

γ 線 偏 光 計

河村 光博・青木 敦・林 竹男

Gamma ray polarimeter

MITSUHIRO KAWAMURA, ATSUSHI AOKI and TAKEO HAYASHI

I 緒 言

原子核が相継いで二つの γ 線を放出する時第一の γ 線に対して θ なる方向に放出される第二の γ 線の偏光を測定することにより我々は各準位の spin 及び parity と γ 線の multipolarity を決定することが出来る¹⁾。γ 線の偏光を測定する方法の中数百 Kev のエネルギーの程度の γ 線に対しては偏光した γ 線に対する Compton 散乱の断面積の φ 方向の非対称性を利用するのが最も有望であり又既に多くの研究がなされて来た²⁻³⁾。偏光一方向相関の測定は方向相関の測定のみによっては識別されない様な崩壊様式を区別する事が出来る点で特別な意味をもつと考えられる⁴⁾。

II 偏光一方向相関測定の原理

偏光計に入る γ 線の偏光ベクトルとカスケード γ 線をつくる平面の垂線とのなす角を φ とすれば一点で散乱をうけて散乱角 δ で φ=0 及び 90° の方向に散乱される γ 線の数 $N_{\perp}(\theta)$, $N_{\parallel}(\theta)$ は夫々次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} N_{\perp}(\theta) &= A [W(\theta 0^{\circ}) d\sigma(\delta 0^{\circ}) + W(\theta 90^{\circ}) d\sigma(\delta 90^{\circ})] \\ N_{\parallel}(\theta) &= A [W(\theta 90^{\circ}) d\sigma(\delta 0^{\circ}) + W(\theta 0^{\circ}) d\sigma(\delta 90^{\circ})] \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(1)$$

こゝに $W(\theta \phi)$ は偏光方向相関の函数で崩壊様式によってきまる函数である。A はすべての角変数に独立な数 $d\sigma(\delta \phi)$ は微分散乱断面積で Klein-Nishina の式で与えられる⁵⁾。

$$d\sigma(\delta \phi) = \frac{r_0^2}{2} d\Omega \frac{k^2}{k_0^2} \left[\frac{k}{k_0} + \frac{k_0}{k} - 2 \sin^2 \delta \cos^2 \phi \right] \dots\dots(2)$$

$$k = k_0 \left[1 + \frac{k_0}{mc^2(1 - \cos \delta)} \right]^{-1}, \quad r_0 = \frac{e^2}{mc^2}$$

$$(1) \text{ より } \frac{N_{\parallel}(\theta)}{N_{\perp}(\theta)} = \frac{p+R}{1+pR} \dots\dots\dots(3)$$

$$p = \frac{W(\theta 90^{\circ})}{W(\theta 0^{\circ})}, \quad R = \frac{d\sigma(\delta 90^{\circ})}{d\sigma(\delta 0^{\circ})} \dots\dots\dots(4)$$

となり R を知れば測定値 $N_{\parallel}(\theta)/N_{\perp}(\theta)$ から p を決定する事が出来る。与えられた p に対して $N_{\parallel}(\theta)/N_{\perp}(\theta)$ が出来る丈大きな値をとる様にするには R を出来る丈大きくなる様に選ぶ必要がある。点状散乱体に対して最大の

R を与える様な散乱角 δ_{max} は γ ray エネルギーの函数として Fig. 1 の様に表され、R も γ ray エネルギーと共に Fig. 2 の様な変化を来す事が知られている²⁾。

