

電子・光子輸送計算コード EGS5 の高エネルギーと
低エネルギーへの拡張に関する研究

総合研究大学院大学
高エネルギー加速器研究科
加速器科学専攻
桐原 陽一

2010年3月24日

要旨

放射線の物質内の輸送過程を理解することは、放射線の利用や防護において重要である。この輸送過程を理解する有効な手段の一つは、輸送計算コードによる計算と実験による測定値を比較することである。EGS5 (Electron Gamma Shower version 5) コードは、数 keV から数 TeV のエネルギー領域において計算可能な電子・光子輸送計算モンテカルロコードである。EGS5 コードは数 keV から数 MeV のエネルギー領域の医学物理分野で多く利用されている。放射線治療分野の発展にともない、EGS5 コードの系統的な精度評価が必要である。一方で、EGS5 コードは加速器における検出器の開発や遮蔽計算にも利用されている。加速器の高エネルギー化により、高エネルギー領域(数 GeV 以上)の放射線輸送の精度ある計算が必要である。本研究では、EGS5 コードの高エネルギーおよび低エネルギー領域への拡張とその検証のために、以下に述べる三つのテーマの研究を行った。

一つ目は、高エネルギー領域への拡張のため、EGS5 コードへの LPM 効果と誘電による抑制効果の組み込みである。高エネルギー領域において重要な物理過程である制動放射と電子・陽電子対生成は、Bethe-Heitler(BH) 断面積で記述できることが知られている。Landau、Pomeranchuk は、BH 断面積が超相対論的エネルギーにおいて抑制されることを指摘し、Migdal によってこの抑制は定式化された(LPM 効果)。また、Ter-Mikaelian は、高エネルギー光子の相互作用は抑制されることを指摘し、Migdal によって抑制を含めた断面積が示された(誘電による抑制効果)。この二つの抑制の効果を再現するために、これらの抑制効果を含んだ断面積を、棄却法を用いて EGS5 コードに組み込んだ。この断面積の組み込みによって得られた制動放射による光子のエネルギースペクトルは、LPM 効果と誘電による抑制効果における測定値を良く再現した。

二つ目は、低エネルギー拡張のための放射光施設における低エネルギー散乱 X 線の測定である。8、20 keV に単色化された放射光をターゲットに照射し、ターゲットから散乱された X 線のエネルギースペクトルを Si 検出器を用いて測定した。これにより、これまで EGS5 コードの検証ができていなかった 5 keV から 1.5 keV の測定値を得ることができた。Al、Si、Ti、Fe、C、Cu、Ag ターゲットからのエネルギースペクトルの実験値と計算値を比較したところ、特性 X 線において 11% 以内で一致することを確認できた。

三つ目は、電子後方散乱における検証と改良である。電子後方散乱係数(入射電子数に対してターゲットからの後方散乱電子の数の比率)を EGS5 コードを含めた四つの汎用電子・光子輸送計算コード(EGS5、EGSsrc、ITS 3.0、PENELOPE)を用いて計算し、実験値と比較した。3 keV から 20 MeV の入射電子エネルギー、4Z92 のターゲットで比較したところ、EGS5、EGSsrc、PENELOPE コードは、20% 以内で一致した。計算値を実験値と比較した結果、入射電子のエネルギーが数 MeV であるときの原子番号の低いターゲットにおいて、計算値と実験値の差が最も大きいことがわかった。この領域を含み系統的に電子後方散乱係数を測定している多幡の実験値に注目し、多幡が後方散乱電子の測定に用いた電離箱の感度の再評価を行った。これにより、多幡の実験値と EGS5 コードによる計算値の差は、再評価前で最大 2.4 倍だったものが再評価後には 1.5 倍以内で一致することを確認できた。

本研究によって、EGS5 コードの既存の電子輸送の精度検証を行い、またより広範囲のエネルギー領域に適用が可能となったことから、EGS5 コードの汎用性を向上させた。

発表論文

本研究関連の成果は以下で公表されている。

1. Y. Kiriwara, Y. Namito, H. Iwase and H. Hirayama, "Monte Carlo Simulation of Tabata's Electron Backscattering Experiments", Nucl. Instrum. and Meth. B (DOI:10.1016/j.nimb.2009.12.014).
2. Y. Kiriwara, Y. Namito, and H. Hirayama, "Incorporation of Landau-Pomeranchuk-Migdal effect and dielectric suppression effect in EGS5 code", Nucl. Instrum. and Meth. B (DOI:10.1016/j.nimb.2010.03.009).
3. Y. Kiriwara, T. Iwase, T. Itoga, M. Hagiwara, S. Ban, and T. Nakamura, "Comparison of Several Monte Carlo Codes with Neutron Deep Penetration Experiments", Nuclear Technology, **168**, 773 (2009).

共著論文、口頭発表、ポスター発表

共著論文

1. Y. Iwamoto, S. Taniguchi, N. Nakao, T. Itoga, H. Yashima, T. Nakamura, D. Satoh, Y. Nakane, H. Nakashima, Y. Kirihara, M. Hagiwara, H. Iwase, K. Oishi, A. Tamii and K. Hatanaka, “Measurement of thick target neutron yields at 0 degree bombarded with 140, 250 and 350 MeV protons”, Nucl. Instr. and Meth. A **593**, 298, (2008).
2. H. Yashima, H. Iwase, M Hagiwara, Y. Kirihara, S. Taniguchi, H. Yamakawa, K. Oishi, Y. Iwamoto, D. Satoh, Y. Nakane, H. Nakashima, T. Itoga, N. Nakao, T. Nakamura, A. Tamii, and K. Hatanaka, “Radiation Protection Benchmark Experiment of Neutron Penetration through Iron and Concrete Shields for Hundreds-of-MeV Quasi-Monoenergetic Neutrons-I: Measurements of Neutron Spectrum by a Multimoderator Spectrometer”, Nuclear Technology, **168**, 298, (2009).
3. M Hagiwara, H. Iwase, Y. Kirihara, H. Yashima, Y. Iwamoto, D. Satoh, Y. Nakane, H. Nakashima, T. Nakamura, A. Tamii, and K. Hatanaka, “Radiation Protection Benchmark Experiment of Neutron Penetration through Iron and Concrete Shields for Hundreds-of-MeV Quasi-Monoenergetic Neutrons-II: Measurements of Neutron Spectrum by an Organic Liquid Scintillator”, Nuclear Technology, **168**, 304, (2009).

国際会議での口頭発表

1. Y. Kirihara, H. Iwase, M. Hagiwara, S. Ban, and T. Nakamura, ”Comparison of Several Monte Carlo Codes with Neutron Deep Penetration Experiments”, 11th International Conference on Radiation Shielding, (April 13-18, 2008, Pine Mountain, USA).
2. Y. Kirihara, Y. Namito, H. Iwase, and H. Hirayama, ”Comparison of Several Electromagnetic Cascade Monte Carlo Codes with Electron Backscattering Experiments”, The Fifth International Symposium on Radiation Safety and Detection Technology, (July 15-17, 2009, Kitakyushu, Japan).

国内学会での口頭発表

1. 桐原陽一、波戸芳仁、平山英夫、岩瀬広, ”電子後方散乱のモンテカルロ計算と実験の比較”, 日本原子力学会 2008 年秋の大会,(高知,2008.9.4-9).
2. 桐原陽一、波戸芳仁、岩瀬広、平山英夫, ”電子後方散乱における Class I(ITS3.0) と Class II(EGS5) の違い”, 日本原子力学会 2009 年春の大会,(東京,2009.3.23-25).
3. 桐原陽一、波戸芳仁、平山英夫, EGS5 へのミグダル効果の組込み, 日本原子力学会 2009 年秋の大会,(仙台,2009.9.16-18).

4. 桐原陽一、波戸芳仁、平山英夫, EGS5 への LPM 効果および誘電による抑制効果の組み込み, 日本原子力学会 2010 年春の大会,(水戸,2010.3.26-28).

国内学会でのポスター発表

1. 桐原陽一、萩原雅之、岩瀬広、糸賀俊朗、伴秀一、中村尚司, ”中性子透過実験におけるコード間の比較”, 日本原子力学会北関東支部若手研究者発表会,(茨城,2008.4.25).
2. 桐原陽一、波戸芳仁、岩瀬広、平山英夫, ”電子後方散乱におけるモンテカルロ計算と実験の比較”, 日本原子力学会北関東支部若手研究者発表会,(茨城,2009.4.24).

目次

第 1 章	序論	1
1.1	電子・光子輸送計算コード	1
1.2	EGS コード	2
1.2.1	EGS5 コード	2
1.3	EGS5 コードが取り扱う物理過程	4
1.3.1	光子輸送に関する物理過程	4
1.3.2	電子・陽電子輸送に関する物理過程	8
1.3.3	多重散乱角度分布モデル	9
1.3.4	電子輸送エネルギーロスモデル	14
1.3.5	電子輸送デュアルヒンジメカニズム	15
1.4	EGS5 コードにおける研究課題	17
1.4.1	高エネルギー領域拡張のための課題	17
1.4.2	光子の低エネルギー領域拡張のための課題	18
1.4.3	既存のエネルギー領域の課題	21
1.5	本研究の目的	25
第 2 章	LPM 効果および誘電による抑制効果の組み込み	26
2.1	背景および研究目的	26
2.1.1	形成距離 (Formation length)	26
2.1.2	制動放射における LPM 効果	27
2.1.3	電子対生成における LPM 効果	30
2.1.4	誘電による抑制効果	32
2.1.5	EGS5 コードの Bethe-Heitler 断面積	32
2.1.6	制動放射における LPM と誘電による抑制効果断面積	33
2.1.7	電子対生成における LPM 効果の断面積	37
2.2	方法	37
2.2.1	LPM 効果と誘電による抑制効果の計算	37
2.2.2	実験値との比較	39
2.3	結果と議論	39
2.3.1	Anthony らの実験との比較	39
2.3.2	Hansen らの実験との比較	50
2.4	まとめ	50

第 3 章	放射光施設における低エネルギー散乱 X 線の測定	56
3.1	背景および研究目的	56
3.2	実験	58
3.2.1	実験手順	58
3.2.2	解析方法	60
3.3	計算方法	60
3.3.1	Step 1:ターゲットからの 90 度方向散乱スペクトル	60
3.3.2	Step 2:Si 検出器によって測定されるエネルギースペクトル	60
3.4	結果と議論	64
3.4.1	エネルギースペクトルの比較	64
3.4.2	特性 X 線ピークの計算値に対する実験値の比	64
3.5	まとめ	64
3.5.1	今後の課題	65
第 4 章	電子後方散乱における電子輸送の検証	69
4.1	背景および研究目的	69
4.2	電子後方散乱係数の比較	70
4.2.1	測定データ	70
4.2.2	計算コードおよび計算条件	70
4.2.3	結果および議論	73
4.2.4	MeV 領域における後方散乱実験	78
4.3	Tabata の後方散乱実験のシミュレーション	79
4.3.1	計算方法	79
4.3.2	結果および議論	87
4.4	Molière 多重散乱分布へのスピン相対論効果の適用	94
4.4.1	計算方法	94
4.4.2	結果と議論	94
4.5	まとめ	96
第 5 章	結論	98
補遺 A	変数および定数	100
補遺 B	LPM と誘電による抑制効果の計算プログラム	101
B.1	フローチャート	101
B.2	プログラムリスト	107
B.2.1	BREMS サブルーチン	107
B.2.2	PAIR サブルーチン	110
B.2.3	RMGBH サブルーチン	113
B.2.4	RMGOP サブルーチン	117
B.2.5	LPM 計算用ユーザープログラム	121

補遺 C	Spin-Molière モデルの計算プログラム	137
C.1	フローチャート	137
C.2	プログラムリスト	139
C.2.1	MSCAT サブルーチン	139
C.2.2	MRCAL サブルーチン	142
C.2.3	Spin-Molière 計算用ユーザープログラム	144
参考文献		155
謝辞		160

第1章 序論

放射線は、物理学だけでなく化学、生物学などの自然科学の研究や、工学、医療などへ広く利用されている。また、加速器の発展にともない、放射線の利用されるエネルギー領域も拡張し、ビーム強度も増大している。高エネルギー加速研究機構 (KEK) と日本原子力研究開発機構 (JAEA) の共同事業による大強度陽子加速器施設 (J-PARC)、欧州原子核共同研究機構 (CERN) の大型ハドロン衝突型加速器 (LHC)、国際プロジェクトにおける国際リニアコライダー (ILC) などの加速器の建設により、より高エネルギー領域 (数百 GeV 以上) における放射線検出器開発や放射線防護に関する研究が必要である。一方、低エネルギー領域 (数 10 keV 以下) の放射線は、医療における診断に広く利用されている。例えば、従来型レントゲン撮影装置の使用に加えて CT 装置等の高度 X 線応用機器の使用が増加し、工業分野でも工業用の CT の開発が進んでいる。従来利用されているエネルギー領域 (数 10 keV ~ 数十 GeV) の放射線は、放射線治療における治療計画、構造解析、食品加工など、より汎用的に利用されている。またこのエネルギー領域では、原子炉施設などにおける最適な遮へいの研究が必要である。これらの放射線に関連した研究やその利用は、放射線の物質内での輸送過程が基礎にある。このため、従来のエネルギー領域はもとより、より広いエネルギー範囲における放射線の輸送過程を理解することが重要である。

1.1 電子・光子輸送計算コード

電子・光子輸送計算コードは、電子 (陽電子) と光子が物質中を通過するときに経験する物理過程を、理論式や計算モデル、断面積データを用いて再現し、任意の点におけるフラックス、エネルギー付与、線量などの測定量を得ることができる計算プログラムである。また、単に測定量を得るだけでなく、電子や光子が物質中においてどのような過程を経ているかを理解することにも有効である。電子・光子輸送計算コードは、

- 加速器や原子炉施設における遮へい設計
- 放射線検出器の開発
- 放射線治療における患者内部の線量分布の計算 (治療計画)
- 放射線測定における問題点の判別

などに利用されている。現在、一般的に用いられている汎用電子・光子輸送計算コードには EGS[1]、EGSnrc[2]、PENELOPE[3]、ITS 3.0[4] コードがある。また MCNP[5]、

FLUKA[6]、Geant4[7]などの汎用輸送計算コードは、電子・光子輸送を内包しており、これらのコードは電子・光子輸送計算に利用されている。

本章以降で用いる主な変数の記号、内容、単位および定数の記号、内容、値を補遺Aにまとめて示した。

1.2 EGS コード

EGS(Electron Gamma Shower) コードは、高エネルギー領域でを使用することを目的に長年開発されてきた電子・光子輸送計算コードである。バージョン3の公開以降、広い分野で使用される汎用の計算プログラムとなり、高エネルギー領域において加速器の検出器設計などに用いられると同時に、医学物理分野などの低エネルギー領域での利用が急速に広まり、より低エネルギー領域への拡張が望まれるようになった。1986年にバージョン4(EGS4 コード)が公開され、20年にわたり医学物理や放射線測定研究、産業面での開発に多く利用されてきた。2006年にリリースされたバージョン5(EGS5 コード)は、EGS4 コードの利用における要望に合わせて改良が行われた。本章では、EGS5 コードの現状とそこでの研究課題を述べる。

1.2.1 EGS5 コード

EGS5 コードの主な特徴を以下にまとめる。

- 1 keV から数百 GeV までのエネルギー領域での電子(陽電子)・光子の輸送計算が可能である。
- 物質として元素($Z = 1$ から 100)、化合物、混合物が利用可能である。
- Preprocessor EGS(PEGS) コードを利用して輸送計算に必要な断面積データを計算する。
- ランダムなステップ長によって電子(陽電子)と光子を輸送する。
- 組み合わせジオメトリ(CG)を用いて簡単に計算体系を作成できる。

EGS5 コードパッケージには、検出器のレスポンスや線量分布を計算することができるサンプルコードが用意されている。これらのサンプルコードを部分的に修正することで、ユーザーが興味ある測定量を容易に計算することができる。表1.1に、EGS5 コードが取り扱っている物理過程およびその計算のための計算式、モデル、データを示す。次節に、EGS5 コードが取り扱う物理過程とその取り扱い方法について述べる。

表 1.1: EGS5 コードが主に取り扱う物理過程とそれに対する計算式、モデルおよびデータ。

輸送粒子	物理過程	計算式、モデル、データ
光子	光電吸収	PHOTX ライブラリ [8]
	特性 X 線、オージェ電子	Table of Isotopes 8th Edition [9]
	コンプトン散乱	PHOTX ライブラリ [8]
	レイリー散乱	Klein-仁科断面積 [10]
	電子対生成	PHOTX ライブラリ [8]
		Bethe-Heitler 断面積 [11]
電子・陽電子 (単一事象)	Møller 散乱	Møller による式 [12]
	Bhabha 散乱	Bhabha による式 [13]
	制動放射	Bethe-Heitler 断面積 [11]
	陽電子消滅	Heitler による断面積 [14]
電子・陽電子 (グループによる扱い)	多重弾性散乱角度分布	Molière [15]
	エネルギーロス	Goudsmit-Saunderson [16][17]
	多重散乱ステップ内電子輸送	Class II デュアルヒンジ

1.3 EGS5 コードが取り扱う物理過程

1.3.1 光子輸送に関する物理過程

図 1.1 に、(a) 水と (b) 鉛におけるエネルギーを関数とした光子輸送過程の質量減衰係数を示す。keV 領域において支配的な光子輸送過程は、光電吸収、コンプトン散乱およびレイリー散乱である。また、光電吸収によって励起された原子の緩和過程として、特性 X 線放出とオーグ電子放出が起こる。

一方で、MeV 以上のエネルギー領域においては電子対生成が支配的である。電子対生成によって生成された電子・陽電子は、制動放射を起こし光子を放出する。この光子は、さらに電子対生成によって電子と陽電子を放出する。この一連の過程が連続的に起こり、電子・陽電子と光子が増倍されていく (電磁カスケードシャワー)。MeV 以上のエネルギー領域では電子対生成とその生成電子・陽電子からの制動放射が支配的である。

コンプトン散乱

コンプトン散乱は、光子と自由電子との間で起こる相互作用である。コンプトン散乱において、入射光子に対して角度 θ に散乱された光子のエネルギー k は、

$$k = \frac{k_0}{1 + (1 - \cos \theta)k_0/mc^2} \quad (1.1)$$

で与えられる。また、コンプトン散乱断面積は Klein-仁科の式 [10]、

$$\frac{d\Sigma_{Compt}(k_0)}{dk} = \frac{X_0 n \pi r_0^2 m}{k_0^2} \left[\left(\frac{C_1}{\epsilon} + C_2 \right) / \epsilon + C_3 + \epsilon \right] \quad (1.2)$$

で与えられる。ここで、

$$\begin{aligned} \epsilon &= k/k_0 \\ C_1 &= (k'_0)^{-2} \\ k'_0 &= k_0/m \\ C_2 &= 1 - 2(1 + k'_0)/(k'_0)^2 \\ C_3 &= (1 + 2k'_0)/(k'_0)^2 \end{aligned}$$

である。EGS5 コードは、式 (1.2) の微分断面積と、放出光子のエネルギーについて積分した全断面積を用いている。

コンプトン散乱の束縛効果とドップラー広がり

コンプトン散乱断面積の式 (1.2) は、電子が束縛されず静止していることを仮定している。また、原子内電子は運動量を持つことから、コンプトン散乱において、放出された束縛電子は単一ではなく広がりのあるエネルギーを持っている (ドップラー広がり)。

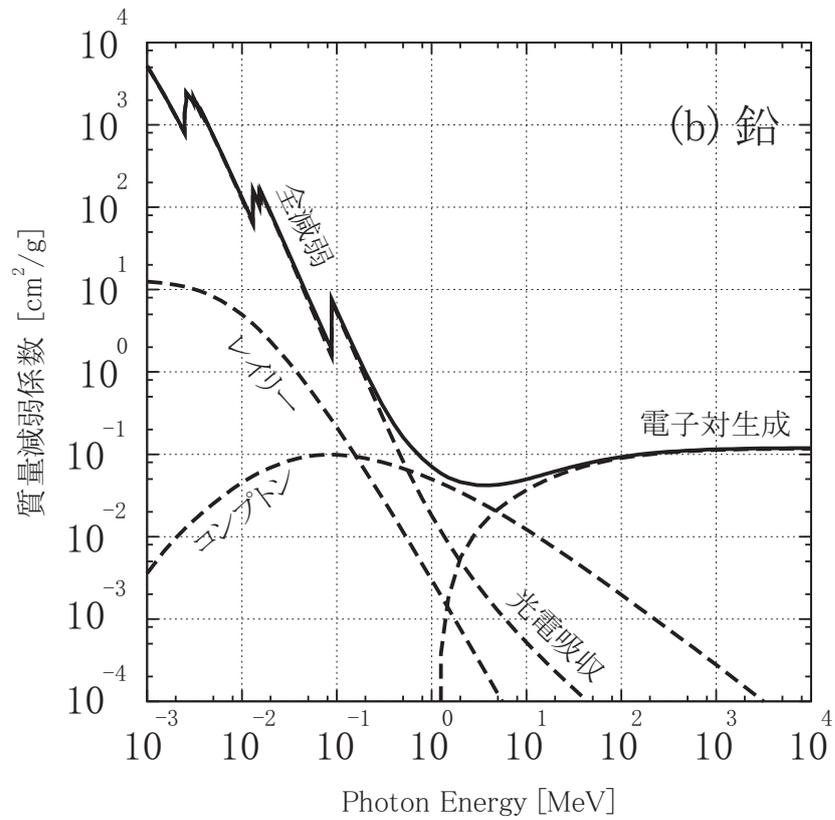
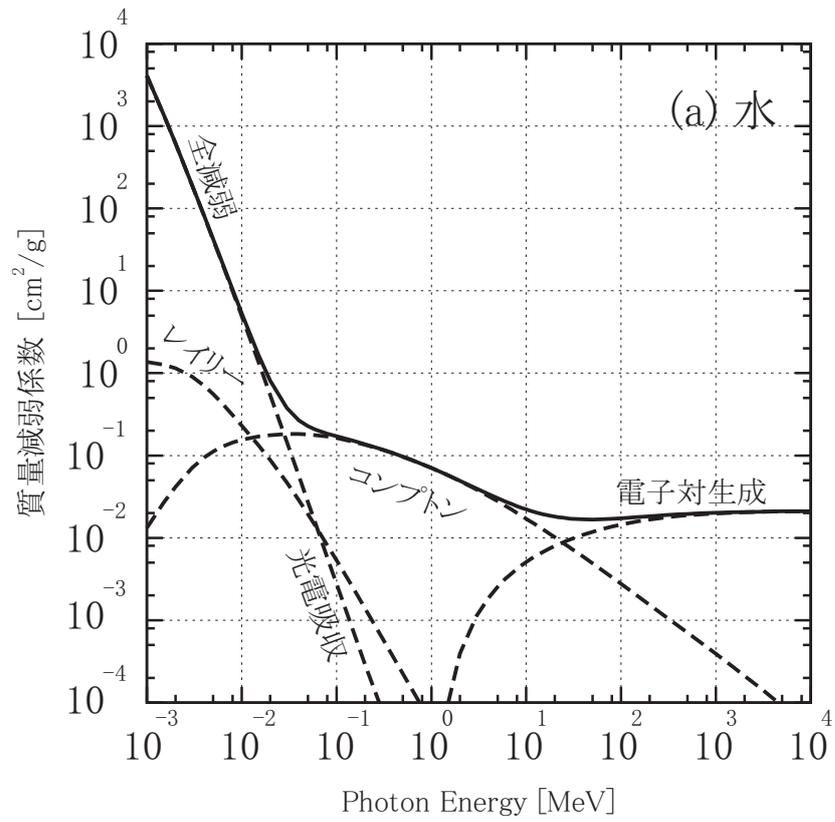


図 1.1: (a) 水と (b) 鉛におけるエネルギーを関数とした光子輸送過程の質量減衰係数 [18]。

Namitoらは、束縛効果とドップラー広がりを考慮したコンプトン散乱における放出粒子の角度分布と全コンプトン散乱断面積を与えた [19, 20]。低エネルギーの光子においてこれらの効果が重要となる。EGS5 コードにおいて、上記の束縛電子の効果とドップラー広がりの扱いが組み込まれている。

直線偏光光子の散乱

上記で述べたコンプトン散乱の扱いは、入射光子が偏光していないことを仮定している。偏光光子の散乱は方位角について等方ではないため、偏光光子が含まれたシミュレーションを行う場合、精度に問題があった。この問題を解決するため、Namitoらは直線偏光光子の散乱のモデリングの方法を開発し、EGS5 コードに組み込んで [21]。

レイリー散乱

レイリー散乱は、原子内電子と干渉的に相互作用する。この過程では原子は電離せず、入射光子の方向のみが変化し、光子エネルギーは不変である。EGS5 コードは、PHOTX ライブラリ [8] によるレイリー散乱断面積データを用いている。また、レイリー散乱における直線偏光の取り扱いもコンプトン散乱と同様に組み込まれている。

光電吸収

光電吸収は、光子が原子と相互作用して消失し、原子内の電子を光電子として放出する過程である。光電子を放出した原子は、殻に空孔ができ励起状態となる。EGS5 コードは光電吸収を、全光電断面積と副殻光電断面積に PHOTX ライブラリ [8] を用いて計算している。光電子が元素 Z の $shell(=K,L,M,...)$ 殻から放出される時のエネルギーは、

$$E = k_0 - E_{shell}(Z) + mc^2 \quad (1.3)$$

で与えられる。ここで、 $E_{shell}(Z)$ は原子番号 Z の $shell(=K,L,M,...)$ 殻の束縛エネルギーである。

緩和過程

光電吸収の直後に、より結合エネルギーの小さい外殻にある電子がこの空孔に再配置され、原子は基底状態に戻る。このとき、原子の励起状態から基底状態への遷移にともなって、原子は特性 X 線またはオージェ電子を放出する。図 1.2 に (a) 光電吸収、その緩和過程である (b) K-X 線の放出、(c) L-X 線の放出、(d) オージェ電子放出の概念図を示す。

特性 X 線のエネルギーは、初期の空孔がある殻と、再配置した電子の元にあった殻の結合エネルギーの差に相当する。例えば、原子の K 殻に一個の空孔ができたとする、その後この空孔が埋められるときに K 系列の特性 X 線が放出される。空孔を埋め

る電子がL殻からくる場合には、K殻とL殻の結合エネルギーの差に相当する K_α 光子が放出される。M殻から電子がくる場合には、少しエネルギーの大きな K_β 光子が放出される。L殻に空孔ができた場合も同様に、M殻からの電子が空孔を埋める場合は L_α 光子が、N殻からの電子が空孔を埋める場合は L_β 光子を放出する。また、励起状態の原子が基底状態に遷移するときに、特性X線を放出する代わりに原子の励起エネルギーが外殻の電子の一つに付与されて、その電子が原子から放出されることがある。ここで放出される電子をオージェ電子という。オージェ電子の放出と特性X線の放出は競合している。特性X線とオージェ電子のサンプリングには、Table of Isotopes 8th edition [9] の蛍光収率を用いている。

