

ポジトロニウムの寿命測定による 量子振動の観測

高柳遠林 宮川大輝 山岡慎治

1. 実験の動機

○ ポジトロニウムの特徴

• 純粋な束縛系QED

(質量が軽く弱い相互作用を無視できる)

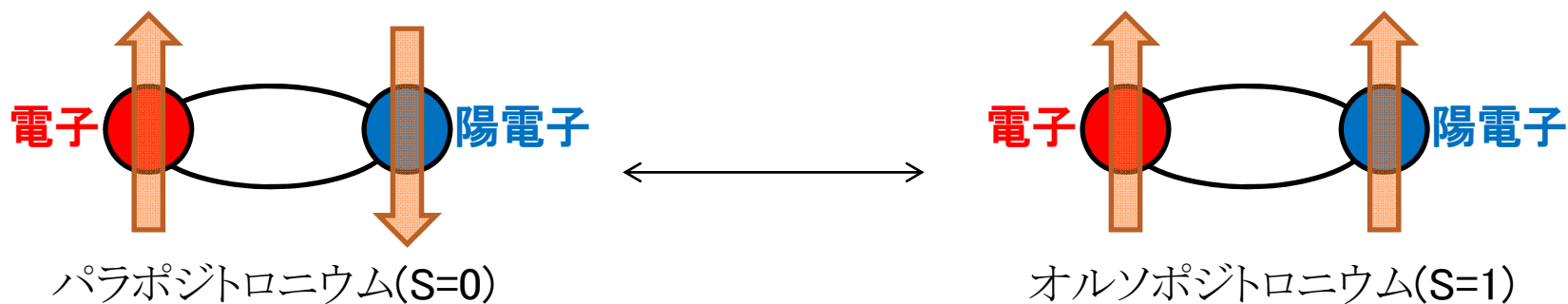
• 寿命が長い(0-Psで142ns程度)



素粒子実験で扱いやすいテーマ



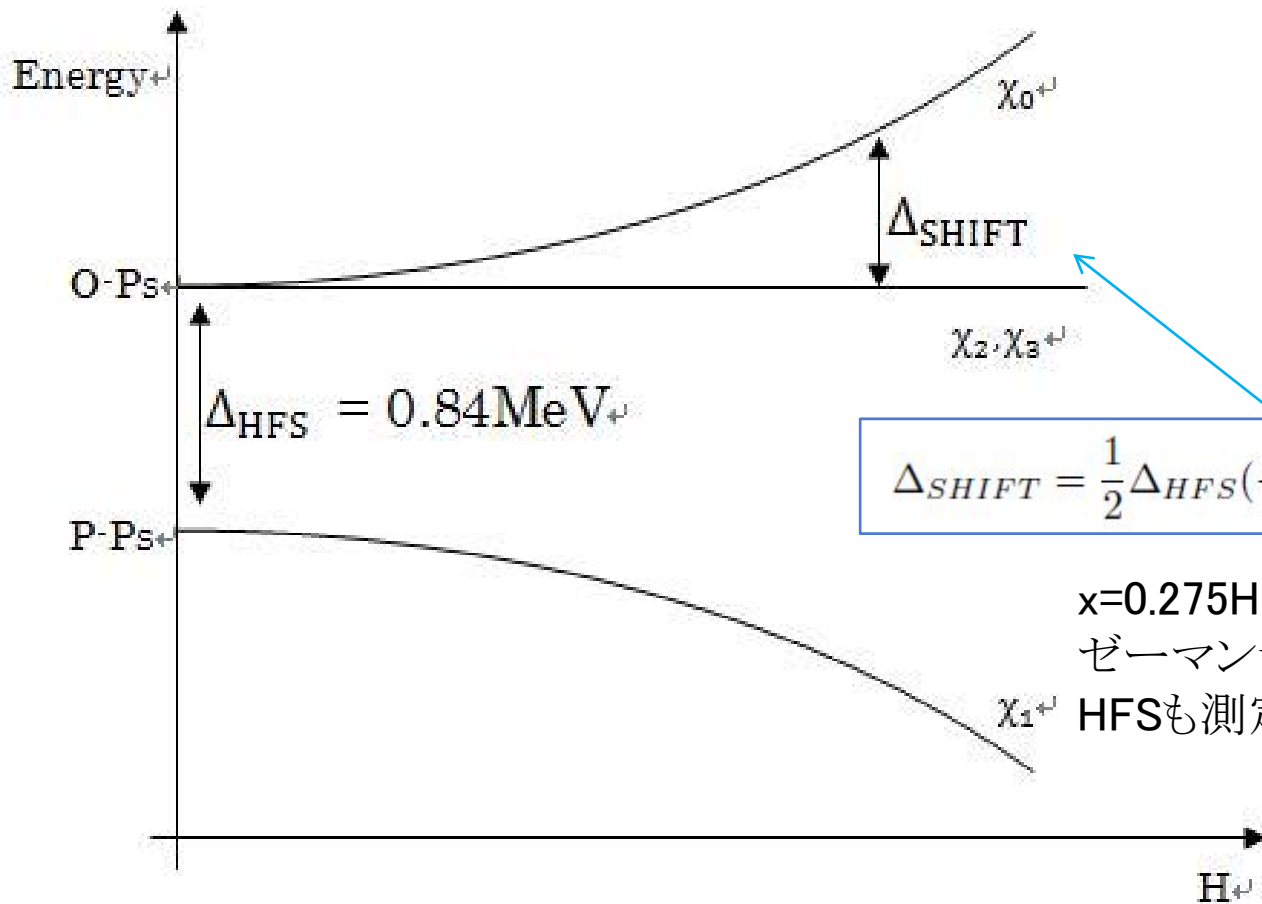
- ポジトロニウムを扱うならば、束縛系特有の超微細構造 (Hyper Fine Structure)を観測してみたい！



これらの状態間のエネルギー差をHyperFineSplittingと呼ぶ
~203GHz(0.84meV)



磁場をかけると...



$$\Delta_{SHIFT} = \frac{1}{2} \Delta_{HFS} (-1 + (1 + x^2)^{\frac{1}{2}})$$

$x=0.275H$ より磁場の強さとゼーマンシフトが測定できればHFSも測定できる。

$x=0.275H$



2. 理論

- オルソポジトロニウムの3 γ decayの全断面積は

$$\sigma \sim (1 + h \sin \Omega t) \exp\left(-\frac{1}{2}(\gamma_1 + \gamma_2)t\right)$$

この時の振動数 Ω とゼーマンシフトは同一である



振動数が測定できればHFSも測定できる。



$$\left\{ \begin{aligned} Y_0 &= \frac{1}{2} \left(1 + \frac{1}{\sqrt{1+x^2}} \right) Y_P + \frac{1}{2} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1+x^2}} \right) Y_0 \\ Y_1 &= \frac{1}{2} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1+x^2}} \right) Y_P + \frac{1}{2} \left(1 + \frac{1}{\sqrt{1+x^2}} \right) Y_0 \\ Y_2 &= Y_3 = Y_0 \end{aligned} \right.$$