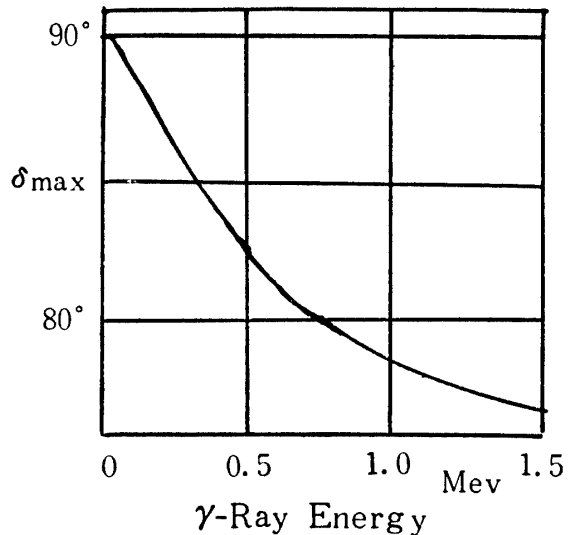


Fig. 1 δ_{max} for ideal geometry, as a function of γ-ray energy

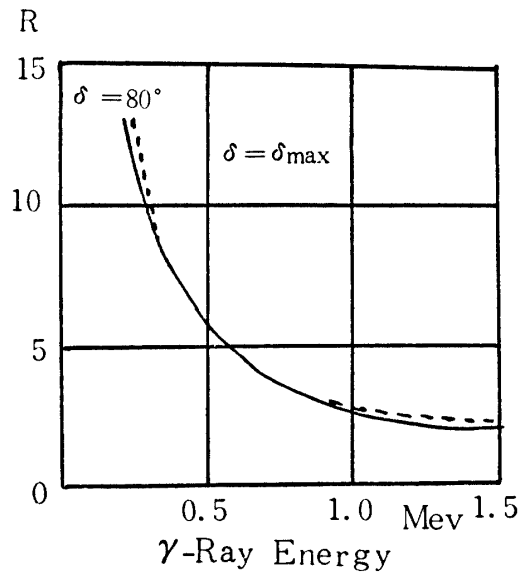


Fig. 2 R as a function of γ-ray energy

III 偏光計と電子回路

我々が作った偏光計の主要部の写真を Fig. 3 に又略図及び電子管回路を Fig. 4-5 に示す。D結晶及びS結

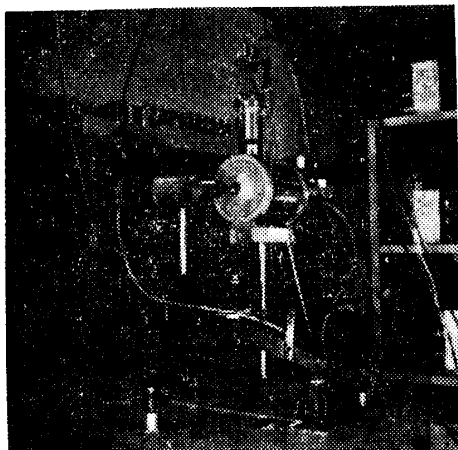


Fig. 3 Photograph of γ -ray polarimeter

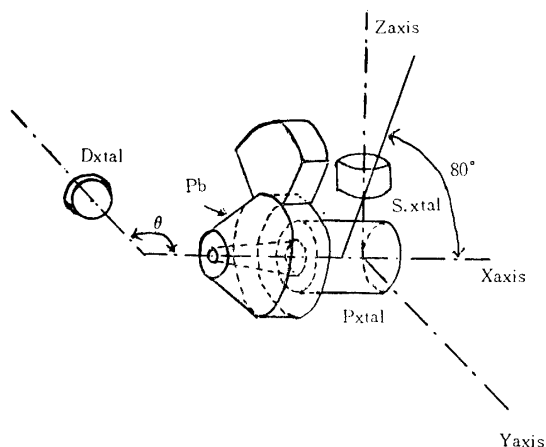


Fig. 4

Schematic arrangement of γ -ray polarimeter

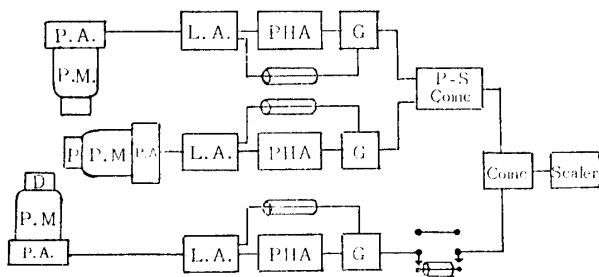


Fig. 5 Block diagram of the triple coincidence circuit

P. M.-RCA 5819 P. A.-6AK5 cathode follower
 L. A.-Model 500 linear amplifier
 P. H. A.-Pulse height analyser modified Atomic type (for *P* and *D*)
 modified Johnstone type (for *S*)
 G.-Gate circuit

晶は夫々第一の γ 線及び第二の γ 線の散乱された γ 線に対する検出器であり $1\frac{1}{2}'' \times 1''$ の *NcI, Tl* からなる。

又蛍光体 *P* は散乱体で polystyrene + *p*-terphenyl (1%) + POPOP (0.03%) + Zincstearate (0.03%) の組成をもつ $4\text{cm}\phi \times 4.5\text{cm}$ のプラスチックシンチレーターである。*D, P, S* に対する光電子増倍管はいずれも RCA 5819 を用いた。線源と *D* 結晶及び蛍光体 *P* の前面までの距離は共に 5 cm, *S* 結晶前面と蛍光体 *P* の中心軸 (*x* 軸) の距離も又 5 cm である。