

ガンマブロック・スチルベン
中性子検出器の特性

1965 年 9 月

日本原子力研究所

Japan Atomic Energy Research Institute

ガンマブロック・スチルベン中性子検出器の特性

要 旨

数 MeV ないし十数 MeV の高速中性子検出器として 2 インチ径×2 インチ厚のスチルベン結晶を用い、ガンマ線を抑制（ブロック）する回路を併用した検出器を製作、テストした。ガンマブロックの回路としては DAHNICK-SHERR のものにいくらかの改良を加えて使用した。ガンマ線の抑制比、低エネルギー側における反跳陽子パルスの数え落し、高エネルギーガンマ線に対するレスポンスなどの特性を RI からのガンマ線、RaD-Be 中性子、2MV V. D. G. による T-p, D-d, T-d 中性子および $^{19}\text{F}(p, \alpha\gamma)^{16}\text{O}$, $^7\text{Li}(p, \gamma)^8\text{Be}$ 反応からの 6.14, 17.6 MeV ガンマ線を用いてテストした。これらのテストの結果、数 MeV 以下のエネルギーのガンマ線しか存在しない場合は、ガンマ抑制比を 1000:1 として相当低いエネルギーの反跳陽子 (~0.6 MeV) 迄ほとんど 100% の効率で検出できること、一方 10 MeV ないし 20 MeV のガンマ線が存在する場合は低エネルギー側の特性をやや犠牲にする必要があるが、1 MeV ないし 1.5 MeV の反跳陽子迄ほとんど 100% 検出できることが分った。実際にガンマ線バックグラウンドの多い (d, n), (^3He , n) 反応で残留核の基底準位、第一励起準位などに対応する中性子群を分離して測定することができた。

1965 年 6 月

東海研究所 研究部 原子核物理第1研究室
岡野 事行

Characteristics of a Gamma-block Stilbene Detector

Summary

A fast neutron detector of a gamma-ray suppressed type has been constructed, using a stilbene crystal 2" in diameter and 2" thick. The pulse-shape discrimination circuit used for the gamma-ray suppression is similar to that of DAHNICK and SHERR. Minor modifications and changes were done to the circuit parameters in order to improve the discrimination characteristics. The performance characteristics such as gamma-rejection ratio and recoil-proton counting efficiency at the low-energy side have been tested by using gamma-ray sources, a RaD-Be neutron source, and the neutrons from the T-p, D-d and T-d reactions. The response of the discrimination circuit to the high-energy gamma rays has also been tested by using the 6.14 and 17.6-MeV gamma rays from the $^{19}\text{F}(p, \alpha\gamma)^{16}\text{O}$ and $^7\text{Li}(p, \gamma)^8\text{Be}$ reactions, respectively. It is found that the lowest energy of recoil-protons which can be detected with almost 100% efficiency is about 0.6 MeV if the gamma-rejection ratio is maintained at 1000:1 and gamma rays with energies higher than several MeV are not present. If gamma rays of about 10- to 20-MeV energy are present, the characteristics at the low-energy side have to be sacrificed to suppress the high energy gamma rays, and the lowest energy of recoil protons which can be detected with almost 100% efficiency is 1 to 1.5 MeV.

Examples of neutron spectra measured by using the gamma-block detector are illustrated. The neutron groups from (d, n) and (^3He , n) reactions leading to the low-lying levels of residual nuclei are clearly resolved and discriminated from large gamma-ray backgrounds.

June, 1965

KOTOYUKI OKANO

Research Division, Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute

目 次

| | |
|-------------|----|
| 1. 序 論 | 1 |
| 2. 波形識別回路 | 1 |
| 3. 特性テスト | 4 |
| 4. 中性子スペクトル | 7 |
| 5. 結 語 | 12 |

図 目 次

| | | |
|---------|--|----|
| Fig. 1 | ガンマブロック・スチルベン中性子検出器の識別パルス整形回路 | 2 |
| Fig. 2 | 識別パルス増幅用前置増幅器回路 | 3 |
| Fig. 3 | 実験装置とガンマブロック検出器回路構成 | 3 |
| Fig. 4 | 識別パルスに対するディスクリミネーター・バイアスの函数としてのガンマ抑制比 | 4 |
| Fig. 5 | 識別パルスの波高分布測定の際の回路構成 | 5 |
| Fig. 6 | 一定エネルギーの反跳陽子からの識別パルスの波高分布 | 6 |
| Fig. 7 | 低エネルギー反跳陽子の計数効率 | 7 |
| Fig. 8 | RaD-Be および ThC' からの中性子とガンマ線のスペクトル | 8 |
| Fig. 9 | T-p 反応による 680 keV 中性子のスペクトル | 8 |
| Fig. 10 | D-d 反応による 4.63 MeV 中性子のスペクトル | 9 |
| Fig. 11 | 4.63 MeV 中性子のスペクトル (光電管電圧 1500 ボルトの場合) | 9 |
| Fig. 12 | T-d 反応による 15.85 MeV 中性子のスペクトル | 10 |
| Fig. 13 | ${}^9\text{Be}(\alpha, n){}^{12}\text{C}$ 反応からの中性子スペクトル | 10 |
| Fig. 14 | ${}^{27}\text{Al}(d, n){}^{28}\text{Si}$ 反応からの中性子スペクトル | 11 |
| Fig. 15 | ${}^9\text{Be}({}^3\text{He}, n){}^{11}\text{C}$ 反応からの中性子スペクトル | 11 |

Contents

| | |
|---------------------------------------|----|
| 1. Introduction | 1 |
| 2. Pulse-shape discrimination circuit | 1 |
| 3. Performance test | 4 |
| 4. Neutron spectra | 7 |
| 5. Conclusion | 12 |

Figure Contents

| | | |
|---------|---|----|
| Fig. 1 | Circuit diagram used for pulse-shape discrimination | 2 |
| Fig. 2 | Circuit diagram of a preamplifier used for amplification of discrimination signals | 3 |
| Fig. 3 | Experimental arrangements and block diagram of a gamma-block neutron detector | 3 |
| Fig. 4 | Gamma-ray rejection ratio | 4 |
| Fig. 5 | Block diagram of the circuits used to obtain pulse-height distributions of discrimination signals | 5 |
| Fig. 6 | Pulse-height distributions of discrimination signals | 6 |
| Fig. 7 | Counting efficiency of recoil-proton pulses | 7 |
| Fig. 8 | Spectra of neutrons and gamma rays from RaD-Be and ThC' | 8 |
| Fig. 9 | Spectrum of 680-keV neutrons | 8 |
| Fig. 10 | Spectrum of 4.63-MeV neutrons | 9 |
| Fig. 11 | Spectrum of 4.63-MeV neutrons taken with reduced photomultiplier voltage | 9 |
| Fig. 12 | Spectrum of 15.85-MeV neutrons | 10 |
| Fig. 13 | Spectrum of neutrons from the ${}^9\text{Be}(\alpha, n){}^{12}\text{C}$ reaction | 10 |
| Fig. 14 | Spectrum of neutrons from the ${}^{27}\text{Al}(d, n){}^{28}\text{Si}$ reaction | 11 |
| Fig. 15 | Spectrum of neutrons from the ${}^9\text{Be}({}^3\text{He}, n){}^{11}\text{C}$ reaction | 11 |

1. 序 論

高速中性子検出器としてアントラセン、スチルベン、プラスチックなどの有機シンチレーターはその効率が高いこと、パルスの減衰時間が短いこと、パルス波高によりエネルギーの選別ができること、などにより広く使用されている。これらのシンチレーターは普通には中性子に対してのみならず、ガンマー線に対してもよく感じるという欠点をもっている。しかしアントラセン、スチルベン、およびある種の液体シンチレーターではそのシンチレーションに速く減衰する成分(数 ns ないし数十 ns で減衰)とゆっくり減衰する成分(数百 ns 或はそれ以上で減衰)があり^{1),2)}、そのおのおの強度比が電子(ガンマー線)と反跳陽子(中性子)に対して異なっていることを利用してガンマー線を取除き中性子だけ検出することができる。シンチレーションの波形の相違を取出す方法にはすでに多くの方式、回路が考案され^{3),3'),4)} 実用化されているが、比較的回路も簡単で性能がよく、かつ計数率が多い場合にも使用できる型として Brooks の回路⁵⁾ を少

し改良した DAHNICK-SHERR の回路⁶⁾ を使用した。実際には二三の点で更に変更を加えて改善した。螢光体としては Harshaw Chemical Co. から購入した 2 インチ径×2 インチ厚のスチルベン結晶を使用した。検出器のガンマー線抑制に対する特性や実際に得られたスペクトルなどについて報告する。