↵

$$Y_P = 8 \times 10^9 \text{ [s}^{-1}\text{]} \leftarrow$$

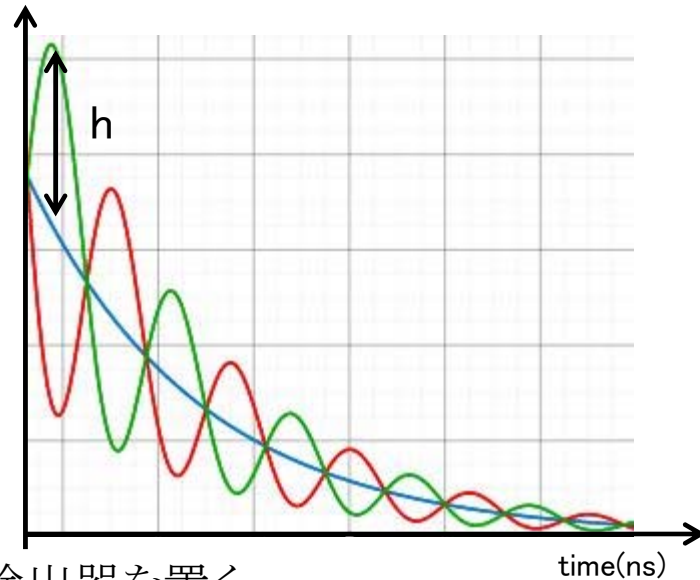
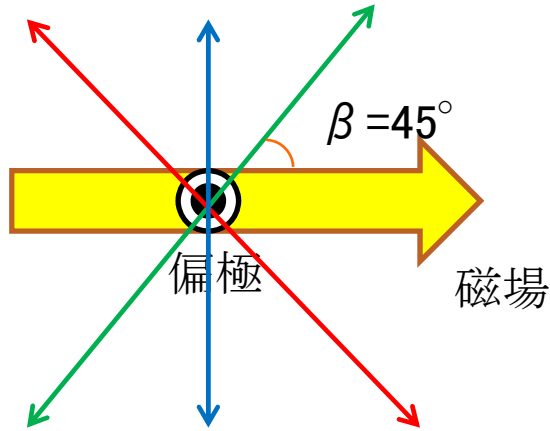
$$Y_0 = 7.04 \times 10^6 \text{ [s}^{-1}\text{]} \leftarrow$$



振動項と非振動項の比は

$$h=0.213P|\sin \theta \sin \alpha \sin 2 \beta |$$

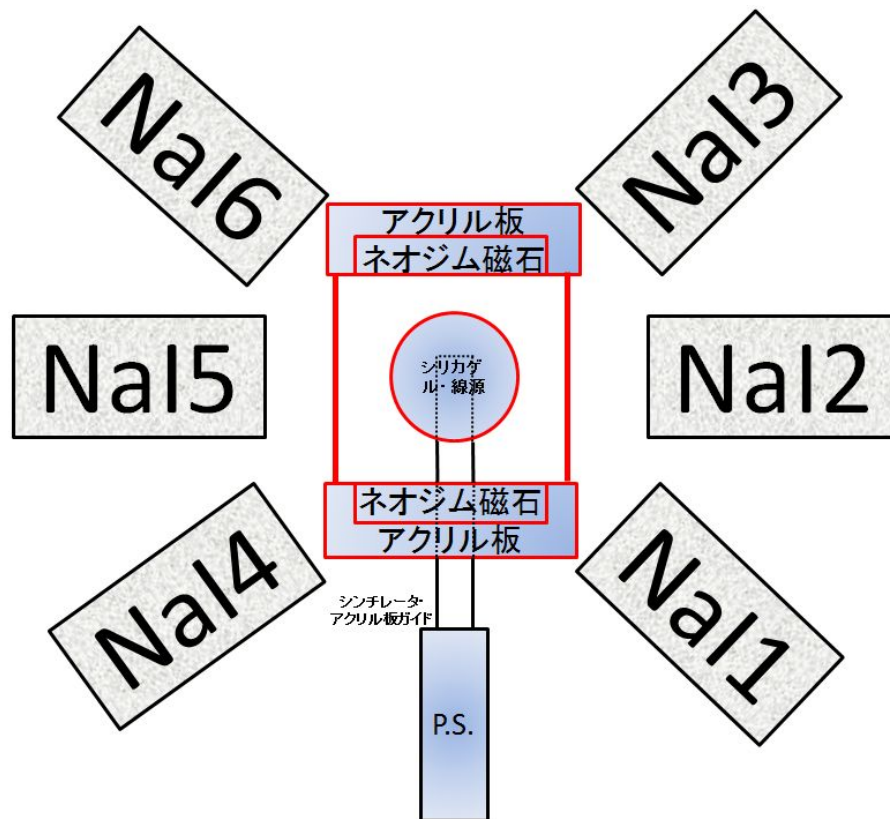
である。ここでP は陽電子の偏極率, θ は磁場に対する偏極の方向,
 α と β は磁場をz方向にとった時の方位角と偏角である。



hが大きいと振動が確認しやすいので
緑と赤の矢印の方向に γ 線検出器を配置
比較の為に振動しない青の矢印方向にも検出器を置く



3. 装置



NaI scintillator × 6

Plastic scintillator (R1398 ASSY)

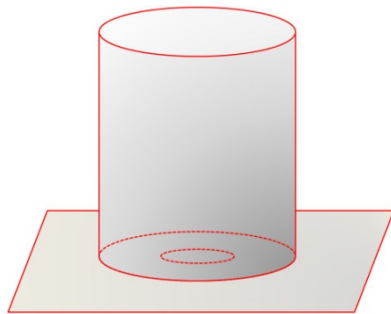
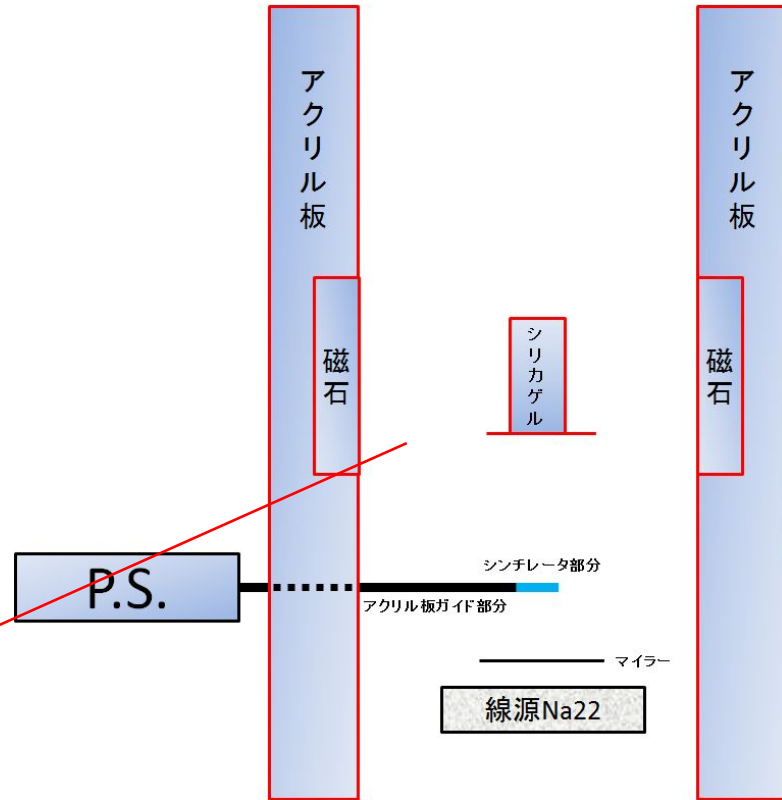
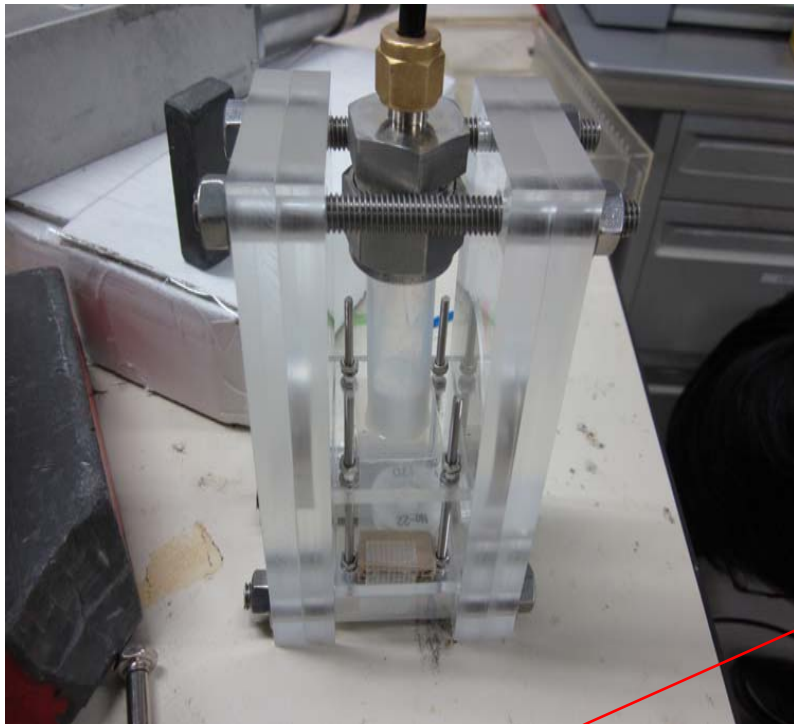
シリカパウダー