*S* 結晶はその前面の中心と蛍光体 *P* の中心を結ぶ直線が *x* 軸となす角が 80° である様な位置におかれ又線源から直接に *S* 結晶に入る γ 線を出来る丈少なくする様約 5 cm の *Pb* で保護されている。この *Pb* 遮蔽と蛍光体 *P* 及び *S* 結晶は互に固定されていて *x* 軸のまわりに廻転出来る様に作られている。*S* 結晶が *z* 軸及び *y* 軸と一致した位置における *D-P-S* triple coincidence の計数を夫々 $N_{\perp}(\theta), N_{\parallel}(\theta)$ とすれば $N_{\perp}(\theta)/N_{\parallel}(\theta)$ が理論値と比べらる量となる。電子管回路は先に発表した double coincidence の電子管回路を二重に用いたものである。triple coincidence の計数に含まれる accidental coincidence の計数は *S* チャンネルの計数が少ないので *P-S* の true coincidence の計数と *D* チャンネルの計数との accidental coincidence の計数が大部分で他は無視する事が出来るので *D* チャンネルに $0.5\ \mu\text{sec}$ の delay を入れた場合の計数を以て accidental coincidence と考える事が出来る。

IV 偏光計の非対称パラメーター

D, P, S 結晶が有限の大きさをもつ場合には (1) 式を直接実験値と比べる事は出来ない。しかしこの影響を完全に計算する事は大変複雑であり且労力を要し実際的には不可能であるので次の様な近似で之等の効果を取り入れる事にする。Fig. 6 に示す様に *D* 結晶は結晶の前面と後

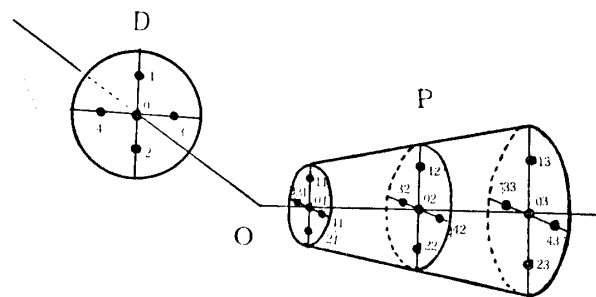


Fig. 6 Illustrative figure of the representative points of the scattering phosphor and the direction crystal

面の中央の平面上にある図の様な5つの代表点 ($D_i, i=0, 1, 2, 3, 4$) の集まりで、蛍光体 *P* は 15 の代表点 ($P_{jk}, j=$

