

X 線の偏光測定実験

今西健介 岡村吉彦 白津和夫

2000年 3月 17日

目次

1	概要	2
2	実験原理	2
2.1	X-ray generator の発生原理	2
2.2	poly-ethylene での reaction	3
2.3	偏光の測定原理	4
3	実験内容	4
3.1	実験装置	4
3.2	実験の評価	5
3.2.1	空気の吸収	5
3.2.2	SSD で検出される X 線の count rate	6
3.2.3	誤差の判定	6
3.2.4	人体への影響	7
4	実験結果	7
4.1	HV 15kV	7
4.2	HV 20kV	7
4.3	HV 25kV	7
5	解析	11
6	考察	20
6.1	偏光度の補正	20
6.2	poly-ethylene のずれによる影響	20
6.3	background の影響	21
6.4	エネルギー依存性	21
6.5	低エネルギーにおけるスペクトル及び偏光度	22
6.6	印加電圧依存性	22
7	付録	23

1 概要

本実験では対陰極型 X 線 generator(K5039S) から放出される X 線の偏光を調べる。実験は X 線 generator からの X 線を poly-ethylene の 2 次 target に照射し、散乱された X 線を Ge の SSD で検出する。また、X 線 generator と poly-ethylene の 2 次 target を水平回転ステージに固定し回転させて角度を変えて測定する。

X 線 generator からは、1 次 target(W) の特性 X 線と制動放射による連続 X 線の 2 種類が放射される。前者は無偏光で後者は偏光しているので、この 2 つの強度 (count 数) の比から偏光度を求める。また、その energy 依存性、generator の filament-target 間の印加電圧の依存性について考察する。

また、偏光の測定により、generator 内部で行なわれている制動放射のメカニズムを解明する。

2 実験原理

2.1 X-ray generator の発生原理

generator 内部の構造は図 1 に示す。

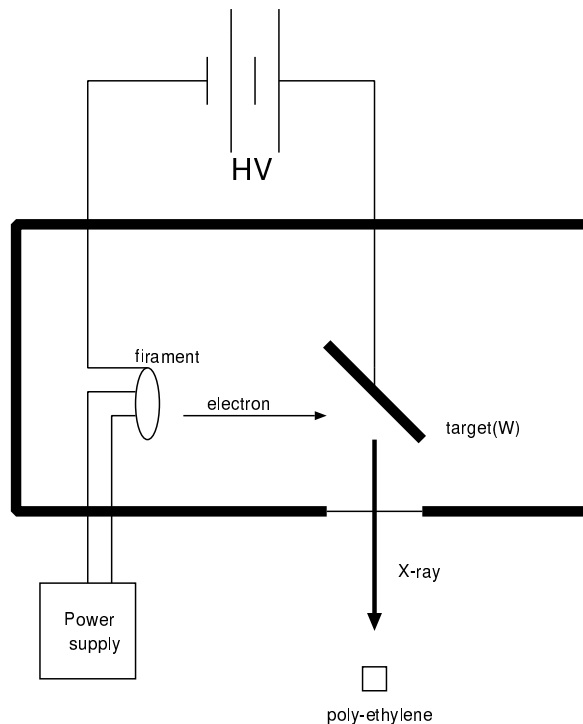


図 1: generator の構造

filament 中の electron は高圧により加速され、W の 1 次 target に入射する。W 内で、electron は線スペクトル放射と制動放射を行なう。

線スペクトル放射とは、入射 electron が W の内殻 (K 殻、L 殻 etc) の electron を叩きだし、その外側の殻から electron が落ちてくる際に放射する W の特性 X 線のことであり、これらの peak line として得られる X 線は一般に無偏光である (この実験では generator にかける高圧は 15kV~25kV

なので、特性 X 線としては W の L_{α} (8.37keV)、 $L_{\beta 1}$ (9.67keV)、 $L_{\beta 2}$ (9.96keV)、 L_{γ} (11.31keV) などが得られると予想される)。

一方制動放射とは、electron が W 原子核の coulomb 力に加速を受けることによって放出される radiation のことである。electron が非相対論的 ($v \ll c$) であると仮定すると、放出される X 線の電場成分 \vec{E} は、

$$\vec{E} \sim \frac{e}{c^2 R^3} [\vec{R} \times (\vec{v} \times \vec{R})]$$

$$|\vec{E}| \sim \frac{e}{c^2 R} v \sin \theta$$

となる。ここで、 \vec{R} は X 線源から観測点 (本実験では poly-ethylene) へのベクトル、 \vec{v} は electron の速度ベクトル、 θ は \vec{v} と \vec{R} のなす角。

これより、得られる連続 X 線の電場成分 \vec{E} は $\theta=90^\circ$ の時最も強くなり、 \vec{v} 方向に得られることがわかる。平均的に見た場合、electron は主に減速する方向、即ち $-\vec{v}$ 方向に強く加速を受けるので、 \vec{E} は \vec{v} に平行な成分を多く持つことが予想される。特に electron が最初の reaction で全 energy を放射するような場合 (例えば印加電圧 15kV の時、X 線 energy が 15keV 程度の場合)、 \vec{v} 方向に大きく偏光していると考えられる。

2.2 poly-ethylene での reaction

poly-ethylene では主に Thomson 散乱が起こる。electron による photon の散乱断面積は、

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = r_0^2 (\sin^2 \phi + \cos^2 \theta \cos^2 \phi)$$

$$r_0 \equiv \frac{e^2}{mc^2}$$

特に、入射 X 線に対し 90° 方向に散乱される時、

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = r_0^2 \sin^2 \phi$$

で表される。ここで、 ϕ は入射 X 線の電場ベクトルと散乱 X 線の方向のなす角 (図 2 参照)。

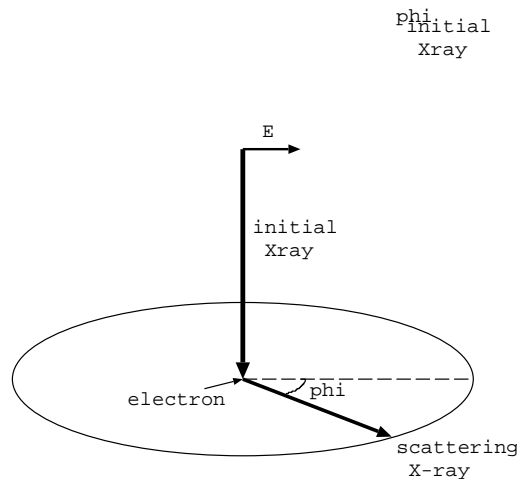


図 2: Thomson 散乱

上式より、散乱 X 線は $\phi=90^\circ$ 、即ち入射 X 線の電場ベクトルに垂直な方向により強く出ることがわかる。

2.3 偏光の測定原理

偏光度 Π は、

$$\Pi = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}}$$

で定義される。ここで I_{max} は得られる強度の最大値 ($\phi=90^\circ$)、 I_{min} は最小値 ($\phi=0^\circ$ 、 180°)。

本実験では、 ϕ を変化させてあらゆる方向から測定し、 I_{max} 、 I_{min} を導出することにより偏光度を計算する。

3 実験内容

3.1 実験装置

装置は図3の通り。turn tableに乗った generator を回転させることにより、poly-ethylene と Ge 検出器の検出口を含む平面において 360° 方向で測定できるようにした。poly-ethylene は直径 1cm、高さ 1cm の円柱型の試料を用いた。generator の X 線口から poly-ethylene の距離 = 5cm。poly-ethylene から Ge の距離 = 13.5cm。generator は Kevex 社製の K5039S、Ge 検出器は EG&G 社製の IGLET-X-06135-S を使い、高圧は -1kV をかけた。

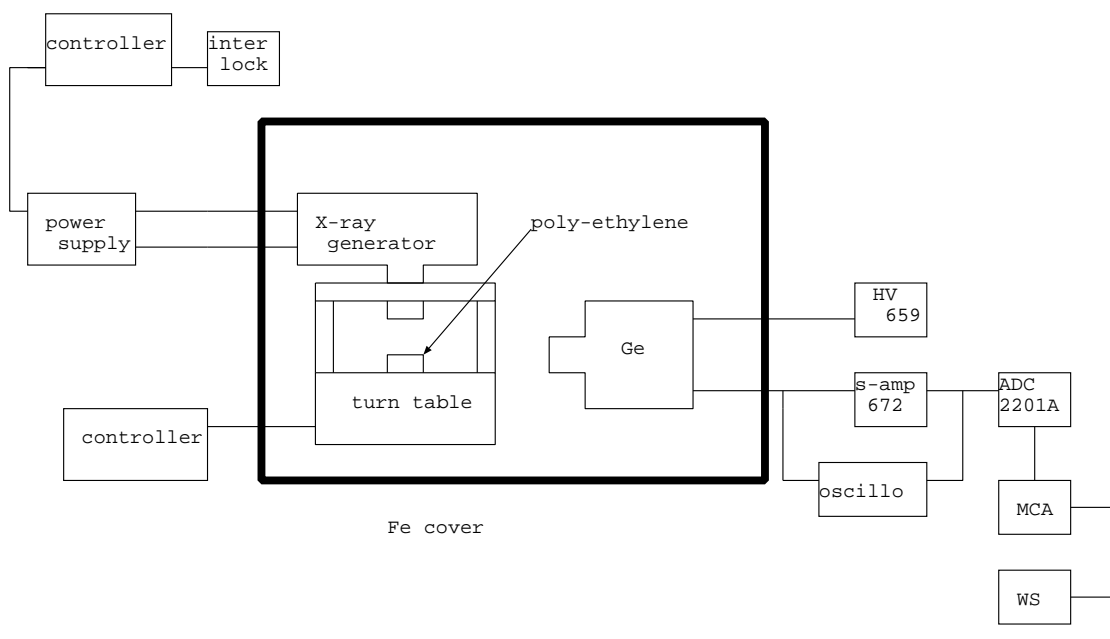


図 3: 装置の概略

測定は generator の高圧を 15kV、20kV、25kV に変えて、それぞれ角度を上から見て図4のようにとり、 $\phi = 0^\circ$ 、 30° 、 60° 、 90° 、 120° 、 150° 、 180° でそれぞれ real time=1000sec ずつ測定した。