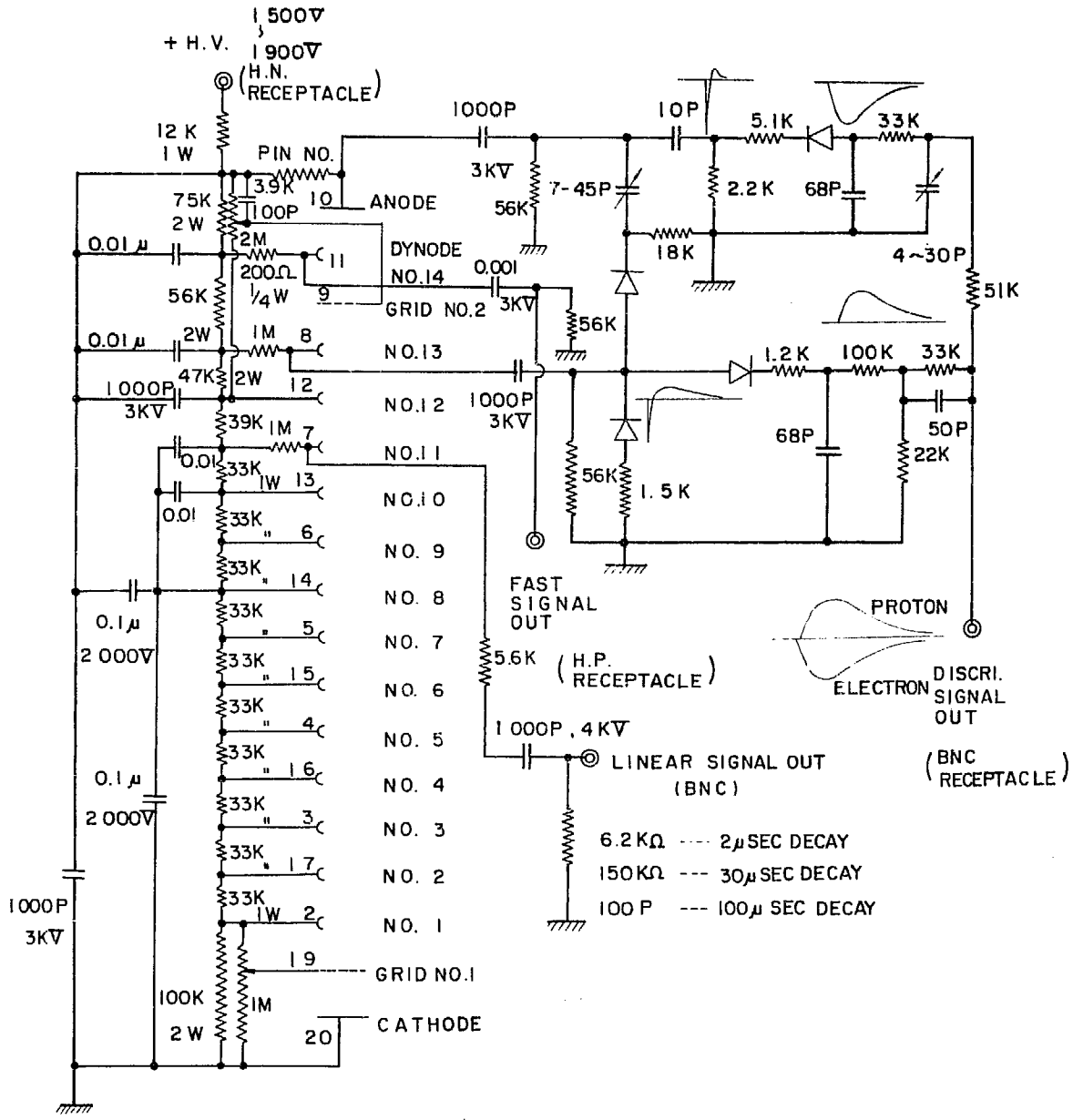
使用目的は主として軽い核の ($^3\text{He}, n$), (d, n) 反応などによる比較的エネルギーの高い中性子群、特に残留核の基底準位や第一励起準位などに対応する中性子群をエネルギー的に分けて測定することにあつた。したがってガンマー線をほとんど完全に抑制すると共に、パルス波高分布のエネルギー分解能のよいことも要求された。 ^3He の二価ビームによる反応ではビーム強度の点から飛行時間法が使用できないので、特にこの方法は効率も高く有望と思われる。その他中性子に対する全断面積や中性子非弾性散乱の測定にも有効に使用することができる。

2. 波形識別回路

実際に使用した 6810A のブリーダー回路と識別パルスを取り出す波形識別回路を Fig. 1 に示す。参考文献 6) の回路に比し、速いパルスの微分時間をさらに短くして固定とした。また、デカップリング・コンデンサーを大きくして波形の歪みを少なくした。これらは後に述べる低エネルギー側での特性の改善に役立った。識別信号取出しに際しては特にパルスの立上りをおそくさせぬよう 50 pF の結合コンデンサーを使用している。ダイオードの種類は特性にあまり影響がなかった。識別パルスの取出される過程は次の通りである。

アノードから取出された速いパルス(立上り時間 15 ns, 減衰時間 100 ns) は 10 pF の結合コンデンサーと 2.2 k Ω の抵抗でクリップ(微分)される(立上り時間 \sim 10 ns, 減衰時間 18 ns)。このクリップされたパルスの高さはシンチレーションの速い成分(減衰時間約 6

ns の成分) にほぼ比例すると考えられる。このクリップされたパルスはダイオードおよびそれに続く RC 回路で波形整形される(立上り時間 0.6 μ s, 減衰時間 2.6 μ s)。一方、最後から 2 番目のダイオードから取出された積分パルスは、最初の 100 ns 位の部分はアノードからの大きな速い負のパルスにより打消され、100 ns 以後の積分波形がダイオードおよびその後の RC 回路で整形される。その整形されたパルス(立上り時間 1 μ s, 減衰時間 4 μ s) の高さはほぼおそい成分(減衰時間約 370 ns の成分) の積分に比例する。この二つの整形されたパルスの差が識別パルスとして取出される(立上り時間 \sim 1.5 μ s, 減衰時間 \sim 8 μ s)。光電管の第 2 グリッドの電圧を変えることにより、二つのパルスの大きさを適当に調整すると反跳陽子(中性子)に対しては正極性、電子(ガンマー線)に対しては負



DIODE - 1N 39
 RESISTOR 5%
 右側回路の抵抗 1/4 ~ 1/2W

6810A

Fig. 1 Circuit diagram used for pulse-shape discrimination with a 2 φ × 2 stilbene crystal.

極性の識別パルスが得られる。識別パルスは、Fig. 2のプリアンプを通して増幅され、かつガンマ線によるパルスはダイオードによってカットされる。この後比例増幅器およびディスクリミネーターを通して256チャンネル波高分析器のコインシデンス・ゲート・パルスとして使用する。シンチレーションの大きさに比例するリニヤー・パルスは最後から4番目のダイノードより取出され、増幅されたのち256チャンネル波高分析器に入れられる。このリニヤー・パルスに識別パルス

のコインシデンスをかけると、中性子のみの波高分布が得られるわけである。実際の実験に際しての系統図をFig. 3に示した。

ガンマブロック回路の特性は識別パルスの特性によるわけであるが、テスト中に判明した二、三の問題点を次に述べる。

識別パルスの波高は正極性側、負極性側共に反跳陽子および電子の波高にほぼ比例するはずであるが、光電管やダイオードの特性のため必ずしもそうならな

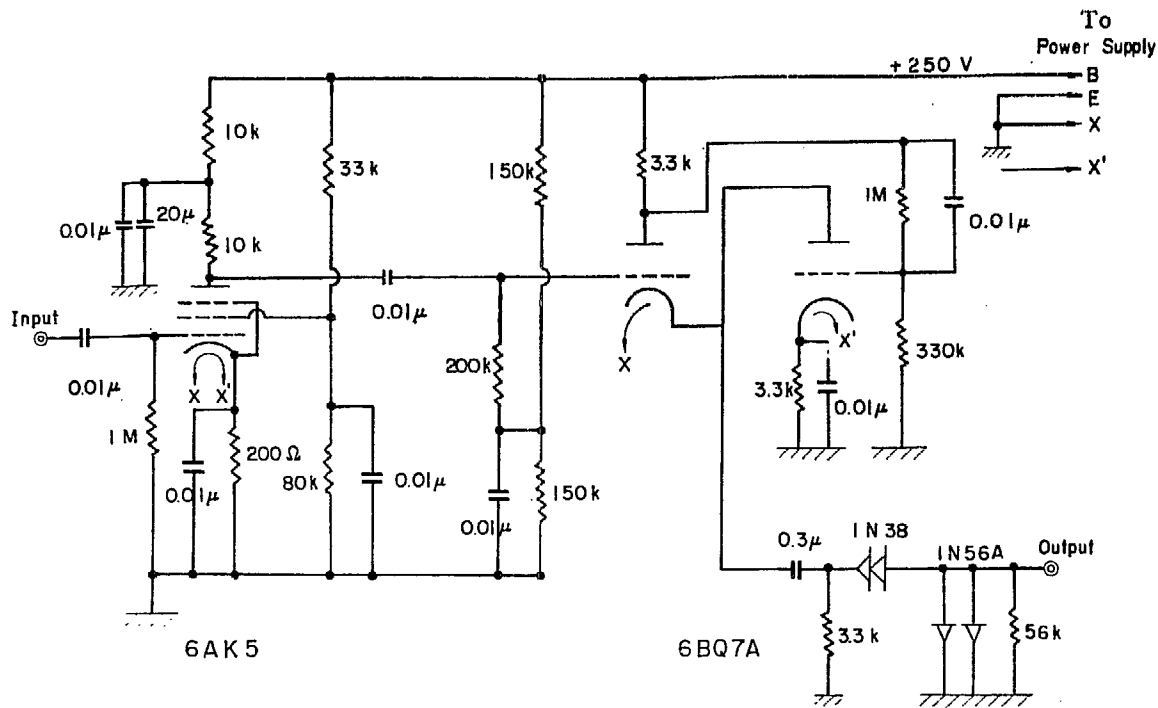


Fig. 2 Circuit diagram of a preamplifier used for amplification of discrimination signals

