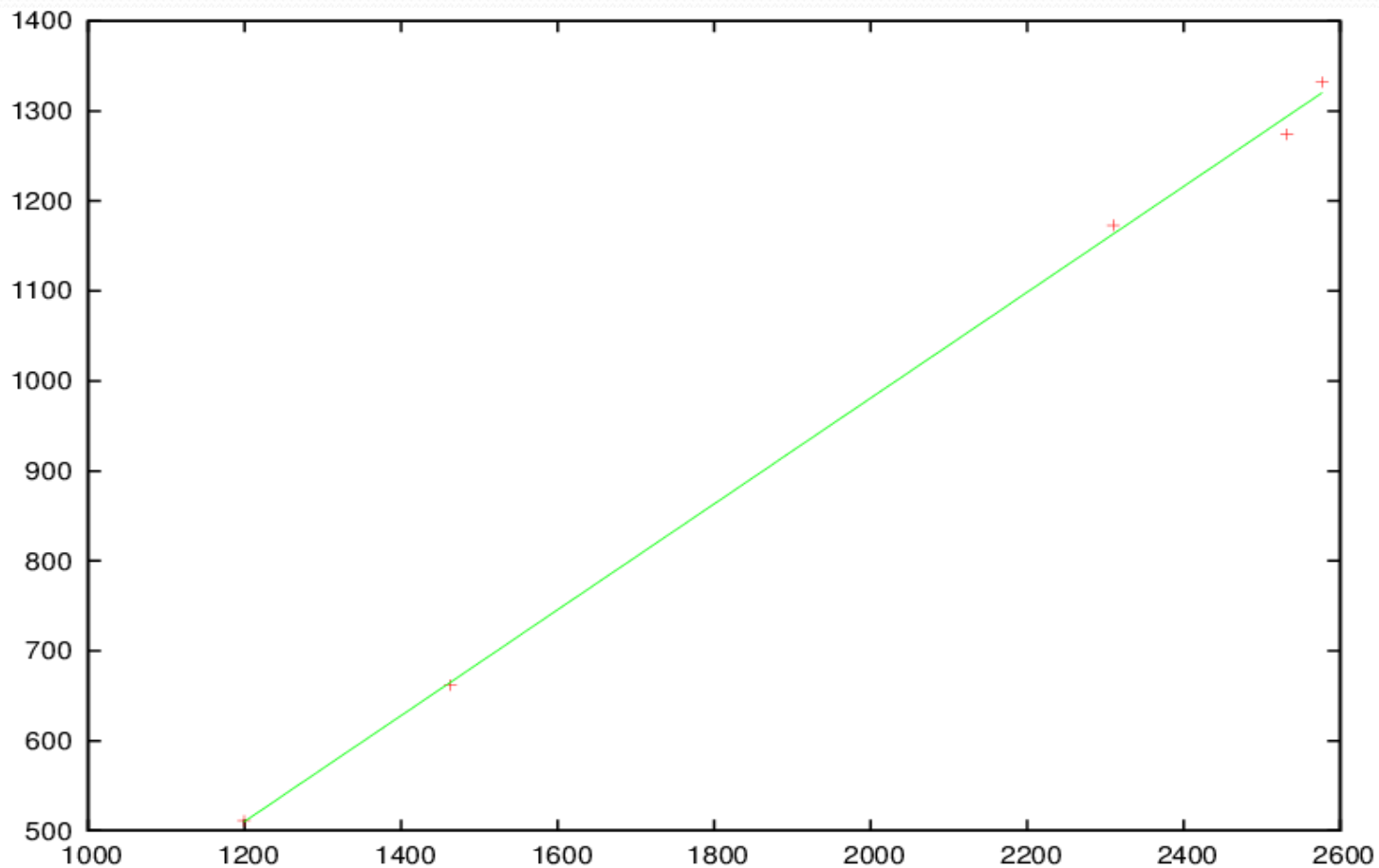
ADC、TDCともに変換は一次式で表せるものとする。

$$E[\text{keV}] = p \times \text{ADC} + q$$

$$T[\text{ns}] = a \times \text{TDC} + b$$

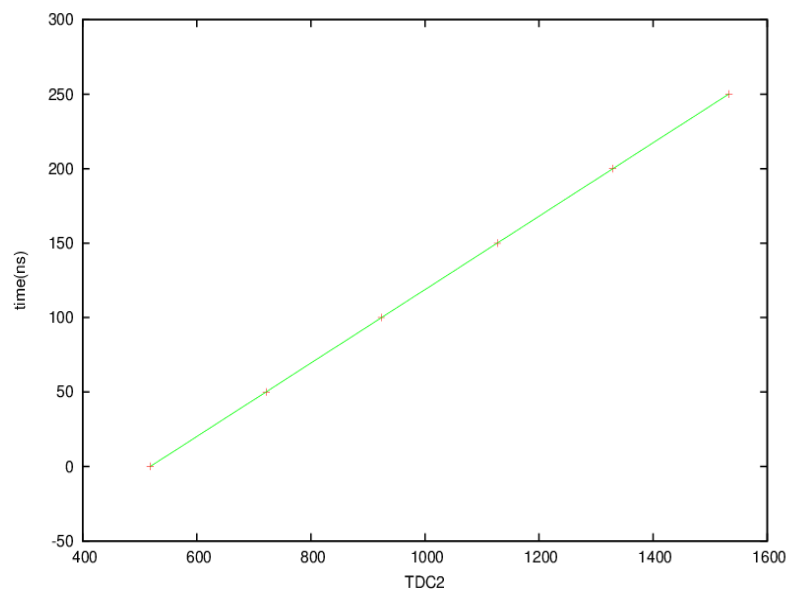
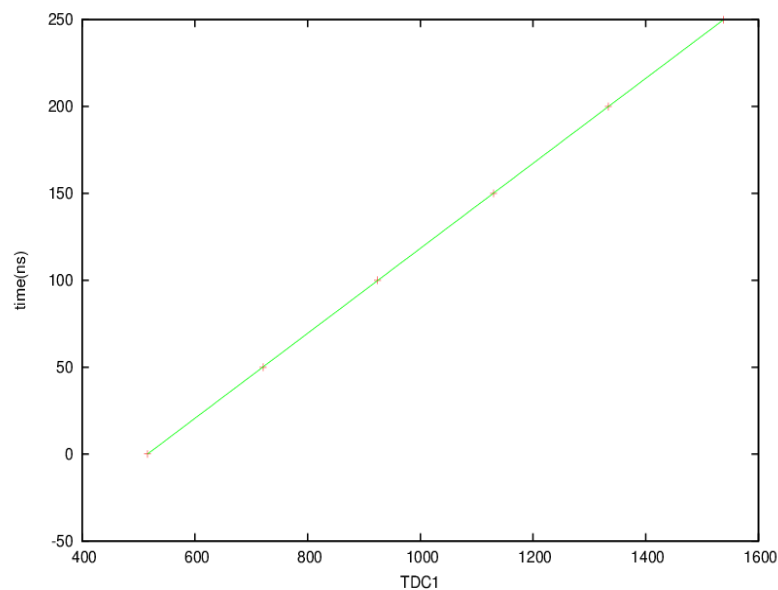
# ADCキャリブレーション