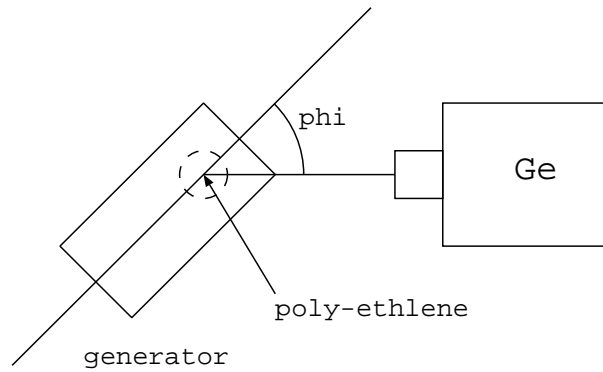


図 4: 角度の定義

3.2 実験の評価

以下で本実験の評価をする。

3.2.1 空気の吸収

実験中に X 線が空気によってどのくらい吸収するかを概算する。

空気を 290K、1atm、成分が 80 % の窒素と 20 % の酸素であると仮定する。窒素と酸素の吸収断面積を μ_N, μ_O 、密度を $\rho_N (= 9.42 \times 10^4 \text{g/cm}^3)$ 、 $\rho_O (= 2.69 \times 10^4 \text{g/cm}^3)$ とすると、X 線 Generator から Ge の SSD までの行程 ($l=18.5\text{cm}$) を透過する割合 P_T は、

$$P_T = e^{-(\mu_N \rho_N + \mu_O \rho_O)l}$$

である。

いろいろな X 線の energy において¹空気の透過率を計算し、表 1 にまとめた。

表 1: 空気の透過率

X 線の energy [keV]	$\mu_N [\text{cm}^2/\text{g}]$	$\mu_O [\text{cm}^2/\text{g}]$	透過率 (%)
2.98 (Ag, L_α)	146	224	2.57
4.95 (V, K_α)	31.3	49.4	42.5
8.05 (Cu, K_α)	6.85	10.1	84.4
15.0 (Y, K_α)	0.929	1.49	97.7
21.1 (Pd, K_α)	0.298	0.483	99.2

X 線のエネルギーにより空気の吸収率が異なり、特に低エネルギーで空気による吸収が顕著であることが分かる。

¹以下吸収断面積は'Atomic Data and Nuclear Data Tables'による

3.2.2 SSD で検出される X 線の count rate

Ge の SSD にどのくらいの count rate で photon が来るのかを概算する。

使用する X 線 Generator が 1 秒間に幾つの photon を出しているかは、浜口さんが 1997 年 5 月 1 日に測定した data を使用する。X 線 generator から 85cm の距離に Si の SSD を置き、0.5mmφ のコリメーターを通して直接 X 線 generator の強度を測定したものである。0.013mA, 15kV の設定で WL_α 部分は合計 248counts/sec であった。また、1ch あたり、連続 X 線部分が 0.7counts/sec·ch、 WL_α 部分は最大 7.9counts/sec·ch であった。

また、他の測定データから、この X 線 generator の窓からは、中心軸方向（軸から 10 度の角度まで）にほぼ一様な count 数の X 線が放射されている事が分かっている。

Thomson 散乱により 8keV 程度の X 線が 1cm 進む間に散乱される確率は散乱断面積から 0.186、poly-ethylene の吸収により X 線が 0.5[cm] 進む間に強度は 0.200 倍になると計算される。poly-ethylene に入射する X 線強度を I とし、X 線が散乱が poly-ethylene の中心で等方的に起こると仮定すると、吸収散乱の効果と立体角を計算してやると SSD(6mmφ) に入射する X 線強度は $9.17 \times 10^{-7}I$ となる。

従って、この実験において X 線 generator を 0.013mA, 15kV に設定した場合、Ge の SSD に検出される photon 数は、空気の影響を考えなければ、W の L_α 部分は合計 26.3counts/sec、1ch あたりでは、連続 X 線部分が 0.07counts/sec·ch、 WL_α 部分は最大 0.83counts/sec·ch の count 数が計測されると予想される。

3.2.3 誤差の判定

ここでは、count 数による揺らぎが偏光を測定する上で影響を及ぼさない程度にするには、どの程度の測定時間が必要か見積もる。

generator から出てくる X 線を direct に測定した実験結果によると、特性 X 線の強度 I_L^0 と連続 X 線の強度 I_C^0 は、 $\frac{I_C^0}{I_L^0} \sim 0.1$ である。poly-ethylene により散乱された X 線のうち、特性 X 線や連続 X 線の無偏光成分は等方的に得られるが、連続 X 線の偏光成分は方向により強度が変わる。しかし予想される偏光度は 10% 程度なので、 $\frac{I_C^0}{I_L^0} \sim 0.1$ の値はどの散乱 X 線でも変わらないとする。

どの角度でも特性 X 線の強度は変わらないとすると、予想される偏光度 10% に対し、

$$0.1 = \frac{I_C^{max} - I_C^{min}}{I_C^{max} + I_C^{min}}$$

$$I_C^{max} = 1.22I_C^{min}$$

相対強度 $A \equiv \frac{I_C}{I_L}$ の 90% エラーは、

$$\Delta A = 1.64 \sqrt{\frac{1}{I_L} + \frac{1}{I_C}} A \simeq \frac{5.44A}{\sqrt{I_L}}$$

よって相対強度の最大と最小の差 $\frac{I_C^{max} - I_C^{min}}{I_L} \simeq 0.22A$ が ΔA より充分大きければ、揺らぎの影響を受けず偏光が測定できているはずである。得られた実験 data では I_L は最低でも 50000counts ほどあるので、

$$(\Delta A)_{max} \simeq \frac{5.44A}{\sqrt{50000}} \simeq 0.024A$$

よってすべての実験 data で揺らぎの影響は小さいと思われる。

3.2.4 人体への影響

この節では、X線の人体への影響の評価を行う。今回の実験では2mm(=d)厚のFeの板で実験装置全体を覆い、X線が外に漏れ出さないようにする。Feの密度は $\rho=7.86 \text{ g/cm}^3$ 、吸収断面積を μ とすると、透過率は $\exp^{-\mu\rho d}$ である。

X線のエネルギーが5keV、15keV、30keV、50keVの時の吸収断面積と透過率を表にまとめたものが下の表1である。

表 2: X線の透過率

X線の energy (keV)	吸収断面積 (cm^2/g)	透過率
5	138	0
15	56.3	3.66×10^{-39}
30	7.8	4.73×10^{-6}
50	~2	$\sim 4.31 \times 10^{-2}$

この図2によると、X線のenergyが15keVでは2mmの鉄板でほぼ100%吸収するのに、energyが上がるとともに急激に透過率が上がることが分かる。今回の実験で使用するX線 generatorの最大発生エネルギーは50keVであるが、表1より50keVのX線は4%以上透過してしまい、かなり人体に危険である。したがって、X線 generatorの放出するX線のenergyが約30keV以下という条件のもとで実験を行う必要があるものと思われる。また、実験中はX線がFeの覆いから漏れ出さないか、サーバイメーターを用いて常に監視しておかなければならない。

4 実験結果

4.1 HV 15kV

generatorの設定は、電圧15kV、電流0.02mA。shaping-ampの設定は、coarse gain=100、fine gain=1.5、shaping time=10 μ sec、PZ=man、BLR=auto。

得られたスペクトルは図5($\phi=0^\circ$)、図6($\phi=90^\circ$)。その他は付録参照。

4.2 HV 20kV

generatorの設定は、電圧20kV、電流0.02mA。shaping-ampの設定は、coarse gain=100、fine gain=1.0、shaping time=10 μ sec、PZ=man、BLR=auto。

得られたスペクトルは図7($\phi=0^\circ$)、図8($\phi=90^\circ$)。その他は付録参照。

4.3 HV 25kV

generatorの設定は、電圧25kV、電流0.02mA。shaping-ampの設定は、coarse gain=100、fine gain=0.8、shaping time=10 μ sec、PZ=man、BLR=auto。