NdFeB磁石 $\Phi 50 \times 5\text{mm}$

Na22 (545keV)

Mylar(DuPont ,0.125mm)

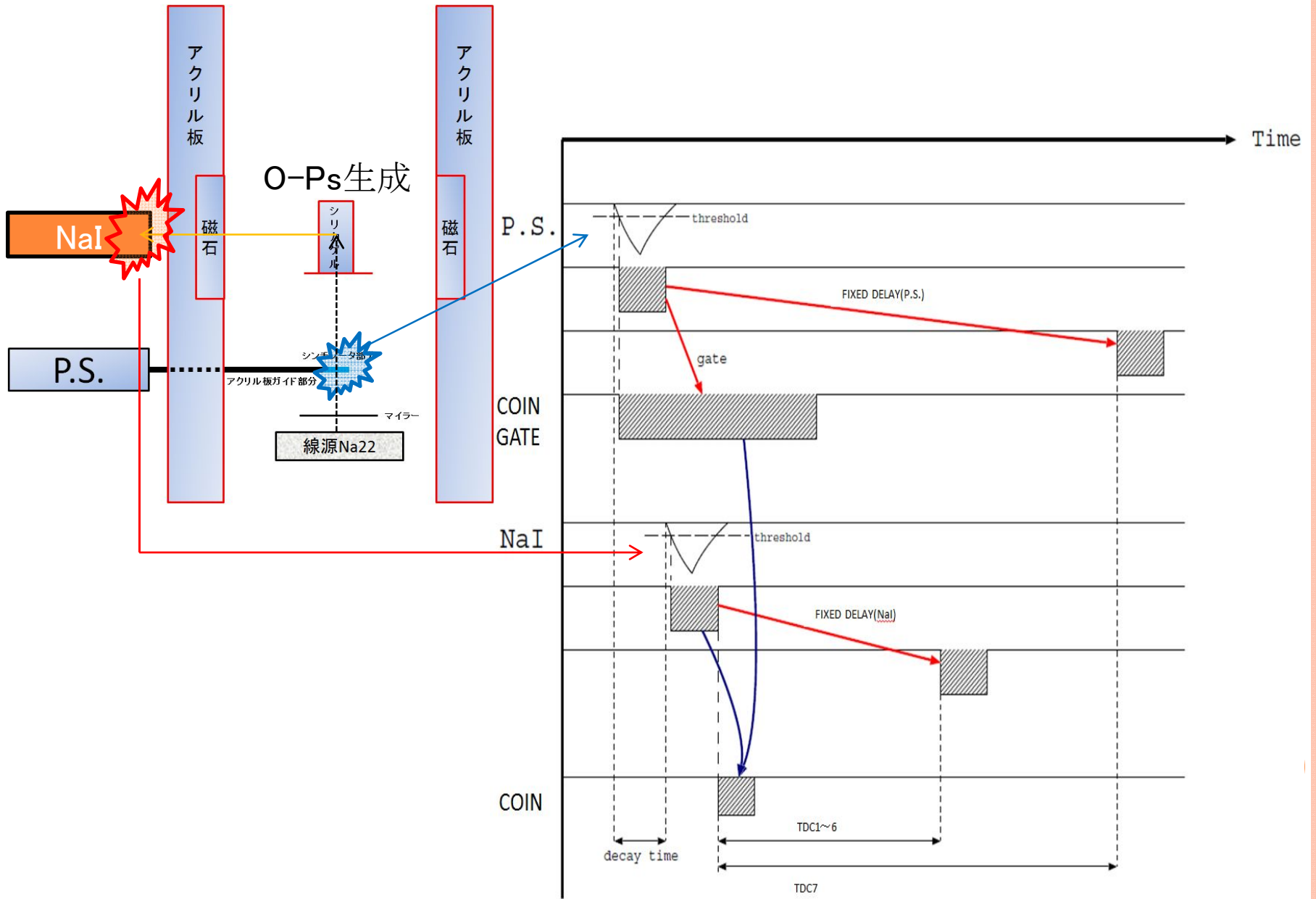




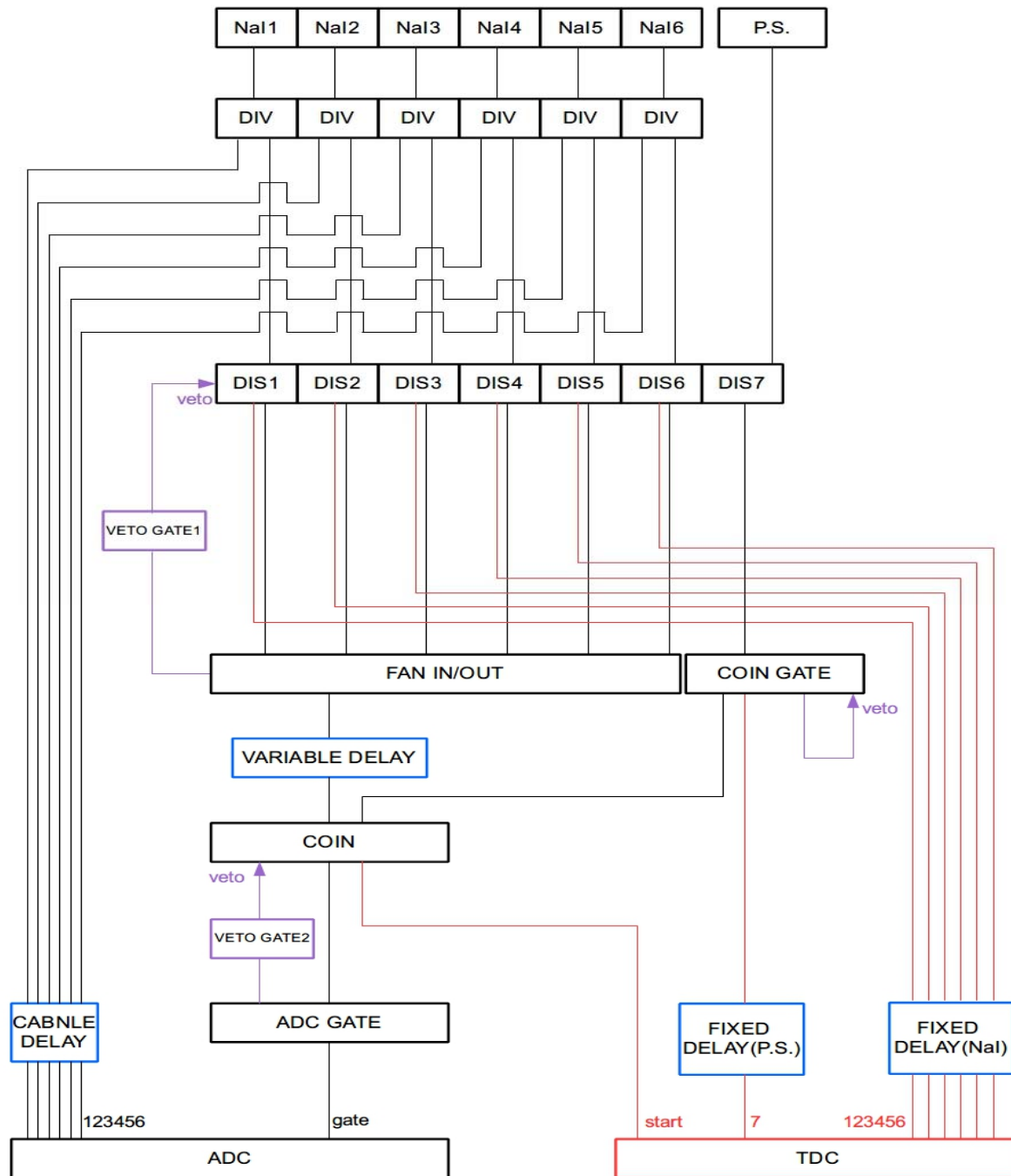
シリカ容器は真空チューブ(3/4inch)を用い、直接真空引きした。
