

シンチレーションカウンター
における
中性子とガンマ線の識別

研究報告 No. 15

1961年1月

日本原子力研究所

Japan Atomic Energy Research Institute

シンチレーションカウンターにおける 中性子とガンマ線の識別

要 旨

有機ケイ光体から出るシンチレーションは高速成分と低速成分よりなり、その減衰時間はそれぞれ数十ミリマイクロ秒、数百ミリマイクロ秒であり、その相対的強度は入射粒子が電子のときと、重い粒子のときとでは異なることが OWEN により示された¹⁾。

OWEN はこのことを応用して、光電子増倍管中に空間電荷制限を生ぜしめて中性子とガンマ線の識別ができる事を示した。この研究はアントラセンおよび数種類の光電子増倍管を使用して、中性子とガンマ線の識別のための最適条件を調べたものである。

高速および低速成分の相対的強度が電子および重い粒子に対して異なる原因を調べるために、各成分の波長分布の予備的な測定もおこなわれた。

日本原子力研究所 原子核物理研究室 布 施 卓 嘉*

Discrimination of Neutrons from Gamma Rays in the Scintillation Counter

ABSTRACT

It has been tried to find the optimum conditions for the discrimination of neutrons from gamma rays using a method similar to that of Owen¹⁾. Several types of photomultipliers were used for this purpose. Degrees of the discrimination depended on the type of photomultipliers.

A clue for the mechanism of the scintillation in anthracene is also suggested, that is, there may be a little difference between the spectra of fast and slow components of the light of scintillation, both of which are distributed around 4,000 Å.

Nuclear Physics Laboratory

Japan Atomic Energy Research Institute

TAKAYOSHI FUSE*

* 現所属 運輸省運輸技術研究所

* On leave of absence from the Transportation Technical Research Institute, Mitaka, Tokyo.

目 次

1	序論.....	1
2	原理.....	2
3	実験.....	3
4	考察.....	6

表 目 次

TABLE 1.	空間電荷制限をうけた場合のガンマ線と中性子による最大出力の比.....	4
TABLE 2.	空間電荷制限をうけた光電子増倍管にフィルターをつけた時および つづけない時のガンマ線と中性子による最大出力の比.....	5

図 目 次

Fig. 1	中性子とガンマ線によるアントラセンからのシンチレーション・パルスの波形.....	1
Fig. 2	空間電荷制限された時のパルス波形.....	2
Fig. 3	実験装置のブロック図.....	2
Fig. 4	ラスト・ダイノードでの最大パルス波高値とガンマ線のエネルギーの関係.....	3
Fig. 5	RaD-Be 源に対する計数率とデスクリミネーション・レベルの関係	3
Fig. 6	ラスト・ダイノードでの最大パルス波高値と中性子またはガンマ線のエネルギーの関係.....	3
Fig. 7	フィルターの透過度と波長の関係.....	4
Fig. 8~11	タンクステン・ランプおよび水銀ランプに対する光電子増倍管の 出力電流と波長の関係	5 ~ 6

Contents

1	Introduction	1
2	Principle	2
3	Experiments	3
4	Study	6

Table contents

TABLE 1.	Ratio of the maximum output at the last dynode for gamma-rays to that for neutrons.....	4
TABLE 2.	Ratio of the maximum output at the last dynode for gamma-rays to that for neutrons with and without a filter.....	5

Figure contents

Fig. 1	Neutron and gamma-ray pulses in anthracene	1
Fig. 2	Pulse shapes at the last dynode which is partially space-charge-limited	2
Fig. 3	Block diagram of the experimental apparatus	2
Fig. 4	Maximum pulse height at the last dynode vs. gamma-ray energy.....	3
Fig. 5	Counting rate vs discrimination level for RaD-Be source.	3
Fig. 6	Maximum pulse height at the last dynode vs. neutron or gamma-ray energy	3
Fig. 7	Transmission of filters vs. wave length.....	4
Fig. 8~11	Relative output current of photomultipliers vs. wave length	5 ~ 6

1. 序論

シンチレーターとして有機ケイ光体を使ったシンチレーションカウンターは、効率の高い高速中性子検出器である。しかし同一エネルギーの中性子とガンマ線に対しては、ガンマ線が入射した方が一般的に出力パルスが大きい（約3~4倍）ので、ガンマ線のバックグラウンドが多いところでは使うのがむづかしい。中性子による出力に対してガンマ線による出力が小さいシンチレーターとして、ホニアックボタン²⁾等が考えられているが、これらはいずれも効率が低い。

