

崩壊 中間子分光実験用  
シリコン・ストリップ検出器 (SSD) の研究

東北大学理学部物理学科 4 年  
新井 直樹

2011 年 5 月 9 日

## 目次

1	ハイパー核	3
1.1	ハイパー核とは	3
1.2	粒子の生成反応	3
1.3	崩壊 中間子分光実験	4
2	本研究の目的	5
3	シリコン・ストリップ検出器 (SSD)	5
3.1	特徴	5
3.2	半導体検出器の動作原理	6
3.3	SSD の構造	7
4	検出効率とノイズと leakage current	13
4.1	測定方法	13
4.2	検出効率の結果	14
4.3	ノイズの結果	16
4.4	leakage current の結果	17
4.5	検出効率の結果に対する考察	19
4.6	ノイズの結果に対する考察	20
5	結論	21
6	謝辞	22
7	参考文献	23

## 目次

1	( $K^-$ , $\pi^-$ ) 反応 . . . . .	3
2	( $\pi^+$ , $K^+$ ) 反応) . . . . .	3
3	( $e$ , $e'K^+$ ) 反応 . . . . .	4
4	崩壊 中間子分光実験の原理 1 . . . . .	4
5	崩壊 中間子分光実験の原理 2 . . . . .	5
6	半導体検出器の原理 1 . . . . .	6
7	半導体検出器の原理 2 . . . . .	7
8	SSD の写真 1 . . . . .	8
9	SSD の写真 2 . . . . .	9
10	SSD を上から見た図 . . . . .	9
11	SSD を横から見た図 . . . . .	10
12	Readout . . . . .	11
13	パイアス . . . . .	12
14	ECL Driver Board . . . . .	13
15	検出効率の測定方法 . . . . .	14
16	コリメート . . . . .	14
17	検出効率の結果 . . . . .	15
18	検出効率の結果 . . . . .	16
19	検出効率の結果 . . . . .	17
20	ノイズレートの比較 . . . . .	21

# 1 ハイパー核

## 1.1 ハイパー核とは

多くの原子核はアップクォーク、ダウンクォークからなるバリオン、陽子と中性子から構成されている。それに対して、アップクォーク、ダウンクォーク以外にストレンジクォークを含んだバリオン（ハイペロン）が含まれている原子核が存在している。このような原子核はハイパー核と呼ばれている。

ハイパー核の中にあるハイペロンは陽子や中性子とは異なる粒子なので、核内でのそれらからのパウリの排他律を受けることがない。パウリの排他律を受ける陽子や中性子では原子核の深い束縛状態を探ることが困難であるが、ハイペロンはそうではないため、深い束縛状態を探る上での探針となりうる。これによってバリオン多体系として原子核の構造を理解できることが期待されている。

また、ハイパー核は身近な物質に存在することはなく、高温極限状態において生成される。このことから中性子星の内部に存在することが予言されている。ハイパー核の研究は中性子星の性質を明らかにする上で一翼を担う可能性がある。

このように、ハイパー核の研究は原子核の構造のみならず宇宙に関することまで我々に理解を深めさせてくれる可能性があり、物理学において非常に有意義な研究の一つであると言える。

## 1.2 粒子の生成反応

上述のハイパー核の中でも  $\Lambda$  粒子というハイペロンを含むハイパー核が実験で多く作られてきた。その  $\Lambda$  粒子の生成反応の代表的なものを述べる。

代表的な反応は3種類あり、それぞれ  $(K^-, p, n)$  反応、 $(\pi^+, K^+)$  反応、 $(e, e', K^+)$  反応と呼ばれている。これらの反応のファイマン図を下に示す。

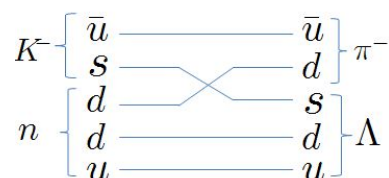


図1  $(K^-, p, n)$  反応

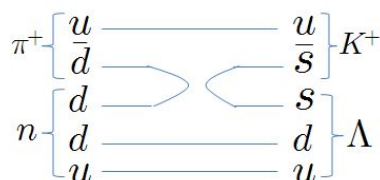


図2  $(\pi^+, K^+)$  反応

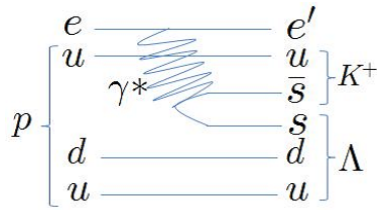


図3 (e, e'K<sup>+</sup>) 反応

### 1.3 崩壊 中間子分光実験

現在、ハイパー核の質量を測定する方法で、新しい実験手法である崩壊 中間子分光実験が提言されており、今後、行われる予定である。

この実験はハイパー核を生成し、そのハイパー核がある確率でハイパーフラグメントとしてより小さいハイパー核に崩壊し、そのハイパー核がまたある確率で中間子弱崩壊を起こし、出てきた  $\pi^-$  の運動量を測定することでハイパーフラグメントの質量を求めるものである。なお、この実験では前述の (e, e'K<sup>+</sup>) 反応を用いて行われる。下にその図を示す。

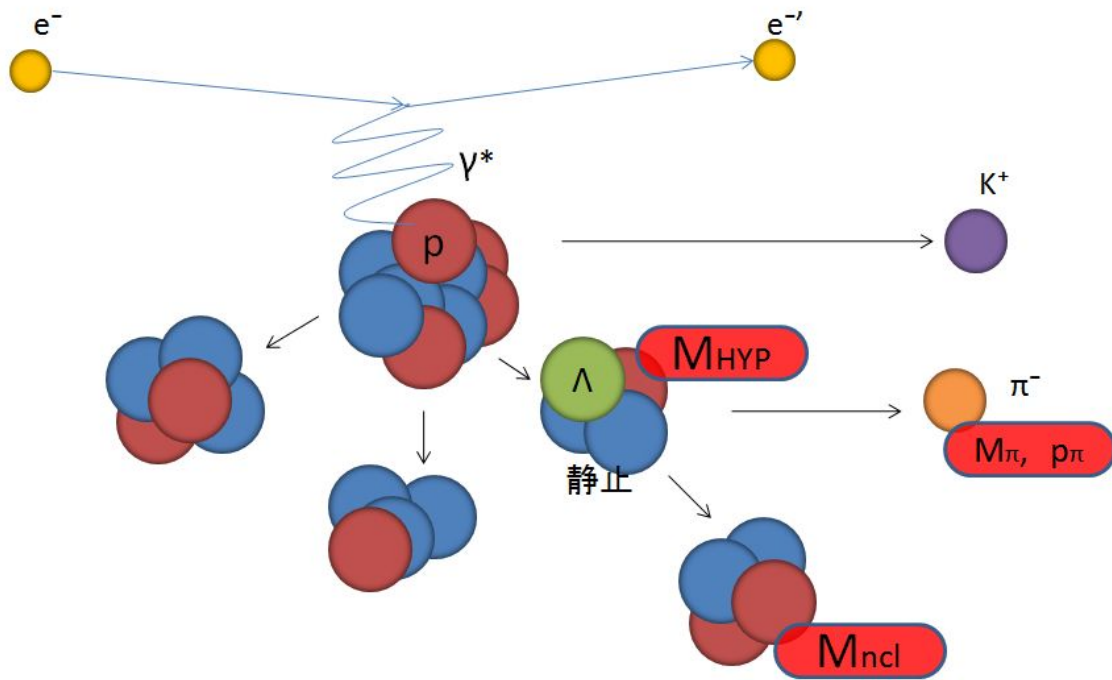


図4 崩壊 中間子分光実験の原理 1

図より、求める静止した  ${}^4_{\Lambda}\text{H}$  の質量を  $M_{HYP}$ 、 $\pi^-$  の質量を  $M_{\pi}$ 、 $\pi^-$  の運動量を  $p_{\pi}$ 、 ${}^4\text{He}$  の質量を  $M_{ncl}$  とし、運動学を解くと、

