

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
66
67
68
69
70
71
72
73
74
75
76
77
78
79
80
81
82
83
84
85
86
87
88
89
90
91
92
93
94
95
96
97
98
99
100

$(p,p')0^\circ$ 非弾性散乱実験用 Si 検出器の試験

松田 洋平

平成 14 年 4 月 29 日

Contents

1 Introduction	1
1.1 GMRの実験方法	1
1.2 SSDに求められる Resolution	1
1.2.1 Energy Resolution	1
1.2.2 角度分解能 (Time Resolution)	3
2 Specification	4
2.1 Full Depletion Voltage	4
2.2 Energy Resolution	6
2.3 Rise Time	7
2.4 Time Resolution	9
2.5 Dead Layer Thickness	10
3 proton beam を用いた測定	12
3.1 実験方法	12
3.2 Results	13
3.2.1 energy loss の計算	13
3.2.2 Energy Resolution	14
3.2.3 Time Resolution	16
3.3 Conclusion	19
Appendix A	20
実験の再現性	20
Appendix B	22
Target Thickness	22
Appendix C	26
Full Depletion Voltage 測定時の回路 (2.1)	26
Energy Resolution, Dead layer Thickness, Target Thickness 測定時の回路 (2.2, 2.5, Appendix B)	27
proton beam を用いた測定時の回路 (3.2)	28
FNL での実験	29
Dynamitron	29
Chamber	30
謝辞	31

Abstract of the paper by M. Saito, T. Nakamura, and M. Yamamoto, titled 'Measurement of Giant Monopole Resonance in ^{241}Am with a Silicon Detector'. The abstract describes the experimental setup and results for measuring the Giant Monopole Resonance (GMR) in ^{241}Am using a silicon detector. It mentions the use of an alpha source and the detection of the GMR peak at approximately 20 MeV.

abstract

本文は、後で述べる方法で Isoscalar の Giant monopole Resonance (GMR)^{[1],[2]} を測定するために用いる Si 検出器が、要求されるエネルギーと時間に関する分解能に答えているかについて書いてある。

まず、陽子ビームを使って測定を行う前に S4276 の特徴をあらかじめ知っておく必要がある。 ^{241}Am の α 線を用いて S4276 の性能について調べ、その後で実際に陽子ビームから得られた結果とその考察について述べることにする。

最後に Appendix として、実験の再現性、実験で使用した標的、それぞれの測定に対して使用した回路について取り上げる。

実際の実験で用いる Si 検出器は今回使用した Si 検出器 (Hamamatsu S4276) よりも少し表面積 (検出器の静電容量) が大きなものを使用する予定だが、ある程度の目安にはなると考えられる。



1 Introduction

1.1 GMRの実験方法

実験は 核子当たり約数十 [MeV] のエネルギーを持つ中性子過剰ビーム (^{38}S など) と陽子標的を用いた (p,p') 0° 非弾性散乱を用いて行う (Fig.1)。但し、 0° 方向に散乱された低エネルギー陽子は入射ビームと同じ方向のため、その測定は通常の方法では不可能である。そこで散乱された陽子を磁場により 180° 曲げる 180° スペクトロメータを用いることによって測定を行う (Fig.2)。

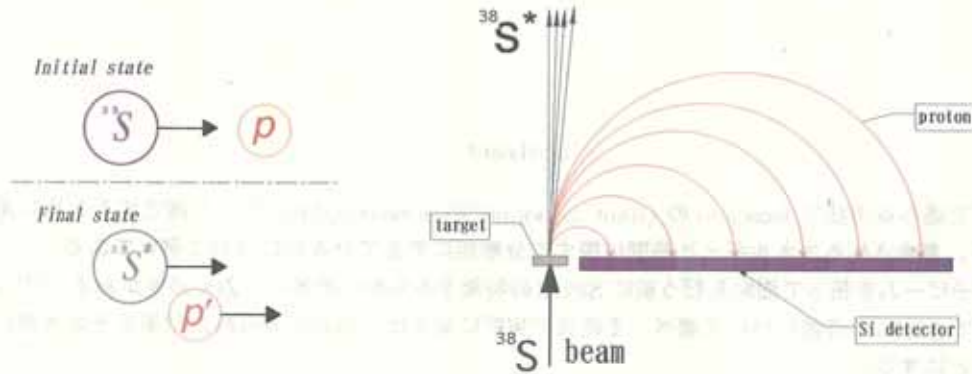


Fig. 1: (p,p') 非弾性散乱

Fig. 2: GMRの測定方法

1.2 SSDに求められる Resolution

Si 検出器での測定量は、陽子の運動エネルギーとその入射角度である。入射角度は陽子が磁場によって円軌道を描くのでその飛行時間から求める事ができる。従って Si 検出器は以下の計算からエネルギー分解能 30[keV]、時間分解能 2[nsec] 程度が要求されることになる。

1.2.1 Energy Resolution

散乱される陽子の運動エネルギーは実験室系において古典的に考えると

$$t_p = \frac{E_x^2}{\hat{t}_1 \cos^2 \theta \left(2 - \frac{A-1}{2A} \frac{E_x}{\hat{t}_1 \cos^2 \theta} \right)^2} \quad (1)$$

- t_p : 散乱陽子の運動エネルギー
- E_x : 入射粒子の励起エネルギー
- \hat{t}_1 : 入射粒子の核子当たりの運動エネルギー
- θ : 散乱角度 (Lab)
- A : 入射粒子の核子数

と近似的に求まる (Fig.3)。よって励起エネルギー分解能は

$$\frac{dE_x}{E_x} \simeq \frac{1}{2 - \frac{A+1}{4A} \frac{E_x}{\hat{t}_1}} \frac{dt_p}{t_p} \quad (2)$$

となる (Fig.4)。

様々な核種に対する GMR の測定結果から ^{38}S の GMR 励起エネルギーは $15 \pm 10[\text{MeV}]$ と予想される。そのエネルギー範囲において 0° 方向に散乱される陽子のエネルギー t_p は、式 (1) より $5[\text{MeV}]$ 以下である。必要な GMR 励起エネルギーの分解能を $\frac{\sigma(E_x)}{E_x} \simeq 10\%$ と考えた場合、Fig.4 より散乱陽子に対して $\sigma(t_p)_E \simeq 30[\text{keV}]$ と見積もることができる。

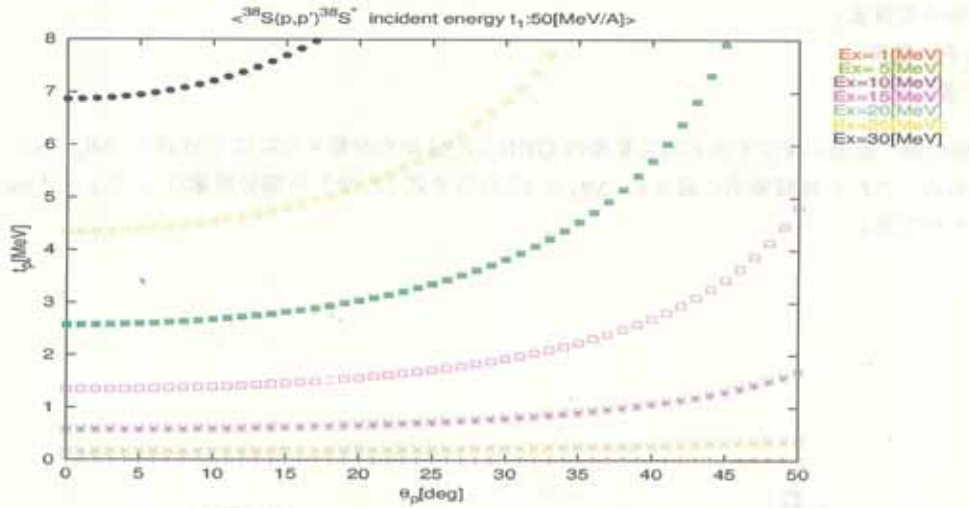


Fig. 3: 散乱角度に対する陽子のエネルギー変化

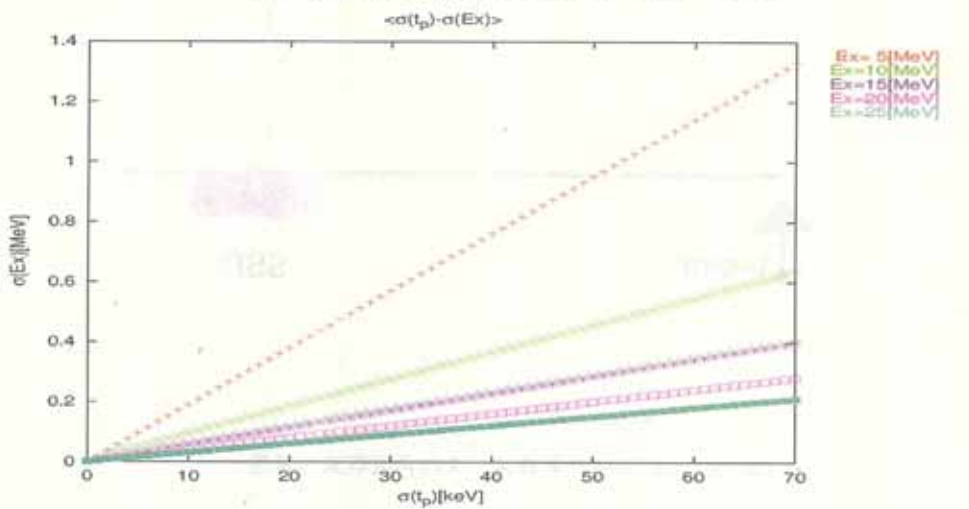


Fig. 4: エネルギー分解能の関係

1.2.2 角度分解能 (Time Resolution)

180° スペクトロメータは角度取束の特性を持っている (Fig.5)。0° 方向に散乱された陽子と $\Delta\theta_p$ 方向に散乱された陽子は焦点面上のほぼ同じ位置へ到達する。その時の飛行経路差を ΔL 、飛行時間差を ΔT_p とすると

$$\Delta T_p = \frac{2m_p}{qB} \Delta\theta_p \quad (3)$$

- m_p : 陽子の質量
- q : 陽子の電荷
- B : 磁場

である。測定の際、急激に減少する GMR を他の GDR/GQR から分離するには CM 系で $\Delta\theta_{p,CM} \simeq 1^\circ$ 程度は必要である。これを実験室系に直すと $\Delta\theta_p \simeq 5^\circ$ なので式 (3) から時間分解能は $\sigma(T_p) \simeq 2$ [nsec] と見積もることができる。

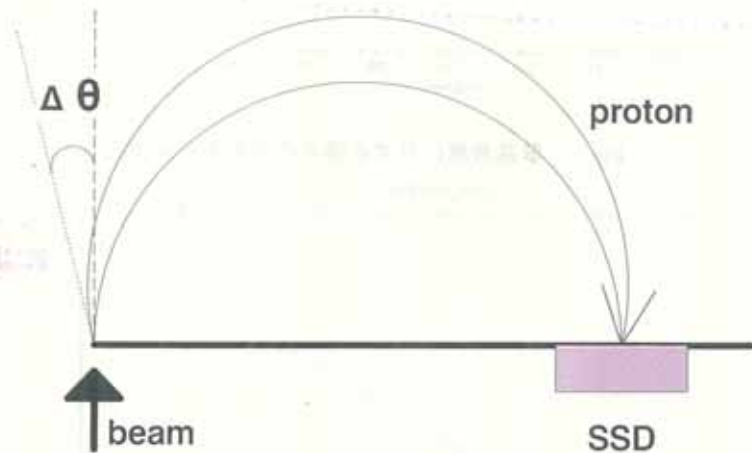


Fig. 5: 180° スペクトロメータの角度取束の特性

2 Specification

今回の実験で使用した Si 検出器 Hamamatsu S4276-02 の性能 (カタログ値@25 °C) を Tab.1 に載せる。また、S4276 の略図を Fig.6,7 に載せた。実際にこの S4276 を陽子ビームを用いて試験を行う前に、あらかじめその性能を知り使用可能か等見ておく必要がある。この章では ^{241}Am の α 線源を用いて S4276 の性能を調べる。