得られたスペクトルは図9($\phi=0^\circ$)、図10($\phi=90^\circ$)。その他は付録参照。

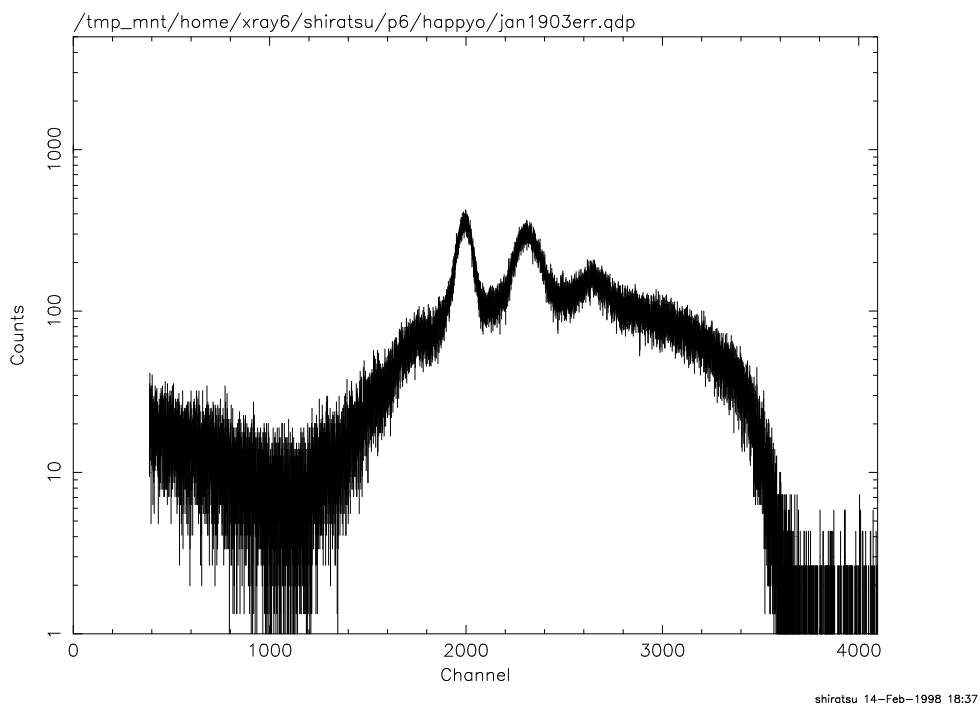


図 5: HV=15kV $\phi=0^\circ$

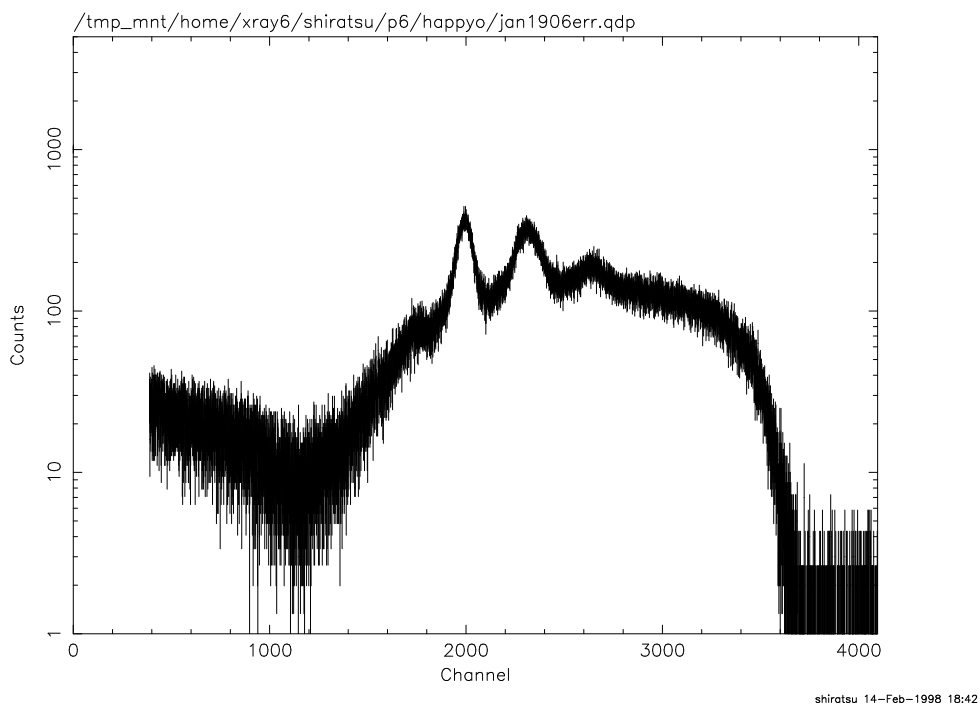


図 6: HV=15kV $\phi=90^\circ$

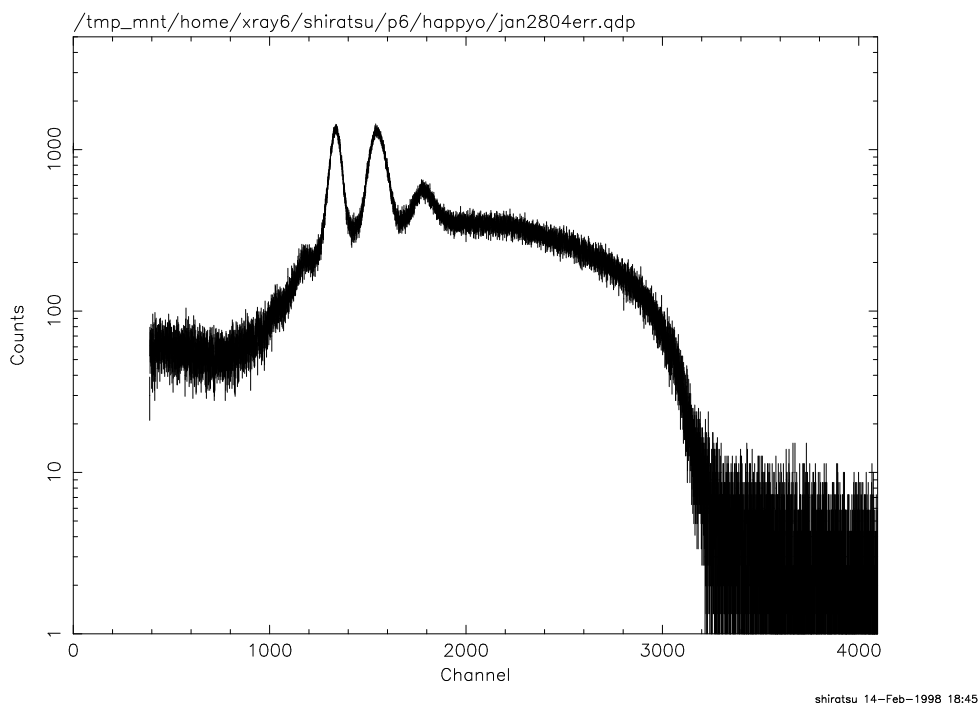


図 7: HV=20kV $\phi=0^\circ$

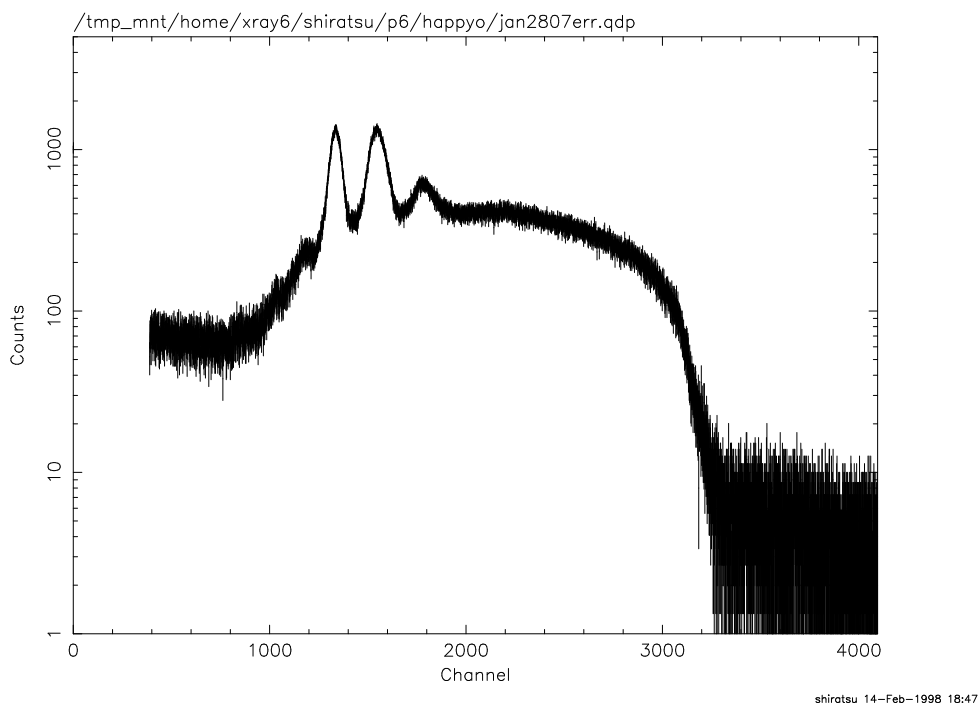


図 8: HV=20kV $\phi=90^\circ$

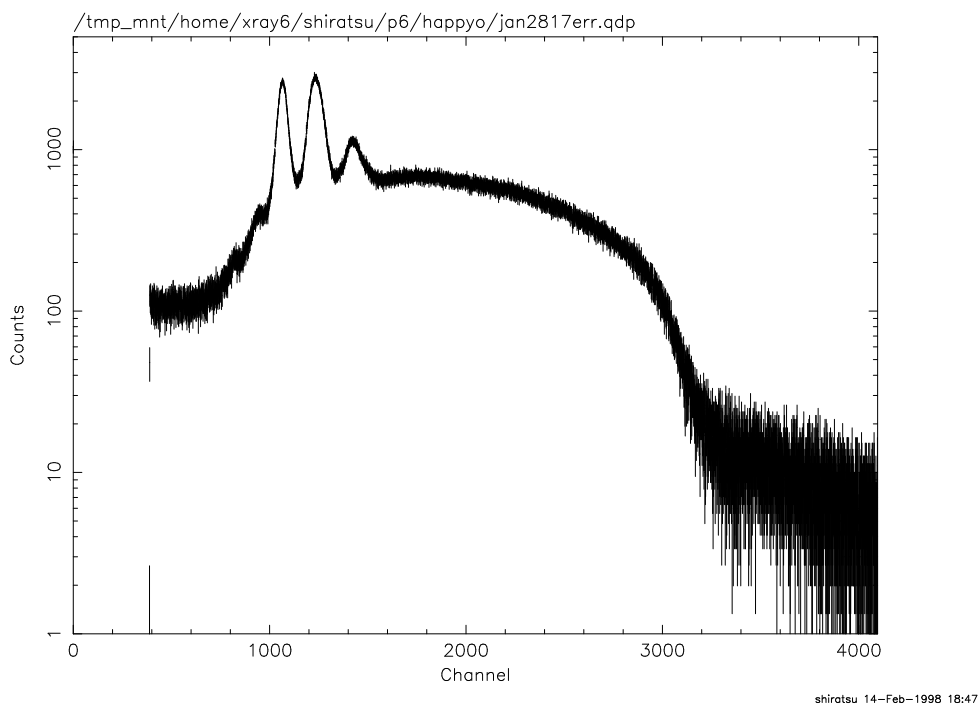


図 9: HV=25kV $\phi=0^\circ$

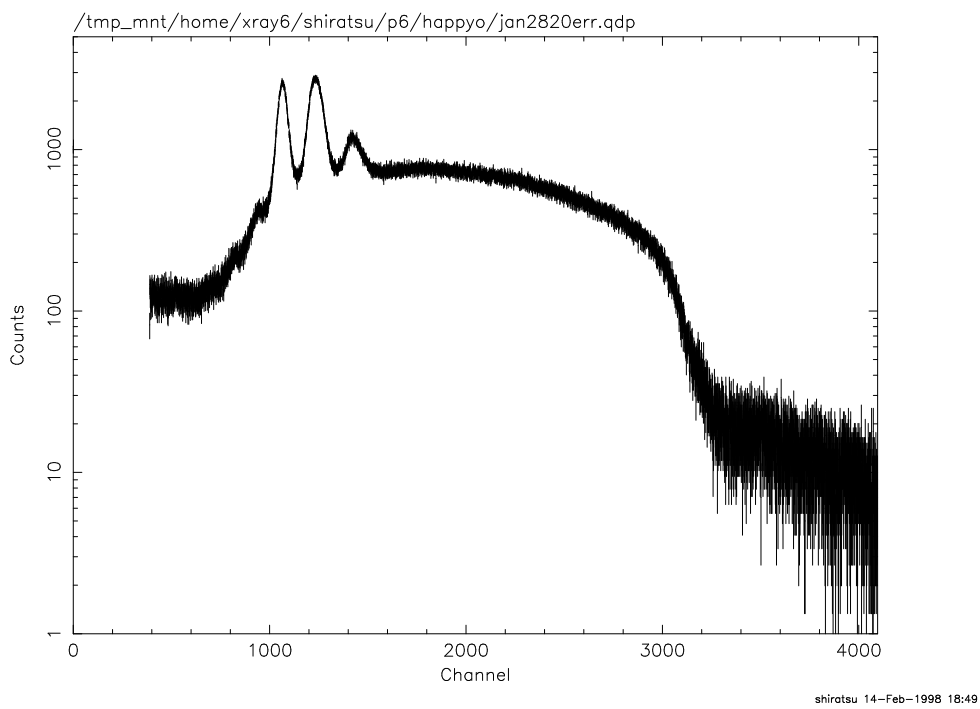


図 10: HV=25kV $\phi=90^\circ$

5 解析

得られたスペクトルより偏光度を求める。

図5～図10のスペクトルはいずれも主に3本のpeak lineと連続x線が見られる。3本のpeak lineは左からWの L_α (8.37keV)、 L_β (9.67keV)、 L_γ (11.31keV)である。