$$M_{HYP} = \sqrt{M_{ncl}^2 + p_{\pi}^2} + \sqrt{M_{\pi}^2 + p_{\pi}^2} \quad (1)$$

のように求められる。 $M_{ncl}$ 、 $M_{\pi}$  は既知の量なので、この実験では  $p_{\pi}$  を求めればよい。 $p_{\pi}$  を求めるには、放出した  $\pi^{-}$  をスペクトロメーターに通し、焦点面に位置検出器で  $\pi^{-}$  を特定することで求める。なお、運動量較正は  $\pi^{-}$  線源を用いることが予定されている。この図を下に示す。

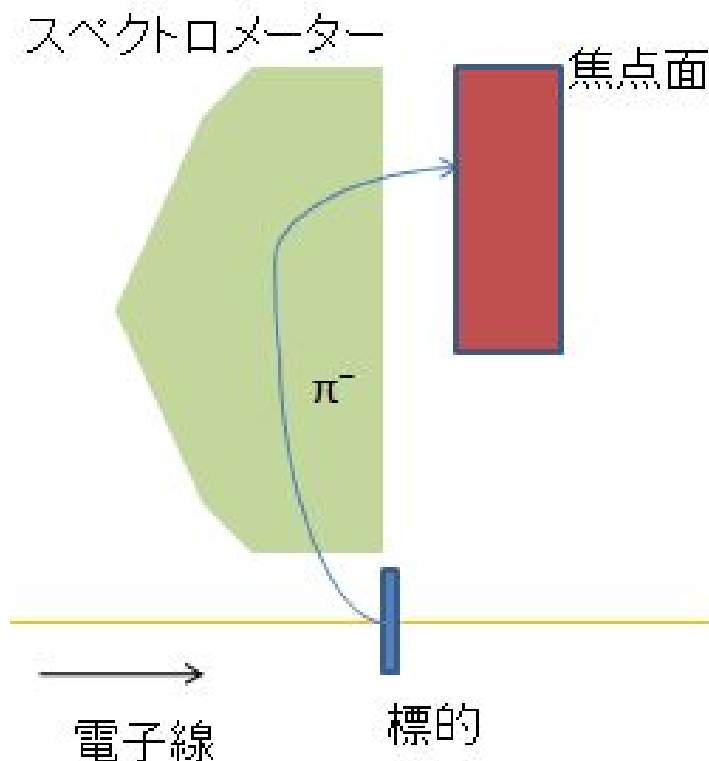


図 5 崩壊 中間子分光実験の原理 2

また、使用される位置検出器は、 $\pi^{-}$  線を使うことから真空中で動作されることが求められ、さらに、位置分解能は高い方がよいのでシリコン・ストリップ検出器が使用される予定である。

## 2 本研究の目的

本論文は私の研究テーマである”崩壊 中間子分光実験用シリコン・ストリップ検出器についてのもの”である。

本研究では前述の崩壊 中間子分光実験に用いられる可能性のあるシリコン・ストリップ検出器 (以下、SSD と略す) の検出効率とノイズレベルの測定を行い、その性能を評価することを目的としている。

## 3 シリコン・ストリップ検出器 (SSD)

### 3.1 特徴

1970 年代、位置検出器の研究の大半はガス検出器が主であったが、1980 年代に入り、高エネルギー素粒子物理により、高精度の位置分解能が要求されるようになった。その要求を満たす位置検出器の一つとして

SSD が研究、開発、使用されるようになった。

SSD の特徴は以下のようなものがあげられる。

- 半導体検出器である
- ガス検出器に比べて位置分解能が高い
- ガス検出器に比べてエネルギー分解能が高い
- 一定の寸法においてガス検出器より検出効率が高い
- ガス検出器に比べてパルスの立ち上がりが速い
- 室温で動作する
- 真空中で動作する

### 3.2 半導体検出器の動作原理

前述の通り、SSD は半導体検出器であるのでその原理について説明する。

n 型半導体と p 型半導体を接合する (pn 接合) と、キャリアが全く存在しない空乏層と呼ばれる領域が生まれる。これに逆バイアス電圧をかけると空乏層の領域は大きくなる。この大きくなった空乏層の領域に荷電粒子が通過すると空乏層の荷電子帯にある電子が励起され、伝導帯へ行き、電子と正孔 (ホール) の対が生成される。生成された電子は電位の高い方へ、正孔は低い方へ引き寄せられ、これが信号となり、荷電粒子が通過したという情報を引き出せる。