Tab. 1: Specification

Parameter	Value	Unit
Active Area	48 × 48	mm
Thickness	325 ± 15	μ m
Uniform Thickness	5.0	μ m
Surface Orientation	(1 1 1)	—
Dead layer ¹ (Front Side) (Rear Side)	1.5	μ m
	20	μ m
Full Depletion Voltage Max	100	V
Dark Current Typ. Max	30	nA
	100	nA
Rise Time ²	100	ns
Terminal Capacitance ³	860	pF

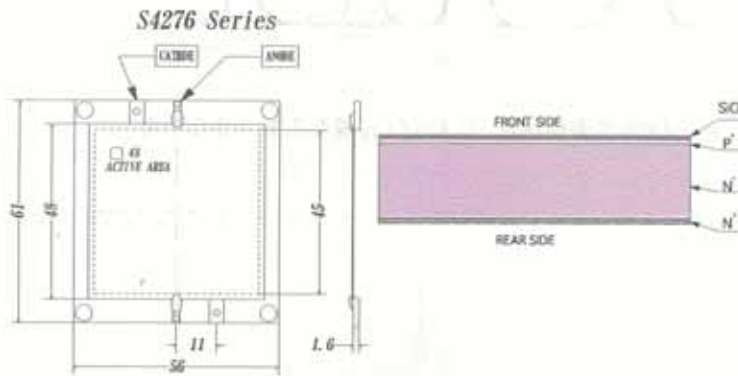


Fig. 6: S4276

Fig. 7: S4276

2.1 Full Depletion Voltage

半導体検出器は PN 接合の両側に電荷が蓄積されるので空乏層領域はコンデンサーとなる。プレナ型検出器の場合、単位面積当たりの静電容量は

$$C = \frac{\epsilon}{d} \cong \left[\frac{eeN}{2V} \right]^{1/2} \quad (4)$$

- ϵ : 真空の誘電率
- d : 空乏層領域の全幅
- N : ドーパント濃度 (接合の低ドーパント濃度側)
- V : 逆バイアス電圧

で与えられる [3]。従って検出器を全空乏層化させるに至るまで高い電圧をかけて測定すればこの静電容量を減らせ、より大きな信号を得ることが出来る。つまりエネルギー分解能が良くなる。

また、高い印加電圧をかける事により電荷収集にかかる時間が短くなるので、時間分解能もまた良くなる。

そこで、印加電圧と信号の関係を見てみる。 ^{241}Am の α 線をS4276の表側、裏側から入射させた時の印加電圧に対するエネルギースペクトルはFig.8,9のようになる。空乏層が大きくなればより大きな信号と良い分解能が得られることがわかる。裏側から入射した場合、裏側の不感層の厚さがスペクトルに広がりを持たせ、また表側より大きくエネルギーを失うことで低いピーク位置になる事もわかる。

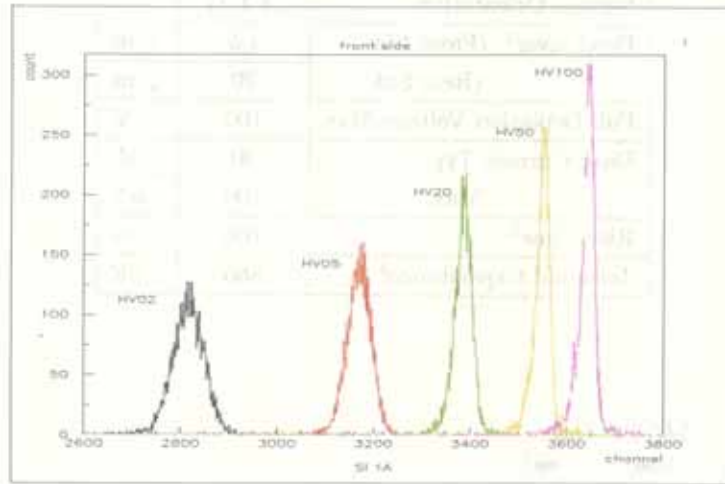


Fig. 8: S4276の表側から ^{241}Am の α 線を入射させた場合

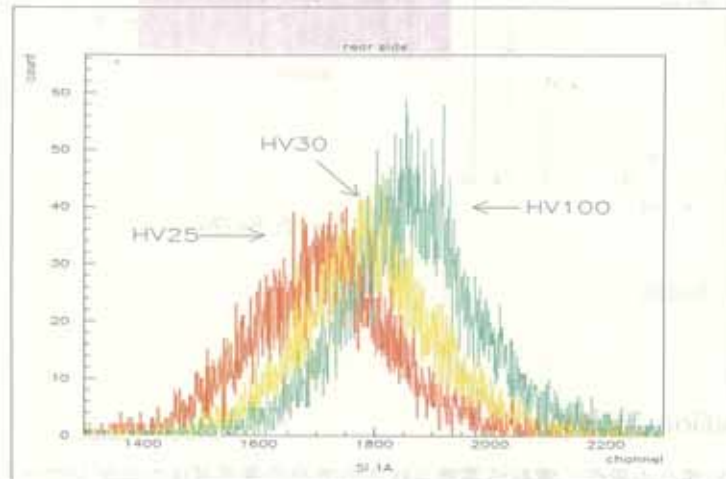


Fig. 9: S4276の裏側から ^{241}Am の α 線を入射させた場合

次にこれらのデータから横軸に印加電圧、縦軸に ^{241}Am の α の5.486[MeV]のピーク位置をとったグラフを作った (Fig.10,11)。

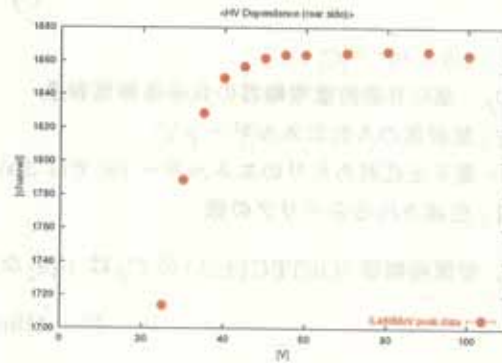
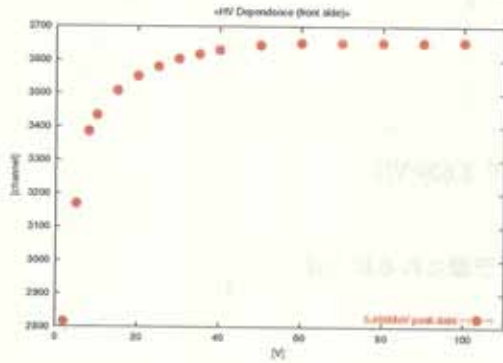


Fig. 10: S4276の表側から ^{241}Am の α 線を入射させた場合 Fig. 11: S4276の裏側から ^{241}Am の α 線を入射させた場合

全空乏層化 (検出器の裏側まで空乏層化) していれば生成されたキャリアは捕獲や再結合など起こさずほとんど全て収集されるので、全空乏層化電圧を知るには裏側から入射した時の Fig.11 を見れば良い。Fig.11 より全空乏層化電圧は 60[V] 程度である。

裏側のデータが印加電圧 20[V] 以下に対して無いのは前置増幅器の信号の立ち上がり時間が 10[μsec] 以上あったため、増幅器での出力が完全なものにならなかったためである。全空乏層化電圧以上では立ち上がり時間はほぼ一定で百数十 [nsec] であった。従って全空乏層化してしまえばそれ以上高い電圧をかけても時間分解能に大きな変化を与えないと考えられる。

2.2 Energy Resolution

エネルギー分解能はキャリアの数 N で与えられ

$$\frac{\sigma}{E} = \frac{1}{\sqrt{N}} \quad (5)$$

である [3]。これより ^{241}Am の α 線 5.486[MeV] では $\sigma = 4.5[\text{keV}]$ となるが、Fig.12,13 より実際に得られた分解能は 5.486[MeV] で $\sigma \approx 13[\text{keV}]$ であった。パルサーを前置増幅器につないでとったデータから回路の雑音は $\sigma_{no} \approx 10\text{keV}$ であったので、分解能を悪くしている要因は主に回路の雑音である。

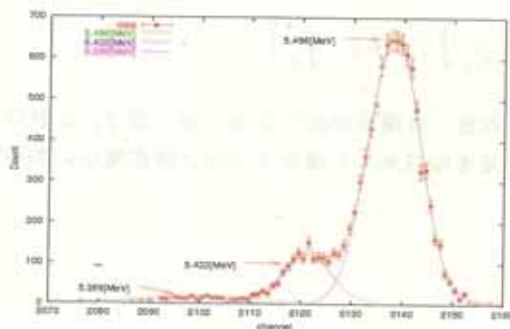


Fig. 12: ^{241}Am の α 線 linear scale

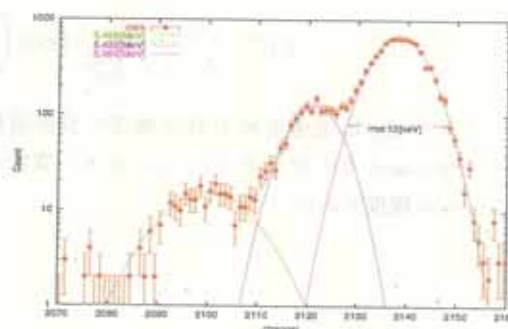


Fig. 13: ^{241}Am の α 線 log scale

理想的な電荷有感型前置増幅器から得られる出力電圧 V は

$$V = \frac{Nq}{C_f}, N = \frac{E}{\epsilon} \quad (6)$$

- q : $1.6 \times 10^{-19}[\text{C}]$
- C_f : 電荷有感前置増幅器の負帰還静電容量
- E : 放射線の入射エネルギー [eV]
- ϵ : 電子正孔対あたりのエネルギー (Siでは 300[K]で 3.62[eV])
- N : 生成されるキャリアの数

である。前置増幅器 (ORTEC142A) の C_f は 1[μf] なので予想される出力は

$$V = 44[\text{mV/MeV}]$$

であるが、実際の出力は

$$V \approx 30[\text{mV/MeV}]$$

であった。これは外部からの影響で C_f に蓄えられる電荷の一部を別の場所に持って行かれることが原因である。従ってこの浮遊容量を減らす事が出来れば S/N 比が改善され分解能が上がる。

2.3 Rise Time

時間測定をおこなう場合、使用している検出器の立ち上がり時間を予め見ておく必要がある。まず、立ち上がり時間がどのくらいになるか計算してみる。

逆バイアス電圧 100[V] において α 線 (5.486[MeV]) から出来た電子正孔対は時間変化に対して Fig.14 のような形で収集されると考えられる。但し、表面の不感層はないとして、Si 中で α 線は 10 個の電子正孔対を一ヶ所で作りながらエネルギー (36.2eV) を失い、最終的には入射した所から約 27.35[μm] の位置で止まると仮定してある。

