



Title	14.0MeV電子線の散乱 scattering foilの基礎的研究
Author(s)	竹井, 力; 吉本, 清一
Citation	日本医学放射線学会雑誌. 1977, 37(7), p. 703-709
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/15749
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

14.0 MeV 電子線の散乱

scattering foil の基礎的研究

九州大学医療技術短期大学部診療放射線技術学科

竹 井 力

九州大学医学部附属病院放射線部

吉 本 清 一

(昭和51年12月17日受他付)

(昭和52年1月26日最終原稿受付)

Scattering of 14.0-MeV Electrons
Fundamental Study of the Scattering Foil

By

Chikara Takei

Department of Radiological Technology, Kyushu University School of Health Sciences,
Fukuoka, Japan

Seiichi Yoshimoto

Department of Radiology, Kyushu University Hospital, Fukuoka, Japan

Research Code No.: 203

Key Words: Electron, Scattering foil, Radiotherapy

The angular distribution of 14.0 MeV electrons scattered by thin Al and Pb foils has been measured, since the beam flatness is important on the high energy electron therapy. These distributions measured were almost completely shown the Gaussian distribution. The root mean square scattering angles, $\sqrt{\theta^2}$, were obtained and were compared with the theories of Williams and Rossi. In our experiments the $\sqrt{\theta^2}$ obtained have the experimental errors of about 4% and 1% for 5° and 10°, respectively.

For Al foils of 0.5 mm to 3.0 mm the experimental values of $\sqrt{\theta^2}$ are 5.49° and 12.43° and are 30% to 10% higher than those predicted by Williams. Although, these values are 4% to 9% lower than those calculated from the theory of Rossi. The $\sqrt{\theta^2}$ obtained with Pb foils of 0.1 mm to 0.3 mm are 9.62° to 18.05° and are 14% to 18% higher than Williams, and are 14% to 7% lower than those theoretically calculated by Rossi.

緒 言

ペータートロンまたはライナックによる高エネルギー電子線治療においては、照射野内の線量分

布を均等にするため、一般には scattering foil が使用される。我々は scattering foil に関する基礎資料を得る目的で 14.0MeV 電子線 (narrow

beam) の散乱角度分布を測定した。

高エネルギー電子線の散乱実験についてはいくつかの報告がある。Fowler ら¹²⁾²³⁾²⁴⁾は ${}^7\text{Li}(p, \gamma){}^8\text{Be}$ 反応の γ 線によつて発生させた二次電子 (0.5~17MeV) の C, Al, Pb による散乱実験をウイリソン霧箱中で行ない、その飛跡から入射電子のエネルギーを求め散乱角を測定し、散乱角度分布を得た。また、Slusky and Crane⁵⁾ も同様な方法で二次電子 (0.5~17MeV) の C, Al, Pb による散乱実験を行なつた。

Kulchitsky and Latyshev⁶⁾は2.25MeV電子線を用いて、Al, Fe, Cu, Mo, Ag, Sn, Ta, Au, Pb の scattering foil についての測定を GM カウンターで実施している。また、Hanson ら⁷⁾は15.7 MeV 電子線の Be, Au による散乱角度分布を電離箱で測定した。

電子線の散乱については Goudsmit and Saunderson⁸⁾, Williams⁹⁾¹⁰⁾, Molière¹¹⁾, Snyder and Scott¹²⁾ および Rossi¹³⁾¹⁴⁾ らの理論がある。電子線散乱実験に関する上記の文献ではいづれも実験値と理論値との間には大差はなかつたと報告されている。

我々は14.0MeV電子線の Al, Pbによる散乱角度分布を電離箱で測定し、平均自乗散乱角の $\sqrt{\theta^2}$ を求め、Williams および Rossi の理論値と比較した。

実験方法

ベータートロン (島津製: BT-15) からの14.0 MeV 電子線は厚さ12cm のアクリライトにあげた4mmφの穴を通して narrow beam とし scattering foil に垂直に入射させた。