最近、有機ケイ光体を使ったシンチレーションカウンターで、比較的容易に中性子とガンマ線の識別をする方法が開発された。有機ケイ光体から出るシンチレーションの減衰時間は入射粒子の種類により異なることがWRIGHTにより示され³⁾、OWENはシンチレーションの減衰時間が数十ミリマイクロ秒以下の高速成分と数百ミリマイクロ秒の低速成分からなり、入射粒子が電子の場合は陽子の場合よりも低速成分の割合が少ないことを示した¹⁾。アントラセンに陽子、電子が入射したとき出るシンチレーションは減衰時間が33ミリマイクロ秒の高速成分と370ミリマイクロ秒の低速成分からなり、低速成分の割合は陽子の場合が電子の場合の約2倍であった。シンチレーションの時間に対する減衰をFig. 1に示す¹⁾。

シンチレーションの低速成分の割合が異なることを利用して、中性子とガンマ線とを識別する実験をOWEN¹⁾、BROOKS⁴⁾らがおこなった。OWENは光電子増倍管の電極間ににおいてシンチレーション・パルスが空間電荷制限をうけると、中性子とガンマ線の識別が比較的容易にできることを示した。

本研究ではOWENと同じ方法を用いて中性子とガンマ線の識別に対する最適の条件を調べ、さらにシン

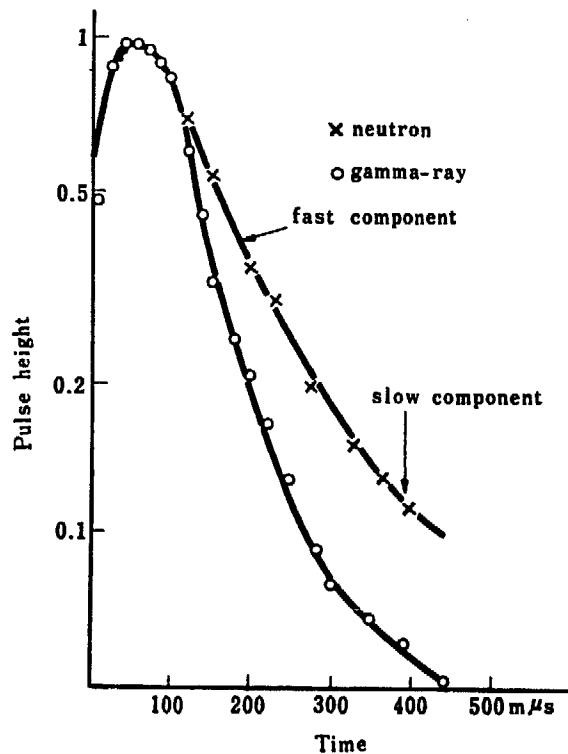


Fig. 1 Neutron and gamma-ray pulses in anthracene.

チレーションの減衰時間の低速成分が中性子とガンマ線に対して異なる原因を調べるために、シンチレーターとしては主としてアントラセンを、光電子増倍管としては電極構造および光電面の波長特性の異なる数種のものを使用して中性子およびガンマ線の識別の良さを検討し、さらにシンチレーションの高速および低速成分の波長分布が等しいか否かを調べる目的で、色ガラスフィルターを使ってシンチレーションの波長分布の測定をおこなった。

2. 原理

シンチレーションの減衰時間の低速成分の割合がガンマ線と中性子とで異なる場合には、次のようにして光電子増倍管の空間電荷制限により中性子とガンマ線とが識別できるであろう。光電子増倍管のラスト・ダイノードとアノード間の電圧を低くすると、空間電荷制限によりラスト・ダイノードから放出される二次電

子は少なくなる。しかしラスト・ダイノードに入射する二次電子は近似的には変化しないと考えられる。そこである程度以上空間電荷制限が著しくなると、ラスト・ダイノードへ入射する二次電子と比較して放出される二次電子が少なくなる。そこでラスト・ダイノードより出力をとり出すと空間電荷制限が起きていない

時は正の出力が出るが、空間電荷制限がある程度以上になると出力が負になる。ラスト・ダイノードから出る二次電子数が多いほど空間電荷制限の効果は現われやすい。有機ケイ光体から出るシンチレーションの高速成分は出力パルスの高い部分に相当するから空間電荷制限を受けやすく、低速成分は低い部分に相当するから制限を受けがたい。そのため空間電荷制限による高速成分は入射二次電子と放出される二次電子が同じになってしまっても、低速成分には空間電荷制限の影響はほとんど現われない。この場合のラスト・ダイノードからの出力を Fig. 2 に示す。ラスト・ダイノードの回路の時定数を低速成分の減衰時間より大きくしておこうと、出力の大きさは高速成分よりも低速成分の大きさにより決まり、そのため同程度のシンチレーションを生ずる中性子とガンマ線が入射した場合、中性子の方が大きい出力が出る。しかも入射粒子のエネルギーがある程度以上になると、ラスト・ダイノードに入射する二次電子は多くなるが放出される二次電子は変わらないので出力はかえって減少する。すなわち、出力には極大がある。当然その極大値は中性子の方がガンマ線のより大きくなる。そこで出力に対するディスクリミ