収集される電荷 $Q(t)$ は最終的に

$$Q = IT_D = \int_0^{\infty} I \exp\left(-\frac{t}{T_D}\right) dt \quad (7)$$

T_D : 電流 Ie^{-t/T_D} 流れるとした時の減衰定数

だけ集り、前置増幅器からの出力は

$$E(t) = \frac{Q}{C_f} \frac{1}{1 - \frac{T_D}{R_f C_f}} \left(\exp\left(-\frac{t}{R_f C_f}\right) - \exp\left(-\frac{t}{T_D}\right) \right) \quad (8)$$

となる [4]。 C_f, R_f は電荷有感前置増幅器の負帰還静電容量、負帰還抵抗である。様々な T_D における $R_f C_f = 10^6[\text{nsec}]$ での出力を Fig.15 に示す。実際の前置増幅器からの波形は全空乏層化電圧において $T_D = 50[\text{nsec}]$ 程度である。

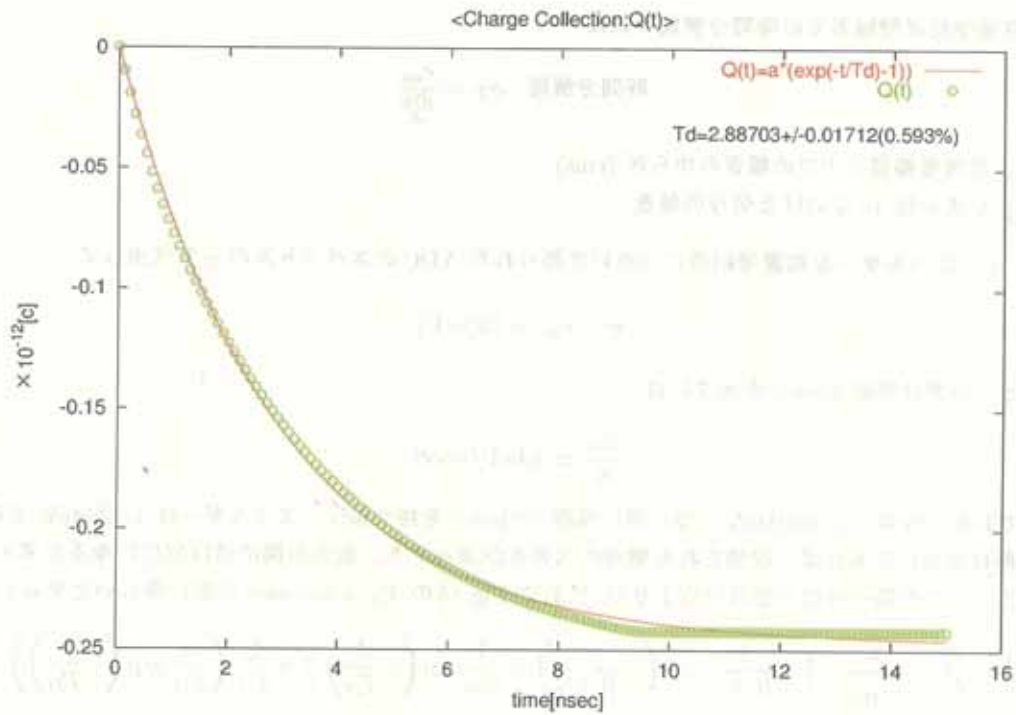


Fig. 14: $Q(t)$ の変化 : 丸が計算値、実線は関数 $Q(t)$ でフィットしたもの

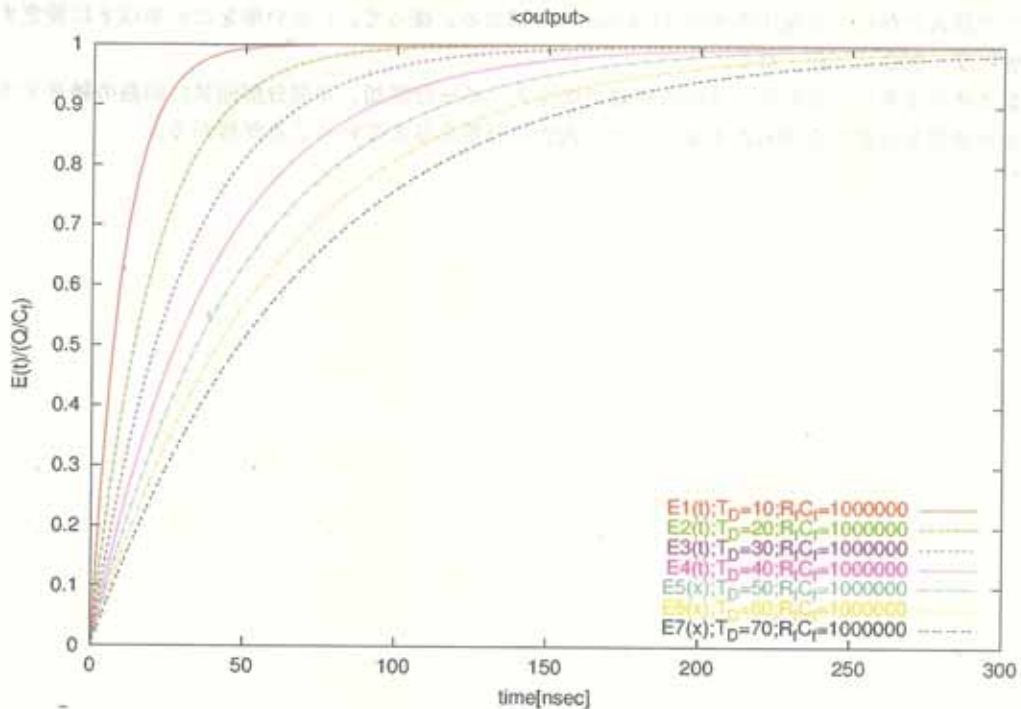


Fig. 15: 様々な T_D における Rise Time の違い

2.4 Time Resolution

電荷有感型前置増幅器での時間分解能の式は

$$\text{時間分解能} : \sigma_T = \frac{e_{no}}{\frac{dV_0}{dt}} \quad (9)$$

- e_{no} : 前置増幅器出力での雑音のゆらぎ (rms)
- $\frac{dV_0}{dt}$: しきい値 V_0 における信号の傾き

である。 e_{no} はパルサーを前置増幅器につないで得られた ADC のスペクトルの σ を代用して

$$\sigma = e_{no} \simeq 10[\text{keV}]$$

とすると、時間分解能 2[nsec] を出すには

$$\frac{dV_0}{dt} \simeq 5[\text{keV/nsec}]$$

が必要である。Si 中で 5.486[MeV] α 線と同じ飛程 (27[μm]) を持つ陽子のエネルギーは 1.42[MeV] である。Si 中の飛程が同じであれば、収集される電荷の大きさが違っても、収集時間はほぼ同じになると考えられる。そこで、この陽子の出力信号の立上りが (2.3) の Fig.15 の $T_D = 50[\text{nsec}]$ の形に等しいとすると

$$\frac{dE(t)}{dt} = \frac{Q}{C_f} \frac{1}{1 - \frac{T_D}{R_f C_f}} \left(-\frac{1}{R_f C_f} \exp\left(-\frac{t}{R_f C_f}\right) + \frac{1}{T_D} \exp\left(-\frac{t}{T_D}\right) \right) \simeq \frac{Q}{C_f} \left(\frac{1}{T_D} \exp\left(-\frac{t}{T_D}\right) \right) \quad (10)$$

これより 1.42[MeV] の陽子に対して $t \simeq 87[\text{nsec}]$ と求まる。この時間 t における出力電圧は Fig.15 より出力の最大値の 80% 程度である。(2.2) で述べたように出力電圧 $V \simeq 30[\text{mV/MeV}]$ なので 1.42[MeV] の陽子に対して最大となる出力電圧の 80% は 34[mV] と求まる。従って、しきい値をこの値以下に設定することができれば、測定は可能となる。

これまで述べて来たことから、今回の実験ではエネルギー分解能、時間分解能共に回路の雑音を小さくすることが必要な分解能を得られるかどうか大きな影響を与えていることが解かる。



2.5 Dead Layer Thickness

Si 検出器の不感層の厚さは次の様にして測ることができる。Si 検出器に対して垂直に α 線が入ったとき、不感層の厚さを t とすると、そこでのエネルギー損失 ΔE_0 は

$$\Delta E_0 = \frac{dE_0}{dx} t \quad (11)$$

なので (エネルギー損失は一定であるとして)、角度 θ だけ傾けたときのエネルギー損失 $\Delta E(\theta)$ は

$$\Delta E(\theta) = \frac{\Delta E_0}{\cos \theta} \quad (12)$$

となる。従って入射エネルギー E の α 線が θ の方向から入ったときに検出されるエネルギー E' は

$$E' = E - \Delta E_0 \frac{1}{\cos \theta} \quad (13)$$

となる [3]。この関係式より Si 検出器の不感層の厚さを求める。

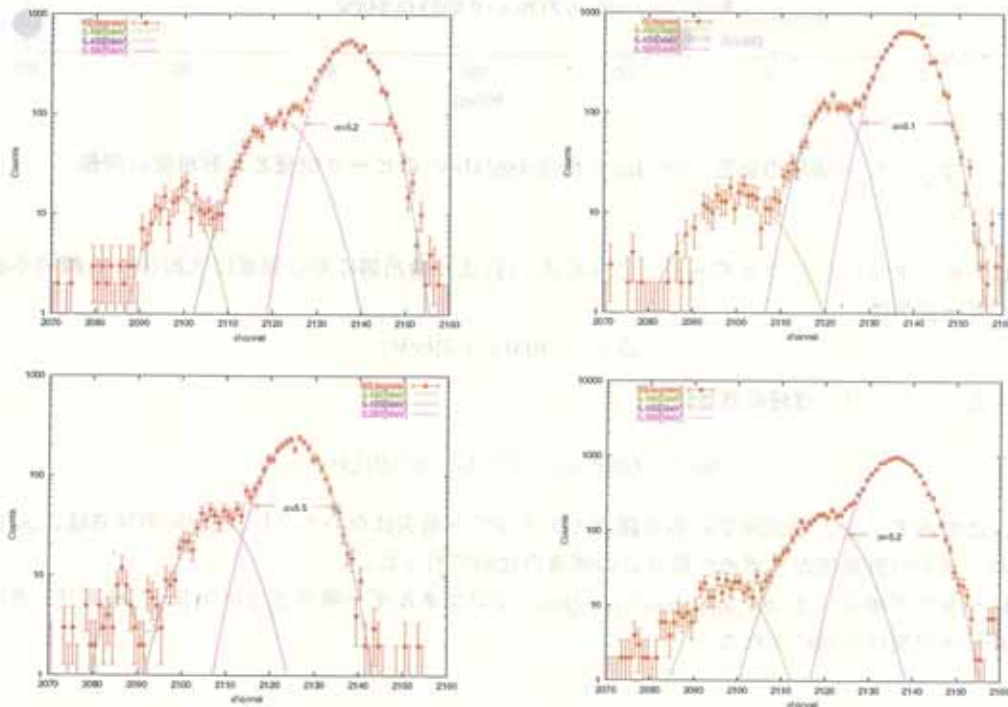


Fig. 16: α -spectrum ^{241}Am : 左上 45° 左下 60° 右上 0° 右下 30°

α 線の入射角度 $0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ のスペクトルを測定した (Fig.16)。 $0^\circ, 45^\circ$ におけるデータを比較するとピークの位置はほぼ同じ所にある。本来 45° におけるデータの方が低いピークになるべきである。このピーク位置の変動を補正するために、バルサーを用いた。そのことについては Appendix A で述べる。また、後の測定についてもバルサーによる補正を行っている。