- いくつかの線源をおいてみて、そのエネルギーとADCの値をプロットし、その関係式を求める。



# TDCキャリブレーション

- ケーブルの長さを変えながら、それにより増えた時間とTDCの出力する値とをプロットし、その関係式を求める。



# キャリブレーション結果

$$E [keV] = p \times ADC + q \quad T_i [ns] = a_i \times TDC_i + b_i$$

$$p = 0.58812 \pm 0.01137$$

$$q = -195.367 \pm 23.83$$

$$a_1 = 0.244635 \pm 0.0001812$$

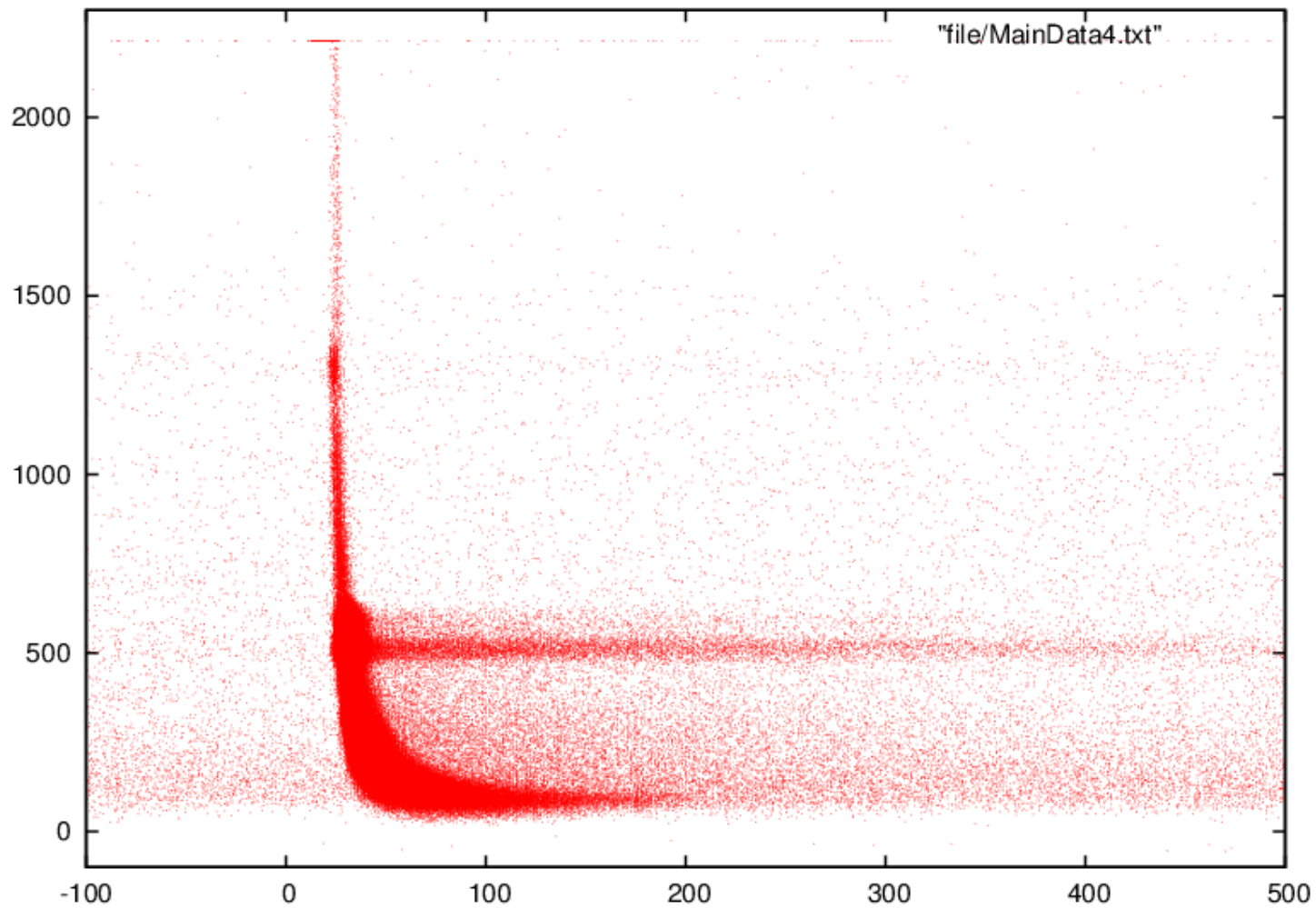
$$b_1 = -126.26 \pm 0.1966$$

$$a_2 = 0.246583 \pm 0.000183$$

$$b_2 = -127.87 \pm 0.1981$$

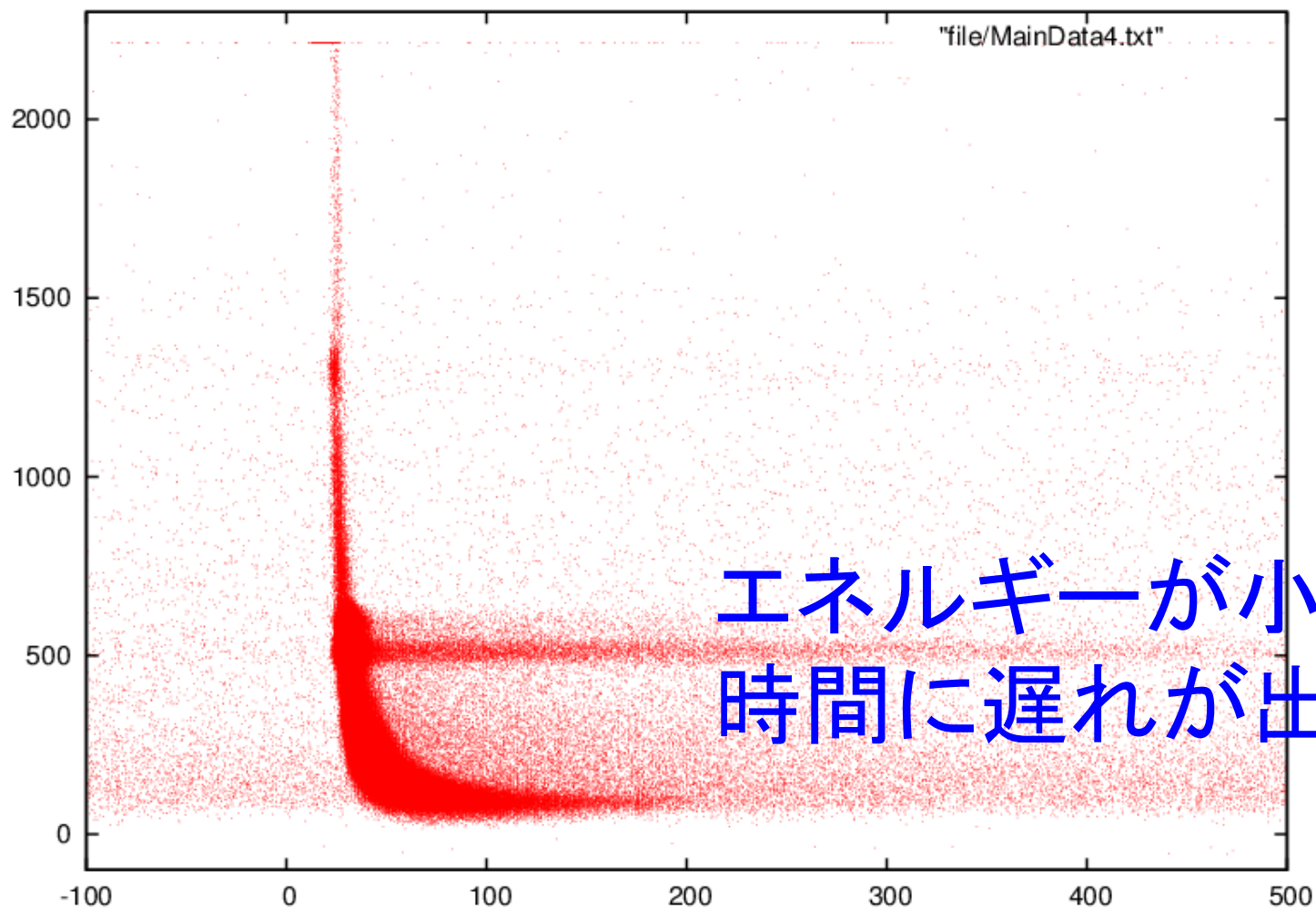
# T-Q補正

- ADCとTDCの相関図



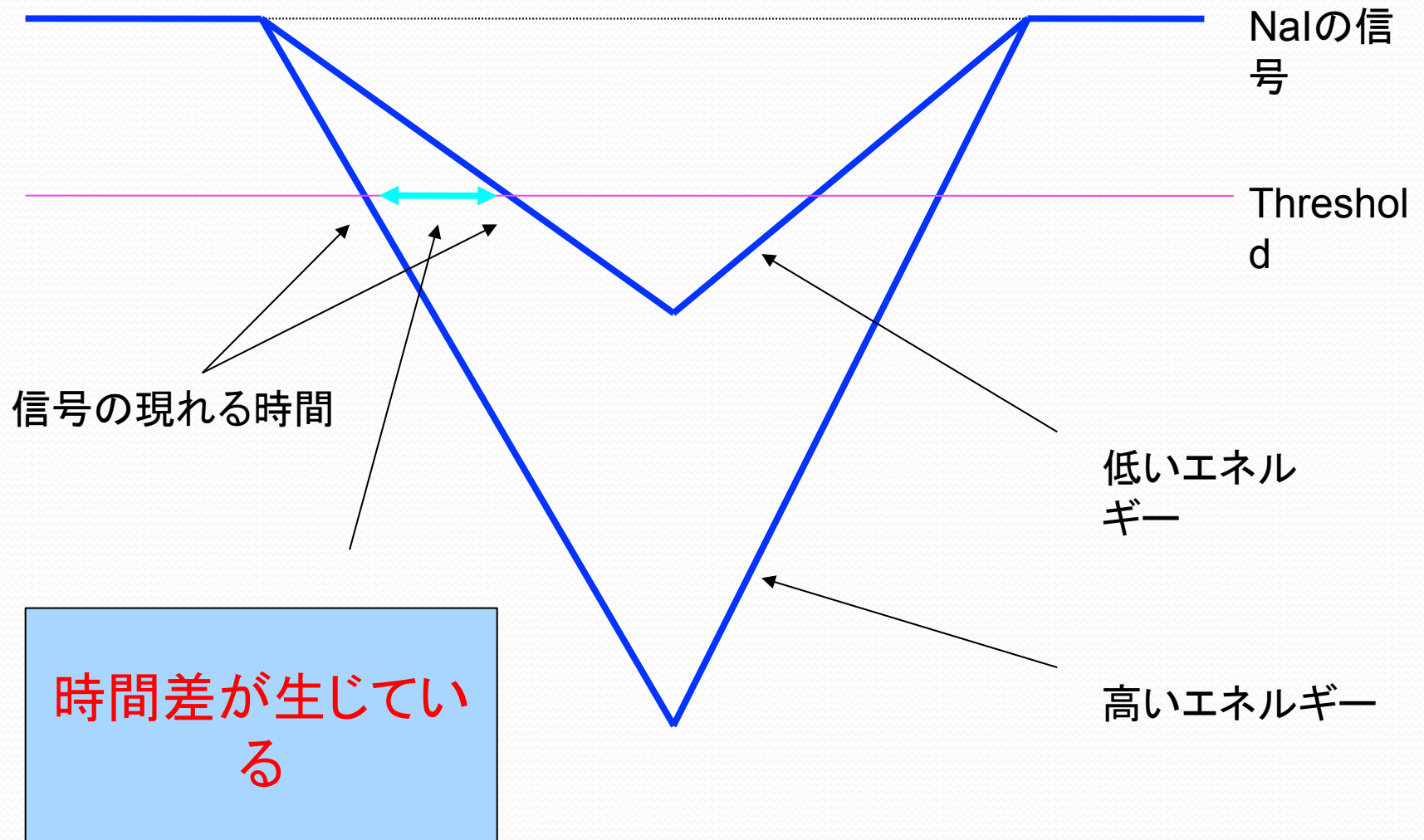
# T-Q補正

- ADCとTDCの相関図



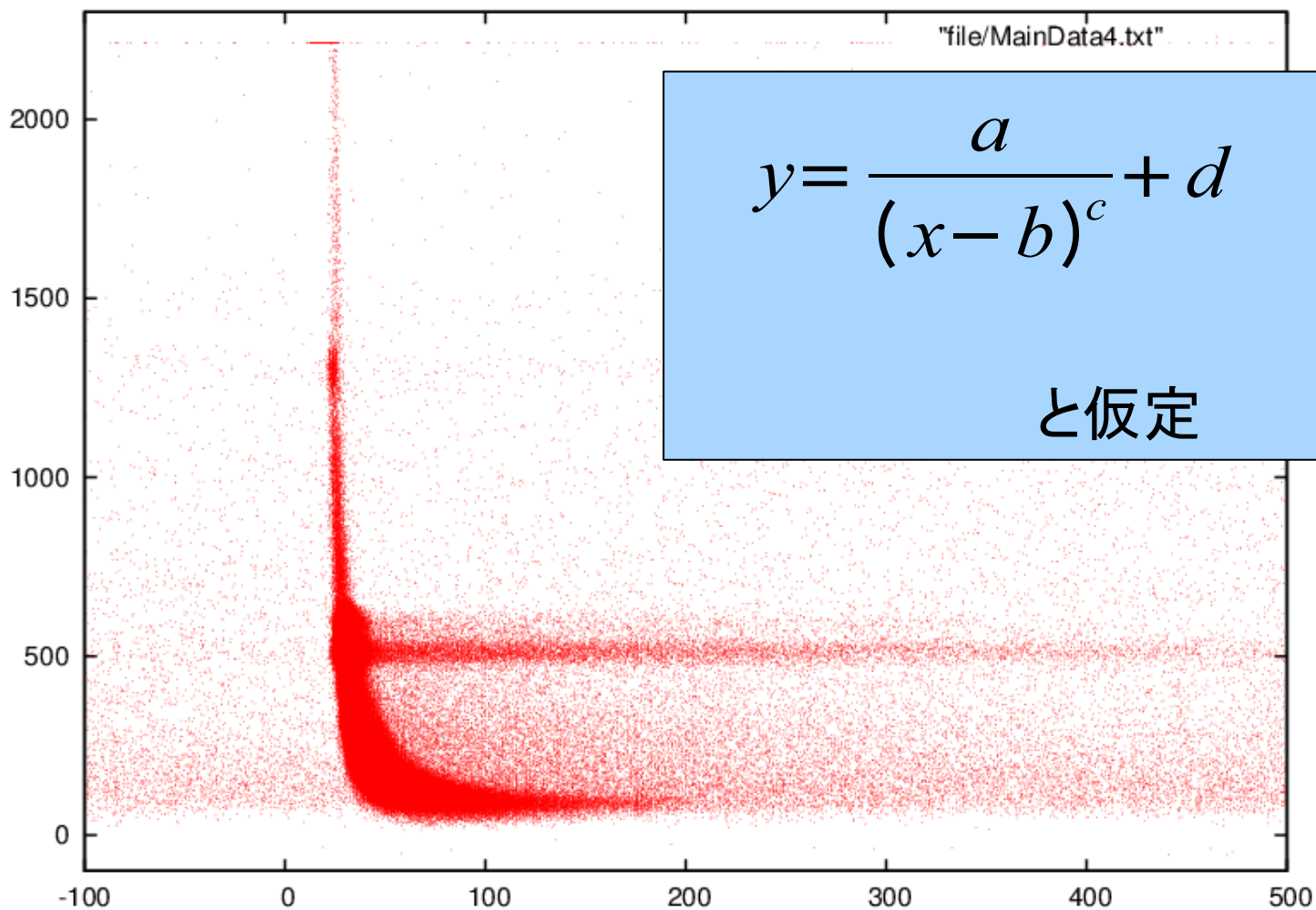
エネルギーが小さいと、  