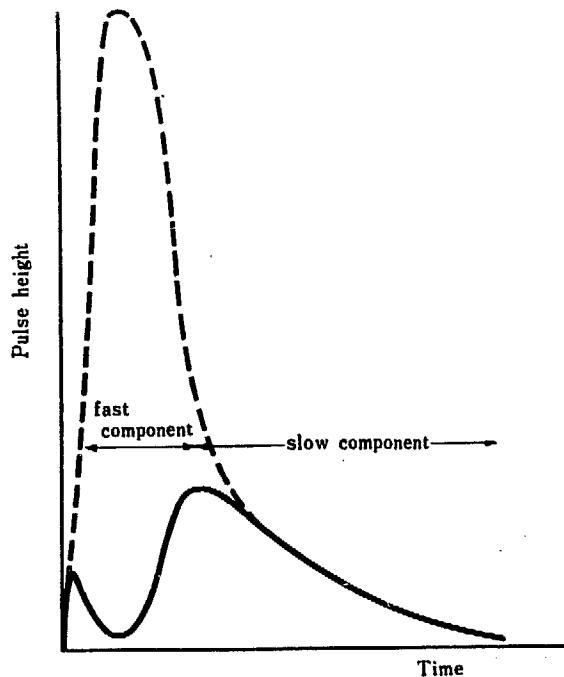


Fig. 2 Pulse shapes at the last dynode which is partially space-charge-limited.

ネーション・レベルをガンマ線の極大値以上にすると中性子だけ検出できる。

3. 実験

実験装置を Fig. 3 に示す。使用した光電子増倍管は Du Mont 6467-3 本、Du Mont 6292-1 本、EMI 6097/B-2 本、RCA 6342-3 本、東芝 7309-1 本である。Du Mont 6467, Du Mont 6292, 東芝 7309 はダイノードの構造がボックス型、RCA 6342 はフォーカシング・エレクトロード型、EMI 6097/B はベネチャーン・ブラインド型である。シンチレーターとしては 1 インチ $\phi \times 1$ インチのアントラセンを主に使い、その他 1 インチ $\phi \times 1/2$ インチのアントラセン、1 インチ $\phi \times 1$ インチのプラスチック・シンチレーターを

用いた。增幅器としては Atomics Model 218 を使用した。ラスト・ダイノードよりの出力は正であるから增幅器の前で極性の変換をおこなった。

ガンマ線源としては ^{137}Cs , ^{60}Co , Th, 中性子源としては RaD-Be 源を用いた。RaD-Be 源は 4.43 MeV のガンマ線と最高 12 MeV の中性子を放出するから、ガンマ線源としても使用できる。

実験は各線源から出るガンマ線のエネルギーと光電子増倍管から出る最大出力の関係を、アノード-ラスト・ダイノード間の電圧 V_{a-d} 、アノード-カソード間の

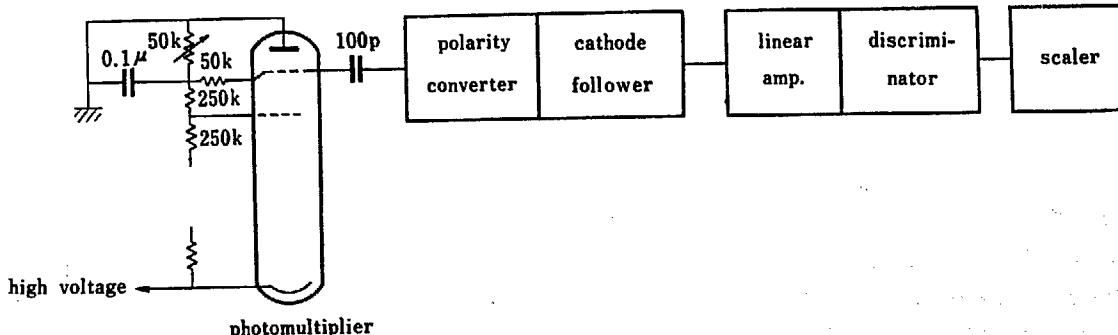


Fig. 3 Block diagram of the experimental apparatus.