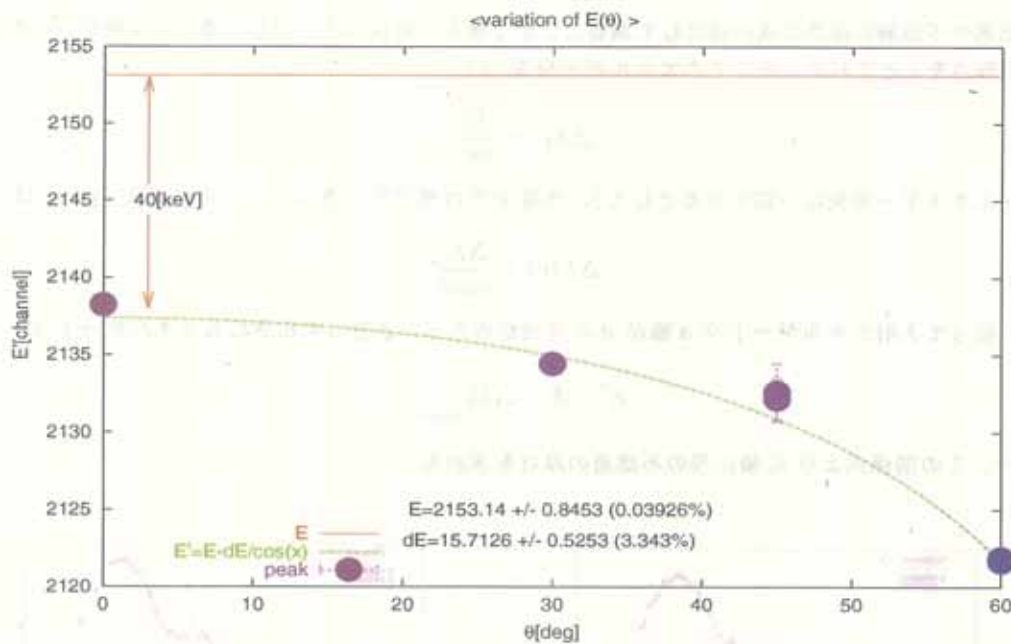


Fig. 17: 不感層の測定； ^{241}Am α 線 5.486[MeV] のピーク位置と入射角度の関係

得られたデータから Fig.17 を作った。これと式 (13) より検出器に対し垂直に入射した α 線の不感層でのエネルギー損失は

$$\Delta E_0 = 40.0 \pm 1.3[\text{keV}]$$

と求まった。これより不感層の厚さは

$$68.1 \pm 0.02[\mu\text{g}/\text{cm}^2](0.26 \pm 0.01[\mu\text{m}])$$

となる。この測定では α 線源表面にある膜でのエネルギー損失はないものとし、 SiO_2 の厚さは、 Si 中でのエネルギー損失の計算値から求めた厚さとその密度の比較で行った。

ちなみにカタログ値の厚さ $397.5[\mu\text{g}/\text{cm}^2](1.5[\mu\text{m}])$ でのエネルギー損失は $236.27[\text{keV}]$ であり、その場合のエネルギー損失は 6 倍にもなる。

3 proton beamを用いた測定

東北大学工学部高速中性子実験室 (FNL) の Dynamitron で実験を行った。Dynamitron と真空曹については使用した回路と共に Appendix C に載せた。

3.1 実験方法

真空容器内に Fig.18 のように 2 枚の Si 検出器と Au または CH_2 の標的を配置する。エネルギー分解能の測定は Au 標的で $\pm 45^\circ$ 方向にラザフォード散乱させた陽子を 2 枚の Si 検出器で測定する (Au 標的については Appendix B を参照)。時間分解能の測定は CH_2 標的を用いて、 $p(p,2p)$ 反応による同時計測で測定する。

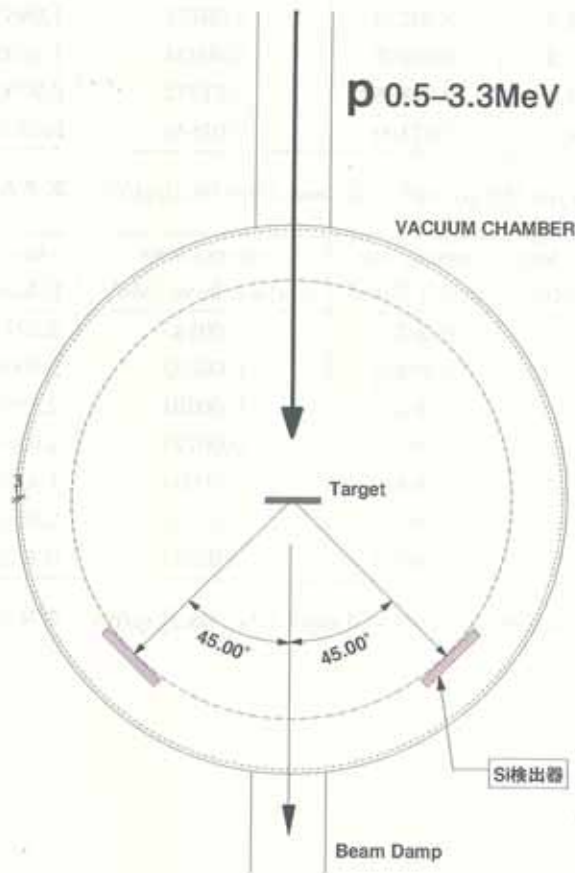


Fig. 18: p beam を Si 検出器で測定する方法

3.2 Results

3.2.1 energy loss の計算

エネルギーの較正をする前に標的と不感層中でどの位エネルギーを失ったか計算する必要がある。計算結果は Tab.2,3 のようになる。これを考慮しないと低い入射エネルギーほど較正結果に大きな影響を与えてしまう事が解かる。

incident E [MeV]	energy loss in Au [MeV]	energy loss in dead layer [MeV]	final E[MeV]
3.3	0.00445	0.00545	3.29011
3.0	0.00469	0.00583	2.98949
2.5	0.00517	0.00662	2.48822
2.0	0.00579	0.00771	1.98650
1.5	0.00667	0.00934	1.48399
1.0	0.00806	0.01212	0.97982
0.5	0.01100	0.01848	0.47052

Tab. 2: energy loss in Au $89[\mu\text{g}/\text{cm}^2]$ + Si dead layer $68.1[\mu\text{g}/\text{cm}^2]$ エネルギー損失最大の場合

incident E [MeV]	energy loss in Au [MeV]	energy loss in dead layer [MeV]	final E[MeV]
3.3	0.00314	0.00545	3.29141
3.0	0.00331	0.00582	2.99086
2.5	0.00365	0.00661	2.48973
2.0	0.00410	0.00771	1.98820
1.5	0.00472	0.00934	1.48595
1.0	0.00570	0.01210	0.98220
0.5	0.00777	0.01841	0.47383

Tab. 3: energy loss in Au $89[\mu\text{g}/\text{cm}^2]$ + Si dead layer $68.1[\mu\text{g}/\text{cm}^2]$ エネルギー損失最小の場合

3.2.2 Energy Resolution

陽子の入射エネルギーを 0.5,1.0,1.5,2.0,2.5,3.0,3.3[MeV] と変化させてデータを取った。得られたスペクトル (0.5[MeV],3.3[MeV]) は Fig.20,21 のようなものになった。