電子線のエネルギーは電子の実用飛程 $R_p(\text{g}/\text{cm}^2)$ とエネルギー $T(\text{MeV})$ の関係式¹⁵⁾ $R_p = 0.52T - 0.30$ から求めた。ファントムにはアクリライト (密度: $1.1\text{g}/\text{cm}^3$) を用い、照射野 $10 \times 10\text{cm}^2$ の条件でシャロー型電離箱 (20mmφ \times 1mm) により深さ1mm毎に深部線量を測定し、飛程6.33mmを得た。 $R_p = 1.1 \times 6.33 (\text{g}/\text{cm}^2)$ として算出して13.97MeVが得られた。このようにして、電子線のエネルギーは14.0MeVと決

定した。

scattering foil とベータートロンの電子線射出窓との距離は40cmである。電離箱 (東芝製: 直読線量計, 4mmφ \times 10mm) を scattering foil から11.2cm離れた距離で水平に移動させ、散乱電子の強度分布をレコーダーに記録した。その配置図を Fig. 1a に示した。

用いた scattering foil は厚さ0.1mm~3mmのAl板9種類と0.1mm~0.3mmのPb板3種類である。測定はベータートロン出力の安定性をモニターで監視しながら行ない、narrow beam の centering はフィルム黒化法で確認した。

測定結果

散乱電子線強度分布の実測例を Fig. 2 に示す。測定された強度分布 $I(x)$ から角度分布 $I(\theta)$ を求めるには、Fig. 1b に示したように、距離による逆自乗則と角度変換をして算出した。

$$I(\theta) = \frac{d^2 + x^2}{d^2} I(x), \quad \theta = \tan^{-1}\left(\frac{x}{d}\right)$$

$I(x)$ の値を記録紙上で $x = 2\text{mm}$ 毎に読み取り、それに対応する θ と $I(\theta)$ を算出した。また、記録紙送り速度と電離箱移動速度は共に180 mm/min であつた。

つぎに、多重散乱の場合には角度分布 $I(\theta)$ は正規分布をなすことがわかつているので、測定された $\theta - I(\theta)$ 曲線が正規分布をしているかどうかを検討する。一般に、正規分布は

$$\Psi(\theta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{\theta^2}{2\sigma^2}}$$

で表わされる。 σ は標準偏差である。

角度分布 $I(\theta)$ の最大値 $I(0)$ を $I(0) = 1$ と規格化し、 $\Psi(\theta)$ を $I(\theta)$ で書き換えると

$$I(\theta) = e^{-\frac{\theta^2}{2\sigma^2}}$$

となる。そこで、 $\theta/\sigma = t$ とおけば、 $I(\theta)$ は $I(t)$ に変換される。

$$I(t) = e^{-\frac{t^2}{2}}, \quad \theta = \sigma t$$

ここで、正規分布表から $I(t)$ を計算し、 $I(t)$ に対応する t の値を $I(t)$ の位置に目盛付けすれば、 $t - I(t)$ 曲線は $\theta - I(\theta)$ の直線に変換される。すなわち、角度分布 $I(\theta)$ の値 ($I(0) = 1$ と規格

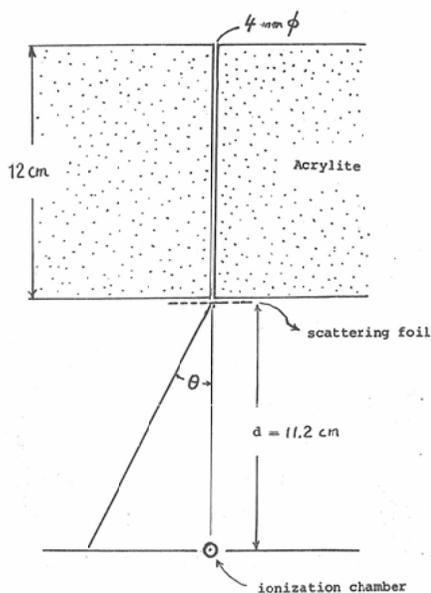


Fig. 1a. Arrangement for measurements of the electron scattering.

$$I(\theta) = \frac{d^2 + x^2}{d^2} I(x)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{x}{d} \right)$$

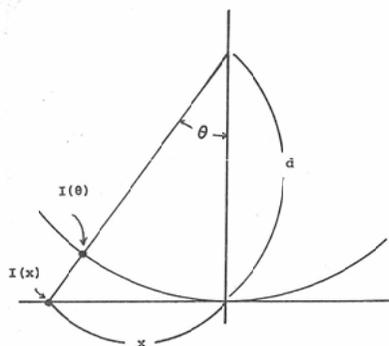


Fig. 1b. Relation of $I(\theta)$ to $I(x)$. $I(x)$ is the measured intensity of the scattered electrons, and $I(\theta)$ is the angular distribution for the scattering of electrons.