 下から β 線が透過するように窓(mylar)を作っている。



4. 回路



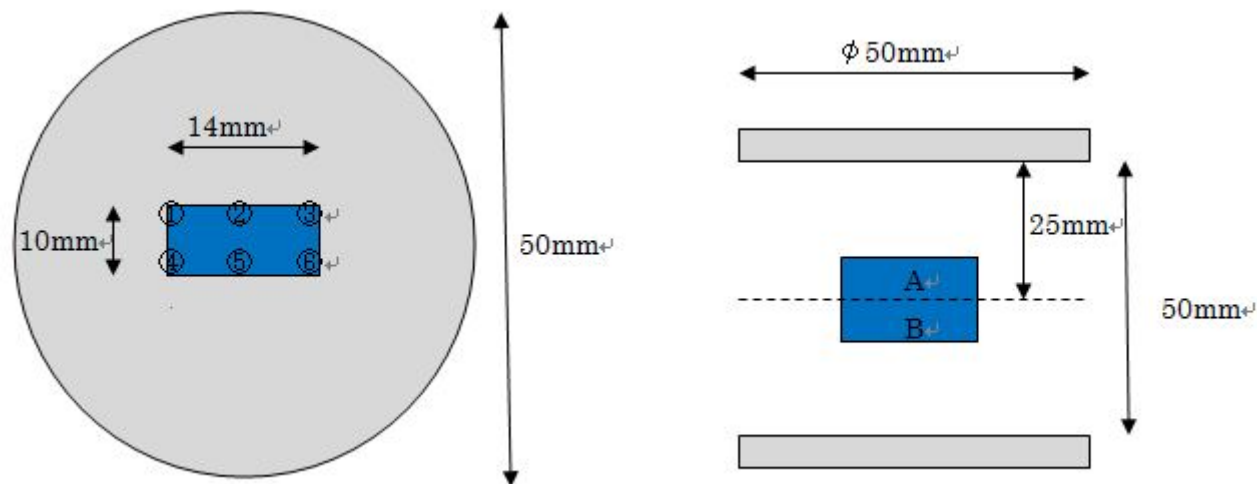
論理回路



4. 予備実験

● 磁場の測定

2012年度P2ではシリカパウダーを一辺20mm立方体の容器に入れたが、本実験では磁場の一様性を高めるために、円柱容器(Φ3/4inch,高さ14mm)に変更した。