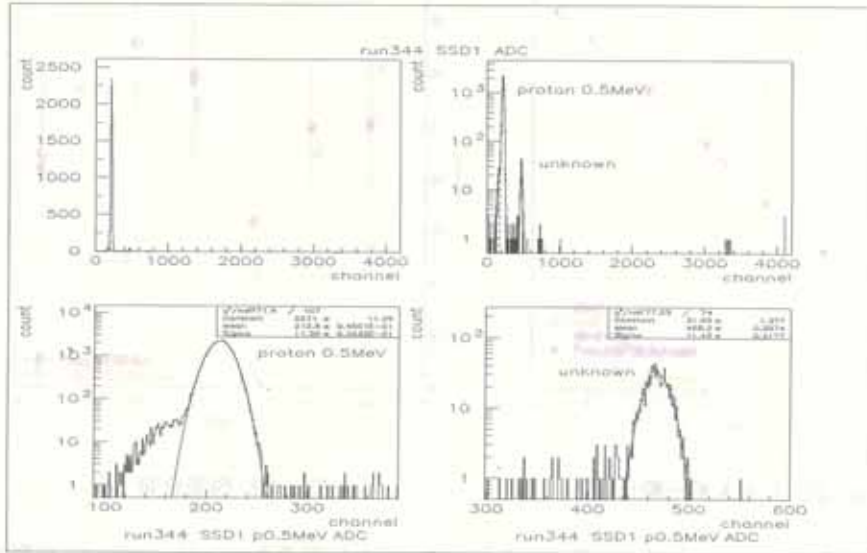


Fig. 19: p beam 0.5MeV Au target $89[\mu\text{g}/\text{cm}^2]$

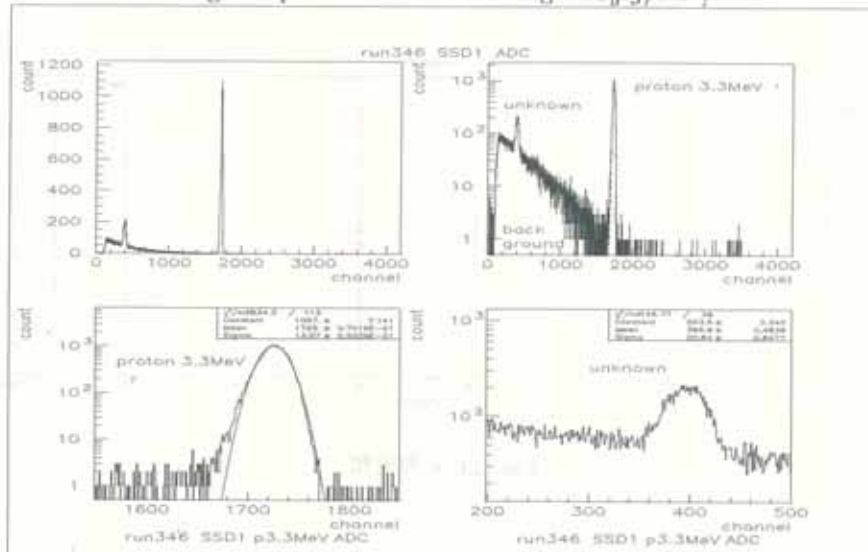


Fig. 20: p beam 3.3MeV Au target $89[\mu\text{g}/\text{cm}^2]$

これらのデータからエネルギー較正曲線とその残差分布は Fig.21,22 のようになる。誤差としてピークのガウスフィットの片側 σ を用いた。

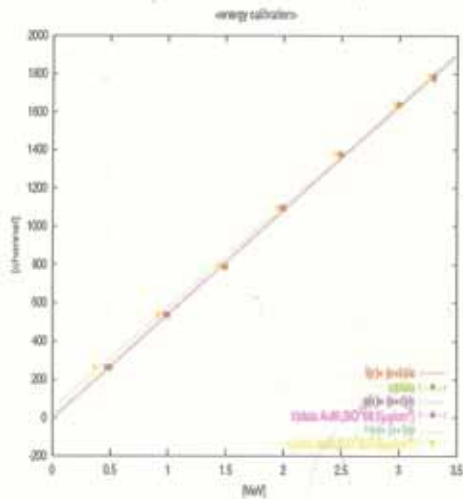


Fig. 21: エネルギー較正

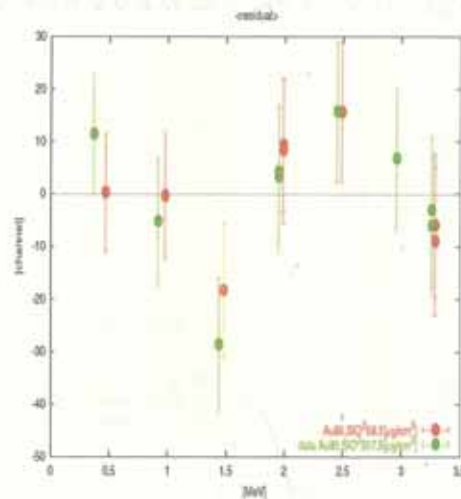


Fig. 22: 残差分布

エネルギー分解能は Fig.23 を見ると陽子の入射エネルギーに関係なく σ は、13[keV] 程度である。従ってエネルギー分解能は条件を満たしている。

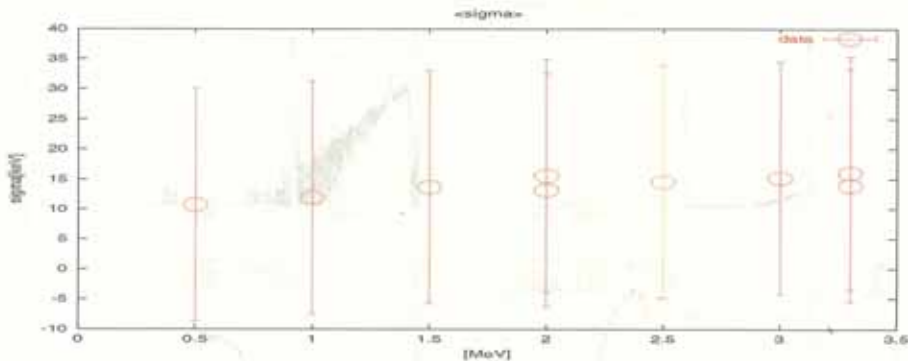


Fig. 23: σ の変化

エネルギー分解能は、主に次の要因で決まってくる。

- キャリアの数からの統計による広がり：1~3[keV] 程度
- Au 標的 ($100\mu\text{g}/\text{cm}^2$) での energy loss difference：約 3[keV]
- Au 標的での straggling：約 3[keV]
- Si 検出器の不感層 ($397.5\mu\text{g}/\text{cm}^2$) での straggling：約 6[keV]
- 回路の雑音による広がり：約 10[keV]

これより、陽子の入射エネルギーが違っても σ の値にあまり変化がなかったのは回路の雑音によって分解能がほぼ決まっているからと考えられる。

3.2.3 Time Resolution

時間分解能の測定は、陽子の入射エネルギー 3.3[MeV]で行った。その結果 ADC の出力は、Fig.24 のようになった。

左上と右上の図はトリガーを 2 枚の Si 検出器の OR でとったものである。これから H(p,2p) の他に C による散乱も起きていることが解かる。この 2 種類の散乱での収量を比較するとクーロン力のみでの散乱が起きている場合、(収量)/(散乱断面積)の比は $(Y_H/\sigma_H) : (Y_C/\sigma_C) = 2:1$ になるが、実際は 2000:1 程度になっている。これは、H(p,2p) では入射エネルギー 3.3[MeV] の陽子に対して核力の影響を無視することができない事を示している。

左下の図はトリガーを 2 枚の Si 検出器の AND でとったものである。この場合 C による散乱をきれいに取り除けていることが解かる。

右下の図は横軸、縦軸それぞれに 2 枚の Si 検出器の ADC をとったものである。CH₂ 標的の厚さ (13μm) によって検出されるエネルギーに広がりを持っている事が解かる。

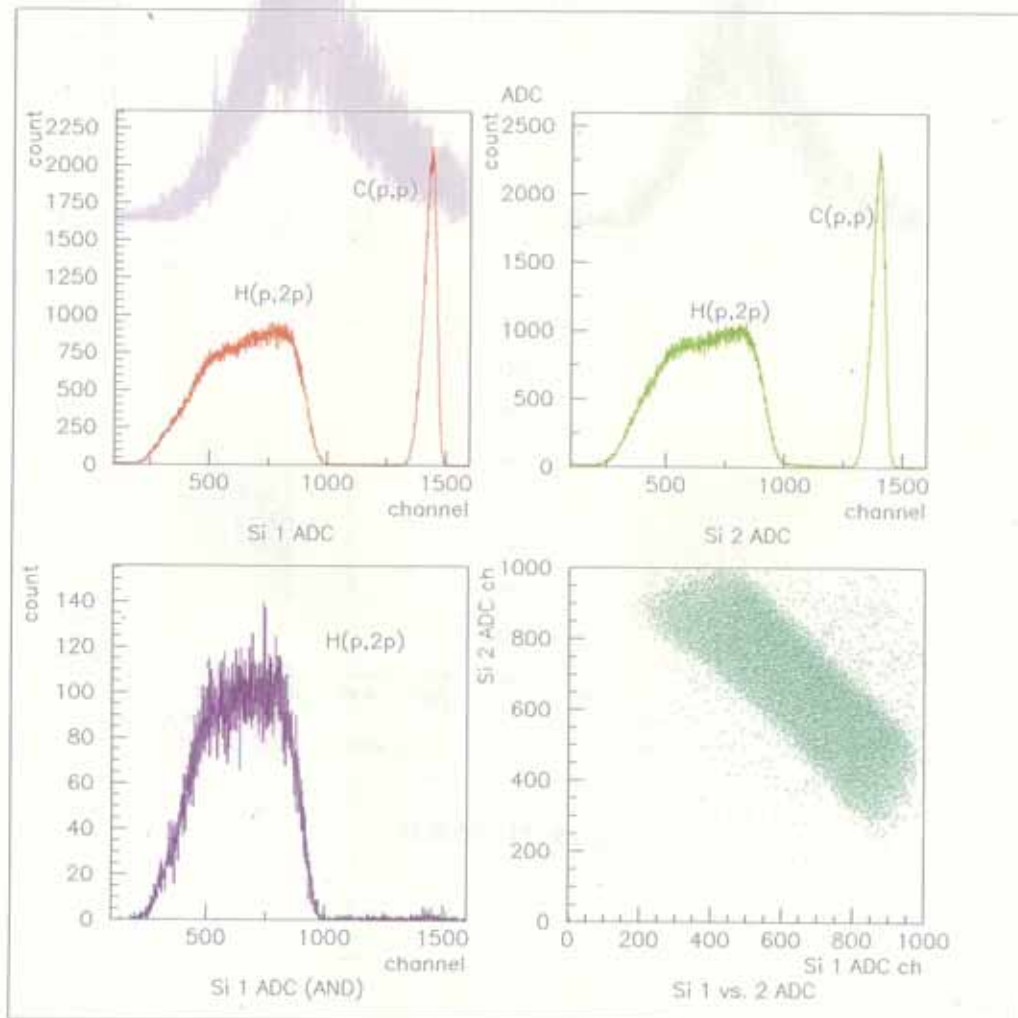


Fig. 24: ADC の出力

次にトリガーを2枚のSi検出器のANDでとった場合のTDCの出力をしてみる (Fig.25)。

左上と右上の図は2枚のSi検出器それぞれのTDCである。左下と右下の図は2枚のSi検出器それぞれのADCを横軸に2つのTDCの差を縦軸にとったものである。TDCはShaping Amp(ORTEC 671)のBi-poler出力の0-crossをTSCA(ORTEC 455)で取ったものを入れているが、左下と右下の図を見て解かるようにTSCAのWalkを合わせられていなかった。従って時間分解能を出す際にSlewの補正をしてやる必要がある。

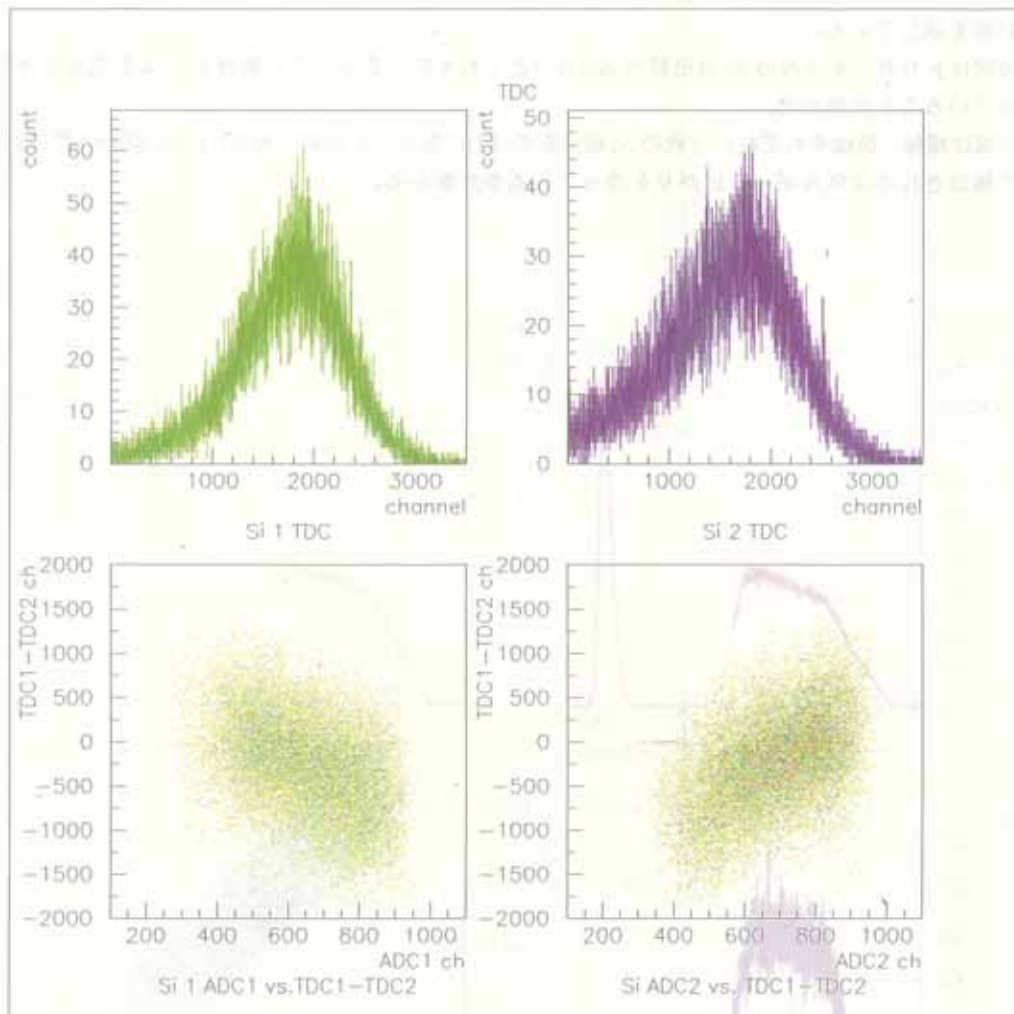


Fig. 25: TDCの出力

Slewの補正は、Bi-polar 0-crossを考慮し、2つあるADCの関数で補正すべきであるが、今回は簡単に補正をした。まず、Fig.25の左下の図に対してADCの各チャンネル毎に Gauss fitし、その中心値を出す (Fig.26の左上)。その中で直線的に変化してそうな500[ch]から800[ch]の部分を取り出して一次関数でフィットし (Fig.26の右上)、Slewの補正をした (Fig.26の左下)。これを縦軸 (TDC1-TDC2) に射影する (Fig.26の右下)。右下の図より $\sigma=587[\text{ch}]=29.35[\text{nsec}]$ ($\text{TDC} 1[\text{ch}]=0.05[\text{nsec}]$) となった。Si検出器1枚当たり21[nsec]となる。同様の事を Fig.25の右下の図に対して行くと、 $\sigma=569[\text{ch}]=28.45[\text{nsec}]$ で、Si検出器1枚当たり20[nsec]となった。