これらの内容を下図に示した。

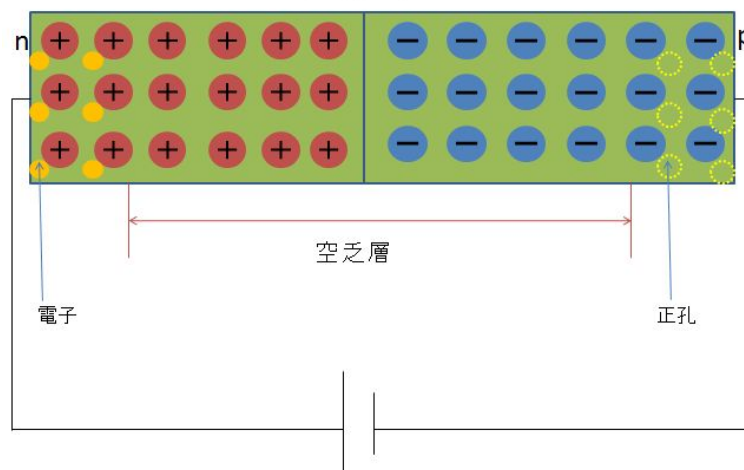


図 6 半導体検出器の原理 1

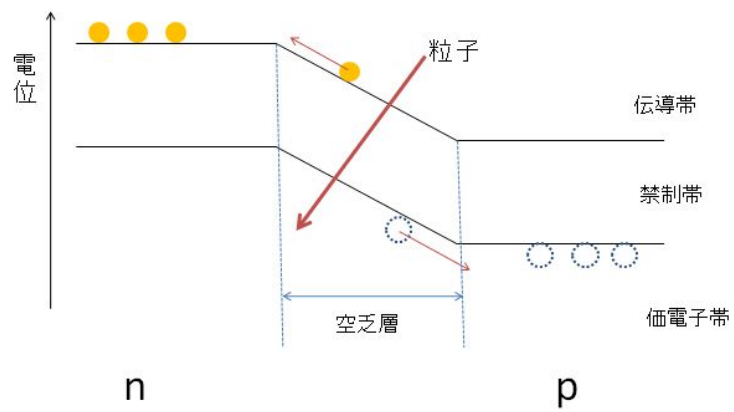


図7 半導体検出器の原理2

### 3.3 SSD の構造

#### 3.3.1 全体

以下に SSD の写真を載せる。赤く囲まれた部分が SSD でそれ以外は読み出し回路等である。





図 8 SSD の写真 1

また、赤く囲まれた部分を後ろにし、金属の覆いを撮った写真を載せる。これがストリップの部分である。



図9 SSDの写真2

そのストリップを図にしたものを下に載せる。ストリップは合計で144本ある。

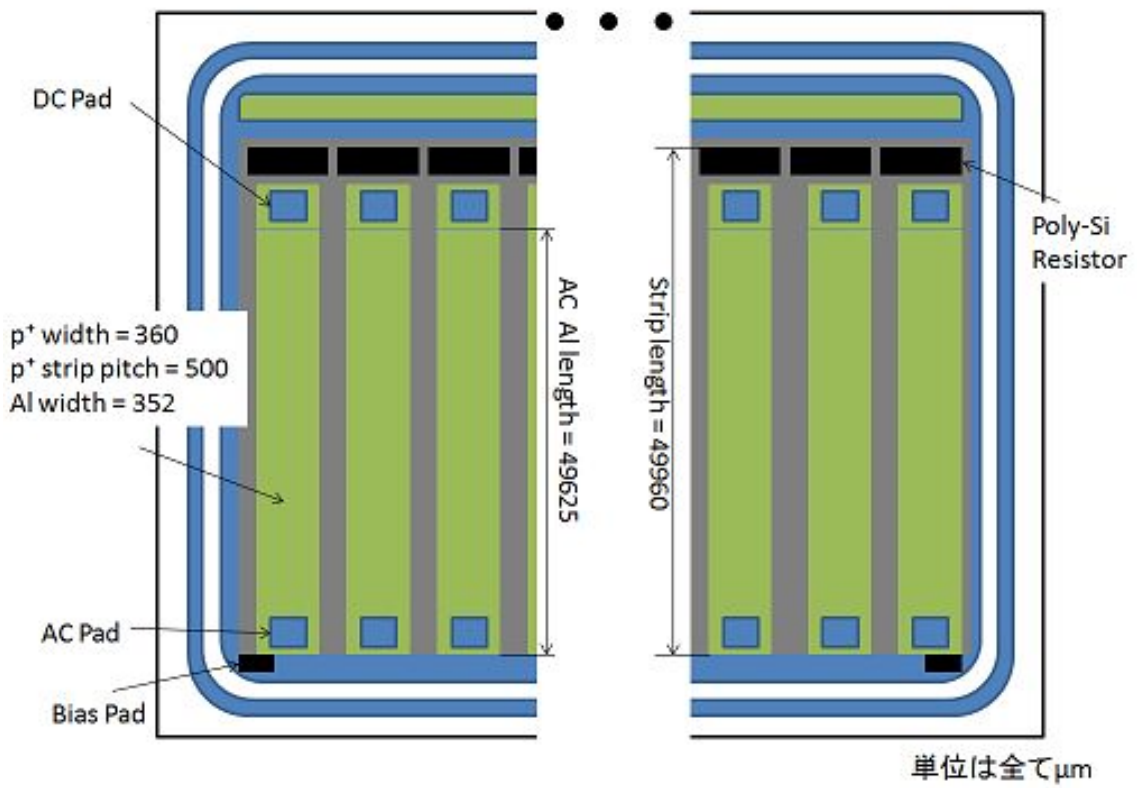


図10 SSDを上から見た図

横から見た図を下に載せる。

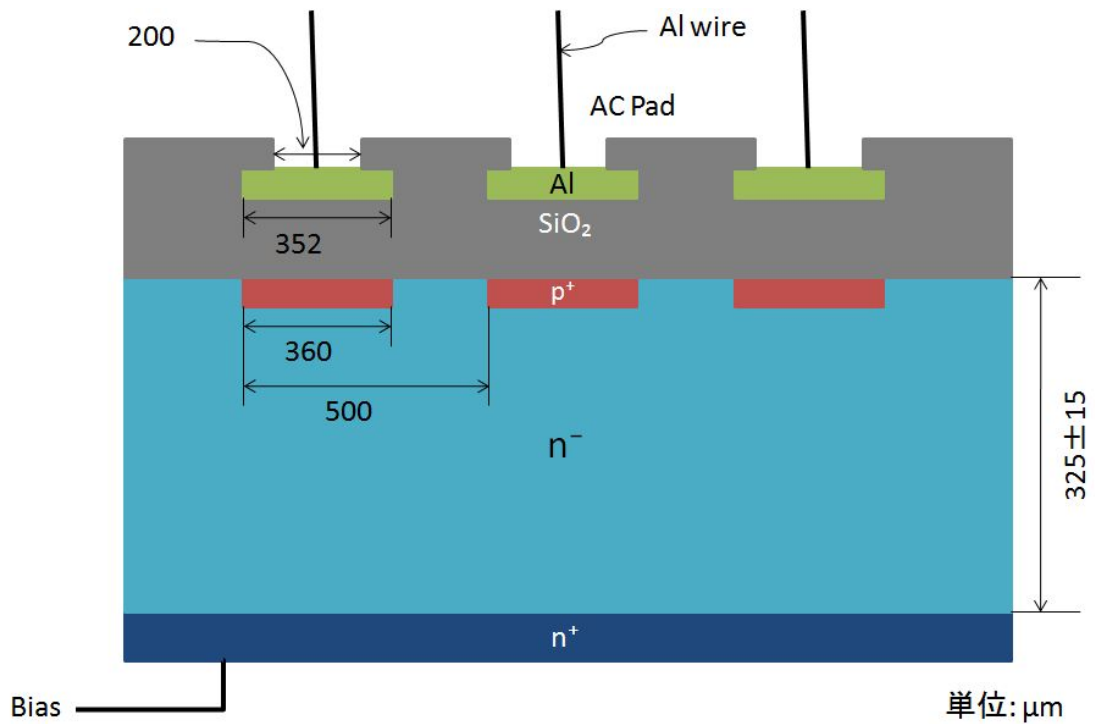


図 11 SSD を横から見た図

### 3.3.2 AC 結合型

本研究で使用した SSD は図 11 に示したように、Al と SSD が直接接合されている DC 結合型ではなく、SiO<sub>2</sub> を挟む AC 結合型を採用している。