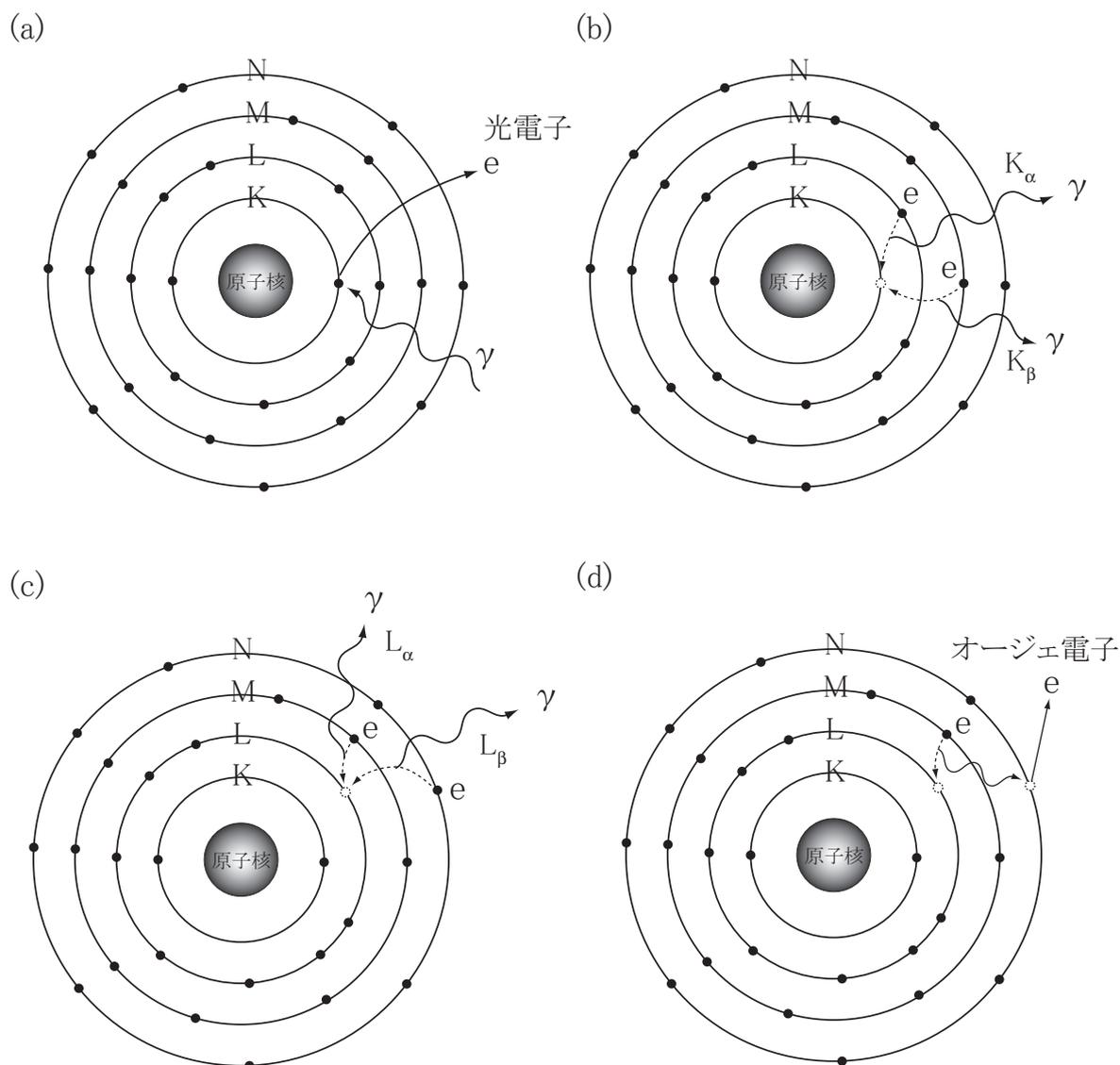


図 1.2: (a) 光電吸収、(b) K-X 線放出 (K_α 、 K_β)、(c) L-X 線放出 (L_α 、 L_β)、(d) オージェ電子放出の概念図。

電子対生成

電子対生成は、高エネルギーの光子が原子核または電子の近傍において吸収され、一对の電子と陽電子を生成する過程である。図 1.3 (a) に電子対生成過程のファインマン図を示す。EGS5 コードは、Bethe と Heitler[11] が与えた電子対生成断面積に補正項を加えた式を用いている。

1.3.2 電子・陽電子輸送に関する物理過程

制動放射

制動放射は、高速電子が原子核または電子のクーロン場により軌道が曲げられて、その運動エネルギーの一部を失い、失ったエネルギーを光子として放出する過程である。放出される光子のエネルギーは連続スペクトルである。図 1.3 (b) に制動放射過程のファインマン図を示す。EGS5 コードは、Bethe と Heitler[11] が与えた制動放射断面積に補正項を加えた式を用いている。

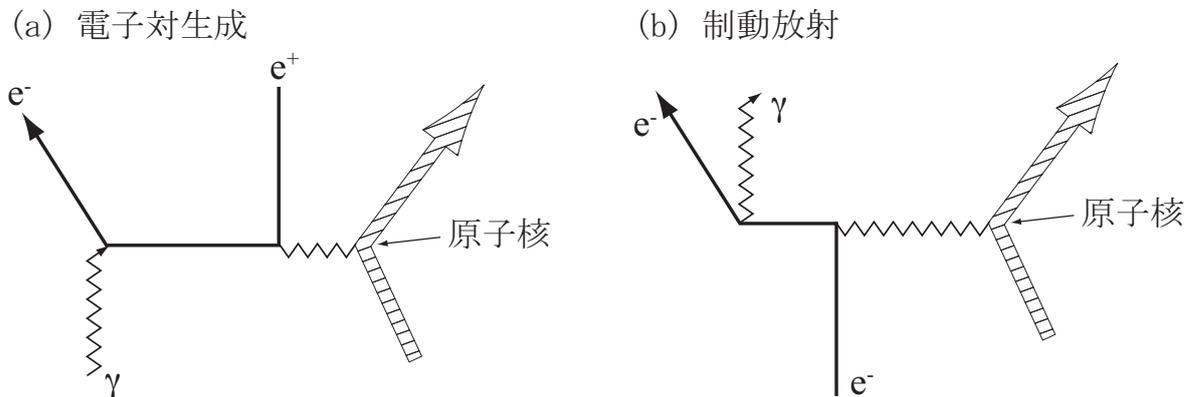


図 1.3: (a) 電子対生成と (b) 制動放射のファインマン図。

Møller 散乱と Bhabha 散乱

Møller 散乱は、入射電子が電子と衝突し、二つの電子を放出する過程である。また Bhabha 散乱は、入射陽電子が電子と衝突し、陽電子と電子を放出する過程である。図 1.4(a) に Møller 散乱、(b) に Bhabha 散乱のファインマン図を示す。EGS5 コードにおける Møller 散乱 [12] と Bhabha 散乱 [13] の計算には、Messel と Crawford[22] によるサンプリング法が用いられている。

陽電子消滅

陽電子消滅は、陽電子が電子と結合し、二つの光子を放出する過程である。図 1.4(c) に陽電子消滅のファインマン図を示す。EGS5 コードにおける陽電子消滅過程からの光子放出の断面積として Heitler[14] によって与えられた式を用いている。

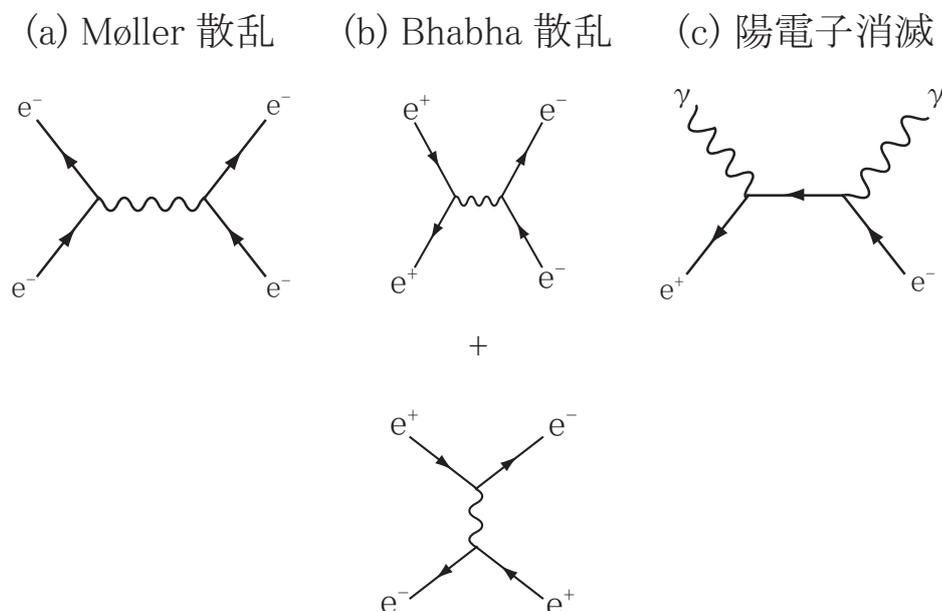


図 1.4: (a) Møller 散乱、(b) Bhabha 散乱、(c) 陽電子消滅のファインマン図。

1.3.3 多重散乱角度分布モデル

電子は、物質を通過するとき原子核とクーロン弾性散乱をする。この散乱回数は非常に多く、すべての散乱を個々にシミュレーションすることは計算量の観点から困難である。このため、電子輸送計算コードでは電子多重散乱モデルを用いて輸送過程を近似的に計算している。これは輸送経路をある領域に分け、その領域を通過する間の角度偏向 (散乱角分布) とエネルギーロスを実験的にサンプリングするものである。電子多重散乱モデルを用いることにより、電子の輸送過程を現実的な計算量で計算することができる。本項では、EGS5 コードが採用している Molière による多重散乱角分布 (Molière 多重散乱分布)[15] と、Goudsmit と Saunderson による多重散乱角分布 (GS 多重散乱分布)[16, 17] について述べる。

Molière 多重散乱分布モデル

Molière 多重散乱分布モデルは、後述の GS 多重散乱モデルよりもサンプリングが単純であり、任意に選ばれた経路長における散乱角分布の計算が比較的容易にできる。一方で、Molière 多重散乱分布は小角近似を基礎としており、約 20 度よりも小さい散乱

角の偏向に使用されるように意図されている。また、Molière 多重散乱分布を適用するためには、すくなくとも 100 回の弾性衝突を起こす経路長が必要である。Jenkins[23]によれば、Molière 多重散乱分布は偏向角度 θ と経路長 s の関数として、

$$F_{\text{Mol}}(\theta, s)\theta d\theta = \vartheta d\vartheta [f^{(0)} + \frac{1}{B}f^{(1)}(\vartheta) + \frac{1}{B^2}f^{(2)}(\vartheta) + \dots] \quad (1.4)$$

$$f^{(n)}(\vartheta) = \frac{1}{n!} \int_0^\infty u du J_0(\vartheta u) e^{-u^2/4} \left(\frac{u^2}{4} \ln \frac{u^2}{4}\right)^n \quad (1.5)$$

で与えられる。ここで、 J_0 は 0 次のベッセル関数である。この分布は、 ϑ を 0 から無限大まで積分したときに 1 になるよう規格化されている。換算偏向角 ϑ は展開パラメータ B を用いて、

$$\vartheta = \frac{\theta}{\chi_c \sqrt{B}} \quad (1.6)$$

$$\chi_c = 0.6009 \frac{Z^2}{A} \left[\frac{\tau + 1}{\tau(\tau + 2)} \right]^2 s \quad (1.7)$$

で表される。ここで、展開パラメータ B は、次式をニュートン法を用いて解くことで得ることができる。

$$B - \ln B = \ln(\chi_c^2 / 1.167 \chi_a^2) \quad (1.8)$$

$$\chi_a^2 = \frac{6.8 \times 10^{-5} Z^{2/3}}{\tau(\tau + 2)} \left[1.13 + 3.76 \left(\frac{Z}{137\beta} \right)^2 \right] \quad (1.9)$$

$$(1.10)$$

ϑ は式 (1.6)、(1.7) によって θ 、 τ 、 Z 、 A 、 s に依存した変数として与えられる。この ϑ のみの関数である $f^{(n)}$ を用いることにより、多重散乱分布の算出に必要な計算量とデータ量を抑えることができる。 $f^{(n)}$ ($n = 1, 2, 3$) の値は、Bethe によって与えられている [24]。図 1.5 に、 $f^{(0)}$ 、 $f^{(1)}$ 、 $f^{(2)}$ を三次スプライン補間した値を示す。EGS5 コードは、 $f^{(n)}(\vartheta)$ を三次スプライン関数によって内挿し、 $F_{\text{Mol}}(\theta, s)\theta d\theta$ を得ている。

Goudsmit-Saunderson(GS) 多重散乱分布モデル

GS 多重散乱分布は Molière 多重散乱分布に比べて計算のために取り扱うデータ量が多いものの、様々なエネルギーポテンシャルによる単一弾性散乱断面積を適用することができる。また GS 多重散乱分布は、Molière 多重散乱分布より短い経路長においても適用でき、すべての散乱角の偏向に適用することができる。GS 多重散乱分布は、

$$F_{\text{GS}}(\theta, s) = \sum_{l=0}^{\infty} (l + 1/2) \exp(-sG_l) P_l(\cos \theta) \quad (1.11)$$

で表される。この分布は、 θ を 0 から π まで積分したときに 1 に規格化される。ここで、 P_l はルジャンドル多項式、 s は経路長 (g/cm^2) であり、係数 G_l は、

$$G_l = 2\pi \frac{N_a}{A} \int_0^\pi [1 - P_l(\cos \theta)] \sigma(\theta) \sin \theta d\theta \quad (1.12)$$

で与えられる。ここで、 $\sigma(\theta)$ は単一散乱の断面積である。

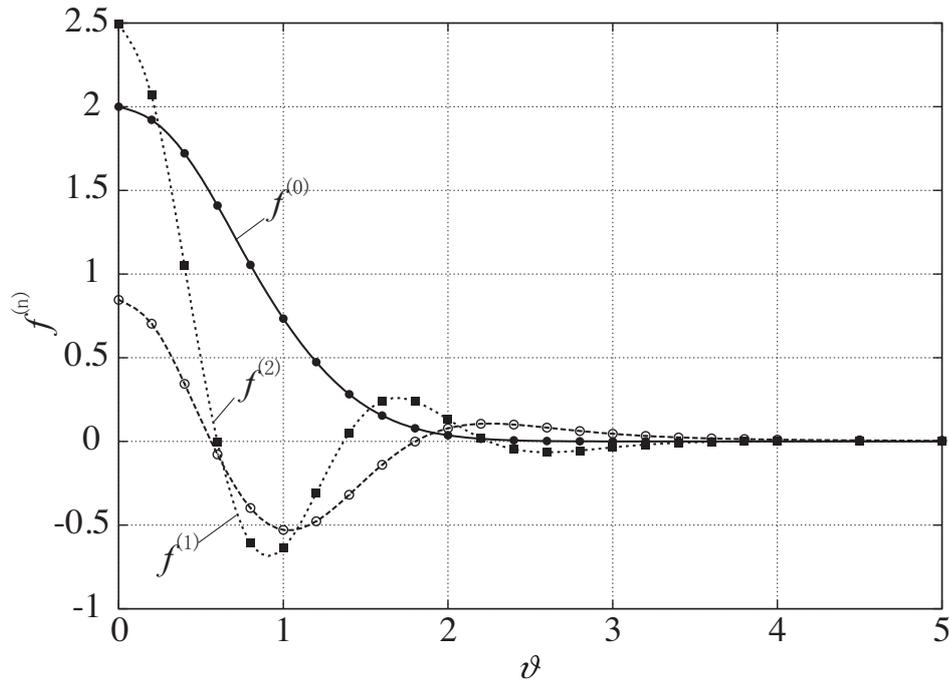


図 1.5: Molière の普遍関数 $f^{(0)}$ 、 $f^{(1)}$ 、 $f^{(2)}$ [24]。

スピン相対論効果の寄与

電子が原子核からクーロン散乱を受けるときの散乱断面積として、非相対論的エネルギーにおいて Rutherford 散乱断面積が用いられている。電子のエネルギーが相対論的エネルギーである場合、電子のもつスピンの影響によって Rutherford 散乱断面積は変更される (スピン相対論効果)。Mott 散乱断面積 [25] は、スピン相対論を考慮し、電子の原子核による弾性散乱の強度を表す断面積である。Rutherford 散乱に対する Mott 散乱断面積の比 (Mott/Rutherford) は、Idoeta と Legarda によって提供されている [26]。図 1.6 に、Be における Mott/Rutherford 比を示す。5 keV の Mott/Rutherford 比は、ほぼ 1 でありほとんど変化はないものの、100 keV 以上から徐々に Mott 散乱断面積が減少する。また、その減少は大角度ほど大きくなり、180 度方向で 0 に近づく。

Mott/Rutherford 比が 180 度方向において減少する理由を、図 1.7 のスピン相対論効果を含めたクーロン散乱における概念図を用いて述べる [27]。 $\beta \rightarrow 1$ の極限の場合、電子のスピン \vec{s} の運動方向 (z 方向) への射影は、保存量である。このため 180 度方向へ電子が散乱されるためには、スピンの z 方向の射影は向きを変えなければならない。しかしながら、スピン 0 の原子核による散乱において、電子スピンの z 方向を変更することはできない。このため、180 度方向へ電子は散乱されない。

MeV 領域においてスピン相対論効果の影響が大きくなるため、このエネルギー領域での電子輸送を精度良く計算するためには、電子の原子核による弾性散乱にスピン相対論効果を考慮する必要がある。GS 多重散乱分布では、部分波解析を用いて散乱強度を求める際にスピン相対論効果を考慮している。Molière 多重散乱分布では、スピン相対論効果は考慮されていない。

EGS5 コードは、スピン効果なしの Molière 多重散乱分布 (NoSpin-Molière) と、スピン効果有りの GS 多重散乱分布 (Spin-GS) を選択できる。一般的に、Spin-GS の精度がよいことが知られている [23]。特に電子の後方散乱を計算する場合、NoSpin-Molière は、Molière 多重散乱分布が小角近似を基礎としていることと、スピン相対論効果を考慮していないことから、Spin-GS を用いるほうがよい。なお、Molière 多重散乱分布にスピン相対論効果を考慮するためには、サンプリングされた多重散乱分布に Mott/Rutherford 比を掛けることで近似的に適用することができる [23]。

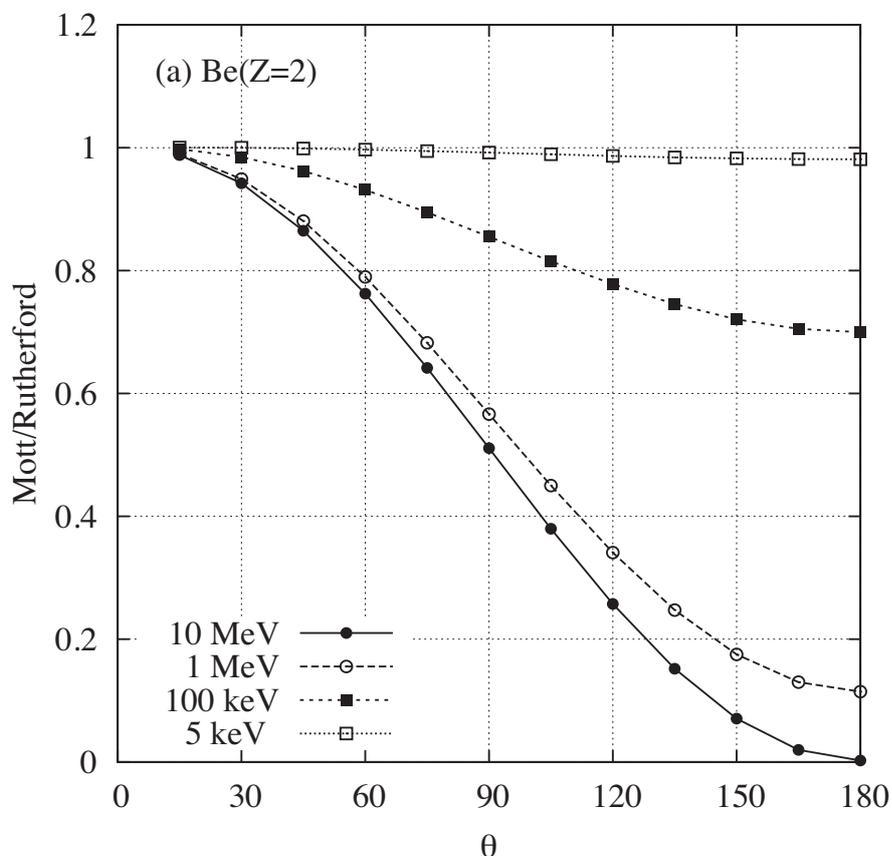


図 1.6: (a) Be における Rutherford 散乱に対する Mott 散乱の比 [26]。

$\beta \rightarrow 1$ のとき 180 度方向への散乱は禁止される

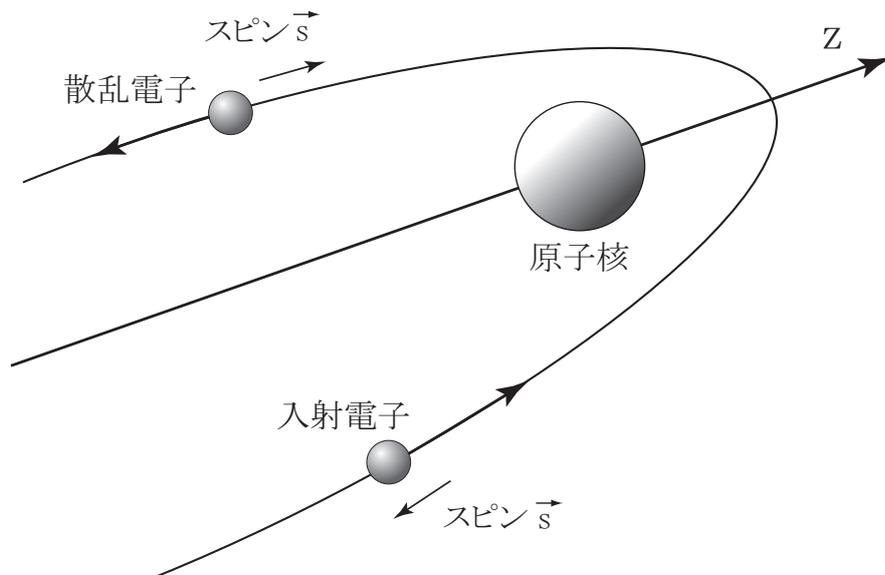


図 1.7: スピン相対論効果を含めたクーロン散乱における概念図。

1.3.4 電子輸送エネルギーロスモデル

電子のエネルギーロスは、電子-電子の非弾性散乱数が多く、個別に扱うことが困難なため、連続して減速すると近似する(連続減速近似)。連続減速近似では、電子の輸送経路をある短い領域に分け、その領域におけるエネルギーロスを連続減速として近似する。このエネルギーロスモデルには、ITS 3.0 コードが採用している Class I モデルと、EGS5 コード、EGSnrc コードや PENELOPE コードが採用している Class II モデルがある。ここでは、Class I モデルと Class II モデルについて述べる。図 1.8 に、(a) Class I モデルおよび (b) Class II モデルのエネルギーロスの概念図を示す。

Class I モデル

Class I モデルは、エネルギーロスのステップが対数で等間隔になるように分けられており、 n 番目のステップでの電子のエネルギー E_n と、 n 番目のステップでの物質に付与されるエネルギー E_{dep} は、

$$E_n = 2^{-1/m} E_{n-1} \quad (1.13)$$

$$E_{\text{dep}} = E_n - E_{n-1} - E_\delta \quad (1.14)$$

で与えられる。ここで、エネルギーロスのステップサイズは m で決める。 E_{n-1} は $n-1$ 番目のステップの後の電子のエネルギーである。 E_δ は二次電子のエネルギーであり、独自にサンプリングされる。また Class I モデルは、このステップを物質に依存したサブステップ N_{substep} に分けており、サブステップ毎に角度偏向や二次粒子生成、エネルギー吸収のサンプリングを行っている。つまり、エネルギーロスと角度偏向や2次粒子の生成はおなじタイミングで行われる。ITS 3.0 コードの場合、デフォルトでは $m=8$ であり一回のステップにおいて8.3%のエネルギーがロスされる。また、サブステップは原子番号 $Z < 6$ において $N_{\text{substep}} = 2$ から、 $Z > 91$ において $N_{\text{substep}} = 15$ までの範囲に設定されている。

Class II モデル

Class II モデルにおいて、エネルギーロスのステップはランダムにサンプリングされており、ステップが n 番目の電子のエネルギー E_n は、

$$E_n = E_{n-1} - t_{n-1} L_{\text{col}}^{AE} - E_\delta \quad (1.15)$$

$$E_{\text{dep}} = t_{n-1} L_{\text{col}}^{AE} \quad (1.16)$$

で与えられる。ここで t_{n-1} は、 $n-1$ 番目のステップ長、 L_{col}^{AE} は制限付き阻止能と呼ばれる。また、 E_δ は2次粒子のエネルギー、 E_{dep} は媒質に付与されるエネルギーである。 AE は δ 線生成の下限エネルギーであり、サンプリングした δ 線のエネルギーが AE 以上であった場合、 δ 線を発生させる。