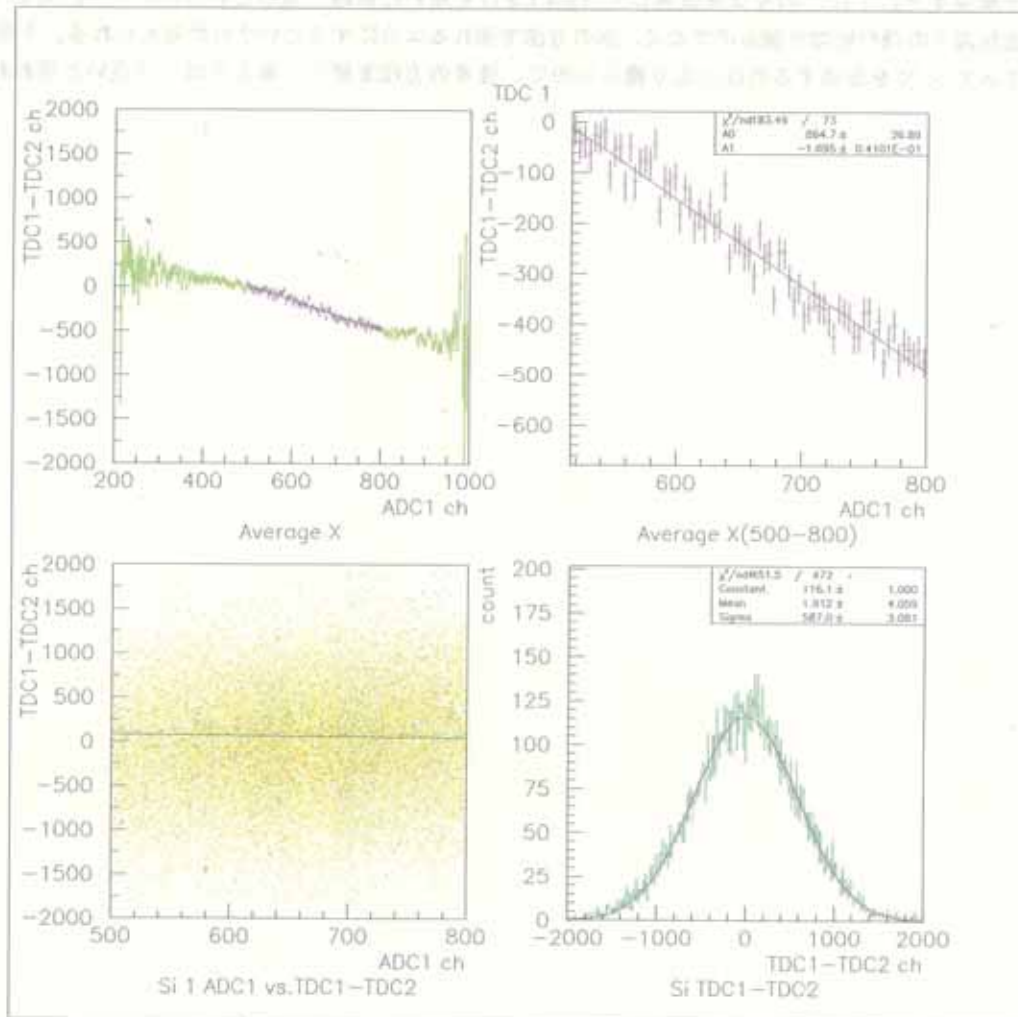


Fig. 26: 時間分解能

3.3 Conclusion

エネルギー分解能は 13[keV] 程度と十分な値が得られたが、時間分解能は 20[nsec] しか得られなかった。時間分解能が 2[nsec] に届かなかった一番の原因は、雑音にある。元々は Pre Amp(ORTEC 142A) の T 出力を TFA(ORTEC 474), CFD(ORTEC 935) とつなぐことで時間測定を行いたかった。しかし、この回路では入射エネルギー 1[MeV] 以下の陽子の信号が雑音に埋もれてしまうため、使用できなかった。そこで、今回は Shaping Amp(ORTEC 671) の Bi-poler 出力の 0-cross を TSCA(ORTEC 455) で取る方法を採用せざるを得なかった。

そこで解決策としては、S/N 比を改善して TFA, CFD を用いた回路を組むというのが一つ。若しくは、角度を散乱陽子の飛行時間で測るのでなく、別の方法で測れるようにするというのが考えられる。今回の実験をしてみて S/N を改善するのはかなり難しいので、後者の方法を新たに考えたほうが良いと思われる。

Appendix A

実験の再現性

Tab.4は、 ^{241}Am の α 線を同じ条件で数回とったデータ(全ての測定に対して $\sigma \approx 5[\text{ch}]$)である。このように σ の二倍程度ピークの位置が変動してはデータを比較する事は出来ない。なぜこのような事が起こるかという

- 測定毎に逆バイアス電圧をかけなおしている事
- 測定の度に真空を引きなおしている事
- 一回の測定時間が30分以上かかること

が主な原因であると考えられる。

Tab. 4: ^{241}Am α 線からのデータ

測定 No.	5.486[MeV] の peak channel	5.433[MeV] の peak channel	5.389[MeV] の peak channel
1	2138.40	2121.54	2099.71
2	2155.19	2138.39	2116.02
3	2152.75	2136.03	2113.97
4	2146.52	2129.48	2107.70

この変動に対して、パルサーを用いてそれぞれの測定上に数点の印をつけることで、その点を目安に測定を比較できるように試みた。(条件としてパルサーの信号は常に一定であるとしている。)

測定中にとったパルサーのデータを Fig.27に示す。縦軸はある測定でとったピークに対して基準とした測定のピーク位置とのずれを表す。Fig.27からずれはチャンネルの一次関数で近似しても良さそうであり、 ^{241}Am での測定に対しこの方法で補正をすることにした。

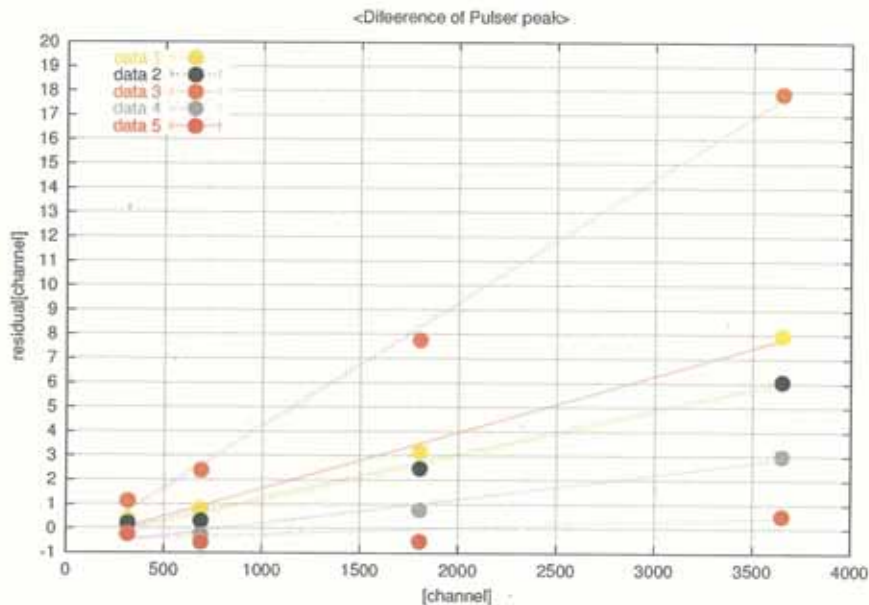
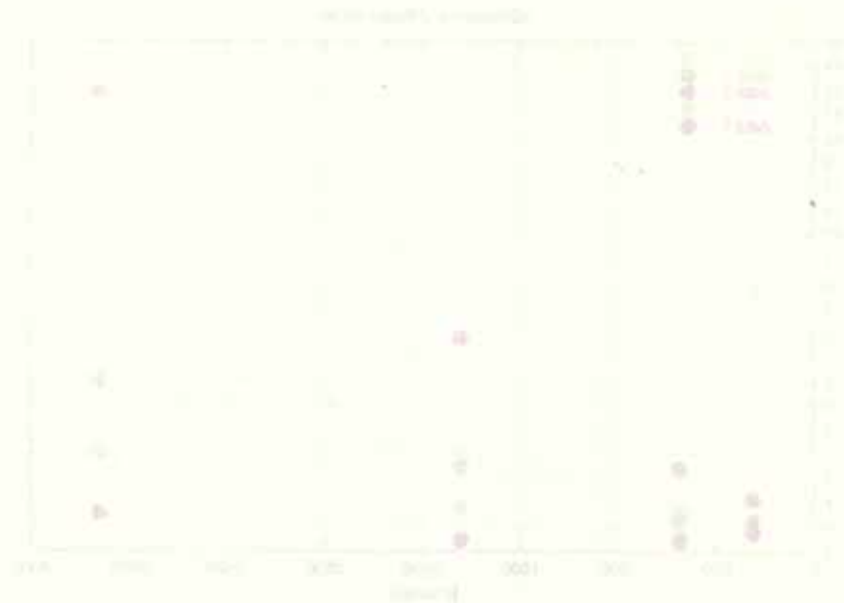


Fig. 27: 測定によるパルサーのピークの違い

陽子ビームでの測定に対しても補正の為にバルサーを用いたが、この測定に関しては Tab.5 を見る限り必要はないものと考えられる。 ^{241}Am での測定と陽子ビームでの測定とでは使用した真空曹が違っている。 ^{241}Am での測定に使用した真空曹内が、ロータリーポンプの油で汚れていた事がピーク位置の変動を招いた原因の一つではないかと考えられる。

Tab. 5: バルサーのデータ ($\sigma \simeq 11[\text{ch}]$)

Run no.	peak ch	peak ch	peak ch
306	411.2	878.6	2273
308	411.9	878.7	2275
312	412.2	879.4	2275
314	411.5	879.3	2275
316	411.7	879.1	2275
318	411.7	879.2	2274
320	411.6	878.9	2275
323	412.1	879.1	2275
325	411.7	879.3	2274
328	411.7	879.2	2274



Appendix B

Target Thickness

今回実験のために入手した Au 標的の厚さは $1930[\text{mg}/\text{cm}^2](1[\mu\text{m}])($ 厚さ絶対値の公差 10%、厚さ均一度の公差 5%) である。実際に厚さを計ってみると $1.6552 \pm 0.0083[\text{mg}/\text{cm}^2], (0.8576 \pm 0.0428[\mu\text{m}])$ であった。

入射エネルギー $0.5[\text{MeV}]$ の陽子は $1930[\text{mg}/\text{cm}^2]$ の Au 標的中でそのエネルギーの 30% を失う。そのような低いエネルギーを測定する必要はないし、標的が厚いので分解能も悪くなる (Fig.28,29,Tab.6 参照、straggling による広がり以上に悪くなっている) ので、この標的を使用しないにこしたことはない。従って Au 標的を薄くする必要がある。

Tab. 6: 標的の厚さと分解能と straggling

thickness $\mu\text{g}/\text{cm}^2$	全体の広がり [keV] (σ)	straggling による 広がり [keV](σ)
0	13	0
1655	41	10
3310	62	14