これは、SSD 内部で生じた leakage current が流れ出してこないようにするために設計されたものである。

### 3.3.3 All-channel Readout

本研究で使用した SSD は数チャンネル間隔で読みだす Charge-division Readout ではなく、全チャンネルを読みだす All-channel Readout を採用している。

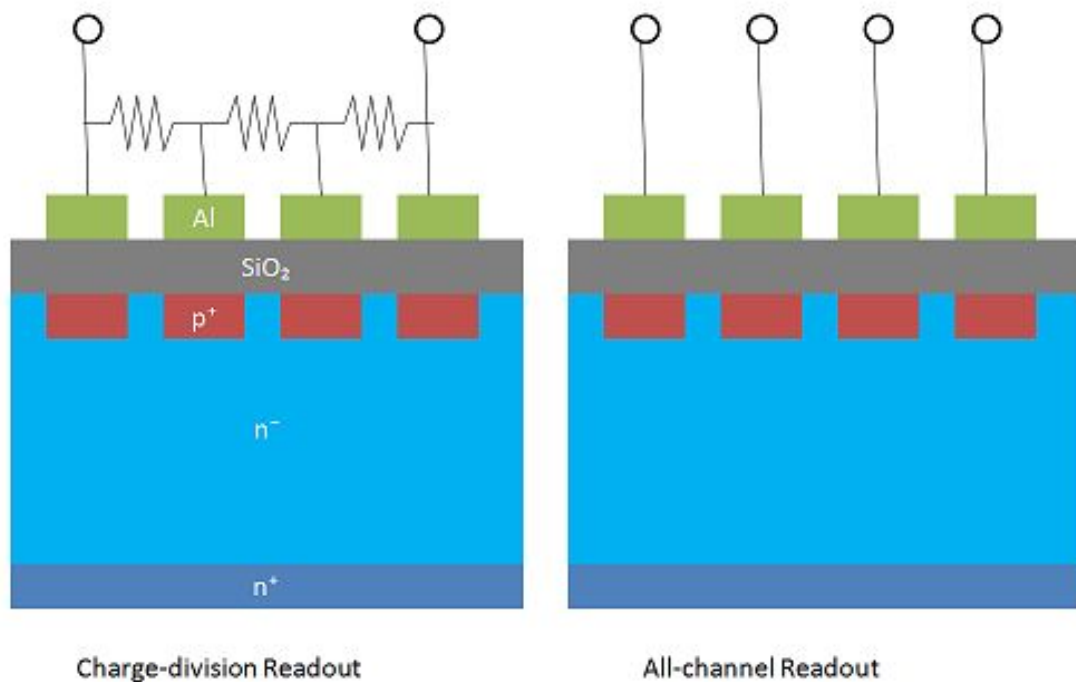


図 12 Readout

### 3.3.4 片面読み出し

片面読み出しとは、SSD の片側からのみ読みだすもので、1 次元の位置検出のみ可能である。本研究で使用した SSD はこの片面読み出しを採用している。

それに対し、両面読み出しは p<sup>+</sup> 側のストリップに直行する n<sup>+</sup> のストリップがあり、二次元の位置検出が可能である。

### 3.3.5 バイアス

バイアスは p<sup>+</sup> 層と n<sup>+</sup> 層の電位差としてかけられる。

p<sup>+</sup> には負の電圧がかかるので SiO<sub>2</sub> 膜内にバイアスによる電場が生じ電位差が大きくなり、帯電しやすくなってしまう。なので、n<sup>+</sup> 側にバイアスをかけ、p<sup>+</sup> 層の電位を GND に接続する。これによって上記のようなことを解消することができる。

また、p<sup>+</sup> と GND の間に Poly-Si 抵抗が挟んである。これは、Noise を減らしたり、leakage current が生じたときに、この部分での電圧降下を大きくするためである。

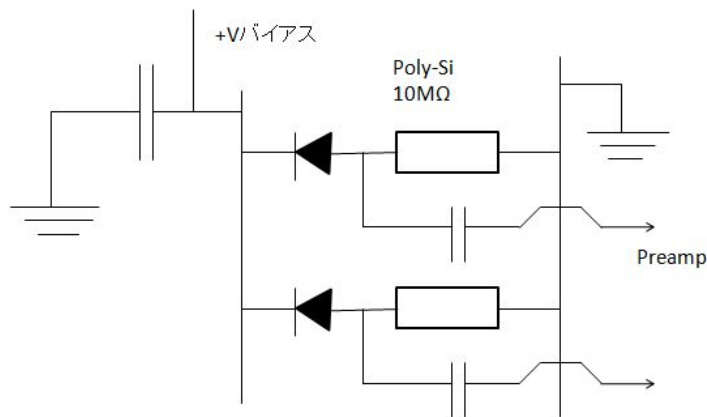


図 13 バイアス

### 3.3.6 TEKZ

SSD から出た信号は、TEKZ チップに入力される。TEKZ は信号を増幅、整形、デジタル化をする部分である。TEKZ の仕様を下表に示した。

Size	5.386 × 4.904 mm <sup>2</sup>
Number of channels	64
Shaping time	32ns
Gain	164 ± 7mV/fC
Output pulse width	40ns
Output pulse height	800mV

### 3.3.7 Front End Board

SSD と TEKZ チップを載せた基盤は Front End Board と呼ばれている (図 8 参照)。SSD から 144ch 分の信号が出るので、Front End Board に TEKZ チップは 3 つ載せられている。

### 3.3.8 ECL Driver Board

Front End Board から出た信号は ECL Driver Board に入力される。ここでは、TEKZ logic signal を ECL logic signal に変換している。一つの ECL Driver Board で 48ch 分変換できるので、一つの SSD に対して、3 つ ECL Driver Board が必要になる。

また、ECL Driver Board に SSD bias 用電圧、Front End Board を動作させる電圧 (+6V)、TEKZ の threshold controll 用電圧はすべてこの ECL Driver Board を介してかけられる。