0. 1. 2. 3. 4. $k=1, 2, 3$)でおきかえる。又 S 結晶は結晶の前後面の中央におかれた直径 4 cm の円形の穴と同じ面積をもち一辺が x 軸と平行な正方形の穴でおきかえこの穴に入る γ 線はすべて同じ計数効率をもつて数えられるとする。この様な近似においては (1) 式は次の様になる。

$$\begin{aligned} N_{\perp}(0) &= C[\sum_{ij} W(\theta_{ij} 90^\circ) \sigma_{ij}(0^\circ) + \sum_{ij} W(\theta_{ij} 0^\circ) \\ N_{\parallel}(0) &= C[\sum_{ij} W(\theta_{ij} 90^\circ) \sigma_{ij}(90^\circ) + \sum_{ij} W(\theta_{ij} 0^\circ) \\ &\quad \left. \begin{matrix} \sigma_{ij}(0^\circ) \\ \sigma_{ij}(90^\circ) \end{matrix} \right] \dots\dots\dots(5) \end{aligned}$$

Cはすべての角変数に独立な数であり $\sigma_{ij}(\varphi)$ は次式で与えられる。

$$\sigma_{ij}(\varphi) = \sum_k e^{-\mu x_{jk}} d\sigma_{ijk}(\varphi) \dots\dots\dots(6)$$

ここに μ は入射 γ 線に対する D 結晶の linear absorption coefficient, x_{jk} は P_{j1} と P_{jk} の間の距離である。

$e^{-\mu x_{jk}}$ は計算によって求められる。(appendix. I)

又 $d\sigma_{ijk}(\varphi)$ は偏光ベクトル \mathbf{e} が $(\overline{OP}_{jk} \mathbf{e})$ 平面が (xy) 平面に垂直な様に完全に偏光した γ 線が P_{jk} で散乱をうけて y 軸に対して φ なる角度の方向におかれた S 結晶内に散乱される γ 線に対する積分された散乱断面積であり、更に他の γ 線が D に入る事によってカスケード γ 線のつくる平面の垂線方向が $(\overline{OD}_0 \overline{OP}_{jk})$ 平面と傾く事による効果に対する補正を行って得られた値である。 $\sigma_{ij}(\varphi)$ は偏光計の各部の幾何学的配置と入射 γ 線のエネルギーによってきまる定数で数値計算によって求められる。之を偏光計の非対称パラメーターとよぶ。500 Kev 及び 1 Mev γ 線に対して計算された値を Table 1 及び Table 2 に示す。

Table 1 0.5 Mev- γ ray に対する非対称パラメーター

ij	$\sigma_{ij}(0^\circ)$				$\sigma_{ij}(90^\circ)$			
	90°	120°	150°	180°	90°	120°	150°	180°
00								
30	0.1277	0.1277	0.1277	0.1277	0.4554	0.4554	0.4554	0.4554
40								
10	0.1478	0.1533	0.1942	0.4554	0.4354	0.4298	0.3889	0.1277
20								
11	0.2744	0.3090	0.4316	0.7017	0.3856	0.3641	0.2880	0.1202
21	0.2744	0.2618	0.2595	0.7017	0.3856	0.3935	0.3949	0.1202
31	0.2480	0.2622	0.3889	0.4110	0.4020	0.3932	0.3145	0.3007
41	0.2480	0.2486	0.2640	0.4110	0.4020	0.4016	0.3920	0.3007
02	0.0846	0.0872	0.1076	0.3196	0.4022	0.3991	0.3746	0.1202
12	0.0985	0.0919	0.0907	0.3196	0.3856	0.3935	0.3949	0.1202
22	0.0935	0.1163	0.1798	0.3196	0.3856	0.3641	0.2880	0.1202
32	0.0849	0.0921	0.1577	0.1692	0.4020	0.3932	0.3145	0.3007
42	0.0849	0.0851	0.0931	0.1692	0.4020	0.4016	0.3920	0.3007
43								
03	0.1202	0.1202	0.1202	0.1202	0.7017	0.7017	0.7017	0.7017
33								
13	0.1374	0.1487	0.2262	0.3007	0.6740	0.6558	0.5310	0.4110
23								
14	0.1374	0.1391	0.1566	0.3007	0.3053	0.3039	0.2893	0.1692
24								
44	0.1202	0.1202	0.1202	0.1202	0.3196	0.3196	0.3196	0.3196
04								
34								
01	0.2477	0.2527	0.2922	0.7017	0.4022	0.3991	0.3746	0.1202