また3本のpeak lineの他に(特に20kVや25kVの時)、6.3keV付近や7.2keV付近に弱いpeak lineが確認できる。まず6.3keV付近のpeakは、カバー板として用いているFeの K_α (6.40keV)が現れていると思われる。7.2keV付近のpeakは、Wの L_α (8.37keV)のGeの L_α (1.19keV)によるエスケープライン(7.12keV)が現れていると思われる。これらはcount数も少なく、特に偏光度を求める上で大きな影響を及ぼさないとと思われるので、以下ではこれらに触れずに議論していく。

まず、3本の特性X線のスペクトル(L_α 、 L_β 、 L_γ)をgaussianでfittingすることにより分離し、連続部分とpeak部分のスペクトルを得る(例として15kV、 0° の時のスペクトルを図11、11a、11bに示す。fitting dataは付録の表5参照)。

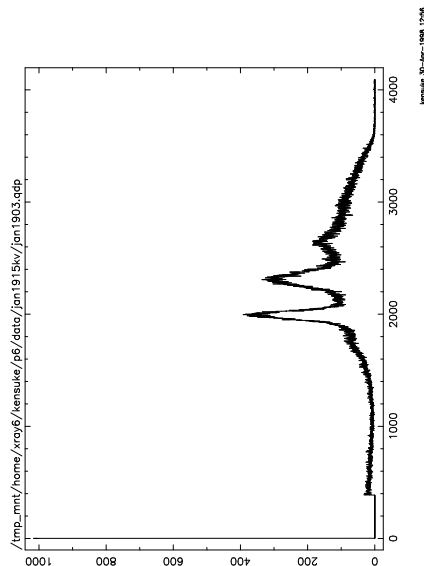


図 11: 全体のスペクトル (HV=15kV $\phi=0^\circ$)

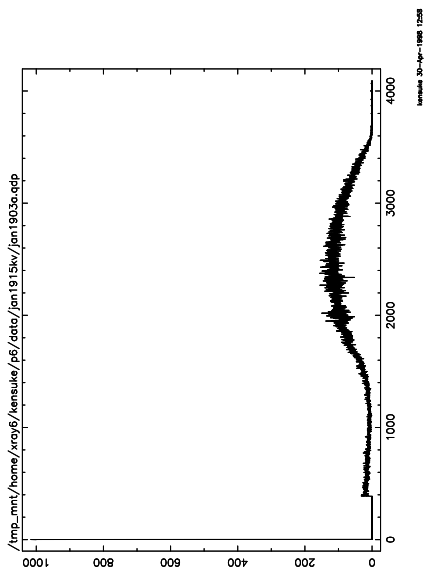


図 11a: 連続 X 線のスペクトル
(HV=15kV $\phi=0^\circ$)

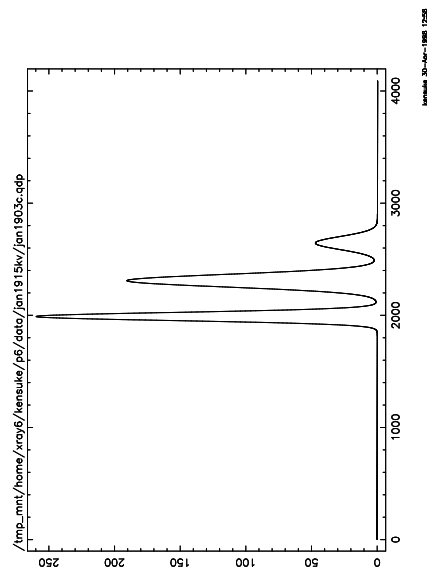


図 11b: 特性 X 線のスペクトル
(HV=15kV $\phi=0^\circ$)

連続部分と peak 部分の総 count 数 N_c 、 N_p を求める。また、連続 X 線は最大で HV によって加速される電子の energy (15kV なら 15keV) まで得られるが、そのうち、60% 以下、60%~80%、80% 以上の 3 つの部分に分け、それぞれ総 count 数 N_l 、 N_m 、 N_h を求める (付録の表 6 参照)。

次に、poly-ethylene の中心軸からのずれなどの影響による count 数の角度依存を避けるため、 N_p を基準にとりそれぞれの相対強度 $I_c (\equiv \frac{N_c}{N_p})$ 、 I_l 、 I_m 、 I_h を求め、表 3 にまとめた。

表 3: 相対強度

HV	ϕ	I_c	I_l	I_m	I_h
15	0	3.266	1.051	1.326	0.8547
	30	3.541	1.151	1.438	0.9837
	60	4.031	1.184	1.600	1.209
	90	4.356	1.263	1.708	1.351
	120	4.174	1.241	1.672	1.226
	150	3.516	1.102	1.411	0.9662
	180	3.321	1.039	1.374	0.8727
	20	0	3.197	1.551	1.085
30		3.412	1.634	1.150	0.6167
60		3.787	1.753	1.275	0.7481
90		3.857	1.738	1.301	0.8010
120		3.756	1.725	1.270	0.7496
150		3.462	1.654	1.166	0.6309
180		3.141	1.543	1.065	0.5504
25		0	3.629	2.078	1.049
	30	3.665	2.052	1.072	0.5409
	60	4.076	2.225	1.193	0.6589
	90	4.314	2.322	1.265	0.7266
	120	4.104	2.236	1.201	0.6664
	150	3.757	2.101	1.093	0.5624
	180	3.568	2.026	1.038	0.5041

それによると強度はいずれも 90° の時に最大、 0° 180° で最小になっている。従って、連続 x 線の電場成分は 0° 方向に偏光していることが分かる。

角度と相対強度の関係を図 12~14 に示す。その際、比較のため 0° の相対強度を 1 に normalize した。

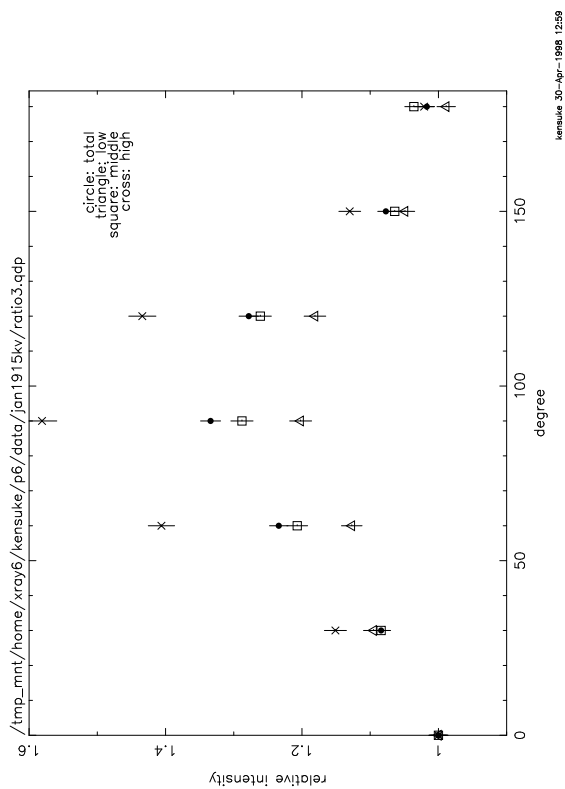


図 12: 角度 - 相対強度関係 (HV=15kV)

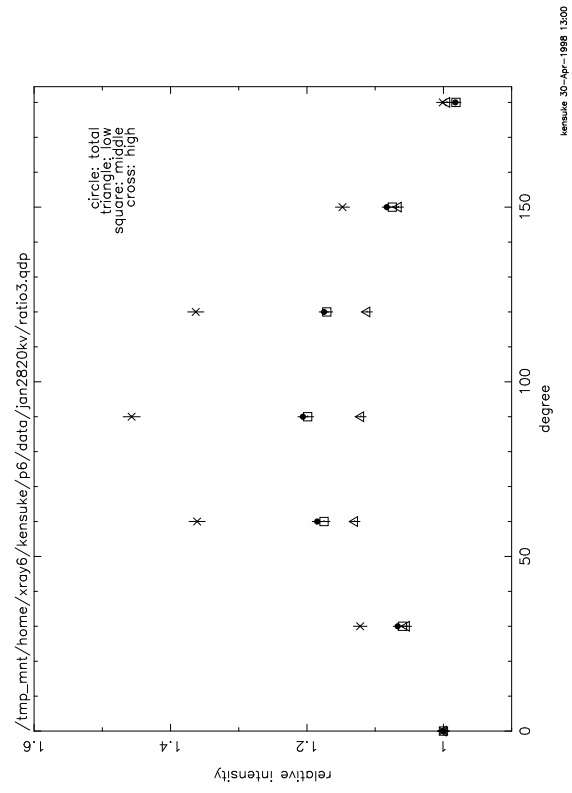


图 13: 角度 - 相对强度关系 (HV=20kV)