時間に遅れが出る！

# T-Q補正



# T-Q補正

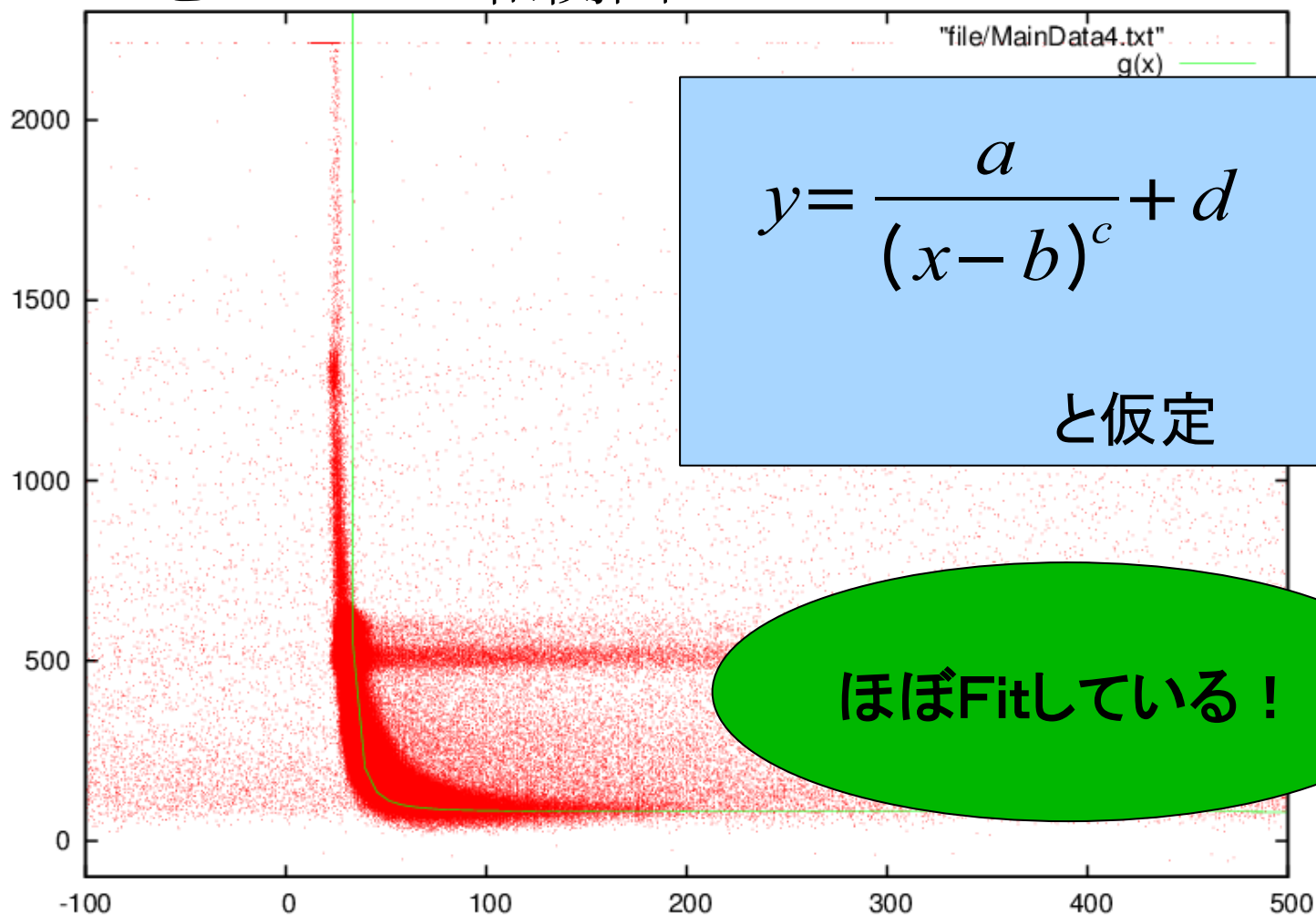
- ADCとTDCの相関図





# T-Q補正

- ADCとTDCの相関図



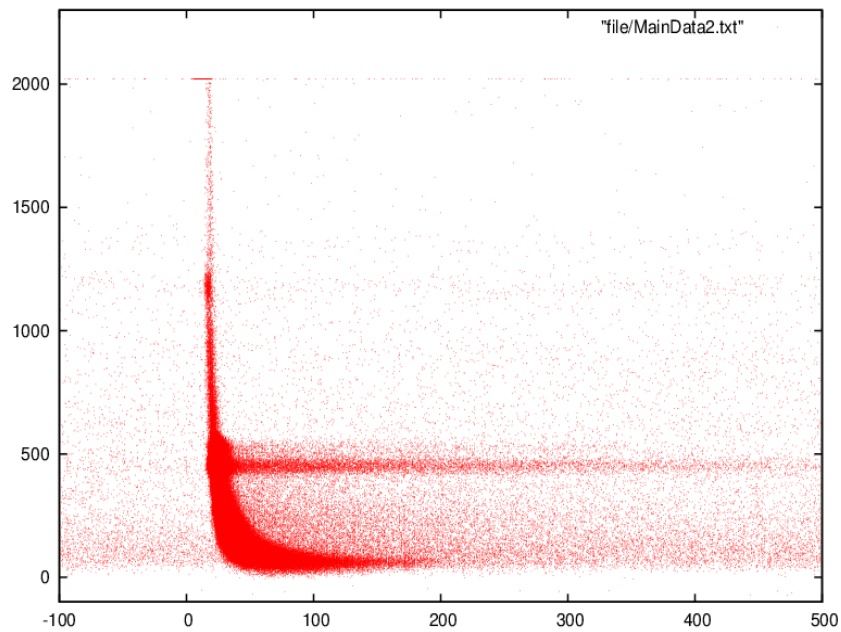
$$y = \frac{a}{(x-b)^c} + d$$

と仮定

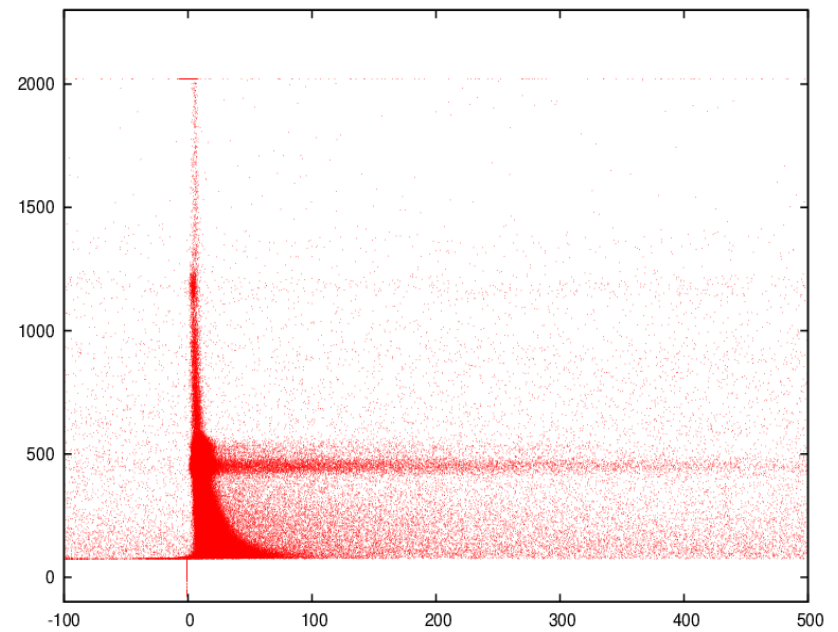
ほぼFitしている!

# T-Q補正

補正前



補正後



# カッティング

- 得られたデータの中には、予期したものの以外のものや使いにくいデータが混ざっているため、それらを取り除く。
- 取り除くもの：
  - ADCのエネルギー領域で使いにくいもの
  - TDC 1が0になっているもの
  - TDC 2がある範囲内にないもの
  - $TDC 2 - TDC 1$ が負になっているもの

# カッティング : ADC

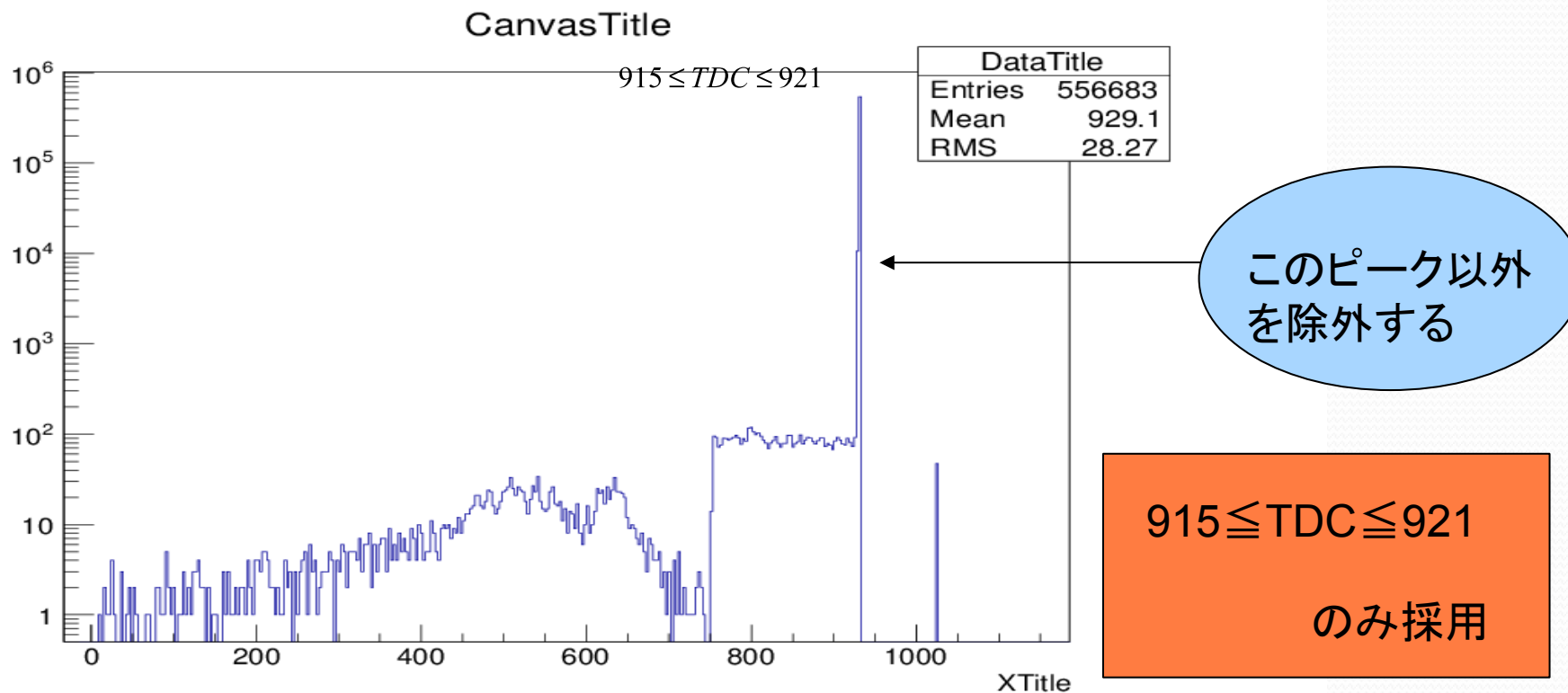
- 今回観測するのは 5 1 1 keV のエネルギーのものなのでそれより大きい領域のものは除外する必要がある。
- 5 1 1 keV がコンプトン散乱によりもっと低いエネルギーとして観測されうるが、低いエネルギー帯は時間の分解能がよくないため除外する。
- 今回は