Table 2 1 Mev γ 線に対する非対称パラメーター

ij	$\sigma_{ij}(0^\circ)$				$\sigma_{ij}(90^\circ)$			
	90°	120°	150°	180°	90°	120°	150°	180°
00								
30	0.1263	0.1263	0.1263	0.1263	0.2960	0.2960	0.2960	0.2960
40								
10	0.1367	0.1395	0.1607	0.2960	0.2856	0.2828	0.2616	0.1263
20								
11	0.2417	0.2605	0.3274	0.4768	0.2525	0.2415	0.2027	0.1171

21	0.2417	0.2347	0.2334	0.4768	0.2525	0.2564	0.2572	0.1171
31	0.2273	0.2349	0.3041	0.3163	0.2607	0.2563	0.2162	0.2091
41	0.2273	0.2275	0.2359	0.3163	0.2607	0.2606	0.2557	0.2091
02	0.0869	0.0882	0.0932	0.2023	0.2609	0.2593	0.2468	0.1171
12	0.0937	0.0905	0.0899	0.2023	0.2525	0.2564	0.2572	0.1171
22	0.0937	0.1025	0.1336	0.2023	0.2525	0.2415	0.2007	0.1171
32	0.0870	0.0906	0.1223	0.1285	0.2607	0.2563	0.2162	0.2091
42	0.0870	0.0871	0.0911	0.1285	0.2607	0.2606	0.2557	0.2091
43								
03	0.1171	0.1171	0.1171	0.1171	0.4748	0.4748	0.4748	0.4748
33								
13	0.1258	0.1316	0.1712	0.2091	0.4597	0.4498	0.3816	0.3163
23								
14	0.1258	0.1267	0.1357	0.2091	0.1954	0.1946	0.1874	0.1285
24								
04								
44	0.1171	0.1171	0.1171	0.1171	0.2023	0.2023	0.2023	0.2023
34								
01	0.2270	0.2277	0.2513	0.4768	0.2609	0.2593	0.2468	0.1171

V 装置の調整

i) Sチャンネルにおける波高選別

Cs¹³⁷ を線源の位置においた時、Pチャンネルのすべてのパルスと coincidence する Sチャンネルのスペクトルは Fig. 7 の様になる。期待される約 290 Kev の γ

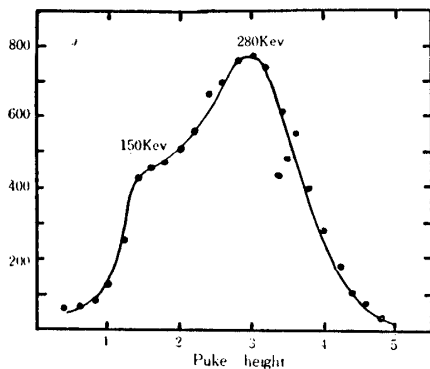


Fig. 7 γ -ray spectrum of the S-channel in coincidence with all pulses in the P-channel

線のピークの他に低エネルギーピークが表れる。之はPチャンネルとSチャンネルとの波高の色々な部分の coincidence をとる事により主としてPチャンネルの低エネルギーの部分と coincidence している事が明らかとなるので、蛍光体Pに入る前に周囲の物体で散乱をうけてエネルギーの下った γ 線による P-S coincidence か又は蛍光体Pで一度散乱をうけた後他の物体で更に散乱をうけた γ 線にする P-S coincidence と考えられる。この好ましくない coincidence は Sチャンネルの波高選別器のバイアスのきめ様によってのぞく事が出来る。