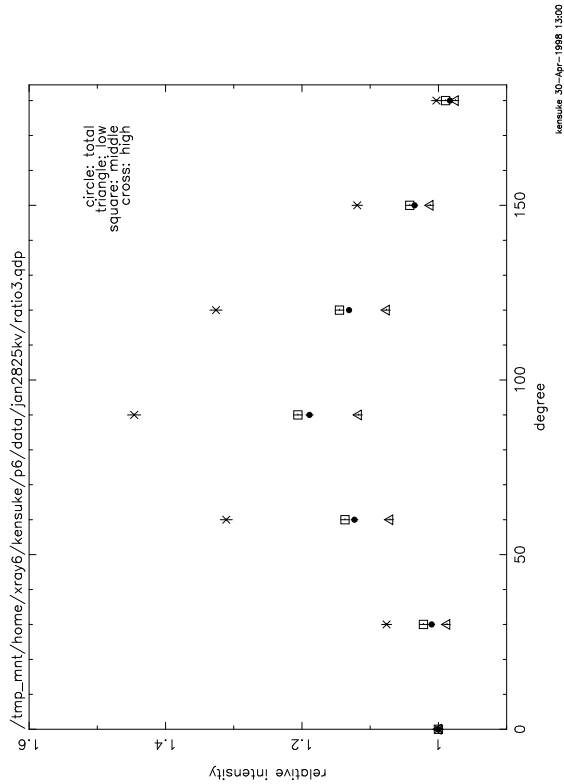


図 14: 角度 - 相対強度関係 (HV=25kV)

得られたグラフは thomson 散乱の散乱断面積に従うので、 $C_1 \sin^2(\frac{2\pi x}{360}) + C_2$ (C_1 、 C_2 は定数) の形でより良く fitting できるはずである。この fitting で I_{max} 、 I_{min} を求め、偏光度を計算する (表 4)。

表 4: 偏光度

HV	15kV				20kV				25kV			
	I_c	I_l	I_m	I_h	I_c	I_l	I_m	I_h	I_c	I_l	I_m	I_h
I_{max}	1.335	1.207	1.295	1.565	1.228	1.145	1.219	1.474	1.175	1.108	1.196	1.433
I_{min}	1.004	1.004	1.023	0.9561	1.003	1.010	1.000	1.008	0.9836	0.9777	0.9880	0.9951
偏光度 (%)	14.13	9.153	12.26	22.62	10.12	6.240	9.880	18.79	8.882	6.235	9.528	18.03

表 4 を見ると、どの印加電圧でも X 線の energy が高いほど偏光度がよい。また、印加電圧が上がるほど偏光度が下がるという傾向が見られる。

そこで、それぞれの印加電圧で energy 分割をさらに細かくして (印加電圧に対する最大 energy の 2% きざみに分割)、偏光度を計算し図 15~17 に示す。但し、図 12~図 14 の fitting の結果から、最小値、最大値をとる θ が 0° 、 90° からほとんどずれていないので、偏光度を計算には、簡単のため I_{max} 、 I_{min} として 0° 、 90° の値を用いた。

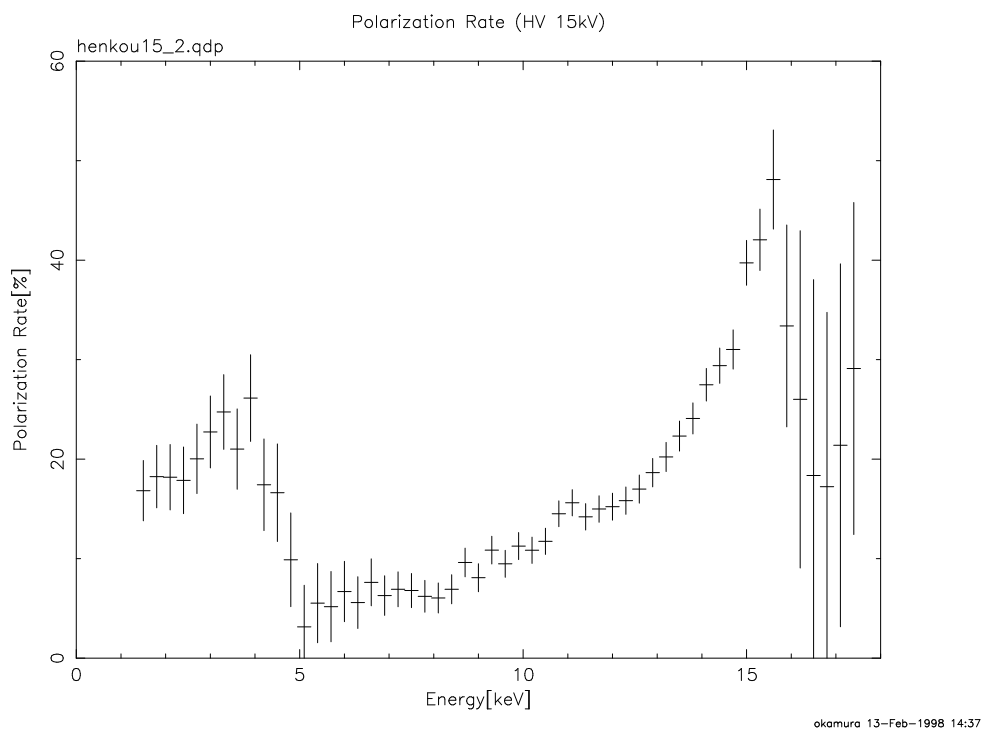


図 15: energy- 偏光度関係 (HV=15kV)

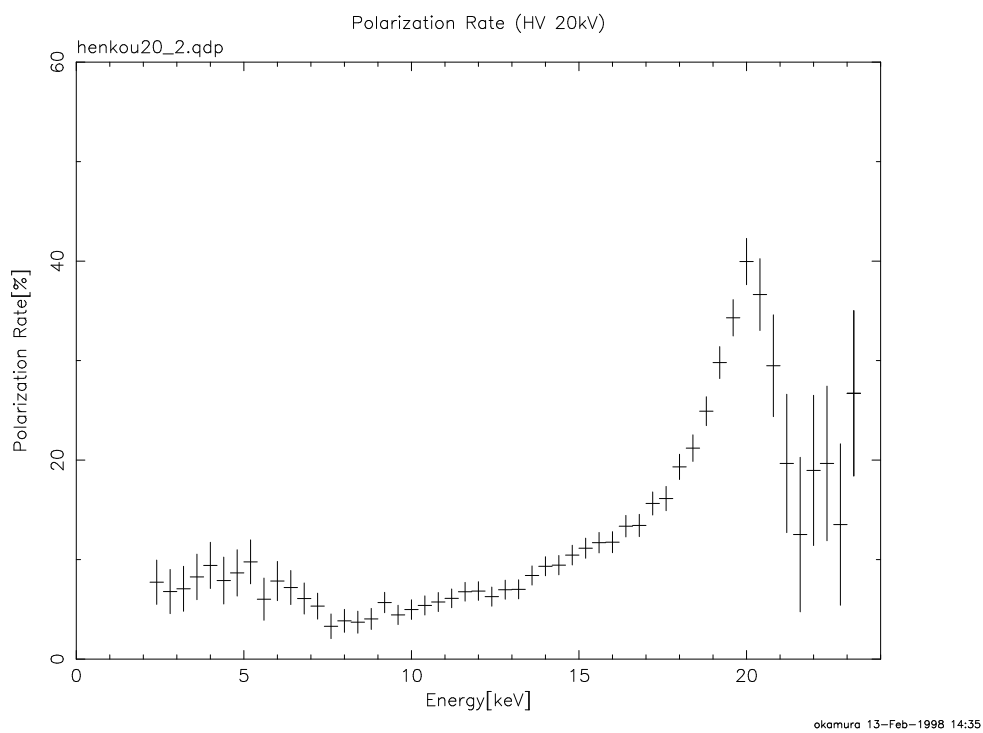


図 16: energy- 偏光度関係 (HV=20kV)

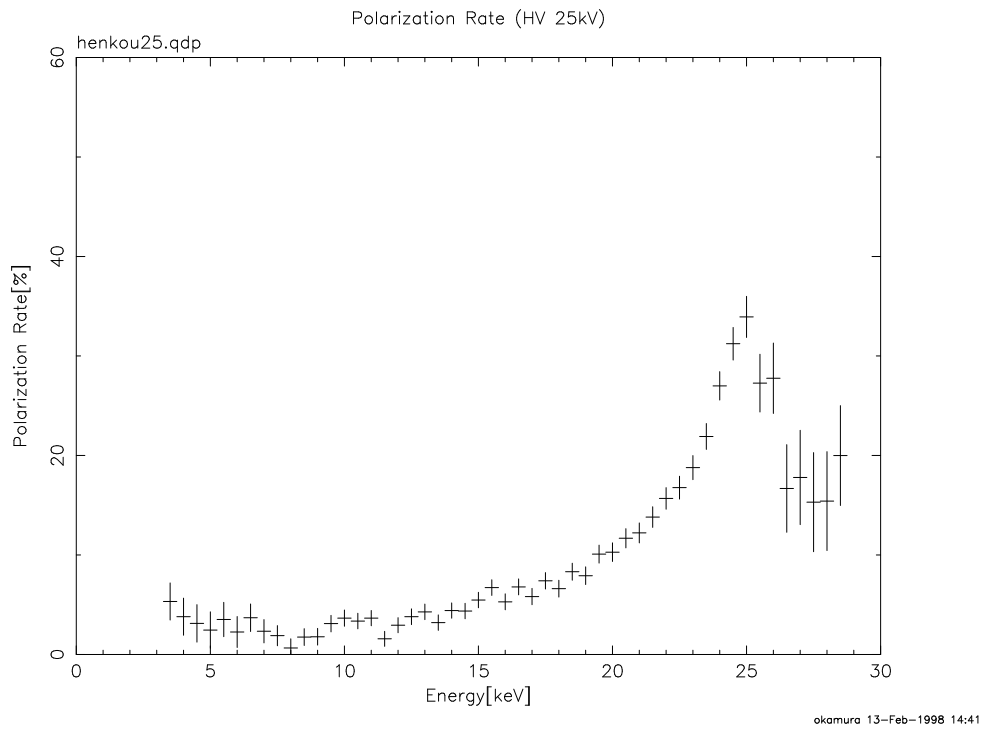


図 17: energy- 偏光度関係 (HV=25kV)

図 15~17 から、どの印加電圧でも最大 energy に近づくにつれて大幅に偏光度が良くなっている。最大 energy では、どの印加電圧でも偏光度はほぼ 40% になる。また、図 15 の 5keV 以下の低 energy 部分で偏光度が高くなっていることが分かる。これらの理由については 6.2 節、6.3 節で考察する。最大 energy を越える X 線も観測されているが、これは pile up による影響と考えられる。