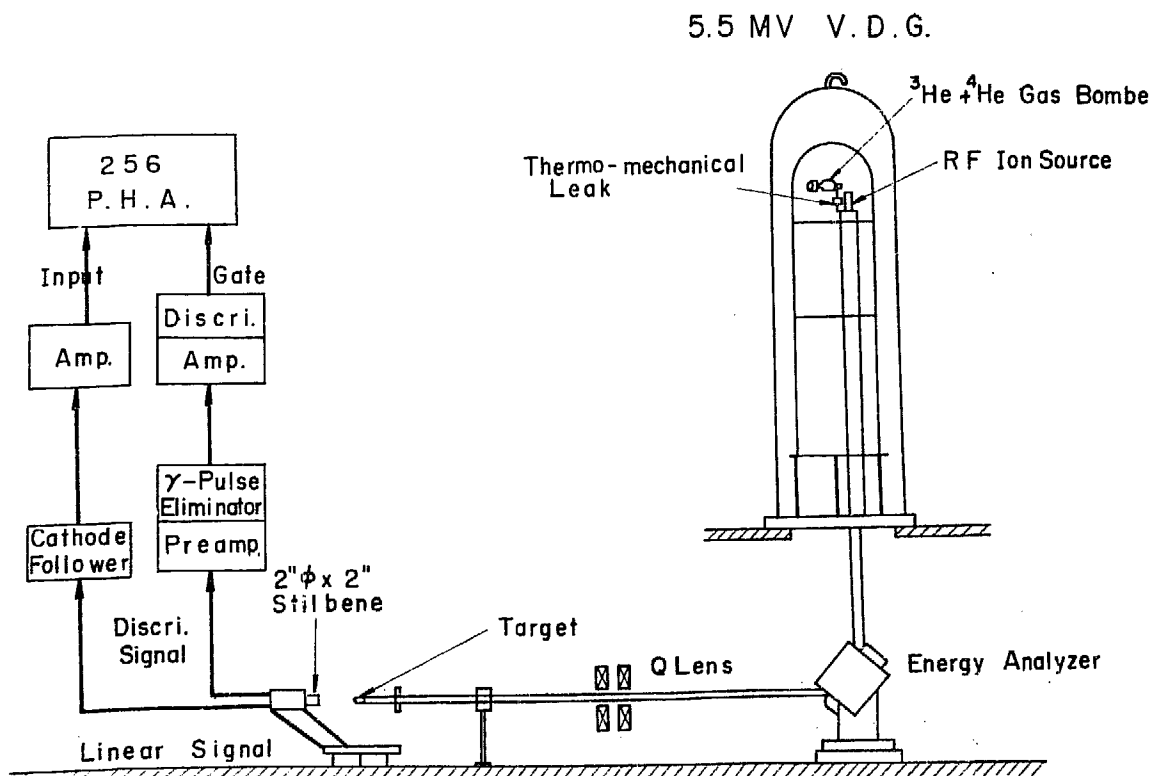


Fig. 3 Experimental arrangements and block diagram of the gamma-block neutron detector.

い。

(1) 低いエネルギー(数百 keV)の電子による識別パルスが低い波高ではあるが正側(反跳陽子側)に出るため低エネルギーでの特性が悪くなる。この正に出る波高は光電管にかかる電圧を変えてもあまり変わらないので、電圧を高くする程低エネルギー側での特性はよくなる。この正極性側に電子パルスが出る原因ははっきり突止められなかったが、光電管によりいく分出方は異なり、又デカップリングや速いパルスのクリッピングの改善によって相当減少した。

(2) 高いエネルギーのガンマー線が入ってきた場合、アノードに出る速いパルスの飽和現象が起るため識別パルスの一部分が正側にスイングする。これを避けるためには、なるべく光電管にかかる電圧を低くしてパルスを小さくしなければならない。

(3) ダイオードの特性が温度に敏感なため識別パルスの波高はあまり安定でない。

これらの点は光電管の特性や回路の特性によって変ると思われるが、Fig. 1 の回路で 6810 A を 1900 V ~1500 V の電圧で使用しテストした結果を述べる。

3. 特性テスト

(1) 識別パルスのコインシデンスによってガンマー線がどの位取除かれるか、正確にはエネルギー E_e の電子に対するコインシデンスをかけない場合とかけた場合の計数の比(これを抑制比, rejection ratio という)を Fig. 3 の回路によってテストした。 ^{60}Co のガンマー線による反跳コンプトン電子を使用した。Fig. 4 に結果を示す。Fig. 4 において、横軸の識別パルスに対するディスクリ・バイアスはボルトの他に対応する電子エネルギーで表わしてあり、これは ^{137}Cs の 477keV コンプトン電子と同じリニヤール・パルス波高をもつ反跳陽子による識別波高を 477keV として比例的に較正したものである。Fig. 4 よりたとえ 100 ~150keV の電子に対しては $E_e=30\text{keV}$ 位のバイアスで 1000 : 1 の抑制比の得られることがわかる。

(2) 識別パルスに対するディスクリミネーター・バイアスを上げるとガンマー線に対する抑制比は良くなるが、反跳陽子パルスの方も低エネルギーの方が落ちることとなる。その割合を調べるため RaD-Be からの中性子を用い、Fig. 5 に示したように識別パルスを増幅して 256 チャンネル波高分析器に入れ、一定波高のリニヤール・パルスでゲートを開き識別パルスの波高分布を調べた。Fig. 6 に結果を示す。リニヤール・パルスの波高は ^{137}Cs のコンプトン電子を用いて比例的に較正し、図の右下にそれぞれのカーブに対して記してある。

(3) Fig. 6 のグラフから、ある値に識別パルスのディスクリ・バイアスをおいた場合の反跳陽子に対する計数効率を求めることができる。ガンマー抑制比が ^{60}Co および ^{137}Cs のガンマー線による反跳コンプト

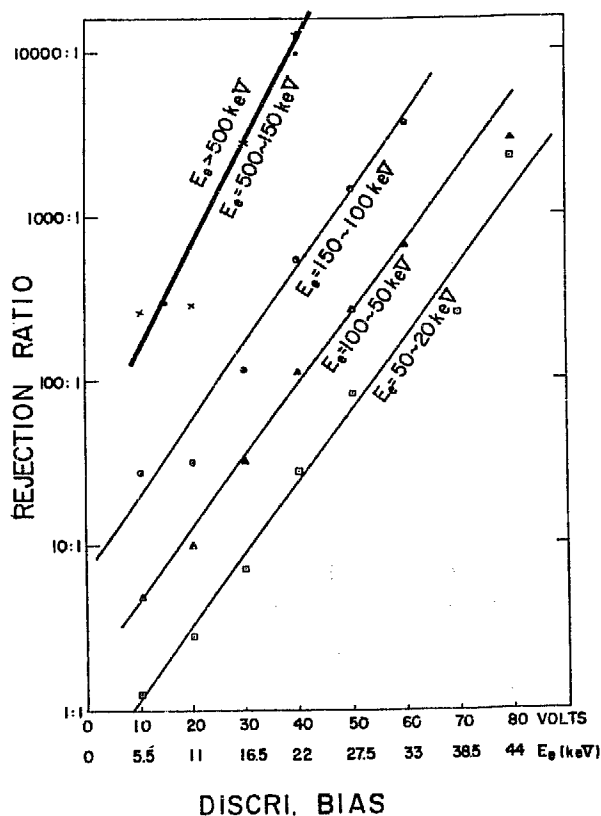


Fig. 4 Rejection ratio for electrons of energy E_e as a function of bias voltage for discrimination signals. The measurements have been performed by using Compton electrons from the ^{60}Co gamma-rays and the arrangements shown in Fig. 3. The photomultiplier voltage used is 1900 V. The discriminator bias voltage for the discrimination signals is calibrated by the pulse height of recoil protons which have light output equal to that of ^{137}Cs Compton-edge electrons ($E_e=477$ keV). The counting rates of linear signals are 5400 counts/sec and 2800 counts/sec for electrons with energies higher than 20 keV and 500 keV, respectively.