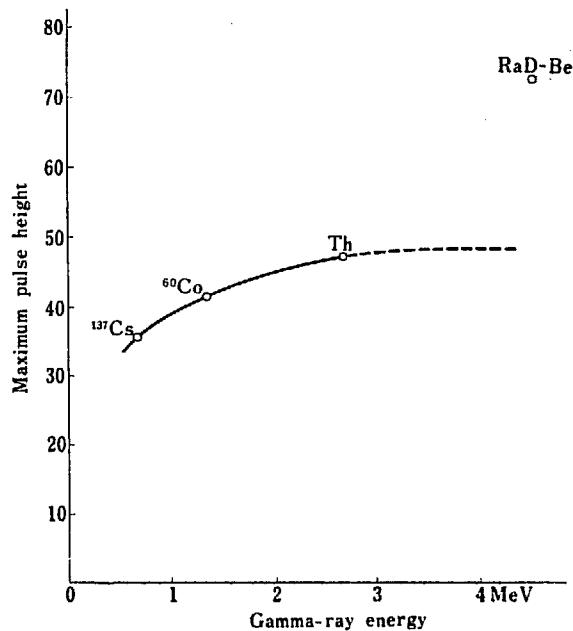


Fig. 4 Maximum pulse height at the last dynode versus gamma-ray energy.
(anthracene, RCA 6342, H.T.=1,400 V and $V_{a-d}=1$ V)

電圧 V_{a-d} を変えて求めた。シンチレーターとしてアントラセン、光電子増倍管として RCA 6342 を用いた例を Fig. 4 に示す。横軸がガンマ線のエネルギー、縦軸は最大出力である。これはアノード-ラスト・ダイノード間の電圧 1 V, アノード-カソード間の電圧 1,400 V の場合である。空間電荷制限が起っていない場合は、入射粒子のエネルギーと最大出力は線型の関係にある。RaD-Be 源から出る 12 MeV の中性子による出力と 4.43 MeV のガンマ線による出力はアントラセンの陽子に対する発光効率が電子に対する効率の約 1/3 なので大体同じ大きさである。空間電荷制限が起ると Fig. 4 に示されるようにガンマ線による出力は飽和してくるが、RaD-Be 源による出力はその曲線を外挿した点より上に出る。これは中性子の効果によるものである。この状態で RaD-Be 源と検出器の間にパラフィン厚さ 11 cm を置いた場合、鉛厚さ 10 cm を置いた場合の出力に対するディスクリミネーション・レベルと計数率の関係を調べた。Fig. 5 がその結果である。横軸がディスクリミネーション・レベル、縦軸が計数率で間にパラフィン、鉛、何もない場合の結果が示されている。パラフィンを置いた場合ガンマ線はあまり減衰しないが、中性子はかなり減衰する。鉛を置いた場合はガンマ線はほとんど吸収される。ディスクリミネーション・レベルに対して計数が、パラフィンを置いた場合の方が鉛を置いた場合より急速に減少しているのはこれがガンマ線によるためである。

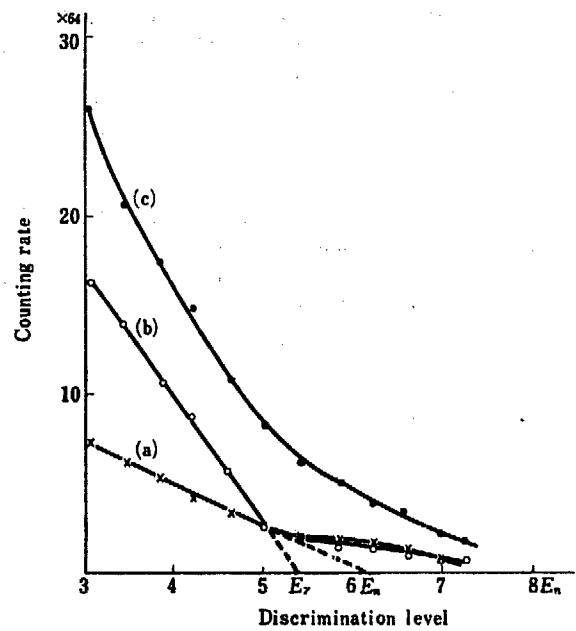


Fig. 5 Counting rate vs. discrimination level for RaD-Be source.
(anthracene, RCA 6342, H.T.=1,400 V and $V_{a-d}=3$ V)
(a) Pb (10 cm thickness) is placed between the source (RaD-Be) and detector.
(b) Paraffine (11 cm thickness)
(c) There is no shield between the source and detector.