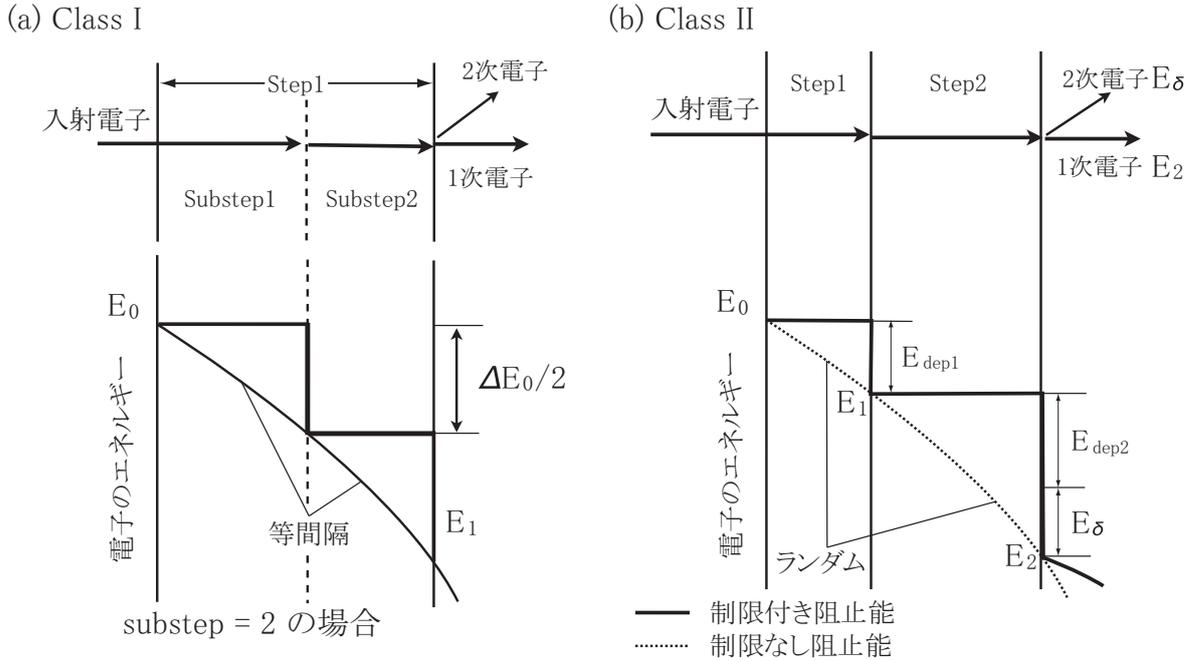


図 1.8: 多重散乱エネルギーロスモデル、(a) Class I と (b) Class II の概念図。

1.3.5 電子輸送デュアルヒンジメカニズム

EGS5 コードは、1.3.3 で述べた多重散乱角度分布と 1.3.4 で述べた Class II モデルのエネルギーロスを考慮しながら粒子の輸送計算を行うために、デュアルヒンジメカニズムを採用している。図 1.9 に、輸送ステップとエネルギーロスのデュアルヒンジメカニズムの概念図を示す。デュアルヒンジメカニズムの輸送ステップは、下記の二つのプロセスを独立して同時に処理している。

輸送ステップにおいて、

1. 輸送ステップ距離 $t_{\theta}(K_1)$ の最初の区分の距離を、乱数 ξ_{θ} を用いて $\xi_{\theta}K_1$ によって決める。
2. $t_{\theta}(\xi_{\theta}K_1)$ のヒンジ点に到達するまでに直線で輸送する。
3. ヒンジ点にて多重散乱分布モデルを用いて散乱方向を決める。
4. ヒンジ点の後の残った距離 $t_{\theta}[(1 - \xi_{\theta})K_1]$ を輸送する。

エネルギーロスステップにおいて、

1. エネルギーロスステップ距離 $t_E(\Delta E)$ の最初の区分の距離を、乱数 ξ_E を用いて $\xi_E\Delta E$ によって決める。
2. $t_E(\xi_E\Delta E)$ のヒンジ点に到達するまでに一定のエネルギーで輸送する。
3. ヒンジ点にてエネルギーをロスさせる。

4. ヒンジ点の後の残った距離 $t_E[(1 - \xi_E)\Delta E]$ を輸送する。

これらプロセスにおいて、輸送ステップのヒンジ点とエネルギーロスステップのヒンジ点のうち先に到達した方から計算を行う。つまり、多重散乱のヒンジ点に先に到達した場合には方向を変化させ、その後エネルギーのヒンジ点に到達したときにエネルギーを変化させる。散乱強度 K_1 は、

$$K_1(t) = \int_0^t dt' G_1(t') \quad (1.17)$$

$$G_l(t) = 2\pi \int d\mu \Sigma(\mu; t; E) [1 - P_l(\mu)] \quad (1.18)$$

で与えられる。ここで、 $\Sigma(\mu; t; E)$ は巨視的単一散乱断面積、 μ は $\cos(\Theta)$ 、 P_l はルジャンドル関数である。散乱強度 $K_1(t)$ を用いることで、多重散乱分布ステップに電子のエネルギー変化を考慮することができる。また、エネルギーロスヒンジに用いている ΔE はステップ間のエネルギーロスであり、式 (1.16) に従って計算される。

上記のデュアルヒンジは、エネルギーロスステップ間のエネルギーロスを、ステップ内のエネルギーヒンジ点で集中的に行う。エネルギーヒンジ点の間の電子エネルギーは一定であることから、その間での G_l は一定となる。このため、多重散乱角度分布ヒンジ点 $t_\Theta(\xi_\Theta K_1)$ は、容易に計算することができる。

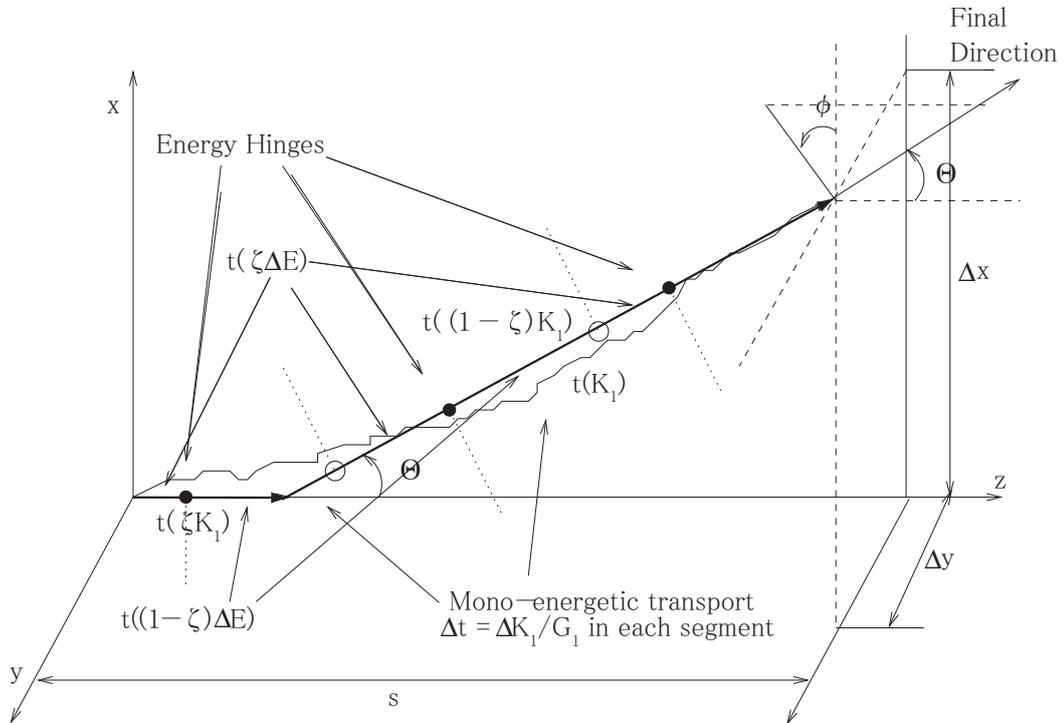


図 1.9: エネルギーと角度のデュアルヒンジ輸送の概念図。

1.4 EGS5 コードにおける研究課題

本項では、前項で見た物理過程の取り扱いにおいて、EGS5 コードが現在抱えている研究課題について述べる。

1.4.1 高エネルギー領域拡張のための課題

LPM 効果と誘電による抑制効果

制動放射と電子対生成の断面積として Bethe-Heitler 断面積が用いられる。しかし相対論的効果の影響によってこれらの放出断面積は抑制される。この抑制効果は、1950 年代に Landau と Pomeranchuk[28] によって指摘され、Migdal[29] によって定式化されたことから、「Landau-Pomeranchuk-Migdal(LPM) 効果」と呼ばれている。LPM 効果は、制動放射においておよそ数十 GeV 以上、電子対生成において数 TeV 以上のエネルギー領域で効果が現れる。BH 断面積の場合、エネルギーにおける放出確率のオーダーは $dN/dk \sim 1/k$ であるものの、LPM 効果を考慮した場合は $dN/dk \sim 1/\sqrt{k}$ に置き換わる。

また Ter-Mikaelian[30] は、相対論的エネルギーを持った電子からの低エネルギー制動放射光子は、物質の誘電的な性質に関連して抑制されることを指摘し、この抑制も Migdal によって定式化された。この抑制は、「誘電による抑制効果」と呼ばれている。これらの抑制効果の物理的な意味は Klein[31] のレビュー論文に紹介されており、本論文では 2.1 において詳しく見る。

LPM 効果と誘電による抑制効果の実験的研究

制動放射と電子対生成におけるこれらの抑制効果を検証するには、高エネルギーの電子または光子ビームを用いる必要がある。制動放射における LPM 効果と誘電による抑制効果は、加速器による電子ビームを用いて測定することができる。1997 年に Anthony ら [32] は、SLAC にある線形加速器を用いて、8 GeV と 25 GeV の電子からの制動放射光子のスペクトルを測定し、LPM 効果と誘電による抑制効果の精度良い測定値を示した。また 2004 年に Hansen ら [33] は、CERN の Super Proton Synchrotron (SPS) 加速器を用いて 149、207、287 GeV の電子からの制動放射光子のスペクトルを測定し、より高エネルギーの電子における LPM 効果の精度良い測定値を示した。

一方で電子対生成に関しては、数 TeV 以上のエネルギーの光子ビームが必要となるため、現存している加速器の範囲を超えている。このため電子対生成における LPM 効果の実験的研究は、宇宙線を用いて行われているものの、統計精度がきわめて限られている。

EGS5 コードの高エネルギー領域の制限

EGS5 コードでは、制動放射光子と電子対生成の計算に、BH 断面積を補正した式を用いている (1.3 参照)。これらの断面積は、制動放射における LPM および誘電による

抑制効果と、電子対生成における LPM 効果を考慮していない。制動放射と電子対生成は高エネルギー領域において支配的な物理過程であるため、これらの抑制効果を無視していることで EGS5 コードの計算可能な上限エネルギーが決まっている。

1.4.2 光子の低エネルギー領域拡張のための課題

数 10 keV 以下の光子は、放射光施設などにおいて物質構造解析などの物性研究を対象とした、対象物質の電子状態を調べる手段に用いられている。EGS5 コードなどの輸送計算コードは、物質中の電子の数をベースとした計算を行うため、原子内電子の状態を個々に取り扱うことは難しい。このため、束縛コンプトンやドップラー広がりを取り扱いを EGS5 コードに組み込むことにより、平均的な電子の状態を考慮している。よって、これらのエネルギー領域において EGS5 コードが適用可能か確認するためには、測定値による検証が必要である。

これまでに低エネルギー領域の光子輸送の検証のため、Namito らによって高エネルギー加速器研究機構の放射光施設 (KEK-PF) において、X 線散乱実験が行われている [19, 20]。この実験には、ゲルマニウム半導体検出器 (Ge 検出器) が用いられ、8 keV 以上の特性 X 線 (K-X 線) が測定されており、EGS5 コードによる計算値は、この測定データを 5 % 以内で再現している。図 1.10 にこの実験の測定体系を示す。図 1.11 に、この実験において測定された 40 keV の X 線を Cu ターゲットに入射させたときの Ge 検出器による散乱スペクトルの実験値と計算値の比較を示す。このときの測定には、ターゲットから水平方向および垂直方向に向かって 90 度方向にそれぞれ Ge 検出器を配置し測定を行っている。

図 1.12 にこの体系において EGS5 コードを用いて計算した Ge 検出器の検出効率を示す。この測定体系における Ge 検出器の検出効率は、8 keV 以下で急激に低下する。これは、ターゲットからの散乱光子が Ge 検出器に入射するまでに、真空チャンバーの窓であるカプトン膜 (25 μm) とその後の空気層 (3.4 cm) を通過することに起因している。このため、8 keV 以下の特性 X 線を測定するためには別の測定体系を用いる必要がある。

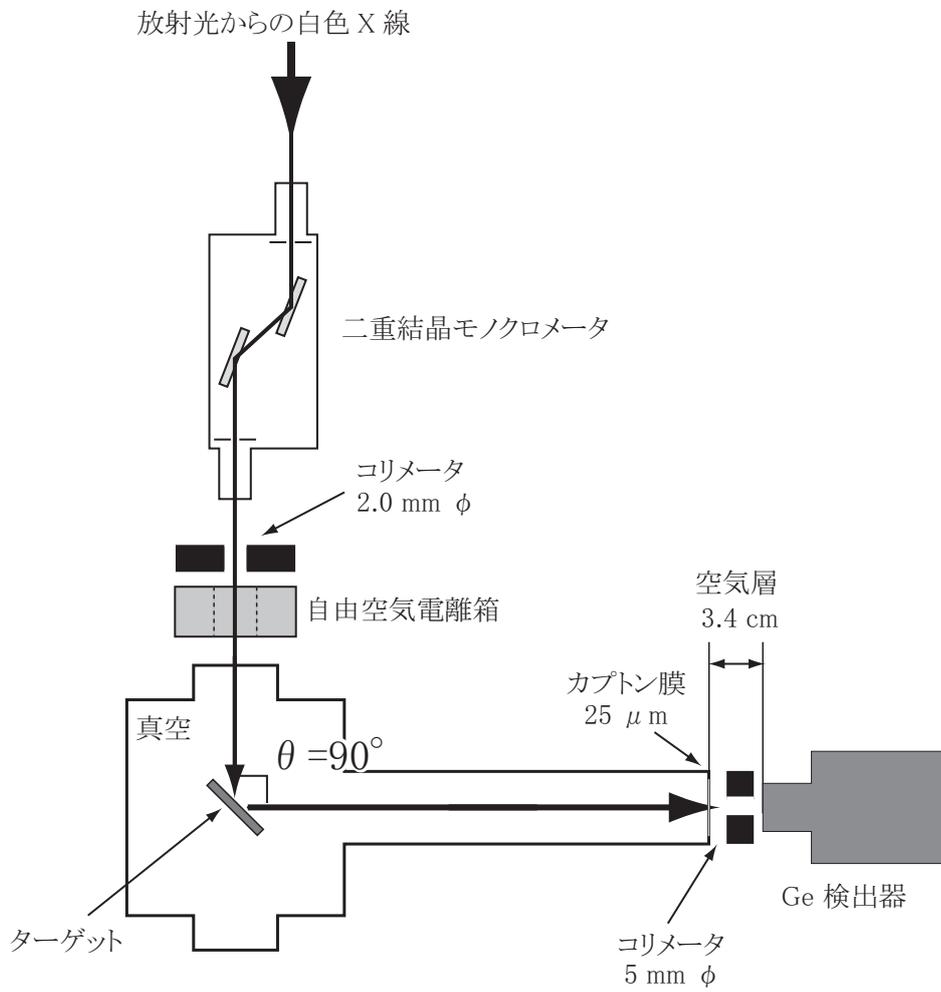


図 1.10: Namito らによる X 線散乱実験の測定体系。

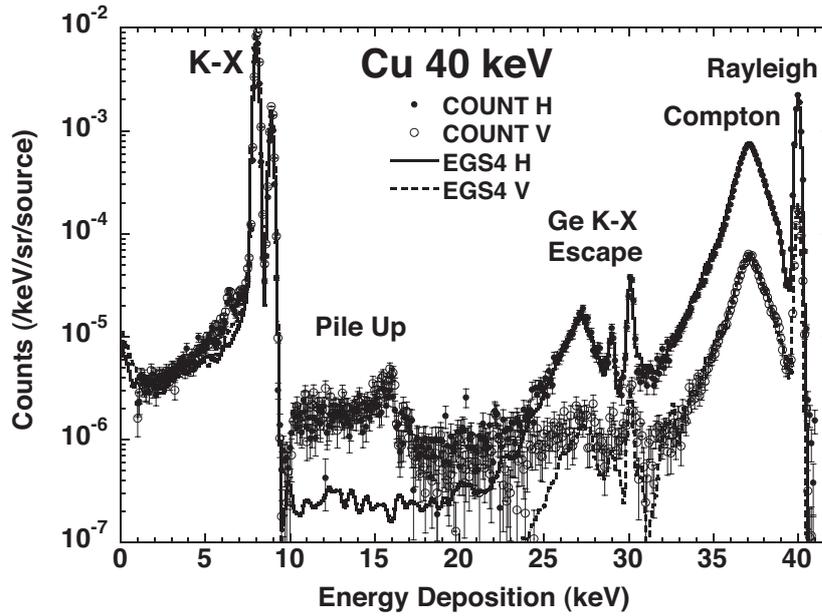


図 1.11: Namito らの X 線散乱実験における Ge 検出器による Cu ターゲットからの 90 度散乱スペクトルの実験値と計算値の比較。COUNT H、COUNT V はそれぞれ水平と垂直位置での測定値、EGS4 H、EGS4 V はそれぞれ水性と垂直位置での計算値である。計算は EGS4 コードに束縛コンプトンとドップラー広がりを含めた計算であり、EGS5 コードによる計算と同等の結果である [19]。

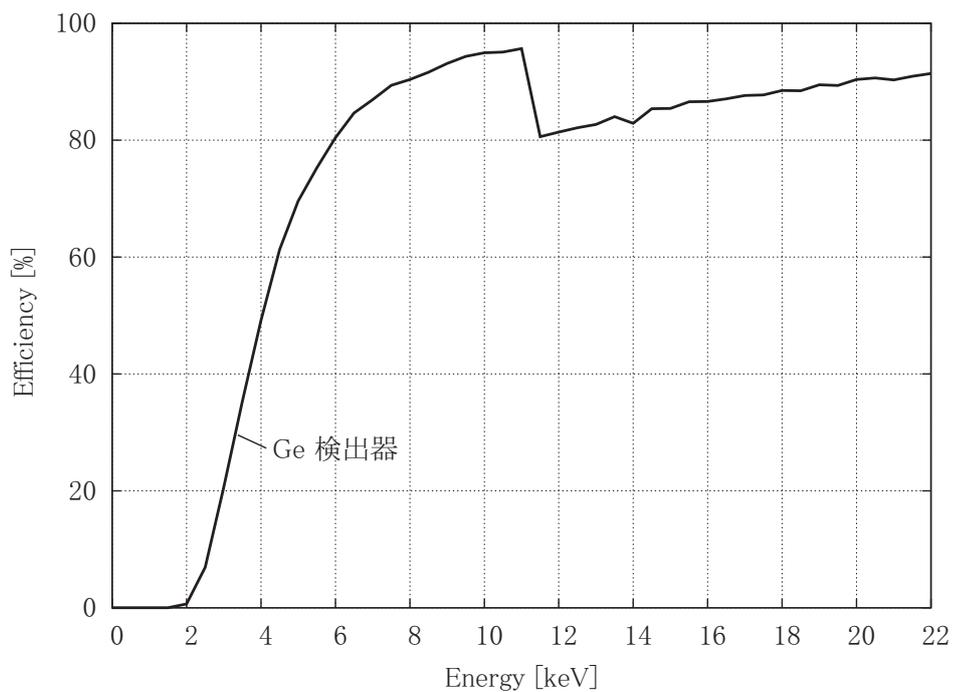


図 1.12: Namito らの X 線散乱実験における Ge 検出器の検出効率。

1.4.3 既存のエネルギー領域の課題

EGS5コードを含めた電子・光子輸送計算コードは、電子または光子が物質を通過するときの物理過程を再現するために、理論式、近似モデル、断面積データを多く用いており、それらは複雑に関わり合っている。輸送計算コードで再現された物理過程の精度検証は、比較対象である物理過程が大きく寄与している測定データとのベンチマークが有効である。また、ベンチマークは、計算値と測定値の両面から物理過程を評価するので、放射線の輸送過程を理解する有効な手段である。

ベンチマークの種類

輸送計算コードによるベンチマーク計算は、測定データと同じ条件下で行わなければならない。そのため、ベンチマークに用いられる測定データは測定条件が明確であることが必要である。このためには、単純な体系であり単純なソース(粒子、エネルギー、方向)であることが望ましい。表1.2に、主に電子・光子輸送計算コードのベンチマークに用いられる輸送過程と評価量を示す。ここに示した電子・陽電子または光子、輸送過程および評価量の組み合わせによって、注目しているの物理過程が大きく寄与している評価量において比較検証することができる。

表 1.2: 電子・光子輸送計算コードにおけるベンチマークの種類

輸送粒子	輸送過程	評価量
(E) 電子・陽電子	(i) 後方散乱	(a) 係数
		(b) エネルギースペクトル
		(c) 角度分布
(E) 電子・陽電子	(ii) 物質透過	(a) 係数
		(b) エネルギースペクトル
		(c) 角度分布
(P) 光子	(iii) 物質深部	(d) 制動放射光子
		(a) エネルギー付与
		(b) 電荷付与
		(c) 線量
		(d) 検出器のレスポンス

これまでのベンチマーク計算

表 1.3 に、これまでに行われた汎用輸送計算コードによる主なベンチマーク計算を示す。評価量は、表 1.2 の記号を用いて示している。

表 1.3: これまで行われた汎用輸送計算コードによる電子・光子輸送ベンチマーク計算。

計算コード	文献	評価量
EGS [1]	Jenkins [23]	(E)-(ii)-(d)
	Nelson [34]	(E)-(iii)-(a),(c)
	Rogers [35]	(P)-(iii)-(d)
		(P)-(iii)-(c)
	(P)-(iii)-(d)	
EGSnrc [2]	Ali et al. [36, 37]	(E)-(i)-(a),(b),(c)
ETRAN [38]	Jenkins [23]	(E)-(i)-(a),(b)
	Seltzer and Berger [39]	(E)-(ii)-(a),(b),(d)
		(E)-(iii)-(a),(b),(c)
		(P)-(iii)-(d)
ITS 3.0 [4] (MCNP)* [5]	Jenkins [23]	(E)-(i)-(a)
	Ito et al. [40]	(E)-(ii)-(a),(d)
	Edwards et al. [41]	(E)-(iii)-(a),(c)
	Gierga et al. [42]	(P)-(iii)-(d)
	Halbleib et al. [4]	
	Jeraj et al. [43]	
PENELOPE [3]	J.Sempau et al. [44]	(E)-(i)-(a),(b),(c)
	E.Acosta et al. [45]	(E)-(ii)-(a),(b),(d)
	U.Chica et al. [46]	(E)-(iii)-(c)
	Benedito et al. [47]	
	J. Baró et al. [48]	
FLUKA [6]		(E)-(i)-(a),(c)
	Ferrari et al. [49]	(E)-(ii)-(a),(b),(d)
		(E)-(iii)-(c)
Geant4 [7]	Faddegon et al. [50]	(E)-(ii)-(d)

*MCNP コードの電子輸送には ITS 3.0 コードが用いられているため、MCNP コードによるベンチマーク計算も含めている。

電子輸送計算における検証の必要性

EGS5 コードを含めた汎用電子・光子輸送計算コードは、電子輸送において多重散乱角度分布モデルなどのグループによる取扱いにより近似計算しており (1.3.3、1.3.4、1.3.5 参照)、表 1.4 に示すように、これらモデルとその取扱いはそれぞれのコードによって異なる。このため、電子輸送に関するベンチマークは、多重散乱モデルとその取り扱いの妥当性を検証するために重要である。

表 1.4: 汎用電子・光子輸送コードの電子輸送に用いられているモデルの比較。

計算コード	多重散乱分布	スピン 相対論効果	エネルギーロス	電子輸送 メカニズム
EGS5	Molière GS	無し 有り	Class II	デュアルヒンジ
EGSnrc	GS	有り	Class II	単一散乱のみ 別途計算
PENELOPE	GS	有り	Class II	デュアルヒンジ 大角度散乱のみ 別途計算
ITS 3.0	GS	有り	Class I	固定幅

このベンチマークとして有効な測定量に、電子後方散乱係数 (表 1.2 の (E)-(i)-(a) に相当) がある。電子後方散乱係数は、ターゲットに入射した電子数に対して後方全域に散乱された電子数の比率であり η で表される。ターゲットから後方に散乱される電子は、少数回の大角に散乱される過程を経ていると考えられる。また η の測定値は、実験体系が比較的単純なことから、多くのグループによって提供されている。

表 1.5 に、これまで行われた後方散乱係数のベンチマーク計算を、ターゲット物質とエネルギーを合わせて示す。EGS コードにおいてこれまで後方散乱係数の系統的なベンチマーク計算結果は行われていない。また、原子番号の低い物質である Be や C などを含む MeV 領域のベンチマークは、伊藤らによる ITS 3.0 コードによる計算のみが行われている。このことから、EGS5 コードの電子輸送の妥当性の検証のために、keV 領域から MeV 領域、原子番号の低い物質から高い物質まで、系統的な電子後方散乱係数のベンチマーク計算が必要である。

表 1.5: 電子後方散乱係数におけるベンチマーク。

計算コード	著者	ターゲット	エネルギー領域 [MeV]
EGSnrc [2]	Ali and Rogers [36]	Be から U	0.005~0.14
	Ali and Rogers [37]	Al, Cu, Ag, Au	0.01~0.07
ETRAN [38]	Seltzer and Berger [39]	Al	0.1~20.0
		Be から U	1.0
ITS 3.0 [4]	Ito et al. [40]	Be から U	0.1~20.0
FLUKA [6]	Ferrari et al. [49]	Al	0.03~20.0
		Au	0.1~3.0
PENELOPE [3]	J. Baró et al. [48]	Au	0.001~0.06
	Benedito et al. [47]	Al, Au	3.24~10.1
	Sempau et al. [44]	Be, Al, Cu, Au	0.0004~0.1
Al, Cu, Au		0.2~20.0	

1.5 本研究の目的

EGS5 コードを数十 GeV 以上の高エネルギー領域への拡張するためには、1.4.1 で見たように、制動放射に LPM 効果と誘電による抑制効果が組み込みを行い、LPM 効果の測定データと比較する必要がある。

また、EGS5 コードの低エネルギー光子輸送に関しては、1.4.2 で見たような近似的な電子状態の取り扱いによる EGS5 コードの計算値を、測定値と比較することで、どこまで適用可能か検証する必要がある。

EGS5 コードの電子輸送に関して、Spin-GS やデュアルヒンジによる取扱いが組み込まれている。これらの取扱いの検証として有効である電子後方散乱係数のベンチマーク計算は、系統的には行われていない。

これらの課題に対して、本研究では、

- LPM 効果および誘電による抑制効果の組み込み (2 章)
- 放射光施設における低エネルギー散乱 X 線の測定 (3 章)、
- 電子輸送の妥当性の検証のための電子後方散乱の比較 (4 章)、

を行い、EGS5 コードの高エネルギーおよび低エネルギー領域への拡張と検証を目的とする。

第2章 LPM効果および誘電による抑制効果の組み込み

2.1 背景および研究目的

制動放射のLPM効果および誘電による抑制効果は電子エネルギーが数 GeV 以上の場合に現れる。また、電子対生成のLPM効果は数 TeV 以上の光子の場合に現れる。本章では、これらのエネルギー領域での電磁シャワー輸送を EGS5 コードを用いて精度よく計算するため、EGS5 コードに LPM 効果および誘電による制動放射の抑制効果、および LPM 効果による電子対生成の抑制効果の組み込みを行った。