上図のA,B領域の①~⑥、計12点で磁場を測定した。
同じ条件で3回測定して、平均値を求めた。

磁場の大きさ $H = 64.9 \pm 1.54 \text{ mT}$

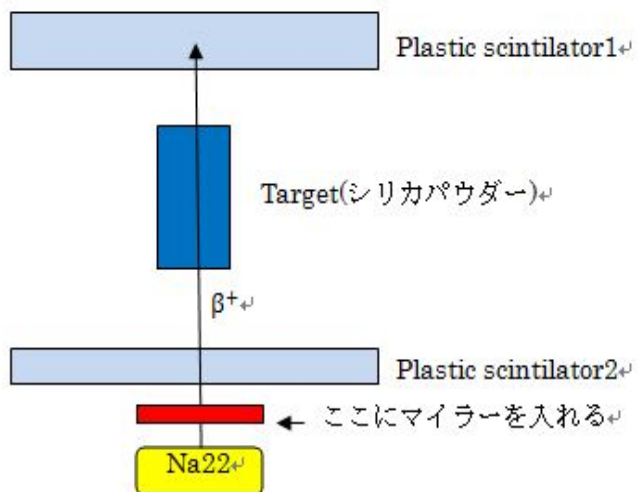


磁場の一様性を上げるためにtargetを小さく。



問題点

- Count rate が減ってしまう
→時間をかけて測定すればよい
- 陽電子がtargetを通過してしまう
→減速材を用いる

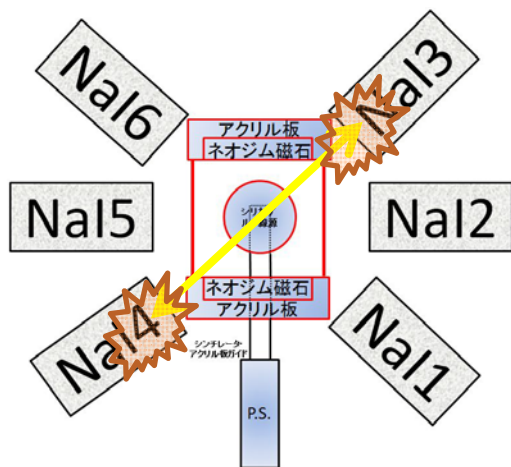
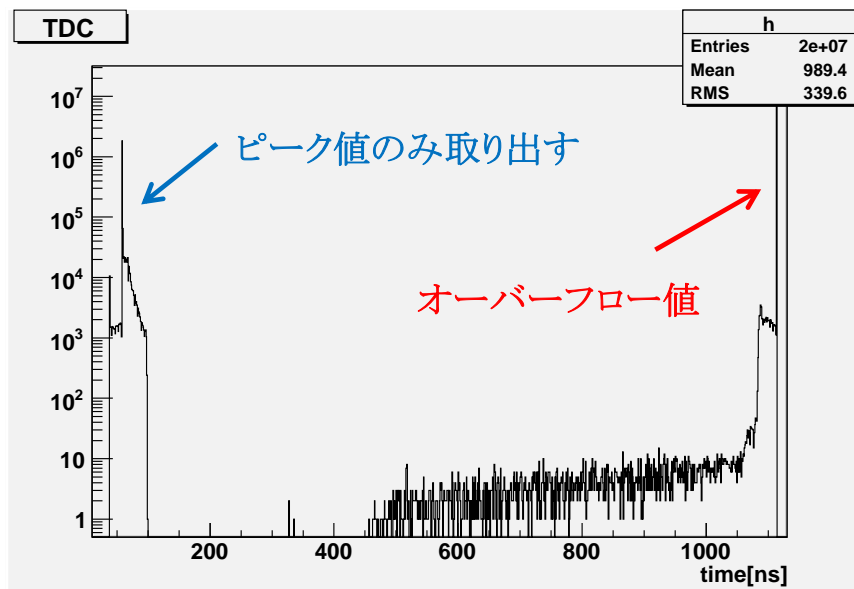
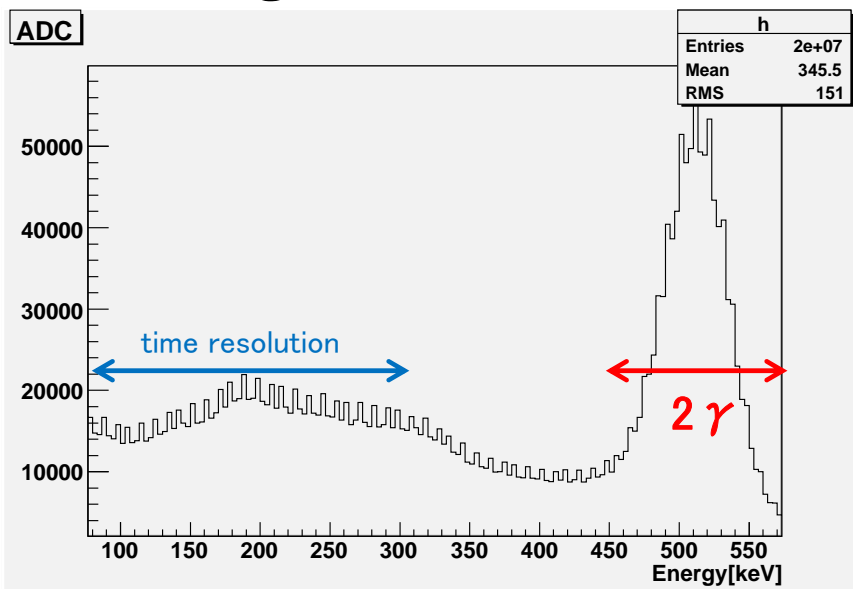


マイラー数	カウント数(10min.あたり)
0	292
1	158
2	150
3	159

減速材はmylar1枚と決めた

5.解析

○ Cutting

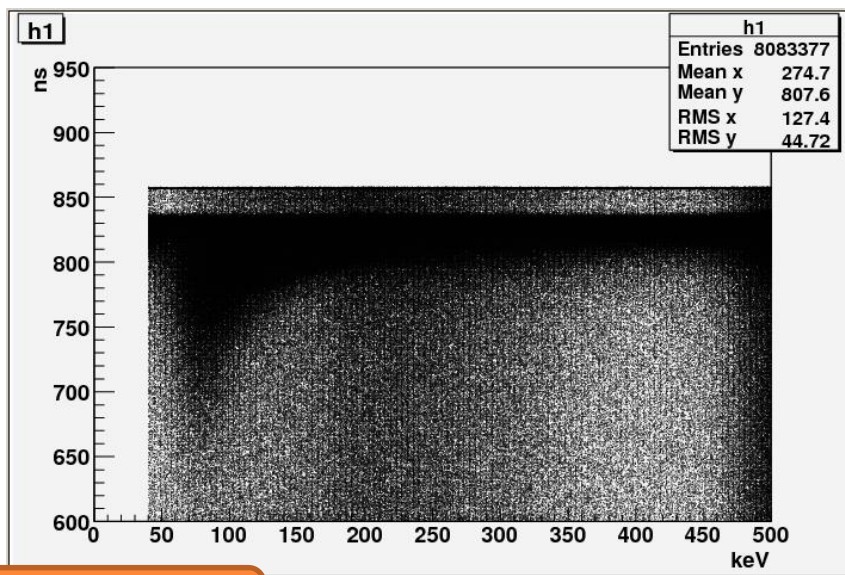
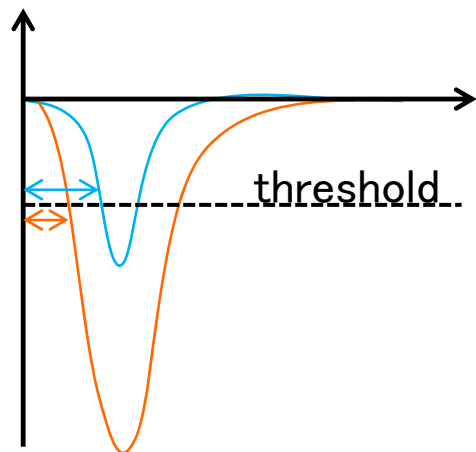


2 γ decayの場合、対角線上のNaIが反応する。
そこでNaIが二つ以上反応したものはCutした



○ t-Q補正

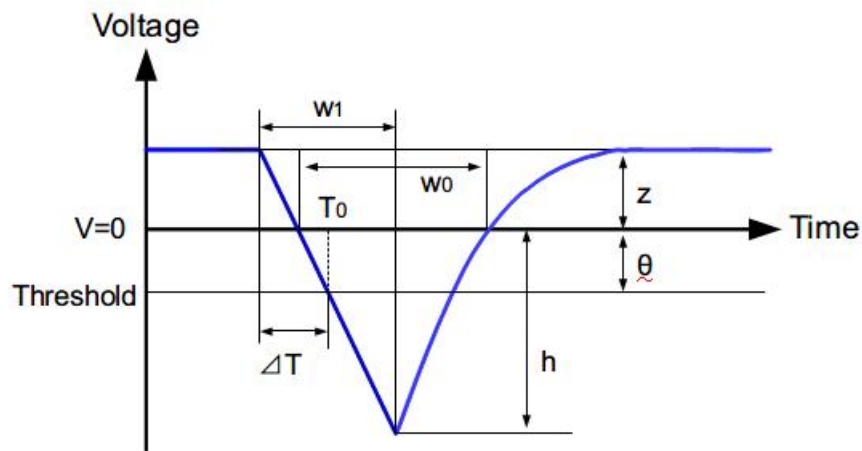
NaIシンチは時間の応答が悪く、**threshold** を超えるのに時間がかかり、その分タイムラグが生じるので補正する必要がある。



タイムラグはエネルギーの大きさに依存

Energy(NaI) × TDC const.