ECL Driver Board の写真を下に載せる。

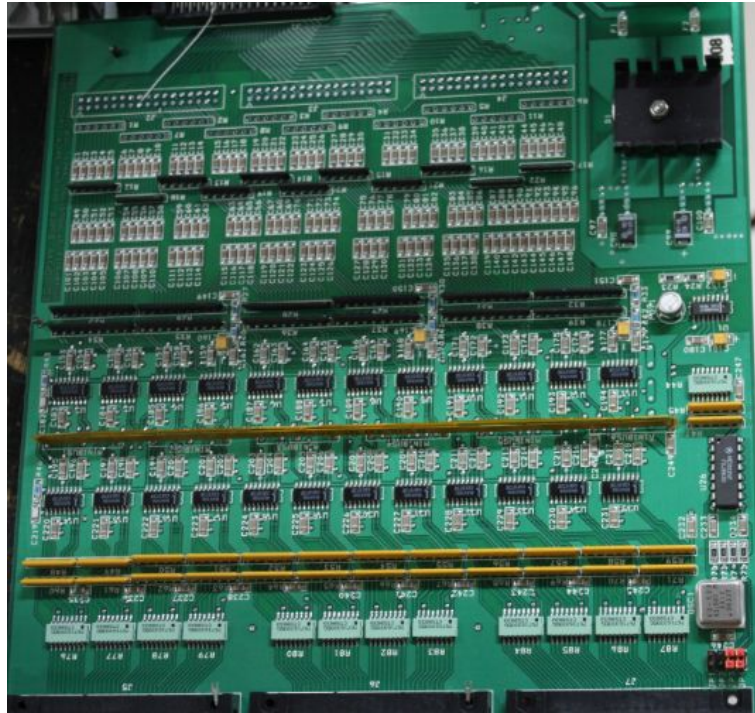


図 14 ECL Driver Board

## 4 検出効率とノイズと leakage current

本研究では、検出効率とノイズレベルと leakage current の測定を行った。以下にその測定方法と結果について述べる。

### 4.1 測定方法

#### 4.1.1 検出効率

まず、プラスチック・シンチレーターとそれに接続された光電子増倍管 (PMT) を SSD の下に置く。次に、SSD の上に 線源である  $^{90}\text{Sr}$  を置く。

そして、SSD から出た信号を TUL モジュールに入れる。TUL モジュールは自由に回路をプログラムできるもので、今回は 144ch 分の信号のうち、128ch 分 or 回路をとった。この 128ch 分の信号を coincidence モジュールに入れ、その信号を scalar に入れる。

PMT からの信号は discriminator でデジタル信号に変換し、Gate Generator モジュールに入れる。Gate Generator モジュールでは信号の width の調整、また、タイミング合わせのため、delay を行った。ここから出てきた信号は一方は SSD の信号で使用した coincidence モジュールに入れ、もう一方は scalar に入れた。

こうして、scalar には二つの信号が入ることになる。一つは SSD の信号と PMT の信号の coincidence の信号、もう一方は PMT の信号である。今回、検出効率を後者の信号のカウンタ数分の前者のカウンタ数と定義して測定した。

この測定方法を下図にまとめた。

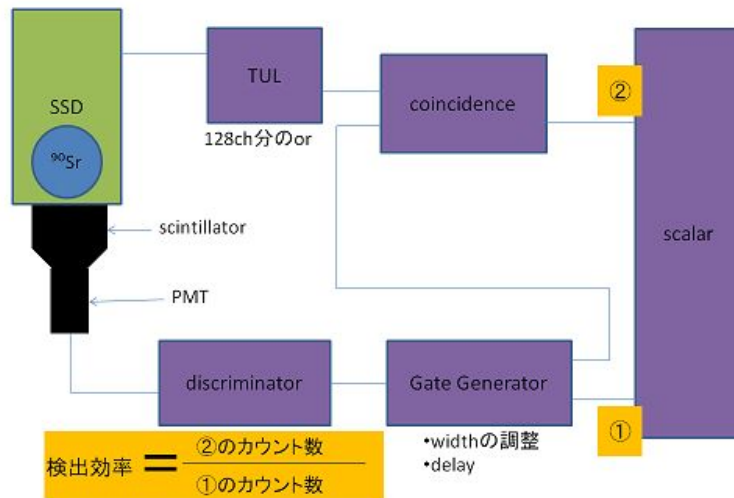


図 15 検出効率の測定方法

また、コリメートの方法は SSD に付属している金属の覆いがあり、それに穴があいていてそこ以外に線源が通らないように工夫して設置した。これを下図に示す。

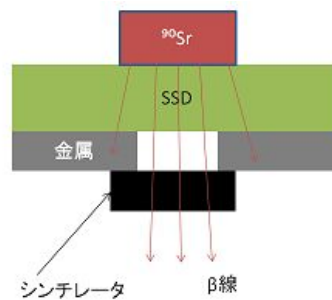


図 16 コリメート

以上のような方法で、SSD の threshold を 0.3~1.0V、バイアス電圧を 30~80V の領域で測定した。

#### 4.1.2 ノイズの測定方法

図 15 で、<sup>90</sup>Sr を置かず、SSD の信号の方で、TUL モジュールに入れたのち、coincidence モジュールに入れず、そのまま scalar でカウント数を測定して、それをノイズとして測定した。