2.1.1 形成距離 (Formation length)

古典論的記述

制動放射において、光子が放出されるまでの時間を考える。このときの概念図を図 2.1 に示す。Hansen ら [33] によれば、制動放射における放出光子の波長を λ とすると、電子と放出光子が $\lambda/2\pi$ だけ離れることを分離としている。その分離に必要な時間の関係式は、

$$\frac{l_{f0}}{v} = \left(l_{f0} + \frac{\lambda}{2\pi} \right) \frac{1}{c} \quad (2.1)$$

と与えられている。ここで、 l_{f0} は形成距離 (formation length) である。 v は入射電子の速度であり、

$$v = \sqrt{1 - 1/\gamma^2}c \quad (2.2)$$

で与えられる。 $y \ll 1$ のときの近似 $\sqrt{(1-y)} \sim 1 - y/2$ と、高エネルギーの電子の場合は $\gamma^2 \ll 1$ であることから

$$l_{f0} \sim \frac{2\gamma^2 c}{\omega} = \frac{2\hbar E^2}{m^2 c^3 k} \quad (2.3)$$

が得られる。ここで、 $\omega = 2\pi c/\lambda = k/\hbar$ である。

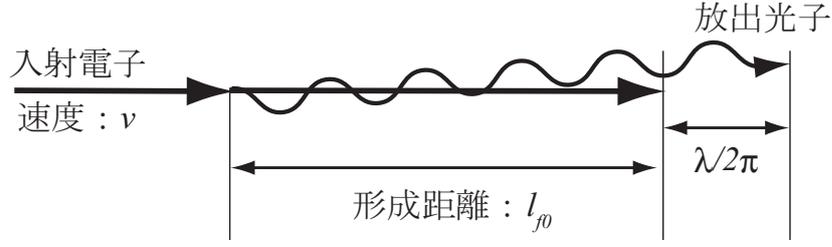


図 2.1: 制動放射における形成距離に必要な時間の概念図。

相対論的記述

形成距離を理解する別のアプローチとして、制動放射における入射電子と原子核との運動量移動に注目する。このときの概念図を図 2.2 に示す。放出光子の発生角と電子の散乱角を無視すれば、進行方向の運動量移動 q_{\parallel} は、

$$\begin{aligned} q_{\parallel} &= p_e - p'_e - p_{\gamma} \\ &= \sqrt{(E/c)^2 - (mc)^2} - \sqrt{[(E-k)/c]^2 - (mc)^2} - k/c \end{aligned} \quad (2.4)$$

である [31]。ここで p_e と p'_e は制動放射前後の電子運動量、 p_{γ} は放出光子の運動量である。 $m \ll E$ である場合、 $\gamma = E/mc^2 \gg 1$ であり、式 (2.4) は y が小さいときの近似 $\sqrt{1-y} \sim 1 - y/2$ を用いて、

$$q_{\parallel} \sim \frac{m^2 c^3 k}{2E(E-k)} \quad (2.5)$$

である。不確定性原理により形成距離 l_{f0} は、

$$l_{f0} = \frac{\hbar}{q_{\parallel}} = \frac{2\hbar E(E-k)}{m^2 c^3 k} \quad (2.6)$$

である。制動放射はこの距離に渡って起こる現象である。高エネルギー電子が低エネルギーの光子を放出する場合、 l_{f0} は非常に大きい。例えば、25 GeV の電子が 10 MeV の制動放射光子を放出する場合、 $l_{f0} = 100 \mu\text{m}$ である。 $k \ll E$ のとき、式 (2.6) は式 (2.3) と同等である。 l_{f0} は k に反比例、 E^2 に比例して大きくなり、このときの制動放射の相互作用は長い時間と距離が必要である。

高エネルギー電子による制動放射や、高エネルギー光子による電子対生成の相互作用には、長い形成距離が必要である。もし形成距離を横断している間に電子または光子が別の要因で作用を受けると、制動放射や電子対生成の断面積は抑制される。

2.1.2 制動放射における LPM 効果

制動放射において、電子が形成距離を横切る間にクーロン多重散乱が起こる場合の影響について考える。このときの概念図を図 2.2 (b) に示す。電子と原子核とのクーロン多重散乱は、電子の進行方向の速度を減少させ、原子核との縦方向運動量移動 q_{\parallel} に

影響を及ぼす。Rossi[51] は、電子が距離 x を進んだときの多重散乱による角度偏向 θ_{MS} を、

$$\theta_{\text{MS}} = \frac{E_s}{E} \sqrt{\frac{x}{X_0}} \quad (2.7)$$

と与えた。ここで $E_s = mc^2 \sqrt{4\pi/\alpha} = 21.2 \text{ MeV}$ である。制動放射の発生点を形成距離の中心と考えると、制動放射前後の電子の方向は多重散乱によって均等に影響を受ける。このときの制動放射前後の電子の縦方向運動量 $p_{e\text{-before}}$ 、 $p_{e\text{-after}}$ は、形成距離 l_f の半分の多重散乱による角度偏向 $\theta_{\text{MS}/2}$ を用いて、

$$p_{e\text{-before}} = \sqrt{\left(\frac{E \cos \theta_{\text{MS}/2}}{c}\right)^2 - (mc)^2} \quad (2.8)$$

$$p_{e\text{-after}} = \sqrt{\left\{\frac{(E - k) \cos \theta_{\text{MS}/2}}{c}\right\}^2 - (mc)^2} \quad (2.9)$$

で与えられる。ここで、

$$\theta_{\text{MS}/2} = \frac{E_s}{E} \sqrt{\frac{l_f}{2X_0}} \quad (2.10)$$

である。このときの q_{\parallel} は放出光子の運動量 p_{γ} を用いて、

$$\begin{aligned} q_{\parallel} &= p_{e\text{-before}} - p_{e\text{-after}} - p_{\gamma} \\ &= \sqrt{\left(\frac{E \cos \theta_{\text{MS}/2}}{c}\right)^2 - (mc)^2} - \sqrt{\left\{\frac{(E - k) \cos \theta_{\text{MS}/2}}{c}\right\}^2 - (mc)^2} - \frac{k}{c} \end{aligned} \quad (2.11)$$

で与えられる [31]。式 (2.4) と同様に、式 (2.11) は y が小さいときの近似 $\sqrt{(1-y)} \sim 1 - y/2$ と小角近似を用いて、

$$q_{\parallel} = \frac{km^2c^3}{2E(E-k)} + \frac{k\theta_{\text{MS}/2}^2}{2c} \quad (2.12)$$

である。クーロン多重散乱の影響は、式 (2.12) の第 2 項が第 1 項より大きくなった場合に重要である。これは、

$$k < k_{\text{LPM}} = \frac{E(E-k)}{E_{\text{LPM}}} \quad (2.13)$$

の場合である。ここで、 E_{LPM} は物質に依存した定数であり、

$$E_{\text{LPM}} = \frac{m^4 c^7 X_0}{\hbar E_s^2} = \frac{m^2 c^3 X_0 \alpha}{4\pi \hbar} \approx 7.7(\text{TeV/cm}) \cdot X_0 \quad (2.14)$$

で与えられる。式 (2.13) は、 $k \ll E$ において $k < k_{\text{LPM}} = E^2/E_{\text{LPM}}$ となり、 k_{LPM} 以下の光子の放出が抑制されることを示している。たとえば、鉛における 25 GeV 電子の場合、125 MeV 以下の光子放出が抑制される。ここで、クーロン多重散乱の影響も含めた形成距離を l_f とする。式 (2.10) を式 (2.12) に代入し、不確定性原理から

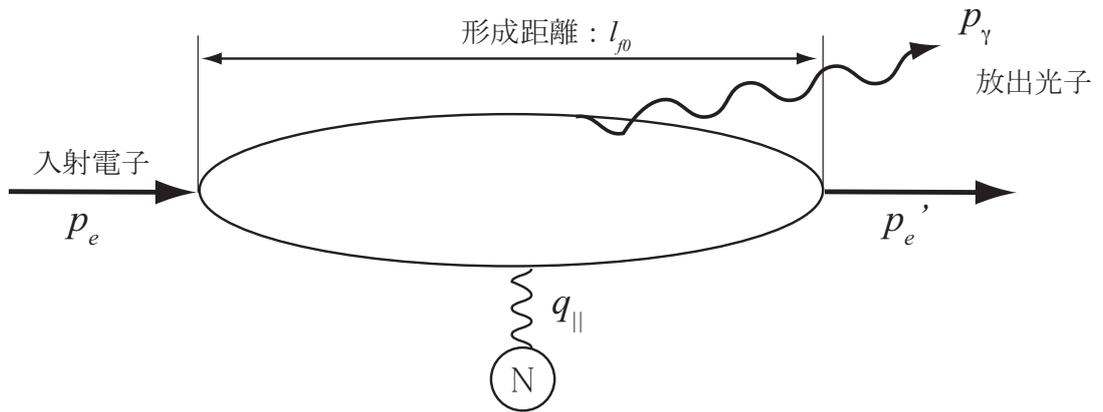
$$l_f = \frac{\hbar}{q_{\parallel}} = l_{f0} \left[1 + \frac{E_s^2 l_f}{2m^2 c^4 X_0} \right]^{-1} \quad (2.15)$$

が得られる。クーロン多重散乱が少ない場合、この式は式 (2.6) に漸近する。クーロン多重散乱が支配的な場合には、クーロン多重散乱における抑制の比 S は、

$$S = \frac{l_f}{l_{f0}} = \sqrt{\frac{kE_{LPM}}{E(E-k)}} \quad (2.16)$$

で表される。入射電子のエネルギー E が大きい、または放出光子のエネルギー k が小さい場合、この抑制は大きくなる。Bethe-Heitler 断面積の場合、微分断面積は $dN/dk \sim 1/k$ である。一方、 S は \sqrt{k} に比例するので、この抑制を考慮することで $dN/dk \sim 1/\sqrt{k}$ となる。この抑制は、Landau と Pomeranchuk[28] が指摘し、Migdal[29] によって定式化されたことから、LPM 効果と呼ばれている。Migdal によって与えられた制動放射における LPM 効果を含めた微分断面積の式は 2.1.6 において述べる。

(a) 制動放射における運動量移動



(b) クーロン多重散乱の影響する場合の制動放射における形成距離

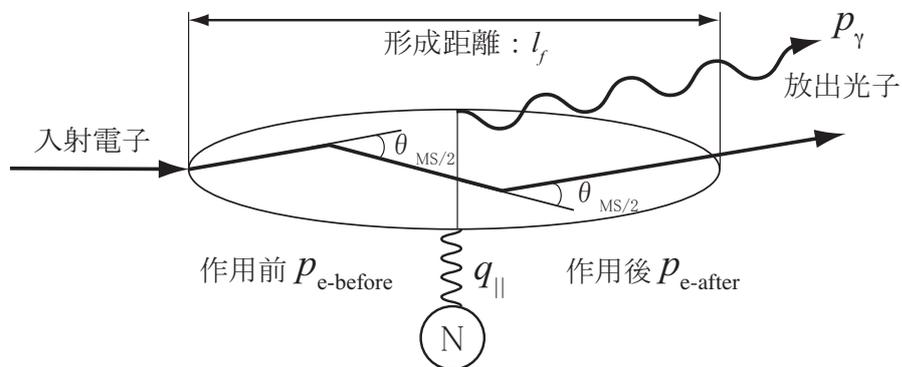


図 2.2: 制動放射における (a) 形成距離と (b) クーロン多重散乱の影響を受ける場合の形成距離の概念図。

2.1.3 電子対生成における LPM 効果

電子対生成において、生成された電子及び陽電子が形成距離を横切る間にクーロン多重散乱が起こる場合の影響について考える。電子対生成における形成距離の概念図を図 2.3 (a) に示す。電子対生成の運動量移動は、

$$\begin{aligned}
 q_{\parallel} &= p_{\gamma} - p_{e^{-}} - p_{e^{+}} \\
 &= \frac{k}{c} - \sqrt{\left(\frac{E_{-}}{c}\right)^2 - (mc)^2} - \sqrt{\left(\frac{E_{+}}{c}\right)^2 - (mc)^2} \\
 &= \frac{m^2 c^3 k}{2E_{-}(k - E_{-})}
 \end{aligned} \tag{2.17}$$

で与えられる [52]。このときの形成距離 l_{f0} は、

$$l_{f0} = \frac{\hbar}{q_{\parallel}} = \frac{2\hbar E_{-}(k - E_{-})}{m^2 c^3 k} \tag{2.18}$$

で与えられる。電子対生成で生成された電子と陽電子は多重散乱を起こすので、それらの光子の進行方向への運動量は減少する。このときの概念図を図 2.3 (b) に示す。このときの運動量移動 q_{\parallel} は、

$$q_{\parallel} = k/c - \sqrt{\left(\frac{E_{-} \cos \theta_{MS/2}}{c}\right)^2 - (mc)^2} - \sqrt{\left(\frac{E_{+} \cos \theta_{MS/2}}{c}\right)^2 - (mc)^2} \tag{2.19}$$

で与えられる。制動放射の場合と同様に、式 (2.19) は y が小さいときの近似 $\sqrt{(1-y)} \sim 1 - y/2$ と小角近似を用いて、

$$q_{\parallel} = \frac{km^2 c^3}{2E_{-}(E_{-} - k)} + \frac{k\theta_{MS/2}^2}{2c} \tag{2.20}$$

と書き換えることができる。クーロン多重散乱を含めた形成距離 l_f は、制動放射のときの式 (2.15) と良く似た形、

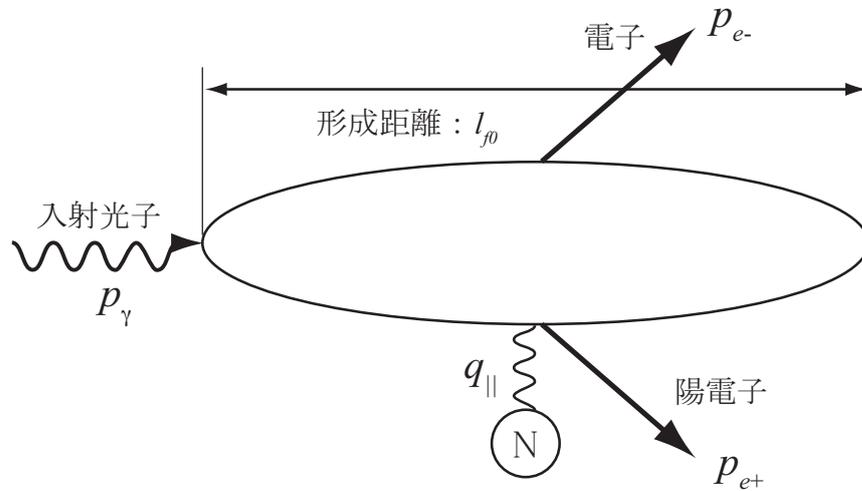
$$l_f = \frac{\hbar}{q_{\parallel}} = l_{f0} \left[1 + \frac{E_s^2 l_f}{2m^2 c^4 X_0} \right]^{-1} \tag{2.21}$$

で与えられる。この式の第 2 項が支配的であるとき、抑制の比 S は

$$S = \frac{l_f}{l_{f0}} = \sqrt{\frac{kE_{LPM}}{E_{-}(k - E_{-})}} \tag{2.22}$$

である。抑制は、 $E_{-(+)} = k - E_{-(+)} (= E_{+(-)}) = k/2$ において最大になる。また、 $E_{-(+)} = 0$ または $E_{-(+)} = k$ のときには抑制は無くなる。電子対生成における LPM 効果を考慮した微分断面積の式は 2.1.7 において述べる。

(a) 電子対生成における形成距離



(b) クーロン多重散乱の影響する場合の電子対生成における形成距離

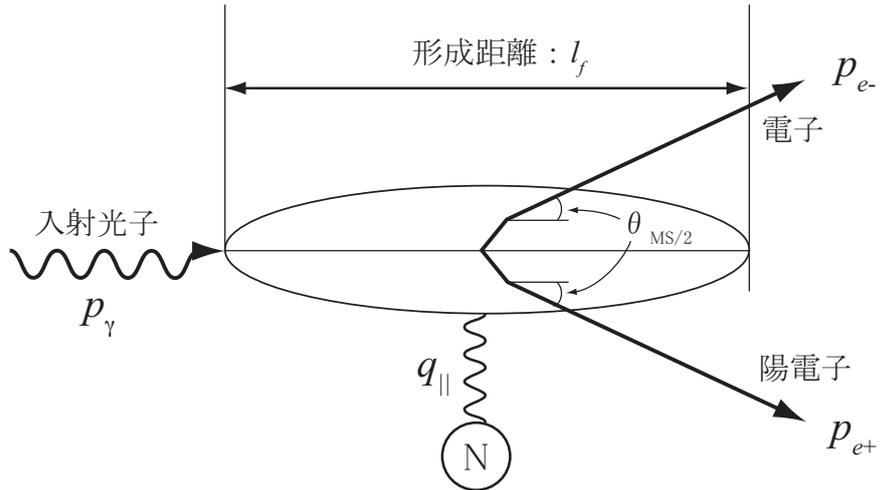


図 2.3: 電子対生成における (a) 形成距離と (b) クーロン多重散乱の影響を受ける場合の形成距離の概念図。

2.1.4 誘電による抑制効果

Ter-Mikaelian[30] は、古典電磁気学を用いて、制動放射光子が物質の誘電率に関連して抑制されることを指摘した。物質の誘電率 ϵ は、

$$\epsilon = 1 - \frac{k_p^2}{k^2} \quad (2.23)$$

で与えられる。ここで $k_p = \hbar\omega_p$ であり、 $\omega_p = \sqrt{4\pi NZe^2/m}$ は物質のプラズマ周波数である。物質中を輸送する光子の運動量は、誘電率の影響のため $p = k/c$ から $p = \sqrt{\epsilon}k/c$ に置き換わる。誘電率の影響を考慮した制動放射における運動量移動 $q_{||}$ は、

$$\begin{aligned} q_{||} &= p_e - p'_e - \sqrt{\epsilon}k/c \\ &= \sqrt{\left(\frac{E}{c}\right)^2 - (mc)^2} - \sqrt{\left(\frac{E-k}{c}\right)^2 - (mc)^2} - \sqrt{\epsilon}k/c \\ &= \frac{k}{2c\gamma^2} + \frac{k_p^2}{2ck} \end{aligned} \quad (2.24)$$

で与えられる。したがって形成距離 l_f は、

$$l_f = \frac{\hbar}{q_{||}} = \frac{2\hbar ck\gamma^2}{k^2 + (\gamma k_p)^2} \quad (2.25)$$

である。抑制 S は媒質における形成距離 l_f と真空における形成距離 l_{f0} の比、

$$S = \frac{l_f}{l_{f0}} = \frac{k^2}{k^2 + k_p^2} \quad (2.26)$$

で与えられる。抑制は $k < k_p$ の場合に大きく、そのとき S は k^2 に比例する。Bethe-Heitler 断面積は $dN/dk \sim 1/k$ であるので、この抑制を考慮することで $dN/dk \sim k$ となる。

多くの物質においてプラズマ振動数 ω_p は 20 – 60 eV の範囲であり、そのため抑制は $k < rE$ において重要になる。ここで $r = \hbar\omega_p/m$ であり、例えば C で $r = 5.5 \times 10^{-5}$ 、W で $r = 1.4 \times 10^{-4}$ である。放出光子が低エネルギーの場合、誘電による抑制効果は LPM 効果よりも重要になる。誘電による抑制効果を考慮した制動放射微分断面積の式は、2.1.6 において述べる。

2.1.5 EGS5 コードの Bethe-Heitler 断面積

1.3 で述べたように、EGS5 コードにおける制動放射は Bethe-Heitler(BH) 断面積を基礎とした微分断面積を用いており、

$$\begin{aligned} \frac{d\sigma_{\text{Brems-BH-EGS5}}}{dk} &= \frac{A'r_0^2\alpha Z(Z + \xi_{\text{EGS}}(Z))}{k} \\ &\times \left\{ \left(1 + (E/E_0)^2\right) \left[\phi_1(\delta) - \frac{4}{3}\ln Z - a_{\text{Brems}}\right] \right. \\ &\quad \left. - \frac{2}{3}\left(\frac{E}{E_0}\right) \left[\phi_2(\delta) - \frac{4}{3}\ln Z - a_{\text{Brems}}\right] \right\} \end{aligned} \quad (2.27)$$

で与えられる。ここで、

$$a_{\text{Brems}} = \begin{cases} 4f_c(Z) & \text{if } E_0 > 50 \text{ MeV} \\ 0 & \text{if } E_0 < 50 \text{ MeV} \end{cases} \quad (2.28)$$

であり、それ以外の変数は文献 [1] と同じある。また、電子対生成の BH 断面積は、次式で表される。

$$\begin{aligned} \frac{d\sigma_{\text{Pair-BH-EGS5}}}{dE_{-(+)}} &= \frac{A'_p r_0^2 \alpha Z (Z + \xi_{\text{EGS}}(Z))}{k_0^3} \\ &\times \left\{ (E_+^2 + E_-^2) \left[\phi_1(\delta) - \frac{4}{3} \ln Z - a_{\text{Pair}} \right] \right. \\ &\left. + \frac{2}{3} E_+ E_- \left[\phi_2(\delta) - \frac{4}{3} \ln Z - a_{\text{Pair}} \right] \right\}. \end{aligned} \quad (2.29)$$

ここで、

$$a_{\text{Pair}} = \begin{cases} 4f_c(Z) & \text{if } k_0 > 50 \text{ MeV} \\ 0 & \text{if } k_0 < 50 \text{ MeV} \end{cases} \quad (2.30)$$

であり、それ以外の変数は文献 [1] と同じである。

2.1.6 制動放射における LPM と誘電による抑制効果断面積

Migdal[29] は、量子電磁気学 (QED) を用いて LPM 効果を考慮した制動放射微分断面積を定式化した。その後、より新しい形状因子の補正が加えられ、Klein[31] はこの断面積を、

$$\frac{d\sigma_{\text{Brems-LPM}}}{dk} = \frac{4\alpha r_e^2 \xi(s)}{3k} \{y^2 G(s) + 2[1 + (1-y)^2] \phi(s)\} Z^2 \ln\left(\frac{184}{Z^{1/3}}\right) \quad (2.31)$$

と示した。ここで $y = k/E$ であり、 $\xi(s)$ 、 $G(s)$ 、 $\phi(s)$ は

$$s = \left(\frac{E_{\text{LPM}} k}{8E(E-k)\xi(s)} \right)^{1/2} \quad (2.32)$$

の関数である。 E_{LPM} は式 (2.14) で与えられる。 $\xi(s)$ はそれ自身が式 (2.32) の右辺にあることから、 $\xi(s)$ を解くためには反復法が必要である。また、 $G(s)$ と $\phi(s)$ は無限級数で与えられている。このため、これらの関数が含まれる式 (2.31) を、直接的に EGS5 コードに用いることは困難である。Stanev ら [53] は、 $G(s)$ と $\phi(s)$ を多項式によって置き換え、また $\xi(s)$ と s の反復法なしの近似式を与えた。EGS5 コードにこれらの近似式を用いることで、直接的に式 (2.31) を計算することができる。Stanev らの与えた近似式はこの節の最後に示す。

$s \rightarrow \infty$ の場合、 $G(s) \rightarrow 1$ 、 $\phi(s) \rightarrow 1$ であるため、LPM 効果はなくなる。その場合式 (2.31) は、

$$\frac{d\sigma_{\text{Brems-BH}}}{dk} = \frac{4\alpha r_e^2}{3k} \{y^2 + 2[1 + (1-y)^2]\} Z^2 \ln\left(\frac{184}{Z^{1/3}}\right) \quad (2.33)$$

である。これをここでは「bare-bones BH」と呼ぶ。式(2.33)はBetheとHeitlerが示したBH断面積と同等である。一方、 $s \rightarrow 0$ の場合、 $G(s) \rightarrow 0$ 、 $\phi(s) \rightarrow 0$ であり、LPM効果による抑制が増加する。

図2.4に、鉛($Z = 82$)における制動放射のBH断面積(式(2.33))とLPM効果を考慮した断面積(式(2.31))を示す。縦軸は、制動放射光子の放出確率 $X_0 n y d\sigma/dy$ を示している。LPM効果を考慮した断面積は E_0 が増加するとともに減少し、低エネルギー領域の光子の放出がより抑制される。

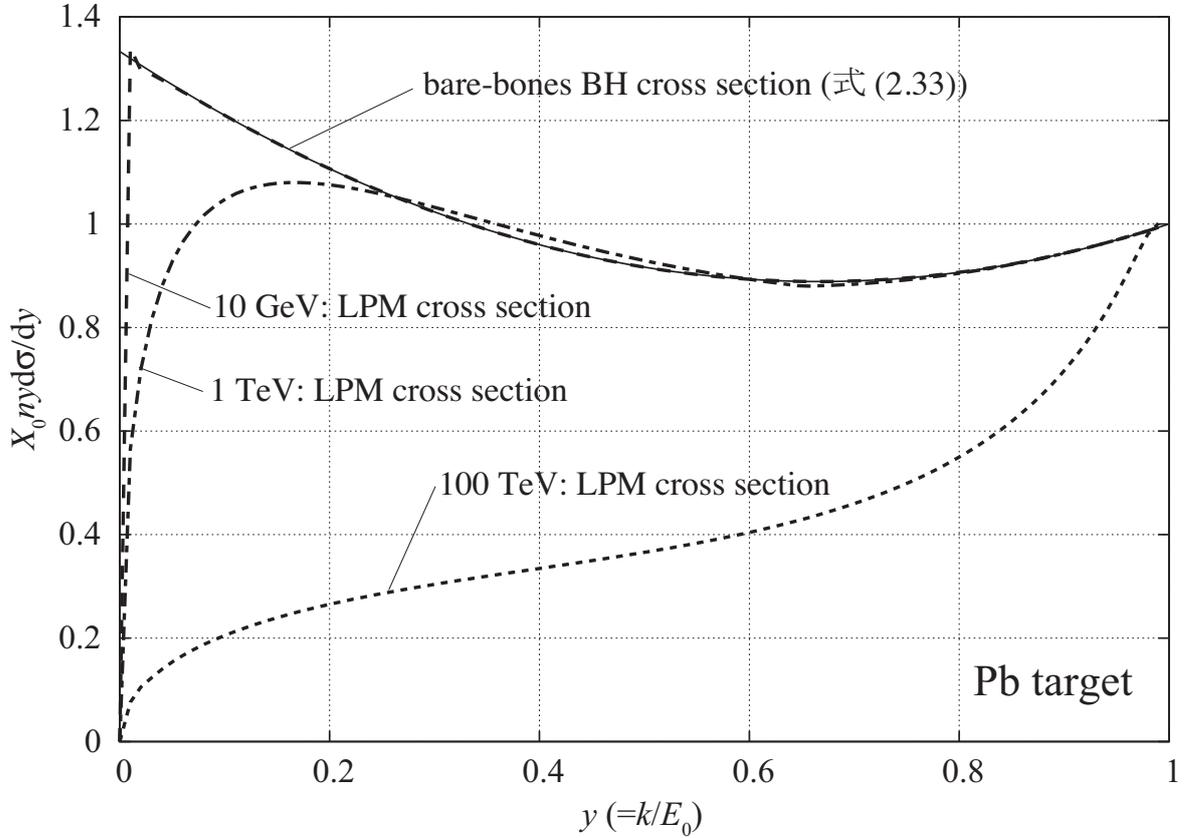


図 2.4: 鉛($Z = 82$) の場合の制動放射光子の微分 LPM 断面積の変化。実線は LPM 抑制がない場合(式(2.33))、破線、一点鎖線、点線はそれぞれ、10 GeV、1 TeV、100 TeV の入射電子エネルギーにおける LPM 断面積(式(2.31))を示す。