パルスの波形を三角形と近似して、エネルギー依存性を見てみる。

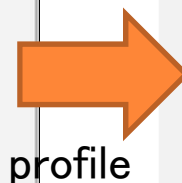
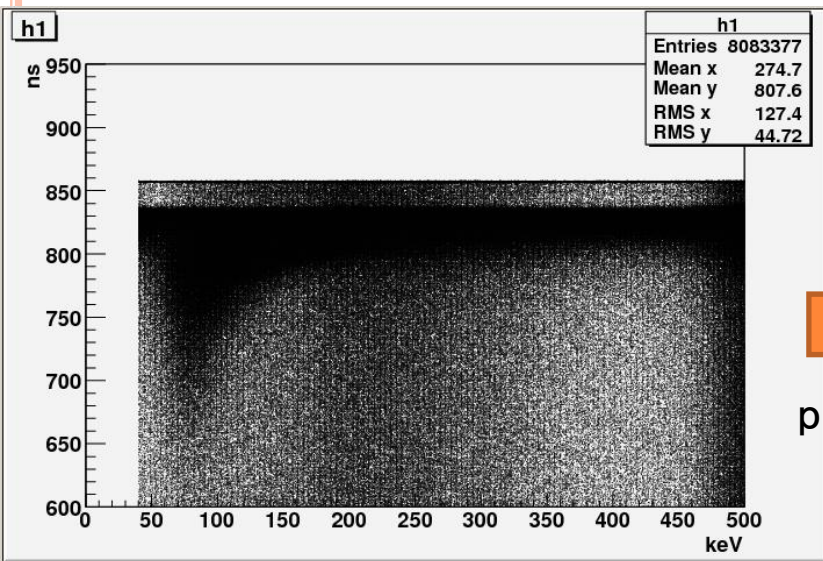


- 波形は三角形と近似
- w1,w0はエネルギー依存しない

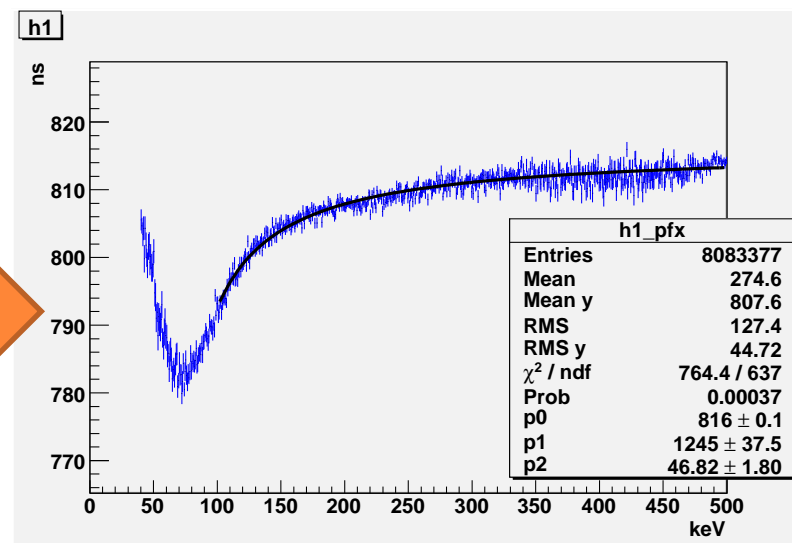


$$\Delta T = a / (E + b)$$

E:ADCによって測定したエネルギー値
a,b:const.



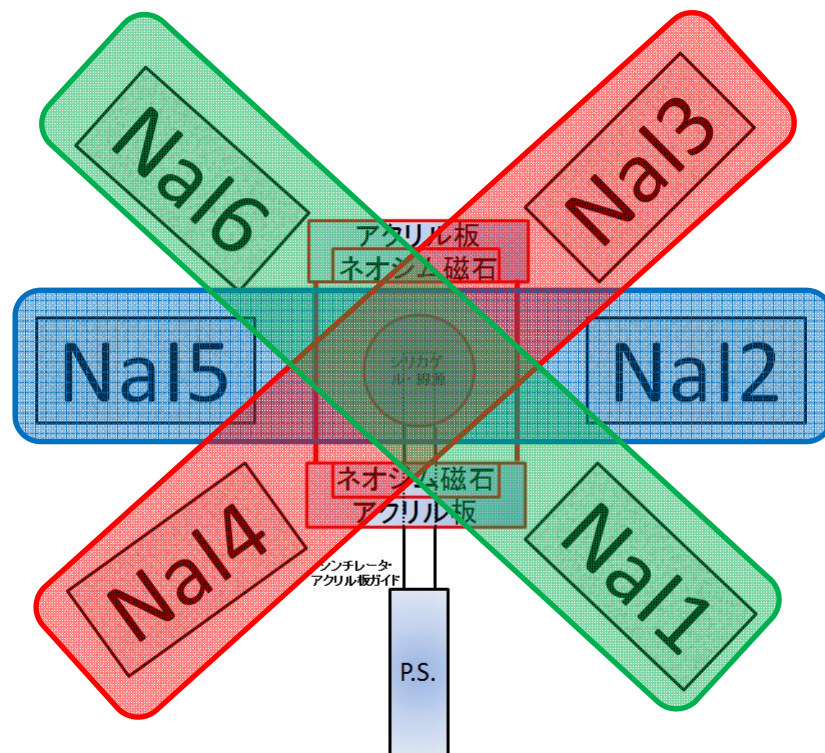
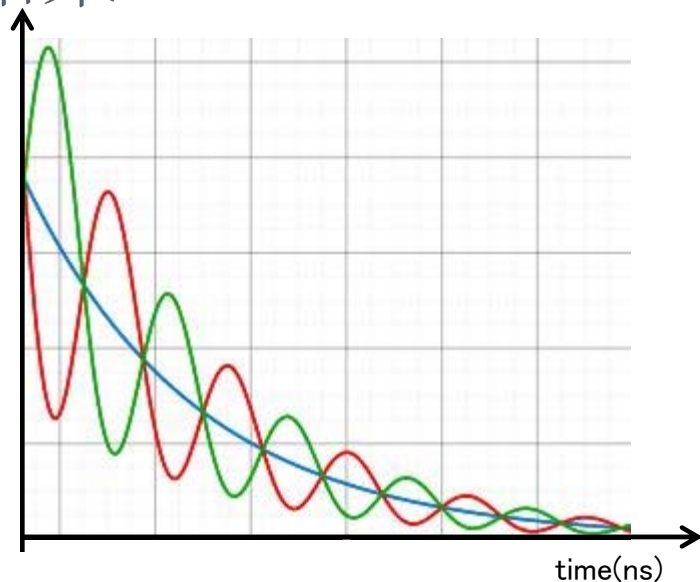
profile