#### 4.1.3 leakage current の測定方法

バイアス電圧を供給するモジュールの抵抗と電圧を測定する方法で測定を行った。

### 4.2 検出効率の結果

横軸を SSD の threshold(V)、縦軸を検出効率として結果をグラフにした。

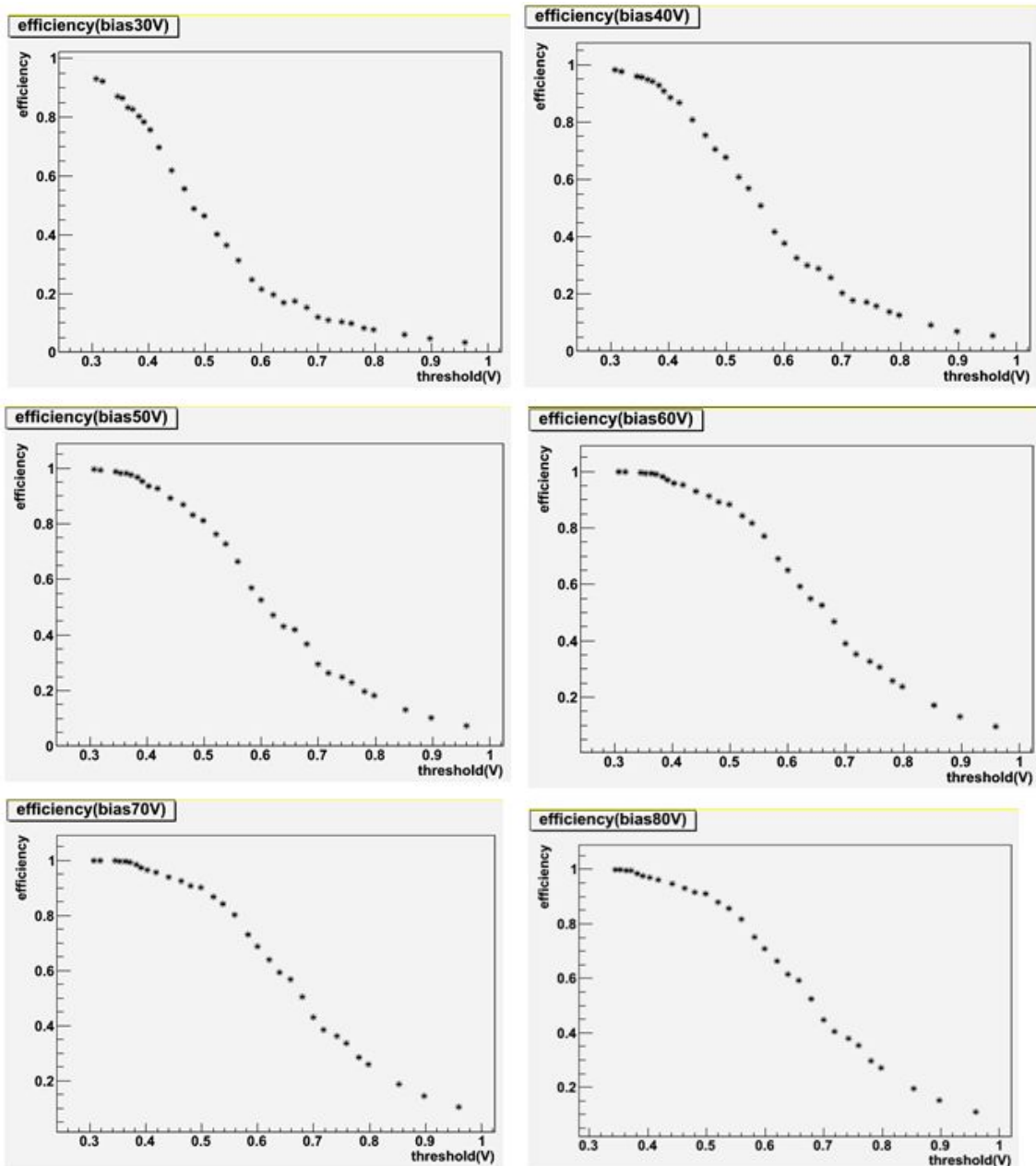


図 17 検出効率の結果

バイアス電圧が上がるほど検出効率上がるのがわかり、バイアス電圧が 70V と 80V では threshold < 0.418V で検出効率が 0.95 以上であることが分かる。