また Migdal [29] は、制動放射における誘電による抑制効果を含めた断面積を示した。誘電による抑制効果は、 $y \ll 1$ の場合において $\phi(s)$ の項のみが関与する。Migdal は $\phi(s)$ を $\phi(s\Gamma)/\Gamma$ に置き換えて、

$$\frac{d\sigma_{\text{diel}}}{dk} = \frac{16\alpha r_e^2 \xi(s)}{3k} \frac{\phi(s\Gamma)}{\Gamma} Z^2 \ln\left(\frac{184}{Z^{1/3}}\right), \quad (2.34)$$

を与えた。ここで $\Gamma = 1 + (k_p^2/k^2)$ 、 $k_p = \gamma \hbar \omega_p$ 、 $\omega_p = \sqrt{4\pi n Z e^2/m}$ である。

Klein[31] のレビュー論文をもとに、式(2.31)で与えられる LPM 効果と、式(2.34)で与えられる誘電による抑制効果の両方を EGS5 コードに組み込むために、LPM と誘電

による抑制の微分断面積を、

$$\frac{d\sigma_{\text{Brems-LPM-diel}}}{dk} = \frac{4\alpha r_e^2 \zeta(s)}{3k} \{y^2 G(s) + 2[1 + (1-y)^2] \frac{\phi(s\Gamma)}{\Gamma} Z^2 \ln\left(\frac{184}{Z^{1/3}}\right)\} \quad (2.35)$$

と与える。図 2.5 に $E = 25$ GeV、炭素 ($Z = 6$) の場合の、これまで示してきた制動放射の微分断面積を示す。 $y \geq 1.4 \times 10^{-3}$ のとき、式 (2.35) の LPM と誘電による抑制断面積は、LPM 効果の断面積の式 (2.31) と等しい。一方で、 $y < 1.4 \times 10^{-3}$ のとき、式 (2.35) の LPM と誘電による抑制断面積は、誘電による抑制断面積の式 (2.34) と等しい。

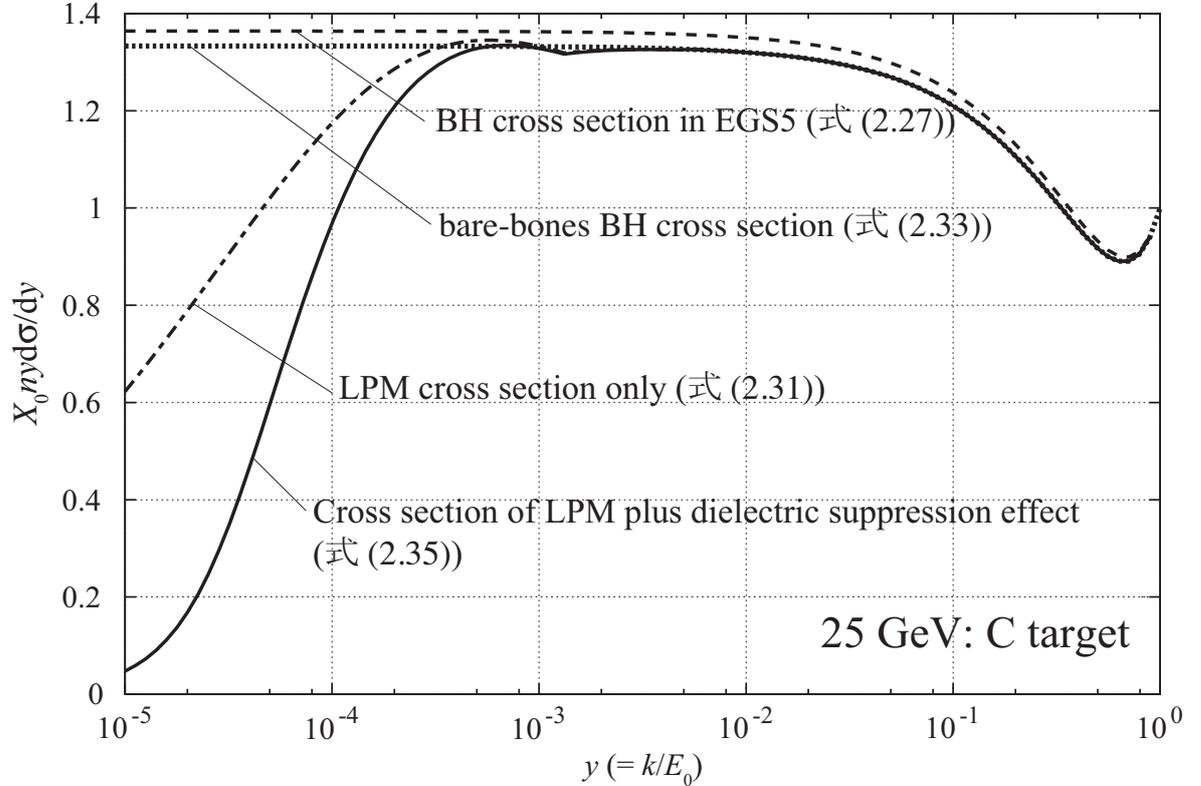


図 2.5: $E = 2.5 \times 10^4$ MeV、炭素 ($Z = 6$) における制動放射光子の微分断面積の比較。破線は EGS5 コードが用いている BH 断面積 (式 (2.27))、点線は式 (2.33) の bare-bones BH 断面積、一点鎖線は式 (2.31) の LPM 断面積、実線は式 (2.35) の LPM および誘電による断面積をそれぞれ示す。

Stanev らの近似式

ここで式 (2.31) の $G(s)$ と $\phi(s)$ を次式に示す。

$$G(s) = 48s^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{1}{2} \int_0^\infty e^{-st} \frac{\sin(st)}{\sinh(t/2)} dt \right) \quad (2.36)$$

$$\phi = 12s^2 \left(\int_0^\infty e^{-sx} \coth(s/2) \sin(sx) dx \right) - 6\pi s^2 \quad (2.37)$$

である。 $\xi(s)$ は、

$$\xi(s) = \begin{cases} 2 & (s < s_1) \\ 1 + \ln(s)/\ln(s_1) & (s_1 < s < 1) \\ 1 & (s \geq 1) \end{cases} \quad (2.38)$$

であり、 $s_1 = Z^{1/3}/191^2$ である。ここで

$$s = \sqrt{\frac{E_{LPM}k}{8E(E-k)\xi(s)}} \quad (2.39)$$

である。

Stanev ら [53] は、Migdal が与えた無限級数の $G(s)$ と $\phi(s)$ を多項式を用いて、

$$\phi(s) = \begin{cases} 6s & (s \leq 0.01) \\ 1 - \exp\left[\frac{-6s\{1+(3-\pi)s\}^3}{0.623+0.796s+0.658s^2}\right] & (0.01 < s < 2) \\ 1 & (s \geq 2) \end{cases} \quad (2.40)$$

$$\psi(s) = \begin{cases} 4s & (s \leq 0.01) \\ 1 - \exp\left[-4s - \frac{8s^2}{1+3.96s+4.97s^2-0.05s^3+7.50s^4}\right] & (0.01 < s < 2) \\ 1 & (s \geq 2) \end{cases} \quad (2.41)$$

$$G(s) = 3\psi(s) - 2\phi(s) \quad (2.42)$$

と置き換えた。また、 s の関数である $\xi(s)$ は、それ自身が s の式 (2.39) に含まれていることから、解法には反復法が必要である。これを避けるために Stanev らは、

$$s' = \sqrt{\frac{E_{LPM}k}{8E(E-k)}} \quad (2.43)$$

$$h = \ln(s')/\ln(\sqrt{2}s_1) \quad (2.44)$$

とし、 $\xi(s')$ と s を s' の関数として、

$$\xi(s') = \begin{cases} 2 & (s' \leq \sqrt{2}s_1) \\ 1 + h - 0.08(1-h)(1-(1-h)^2)/\ln(\sqrt{2}s_1) & (\sqrt{2}s_1 < s' \ll 1) \\ 1 & (s' \geq 1) \end{cases} \quad (2.45)$$

$$s = s'/\xi(s')^{1/2} \quad (2.46)$$

と置き換えた。式 (2.40)-式 (2.46) 式は、Migdal の値を良く再現しており、EGS5 コードに用いている。

2.1.7 電子対生成における LPM 効果の断面積

制動放射と同様に Migdal [29] は、電子対生成における LPM 効果を定式化し、形状因子の補正が加わった微分断面積は Klein[31] によって、

$$\frac{d\sigma_{\text{Pair-LPM}}}{dE} = \frac{4\alpha r_e^2 \xi(\tilde{s})}{3k} \left\{ G(\tilde{s}) + 2[v^2 + (1-v)^2] \phi(\tilde{s}) \right\}, \quad (2.47)$$

と与えられた。ここで $v = E_{-(+)}/k$ 、 k は入射光子のエネルギー、 $E_{-(+)}$ は生成される電子 (陽電子) のエネルギーであり、 $\xi(\tilde{s})$ 、 $G(\tilde{s})$ 、 $\phi(\tilde{s})$ は

$$\tilde{s} = \sqrt{\frac{E_{\text{LPM}} k}{8E_{-(+)}(k - E_{-(+)})\xi(\tilde{s})}} \quad (2.48)$$

の関数である。式 (2.31) と同様に、Stanev ら [53] が与えた $G(\tilde{s})$ と $\phi(\tilde{s})$ の多項式と、 $\xi(\tilde{s})$ の反復法なしの近似式を EGS5 コードに採用した。式 (2.47) では、 $\tilde{s} \gg 1$ の場合には抑制は起きず、 $\tilde{s} \rightarrow 0$ において抑制が起こる。図 2.6 に、鉛 ($Z = 82$) での対生成の BH 断面積 (式 (2.29)) と LPM 効果を考慮した断面積 (式 (2.47)) の比較を示す。縦軸は、対生成による電子 (陽電子) の生成確率 $X_0 n v d\sigma/dv$ である。LPM 効果を考慮した断面積は k が増加するとともに減少し、 $k/2$ のエネルギーを持った電子 (陽電子) の生成確率をもっとも抑制される。電子対生成において LPM 効果が顕著に表れるのは、光子のエネルギーが 1 TeV 以上の場合であり、これは制動放射における LPM 効果の発現するエネルギーに比べて遙かに高いエネルギーである。

2.2 方法

2.2.1 LPM 効果と誘電による抑制効果の計算

式 (2.35) による制動放射における LPM と誘電による抑制断面積を、棄却法を用いて EGS5 コードに組み込んだ。この棄却法による手順を下記に示す。

1. EGS5 コードの既存部分で、制動放射の発生をサンプリングにより決定する。
2. 物質が化合物または混合物の場合、 $p_i Z(Z+1)$ の重み付けをし、制動放射を起こす原子核をサンプリングする。ここで p_i は i 番目の元素の原子核比である。制動放射の断面積が $Z(Z+1)$ に比例すると近似した。
3. 式 (2.27) を用いて、放出光子のエネルギー k を決定する。
4. Z 、 E 、 k における BH 断面積 (式 (2.27)) に対する LPM と誘電による抑制断面積 (式 (2.35)) の比 (LPM/BH) を計算する。
5. 乱数 ζ ($0 \leq \zeta \leq 1$) を生成する。
6. $\zeta \geq \text{LPM/BH}$ であった場合、制動放射は起こらない。

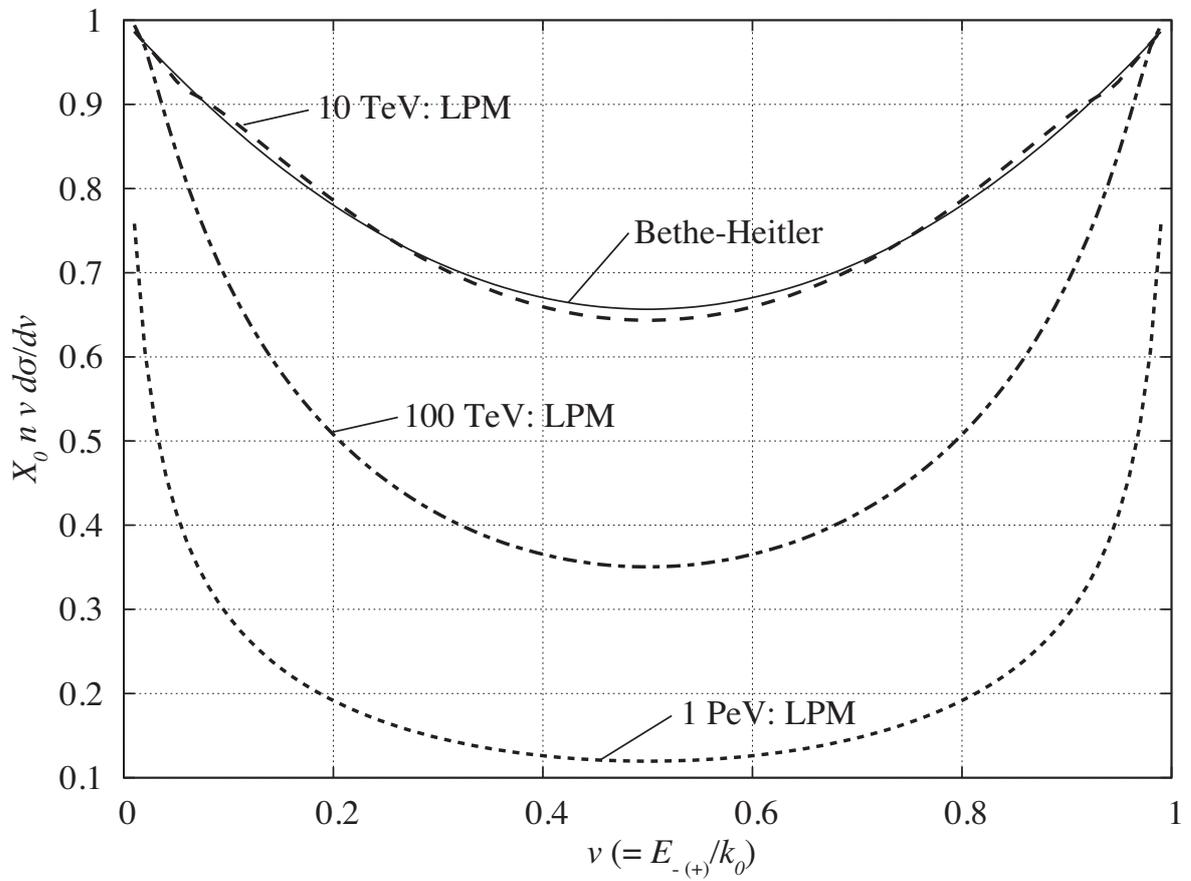


図 2.6: 鉛 ($Z = 82$) の場合の対生成電子 (陽電子) の微分 LPM 断面積の変化。実線は LPM 抑制がない場合 ($\tilde{s} \gg 1$)、破線、一点鎖線、点線はそれぞれ、10 TeV、100 TeV、1 PeV の入射電子エネルギーにおける LPM 断面積 (式 (2.47)) を示す。

対生成においても、LPM 断面積の式 (2.47) と BH 断面積の式 (2.29) を用いて、上記の手順と同様に EGS5 コードに組み込みを行った。これらの抑制効果を組み込んだ計算プログラムとフローチャートを補遺 B に示す。

2.2.2 実験値との比較

制動放射における LPM と誘電による抑制断面積を組み込んだ EGS5 コードの妥当性を評価するため、測定値と EGS5 コードによる計算値の比較を行った。抑制効果がない場合と比較するために、EGS5 コードによる計算は BH 断面積を用いた計算も合わせて行った。LPM と誘電による抑制効果に関して、測定条件が明確で統計精度も良い実験は、Anthony らと Hansen らによって行われている。

Anthony ら [32] は SLAC の線形加速器を用いて、8 GeV と 25 GeV の電子からの制動放射スペクトルを BGO カロリメータを用いて測定した。実験に使用されたターゲットの物質と厚さを表 2.1 に示す。Anthony らは測定と合わせて、LPM と誘電による抑制断面積を用いたモンテカルロ法による計算値を示した。ターゲットを通過する単一の電子は、二回以上の相互作用を起し、二つ以上の光子を放出することがある。この場合、これらの光子のエネルギーの総和が BGO カロリメータに付与され、1 回 1 回の反応に分離することはできない (多重光子によるパイルアップ)。EGS5 コードによる計算と Anthony らのモンテカルロ計算には、多重光子によるパイルアップが考慮されている。

Hansen ら [33] は CERN の SPS 加速器を用いて、149、207、287 GeV の電子からの制動放射スペクトルを鉛ガラス (LG) 検出器を用いて測定した。実験に使用されたターゲットの物質と厚さを表 2.4 に示す。また Hansen らは、LPM 断面積の組み込んだ GEANT コード [7] による計算値を示した。多重光子によるパイルアップは、Hansen らの実験においても起こるため、EGS5 コードによる計算と Hansen らの GEANT の計算には、多重光子によるパイルアップが考慮されている。Hansen らの実験値のエネルギー範囲では、誘電による抑制効果は無視できる。

2.3 結果と議論

2.3.1 Anthony らの実験との比較

8 GeV と 25 GeV の電子を用いた Anthony らの制動放射光子の実験データと、EGS5 コードによる計算値の比較を行った。0.2 MeV から 500 MeV の範囲の制動放射光子のエネルギースペクトルを、対数によるビン幅に分けてプロットした。EGS5 コードによる計算と Anthony らのモンテカルロ計算は、表 2.1 で示す規格化定数を用いて規格化してある。規格化のエネルギー範囲は、8 GeV の入射電子エネルギーについて 2 MeV から 50 MeV、25 GeV の入射電子エネルギーについて 20 MeV から 50 MeV の範囲である。例外として、0.7% X_0 厚の Au ターゲットの場合には、8 GeV の入射電子エネルギーについて 10 MeV から 50 MeV、25 GeV の入射電子エネルギーについて 30 MeV から 50 MeV の範囲で規格化してある。

Anthony らのデータの制動放射スペクトルは、放射長を単位としたターゲット厚あたり ($dN/d(\ln k)/X_0$) で示されている。放射長を単位としたターゲット厚は表 2.1 の 3 列目に示している。このため、EGS5 コードによる計算値も放射長を単位としたターゲット厚 X_0 [%] あたりで計算を行った。しかしながら、W と U に関してこれらの値は矛盾した点がある。これについては、本項の最後に述べる。

表 2.1: EGS5 計算と Anthony らのモンテカルロ計算に用いた規格化定数。EGS5 コードの統計誤差はすべて 0.02% 以下である。

ターゲット	ターゲット厚		規格化定数 [%] *			
			(25 GeV)		(8 GeV)	
	t [cm]	X_0 [%]	EGS5	Anthony(97)	EGS5	Anthony(97)
2% C	0.410	2.1	-1.3	-3.0 ± 0.3	-3.8	-6.0 ± 0.4
6% C	1.17	6.0	-0.5	-2.9 ± 0.2	-2.1	-4.6 ± 0.5
3% Al	0.312	3.5	0.8	-2.7 ± 0.4	0.8	-3.0 ± 0.4
6% Al	5.3	6.0	1.6	-2.8 ± 0.3		
3% Fe	0.049	2.8	-3.1	-5.4 ± 0.2	1.7	-1.4 ± 0.4
6% Fe	0.108	6.1	-6.7	-7.5 ± 0.2		
2% Pb	0.015	2.7	0.4	-4.5 ± 0.2	4.5	-0.7 ± 0.4
2% W	0.0088	2.7	-7.3	-8.3 ± 0.3	-6.3	-8.6 ± 0.3
6% W	0.021	6.4	-0.1	-4.7 ± 0.3		
3% U	0.0079	2.2	-11.1	-5.6 ± 0.3	-10.4	-6.3 ± 0.3
5% U	0.0147	4.2	9.4	-7.0 ± 0.3	8.1	-7.5 ± 0.4
0.7% Au	0.0023	0.70	1.2	-1.3 ± 0.4	15.0	12.2 ± 0.7
6% Au	0.020	6.0	0.2	-5.5 ± 0.2	0.4	-5.0 ± 0.3

* 例えば「-1.3%」は EGS5 の計算値を 0.987 倍した値を図に記載していることを示している。

図 2.7-図 2.13 に、Anthony らと EGS5 の制動放射スペクトルの比較を示す。Anthony らの実験データの特徴は次の点である。

- 原子番号が大きくなるにつれて、より高エネルギーまで抑制効果が現れる。
- 入射電子エネルギーが 8 GeV よりも 25 GeV のほうがより高エネルギー領域まで抑制効果が現れる。
- ターゲットが厚くなると、多重光子によるパイルアップが多くなり、エネルギーに対してスペクトルの勾配が急になる。

EGS5 コードによる LPM と誘電による抑制効果を含んだ断面積の計算値は、2-6%厚のターゲットからの放出光子の 1 MeV 以下の領域を過小評価する。これは EGS5 コードによる計算値は、遷移放射 (transition radiation) の効果 [54] が含まれていないことに

起因している。一方、Anthony らのモンテカルロ計算では LPM と誘電による抑制効果に加えて、遷移放射も考慮しているため、1 MeV 以下でも実験値と良く一致している。また、図 2.11(a)、(b) に、0.7%厚の金ターゲットに (a) 8 GeV と (b) 25 GeV の電子を入射させたときの制動放射スペクトルを示す。この場合、ターゲット厚が制動放射の形成距離よりも小さくなってしまうため、抑制効果は減少する。これは表面効果 (surface effect) と呼ばれている。EGS5 コードは表面効果を扱っていないため、LPM と誘電による抑制効果を組み込んだ EGS コードによる計算値は 30 MeV 以下の光子エネルギーにおいて過小評価する。

Anthony らが用いた W と U の放射長を単位としたターゲット厚

Anthony らは制動放射スペクトルを、放射長を単位としたターゲット厚 (表 2.1 の 3 列目) あたりで示している。しかしながら、W と U のターゲット厚は矛盾した点がある。表 2.2 に、Anthony らの論文で示された W の放射長 (cm) と、実験で用いた二種類の単位におけるターゲット厚 ($t(\text{cm})$ と $X_0\%$) を示す。ここで、厚さ $t(\text{cm})$ (表 2.2 の 3 列目) を $X_0(\text{cm})$ (表 2.2 の 2 列目) で割った値が、放射長単位の厚さ $X_0\%$ (表 2.2 の 4 列目) になるはずである。しかし実際に計算すると、表 2.2 の 5 列目で示した値になり、その差は 2%W について 7.4%、6%W について 6.2%である。

また、表 2.3 に Anthony らの論文で示された U の放射長 (cm) と二種類の単位におけるターゲット厚 (cm、 $X_0(\%)$)、および EGS5 コードで用いた放射長 X_0 とターゲット厚 ($X_0\%$) を示す。Anthony らの示した放射長 X_0 (表 2.3 の 2 列目) と EGS5 コードの値 (表 2.3 の 5 列目) は異なる。そのため、放射長あたりのターゲット厚 $X_0(\%)$ は、Anthony らが用いた値と EGS5 コードの値と異なる。この差は、3%U と 5%U について 9%である。これらの放射長単位のターゲット厚 $X_0\%$ の差は、表 2.1 で示した規格化定数に直接的に影響を及ぼす。本研究の EGS5 コードにおける規格化定数は、Anthony らが示した放射長あたりのターゲット厚 $X_0(\%)$ (表 2.2 と 2.3 の 4 行目) を用いている。このことから、表 2.1 で示した EGS5 コードの規格化定数はこの誤差も含めた値である。

表 2.2: Anthony らの実験に用いられた W の放射長 X_0 と二種類の単位におけるターゲット厚 (cm、 $X_0(\%)$)。

ターゲット	X_0	ターゲット厚	ターゲット厚 X_0 [%]	
	[cm]	t [cm]	Anthony ら	EGS5 コード
2% W	0.35	0.0088	2.7	2.5
6% W		0.021	6.4	6.0

表 2.3: Anthony らの実験に用いられた U の放射長 X_0 と二種類の単位におけるターゲット厚 (cm、 $X_0(\%)$)、および EGS5 コードで用いた放射長 X_0 とターゲット厚 ($X_0\%$)。

ターゲット	Anthony ら			EGS5 コード	
	X_0 [cm]	ターゲット厚 t [cm]	X_0 [%]	X_0 [cm]	ターゲット厚 X_0 [%]
3% U	0.35	0.0079	2.2	0.32	2.5
5% U		0.0147	4.2		4.6