$$a = 1245 \pm 37.5$$

$$b = 48.62 \pm 1.8$$

6.結果



NaI1&NaI6
NaI2&NaI5
NaI3&NaI4

同位相であるので足し合わせる

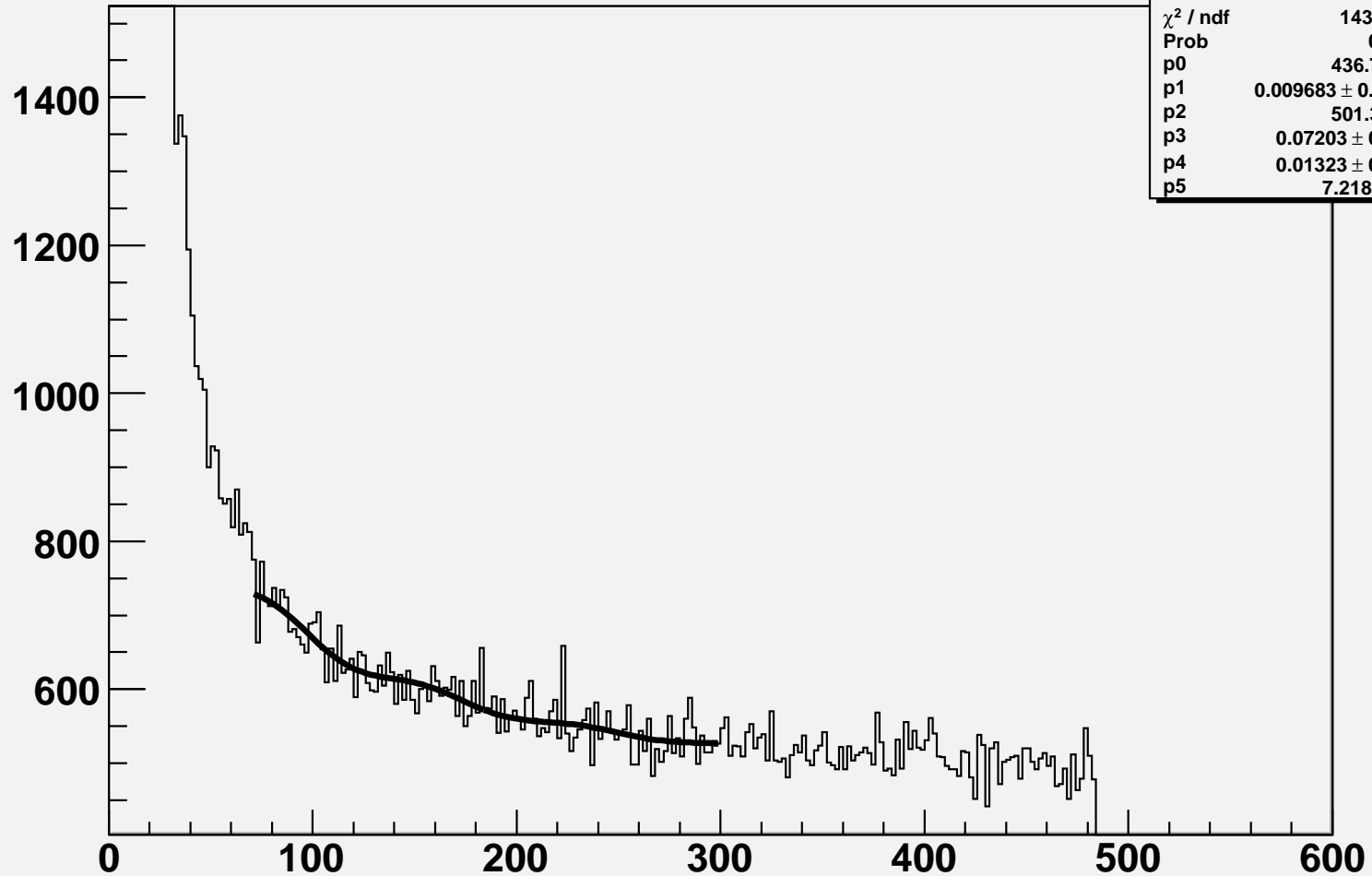
得られたデータに対してfittingを行った

$$y = A(1 + h \sin(2\pi\Omega x + \phi))e^{-\Gamma x} + B$$



NaI1 & NaI6

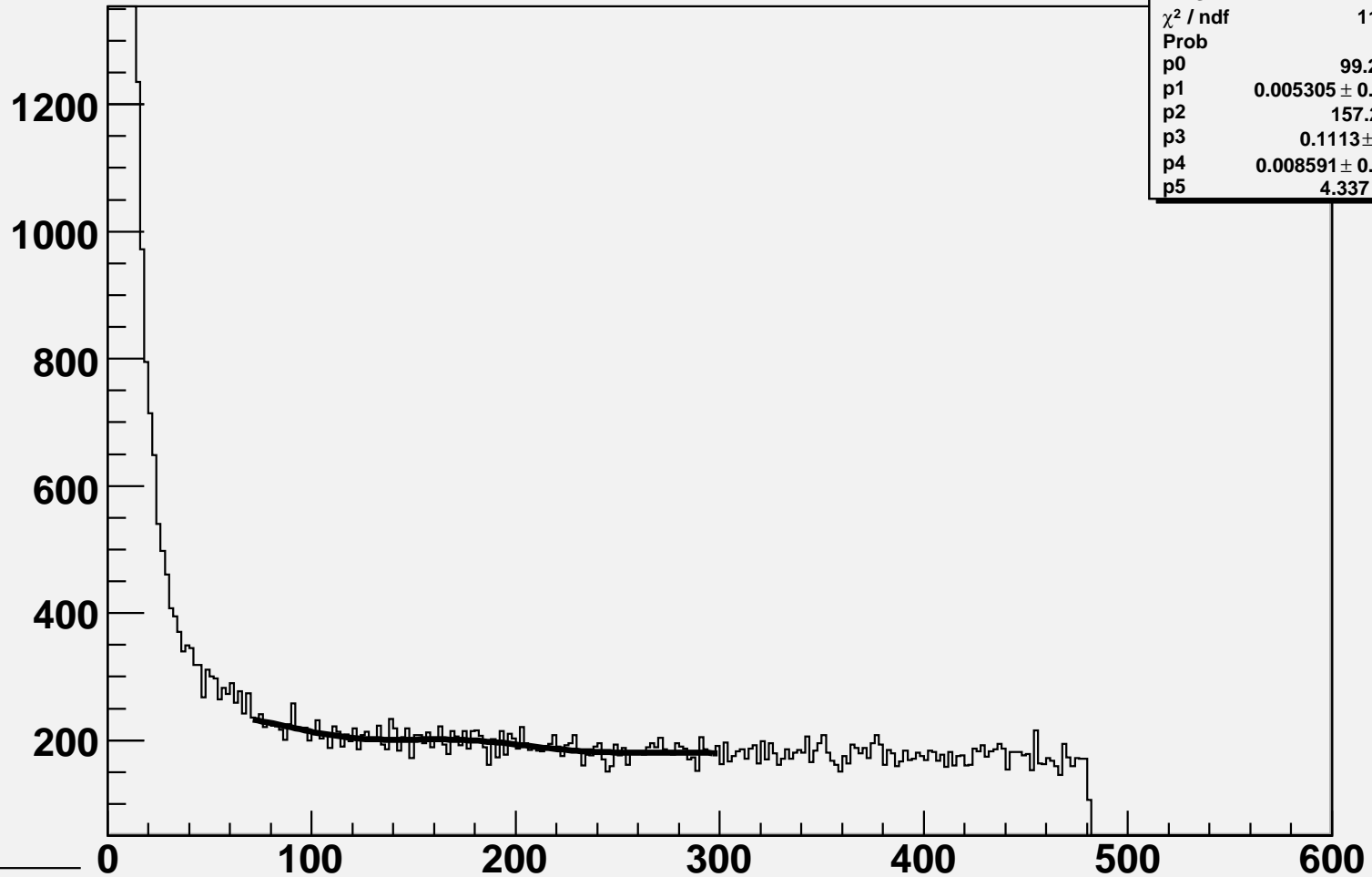
NaI1&6



h5	
Entries	646415
Mean	74.78
RMS	129.5
χ^2 / ndf	143.8 / 109
Prob	0.01439
p0	436.7 \pm 41.9
p1	0.009683 \pm 0.001580
p2	501.3 \pm 13.7
p3	0.07203 \pm 0.03469
p4	0.01323 \pm 0.00140
p5	7.218 \pm 1.141