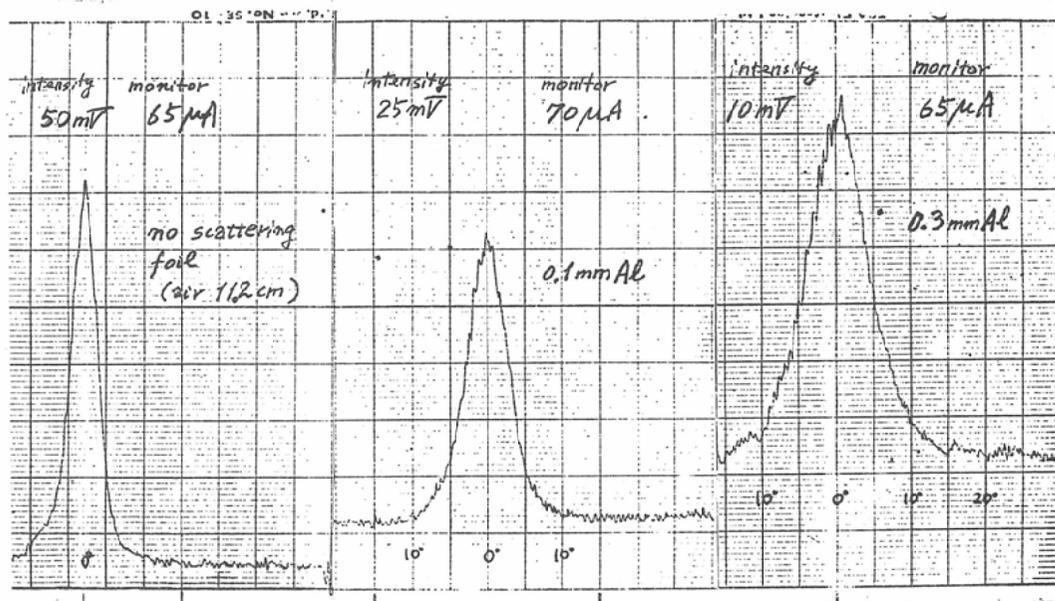


Fig. 2. Examples of the measured intensity of electrons scattered by the air (thickness is 11.2cm) and the Al foils (0.1mm and 0.3 mm).

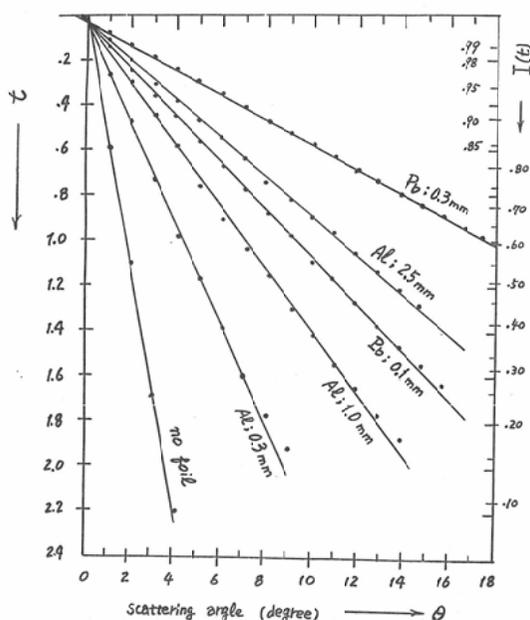


Fig. 3. Graph showing the Gaussian distribution converted to the equation of $I(t) = e^{-t^2/2}$ from $I(\theta) = e^{-\frac{\theta^2}{2\sigma^2}}$, where t is equal to θ/σ and $I(t)$ is the value which was multiplied the normal Gaussian distribution by $\sqrt{2\pi}$. If the curve is a straight line, the angular distribution for the scattering of electrons represent completely the Gaussian distribution.