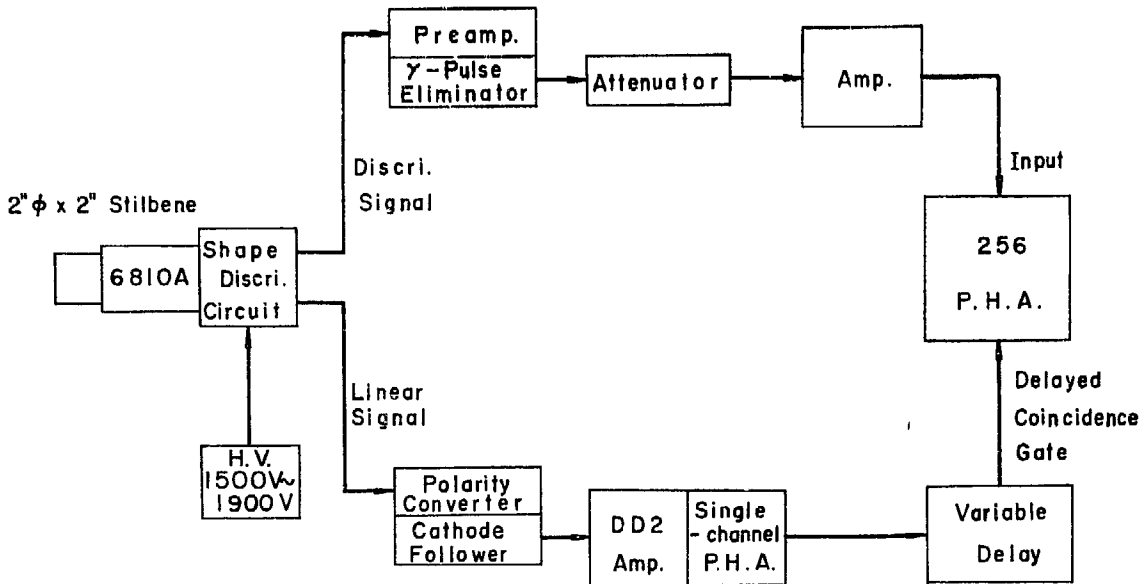


Fig. 5 Block diagram of the circuits used to obtain pulse-height distributions of discrimination signals. A part of linear signals which corresponds to a definite recoil-proton energy is selected and fed to a delayed coincidence gate, which admits the corresponding discrimination signals to be displayed on a 256-channel pulse-height analyzer.

ン電子で $E_e \geq 10\text{keV}$ のすべてのパルスに対して 100 : 1 あるいは 1000 : 1 になるようにディスクリ・バイアスを定めた場合の反跳陽子計数効率を Fig. 7 に示す。これから電子のエネルギーにして約 75 keV, すなわち約 550 keV 以上のエネルギー* の反跳陽子はほとんど 100% 計数できることがわかる。

Fig. 4, 6, 7 は、光電管電圧 1900V で ^{60}Co と RaD-Be を用いて得られた結果であるが、 $^{19}\text{F}(p, \alpha\gamma)^{16}\text{O}$ 反応による 6.14 MeV ガンマー線でテストしたところ、6MeV 位より高いエネルギーのガンマー線が入射した場合、先にも述べたようにアノードの飽和現象のため電圧 1900V では識別パルスの一部が正側にスイングすることが分った。これを避けるためには電圧を下げる必要があり、1800V にすれば ~6 MeV のガンマー線は抑制できる。 $^7\text{Li}(p, \gamma)^8\text{Be}$ 反応による 17.6 MeV および 14.7 MeV のガンマー線の場合は、これを完全に抑えるには電圧を 1500V まで下げる必要のあることがわかった。光電管電圧を下げた場合、反跳

陽子の識別パルスは小さくなるが、先に (1) でも述べたように、ガンマー線によるわずかに正側に現れる識別パルスの波高は大して変化しないのでディスクリ・バイアスはあまり下げられず、結局、低エネルギー側での反跳陽子の数え落しが多くなる。すなわち、Fig. 7 に示された様なグラフをとった場合、反跳陽子計数効率が 100% より落ちる点がエネルギーの高い方へずれる。T-p および D-d 中性子を用いてテストした結果、ガンマー抑制比がほぼ 1000 : 1 になる様識別パルスのディスクリ・バイアスをきめた場合、光電管電圧 1800V では $E_p \sim 600\text{keV}$, 1600V では $E_p \sim 1.1\text{MeV}$, 1500V では $E_p \sim 1.4\text{MeV}$ の反跳陽子迄はほとんど 100% 計数できることが分った。

使用されたガンマーブロック回路は計数率が高い場合にも使用するという特徴があるが⁶⁾、実際約 5000 カウント/秒 以下ではほとんど波高分布の歪みなく測定し得た。10⁴ カウント/秒 以上になるとパルスのパイル・アップのため波高分布に歪みが生じるので、実際の使用に際しては平均のパルス間隔がなるべく 100 μs 以上になる様留意した。

* スチルベンの電子と陽子に対する波高比はガンマー・ソースによるコンプトン電子および T-p, D-d 中性子を用いて実測した。

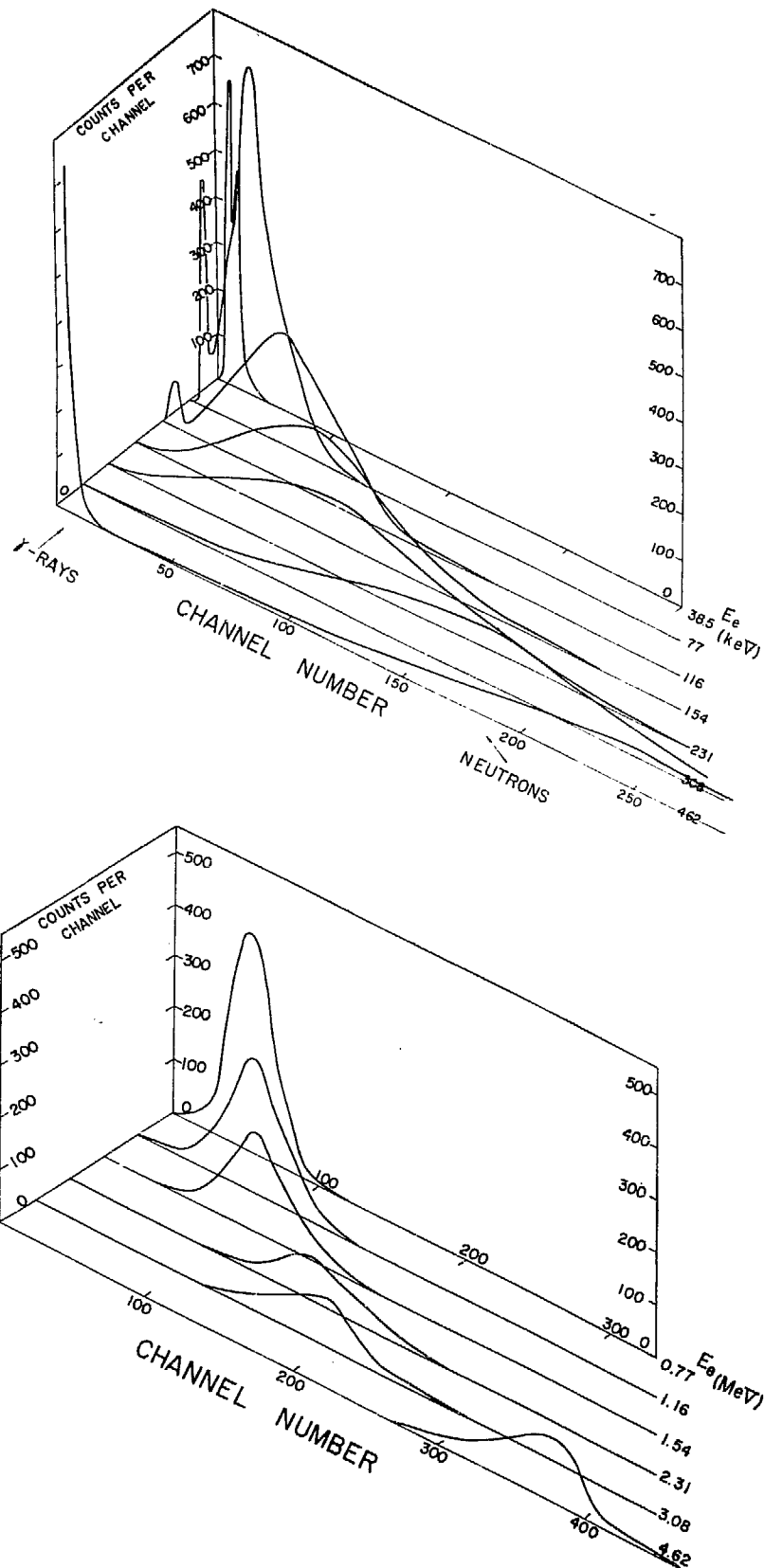


Fig. 6 Pulse-height distributions of discrimination signals corresponding to a series of recoil-proton energies, measured by the arrangement shown in Fig. 5. The recoil-proton energies selected by a coincident linear-signal gate are indicated at right sides of the figures in equivalent electron energies (E_e).