次に、印加電圧に対して偏光度がどう違うのかを比較する。それぞれの data の energy 分割 (最大 energy に対する%分割) に対して、印加電圧 20kV の偏光度を基準にとり、印加電圧 15kV、20kV、25kV の偏光度の割合 (Π_{15kV}/Π_{20kV} 、 $\Pi_{20kV}/\Pi_{20kV} = 1$ 、 Π_{25kV}/Π_{20kV}) を示したものが次の図 18 である。但し、図中の□印が Π_{15kV}/Π_{20kV} 、△印が Π_{25kV}/Π_{20kV} である。

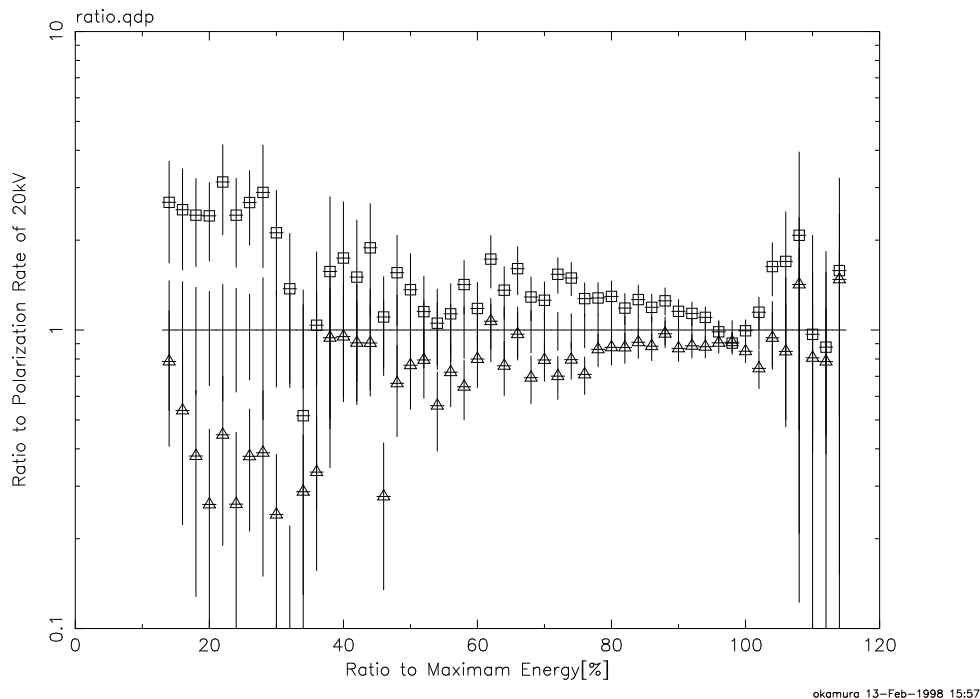


図 18: 印加電圧に対する偏光度の比較

図 18 によると、印加電圧に対する最大 energy(図の横軸の 100% の値) では偏光度はほぼ同じであるのに、その他の部分では全体的に印加電圧 15kV の方が偏光度が高く、25kV の方が偏光度が低いという傾向があることが分かる。

6 考察

6.1 偏光度の補正

5章で計算した偏光度には、poly-ethylene の 2 次 target から SSD($6mm\phi$) を見込む立体角ぶんの補正が必要である。簡単のため poly-ethylene の中心の 1 点で散乱するとして、偏光度の補正項を概算する。

偏光度の真の値を Π とし、poly-ethylene で散乱される X 線の全強度を I とする。Thomson 散乱の偏光因子

$$P = \sin^2 \phi + \cos^2 \theta \cos^2 \phi$$

を SSD を見込む立体角で積分すると、偏光成分は $\phi = 90^\circ$ で $2.35 \times 10^{-4}\Pi I$ 、 $\phi = 0^\circ$ で $8.70 \times 10^{-8}\Pi I$ の強度が測定される。また、無偏光成分は、 4π 方向に一様に散乱されるとすると、 ϕ に因らず $1.23 \times 10^{-4}(1 - \Pi)I$ の強度となる。

従って、5章で計算した偏光度 Π' は

$$\Pi' \simeq \frac{2.35\Pi}{2.46 - 0.11\Pi}$$

となり、偏光度が 0.2 程度の時、 $\Pi' \sim 0.95\Pi$ という補正が必要である。

6.2 poly-ethylene のずれによる影響

表 3 で、 N_c 等の値をピークのカウント N_p で割ったのは、poly-ethylene のずれによる影響を防ぐためである。実際、poly-ethylene のずれによって poly-ethylene 内の吸収に角度による差ができていくとする。付録の表 6 の N_p をプロットしてみればわかるが、 N_p は偏光による Thomson 散乱の角度依存 (\sin^2 の形) は見せていないので、カウント数の差は poly-ethylene のずれによる吸収の差であるとみなせる。これを用いると、8 ~ 11keV 付近では吸収のずれが最大 95 % 程であることがわかり、この付近やそれ以上のエネルギーでは吸収のずれが及ぼす影響は小さいとみなせる。しかし 5keV 付近では吸収のずれは 75 % 程になり、この付近になると吸収の影響は無視できない。しかし観測上は、この付近は Ge のエスケープの影響を強く受けているので、吸収のずれによる影響はほぼ関係なくなっているといえる。

6.3 background の影響

全測定終了後に poly-ethylene を外して測定した。そのスペクトルを図 19 に示す。印加電圧は 20kV、 Coarse gain=100、 fine gain=1.0、 real time=1000sec。

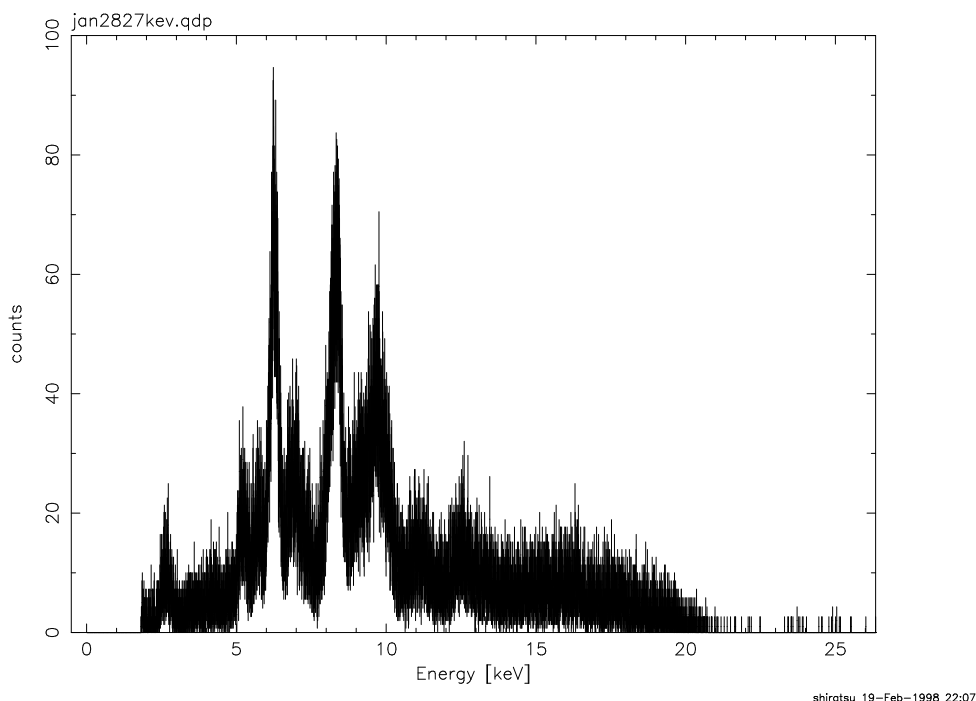


図 19: background

最も強いピークは Fe の K_{α} (6.40keV) であると考えられ、その強度は 70counts 程である。この data は poly-ethylene の散乱、透過の影響を考えていないので、その補正が必要である。計算により、 poly-ethylene の全体での散乱確率は約 6 %、透過確率は約 4 %と求められるので、約 10 %の X 線が poly-ethylene の外に出ていることになる。即ち、この data のうち約 10 %が background として測定 data に乗っていると考えられる。しかし、それは最大でも 7counts 程に留まるので、測定に影響はほとんど与えていないと思える。

6.4 エネルギー依存性

図 12 から図 14 を見ると、SSD で測定された X 線のエネルギーが高くなるにつれて偏光度が高くなっていることが分かる。

その原因について考察する。

X 線の連続部分は generator の 1 次 target での制動放射により発生する。1 次 target で制動放射してそのまま検出された X 線は偏光度が高いのに対し、電離損失を数回繰り返しエネルギーをいくらか失った後で制動放射された X 線は様々な方向に偏光している X 線が重なってほとんど偏光していないと考えられる。また、後者の過程で制動放射された X 線の方が、比較的エネルギーが低いことが予想される。

従って、高エネルギーの X 線は、1 次 target で 1 回だけ制動放射された X 線の割合が高いため偏光度が高くなり、低エネルギーの X 線ほど何回も電離損失を行ってから制動放射するため偏光度が低くなると考えられる。

6.5 低エネルギーにおけるスペクトル及び偏光度

generator から発生した低エネルギーの X 線は、検出器に到達するまでに空気や poly-ethylene に大部分が吸収される。しかし、図 5～図 10 では低エネルギーにおいてもある程度の count 数が測定された。特に 15kV の約 5keV 以下では、エネルギーが下がるに従って count 数が増加している。

また上に述べたように、エネルギーが低い X 線ほど偏光度は低くなると考えられるが、図 15 の 5keV 以下、図 16 の 8keV 以下ではそれに反して偏光度が高くなっている。

これらは、Ge の K_{α} (9.95keV) のエスケープにより説明できる。

その影響が最も顕著に現れている、15kV で考えてみる。連続 X 線のエスケープは、約 5keV より下に現れる。図 5、6 における約 5keV 以下での count 数の増加はこれに対応していると考えられる。エスケープによる X 線は、もともとは偏光した連続 X 線であったため、偏光を示すはずである。それが図 15 の約 5keV 以下で現れた、比較的強い偏光の原因であると考えられる。5keV 付近の偏光度が対応する 15keV 付近の偏光度よりもやや低いのは、エスケープによる X 線以外のものと混ざっているためであろう。