化)に対応する t を正規分布表より求め、 θ を横軸に t を縦軸にプロットすれば、 $I(\theta)$ が正規分布をしていれば $\theta-t$ は完全な直線を示すことになる。このようにして正規分布を検証することができる。

測定例を Fig. 3 に示す。そこで、 $\theta-t$ 直線を最小自乗法で算出し、 $t=1$ ($\sigma=\theta$) となる θ 値を決定すると求める平均自乗散乱角の $\sqrt{\bar{\theta}^2}$ が得られる。Table 1 に掲げた実験値はこのような手順で求めたものである。

電子線散乱についての Williams および Rossi の理論式は次のようである。

Williams の式⁽¹⁰⁾⁽¹⁶⁾ :

$$\bar{\theta}^2 = \frac{4\pi N Z (Z+1)}{p^2 v^2} e^4 t \log \left[4\pi Z^{4/3} N t \left(\frac{\hbar}{m_0 v} \right)^2 \right]$$

$$\bar{\theta}^2 = \frac{7 \times 10^{-8}}{T^2} t, \quad (\text{空気に対する近似式})$$

ただし

- N : 1 cm³ 中に含まれる原子数
- Z : 散乱体の原子番号
- t : 散乱体の厚さ (cm)
- p : 入射電子の運動量
- v : 入射電子の速度
- e : 電子の電荷量
- m₀ : 電子の静止質量
- h : プランクの定数, $\hbar = \frac{h}{2\pi}$
- T : 入射電子の運動エネルギー

ここで、主な定数は下記の通りである。

T = 14.0 MeV, m₀c² = 0.511 MeV, e = 4.803 × 10⁻¹⁰ esu, β² = 0.99876, pv = mc²β² = 2.3218 × 10⁻⁵ erg, mc² = 14.511 MeV, 1eV = 1.6021 × 10⁻¹² erg, $\frac{h}{m_0 c} = 2.4262 \times 10^{-10}$ cm, (N)_{Al} = 6.007 × 10²², (N)_{Pb} = 3.296 × 10²², d = 11.2 cm

これらを代入して $\bar{\theta}^2$ を計算すると、

$$\text{Al} : \bar{\theta}^2 = 0.013563 \left(10.4472 + \frac{\log_{10} t}{0.4342945} \right) t$$

$$\text{Pb} : \bar{\theta}^2 = 0.27829 \left(12.3027 + \frac{\log_{10} t}{0.4342945} \right) t$$

$$\text{空気} : \bar{\theta}^2 = 0.0399997$$

が得られた。 $\bar{\theta}^2$ の単位は (ラジアン)² である。

Rossi の式⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾ :

$$\frac{280}{A} \cdot \frac{m_0 c^2}{pc} > 1 \quad \text{のとき}$$

$$\frac{\bar{\theta}^2}{\rho l} = 16\pi N_A \frac{Z^2}{M_A} r_e^2 \left(\frac{m_0 c^2}{\beta pc} \right)^2 \log \left(\frac{137 pc}{Z^{1/3} m_0 c^2} \right) \quad \dots (1)$$

$$\frac{280}{A} \cdot \frac{m_0 c^2}{pc} < 1 \quad \text{のとき}$$

$$\frac{\bar{\theta}^2}{\rho l} = 16\pi N_A \frac{Z^2}{M_A} r_e^2 \left(\frac{m_0 c^2}{\beta pc} \right)^2 \log \left[196 Z^{-1/3} \left(\frac{Z}{A} \right)^{1/6} \right] \quad \dots (2)$$

ただし

- N_A : アボガドロ数
- M_A : 原子量 A の物質 1 モルの質量
- r_e : 古典電子半径
- ρ : 散乱体の密度 (g/cm³)
- l : 散乱体の厚さ (cm)

ここで、主な定数は次のようである。

N_A = 6.025 × 10²³, (M_A)_{Al} = 26.9875 = (A)_{Al}, (M_A)_{Pb} = 207.19 = (A)_{Pb}, r_e = 2.818 × 10⁻¹³ cm

これらを (1) 式に代入すると $\bar{\theta}^2$ は下記のよう

Table 1 Root mean square scattering angle of 14.0 MeV electrons passing through Al and Pb foils.