$$4\ 0\ 0 \leq \text{ADC} \leq 6\ 0\ 0$$

を採用する。

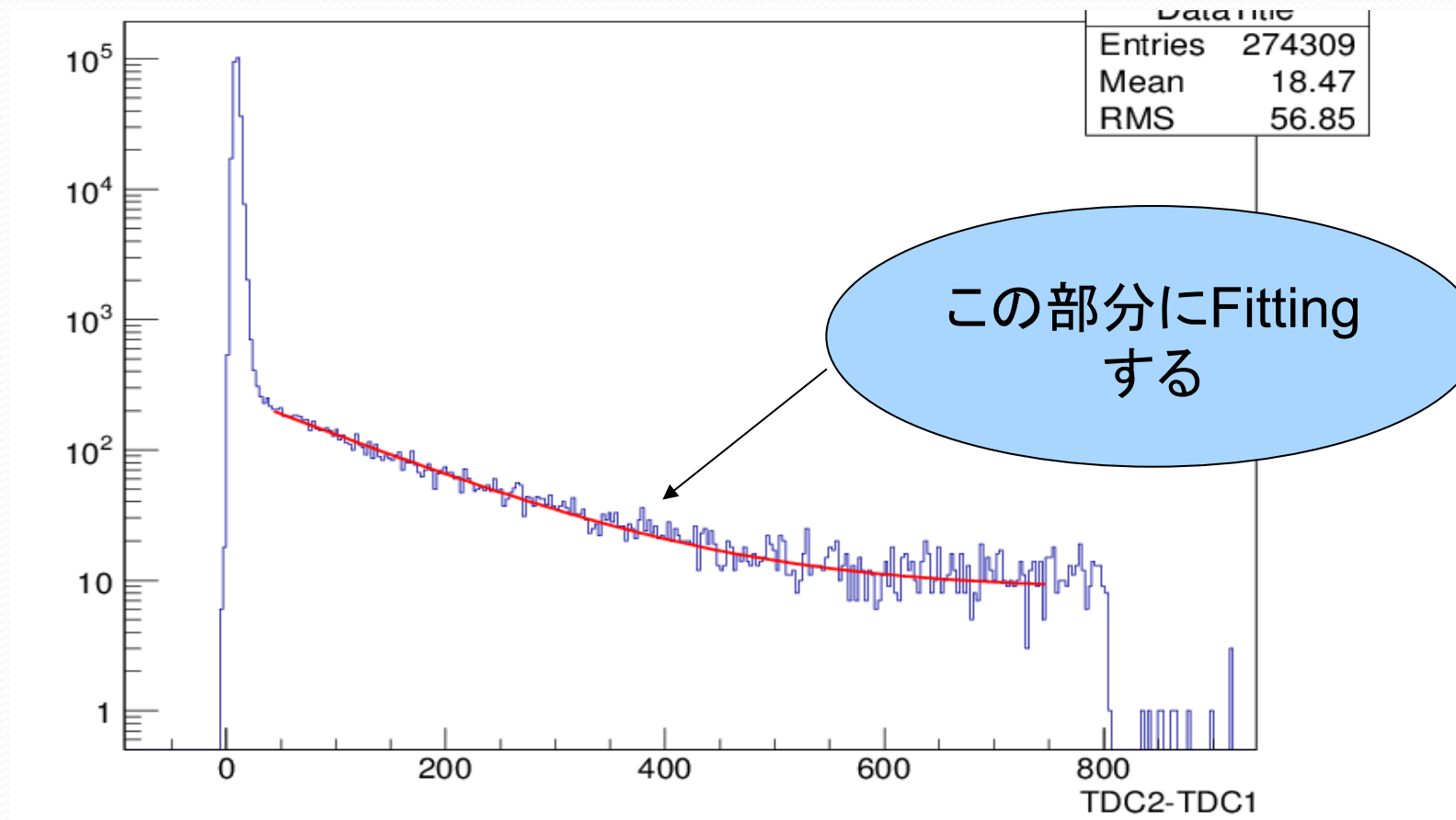
# カッティング:TDC2

- TDC 2は回路の構造から、常に同じ値のはず  
→ピーク以外は除外する



# 寿命の測定

- これまでの補正を行ったうえで、TDC二つの時間差のヒストグラムをつくる。



# 寿命の測定

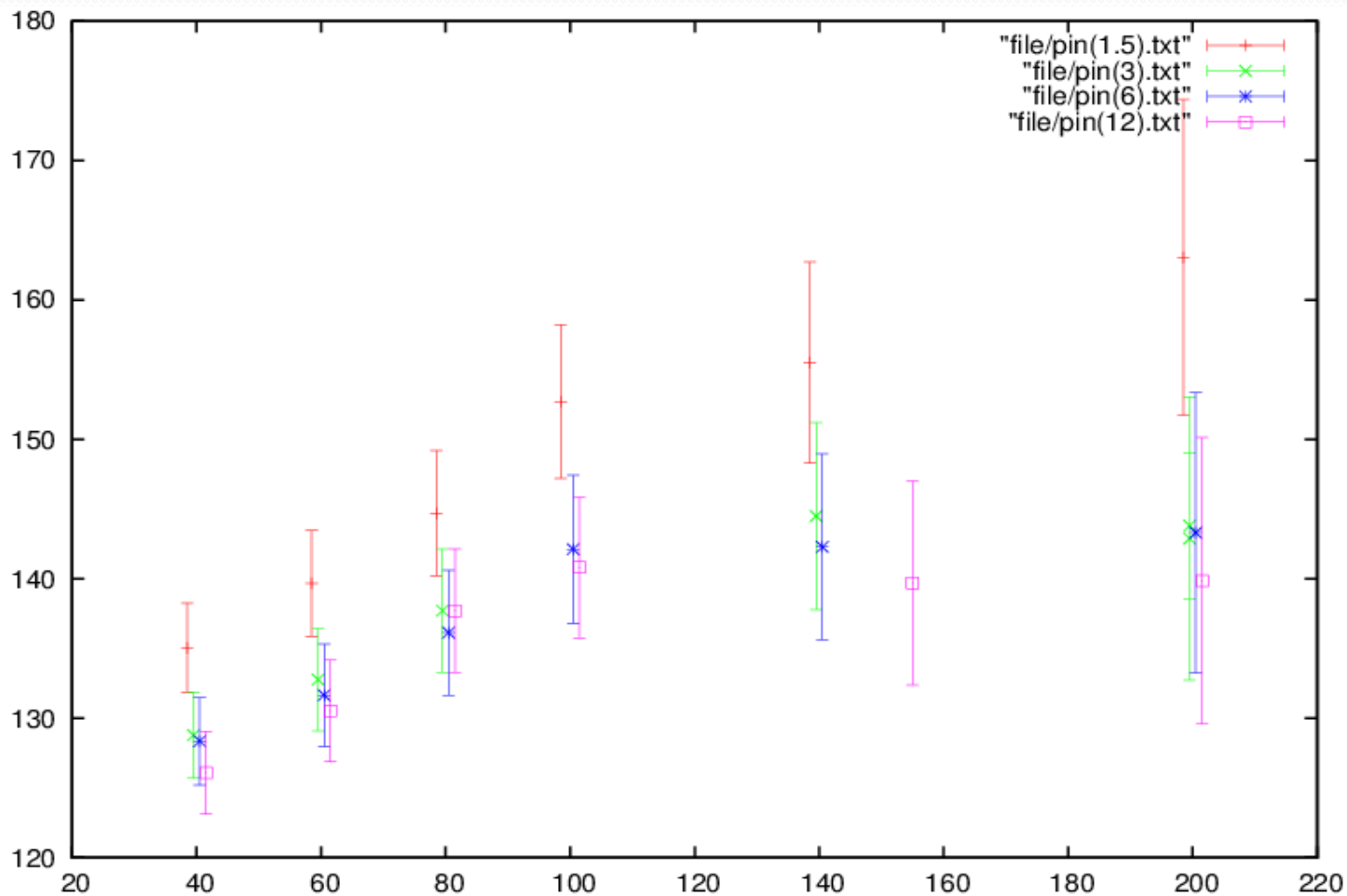
- Fittingする関数は

$$y = a \times \exp(x/b) + c$$

- $b$ が寿命に相当する。

# 寿命の測定

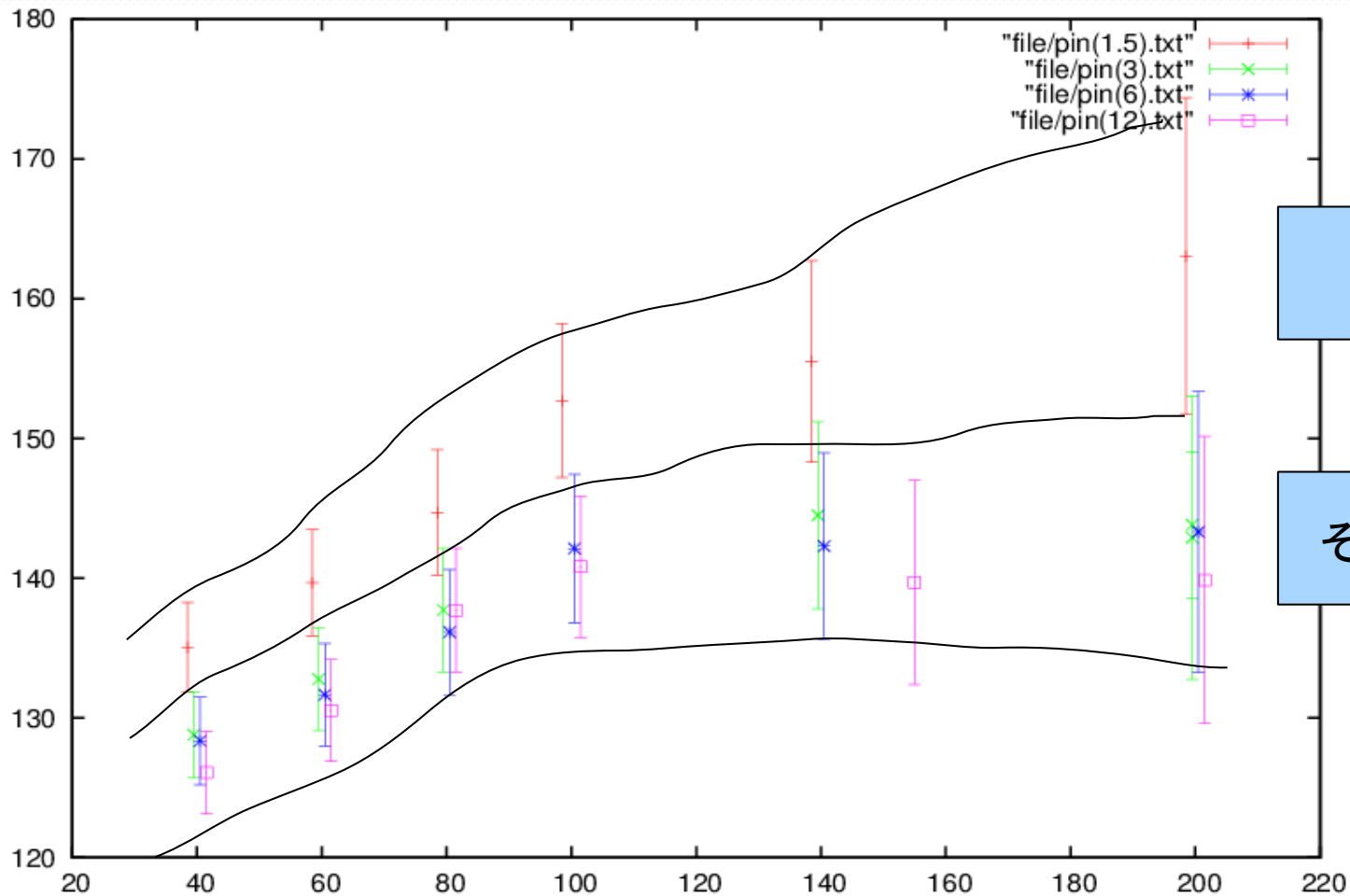
- Fittingする範囲と、ヒストグラムの幅をどうするか？





# 寿命の測定

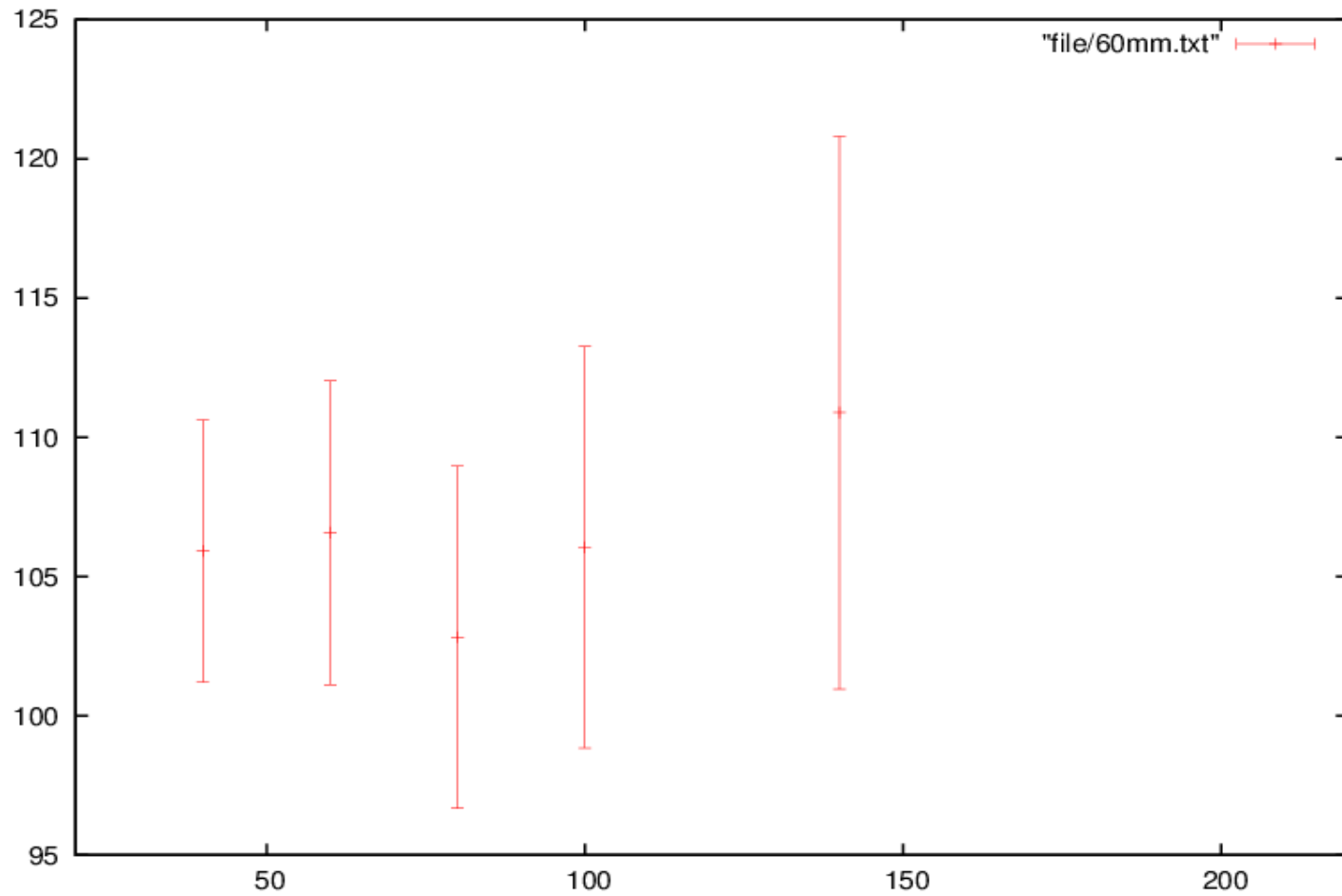
- Fittingする範囲と、ヒストグラムの幅をどうするか？



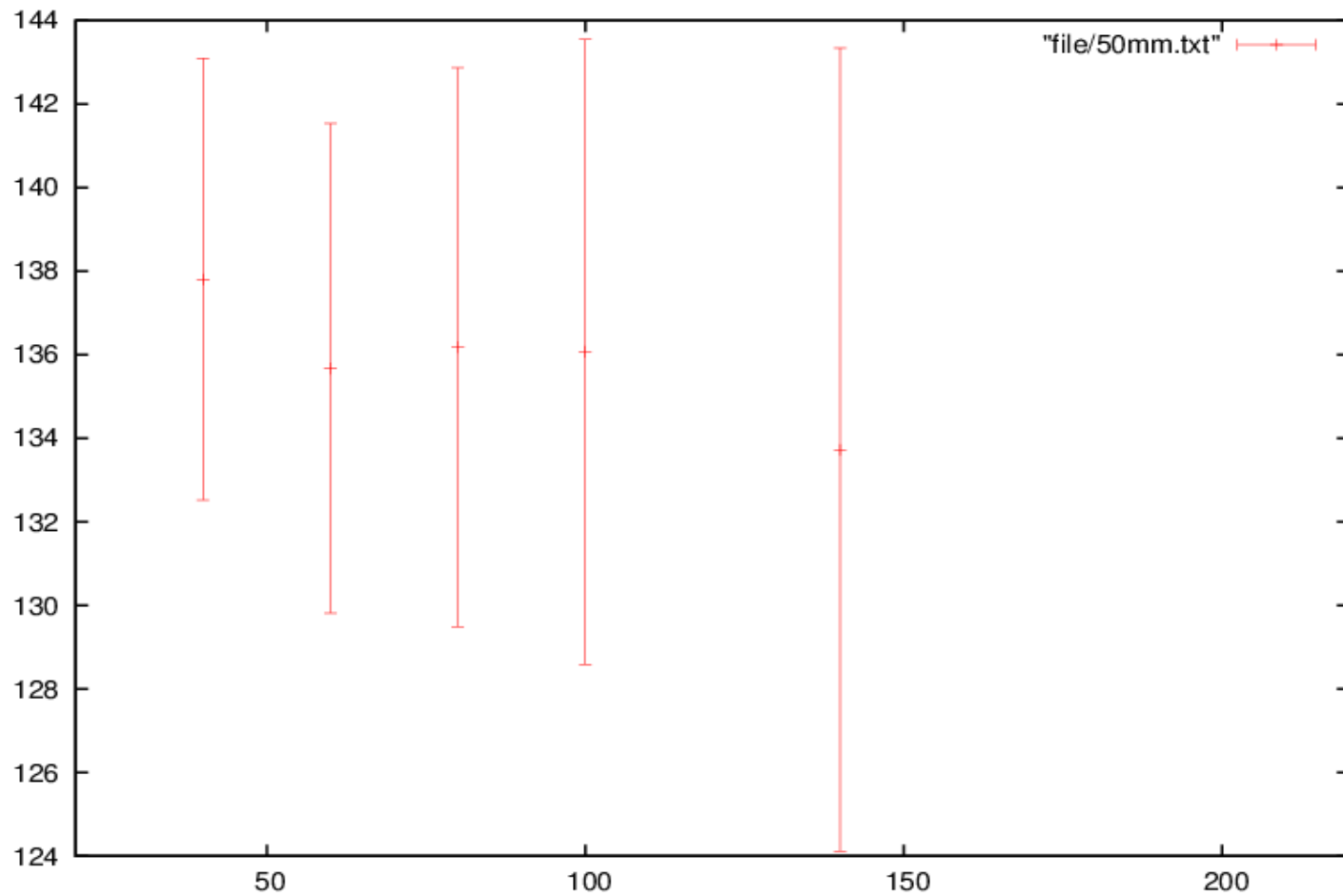
# ヒストグラム幅

- ヒストグラム幅が1.5のときだけ大きくほかのものとずれている。  
→ヒストグラム幅は3を採用
- なぜずれたか  
ヒストグラム幅が小さいと、少しのブレが大きく影響する  
→データ数が少ないと、ヒストグラム幅が狭い時に大きくずれてしまう。