実験前に測定した Cd109 の data によると、 K_{α} 線 (22.1keV) に対するそのエスケープとの総 count 数の割合は、6.3%であった。この割合を用いるとするならば、図 5、6 における約 5keV 以下ではエスケープによる count 数が大部分を占めていることがわかる。

一方、20kV (図 7、8) においては、約 10keV 以下にエスケープが現れているはずである。しかし、10keV 付近では実際の (エスケープではない) X 線の割合が多いため、15kV の 5keV 付近で見られたような急激な偏光度の変化は見られない。エネルギーが下がるにつれて、エスケープによる X 線の割合が増えて、偏光度が増加しているのが分る。

25kV でも同様に 15keV 以下にエスケープが現れるはずであるが、上に述べた理由で 20kV よりもさらにエスケープによる偏光度への影響は見られなくなっている。

6.6 印加電圧依存性

図 18 を見ると、印加電圧を上げるにつれ偏光度が下がっていることがわかる。

入射 electron のエネルギーが全て X 線のエネルギーとして得られるような場合 (図でいう 100 %)、偏光度はいずれの場合もほぼ同じような値を示しているように見える。よってこの 100 % の付近では、全ての過程が印加電圧依存を持たず起こっていることを示している。このことから、偏光度の変化が X 線発生後のイベントで起こっているとは考えにくい。即ち、偏光度の変化の原因は制動輻射の過程にあると考えられる。

例として入射 electron のエネルギーの 40 % のエネルギーの X 線を検出する場合を考える。最初の制動輻射で得られる X 線は理想的に 100 % 偏光していると考えられる。偏光度が低くなるということは、数回の電離損失以降の制動輻射で得られた X 線を観測する機会が増えているためである。15kV の場合、40 % の 6keV のエネルギーの X 線を数回の電離損失以降の制動輻射で観測するためには、9keV 分の電離損失を行なっている必要がある。同様に 25kV の場合、15keV 分の電離損失を行なっていることになる。即ち、15kV より 25kV の方が多い回数の電離損失を経験している、言い替えれば、25kV の方が偏光度が下がっていると考えられる。

印加電圧依存については上で議論したような要因が考えられるが、実際のところははっきりとした原因はわからない。

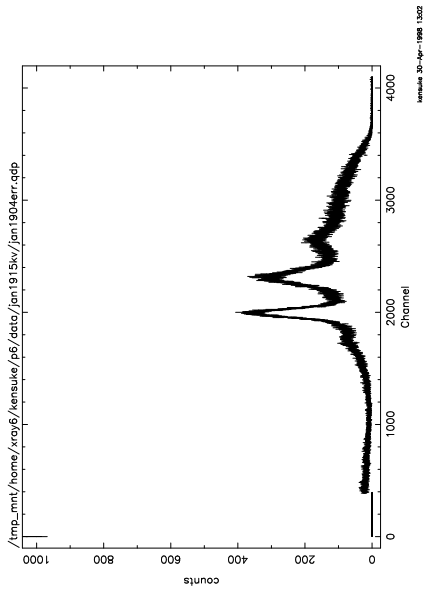
7 付録

表 5: 特性 X 線の fitting data

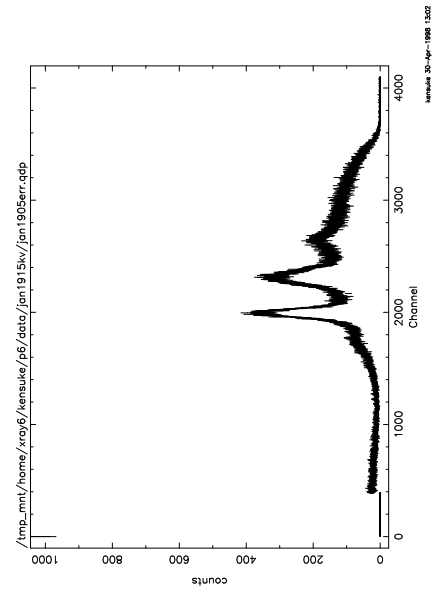
HV	ϕ	L_α			L_β			L_γ		
		中心 (ch)	σ (ch)	波高 (cts)	中心 (ch)	σ (ch)	波高 (cts)	中心 (ch)	σ (ch)	波高 (cts)
15	0	1991.49	35.8833	259.814	2311.29	56.4241	190.702	2647.15	57.9207	47.2636
	30	1991.94	36.6165	255.887	2311.28	56.4015	188.528	2648.96	57.1692	44.5424
	60	1991.50	36.8397	254.697	2312.60	56.9983	190.694	2647.35	49.9477	46.1027
	90	1992.01	35.8784	254.450	2313.08	57.0039	187.783	2646.14	51.8338	43.5464
	120	1991.84	35.4292	255.300	2311.45	56.0648	188.703	2643.46	45.5981	41.2272
	150	1991.80	35.7525	254.251	2311.68	57.4657	185.998	2652.40	58.3191	43.3152
	180	1990.22	47.8018	201.923	2313.40	62.3608	169.238	2654.17	59.3819	36.6103
20	0	1335.69	27.3761	1049.57	1548.74	37.8889	966.403	1784.85	42.3245	196.457
	30	1334.72	27.2342	1037.19	1547.99	37.8086	962.062	1782.17	38.6863	207.395
	60	1335.70	27.4555	1034.43	1548.20	37.9046	961.300	1784.23	37.3436	197.799
	90	1335.57	28.1261	1021.58	1548.67	38.4785	955.737	1783.30	41.2381	199.803
	120	1335.78	27.6682	1025.40	1548.82	37.8959	954.506	1783.47	40.3873	196.624
	150	1335.76	27.2446	1028.68	1548.98	37.7263	956.547	1783.18	38.4214	199.336
	180	1335.65	27.0958	1045.70	1549.14	38.5059	968.431	1786.81	39.2923	201.654
25	0	1065.47	22.7390	2053.61	1234.89	32.4470	2194.98	1423.49	29.9250	413.784
	30	1065.44	23.0840	2041.02	1234.97	32.5666	2159.56	1424.22	35.0531	445.064
	60	1065.51	22.9145	2001.62	1234.98	32.6336	2146.16	1424.54	31.9452	435.988
	90	1065.45	22.9581	1980.80	1234.99	32.7093	2118.09	1423.83	31.3087	407.685
	120	1065.47	22.8990	2006.62	1234.85	32.5418	2120.46	1423.19	32.1694	435.524
	150	1065.30	22.7375	2025.57	1234.81	32.4163	2144.99	1424.09	33.5782	430.905
	180	1065.48	22.7348	2034.73	1234.76	32.6405	2174.31	1423.07	32.4598	430.42

表 6: count 数

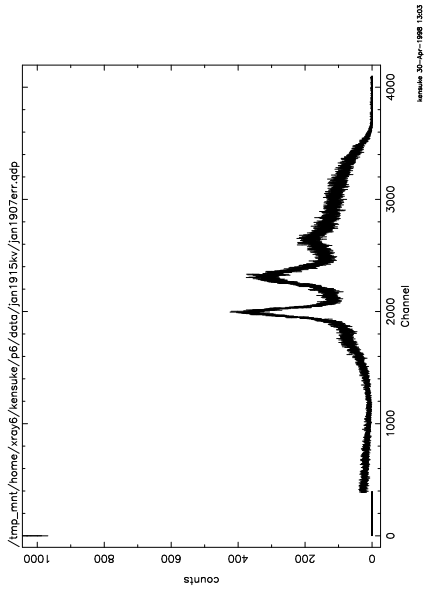
HV	ϕ	N_p	N_c	N_l	N_m	N_h
15	0	5.72e+04	1.868e+05	6.012e+04	7.583e+04	4.889e+04
	30	5.652e+04	2.012e+05	6.246e+04	8.129e+04	5.56e+04
	60	5.654e+04	2.279e+05	6.694e+04	9.048e+04	6.834e+04
	90	5.496e+04	2.394e+05	6.943e+04	9.386e+04	7.427e+04
	120	5.39e+04	2.25e+05	6.688e+04	9.012e+04	6.609e+04
	150	5.591e+04	1.966e+05	6.164e+04	7.89e+04	5.402e+04
	180	5.61e+04	1.863e+05	5.828e+04	7.708e+04	4.896e+04
20	0	1.846e+05	5.902e+05	2.863e+05	2.003e+05	1.015e+05
	30	1.821e+05	6.214e+05	2.975e+05	2.095e+05	1.123e+05
	60	1.81e+05	6.854e+05	3.173e+05	2.308e+05	1.354e+05
	90	1.849e+05	7.12e+05	3.213e+05	2.405e+05	1.481e+05
	120	1.817e+05	6.824e+05	3.134e+05	2.307e+05	1.362e+05
	150	1.799e+05	6.229e+05	2.976e+05	2.098e+05	1.135e+05
	180	1.844e+05	5.871e+05	2.846e+05	1.963e+05	1.015e+05
25	0	3.266e+05	1.18521e+06	6.796e+05	3.425e+05	1.641e+05
	30	3.335e+05	1.22221e+06	6.844e+05	3.574e+05	1.804e+05
	60	3.254e+05	1.32659e+06	7.24e+05	4.045e+05	2.322e+05
	90	3.197e+05	1.37896e+06	7.422e+05	4.045e+05	2.323e+05
	120	3.233e+05	1.32656e+06	7.228e+05	3.884e+05	2.154e+05
	150	3.26e+05	1.22473e+06	6.85e+05	3.564e+05	1.833e+05
	180	3.289e+05	1.17332e+06	6.663e+05	3.413e+05	1.658e+05