Scattering foil (mm)		$\sqrt{\bar{\theta}^2}$ (degree)			ratio	
		experiments	Williams' theory	Rossi's theory	exp. Williams'	exp. Rossi's
air	112	1.83	1.15	1.41	1.59	1.30
Al	0.1	2.54	1.98	2.85	1.28	0.89
	0.2	4.06	2.67	3.78	1.52	1.07
	0.3	4.55	3.31	4.51	1.37	1.01
	0.5	5.49	4.23	5.71	1.30	0.96
	1.0	7.51	6.13	7.95	1.23	0.94
	1.5	9.07	7.64	9.69	1.19	0.94
	2.0	10.95	8.95	11.16	1.22	0.98
	2.5	11.76	10.11	12.46	1.16	0.94
Pb	0.1	9.62	8.46	11.17	1.14	0.86
	0.2	14.64	12.44	15.73	1.18	0.93
	0.3	18.05	15.82	19.24	1.14	0.94

Table 2 Electron energies which the equation of $\frac{280}{A^{1/3}} \cdot \frac{m_0 c^2}{pc} = 1$ is satisfied for any materials, where this equation had been given by Rossi.

material	Z	A	$\rho \left(\frac{g}{cm^3} \right)$	$\frac{pc}{m_0 c^2}$	E(MeV)
Al	13	26.9815	2.69	93.36	47.19
Fe	26	55.847	7.866	73.26	36.92
Ni	28	58.71	8.845	72.07	36.31
Cu	29	63.546	8.929	70.18	35.35
Ta	73	180.948	16.64	49.50	24.78
Pb	82	207.19	11.34	47.32	23.66

に得られた。ただし、空気については文献14の表から近似計算により求めて算出した。単位は(ラジアン)²である。

Al: $\bar{\theta}^2 = 6.9375 \times 10^{-2} \cdot \rho l$

Pb: $\bar{\theta}^2 = 3.2974 \times 10^{-4} \cdot \rho l$

空気: $\bar{\theta}^2 = 0.0608227 \times 10^{-2}$

Rossi の式において、(1)は低エネルギーで低原子番号のときに、(2)は高エネルギーで高原子番号の場合に適用される。 $\frac{280}{A} \cdot \frac{m_0 c^2}{pc} = 1$ の条件についていくつかの散乱体に対するエネルギーを計算し、これを Table 2 に示した。Al および Pb に対してはこの条件を満たす電子線エネルギーは 47.19 MeV および 23.66 MeV であるので、計算は (1) を用いて行なった。

Table 1 の Williams および Rossi の理論値は空気による補正を行なった値を示してある。空気のみによる平均自乗散乱角を $(\bar{\theta}^2)_{air}$ 、散乱自体のみによるそれを $(\bar{\theta}^2)_s$ とおけば、誤差伝播の法則から

$$\bar{\theta}^2 = (\bar{\theta}^2)_{air} + (\bar{\theta}^2)_s$$

が成立する。 $\sqrt{\bar{\theta}^2}$ の理論値はこのようにして求めたものである。

$\sqrt{\bar{\theta}^2}$ について実験値と理論値を比較すると、実験値は Al, Pb の両者とも Williams の値よりも大きかった。Al では 0.2mm ~ 3.0mm の範囲でその比は 1.52 ~ 1.10 であり、厚さが厚くなると次第に減少する傾向にある。また、Pb では 0.1mm ~ 0.3mm で 1.14 ~ 1.18 であり、厚さによる

影響は見られない。Rossi の理論値と比べると、Al では 0.2mm~3.0mm でその比は1.07~0.91 であり、厚さによる減少傾向があつた。また、Pb では0.86~0.94で厚さによる増加傾向が見られた。

実験値 $\sqrt{\bar{\theta}^2}$ が 5° 以上で比較すると、実験値は Williams の値よりも Al で30%~10%、Pb では14%~18%大きかつた。また、Rossi の値よりも Al で4%~9%、Pb では14%~7%小さかつた。

結果および考察

14.0MeV 電子線の我々の散乱実験では Al (0.5mm~3.0mm) に対して $\sqrt{\bar{\theta}^2}$ 値 ($1/\sqrt{e} I(o)$ 値に対応する散乱角、 e は自然対数の底、 $I(o)$ は散乱強度の最大値) は $5.49^\circ \sim 12.43^\circ$ で、Williams の理論値よりも30%~10%大きく、Rossi の値よりも4%~9%小さかつた。また、Pb (0.1mm~0.3mm) に対しては $9.62^\circ \sim 18.05^\circ$ で、Williams の値よりも14%~18%大きく、Rossi のそれよりも14%~7%小さかつた。