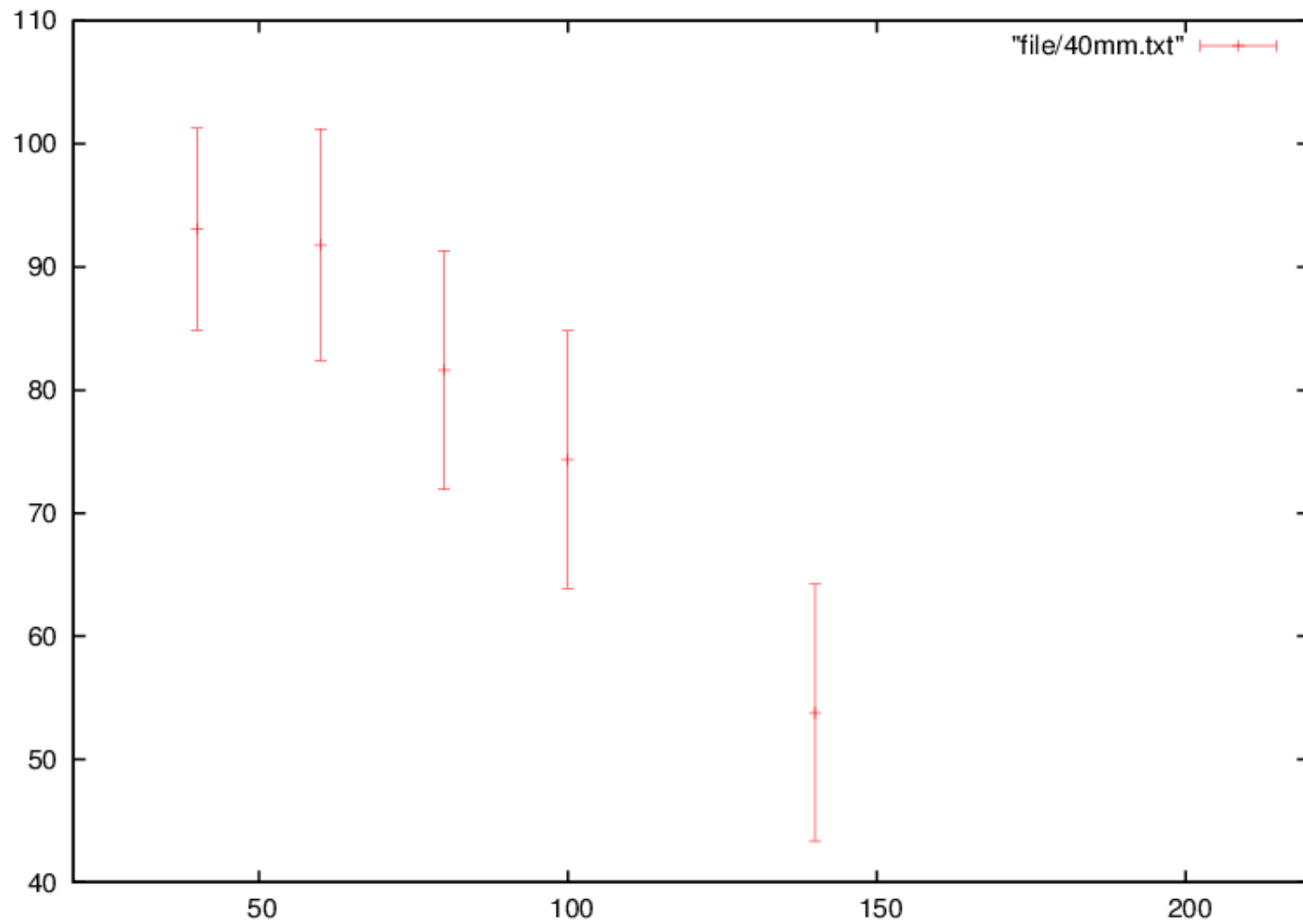
# 磁石間距離60mm



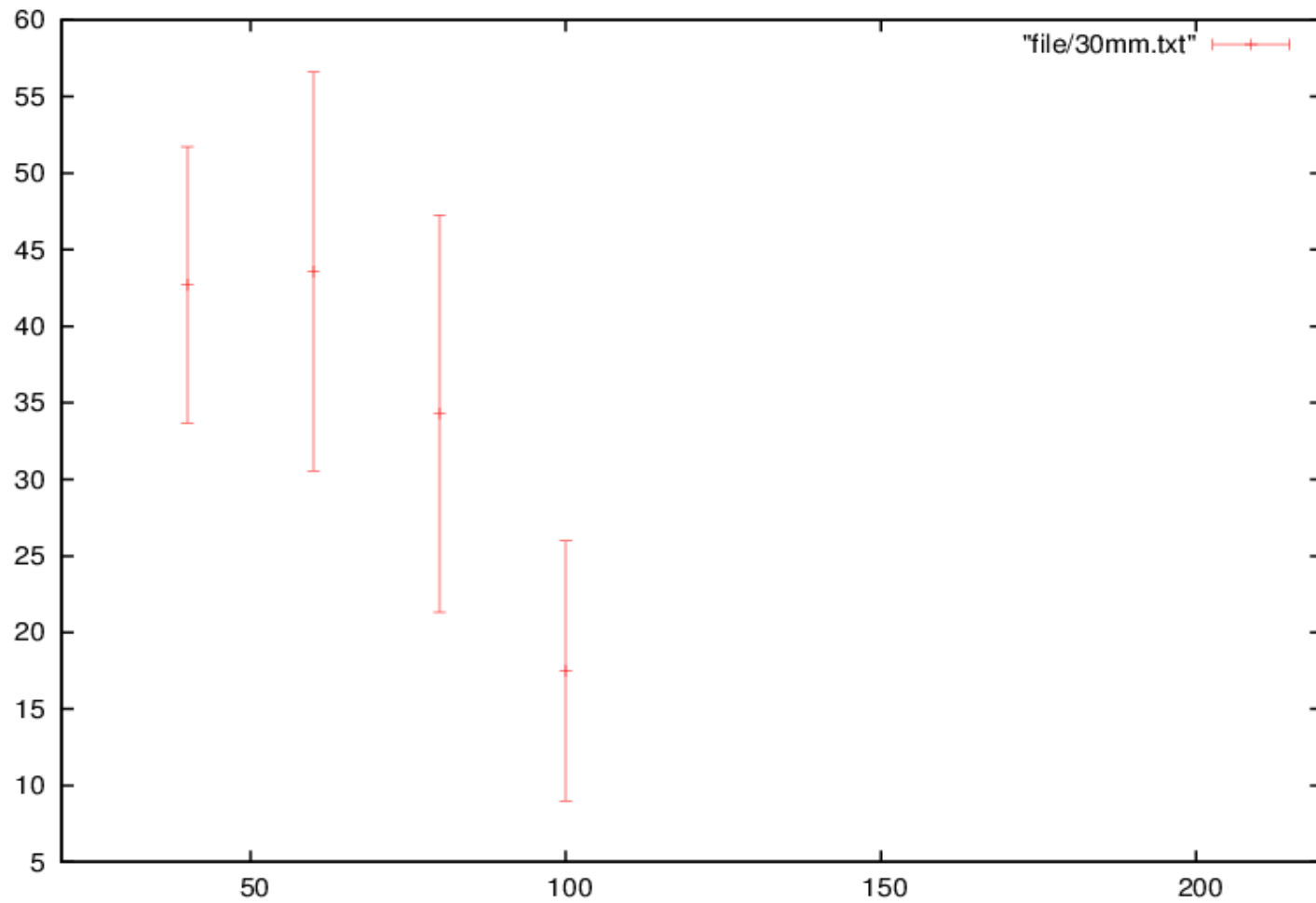
# 磁石間距離50mm



# 磁石間距離40mm



# 磁石間距離30mm



# 寿命の測定

- Fittingする範囲は、範囲の最大値は750で固定し、始点だけを動かした。
- Fittingする範囲の始点を変えても本当はほとんど変化しないはずだが、ほとんどの測定で大きく差がでている。
  - Fittingする場所によってグラフの形が安定していない、つまりデータ数が十分でないことをあらわしている。
- データ数が少ないことが原因でずれているとすると、そのずれの影響を少なくするためにより広い範囲でFittingを行うべき
  - できるだけ始点は小さくする。

# 4. 結果

- D : 磁石間の距離
- B : 磁場の強さ
- b : Fittingした関数の寿命に相当するもの
- $\Gamma$  : bなどから計算された寿命

D	30mm	40mm	50mm	60mm	磁石なし
B	350	263.1	196.9	149.4	
b	42.6994± 9.01227	93.0779± 8.22300	137.806± 5.28830	105.905±4 .71358	129.773±3 .18517