そこでどのくらいの厚さが要求されるかあらかじめ知っておく必要がある。Tab.7 に入射エネルギー 0.5MeV の陽子の Au 標的におけるエネルギー損失を載せる。但し、Si 検出器における不感層を $68.1[\mu\text{g}/\text{cm}^2](0.291[\mu\text{m}])$

Tab. 7: 標的の厚さと通過する陽子 ($0.5[\text{MeV}]$) のエネルギーの関係

thickness $[\mu\text{g}/\text{cm}^2]$	energy loss(Au)[MeV]	energy loss[MeV] (dead layer of SSD)	final energy[MeV]
1930	0.18164	0.02372	0.29464
965	0.08712	0.02039	0.39250
579	0.05147	0.01943	0.42910
386	0.03406	0.01900	0.44693
193	0.01691	0.01861	0.46448
0	0	0.01824	0.48176

とする。

これから Au 標的の厚さを $193[\mu\text{g}/\text{cm}^2](0.1[\mu\text{m}])$ 程度であれば最終的に Si 検出器で測定されるエネルギーは標的なしの場合の 0.96 倍なのでこのくらいの厚さがあれば良い。ちなみにこの厚さでも Si 検出器での計数は十分である。

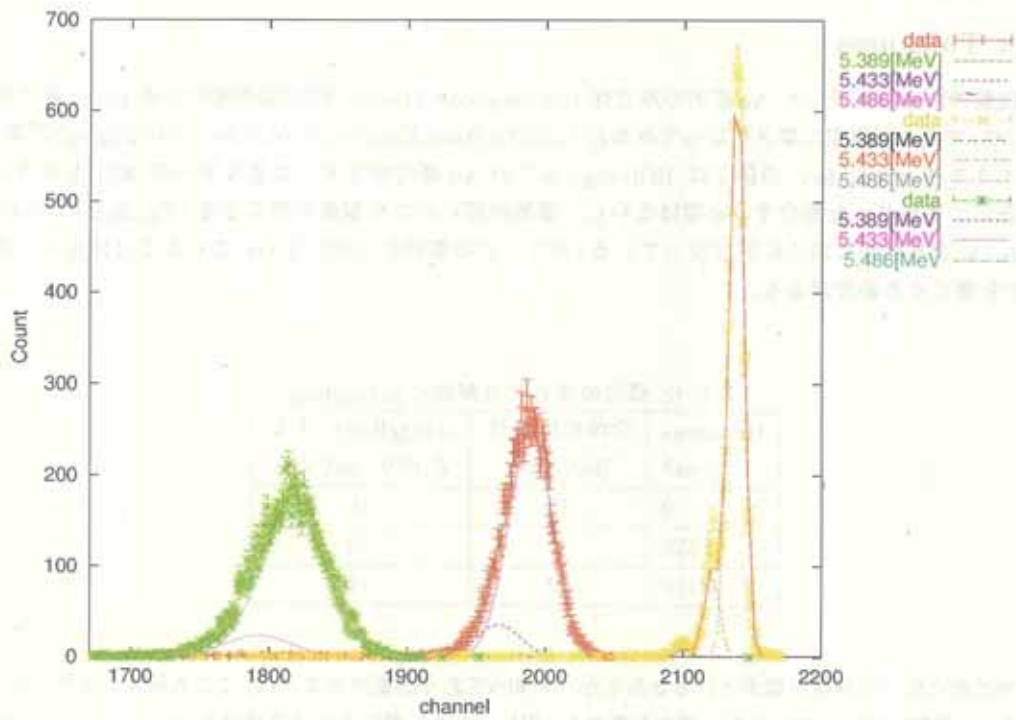


Fig. 28: 右から $0[mg/cm^2]$, $1.6552[mg/cm^2]$, $3.3102[mg/cm^2]$ (linear scale)

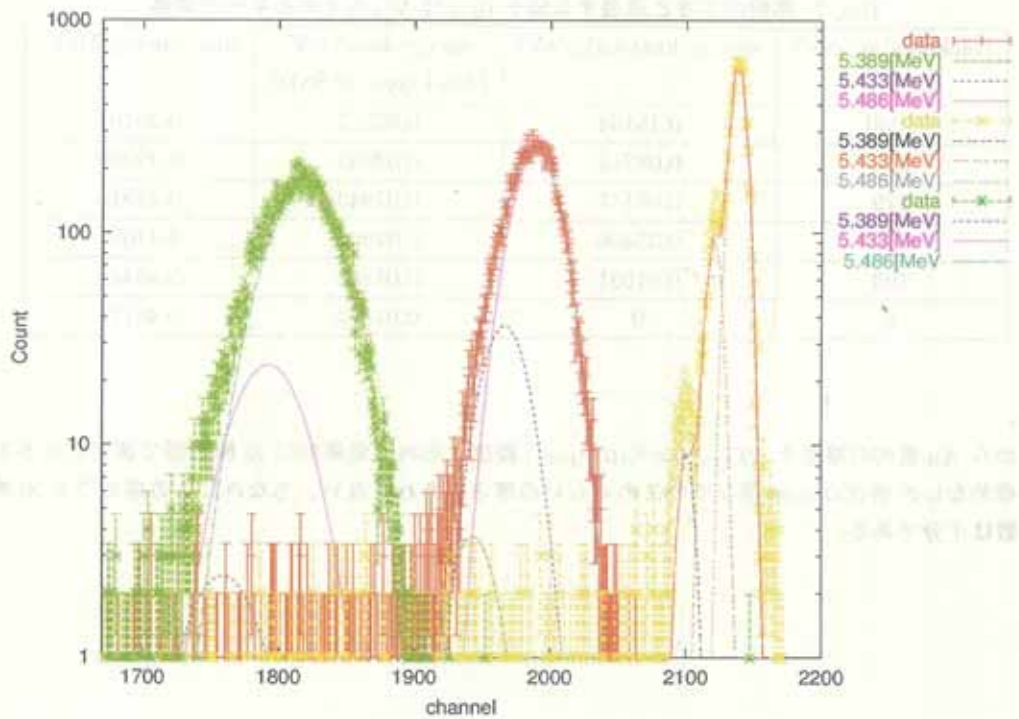


Fig. 29: 右から $0[mg/cm^2]$, $1.6552[mg/cm^2]$, $3.3102[mg/cm^2]$ (log scale);Gaussian の σ は右から $13[keV]$, $41[keV]$, $62[keV]$ と広がっている

製作方法

Cyricにある蒸着装置 (Fig.30) で製作した。基板としてガラスを用い、基板と試料 (Au:60[mg]) との距離は 15[cm] で製作した。

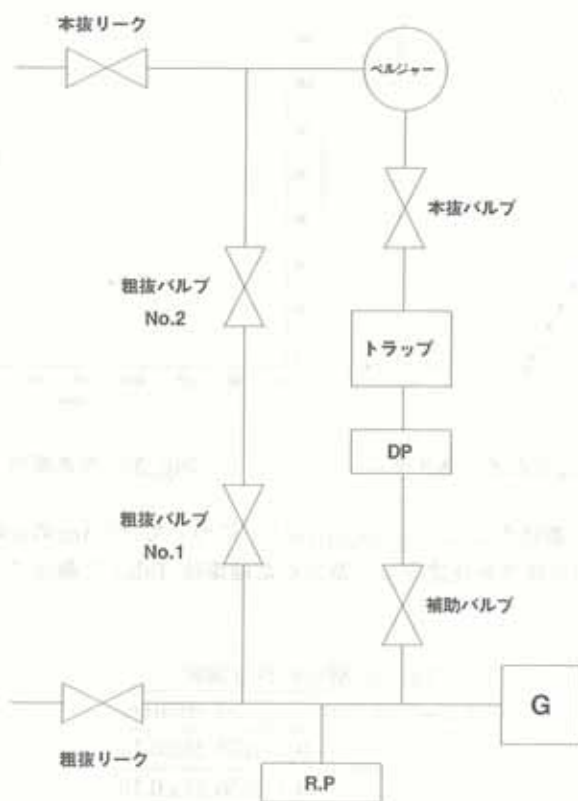


Fig. 30: 蒸着装置

製作した試料の厚さの測定

厚さの測定は次の 2 通りで行った。

1. 重さと面積からの測定

Auの重さ $600 \pm 200[\mu\text{g}]$, 面積 $8.15 \pm 0.1[\text{cm}^2]$ より

$$74 \pm 25[\mu\text{g}/\text{cm}^2]$$

となった。

2. エネルギー損失からの測定

Au 標的の厚さが違う場合、 ^{241}Am の α 線 5.486[MeV] が Si 検出器で測定されるエネルギーは Fig.31 のように、厚さに比例して小さくなる。Fig.31 の横軸は Au 標的の厚さ、縦軸が物質 (Au 標的、 SiO_2 不感層) を通過した後のエネルギーを表す。

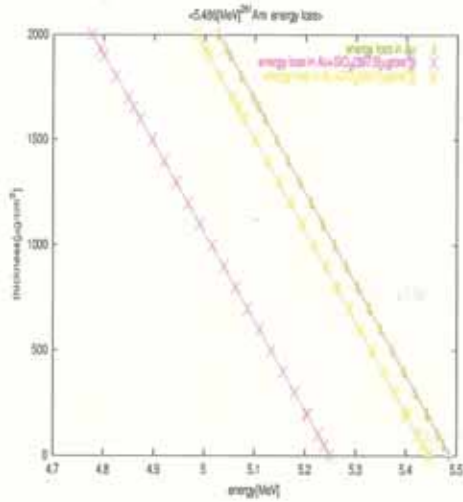


Fig. 31: Au 標的の厚さと検出されるエネルギー

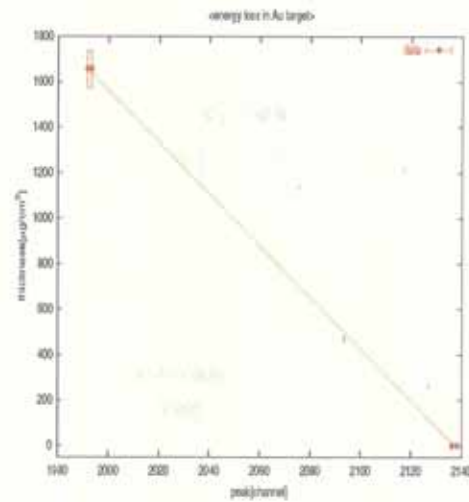


Fig. 32: 厚さ測定

「製作した Au 標的」、「標的なし」、「 $1655[\mu\text{g}/\text{cm}^2]$ 」について ^{241}Am の α 線でデータをとることによって製作した Au 標的の厚さを決定する。測定した結果は Tab.8 に載せる。

Tab. 8: 標的の厚さ測定

thickness $[\mu\text{g}/\text{cm}^2]$	peak channel
0	2138.23 ± 0.10
0	2136.21 ± 0.19
1655	1992.13 ± 0.40
1655	1991.56 ± 0.35
3310	1826.75 ± 0.55
unknown	2129.95 ± 0.34

このデータを用いて Fig.32 にターゲットの厚さと測定されるエネルギーの関係の関係を載せる。このグラフ上に未知試料の測定結果を当てはめるとそこから試料の厚さは、

$$89 \pm 8[\mu\text{g}/\text{cm}^2]$$

と求まった。重さと面積からの測定結果とほぼ同じ値になっている。陽子ビームでの実験ではここで求まった $89 \pm 8[\mu\text{g}/\text{cm}^2]$ を Au 標的の厚さとして様々な計算に使用した。

Appendix C

Full Depletion Voltage 測定時の回路 (2.1)