Kulchitsky らの 2.25MeV 電子線の Al (0.10mm) および Pb (0.007mm) による実験では $1/2 I(o)$ 値は 9.50° および 9.70° ($\sqrt{\bar{\theta}^2}=8.07^\circ$ および 8.25°) であり、Williams の理論値よりもそれぞれ3.7%、10.6%小さい値を得ている。また、Hanson らの 15.7MeV 電子線の Be (2.65mm) と Au (0.02mm) による実験では $1/e I(o)$ 値は 4.25° と 3.76° ($\sqrt{\bar{\theta}^2}=3.27^\circ$ と 2.66°) を得ていて、Molière の理論値よりも8.6%と11.1%小さかつたと報告している。

電子線の散乱角度分布測定においては入射電子線束の大きさ (b)、検出器の窓の大きさ (s) および散乱体—検出器間距離 (d) が問題になり、検出器が scattering foil の中心をのぞむ角度 (Φ) が小さければより正確な測定ができることになる。Kulchitsky らの実験では $b=1.5 \times 2.5\text{mm}^2$ 、 $s=0.4\text{mm}\phi$ 、 $d=37.5\text{mm}$ で $\Phi=36.6'$ である。また、Hanson らの場合は $b=2.03\text{mm}\phi$ 、 $s=0.80\text{mm}\phi$ 、 $d=254\text{mm}$ で $\Phi=10.1'$ である。我々の場合は $b=4\text{mm}\phi$ 、 $s=4\text{mm}\phi \times 10\text{mm}$ 、 $d=112\text{mm}$

であり、電離箱の軸方向で $\Phi=\pm 2^\circ 33'$ 、軸に垂直方向 (電離箱の移動方向) では $\Phi=\pm 1^\circ 1'$ であつた。

電離箱の大きさが $\sqrt{\bar{\theta}^2}$ に与える影響を正規分布から検討すると、 $\sqrt{\bar{\theta}^2}=2.5^\circ$ 、 5° 、 10° のときそれぞれ15%、4%、1%程度真の値よりも大きくなることになる。Table 1 に示した実験値は電離箱の大きさによる補正をしていない値であるので、理論値との比較は少なくとも $\sqrt{\bar{\theta}^2} > 5^\circ$ の範囲でしか行えない。

我々の実験は電子線治療時の scattering foil に関する基礎資料を得るのが目的であるから $\sqrt{\bar{\theta}^2}$ 値は少なくとも 5° 以上を問題にしていることになる。例えば、九大病院の島津製 BT-32 ベータートロンは scattering foil と照射筒先端までの距離は70cm であるから、この距離で照射筒のないとき10cm ϕ 照射野の電子線強度の平坦度を80%または90%と仮定すれば $\sqrt{\bar{\theta}^2}$ 値は 6.0° または 8.8° 程度になる。したがつて、治療条件で4mm $\phi \times 10\text{mm}$ の電離箱を用いて測定しても $\sqrt{\bar{\theta}^2}$ 値は4%以下の誤差で得られることになる。

つぎに、 $\sqrt{\bar{\theta}^2}$ 値の理論値との比較において電子の運動エネルギーの測定精度が問題になるが、これを理論式より検討する。Williams および Rossi の理論式において、高エネルギー電子線では $\beta^2 \doteq 1$ であるから、 $p^2 = \beta^2 m_0^2 c^2 = (T + m_0 c^2) \beta^2 \doteq (T + m_0 c^2) = (T + 0.511) \text{MeV}$ とおける。電子のエネルギー T の測定誤差を ΔT とおけば、理論式中の $\log []$ の項は無視できるので、 $\sqrt{\bar{\theta}^2}$ の誤差率は $-\Delta T / (T + m_0 c^2)$ で表わされる。例えば、 $T=14\text{MeV}$ 、 $\Delta T=\pm 1 \text{MeV}$ とすればこの場合の $\sqrt{\bar{\theta}^2}$ の誤差率は約 $\pm 7\%$ になる。このように、 $\sqrt{\bar{\theta}^2}$ 値の測定においては電子線エネルギーの測定精度は最も重要な点である。しかし、実際には電子線のエネルギーは単一ではなくあるエネルギー分布をしているので、 $\sqrt{\bar{\theta}^2}$ 値について実験値と理論値との比較は厳密には非常にむづかしい。