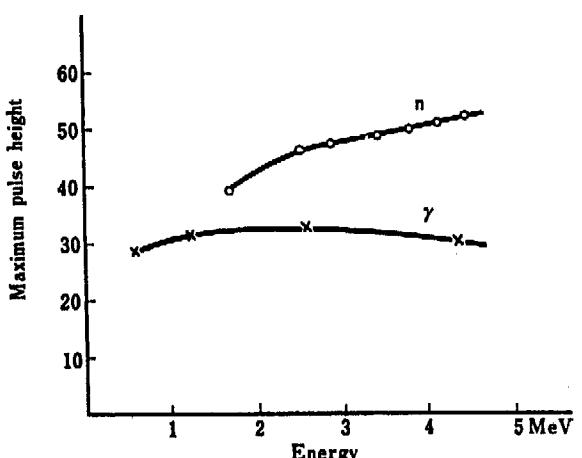


Fig. 6 Maximum pulse height at the last dynode vs. neutron or gamma-ray energy.
(anthracene, Du Mont 6467, H.T.=1,400 V and $V_{a-d}=18$ V)

2 MeV ファンドグラーフ 加速器を用いて $D(d, n)$ ^3He 反応により生ずる中性子を用いて、中性子のエネルギーと最大出力の関係をアントラセン、Du Mont 6467 について調べた。アノード-カソード間の電圧 1,500 V, アノード-ラスト・ダイノード間の電圧 18 V である。同じ状態でガンマ線についても測定した。結果は Fig. 6 である。この図によると約 1 MeV 以上の

TABLE 1. Ratio of the maximum output at the last dynode for gamma-ray (Th, $E_\gamma=2.65$ MeV) to that for neutrons (RaD-Be).

Voltage between the anode and last dynode is lowered to several volts, so that the pulse at the last dynode is partially space-charge-limited.

Scintillator	Photomultiplier	Ratio of maximum output of the last dynode for neutrons to that for gamma-ray	Optimum voltage between the anode and cathode	Optimum voltage between the anode and last dynode
Anthracene 1"φ×1"	DuMont 6467-A	2.0	1,500 V	10 V
"	DuMont 6467-B	2.0	1,500	10
"	DuMont 6292	1.9	1,500	5
"	Toshiba 7309	1.9	1,300	6
"	DuMont 6467-C	1.8	1,500	10
"	EMI 6097/B-A	1.7	1,400	5
"	EMI 6097/B-B	1.7	1,200	3
"	RCA 6342-A	1.6	1,500	0
"	RCA 6342-B	1.5	1,400	0.5
"	RCA 6342-C	1.5	1,500	0.4
Anthracene 1"φ×1/2"	EMI 6097/B-B	1.6	1,400	4
Plastic 1"φ×1"	DuMont 6467-A	1.4	1,500	10

中性子はガンマ線と識別できる。

RaD-Be 源よりの中性子による最大出力と Th よりのガンマ線による最大出力の比は、中性子とガンマ線の識別の良さを表す尺度となる。ガンマ線源として Th をえらんだのは、ガンマ線による出力は 3 MeV 程度で飽和するので、Th より出るガンマ線 (2.65 MeV) による最大出力は、ガンマ線による出力の上限と考えられるからである。この RaD-Be よりの中性子による最大出力と Th よりのガンマ線による最大出力の比はアノード-カソード間の電圧、アノード-ラスト・ダイノード間の電圧により変る。そこでこの比の最大値を、シンチレーターとしては 1 インチ φ×1 インチのアントラセンを各光電子増倍管と組合せた場合、1 インチ φ×1 インチのアントラセンとプラスチック・シンチレーターと Du Mont 6467-A* を組合せた場合、1 インチ φ×1/2 インチのアントラセンと EMI 6097/B-A を組合せた場合について求めた。その時のアノード-カソード間の電圧、アノード-ラスト・ダイノード間の電圧も示した。それが TABLE 1. である。

この比はアントラセンでもプラスチック・シンチレーターでも、ドライアイスとアルコールで約 -50°C に冷却した場合あまり変わらなかった。1 インチ φ×1 インチのアントラセンと 1 インチ φ×1/2 インチのアン

トラセンの差は認められなかった。プラスチック・シンチレーターはアントラセンほど良い結果は得られなかった。1 インチ φ×1 インチのアントラセンと Du Mont 6467-A の組合せが最も良好であった。