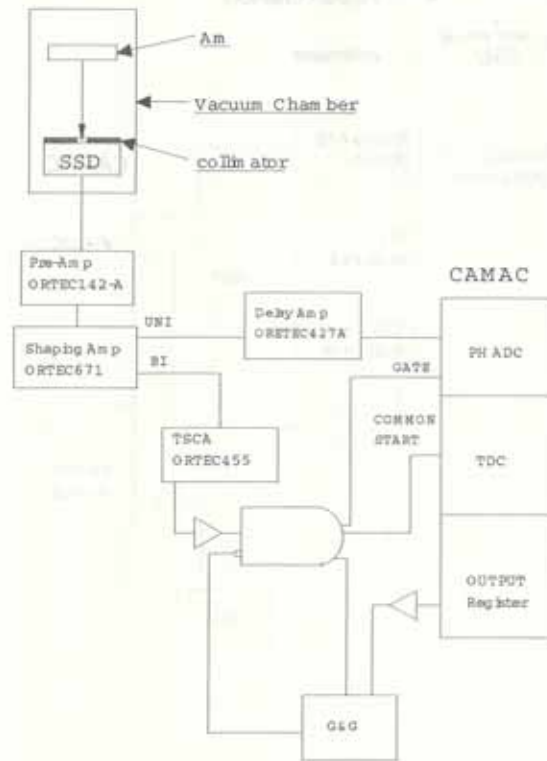


Fig. 33: Full Depletion Voltage 測定時の回路

Energy Resolution, Dead layer Thickness, Target Thickness 測定時の回路 (2.2, 2.5, Appendix B)

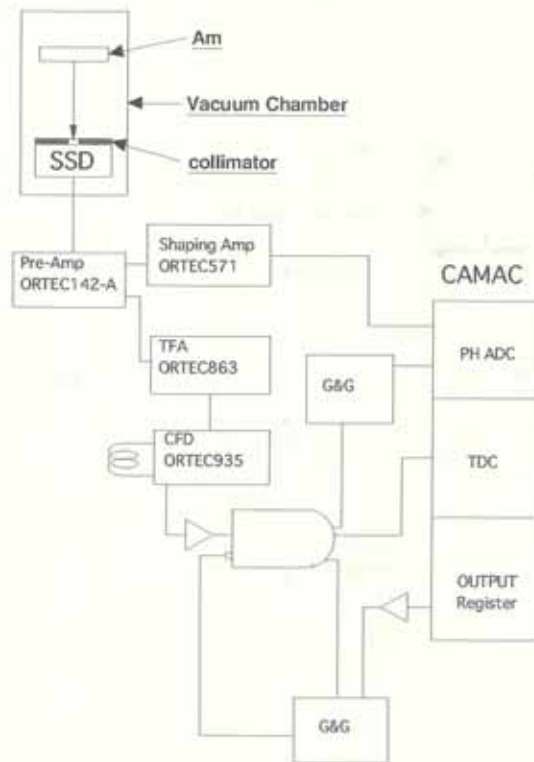


Fig. 34: Energy Resolution, Dead layer Thickness, Target Thickness 測定時の回路

proton beam を用いた測定時の回路 (3.2)

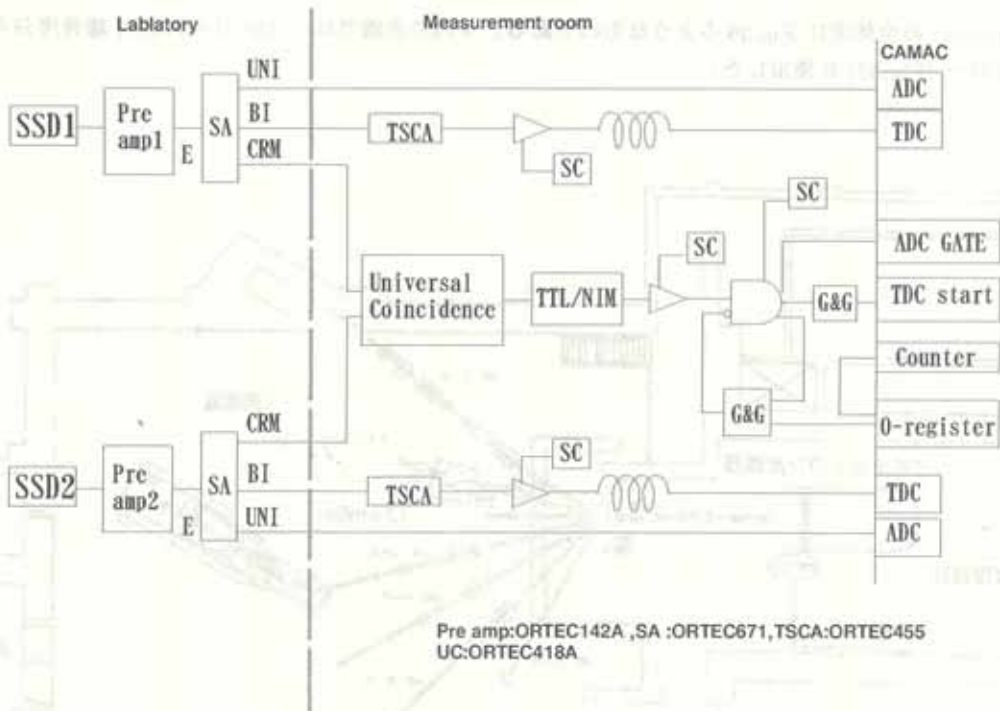


Fig. 35: proton beam を用いた測定時の回路 (陽子の入射エネルギー 2.0[MeV] 以下の時は SA と ADC の間に Delay Amp ORTEC427A をいれてある。)

FNLでの実験

Dynamitron

Dynamitronの全体図は Fig.36 のようなものである。今回の実験では、 -15° コースの X 線角度分布測定用チャンバー (Fig.37) を使用した。

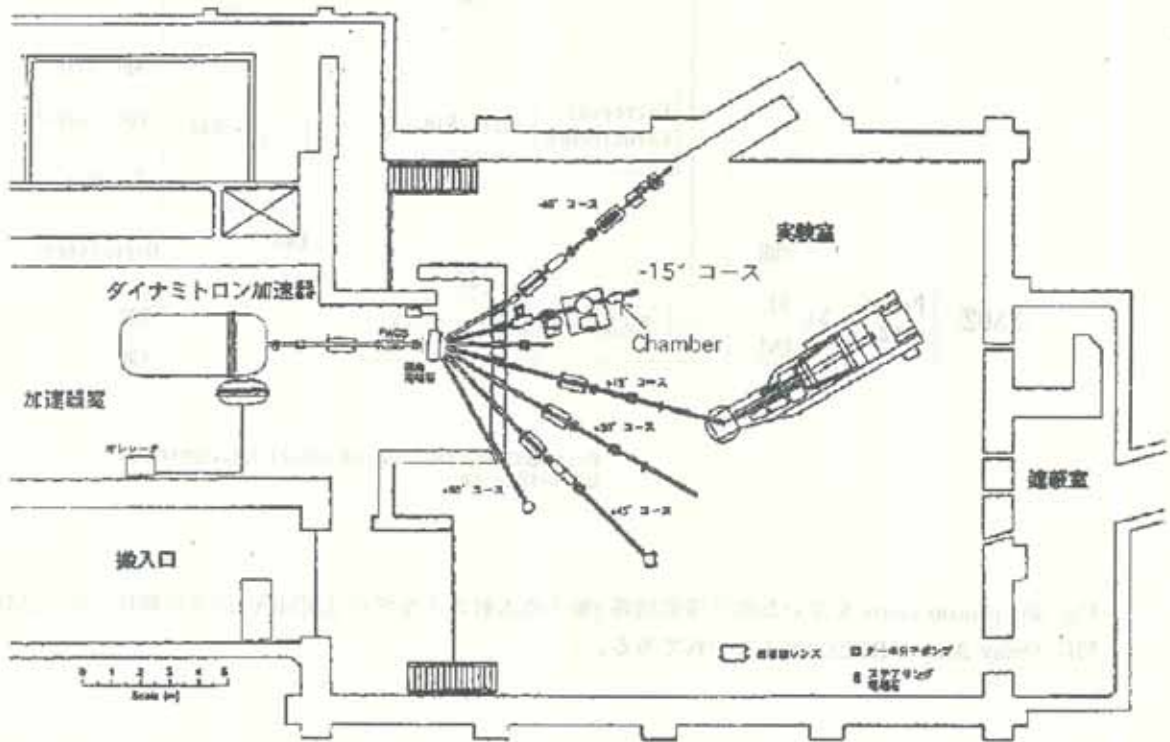


Fig. 36: Dynamitron

Chamber

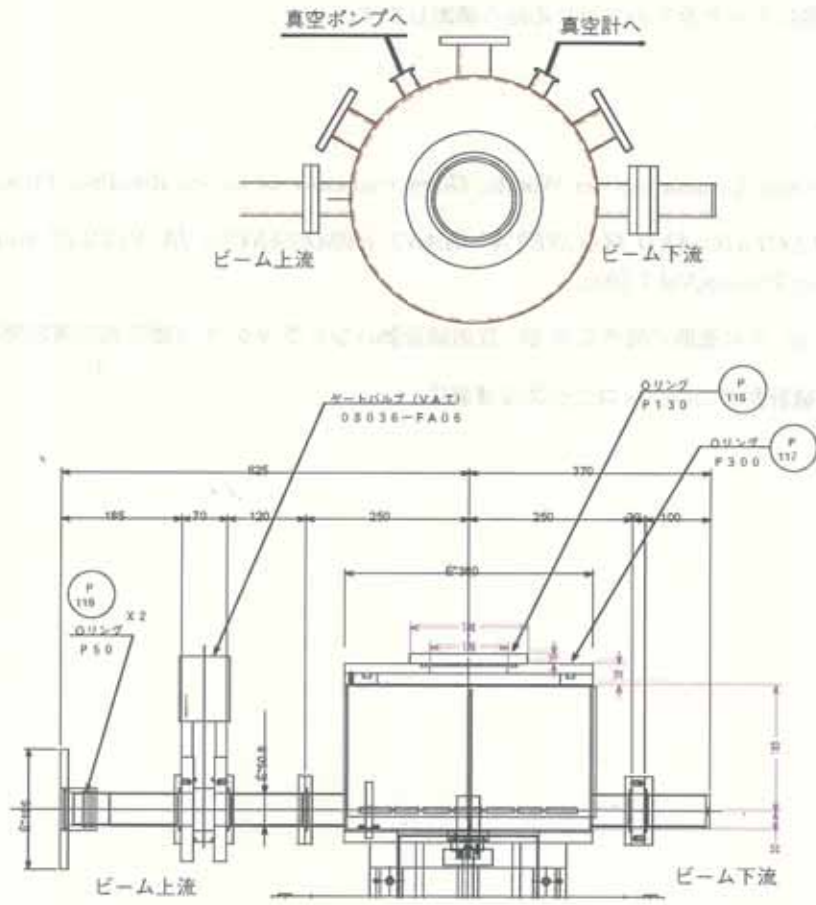


Fig. 37: 使用した Chamber(上: 上側から見た図、下: 横側から見た図)

謝辞

最後に、お世話になった全ての方々に心から感謝します。

Reference

- [1] Josef Speth and Adriaan van der Woude. *Giant resonance in nuclei*. Rep.Prog.Phys.,Vol.44,1981.
- [2] J.speth. *ELECTRIC AND MAGNETIC GIANT RESONANCES IN NUCLEI*. International Review Nuclear Physics,Vol.7,1991.
- [3] Glenn F.knoll. 木村逸郎/阪井英次 訳 放射線計測ハンドブック 第3版日刊工業新聞社
- [4] 佃正呉放射線計測の電子学岩波書店