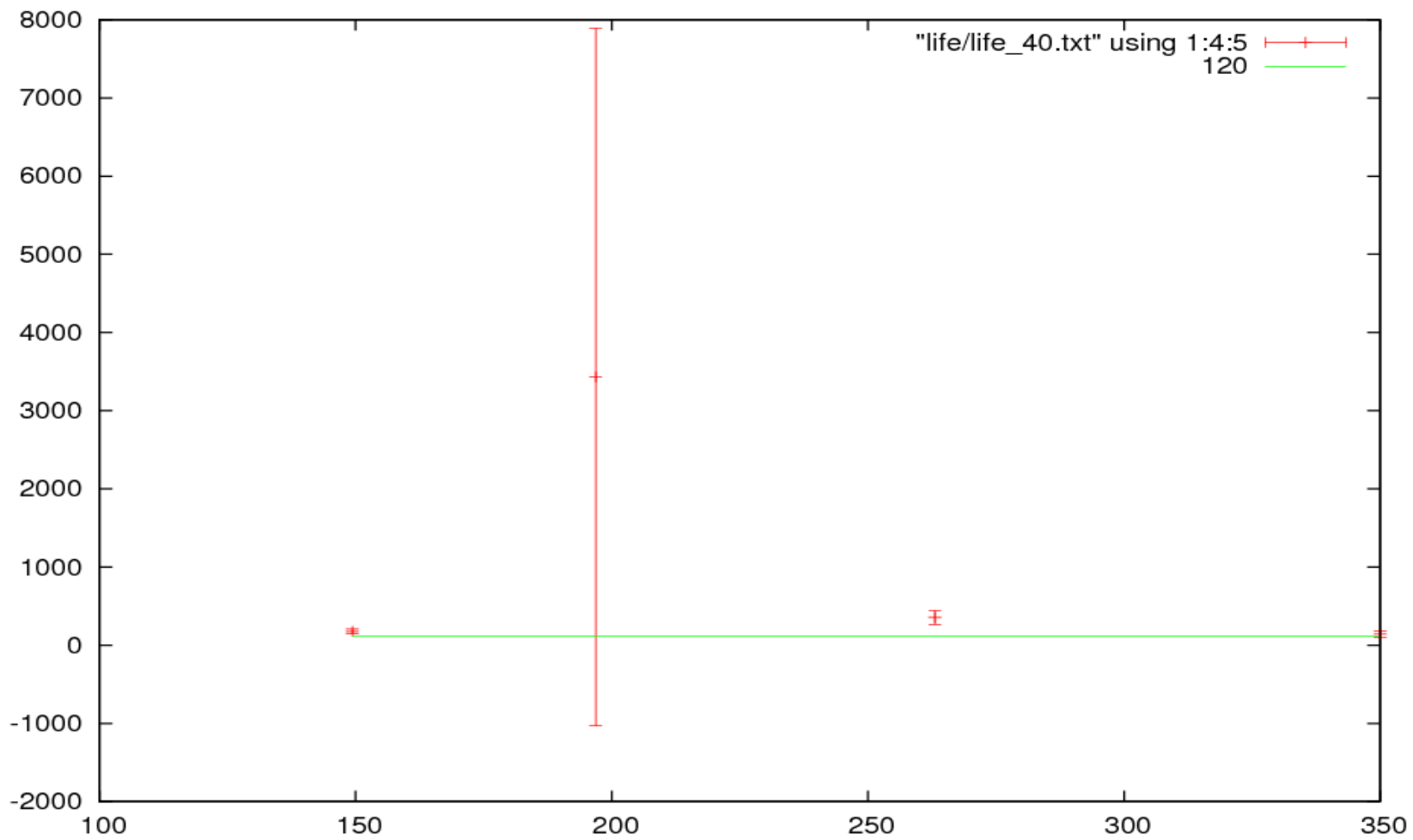
# 結果

結局寿命は、

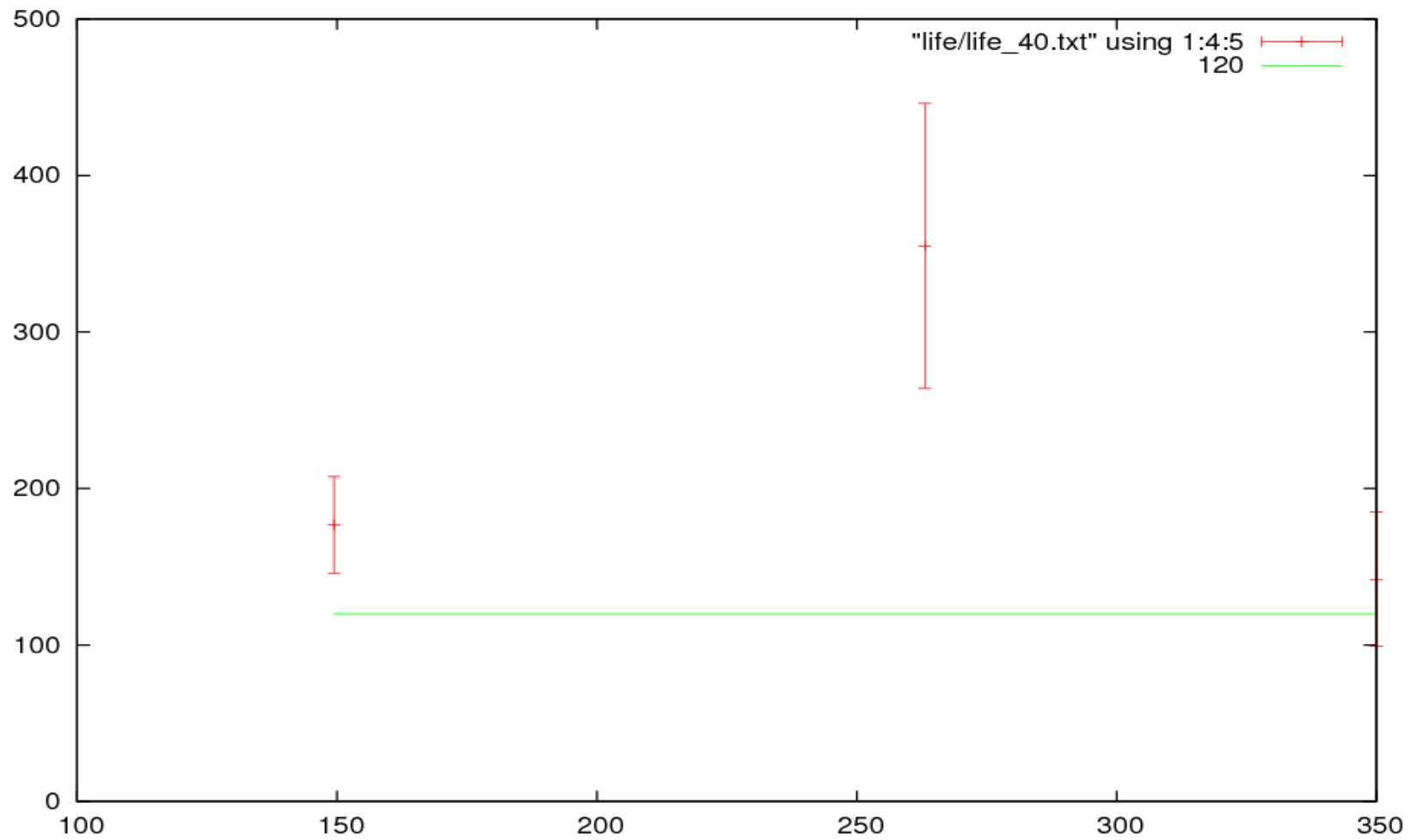
$$\text{寿命} = 178.2665 \pm 24.180724707$$