理論式において、Williams の式では $\log []$ 項の中には t (scattering foil の厚さ) を含んでいるので t を分割して計算すると同じ大きさでも

t の分割の仕方により $\sqrt{\theta^2}$ 値が異なるという矛盾がある。Rossi の式では $\log [\]$ 項の中には t は含まれていないから Rossi の式のような矛盾はない。この点からすれば Rossi の式の方が受入れ易いようである。

結 語

電子線治療時の scattering foil に関する基礎資料を得る目的で、14.0MeV 電子線 (narrow beam) の Al, Pb による散乱実験を電離箱法を用いて行なった。

1. 電子の散乱強度分布は殆んど完全な正規分布をなした。

2. 平均自乗散乱角の $\sqrt{\theta^2}$ 値を求め $\sqrt{\theta^2} > 5^\circ$ の範囲で理論値と比較した。ただし、電離箱の大きさが $\sqrt{\theta^2}$ 値に及ぼす影響は $\sqrt{\theta^2} = 5^\circ, 10^\circ$ のときそれぞれ 4%, 1% 程度大きかった。

1) Al (0.5mm~3.0mm) に対して実験値は $\sqrt{\theta^2} = 5.49^\circ \sim 12.43^\circ$ であり、Pb (0.1mm~0.3mm) については $\sqrt{\theta^2} = 9.62^\circ \sim 18.05^\circ$ であつた。

2) Al に対する実験値は Williams の理論値よりも 30%~10% 大きく、Rossi のそれよりも 4%~9% 小さかった。

3) Pb に対しては Williams の値よりも 14%~18% 大きく、Rossi のそれよりも 14%~7% 小さかった。

今後、電子線治療時の条件 (broad beam) での実験を行ない、エネルギー、scattering foil、平担度の関係を明らかにしたい。

文 献

- 1) Fowler, W.A., Oppenheimer, J.: Scattering and loss of energy of fast electrons and positrons in lead. Phys. Rev. 54: 320—324, 1938
- 2) Fowler, W.A.: Scattering of fast electrons. Phys. Rev. 54: 773—773, 1938
- 3) Sheppard, C.W., Fowler, W.A.: Experi-

ments on the multiple scattering of electrons and positrons. Phys. Rev. 56: 849—849, 1939

- 4) Sheppard, C.W., Fowler, W.A.: Multiple scattering of fast electrons. Phys. Rev. 57: 273—280, 1940
- 5) Slawsky, M.M., Crane, H.R.: The absorption of high energy electrons, IV. Phys. Rev. 56: 1203—1210, 1939
- 6) Kulchitsky, L.A., Latyshev, G.D.: The multiple scattering of fast electrons. Phys. Rev. 61: 254—265, 1942
- 7) Hanson, A.O., Lanzi, L.H., Lyman, E.M., Scott, M.B.: Measurement of multiple scattering of 15.7-MeV electrons. Phys. Rev. 84: 634—637, 1951
- 8) Goudsmit, S., Saunderson, J.L.: Multiple scattering of electrons, II. Phys. Rev. 58: 36—42, 1940
- 9) Williams, E.J.: Multiple scattering of fast electrons and alpha-particles, and curvature of cloud tracks due to scattering. Phys. Rev. 58: 292—306, 1940
- 10) Bethe, H.A., Ashkin, J.: Experimental nuclear physics. Vol. 1 (Segrè, E. edition), pp. 282—287, 1953, Wiley, New York
- 11) Siegbarn, K.: Alpha-, beta- and gamma-ray spectroscopy. Vol. 1, pp. 1—8, 1965, North-holland publishing Company, Amsterdam
- 12) Snyder, H.S., Scott, W.T.: Multiple scattering of fast charged particles. Phys. Rev. 76: 220—225, 1949
- 13) Rossi, B.: High energy particles. pp. 63—69, 1952, Prentice-hall Incorporated, New York
- 14) ICRU report 21: Radiation dosimetry; Electrons with initial energies between 1 and 50 MeV. pp. 13—15, 1972
- 15) 日本医学放射線学会物理部会：放射線治療における ^{60}Co ガンマ線および高エネルギー X 線の吸収線量の標準測定法。日本医放会誌, 31: 723—772, 昭46.
- 16) Hine, G.J., Brownell, G.L.: Radiation Dosimetry. pp. 103—107, 1956, Academic Press Inc., New York