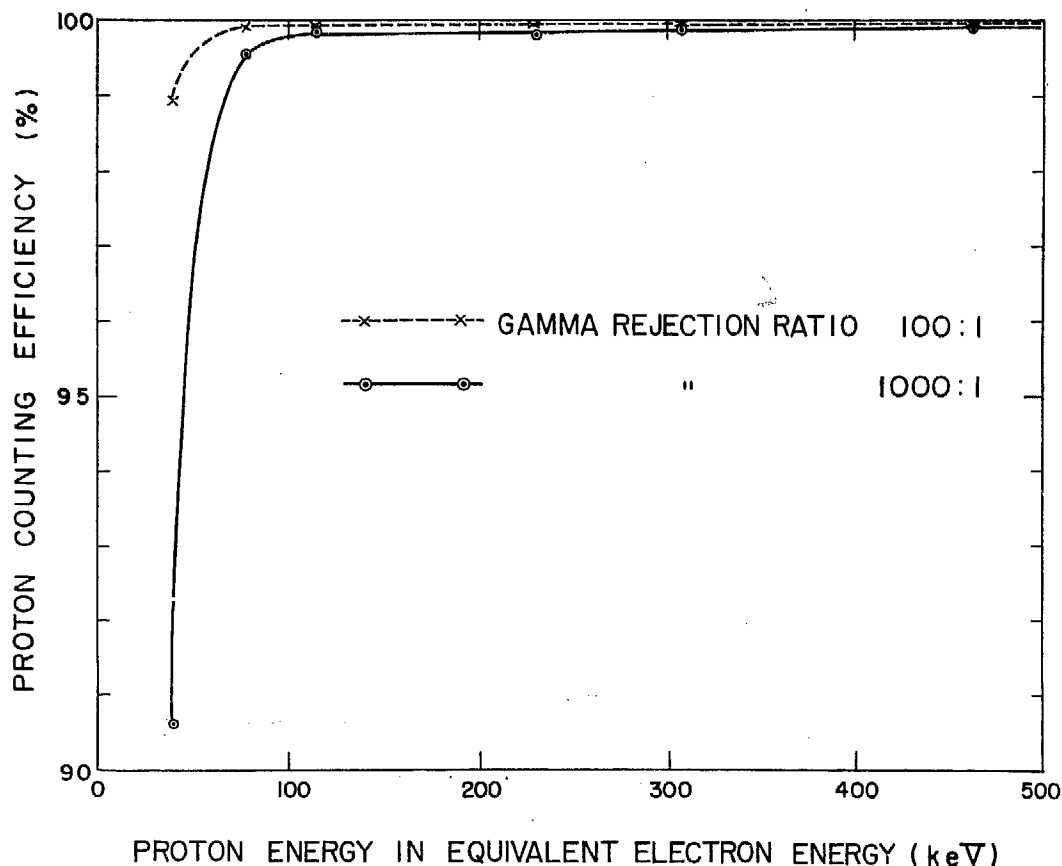


Fig. 7 Counting efficiency for recoil-proton pulses as a function of recoil-proton energy. The recoil-proton energy is expressed in equivalent electron energy in keV. The discriminator bias for shape-discrimination signals is set to eliminate 99% (dashed curve) or 99.9% (solid curve) of electron pulses of energies above ~10 keV, initiated by gamma rays from ¹³⁷Cs or ⁶⁰Co. The photomultiplier voltage used is 1900 V.

4. 中性子スペクトル

実際にとったパルス波高分布のいくつかの例を示す。いずれも識別パルスによるコインシデンス・ゲートをかけた場合（中性子のみのスペクトル）と、かけない場合（中性子とガンマー線との混ったスペクトル）とを比較して示した。

Fig. 8 : RaD-Be 中性子源からの最高 11MeV の連続エネルギー中性子と 4.43MeV ガンマー線に対するスペクトル。ThC'' ガンマー・ソース (2.62 MeV) をそばに置いてもコインシデンス・ゲートをかけるとガンマー線はきれいに抑制される。ThC'' を置いた場合の全計数率は $E_e \geq 200$ keV のパルスに対し 2300 カウント/秒。

Fig. 9 : T-p 反応による 680 keV 中性子のスペクトル。

光電管電圧は 1800V であり、識別パルスのディスクリ・バイアスはガンマー線がほとんど完全に抑制される (1000:1 程度) 点において、 $E_p \sim 600$ keV の反跳陽子は、ほとんど落しなく計数されることがわかる。

Fig. 10 : D-d 反応による 4.63 MeV 中性子のスペクトル。光電管電圧 1900 V。コインシデンスをかけない場合は低エネルギーの方にガンマー線が出ている。

Fig. 11 : Fig. 10 と同じく 4.63 MeV 中性子のスペクトルであるが、光電管電圧を 1500V に下げた場合。このスペクトルでは $E_p \sim 1.7$ MeV の反跳陽子はほとんど落しなく計数されている。

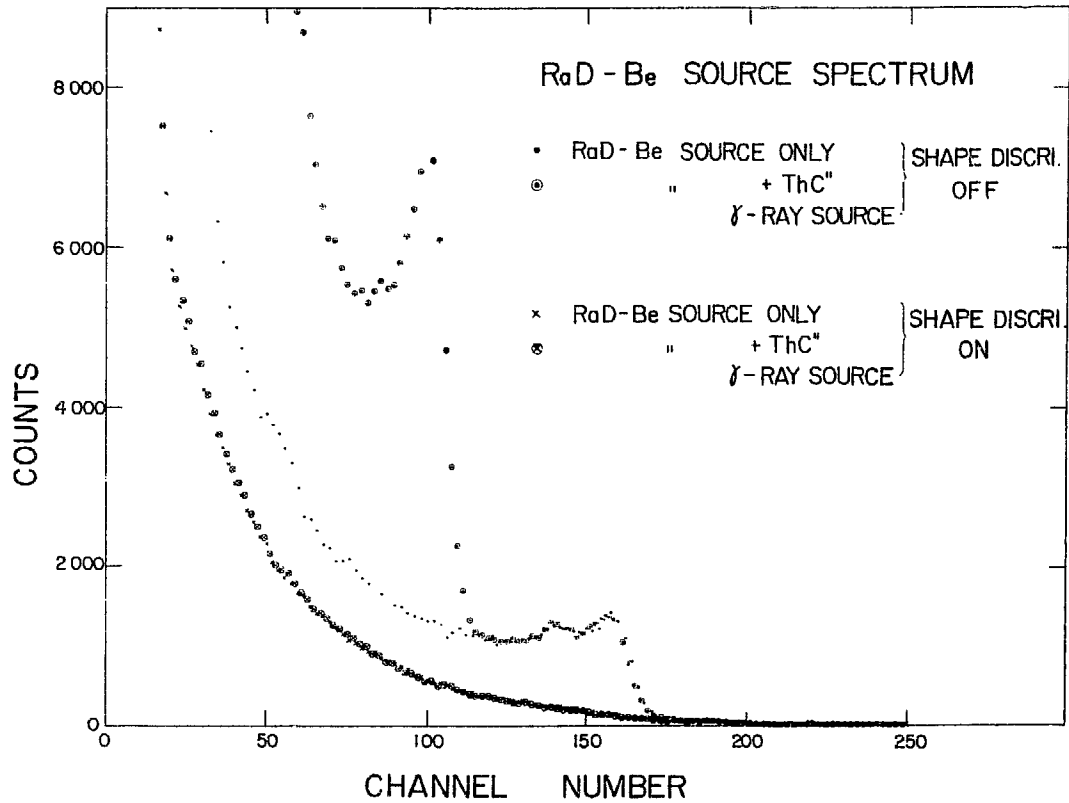


Fig. 8 Spectra of neutrons and gamma rays from a RaD-Be neutron source and from ThC²³². With a coincidence gate on, the 4.43- and 2.62-MeV gamma rays from these sources are rejected.