という結果になった。

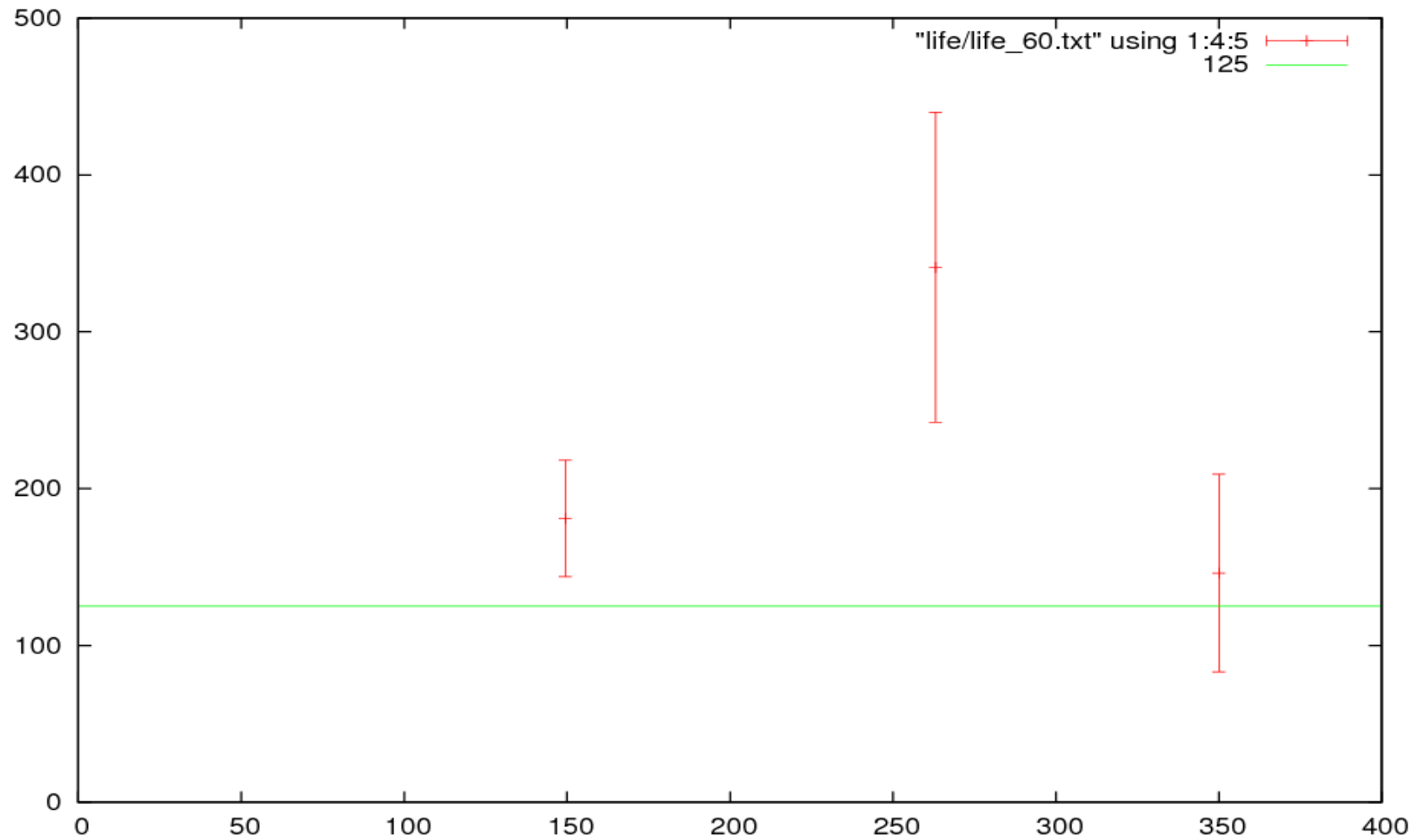
# 40からFit



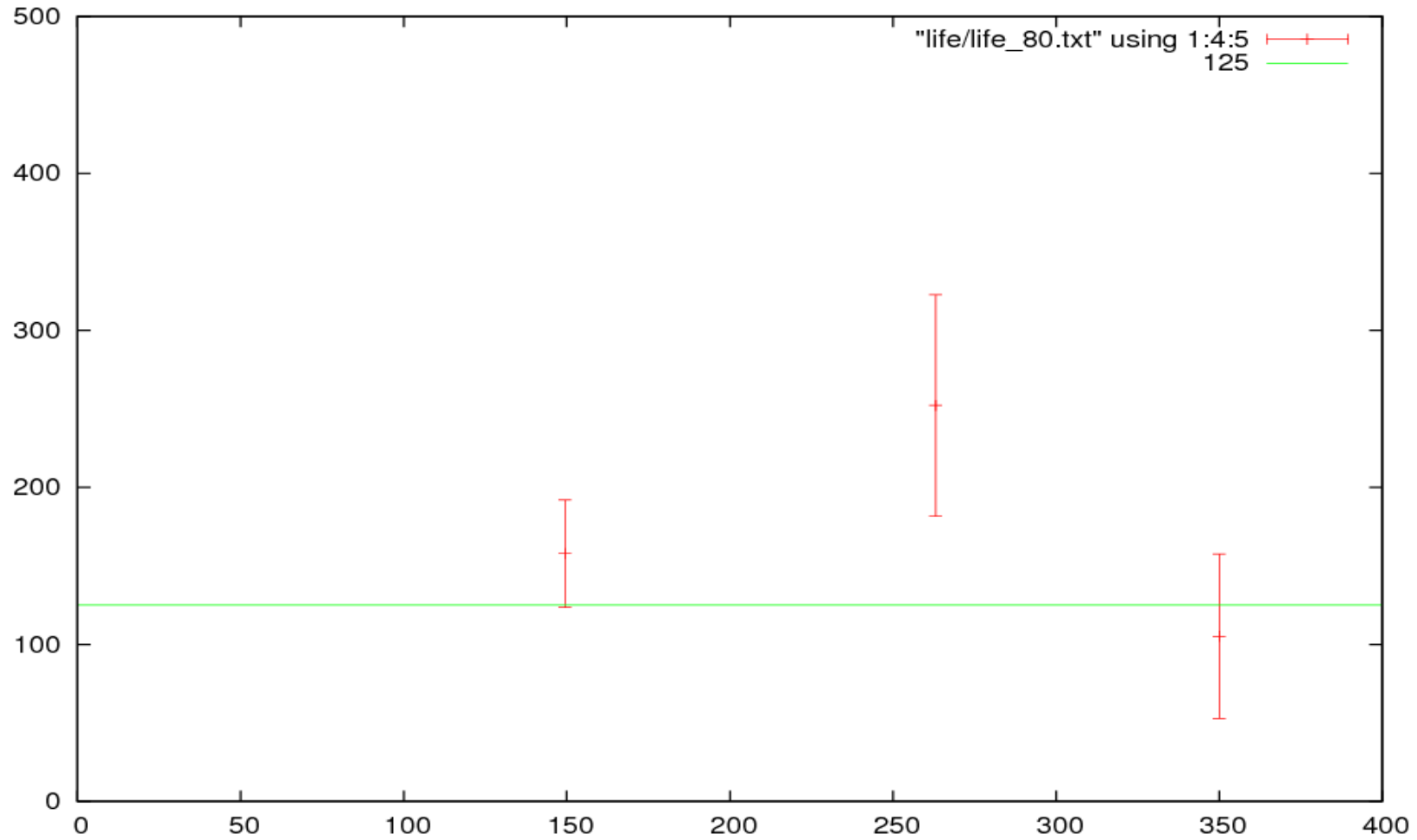
# 40からFit



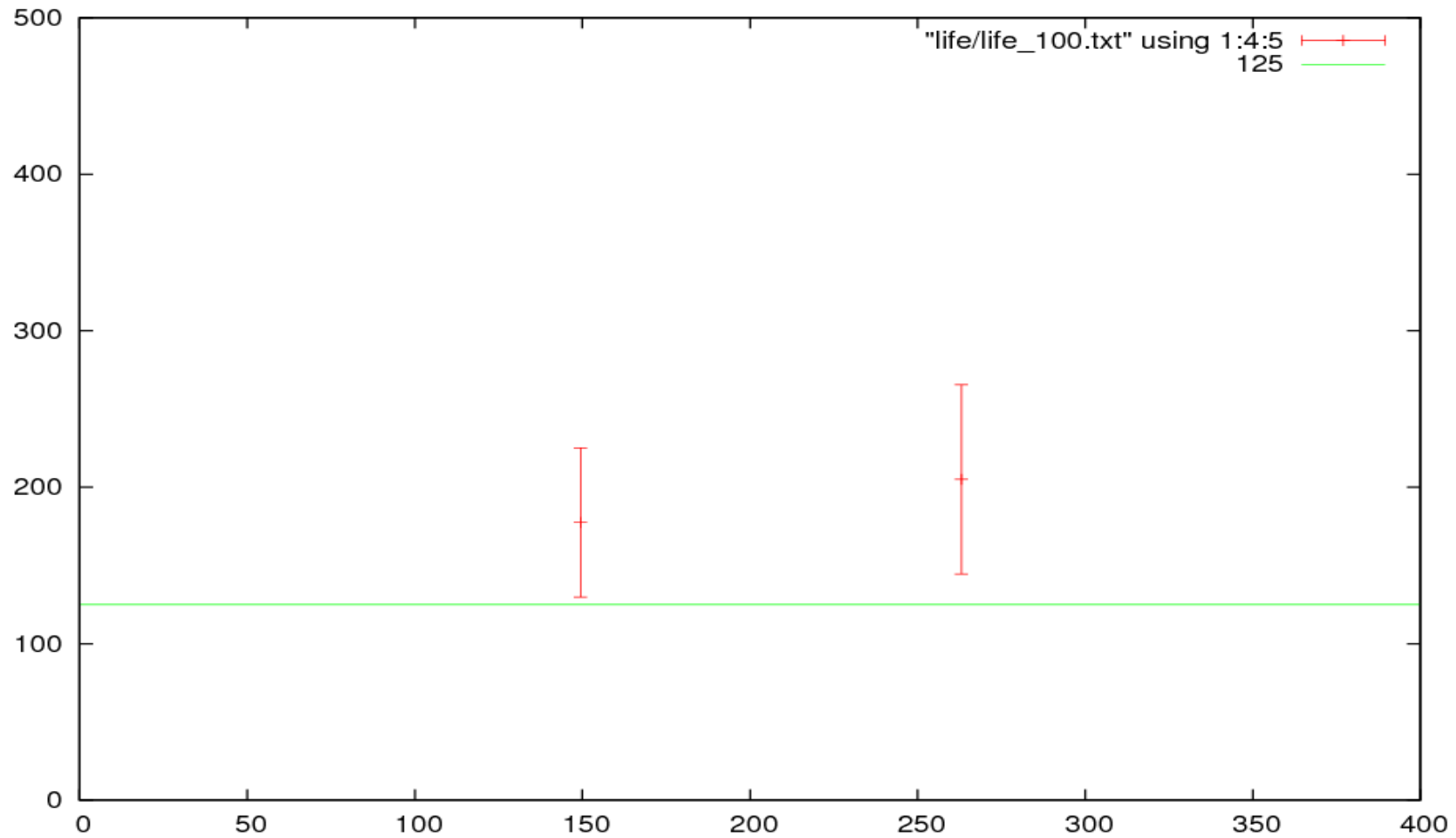
# 60からFit



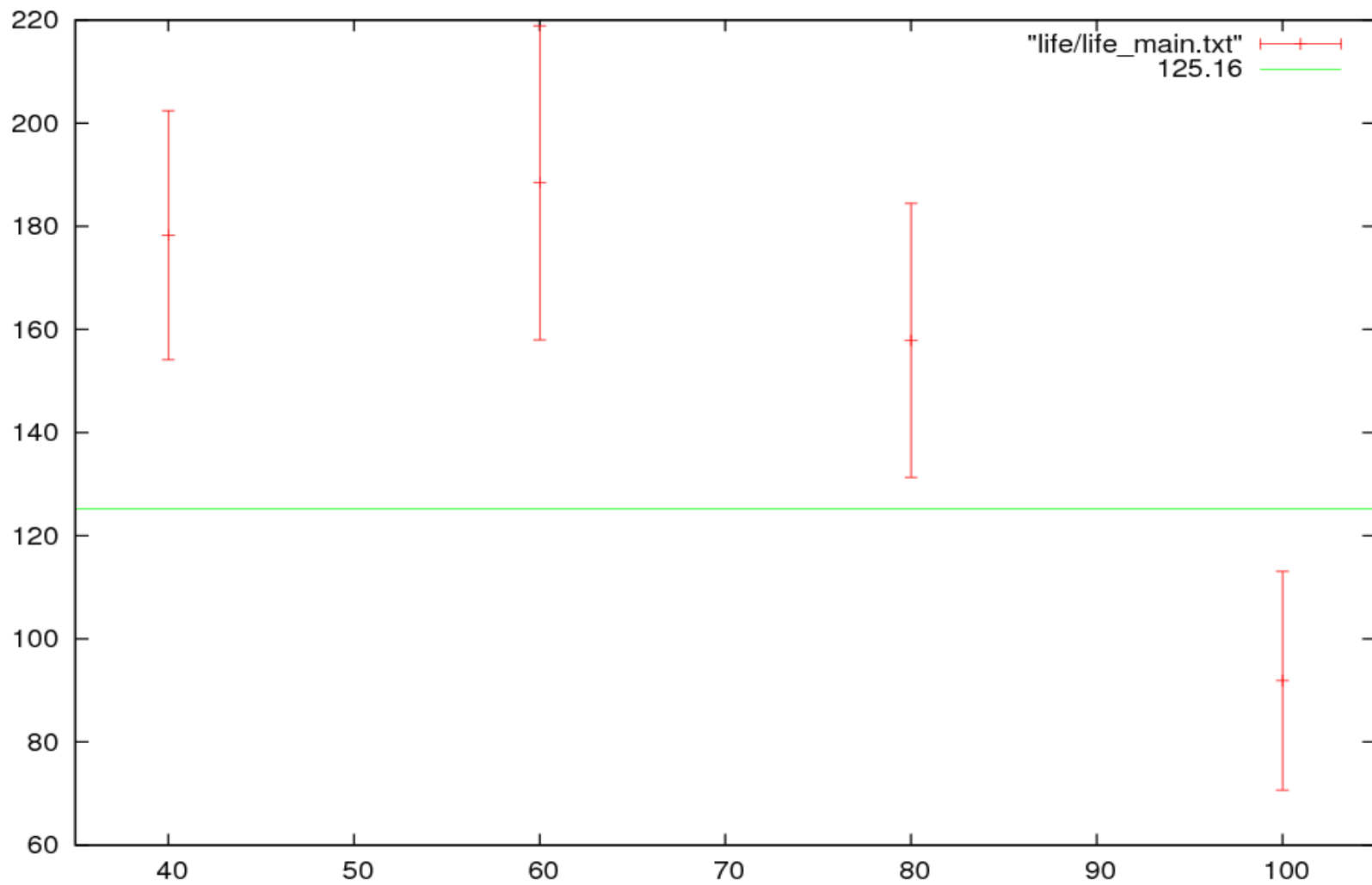
# 80からFit



# 100からFit



# 総合結果



## 6. 考察

- 理論値との誤差の原因
- Coincidenceのrateが低い
- 50mmの大幅な系統誤差

注意

あくまで推測や可能性であり、  
今後検討すべきものであって、  
今回その正当性は評価できていない。



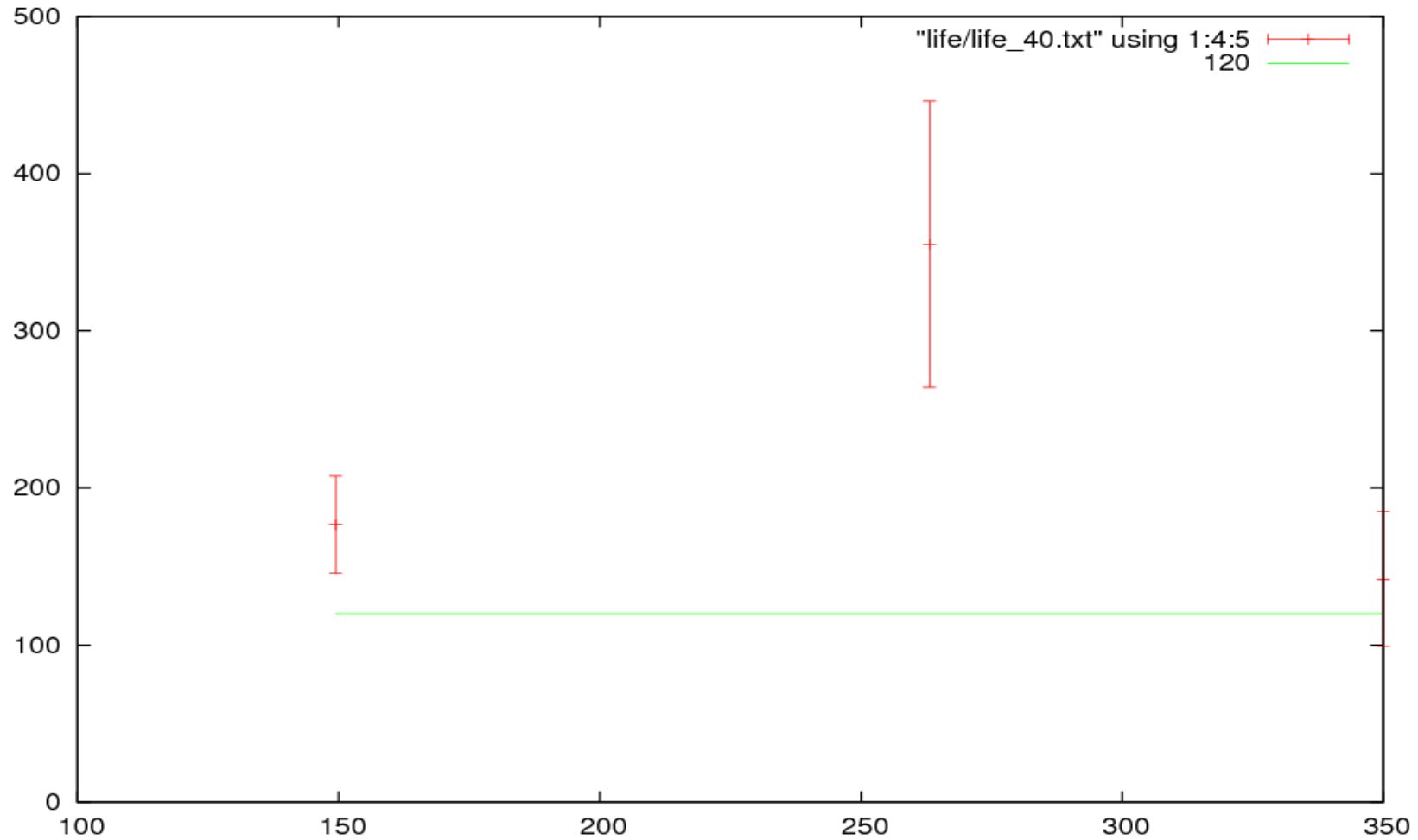
# 理論値との誤差の原因

- 系統誤差 < 統計誤差

磁場の一様性  
キャリブレーション  
T-Q補正  
真空の度合い  
等

ビン幅  
フィッティング  
データ数の大小  
データCut  
等

採用できるデータ数  
が全然取れなかつ  
た！



- 全体的に寿命が長くなっている・・・。

# 寿命が長くなった原因

- Coincidenceが2つしかとれていないのでo- $\text{Ps}$ の3 $\gamma$ の寄与を余計に受けている。
- o- $\text{Ps}$ が混合している程寿命は大きくなる。



寿命が全体的に大きくなった。

# 利用したデータ数

Interval between magnets	Entries/day (400 - 600 KeV)
60mm	$3.8 \times 10^4$
50mm	$2.2 \times 10^4$
40mm	$1.9 \times 10^4$

絶対量はともかく、  
磁場が強くなるにつれて  
相対的にデータ数が少なくなっ  
ている。

# データが少ない理由

1.  $3\gamma$  (o-Ps) に比べて  $2\gamma$  (p-Ps) の時のほうが単位立体角当たりで測定されにくい。
2. 磁場をかけるにつれ p-Ps の崩壊率が支配的になってくるので  $2\gamma$  の寄与が支配的になる。



測定されにくい  $2\gamma$  の割合が増える為、  
単位時間当たり観測されるカウント数も下がる。

# さらに・・・

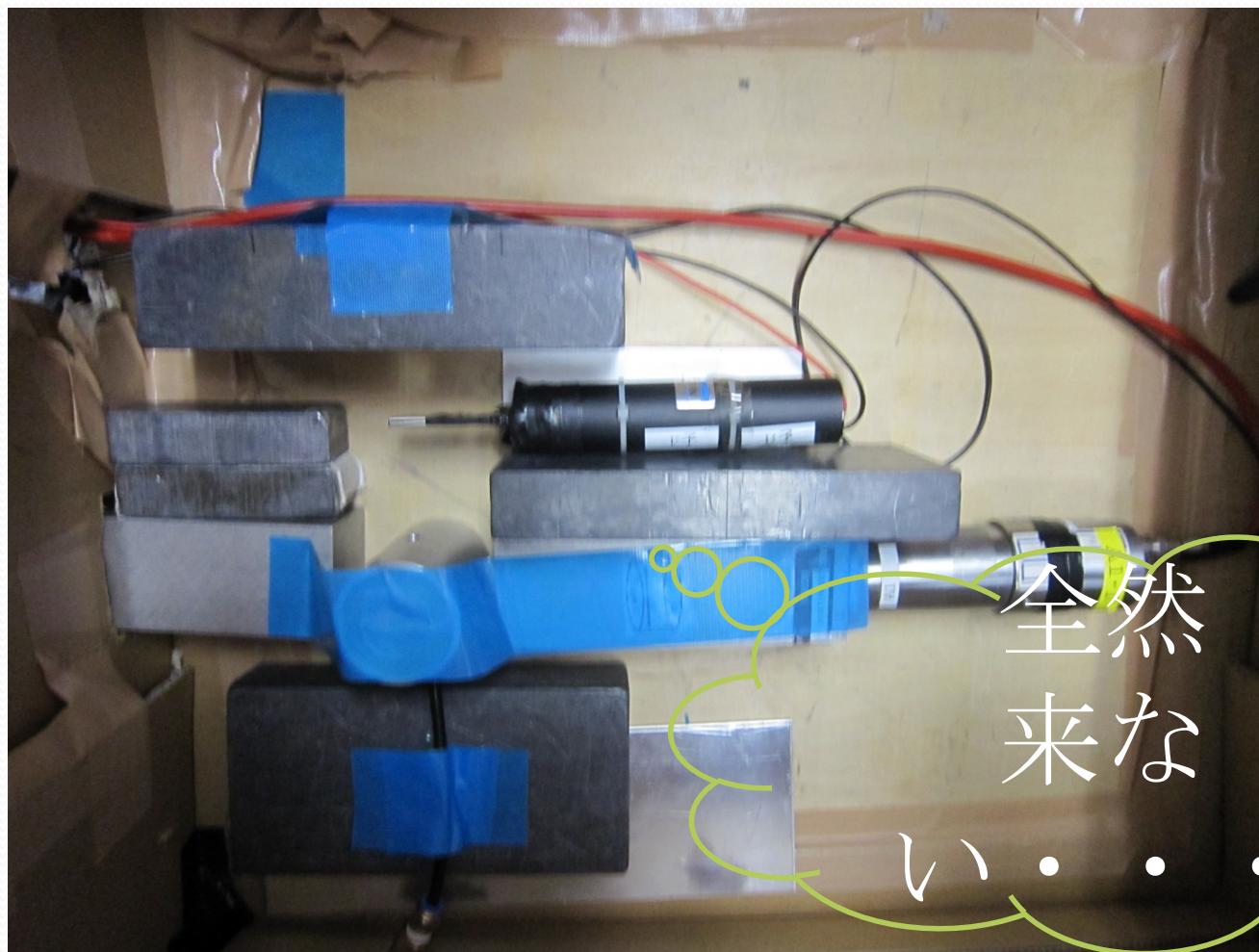
2つのCoincidence (PI + NaI<sub>1</sub>)だと・・・