色ガラス・フィルター** を用いてアントラセンに中性子およびガンマ線をあてた時出るケイ光の波長分布

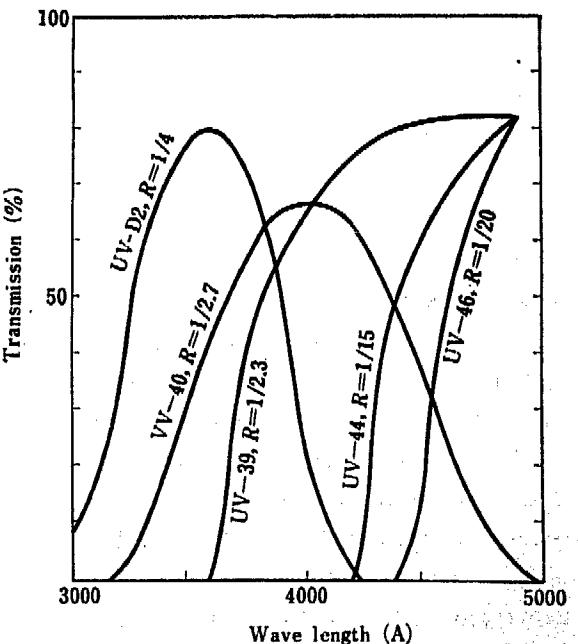


Fig. 7 Transmission of filter vs. wave length.

R: Ratio of maximum pulse height with a filter to that without a filter.

(anthracene, Toshiba 7309, H.T.=1,400 V and $V_{a-d}=140$ V)

In these cases, scintillation pulses are not influenced by space charge.

* A は DuMont 6467 を 3 本使用したのでその区別を表わす。
EMI 6097/B, RCA 6342 についても同様。

** フィルターとしては東芝 UV-D2, UV-39, UV-44, UV-46, VV-40 を使用した。その透過度は Fig. 7 に示されている。

を調べた*. フィルターは、シンチレーターと光電子増倍管の光電面の間にはさんで使用した。空間電荷制限をしない正常な使用方法で、フィルターを入れた時の出力と入れない時の出力の比を測定した。線源にはRaD-Be 源を用いた。光電子増倍管としては東芝 7309 を使用した。結果は Fig. 7 の透過度の曲線に書添えてある。この結果をみるとケイ光は波長が 4,100 Å 以上のものはほとんどなく、3,500~4,000 Å のものが大部分で 3,500 Å 以下にも分布しているかもしれない。

フィルターをつけることにより空間電荷制限による中性子とガンマ線の識別の程度はどう変るかを調べた。フィルターをつけて Th よりのガンマ線による最大出力と RaD-Be 源よりの中性子による最大出力の比を測定した。光電子増倍管としては東芝 7309 を使用した。フィルターをつけると光電子増倍管に入る光量が減少し、空間電荷制限の状態が変るからフィルターをつけないでアノード-カソード間の電圧を下げ、フィルターをつけた場合と同じ大きさの出力が出る状態

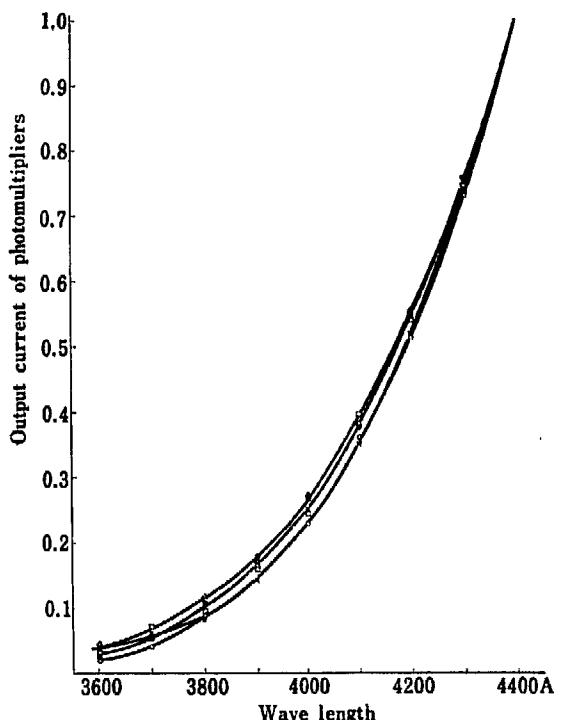


Fig. 8 Relative output current of photomultipliers vs. wave length.

Light source: tungsten lamp

Photomultiplier: box-type

○ Du Mont 6467-A, × Du Mont 6467-B

△ Du Mont 6467-C, □ Du Mont 6292

● Toshiba 7309.

These curves are normalised at 4,400 Å.