1 Mev の入射 γ 線に対しては 320 Kev 以上、660 Kev

の入射 γ 線に対しては 220 Kev 以上にきめればよい事が実験的に確かめられた。

ii) Pチャンネルにおける波高選別

入射 γ 線のエネルギーが 1 Mev 近くなると Pb 遮蔽を透過してS結晶に入る γ 線が可成り増加してくる。従ってこの γ 線が更にS結晶で散乱して蛍光体Pに入る事による P-S coincidence の影響が無視出来なくなる。線源として Sc⁴⁶ を用いた場合 S結晶における計数の内容を実験的にもとめると

- ① 蛍光体Pで散乱されてS結晶に入る正規の γ 線 5
- ② Pb 遮蔽で散乱されずに直接 S結晶に入り photopeak として数えられるもの 2
- ③ ②と同様の過程で S結晶に入り Compton として計数されるもの 7
- ④ 蛍光体P以外で散乱されて S結晶に入るもの 13

この ③ の内の約 $\frac{1}{25}$ (S結晶より蛍光体Pを見る立体角)は蛍光体Pに入って好ましくない P-S coincidence を生ずる可能性をもっている。処で線源→S結晶→P結晶における散乱角の分布をこの配置についてしらべると大体 135° を中心に半値巾30° の Gauss 分布を示す。S結晶で散乱された後蛍光体Pに入る γ 線の内Pチャンネルで数えられるものが $\frac{1}{10}$ 以下になる様にする為には散乱角が 120° 以上のもの即ち Sc⁴⁶ の場合にはP結晶に入る γ 線が 250 Kev 以下の γ 線は数えない様にPチャンネルのバイアスを決めれば充分であった。

iii) 偏光計前面での散乱

Pb コリメーターは線源に接近しておかれた大きな散乱体とも考えられるからこの前面で散乱された γ 線の内 D結晶に入るものがあると当然 $N_{||}/N_{\perp}$ の値を乱す原

因となる。処で散乱された γ 線は入射 γ 線よりエネルギーが低下するので D チャンネルのバイアスを適当に選ぶか又は D 結晶を適当な厚さの Pb で遮蔽する事により減少させる事が出来る。 Sc^{46} の γ 線について D チャンネルのバイアスを 150 Kev 以上に決め前面に 5 mm の Pb 板を付した場合において散乱された γ 線による計数が直接 D 結晶に入るものの計数の約 10% になる様にする事が出来た。この場合測定された $N_{||}/N_{\perp}(90^{\circ})=0.93 \pm 0.02$ で上記の補正を行うと $N_{||}/N_{\perp}(90^{\circ})=0.92 \pm 0.03$ となり計算より期待される 0.89 と実験誤差の範囲で一致を得た。なお Pb 板 (5mm) のない時の $N_{||}/N_{\perp}(90^{\circ})=0.96$ で散乱された γ 線の影響を明らかに示している。

iv) Sample Setting

方向相関の場合に比して Sample Setting は相当面倒である。我々の装置においては蛍光体 P と S 結晶が一体となって廻転する様作られているので Sample を偏光計の前面に固定し $N_{||}/N_{\perp}$ の位置で D チャンネルでの計数が変化しない様に調整する事によって Setting を可成り容易に行う事が出来た。

VI 性 能

偏光計の性能の中最も大きな意味をもつのは非対称パラメーターである。実験値と比較する為には崩壊様式によってきまる相関函数 $W(\theta, \varphi)$ (appendix II) と Table 1-2 の非対称パラメーターとから計算した値を求めねばならない。しかし大体の比較を容易にする為には Table 1-2 から求めた点状検出器近似での R に相当するものを求めておく と便利である。之は 0.50 Mev に対して $R=3.04$ 0.64 Mev に対して $R=2.80$ 1.00 Mev に対して $R=2.12$ Ca^{44} のカスケード γ 線を用いて偏光—方向相関を測定した場合の triple coincidence (true) $\approx 10/\text{min}$ で true 対 accidental の比 $=3:2$ であった。