- Back groundの影響を受けやすくなる。
- 別の時間に起こった関係ない2つの事象をたまたま同時に観測しやすくなる。



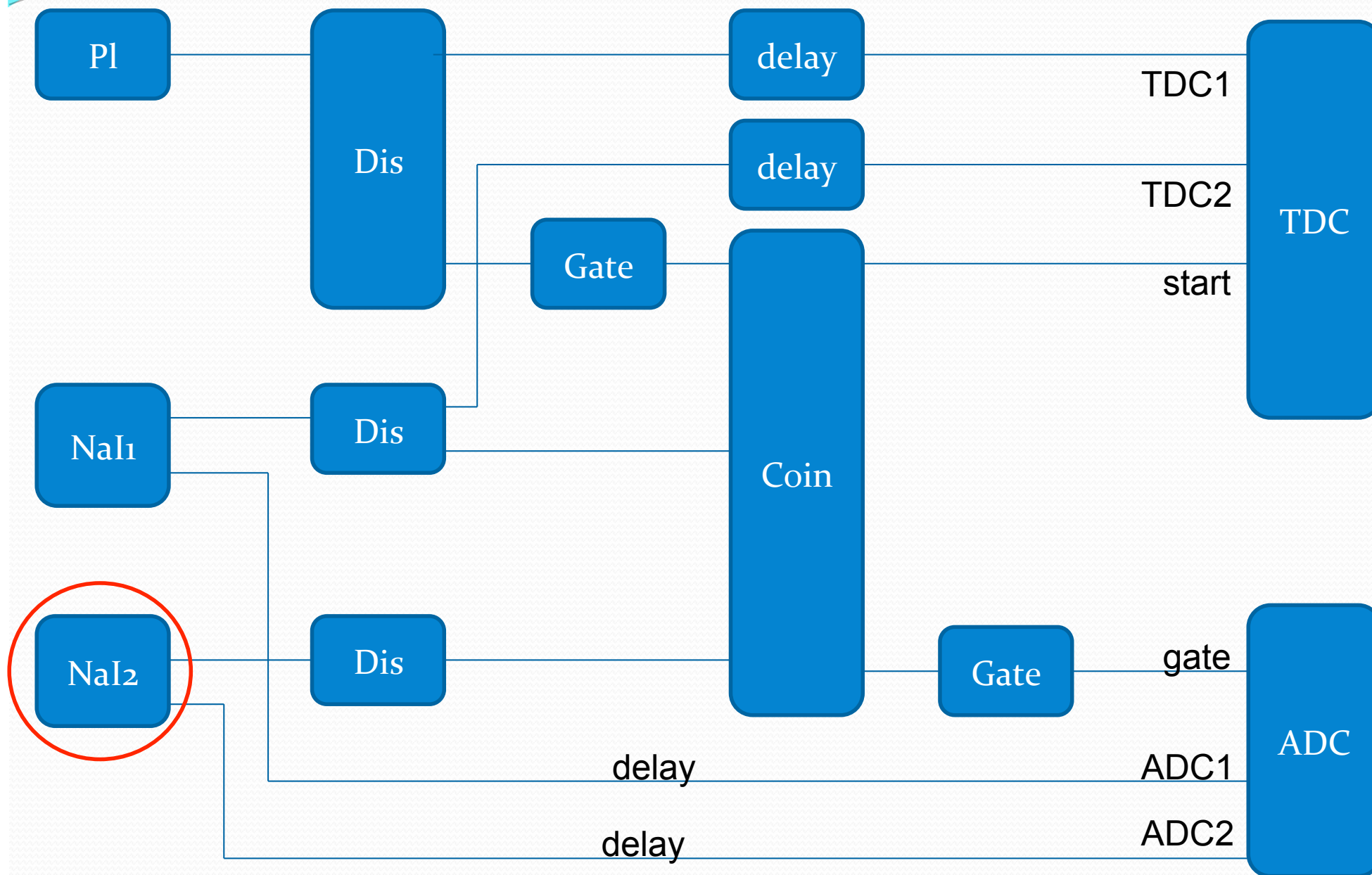
系統誤差につながる。

# 3つのCoincidenceだと・・・



全然  
来な  
い・・・

# 当初の回路図





# Coincidenceの違い

3つのCoincidenceだと・・・(PI + NaI<sub>1</sub> + NaI<sub>2</sub>)

- p-Psの2 $\gamma$ を精度良く測定できる（余計なモノが入りにくい）。
- 全然カウントが来ない（10分で2つ3つ）。

2つのCoincidenceのだと・・・(PI + NaI<sub>1</sub>)

- カウントはそこそこ取れる（3つに比べれば）。
- 余計なモノまで観測（Na線源の生成消滅 $\gamma$ 線等）。

# 3つの場合が少ない理由

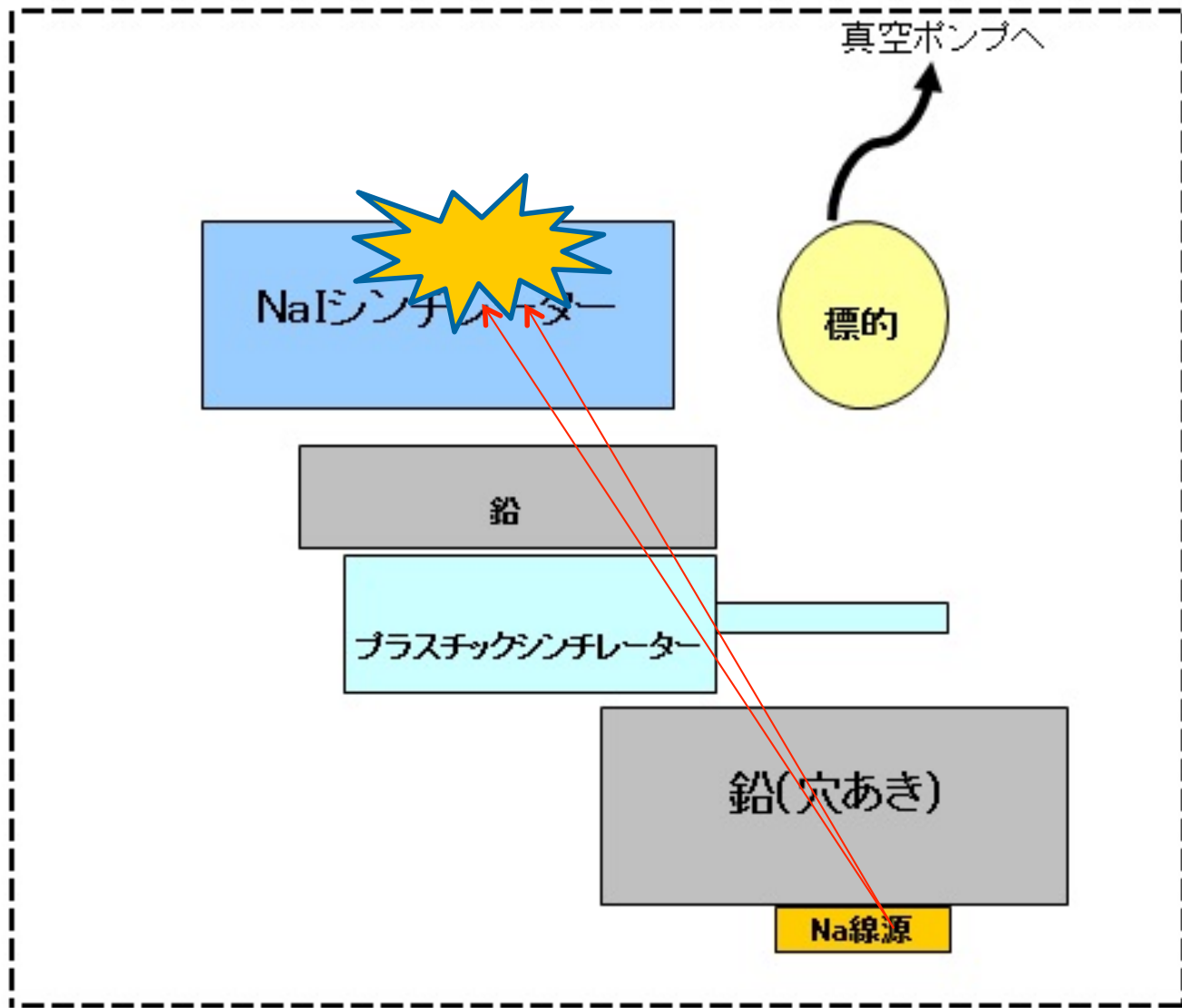
- 実験装置の配置がまずかった？
- 2つ目のNaIに不具合があった？
- 回路の設定がまずかった？

# 50mmのズレの理由

- 磁場の誤差。
- テスラメーターで磁場の値を求め誤った？
- 2回とも偶然とびぬけた？

# 余談(失敗談)

- Coincidenceのゲートの幅が小さく、解析をする上で必要なデータがとれていなかった。
- High Vol.が小さくo-Psの $3\gamma$ のエネルギーの範囲がスレッシュホールドぎりぎりだった。
- 大きな穴のあいた鉛板を使用していた。



※点線は暗箱をあらわす

# 余談(失敗談)

- ゲートの幅をきちんと確認していなかった。
- High Vol.が小さく o-Psのエネルギーがスレッシュホールドぎりぎりだった。
- 大きな穴のあいた鉛板を使用していた。

結果・・・

O-Psから来るデータがあまりとれておらず、ほとんどBack groundばかり観測していた。

# 7. 改善点

- ・PIシンチレータ・NaI2つの計3つのcoincidenceをとる

←混合状態からp- $P_s$ になり崩壊したのを見るため



- ・長期間測定をする

- ←データ数を増やすことにより  
誤差を減らす



夏休みをフルにつかって測定を行うと・・・

夏休み60日間に

磁石間30mm,40mm,50mm,60mm,磁石なしの  
5回測定すると

1回につき

$60 \div 5 = 12$ 日間使える。

データ数がN倍なら、誤差が $1/\sqrt{N}$  倍になること  
を用いると

今回の測定では、

I . 磁石間距離30mm,50mm(1回目)  
→4日間の場合

データ数が3倍になるので、  
誤差は  $1/\sqrt{3}$  倍(約58%)となる。

II . 磁石間距離40mm,50mm(2目),60mm  
→2日間の場合

データ数が6倍になるので、  
誤差は  $1/\sqrt{6}$  倍(約41%)となる。

・ $\text{SiO}_2$ をできる限り真空中に保ったまま作業を行う

←pick off反応やスピン交換  
反応、化学反応を減らす。

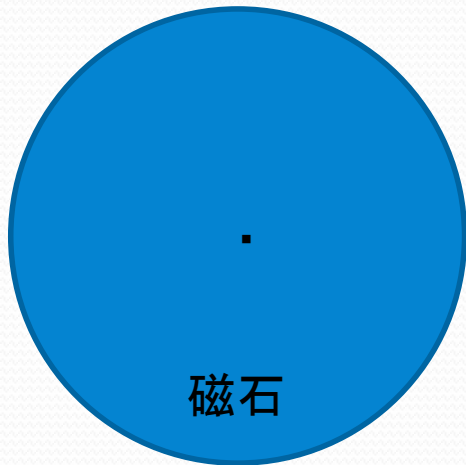
もう、測定はできないが・・・

これらの効果がどれほど  
効いているのか確認するため、  
 $\text{SiO}_2$ を空気に触れさせて測定するとよかった。

# ・磁場の値の求め方

今回

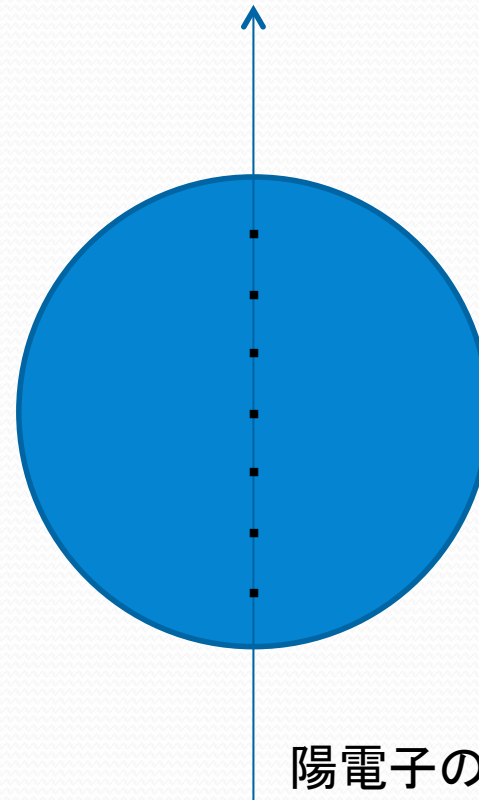
ピーク  
の値を磁場  
の値とした



どこで崩壊するか  
↓  
決まってないので

改善後

陽電子の通り道から  
数点取り平均する





- 測定と解析を並行して行う

←間違いを早く見つけ出し  
時間のロスを防ぐ