### 4.3 ノイズの結果

横軸を SSD の threshold(V)、縦軸をノイズのレート (Hz) として結果をグラフにした。

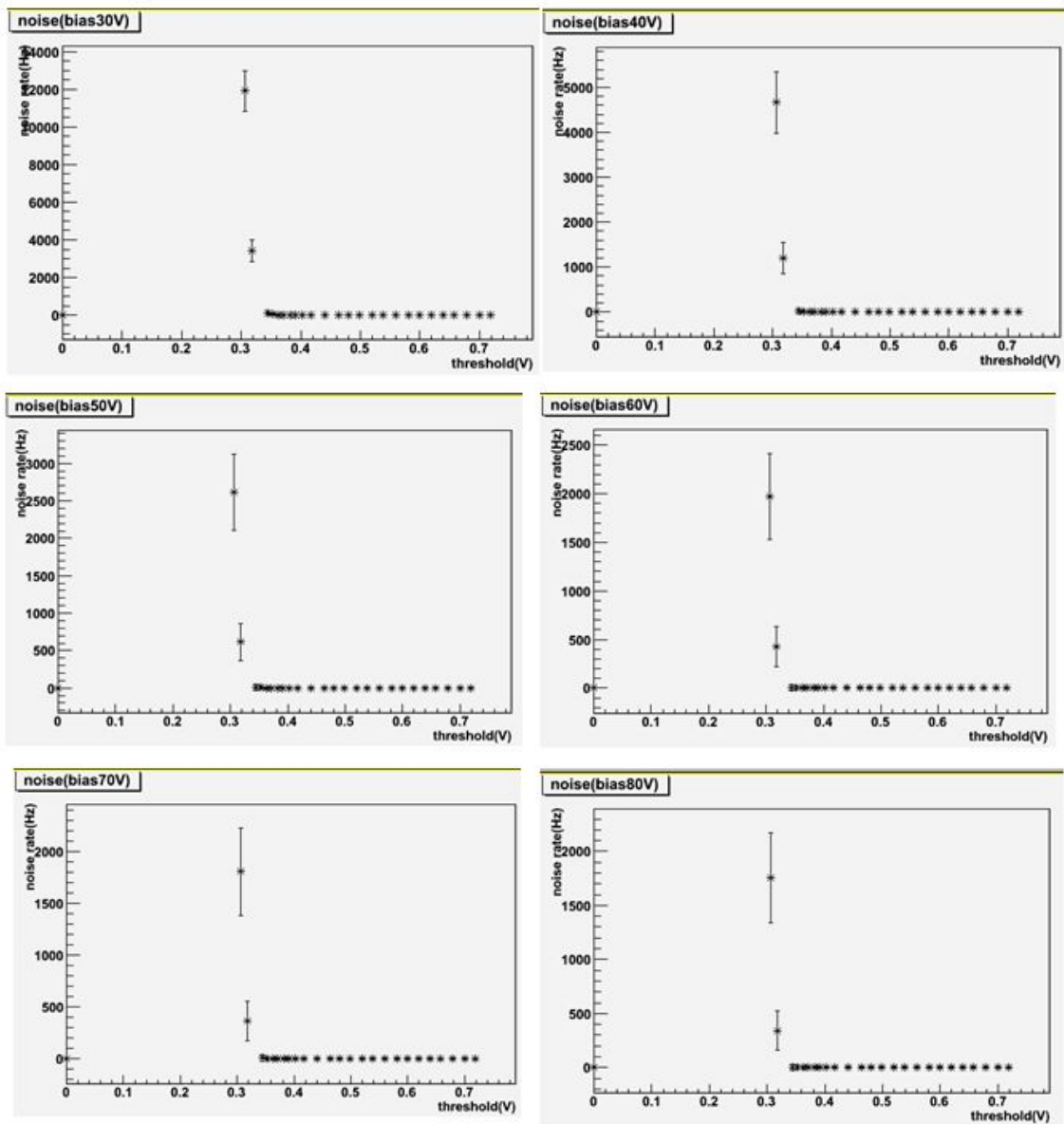


図 18 検出効率の結果

同様に threshold が 0.2V ~ 0.3V のところでも測定した。

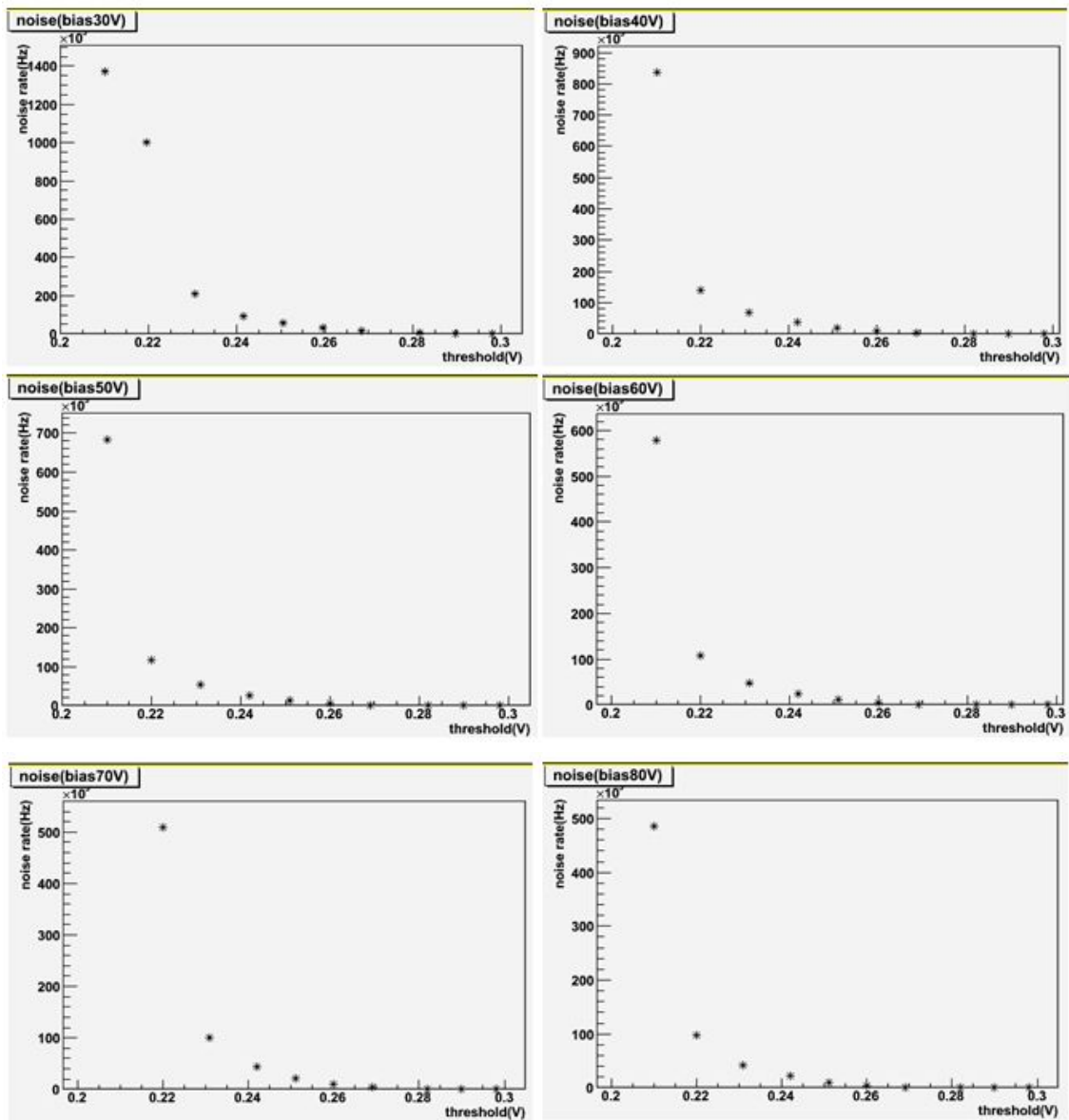


図 19 検出効率の結果

#### 4.4 leakage current の結果

下表に示す。

---

bias(V)	leakage current(A)
30	$1.20 \times 10^{-7}$
40	$1.21 \times 10^{-7}$
50	$1.22 \times 10^{-7}$
60	$1.23 \times 10^{-7}$
70	$1.24 \times 10^{-7}$
80	$1.25 \times 10^{-7}$

---

#### 4.5 検出効率の結果に対する考察

私は SSD のノイズの信号とシンチレーターの信号が coincidence してしまう可能性があると考えた。そこで、そのレートが上述の結果に対して無視できるか調べた。

$f$  を SSD のノイズとシンチレーターの信号が coincidence して出てきた信号のレート (Hz)、 $f_1$  を SSD のノイズのレート (Hz)、 $f_2$  をシンチレーターの信号のレート (Hz)、 $t_1$  を SSD の信号の幅 (s)、 $t_2$  をシンチレーターの信号の幅 (s) とすると、 $f$  は以下の式で記述できる。

$$f = f_1 f_2 (t_1 + t_2) \quad (2)$$

今回は  $t_1 = 1.6 \times 10^{-7}$ s、 $t_2 = 2.0 \times 10^{-7}$ s であった。

下に  $f$  と SSD とシンチレーターの信号の coincidence のレート  $f_{coin.}$  を比較した。

threshold(V)	$f_{coin.}$ (Hz)	$f$ (Hz)
0.306	$2.2 \times 10^3$	$1.0 \times 10^1$
0.318	$2.2 \times 10^3$	$2.9 \times 10^0$
0.344	$2.0 \times 10^3$	$7.9 \times 10^{-2}$
0.353	$1.8 \times 10^3$	$3.8 \times 10^{-2}$
0.363	$1.9 \times 10^3$	$9.7 \times 10^{-3}$
0.371	$1.9 \times 10^3$	$2.5 \times 10^{-4}$
0.382	$1.6 \times 10^3$	$8.7 \times 10^{-4}$
0.391	$1.6 \times 10^3$	$4.7 \times 10^{-4}$
0.403	$2.1 \times 10^3$	$5.8 \times 10^{-4}$
0.418	$2.1 \times 10^3$	$5.6 \times 10^{-4}$
0.441	$1.8 \times 10^3$	$5.5 \times 10^{-4}$
0.463	$1.6 \times 10^3$	$5.8 \times 10^{-4}$
0.480	$1.4 \times 10^3$	$6.5 \times 10^{-4}$
0.498	$1.4 \times 10^3$	$5.3 \times 10^{-4}$
0.520	$1.3 \times 10^3$	$4.5 \times 10^{-4}$
0.538	$1.3 \times 10^3$	$5.4 \times 10^{-4}$
0.559	$1.2 \times 10^3$	$5.9 \times 10^{-4}$
0.582	$1.0 \times 10^3$	$3.2 \times 10^{-4}$
0.599	$9.2 \times 10^2$	$4.9 \times 10^{-4}$
0.620	$9.0 \times 10^2$	$4.9 \times 10^{-4}$
0.639	$7.6 \times 10^2$	$4.5 \times 10^{-4}$
0.658	$6.3 \times 10^2$	$4.0 \times 10^{-4}$
0.679	$5.5 \times 10^2$	$3.8 \times 10^{-4}$
0.700	$5.8 \times 10^2$	$5.7 \times 10^{-4}$
0.718	$5.5 \times 10^2$	$2.2 \times 10^{-4}$

二桁以上違いがあるので  $f$  は考慮しなくてよいと判断した。

ここで、検出効率のデータから、バイアス電圧が 70V と 80V では  $\text{threshold} < 0.418\text{V}$  で検出効率が 0.95 以上であることが分かるので、バイアス電圧は 70V か 80V ぐらいが適当だと考えられる。

#### 4.6 ノイズの結果に対する考察

SSD のノイズは leakage current によるもの大きいと考えられる。その leakage current に対するノイズレート  $N(\text{Hz})$  は以下の式で書ける。

$$N = N_0 \exp\left(-\frac{((V_{th} - V_{off})/g)^2}{2\sigma_n^2}\right) = N_0 e^{-\frac{C_{th}^2}{2\sigma_n^2}} \quad (3)$$