* 紫外線によってアントラセンから出るケイ光は単色でない。
4100, 4300, 4600 Åを中心とした三群に分けられる。⁵⁾

TABLE 2. Ratio of the maximum output at the last dynode for neutrons (RaD-Be) to that for gamma-ray (Th, $E_{\gamma} = 2.65 \text{ MeV}$) with and without a filter (anthracene, Toshiba 7309).

The characteristics of these filters are shown in Fig. 7. The filters are sandwiched in between the anthracene and the photomultiplier. Voltage between the anode and last dynode is lowered to optimum voltage, so that the ratio is maximized.

Filter	(maximum output for neutrons)	
	with a filter	without a filter
UV-D2	1.6	1.8
V V-40	1.7	1.8
UV-39	1.7	1.8
UV-46	1.1	1.5

にして上記の比を測定した。結果を TABLE 2 に示す。この表よりフィルター UV-46 を使用した場合には、フィルターを付けない場合に比べて識別の程度が著しく悪くなることがわかる。

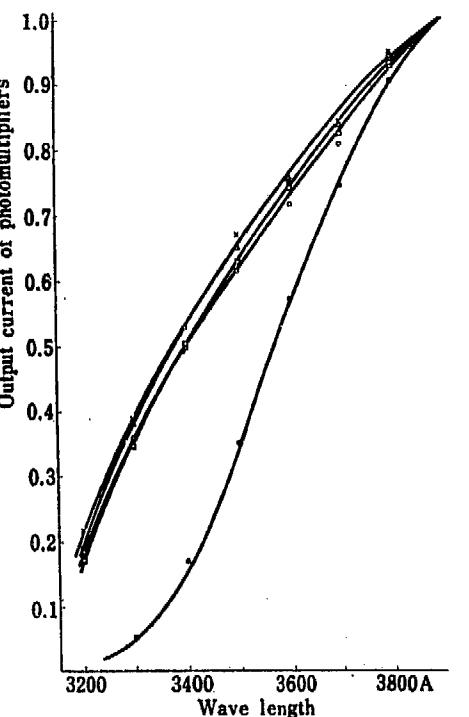


Fig. 9 Relative output current of photomultipliers vs. wave length.

Light source: mercury lamp

Photomultiplier: box-type

○ Du Mont 6467-A, × Du Mont 6467-B

△ Du Mont 6467-C, □ Du Mont 6292

● Toshiba 7309.

These curves are normalised at 3,900 Å.

4. 考 察

シンチレーターについてはアントラセンは良い結果が報告されているが¹⁾筆者らの実験でもプラスチック・シンチレーターに比較して良好であった。プラスチック・シンチレーターについては識別可能という論文⁶⁾と不能とするもの¹⁾があるが、これは光電子増倍管によっては識別が可能なものもあるし、不能な場合もあるかもしれない。光電子増倍管については、この実験の範囲内ではボックス型 (Du Mont, 東芝) が一般に良い結果を示した。次いでベネチャ・ブラインド型 (EMI), フォーカシング・エレクトロード型 (RCA) の順である。同種の光電子増倍管でも識別の程度の良さが異なっている。原因としてはいろいろ考えられるが、シンチレーションの低速成分の波長が高速成分の波長と異なるとすると、光電子増倍管の波長に対する感度分布と識別の良さに何らかの対応がつく

であろう。波長に対する感度は EMI 6097/B 以外は S-11 型であるが、これは製作者により異なり、また同じ製作者のものでも個々の光電子増倍管の間で多少相違がある。この相違の程度をみるためにこの実験で使用した光電子増倍管の波長に対する相対的な感度を分光度計で測定した。光源にはタンクステンランプ、水銀ランプを使用した。結果はタンクステンランプを使用した場合は 4,400 Å を、水銀ランプの場合は 3,900 Å の感度を 1.0 とし、それに対する相対値をグラフに示したのが Fig. 8~11 であるが、識別の良さとの間には明瞭な対応は見られない。

フィルターをつけての実験結果 (TABLE 2) をみると、フィルター VV-40, UV-39 の結果がフィルターをつけた中では識別が良いということよりシンチレーションの低速成分は 4,000 Å を中心とするシンチレーション