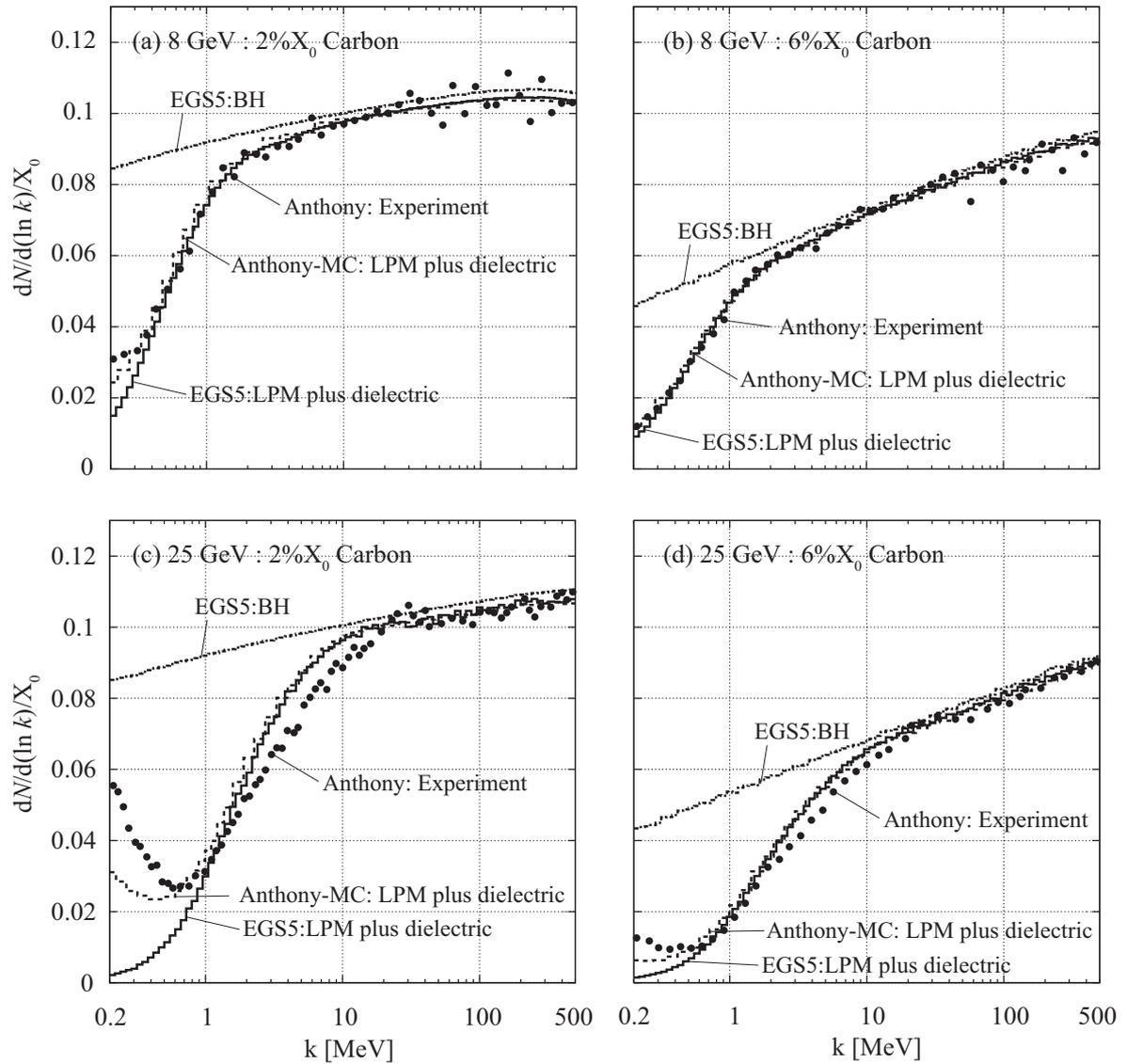


図 2.7: C ターゲットからの制動放射光子。入射電子エネルギーとターゲット厚さ ($X_0\%$) は、(a) 8 GeV 2% X_0 、(b) 8 GeV 6% X_0 、(c) 25 GeV 2% X_0 、(d) 25 GeV 6% X_0 である。黒丸は Anthony らの実験値、破線は Anthony らによる LPM と誘電による抑制断面積のモンテカルロ計算値、実線は EGS5 コードによる LPM と誘電による抑制断面積の計算値、一点鎖線は EGS5 コードによる BH 断面積の計算値を示す。

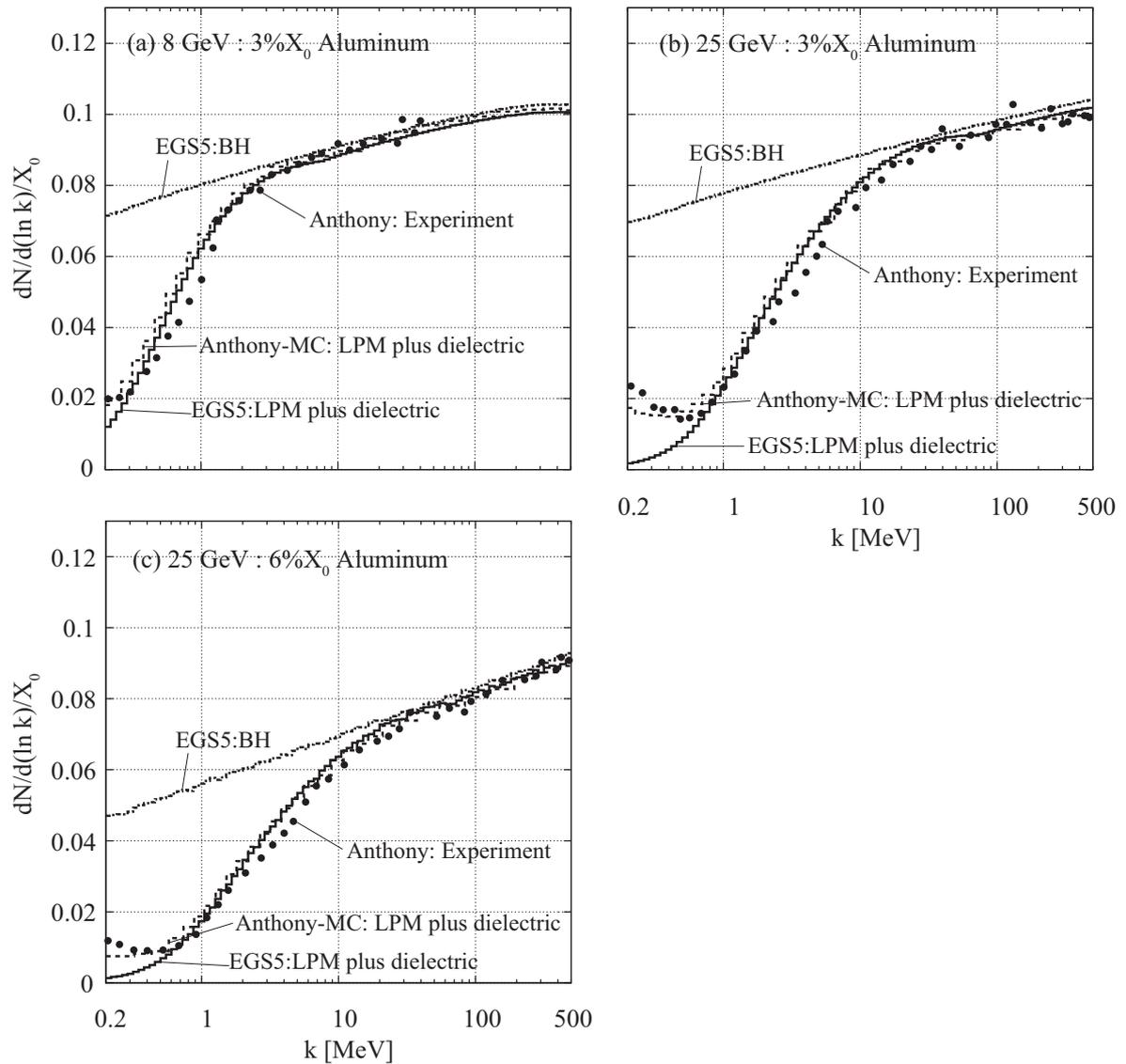


図 2.8: Al ターゲットからの制動放射光子。入射電子エネルギーとターゲット厚さ ($X_0\%$) は、(a) 8 GeV 3% X_0 、(b) 25 GeV 3% X_0 、(c) 25 GeV 6% X_0 である。記号と線種は図 2.7 と同一である。

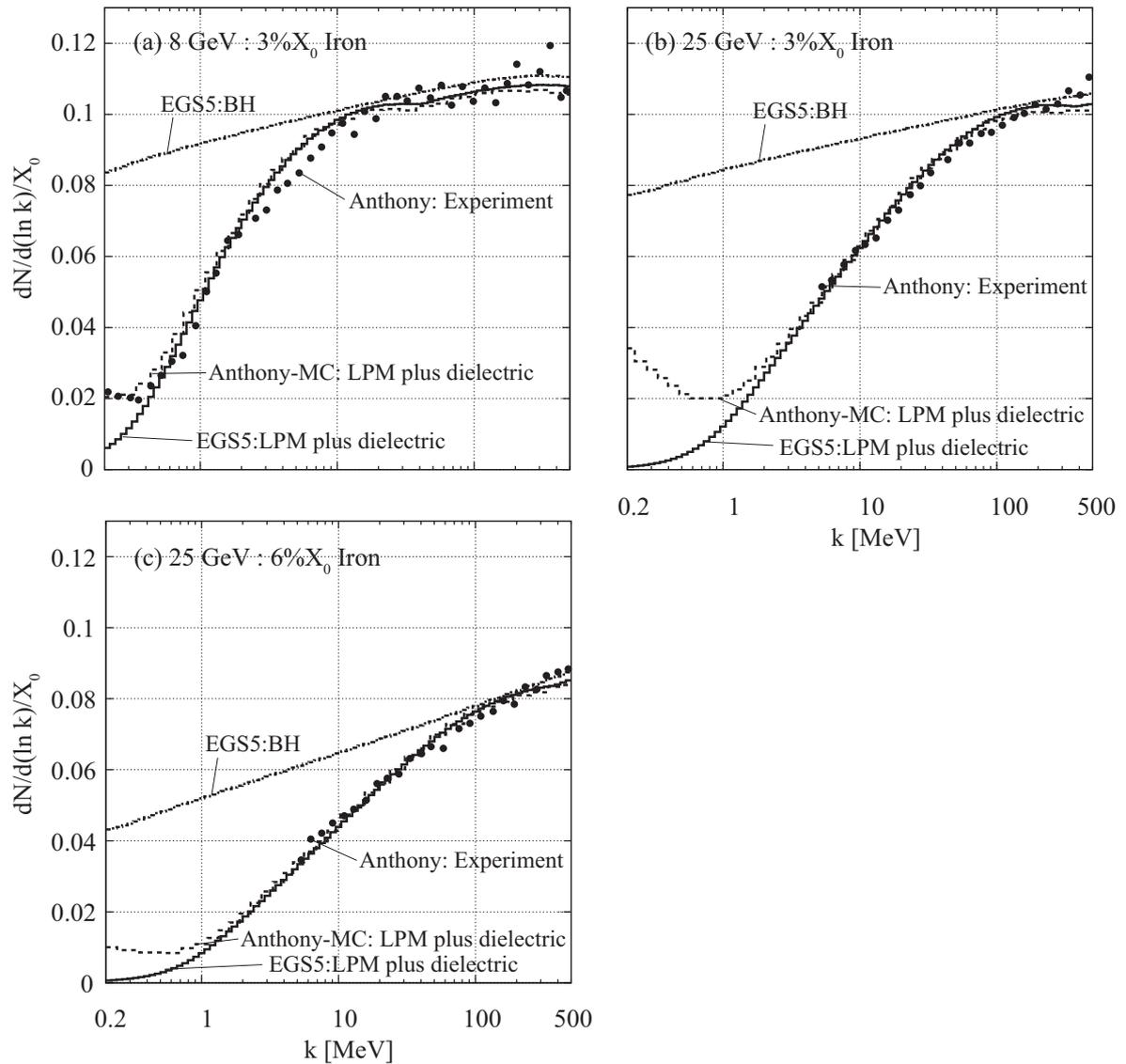


図 2.9: Fe ターゲットからの制動放射光子。入射電子エネルギーとターゲット厚さ ($X_0\%$) は、(a) 8 GeV 3% X_0 、(b) 25 GeV 3% X_0 、(c) 25 GeV 6% X_0 である。記号と線種は図 2.7 と同一である。

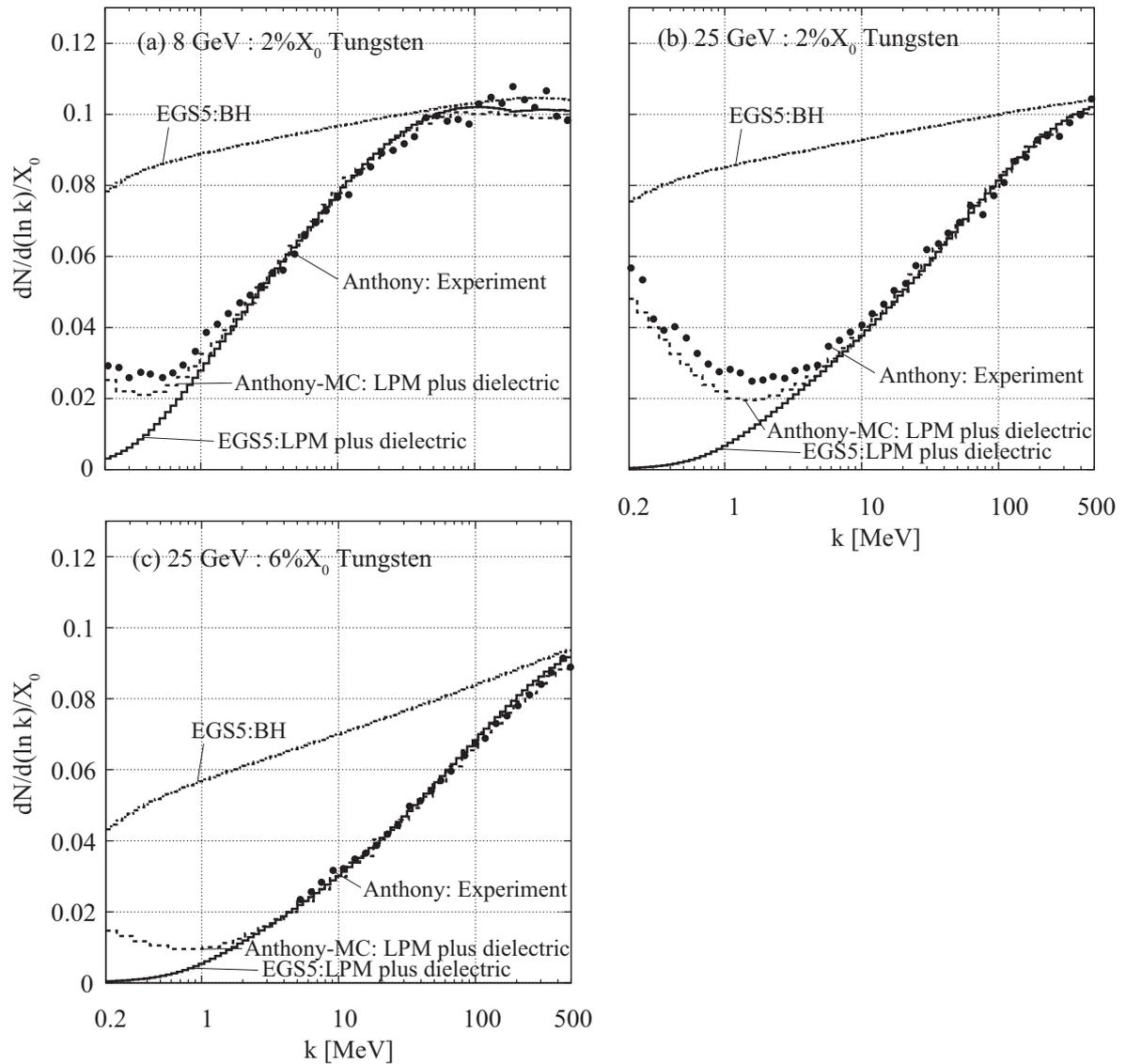


図 2.10: W ターゲットからの制動放射光子。入射電子エネルギーとターゲット厚さ ($X_0\%$) は、(a) 8 GeV 2% X_0 、(b) 25 GeV 2% X_0 、(c) 25 GeV 6% X_0 である。記号と線種は図 2.7 と同一である。

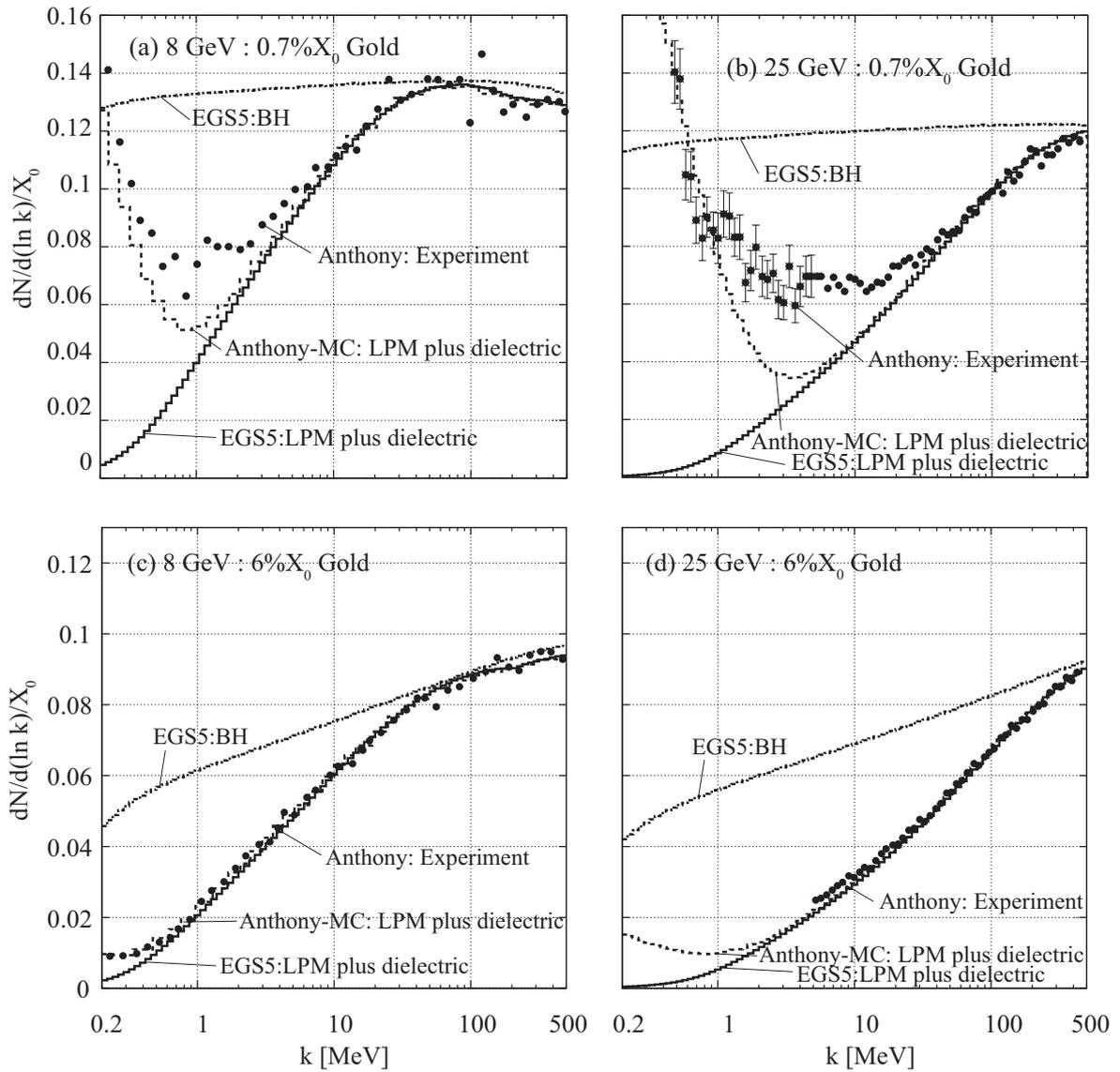


図 2.11: Au ターゲットからの制動放射光子。入射電子エネルギーとターゲット厚さ ($X_0\%$) は、(a) 8 GeV $0.7\%X_0$ 、(b) 25 GeV $0.7\%X_0$ 、(c) 8 GeV $6\%X_0$ 、(d) 25 GeV $6\%X_0$ である。記号と線種は図 2.7 と同一である。

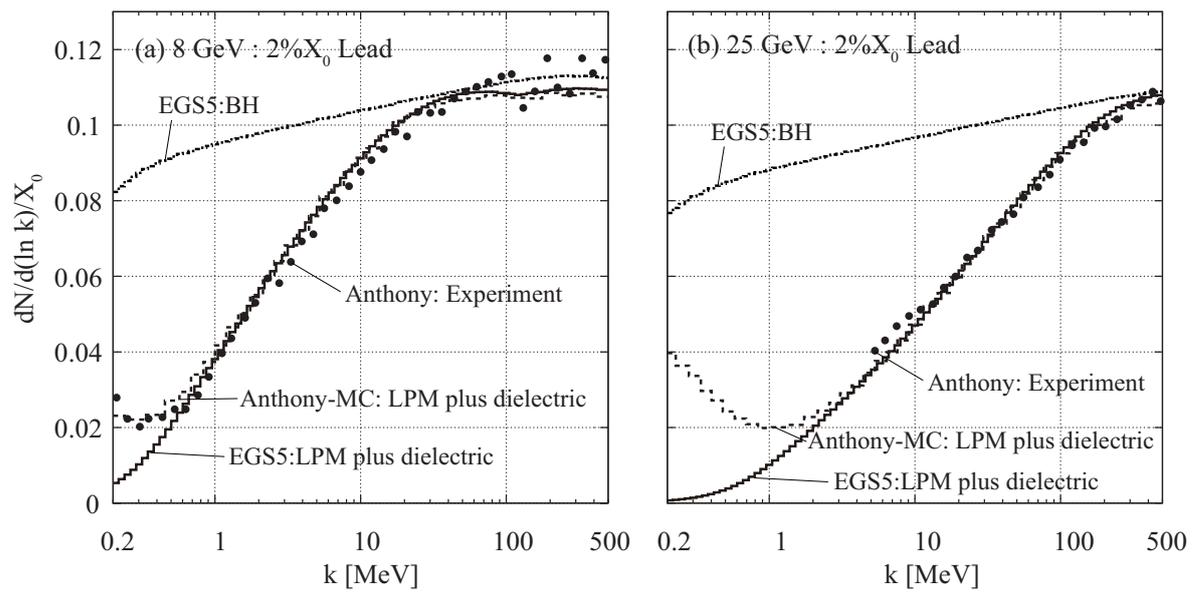


図 2.12: Pb ターゲットからの制動放射光子。入射電子エネルギーとターゲット厚さ ($X_0\%$) は、(a) 8 GeV $2\%X_0$ 、(b) 25 GeV $2\%X_0$ である。記号と線種は図 2.7 と同一である。

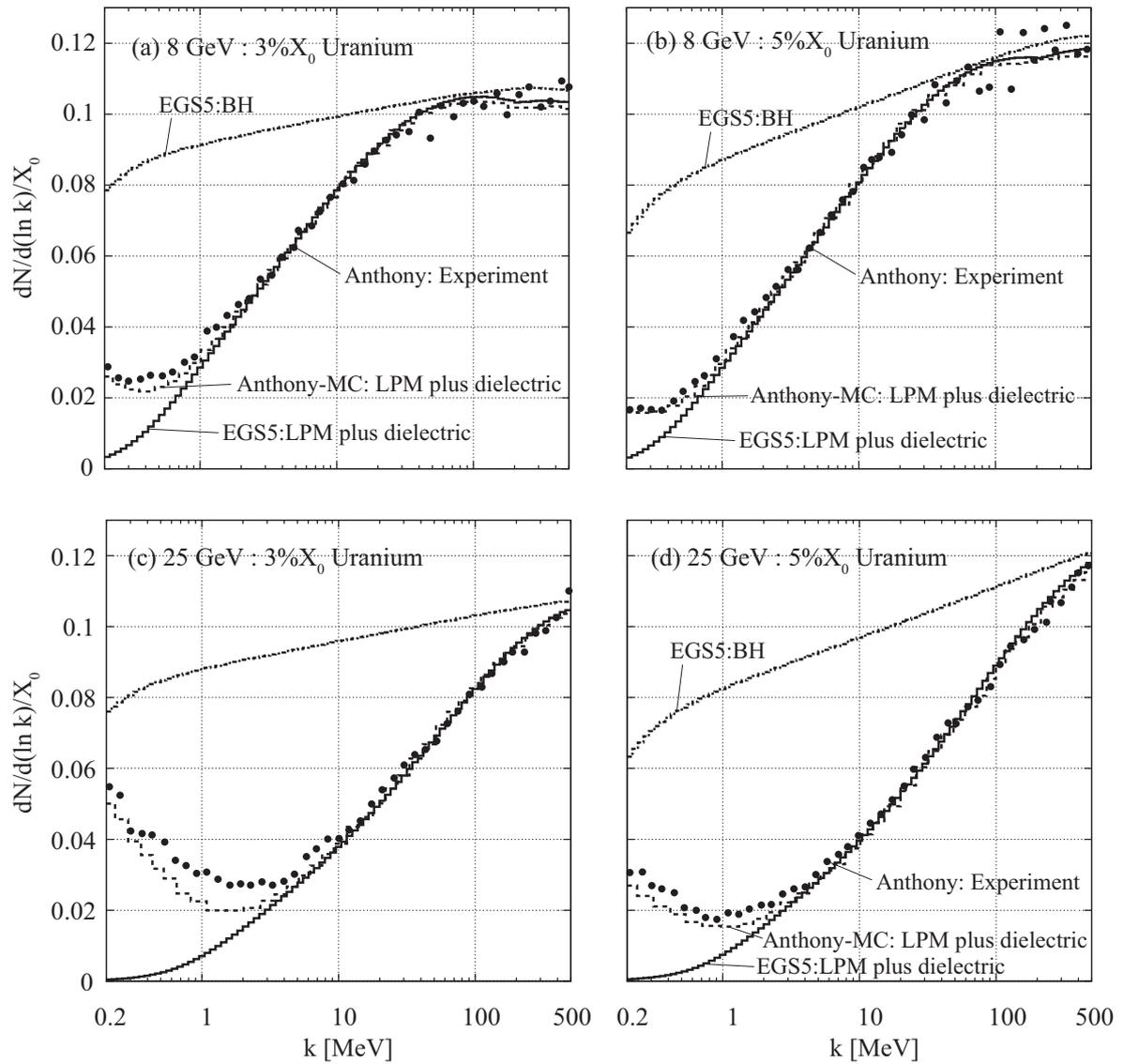


図 2.13: U ターゲットからの制動放射光子。入射電子エネルギーとターゲット厚さ ($X_0\%$) は、(a) 8 GeV 3% X_0 、(b) 8 GeV 5% X_0 、(c) 25 GeV 3% X_0 、(d) 25 GeV 5% X_0 である。記号と線種は図 2.7 と同一である。

2.3.2 Hansen らの実験との比較

149 GeV、207 GeV、287 GeV 電子を用いた Hansen らの制動放射の測定と、EGS5 コードによる計算値の比較を行った。EGS5 コードによる計算は、表 2.4 で示す規格化定数を用いて規格化した。EGS5 コードによる計算の規格化を行ったエネルギー範囲は、149 GeV、207 GeV、287 GeV の入射電子エネルギーに対して、それぞれ 2 GeV から 140 MeV、2 GeV から 200 GeV、2 GeV から 280 GeV である。