$N_0$  は shaping time  $\tau_s$  の関数であり、 $\tau_s = 32\text{ns}$  のとき、4.4MHz である。

$\sigma_n$  はアンプに入力するノイズの電荷量であり、TEKZ の入力側から見た SSD の静電容量  $C_{total}$  と leakage current  $i_{amp}$  によって決まる量である。 $C_{total}$  に対するノイズレベル  $\sigma_C$  と leakage current に対するノイズレベル  $\sigma_i$  は以下の式で与えられる。

$$\sigma_C = 650e^- + 43 \times C_{total}[e^-] \quad (4)$$

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{2i_{amp}\tau_s}{e}} \quad (5)$$

total capacitance は 20pF 以下なので  $\sigma_C$  は  $1510e^-$  (0.24fC) 以下である。

また、 $\sigma_n$  は

$$\sigma_n = \sqrt{\sigma_C^2 + \sigma_i^2} \quad (6)$$

で与えられる。

さらに、 $V_{th}$  を SSD の threshold(mV)、 $V_{off}$  を入力電荷 0 のときに出力される電圧 (mV) とした。

得られた leakage current の結果を代入して、(3) 式を使って実際のノイズレートと下図で比較した。横軸を SSD の threshold(V)、縦軸をノイズレート (Hz)、点を実験データ、実線を (3) のデータとした。

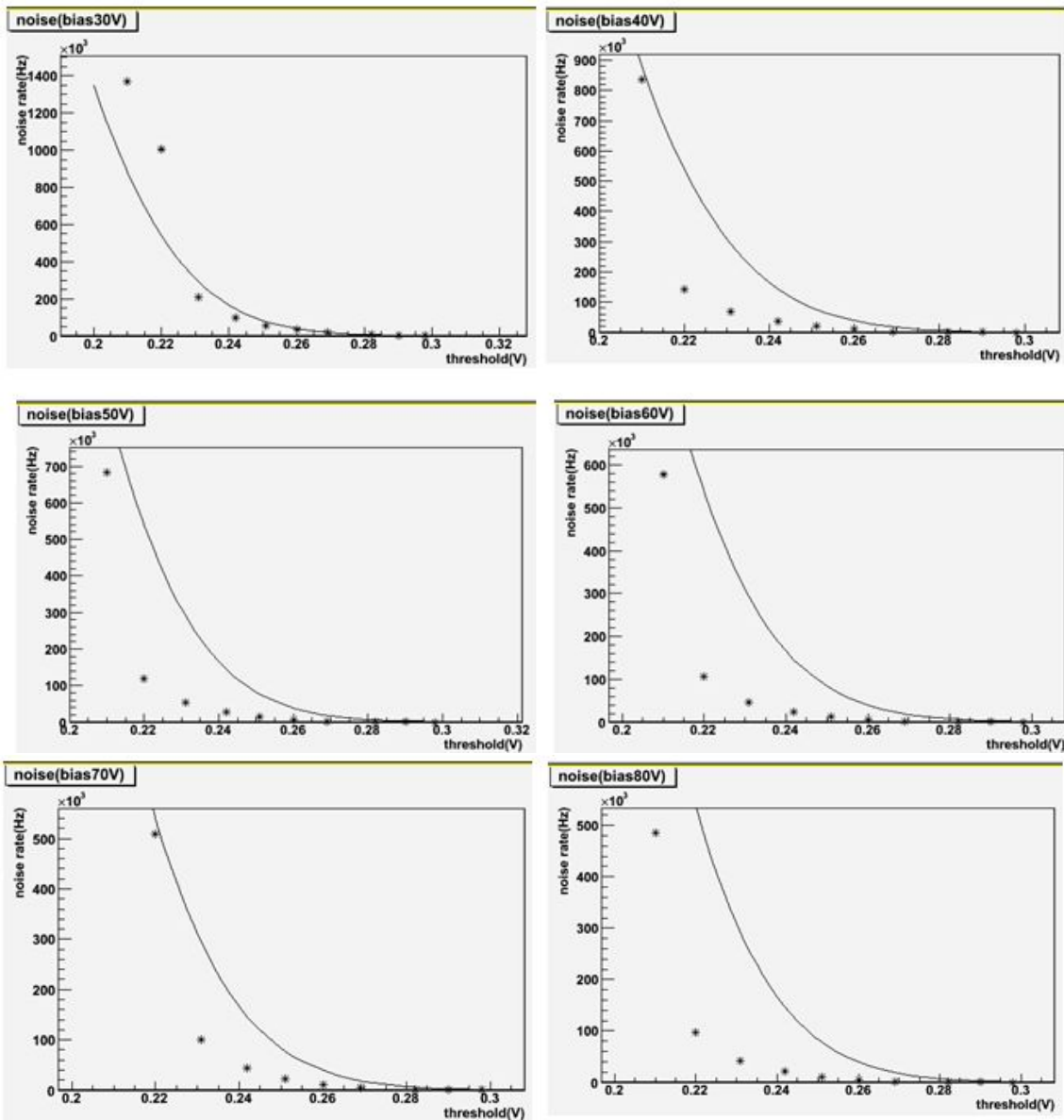


図 20 ノイズレートの比較

比較した結果バイアス電圧が 30V のとき以外、大きくずれている。これはノイズを測定したとき、一切遮光しなかったことが起因しているとは私には考えているが、よくわからなかった。

## 5 結論

128ch 分の or 回路をとり、検出効率とノイズレートを測定した。バイアス電圧 70V と 80V では SSD の threshold が 0.418V 以下で検出効率が 0.95 以上が達成された。また、ノイズレートは leakage current から見積もった理論値からずれていた。

## 6 謝辞

この研究の担当教官であった中村哲准教授、藤井優助教には研究をしていく上での細かい指導、装置の使い方を教えていただきました。鶴養美冬助教には詳しい装置の使い方やしくみを教えていただきました。永尾翔氏には同じく装置の使い方や崩壊 中間子分光実験の概要について教えていただくとともに、TUL モジュールで私の研究用の回路を組んでいただきました。

また、他の東北大学ストレンジネス核物理グループの方々にもミーティングでの細かい指導や、実験装置を扱う上でのノウハウを教えていただきました。

以上の方々全員に感謝申し上げます。

## 7 参考文献

### 参考文献

- [1] L. Tang, J.J. LeRose, O. Hashimoto, S.N. Nakamura, F. Garibaldi, P.Markowitz, J. Reinhold "Hypernuclear Spectroscopy"
- [2] 三好 敏喜, "(e, e'K<sup>+</sup>) 反応によるハイパー核分光用シリコン・ストリップ検出器の開発," 修士論文, 東北大学, 1998
- [3] 鵜養 美冬, "電子線によるハイパー核分光用シリコンストリップ検出器のふるまい," 修士論文, 東北大学, 2000
- [4] 永尾 翔, "電子線を用いたハイパー核崩壊パイ中間子分光実験手法の研究," 修士論文, 東北大学, 2010
- [5] E. Barberies et al. Nucl. Instrum. and Methods A364 (1995) 507