尚本研究を行うに当ってプラスチックシンチレータについて有益な助言を与えられた東京大学原子核研究所の方に厚い感謝の意を表す。尚この研究の一部は文部省各個研究費によるものであることを附記する。

Appendix I.

Polystyrene + p-terphenyl (1%) + POPOP (0.03%) + Zincstearate (0.03%) のプラスチックシンチレータに対する γ 線の linear absorption Coefficient

$h\nu$ (Kev)	μ (cm ⁻¹)
100	0.171
200	0.140
300	0.121
500	0.099

600	0.091
800	0.080
1000	0.072
1500	0.058

Appendix II.

γ - γ カスケードにおいて偏光計において第一の γ 線の

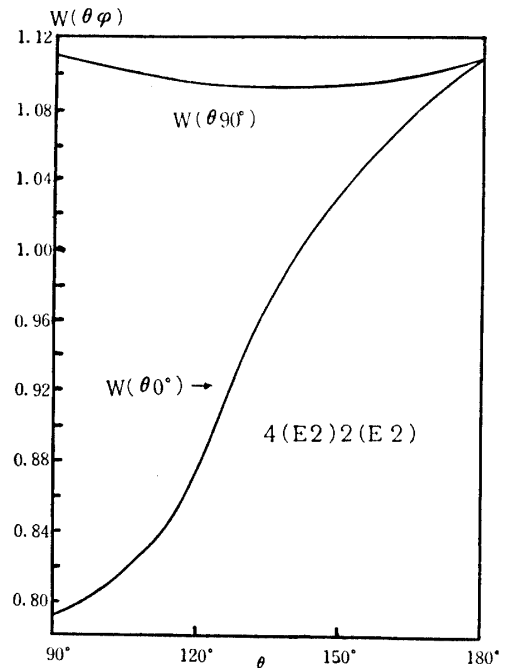


Fig. A II a Function of the polarization-direction correlation for the case of $4(E2)2(E2)0$

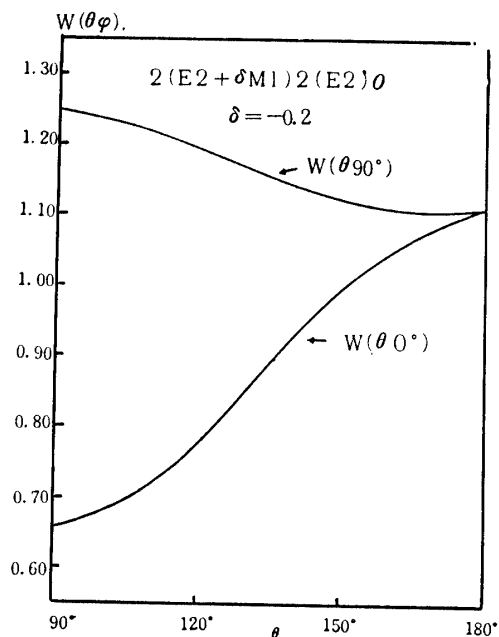


Fig. A II b Function of the polarization-direction correlation for the case of $2(E2+M1)2(E2)0 \delta = -0.2$

偏光を測定する場合と第二の r の偏光を測定する場合の効率が同じである場合この両方をこみにした相関関数を二三の例について書くと次の様になる。

4(E2)2(E2)0 に対して

$$\langle W(\theta\varphi) \rangle_{AV} = 1 + 0.1020 P_2(\cos\theta) + 0.0091 P_4(\cos\theta) + [-0.0510 P_2^2(\cos\theta) + 0.0008 P_4^2(\cos\theta)] \times \cos 2\varphi$$