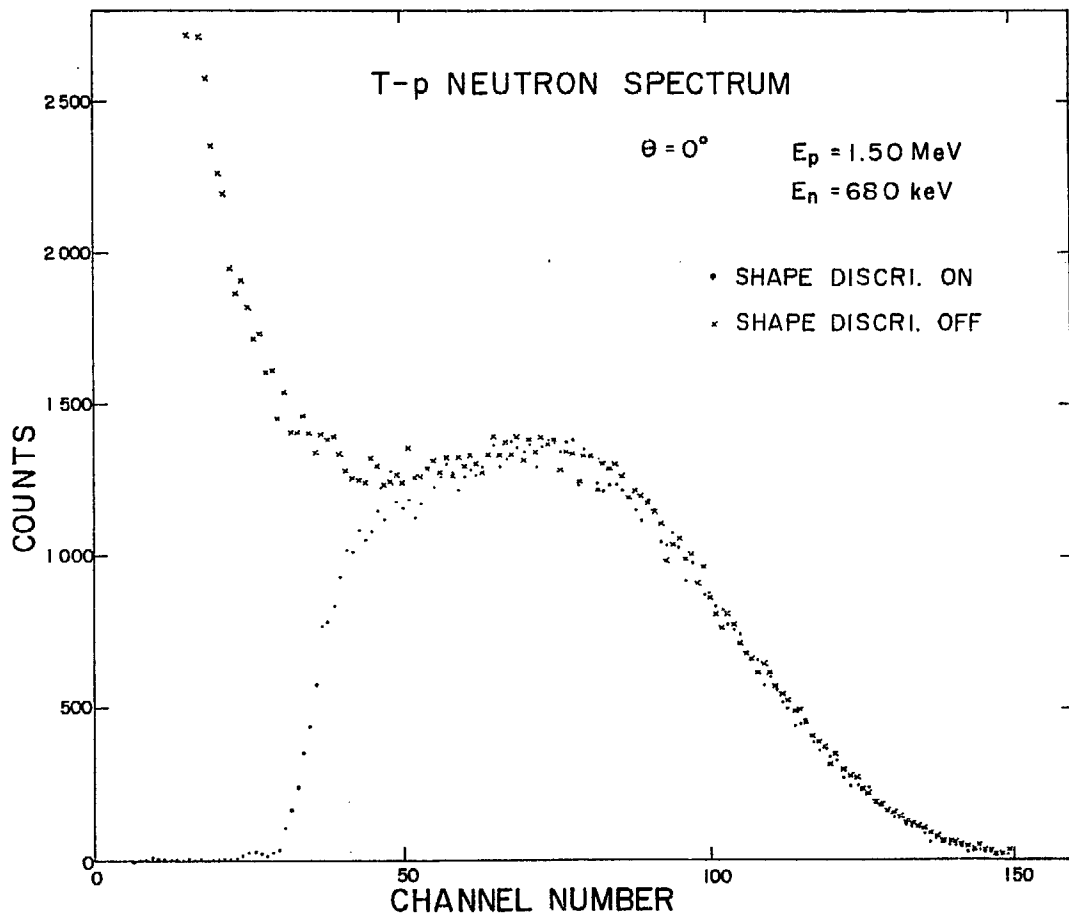


Fig. 9 Spectrum of 680-keV neutrons from the T (p, n)³He reaction. The discriminator bias for discrimination signals is set to eliminate ~99.9% of electron pulses. The photomultiplier voltage used is 1800 V.

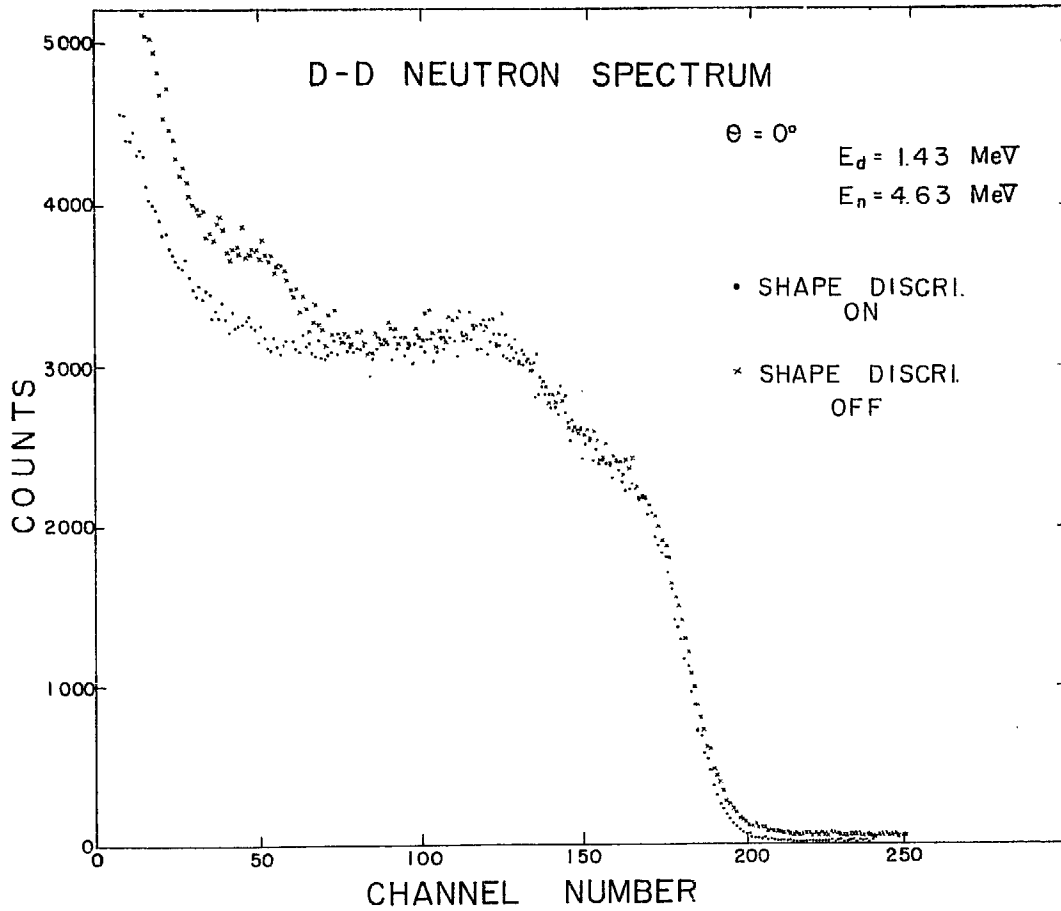


Fig. 10 Spectrum of 4.63-MeV neutrons from the $D(d,n)^3\text{He}$ reaction. The photomultiplier voltage used is 1900 V.

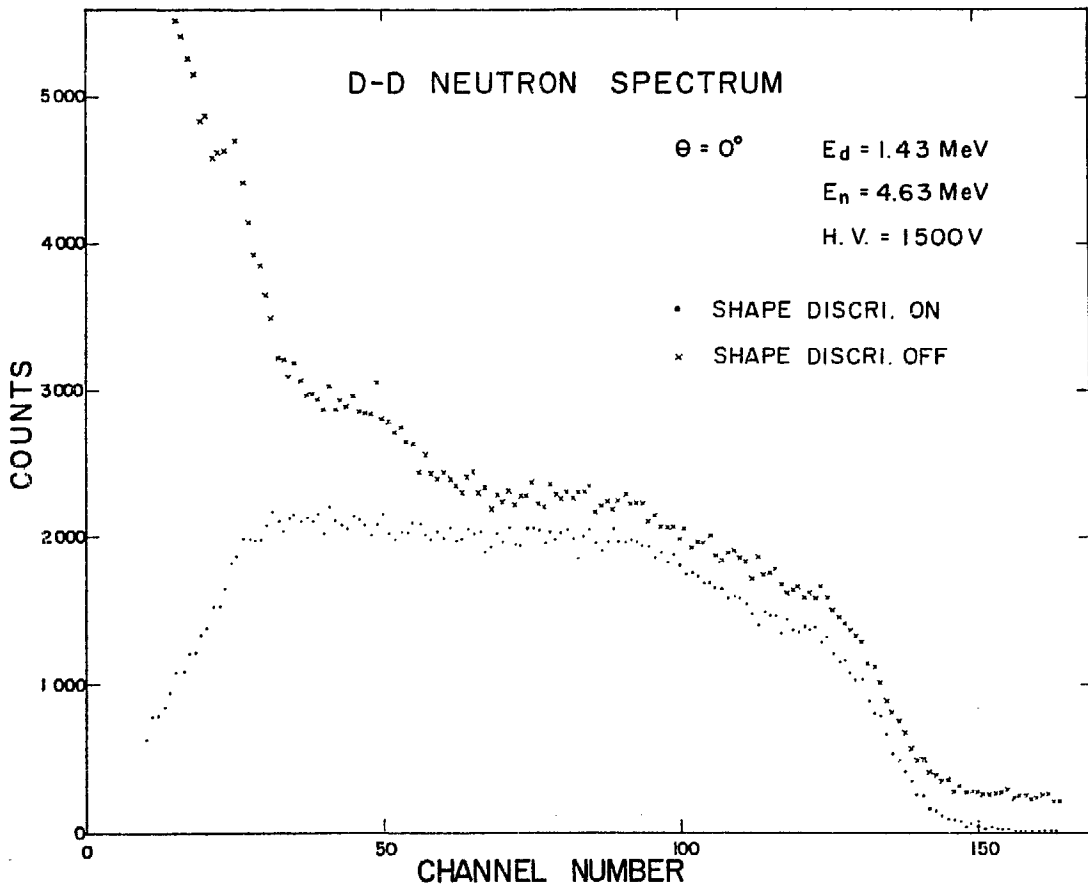


Fig. 11 Spectrum of 4.63-MeV neutrons taken with reduced photomultiplier voltage of 1500 V.