表 2.4: Hansen らの実験における EGS5 計算で用いた規格化定数。

ターゲット	ターゲット厚 X_0 [%]	入射電子エネルギー [GeV]	規格化定数 [%]
Cu	4.40 ± 0.03	149	-5.1
		207	-4.1
		287	-3.2
Ta	4.45 ± 0.05	149	-6.8
		207	-5.6
		287	-3.0
Ir	4.36 ± 0.10	149	-9.8
		207	-6.6
		287	-4.5

Hansen らの測定値と EGS5 の比較を図 2.14-図 2.16 に示す。スペクトルは、2 GeV から入射電子エネルギーまでの範囲を対数によるビン幅に分けてプロットした。LPM 効果は、Anthony らの測定に比べてより高エネルギー領域まで現れる。また原子番号が大きくなるにつれて、より高エネルギーまで抑制効果が現れる。LPM 効果断面積を用いた EGS5 コードの計算値は、Hansen らの実験値を良く再現している。

2.4 まとめ

EGS5 コードの制動放射過程に LPM と誘電による抑制効果断面積、対生成過程に LPM 効果断面積の組み込みを行った。この効果を組み込んだ EGS5 コードによる計算値と、Anthony らが示した、8、25 GeV 電子からの制動放射光子のエネルギースペクトルの実験値を比較した。LPM 効果および誘電による抑制効果の影響が現れるエネルギー領域において、EGS5 コードによる計算は、Anthony らの実験のスペクトル形状を良く再現した。Hansen らが示した 149、207、287 GeV 電子からの制動放射光子のエネルギースペクトルの実験値は、より高エネルギー領域まで LPM 効果が現れる。この測定値と比較した結果、EGS5 コードによる計算は実験のスペクトル形状を良く再現した。

本研究では、抑制におけるスペクトル形状だけでなく、絶対値も比較できるように規格化定数を算出した。Anthony らが示したすべてのターゲットの実験値において、

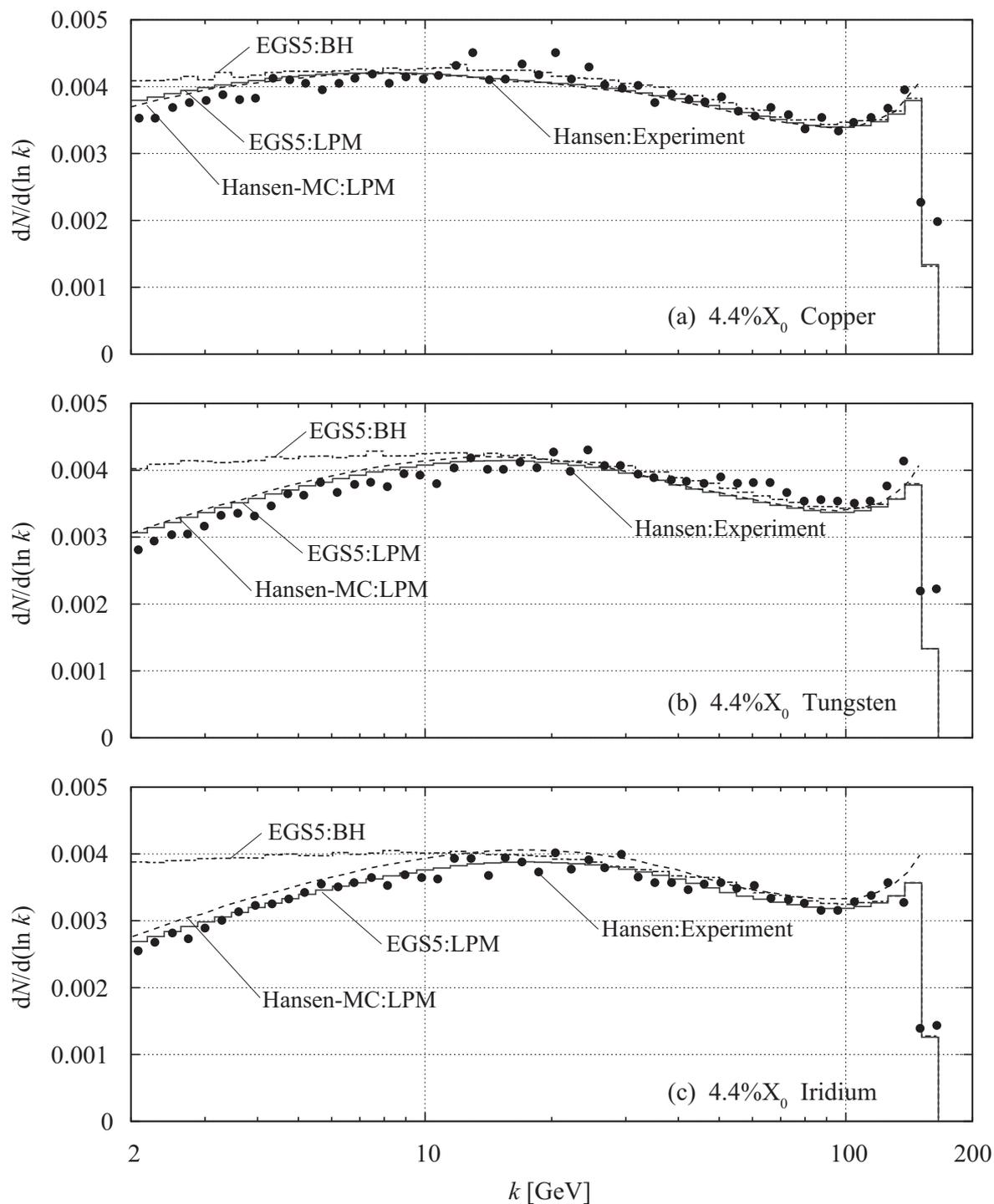


図 2.14: 入射電子エネルギーが149 GeVのときの (a) 銅ターゲット、(b) タングステンターゲット、(c) イリジウムターゲットのエネルギースペクトル。黒丸はHansenらの実験値、破線はHansenらによるLPM断面積を組み込んだGEANTの計算値、実線はLPM断面積を組み込んだEGS5コードの計算値、一点鎖線はBH断面積のEGS5コードによる計算値を示す。

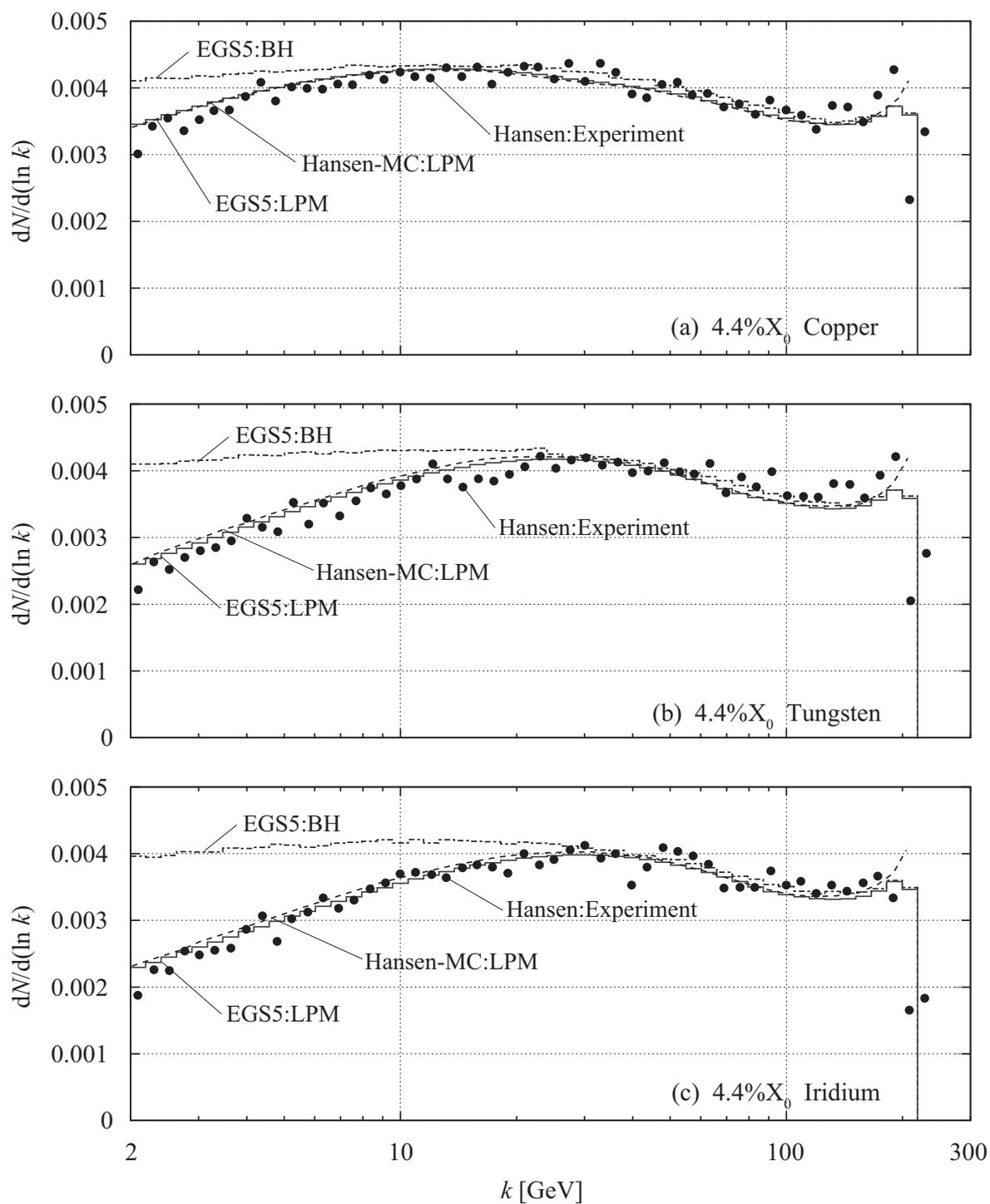


図 2.15: 入射電子エネルギーが 207 GeV のときの (a) 銅ターゲット、(b) タングステンターゲット、(c) イリジウムターゲットのエネルギースペクトル。記号と線種は図 2.14 と同一である。

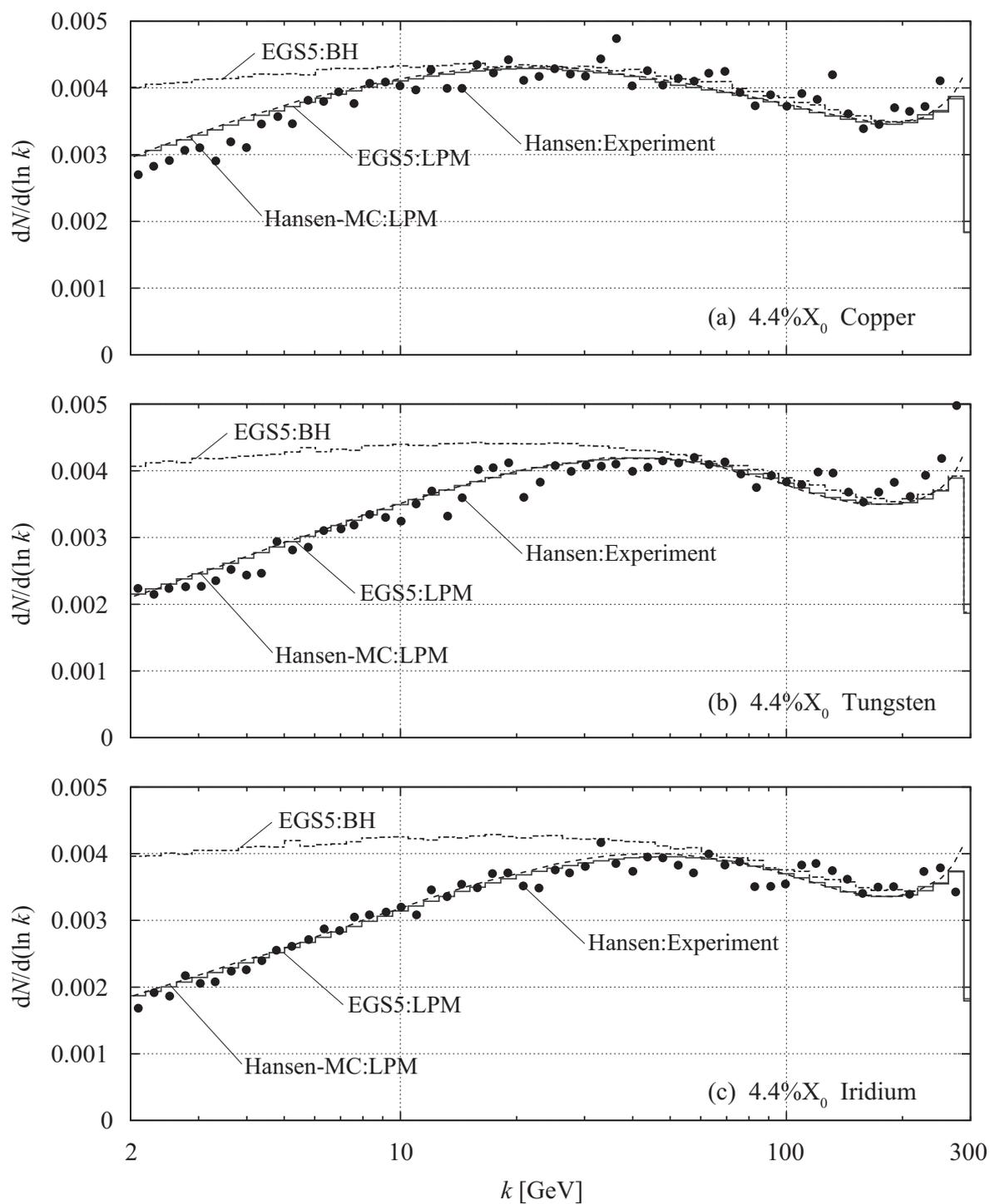


図 2.16: 入射電子エネルギーが287 GeV のときの (a) 銅ターゲット、(b) タングステンターゲット、(c) イリジウムターゲットのエネルギースペクトル。記号と線種は図2.14と同一である。

EGS5 コードは 15%以内で再現した。Anthony らの実験値に対するこの値は、彼らが示した放射長 X_0 の矛盾点に起因した誤差を含んでいる。また、Hansen らが示したすべてのターゲットの実験値を、EGS5 コードは 10%以内で再現した。

高エネルギー領域では、制動放射と電子対生成が支配的であるため、これらの過程に寄与する LPM および誘電による抑制効果が重要である。その抑制効果における実験値を EGS5 コードの計算値は良く再現したことから、EGS5 コードはこのエネルギー領域で、精度良い計算が可能となった。このことにより、EGS5 コードは数十 GeV 以上のエネルギー領域における、放射検出器開発や遮へい計算や空気シャワーの計算に利用することができる。

LPM 効果は、電子のエネルギー損失に E 依存の LPM の変数 (ξ, G, ϕ) が含まれるために、高エネルギーにおける実効的な放射長を伸ばす。例えば、鉛タングステン結晶中の 0.2、1、4 TeV の電子の通常の放射長よりも LPM 効果を含めた実効的な放射長は、2.5%、10%、26%長くなる [55]。

また、LPM 効果により電子が物質へ付与するエネルギーの深度分布が変化する。図 2.17 に、EGS5 コードにて計算した 500 GeV、10 TeV のエネルギーを持った入射電子が Pb に付与するエネルギーの深度分布の LPM/BH 比を示す。電子が物質へ入射した直後は LPM/BH 比が 1 より小さいため、抑制がない BH 断面積のエネルギー付与が LPM 断面積よりも大きい。より深い位置になると、LPM/BH 比は 1 より大きいため、LPM 断面積のエネルギー付与が BH 断面積よりも大きい。例えば 10 放射長において 500 GeV、10 TeV の入射電子エネルギーでそれぞれ LPM/BH 比は 3.8%、23%の差である。

EGS5 コード以外の輸送計算コードでは、GEANT コードと FLUKA コードに制動放射における LPM および誘電による抑制効果が組み込まれている。GEANT コードは Hansen ら実験値のみと比較されており、良く再現していることが報告されている [56]。しかし、Anthony らの実験値との比較はされておらず、誘電による抑制効果の検証はされていない。また FLUKA コードは、これらの抑制効果を組み込んだのみであり、実験値との比較は出版されていない。

電子対生成においては数 TeV 以上で LPM 効果が現れるものの、現状では信頼できる LPM 効果の測定値がないため、EGS5 コードとの比較は行っていない。

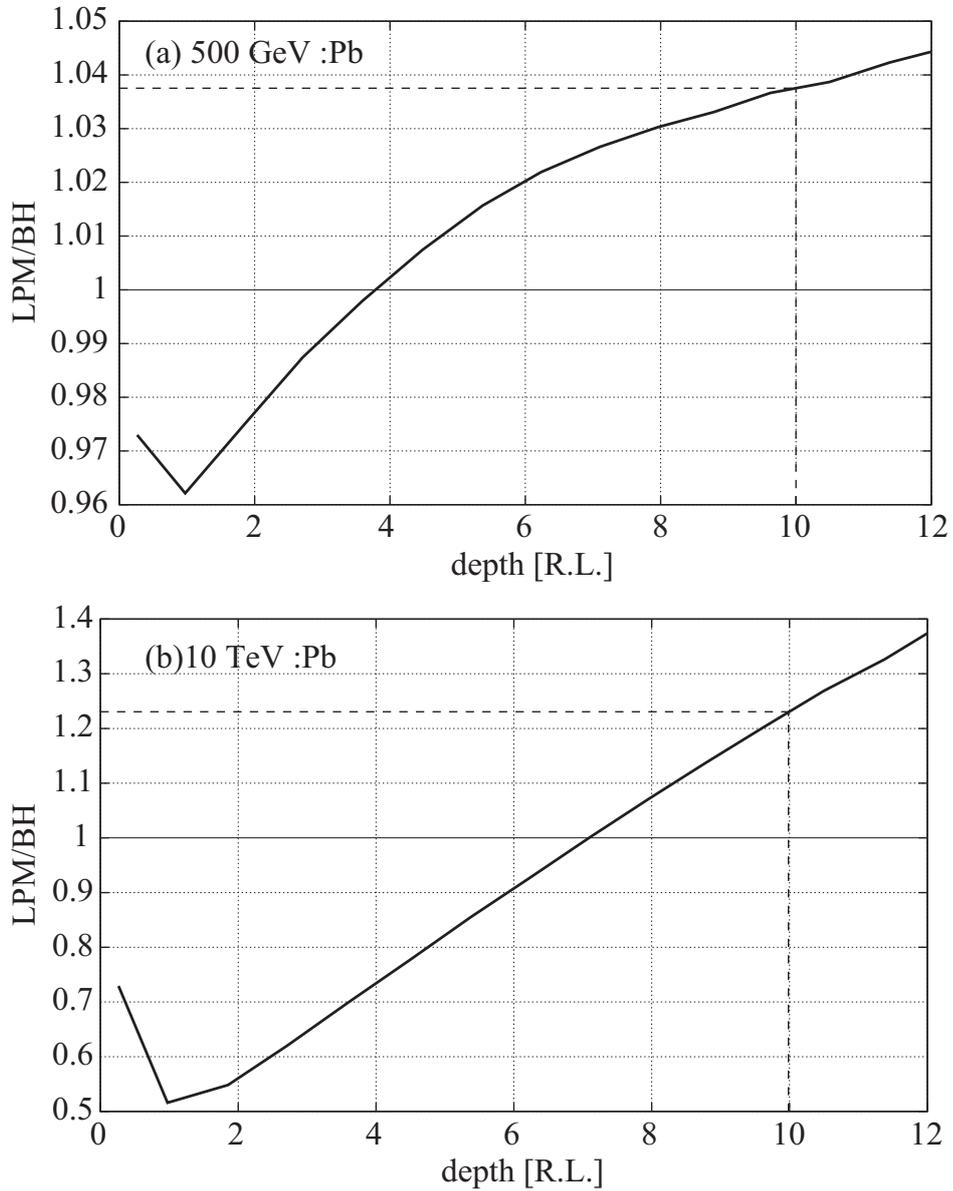


図 2.17: (a) 500 MeV、(b) 10 TeV の入射電子エネルギーにおける鉛 ($Z = 82$) へのエネルギー付与の深度分布の LPM/BH 比。

第3章 放射光施設における低エネルギー散乱X線の測定

3.1 背景および研究目的

これまでNamitoらによりGe検出器を用いたX線散乱実験が行われ、EGS5コードは8 keV以上の実験値を良く再現している[19, 20]。8 keV以下の特性X線の測定については、Ge検出器を用いた測定体系では散乱光子が空気層と真空チェンバーの窓を通過するため、検出効率が低下し測定が困難である。図3.1にEGS5コードにて計算した、Ge検出器(Ortec-Ge)の検出効率を示す。Ortec-Geを用いた体系の場合、散乱X線は真空チェンバーの窓であるカプトン膜(25 μ m、C₂₂N₂O₅、 $\rho = 1.4$ g/cm³)と空気層(3.4 cm、 $\rho = 1.205 \times 10^{-3}$ g/cm³)を通過するため、検出器に入るまでに減衰してしまう。このため、Ortec-Geの検出効率は10 keV以下で低下する。

シリコン半導体検出器(Si検出器)もまた、低エネルギーX線のエネルギースペクトルの測定に用いられる。表3.1に、本研究で用いた二つのSi検出器(Amptek-Si、Vortex-Si)の特性を示す。Amptek-Si、Vortex-Siともに真空チェンバーに直づけできるアタッチメントを有している。このため、ターゲットにより散乱されたX線は、カプトン膜や空気層を通過せずにSi検出器に入射することができる。図3.1にEGS5コードにて計算した、二つのSi検出器(Amptek-Si、Vortex-Si)の検出効率を示す。二つのSi検出器は、Ortec-Geより低エネルギー(~4 keV)まで検出効率が低下しない。

本研究では、新しくAmptek-SiとVortex-Siの二つのSi検出器を用いて、8 keV以下の散乱X線の測定を行う。次にこの測定値と、EGS5コードによって得られた計算値を比較することで、8 keV以下のエネルギー領域のEGS5コードの輸送計算の妥当性を検証し、適用範囲の拡張を行う。

表 3.1: 本実験で用いた Si 検出器の特性 (参考のため Ortec-Ge の値も示す)。

タイプ	Be 窓厚 [μm]	結晶厚 [mm]	不感層 [μm]	有感検出領域 [mm^2]	エネルギー分解能 @ 5.9 keV [eV]
Amptek XR-100CR (Amptek-Si)	12.5	0.5	0.15	25	200
Vortex EX-60 (Vortex-Si)	25.0	0.35	0.05	50	170
Ortec 16195/10p (Ortec-Ge)	127.0	10	-	201.1	194

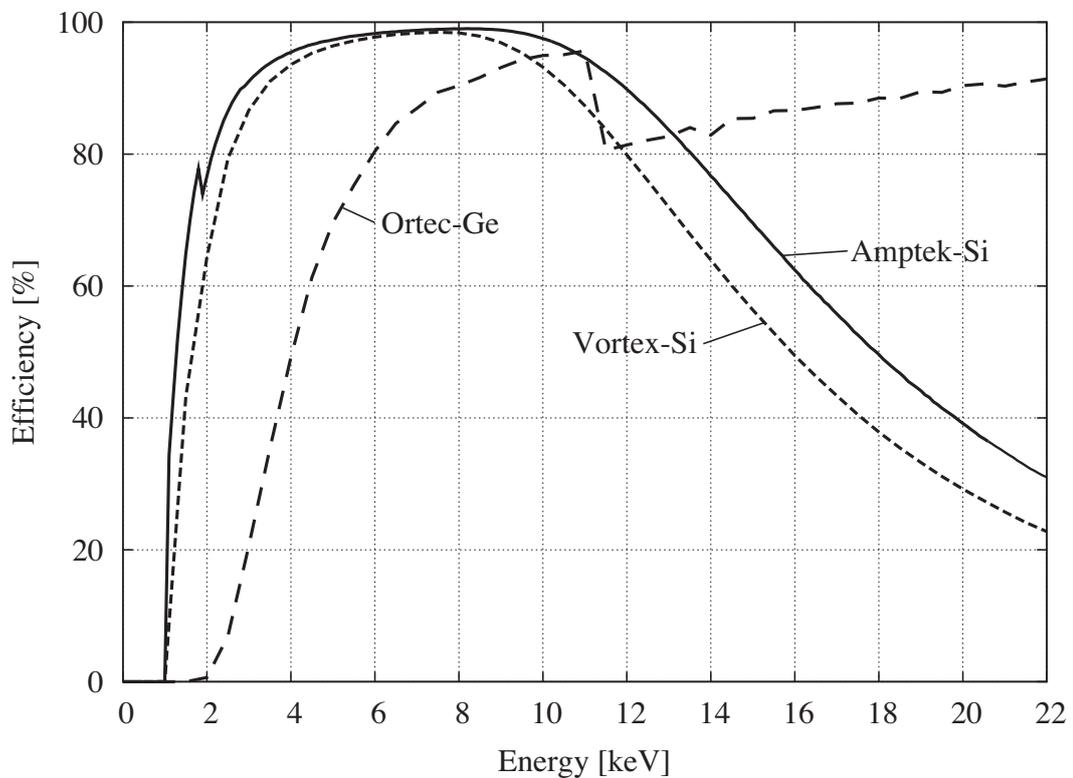


図 3.1: X 線散乱実験に用いた検出器の検出効率。実線は Amptek-Si、点線は Vortex-Si、破線は Ortec-Ge を示す。

3.2 実験

3.2.1 実験手順

測定は 2.5 GeV 放射光施設 (KEK-PF) のビームライン BL-14C において図 3.2 に示す測定体系を用いて行った。実験手順を以下に示す。

1. 放射光リングからの白色 X 線を、Si(1,1,1) の二重結晶モノクロメータによって 8 keV または 20 keV に単色化する。
2. 単色化された X 線ビームを、2.0 mm ϕ にコリメートし、自由空気電離箱 (Free Air Ion Chamber: FAIC) で入射光子数を測定する。
3. 真空チェンバーに入射した単色 X 線は、チェンバー内のターゲット (表 3.2 参照) によって散乱される。ターゲット面の法線ベクトルは $(\frac{-1}{2}, \frac{-1}{\sqrt{2}}, \frac{1}{2})$ である。
4. ターゲットによって $\theta = 90^\circ$ 方向に散乱された X 線を、2.98 mm ϕ にコリメートし、Si 検出器に入射させてエネルギーを測定する。