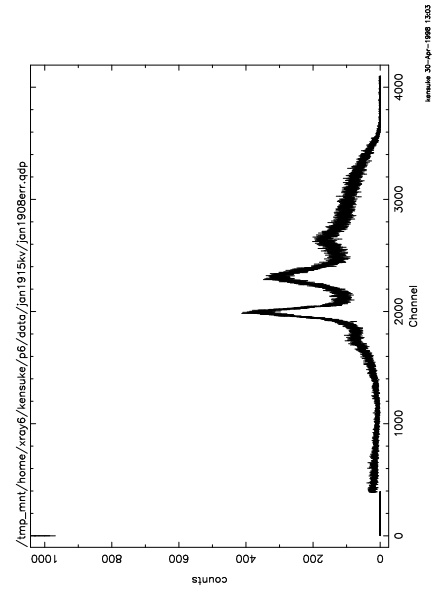
HV=15kV $\phi=30^\circ$



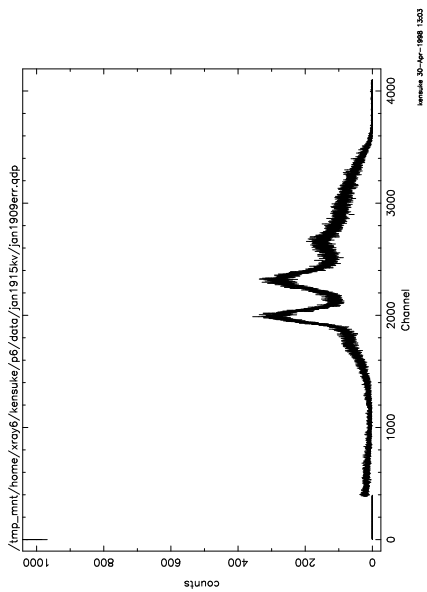
HV=15kV $\phi=60^\circ$



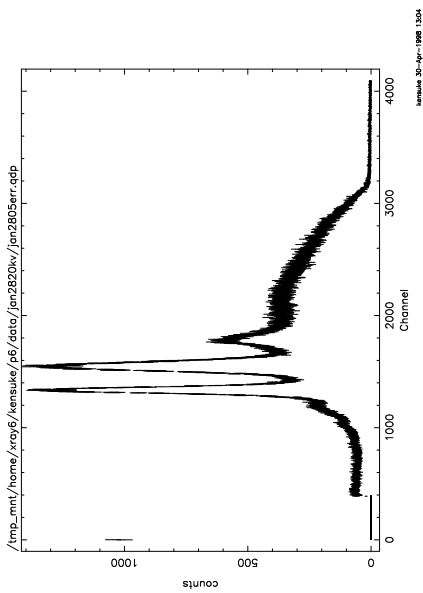
HV=15kV $\phi=120^\circ$



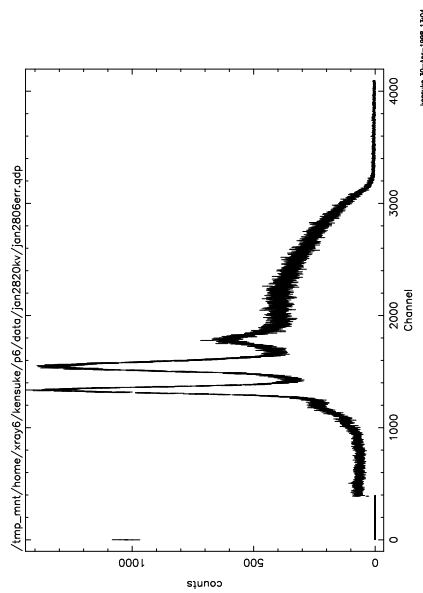
HV=15kV $\phi=150^\circ$



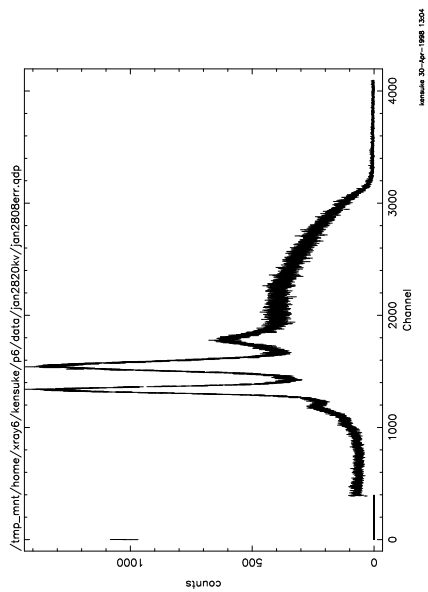
HV=15kV $\phi=180^\circ$



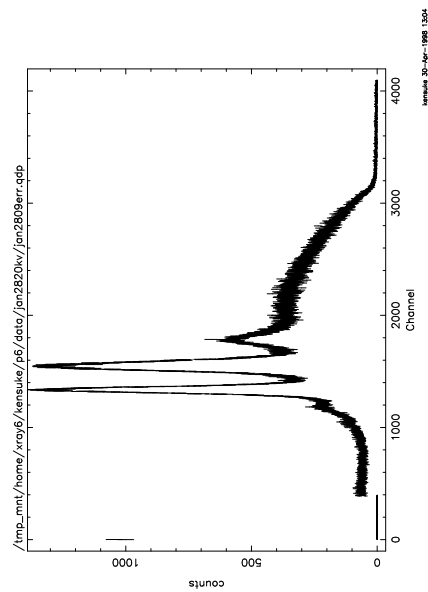
HV=20kV $\phi=30^\circ$



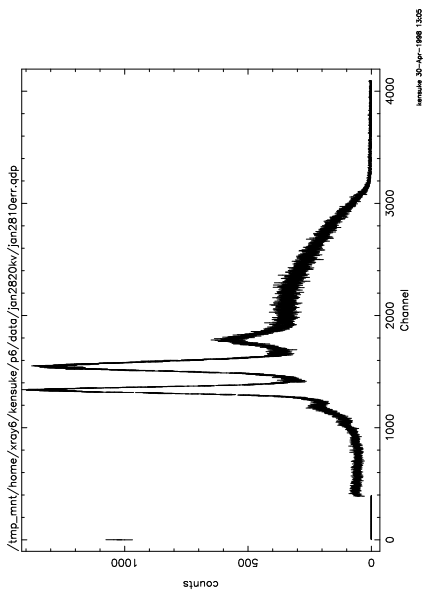
HV=20kV $\phi=60^\circ$



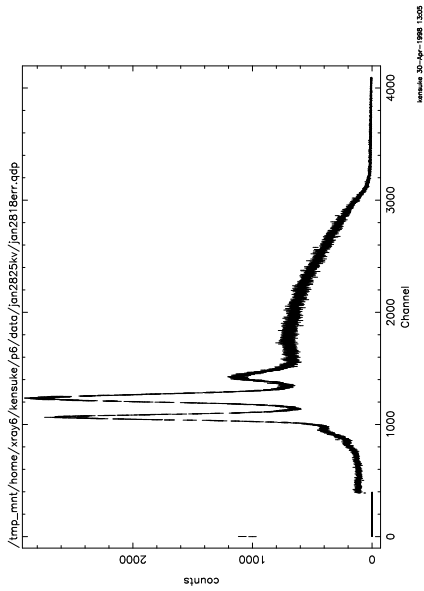
HV=20kV $\phi=120^\circ$



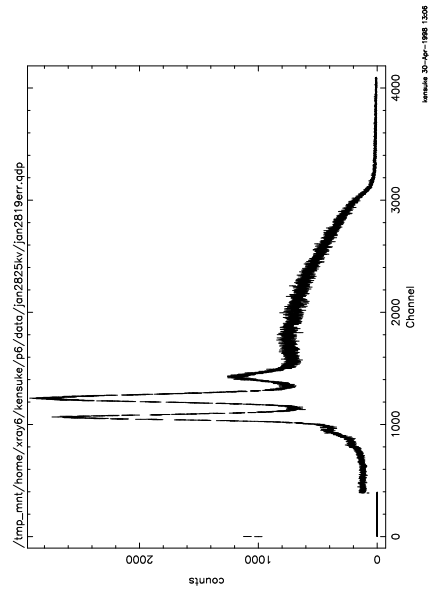
HV=20kV $\phi=150^\circ$



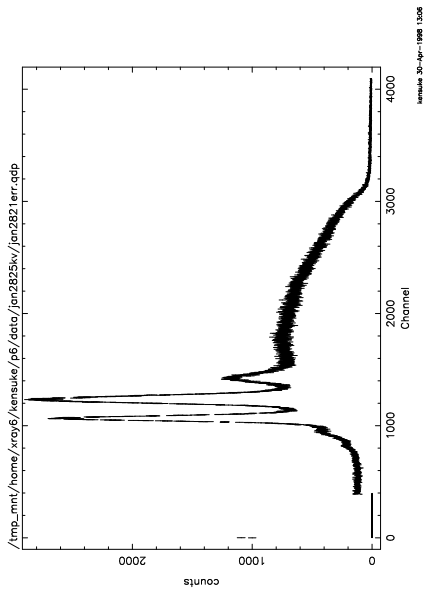
HV=20kV $\phi=180^\circ$



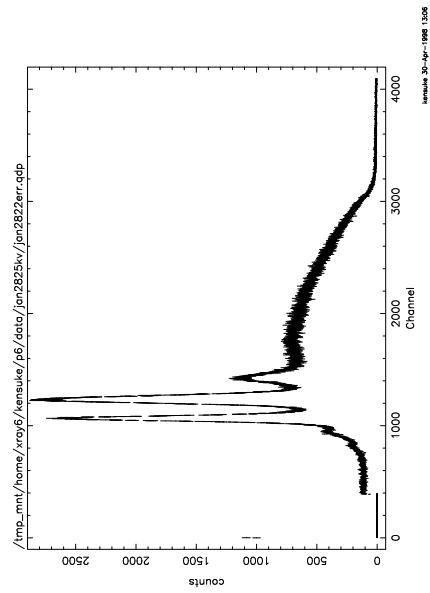
HV=25kV $\phi=30^\circ$



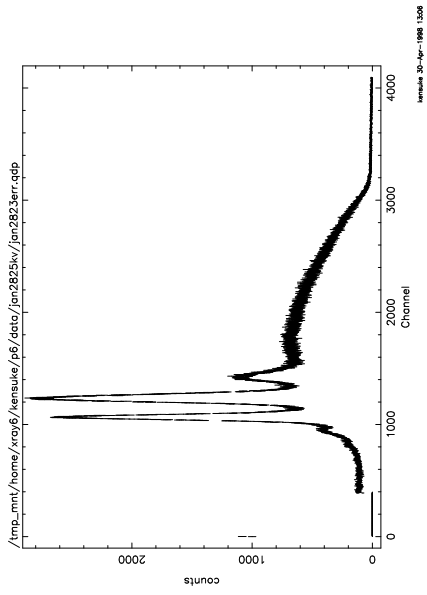
HV=25kV $\phi=60^\circ$



HV=25kV $\phi=120^\circ$



HV=25kV $\phi=150^\circ$



HV=25kV $\phi=180^\circ$