NaI2 & NaI5

NaI2&5

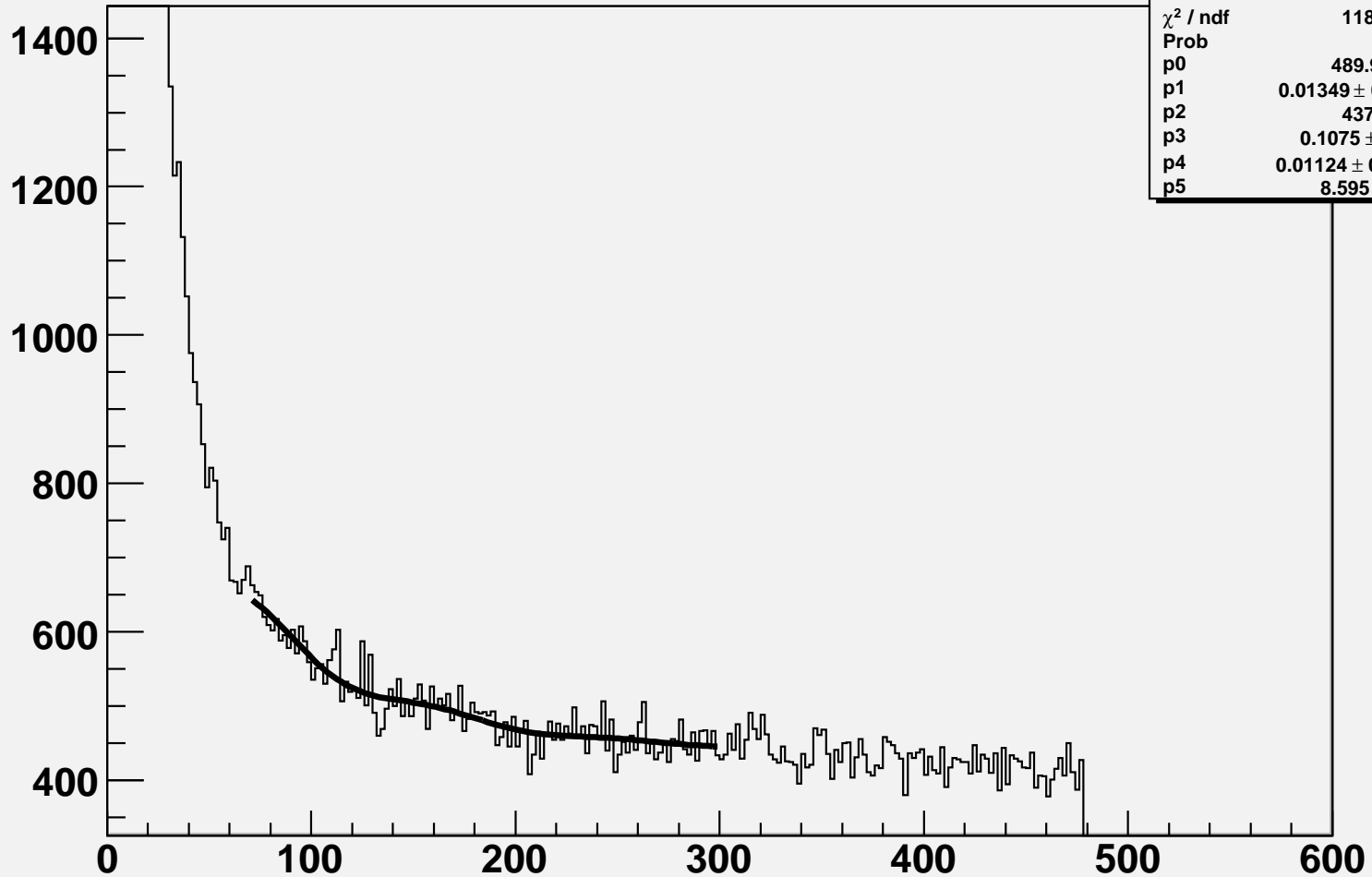


h10

Entries	216399
Mean	72.96
RMS	128.8
χ^2 / ndf	115 / 109
Prob	0.3274
p0	99.2 ± 11.8
p1	0.005305 ± 0.004275
p2	157.2 ± 29.8
p3	0.1113 ± 0.0793
p4	0.008591 ± 0.001392
p5	4.337 ± 1.700

NaI3 & NaI4

NaI3&4



h6	
Entries	584321
Mean	66.09
RMS	122.7
χ^2 / ndf	118.9 / 109
Prob	0.2441
p0	489.9 \pm 80.4
p1	0.01349 \pm 0.00201
p2	437.6 \pm 7.7
p3	0.1075 \pm 0.0501
p4	0.01124 \pm 0.00187
p5	8.595 \pm 1.712

測定値と理論値の比較

$$\Delta_{HFS} \equiv \frac{2\Omega}{\sqrt{1 + (0.275H)^2} - 1}$$



- Fittingにより求めた Ω を代入
- 磁場の大きさは $H=64.9 \pm 1.54\text{mT}$

HyperFineSplittingを測定

理論値: $\Delta_{HFS}=203\text{GHz}$

$$\Gamma \equiv \frac{1}{2}(\gamma_1 + \gamma_2)$$

$H=64.9\text{mT}$ の時、理論値 $\Gamma \sim 0.007297$



NaI pair	Γ (ns ⁻¹)	Ω (ns ⁻¹)	χ^2/ndf
1&6	0.09683 ± 0.001580	0.01323 ± 0.0014	1.319
2&5	0.005305 ± 0.004275	0.008591 ± 0.001392	0.1376
3&4	0.01349 ± 0.00201	0.01124 ± 0.00187	1.091



理論値 $\Gamma \sim 0.007297$



Ω から HFS を算出

NaI pair	HFS (GHz)
1&6	245.9 \pm 14.4
2&5	301.5 \pm 43.4
3&4	230.4 \pm 34.4

理論値 203GHz とは大幅に異なる



7.考察・改善点

HFSが大幅に理論値からずれた原因



磁場の非一様性

磁場の相対誤差は5 %程度であるので、
振動数は10 %程度ぼやけてしまう

限)

・磁石を大きくする

→ γ 線が磁石に当たってしまう(放出角度の制

例えば電磁石を用いる

→ 巨大な電磁石が必要になるので放熱や
電力供給の問題が出てくる。

超伝導磁石があればよい。



8.謝辞

市川さん、黄さん、仲村さん、林野さんには一年間
実験のご指導していただき感謝しております。
本当にありがとうございました。



	first	second	third	mean	sigma
A-1	64.6	63.8	63.6	64	0.529
A-2	67.6	66.4	66.9	67	0.603
A-3	65.1	63.5	64.2	64.3	0.802
A-4	64.7	62.9	64.6	64.1	1.01
A-5	68.2	67.1	67.1	67.5	0.635
A-6	64.7	64.3	64.2	64.4	0.265
B-1	62.7	63.8	63.3	63.3	0.551
B-2	65.9	66.7	65.8	66.1	0.493
B-3	63.3	63.5	62.7	63.2	0.416
B-4	63.3	63	64.2	63.5	0.625
B-5	66.6	66.9	67	66.8	0.208
B-6	64.2	64.5	63.8	64.2	0.351

表 3.1: 磁場測定結果



NaI pair	A	Γ	B		
1 6	436.7±41.9	0.09683±0.001580	501.3±13.7		
2 5	99.2±11.8	0.005305±0.004275	157.2±29.8		
3 4	489.9±80.4	0.01349±0.00201	437.6±7.7		
NaI pair	h	Ω	ϕ	χ^2/ndf	Δ_{HFS}
1 6	0.07203±0.03469	0.01323±0.00140	7.218±1.141	1.319	166.1±19.3
2 5	0.1113±0.0793	0.008591±0.001392	4.337±1.700	0.1376	107.9±18.2
3 4	0.1075±0.0501	0.01124±0.00187	8.595±1.712	1.091	141.2±24.4

表 5.1: fitting 結果及び HFS