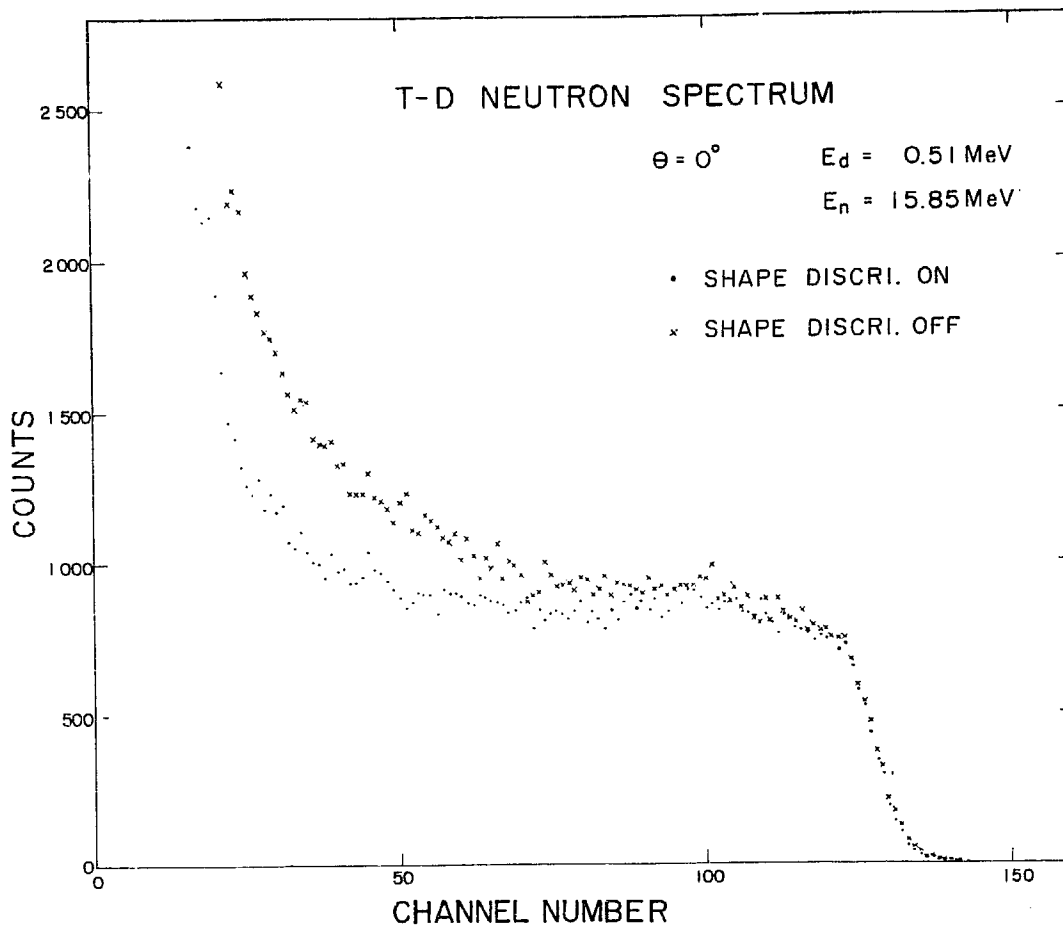


Fig. 12 Spectrum of 15.85-MeV neutrons from the $T(d,n)^4\text{He}$ reaction.

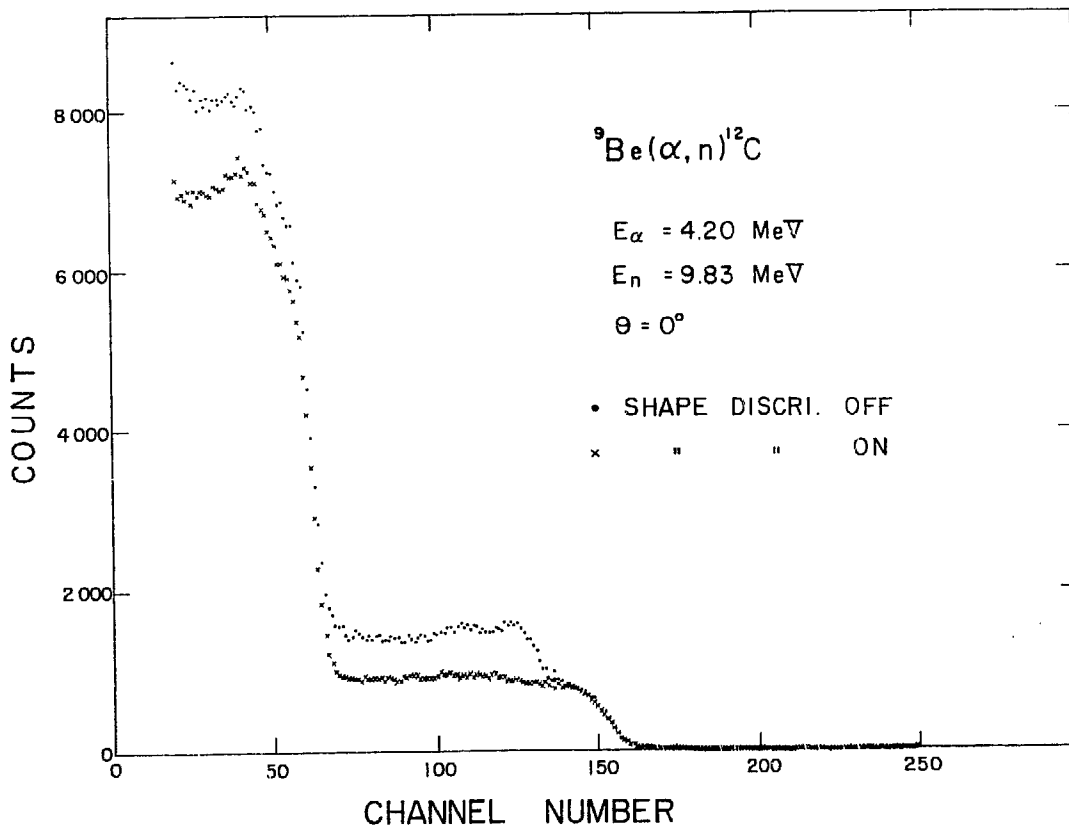


Fig. 13 Spectrum of 9.83- and 5.4-MeV neutrons from the $^9\text{Be}(\alpha, n)^{12}\text{C}$ reaction. The 4.43-MeV gamma ray superposed on the neutron spectrum is rejected when the shape-discrimination coincidence is applied.

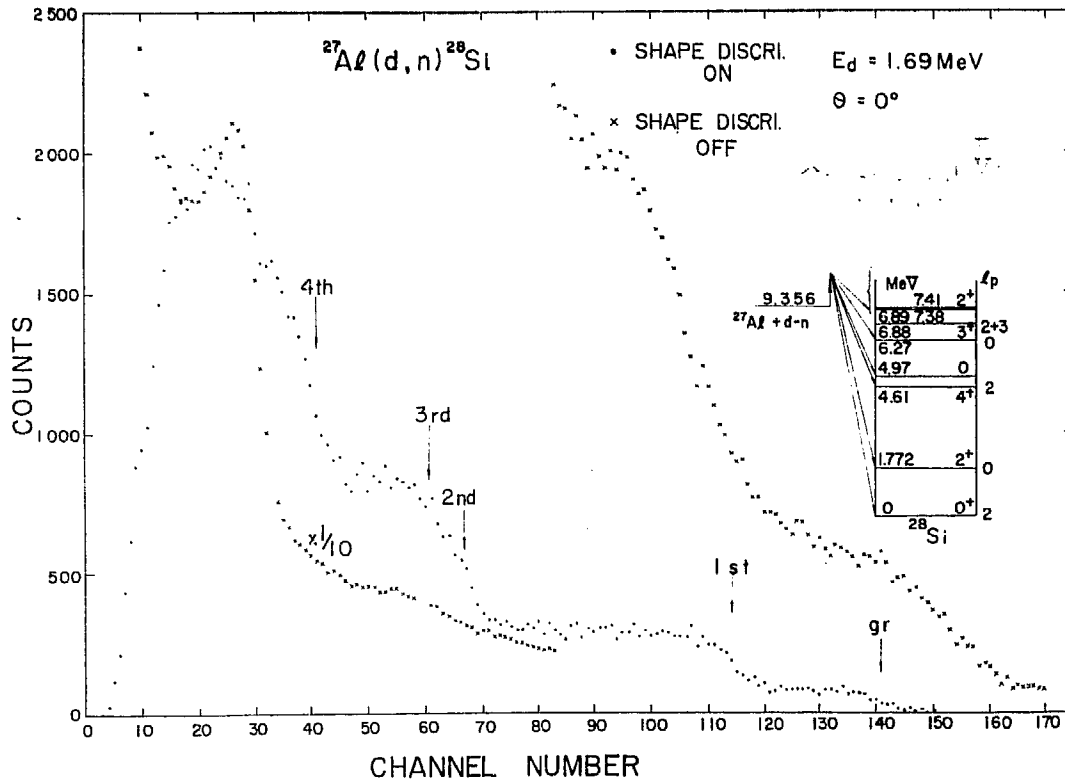


Fig. 14 Spectrum of neutrons from the $^{27}\text{Al}(d,n)^{28}\text{Si}$ reaction. The maximum pulse heights of recoil protons which correspond to neutron groups leading to the low-lying levels of ^{28}Si are indicated by arrows.