2(E2+M1)2(E2)0, $\delta = -0.20$ に対して

$$\langle W(\theta\varphi) \rangle_{AV} = 1 + 0.0967 P_2(\cos\theta) + 0.0126 P_4(\cos\theta) + [-0.0953 P_2^2(\cos\theta) + 0.0011 P_4^2(\cos\theta)] \times \cos 2\varphi$$

3(E2+M1)2(E2)0, $\delta = -0.25$ に対して

$$\langle W(\theta\varphi) \rangle_{AV} = 1 + 0.1064 P_2(\cos\theta) - 0.0049 P_4(\cos\theta) + [0.0087 P_2^2(\cos\theta) - 0.0004 P_4^2(\cos\theta)] \cos 2\varphi$$

之等をグラフに示すと次の様になる。

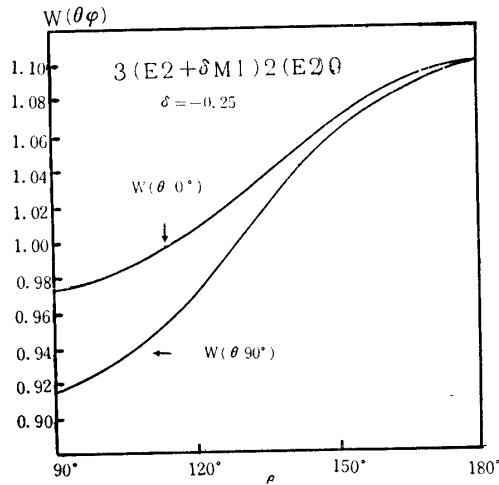


Fig. A II c Function of the polarization-direction correlation for the case of $3(E2 + M1)2(E2)0 = 0.25$

Appendix III
 OP_{jk} と OD_i 間の角 θ_{ij}
 $|\cos \theta_{jj}|$

$ij/0$	90°	120°	150°	180°
00	0.0000	0.5000	0.8660	1.0000
10	0.0000	0.4848	0.8397	0.9696
20	0.0000	0.4848	0.8397	0.9696
30	0.2447	0.6968	0.9621	0.9696
40	0.2447	0.2728	0.7173	0.9696
01	0.0000	0.4910	0.8504	0.9820
02	0.0000	0.4910	0.8504	0.9820
11	0.0467	0.4294	0.7778	0.9054
22	0.0467	0.4294	0.7778	0.9054
31	0.2403	0.6843	0.9448	0.9521
32	0.2403	0.6843	0.9448	0.9521
41	0.2403	0.2679	0.7044	0.9521
42	0.2403	0.2679	0.7044	0.9521
03	0.1910	0.6564	0.9459	0.9820
13	0.1852	0.6365	0.9172	0.9521
23	0.1852	0.6365	0.9172	0.9521
33	0.4255	0.8213	0.9969	0.9054
43	0.0551	0.4517	0.8375	0.9988
04	0.1910	0.3256	0.7549	0.9820
24	0.1852	0.3157	0.7320	0.9521
14	0.1852	0.3157	0.7320	0.9521
34	0.0551	0.5473	0.8927	0.9988
44	0.4255	0.0841	0.5713	0.9054

文 献

- 1) L. C. Biedenharn and M. E. Rose, *Rev. Mod. Phys.* **25** 172 (1953)
- 2) F. Metzger and H. Deutsch, *Phys. Rev.* **78** 551 (1850)
- 3) J. J. Kraushaar and M. Goldhaber, *Phys. Rev.* **89** 1081 (1953)
- 4) J. N. Brazos and R. M. Steffen, *Phys. Rev.* **102** 753 (1956)
- 5) W. Heitler, *The Quantum Theory of Radiation 3rd Edition*, **217** (Oxford University Press 1954)
 (1959年6月30日受理)