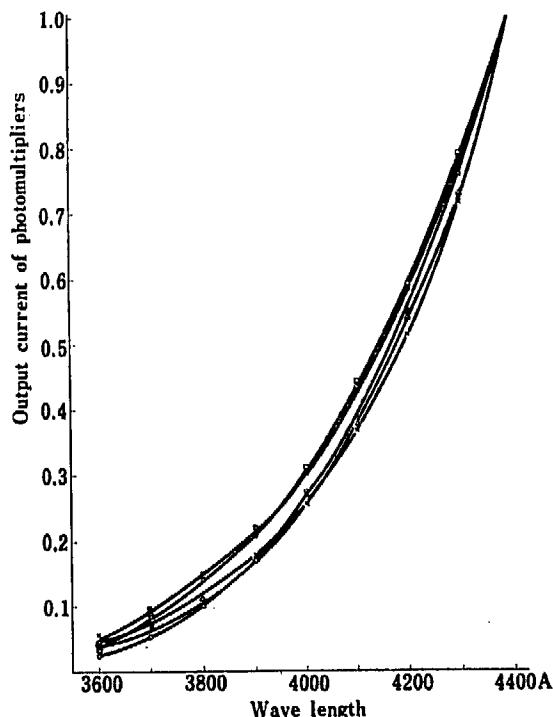


Fig. 10 Relative output current of photomultipliers vs. wave length.

Light source: tungsten lamp.

Photomultiplier: venetian blind type.

● EMI 6097/B-A, □ EMI 6097/B-B.

Focussing electrode type

○ RCA 6342-A, × RCA 6342-B

△ RCA 6342-C.

These curves are normalised at 4,400 Å.

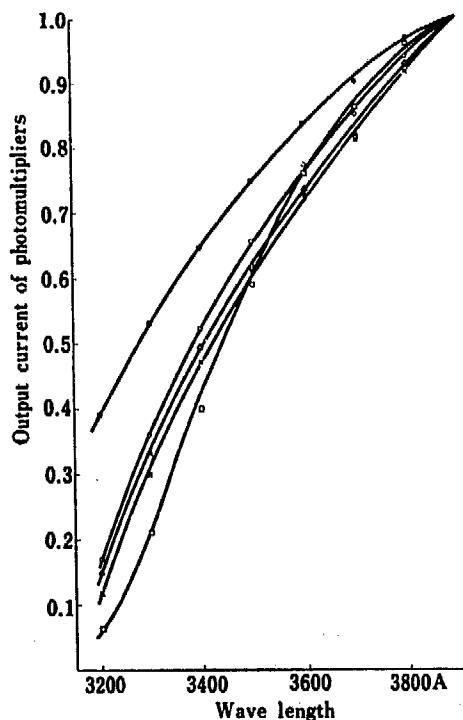


Fig. 11 Relative output current of photomultipliers vs. wave length.

Light source: mercury lamp.

Photomultiplier: venetian blind type.

● EMI 6097/B-A, □ EMI 6097/B-B.

Focussing electrode type

○ RCA 6342-A, × RCA 6342-B

△ RCA 6342-C.

These curves are normalised at 3,900 Å.

ン、またはそれより短い側に含まれると思われる。これをはっきりさせるには波長の幅が VV-40 よりせまいフィルターで実験する必要がある。

識別の良さはシンチレーションの低速成分がガンマ線と中性子でどう異なるかにより決まるのである。高速成分は励起状態から発光を伴う基準状態への許された遷移により生じ、低速成分は禁ぜられた遷移によるものと考えられるが⁷⁾⁸⁾はっきりしない。しかし両者の間に波長の違いがあるならばその機構に関係があり、波長の分布の測定によりある程度解明されるであろう。この実験では余り明かな結果は得られなかつたがある程度違っていることを暗示している (TABLE 2, Fig. 7 および 5 頁脚注参照)。しかし、これは光電子増倍管の雑音によるものかもしれない。⁹⁾

終りにこの実験は原子核物理研究室百田光雄主任研究員、塚田甲子男副主任研究員の御指導によりおこなわれたもので感謝の意を表する。また、固体物理研究

室佐藤好毅研究員にシンチレーションの機構について討論していただいたこと、および伊藤良三氏に対して実験に協力していただいたことに感謝の意を表する。

文 献

- 1) R. B. OWEN: *A. E. R. E. EL/R 2712* (1958)
- 2) W. S. EMMERICH: *Rev. Sci Instr.*, **25** 69 (1954)
- 3) G. T. WRIGHT: *Proc. Phys. Soc. (London)*, **69 B** 358 (1956)
- 4) F. D. BROOKS: *Nucl. Instr. Meth.*, **4** 151 (1959)
- 5) J. W. SIDMAN: *J. Chem. Phys.*, **25** 115 (1956)
- 6) A. E. LITHERLAND, E. ALMQVIST, R. BATCHELOR, and H. E. GOVE: *Phys. Rev. L.*, **2** 104 (1959)
- 7) J. B. Birks: *The Seventh Scintillation Counter Symposium* (1960)
- 8) W. L. BUCK: *The Seventh Scintillation Counter Symposium* (1960)
- 9) O. TANAKA: Private communication