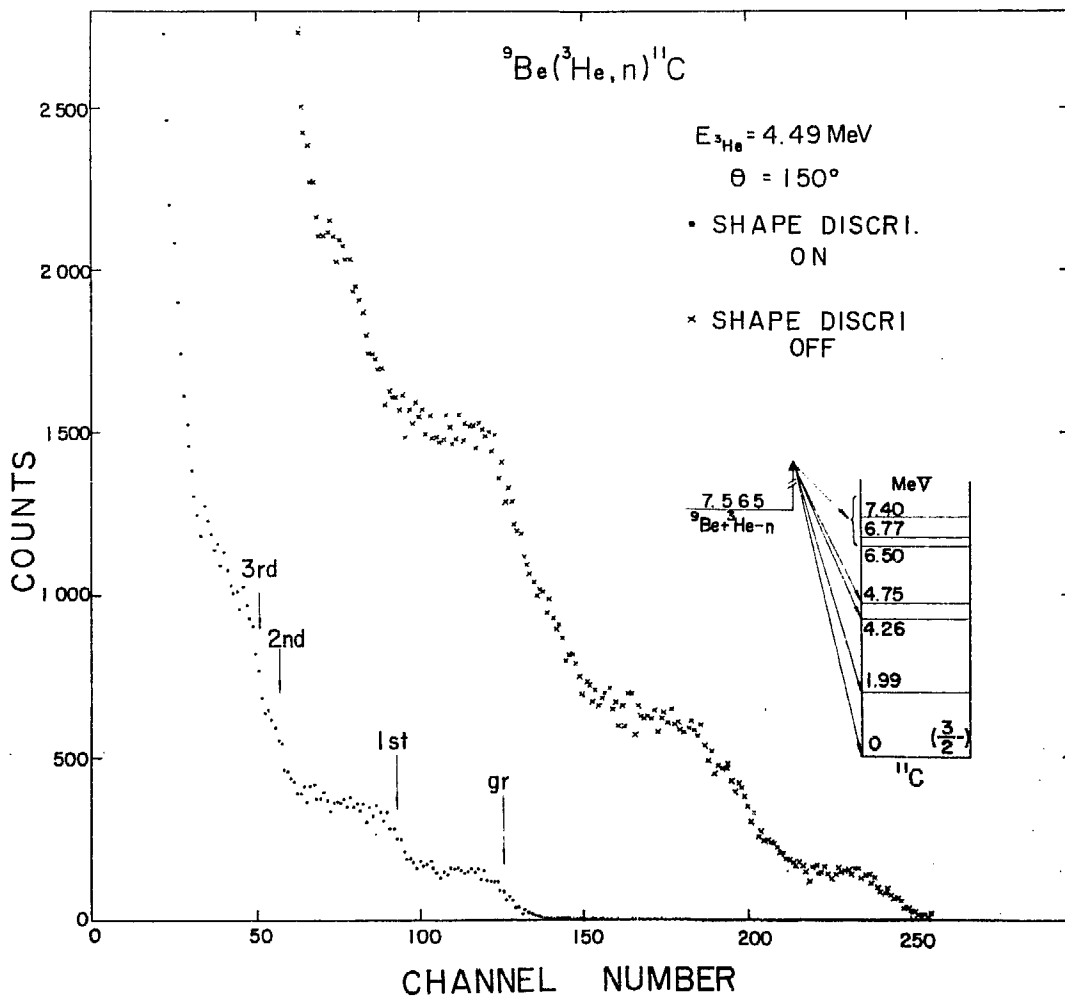


Fig. 15 Spectrum of neutrons from the $^9\text{Be}(^3\text{He},n)^{11}\text{C}$ reaction. The maximum pulse heights of recoil protons which correspond to neutron groups leading to the low-lying levels of ^{11}C are indicated by arrows.

Fig. 12: T-d 反応による 15.85MeV 中性子のスペクトル. 光電管電圧 1500V.

Fig. 13: ${}^9\text{Be}(\alpha, n){}^{12}\text{C}$ 反応からの, ${}^{12}\text{C}$ の基底準位と第一励起準位に対応する 9.83 MeV および 5.4 MeV 中性子のスペクトル. コインシデンスをかけない場合は 4.43MeV ガンマ線が重なって現われている.

Fig. 14: ${}^{27}\text{Al}(d, n){}^{28}\text{Si}$ 反応からの, ${}^{28}\text{Si}$ の低いエネルギー準位に対応する中性子群のスペクトル. ${}^{28}\text{Si}$ の基底準位と第一励起準位に対応す

る中性子群がはっきり見られる. ガンマ線は中性子の 10 倍近くの強度で共存している. 全計数率は $E_0 \geq 470$ keV のパルスに対し 1740 カウント/秒.

Fig. 15: ${}^9\text{Be}({}^3\text{He}, n){}^{11}\text{C}$ 反応からの, ${}^{11}\text{C}$ の低いエネルギー準位に対応する中性子群のスペクトル. ${}^{11}\text{C}$ の基底準位と第一励起準位に対応する中性子群がはっきり見られる. 全計数率は $E_0 \geq 300$ keV のパルスに対し 2650 カウント/秒.

5. 結 語

以上のテストおよび実際のスペクトルの測定からわかる様にスチルベン検出器はガンマ線抑制比がよく, 相当高いエネルギーのガンマ線が強く共存する場合にも, 大体 1 MeV 以上のエネルギーの中性子ならばガンマ線を取除いてきれいに検出する事ができる. 低エネルギー側での特性は統計的な問題で制限される以前に, 光電管も含めた回路の特性によって制限される. 光電管にかける電圧を高くした方が低エネルギー側での特性はよくなるが, 高いエネルギーのガンマ線を抑制できなくなる. 識別パルスに対する適当なディスクリ・バイアスはいづれの場合も RI からのガンマ線を用いて容易にきめることができるので, 適当なバイアスで使用する事により, ガンマブロックの状態で相当低いエネルギーの中性子から完全に計数することができる. また波高分布の分解能もよいので, 数 MeV ないし十数 MeV の中性子群も或程

度互にエネルギーが離れておれば分離して測定することができる. 実際 ${}^{27}\text{Al}(d, n){}^{28}\text{Si}$ 反応や ${}^9\text{Be}({}^3\text{He}, n){}^{11}\text{C}$ 反応からの残留核の基底準位, 第一励起準位などに対応する中性子群を分離して測定し, これらの反応の励起曲線や中性子の角度分布の測定を行なった. 結晶が大きいので計数効率がよく, 断面積の小さい反応, 中性子の散乱の実験, 薄いターゲットによる実験, 角相関などコインシデンスをとる実験, 或は飛行時間法による測定などにも有効に使用できると思われる.

最後に, これらの実験に際しいろいろと御指導, 御鞭撻頂いた百田光雄研究部長, 原子核物理第一研究室塚田甲子男主任研究員, また, 実験に際し御助力頂いた菊池士郎, 小林千明, 小平紘, 神田将の諸氏に厚く感謝の意を表します.

References

- 1) G. T. WRIGHT: *Proc. Phys. Soc.* **B 69** 358 (1956)
- 2) F. D. BROOKS: "Progress in Nuclear Physics", Ed. O. R. FRISH, **5** (Pergamon, London, 1956) p. 284: "Liquid Scintillation Counting", (Pergamon, London, 1958), p. 268
- 3) R. B. OWEN: *IRE Trans. on Nuclear Sci.* **NS-8** 285 (1961)
- 4) M. L. ROUSH, M. A. WILSON and W. F. HORNYAK: *Nuclear Instr. and Methods*, **31**, 112 (1964)
- 5) F. D. BROOKS: *Nuclear Instr. and Methods*, **4**, 151 (1959)
- 6) W. DAHNICK and R. SHERR: *Rev. Sci. Instr.*, **32**, 666 (1961)