ターゲット表面からコリメータ開口部までの立体角は、 1.444×10^{-4} [sr] である。入射光子数の測定に用いた FAIC は入射光子によって電離された電子による電流値を測定し、KEIHLEY-6514 電流計を用いて測定中の電荷量を得た。FAIC はカロリメータに対して較正されており [57]、入射エネルギー、温度、気圧を用いて、測定電荷量から入射光子数を算出する。Si 検出器からの信号を、アンプで増幅し、1850 型 ADC (Seiko EG&G) でデジタル化した後、7800 型マルチチャンネルアナライザーの 4k メモリーに格納した。増幅に用いたアンプは、Amptek-Si に対して Amptek-PX2CR、Vortex-Si に対して Ortec-572 型アンプである。典型的な測定時間は 5 分であり、測定対象の特性 X 線ピークの統計精度 (1σ) が 1.5 % 以下になるように測定時間を調整した。測定におけるマシンタイムは、2008 年 2 月、11 月、2009 年 11 月、2010 年 2 月の 4 回であった。その内 2008 年 2 月、11 月に Amptek-Si を用いた測定、2009 年 11 月、2010 年 2 月に Amptek-Si と Vortex-Si を用いた測定を行った。

表 3.2: 実験に用いたターゲットの厚さと特性 X 線 (K_α) のエネルギー。

ターゲット	厚さ	特性 X 線 (K_α) エネルギー	
	[g/cm ²]	[keV]	ROI:(low-high)
Al	0.525	1.487 (K-X)	1.0 - 2.0
Si	0.117	1.740 (K-X)	1.0 - 2.1
Ti	0.726	4.511 (K-X)	4.0 - 5.3
Fe	1.574	6.404 (K-X)	6.0 - 7.5
Cu	0.986	8.048 (K-X)	7.5 - 9.5

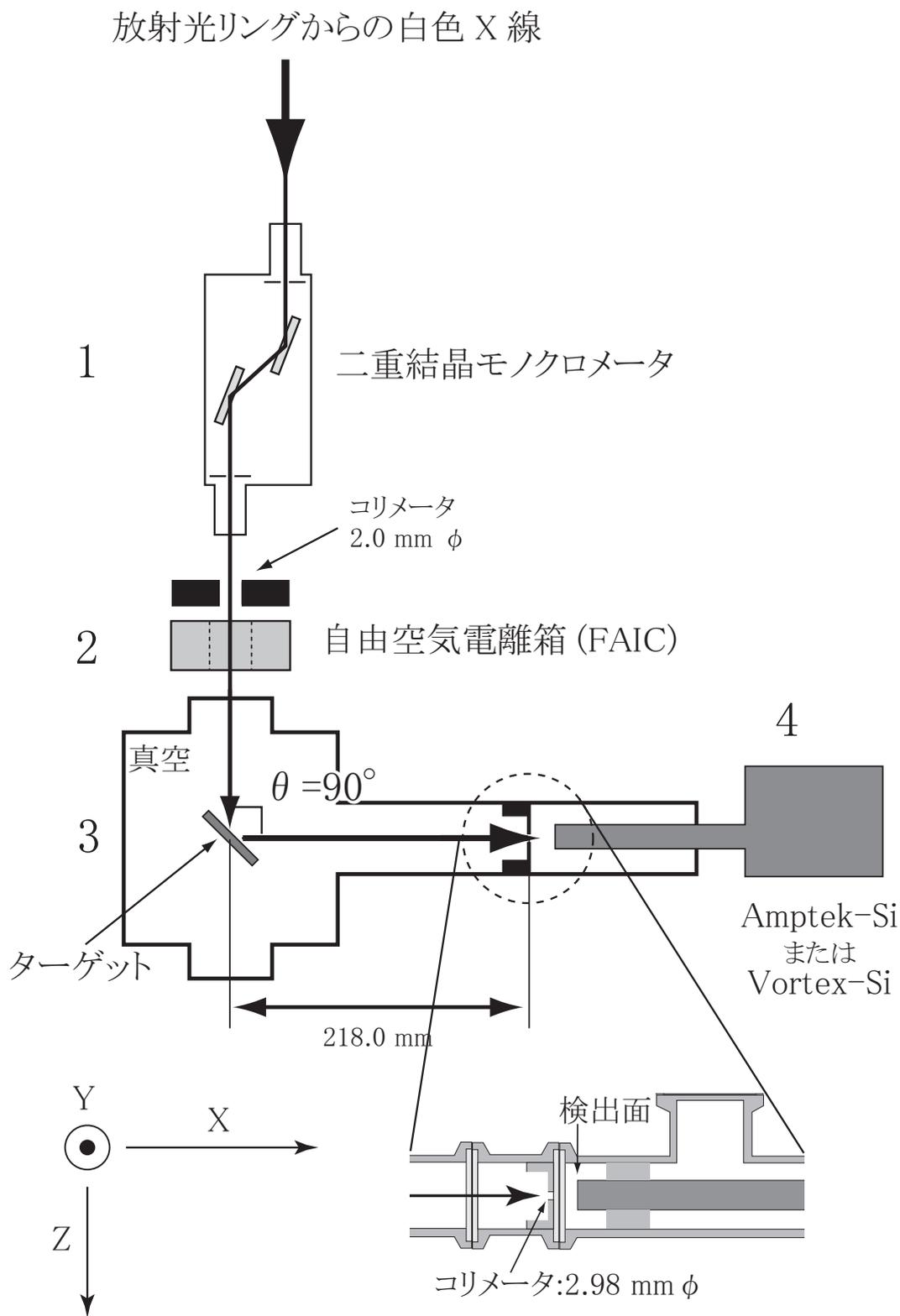


図 3.2: 散乱 X 線の測定体系。

3.2.2 解析方法

本測定で用いたターゲットからの特性 X 線エネルギー、およびそれらのピークにおける ROI を表 3.2 に示す。Si 検出器で測定されたエネルギースペクトルから、それぞれの特性 X 線をこの ROI の範囲で足し合わせ、ターゲットを設置しない場合のバックグラウンドの値を差し引き、FAIC から得られた入射光子数あたり [photon^{-1}]、および立体角あたり [sr^{-1}] で算出した。スペクトルのエネルギー較正は、Cu ターゲットからの K-X ピーク (8.05 keV) と、20 keV 入射時の 90 度方向へのコンプトン散乱ピークエネルギーを用いて行った。90 度方向へのコンプトン散乱ピークエネルギー E_c は式 (1.1) から得られ、20 keV 入射のとき $E_c = 19.247$ keV である。

3.3 計算方法

前項で述べた散乱 X 線実験による測定値を EGS5 コード計算によって再現するため、以下の二つの Step に分けて計算を行った。

3.3.1 Step 1: ターゲットからの 90 度方向散乱スペクトル

8 keV および 20 keV の単色 X 線をそれぞれのターゲット (表 3.2 参照) に入射させ、90 度方向に散乱されたエネルギースペクトルを計算した。ターゲット面は、法線ベクトル $(\frac{-1}{2}, \frac{-1}{\sqrt{2}}, \frac{1}{2})$ に設定し、Z 方向に進むペンシルビーム (0 mm ϕ) を入射させた。EGS5 コードは、*The Table of Isotopes 8th edition*[9] の K 殻蛍光収率を用いている。EGS5 コードによる、8 keV 入射と 20 keV 入射に対する 90 度方向への散乱光子スペクトルを、それぞれ図 3.3、図 3.4 に示す。

3.3.2 Step 2: Si 検出器によって測定されるエネルギースペクトル

Step 1 において計算したエネルギースペクトルを持つ光子を、Si 検出器に入射させたときの Si 検出器の有感領域での吸収エネルギーを計算した。入射光子の方向は、Si 検出器に対し垂直に設定し、ビームサイズは直径 2.98 mm とした。ビームサイズ内でビーム強度を均等に分布させるために、直接サンプリング法を用いた。図 3.5 に (a) Amptek-Si、(b) Vortex-Si の計算体系を示す。入射光子は、Be 窓と Si 結晶の不感層領域を通り抜け、Si の有感層においてエネルギーを付与する。付与されたエネルギーを、それぞれのエネルギービンに分け、そのときの光子数をカウントした。EGS5 コードの計算値に測定データのエネルギー分解能を考慮させるため、計算によるエネルギーピークは測定データのエネルギー分解能を用いて、ガウス分布 (FWHM = 0.2 keV) によって幅を持たせている。

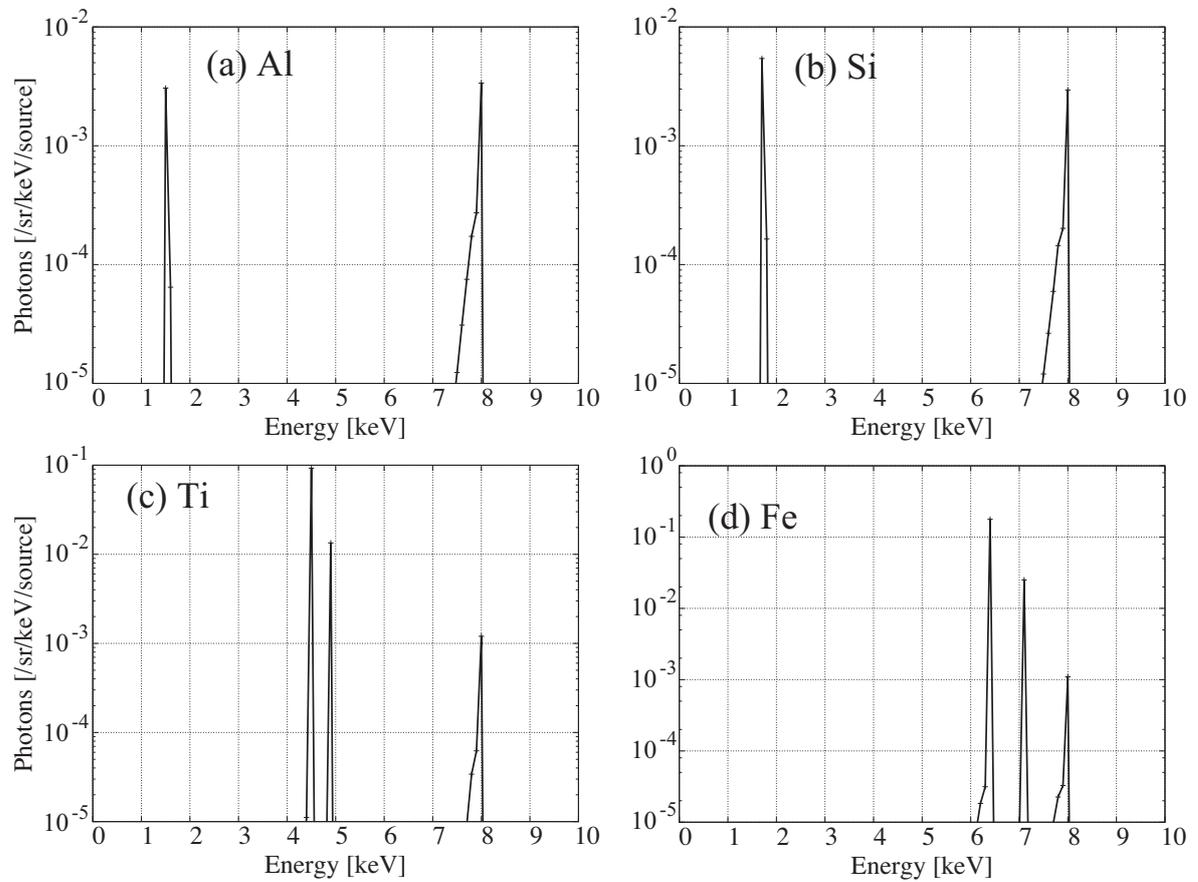


図 3.3: 8 keV の光子をターゲットに入射させたときに 90° 方向に放出される光子のエネルギースペクトルの EGS5 コードによる計算値。ターゲットは、(a) Al、(b) Si、(c) Ti、(d) Fe である。

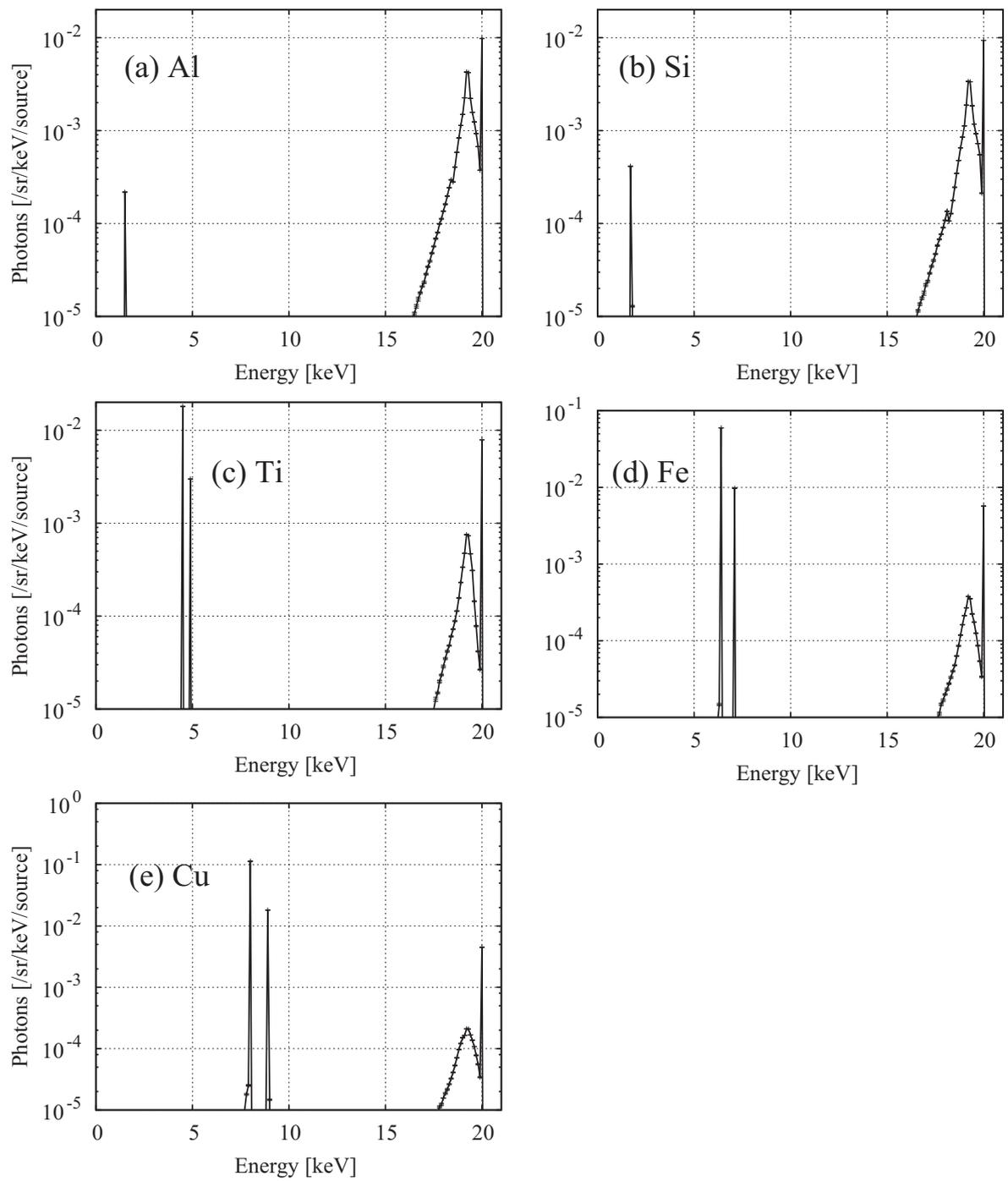
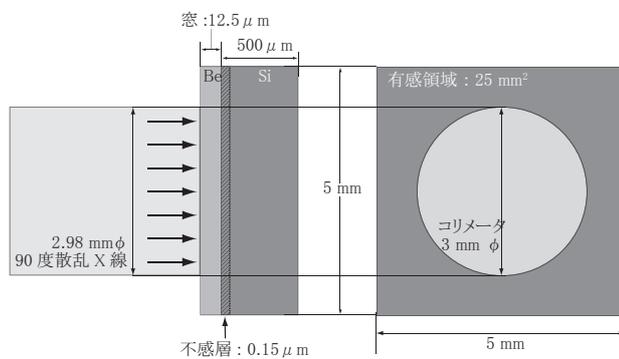


図 3.4: 20 keV の光子をターゲットに入射させたときに 90° 方向に放出される光子のエネルギースペクトルの EGS5 コードによる計算値。ターゲットは、(a) Al、(b) Si、(c) Ti、(d) Fe、(f) Cu である。

(a) Amptek-Si



(b) Vortex-Si

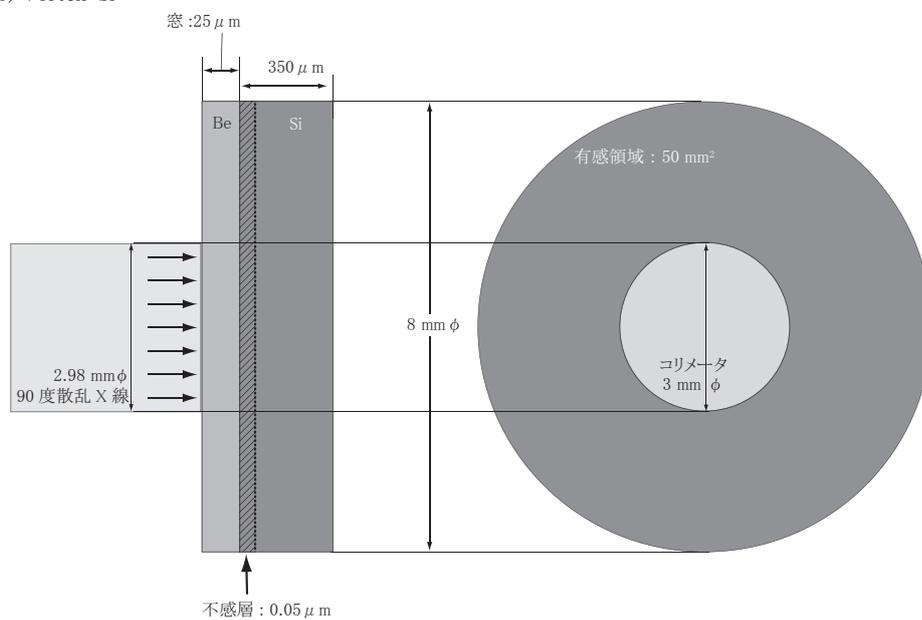


図 3.5: (a) Amptek-Si、(b) Vortex-Si の計算体系。

3.4 結果と議論

3.4.1 エネルギースペクトルの比較

図 3.6、図 3.7 にそれぞれ 8 keV と 20 keV の単色 X 線がターゲットに入射し、ターゲットからの X 線を Amptek-Si 検出器で測定した場合の計算値と実験値のエネルギースペクトルを示す。どちらの入射エネルギーの場合も EGS5 計算によるスペクトル形状は、実験値を良く再現している。8 keV 入射の場合、Amptek-Si 検出器のエネルギー分解能は、8 keV 付近にあるレイリー散乱ピークとコンプトン散乱ピークを分離するには十分ではない。一方、20 keV 入射の場合、レイリー散乱ピーク (20 keV) とコンプトン散乱ピーク (19.247 keV) のエネルギー差は、Amptek-Si 検出器のエネルギー分解能よりも大きいため、分離して測定することができる。

3.4.2 特性 X 線ピークの計算値に対する実験値の比

8 keV および 20 keV の光子がターゲットに入射した場合の、特性 X 線ピークの実験値に対する計算値の比を、それぞれ図 3.8 と図 3.9 に示す。実験値として次の 6 種類のものを用いた；Amptec-Si 検出器の 2008 年 2 月 (Amptek-Si:Feb.2008)、11 月 (Amptek-Si:Nov.2008)、2009 年 11 月 (Amptek-Si:Nov.2009)、2010 年 2 月 (Amptek-Si:Feb.2010) の 4 回の測定と、Vortex-Si 検出器の 2009 年 11 月 (Vortex-Si:Nov.2009)、2010 年 2 月 (Vortex-Si:Feb.2010) の 2 回の測定。ここで Amptek-Si:Nov.2008 以外の実験値について、EGS5 の計算値は 11% 以内で測定値を再現している。

一方、Amptek-Si:Nov.2008 の実験値は、8 keV 入射の場合、全体的に計算値は実験値を 13 ~ 20% で過大評価している。また、20 keV 入射の場合、Si の K-X 線より高いエネルギーにおいて 10% 以内で一致しているものの、Al の K-X 線において 30% の過大評価となっている。計算値は、それぞれの検出器において同一の値を用いているため、この差は測定に起因したものである。

3.5 まとめ

4 回のマシンタイムにおいて、2 種類の Si 検出器を用いて計 6 回の X 線散乱実験を行った。この測定により、これまで EGS5 コードの検証として得ることができていなかった、8 keV 以下の特性 X 線の測定データを得た。このうち Amptek-Si:Nov.2008 以外の測定で、EGS5 の計算値は 11% 以内で測定値を再現している。

表 3.3 に示されるように、本測定における誤差を見積もった。誤差の最大の要因は、Si 検出器の Be 窓厚の不確かさに依存した検出効率の誤差であり、入射エネルギーに依存する。特に、Al や Si の K-X 線の場合に大きく影響を受ける。EGS5 コードが用いている *The Table of Isotopes 8th edition* の蛍光収率 ω_K の値は、本測定に用いた Al と Si ターゲットにおいて 5 ~ 10%、Ti、Fe、Cu ターゲットにおいて 3 ~ 5% の不確かさをそれぞれもつ。これらのことから、本研究における測定値と実験値の差は Al と Si ター

表 3.3: 測定における誤差の見積もり。

要因 (%)	ターゲット				
	Al	Si	Ti	Fe	Cu
入射光子数モニタ	1	1	1	1	1
サンプルの向き	1	1	1	1	1
コリメータの立体角	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
測定の統計誤差 (1σ)	1.2	1.0	0.3	0.2	0.1
検出効率の誤差	3.5	4.0	0.5	0.2	0.2
合計	4.0	4.4	1.6	1.5	1.5

ゲットにおいて見積もった誤差以内で再現しているが、Ti、Fe、Cuターゲットにおいては見積もった誤差以上の差がある。

3.5.1 今後の課題

今回の比較は、8 keV 以下の特性 X 線のみで行ったため、EGS5 コードが採用している特性 X 線の蛍光収率とその取扱いのみの検証である。8 KeV 以下における EGS5 コードが用いているドップラー広がりや束縛コンプトンのマクロな取扱いの検証は、コンプトン散乱の測定および比較により行う必要がある。

特性 X 線における課題としては、Amptek-Si:Nov.2008 の測定における再現性の条件を調査し、この測定値の過小評価の原因を明確にすることである。この原因の候補として、

- ターゲット上のビームスポットが検出器の有感領域からすべて見えていたか？
- コリメータ開口部と Si 検出器の有感領域の位置ずれがなかったか？
- FAIC の測定に問題はなかったか？

が考えられる。

Fe、Ti、Cu ターゲットにおける K-X 線の場合、実験値間で最大 10% の差がある。これは、表 3.3 に示した測定における誤差の見積もりよりも大きいため、この差が何に起因しているか調査する必要がある。また Al、Si ターゲットにおける K-X 線のエネルギー領域は、Si 検出器の検出効率が大きく変化するところである (図 3.1 参照)。ここでの検出効率は、Si 検出器の Be 窓や不感層の厚さの影響が大きいため、これらの厚さの違いがどの程度効率に影響を与えるか調べる必要がある。これらの課題をクリアすることにより、このエネルギー領域まで EGS5 コードの適用範囲が拡張できたと言える。

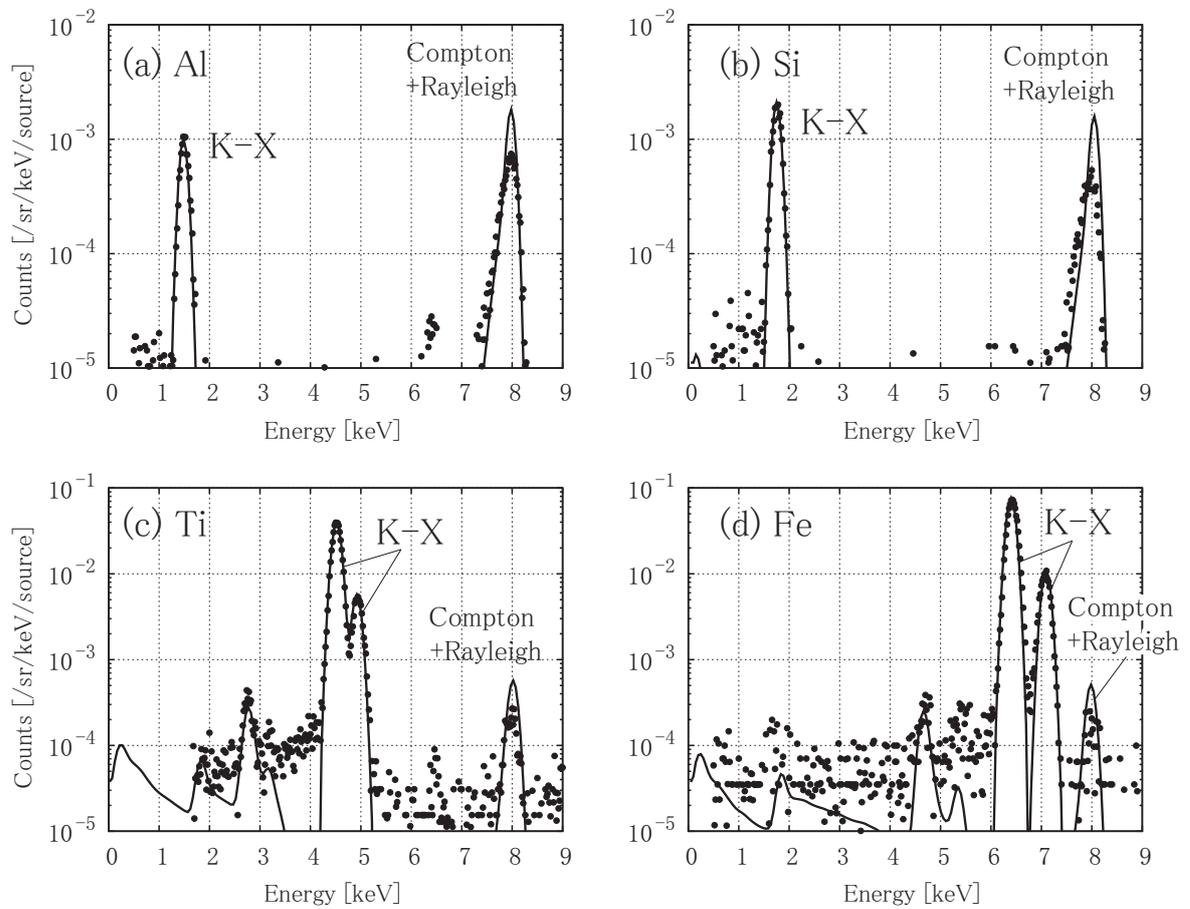


図 3.6: 8 keV の単色 X 線を (a) Al、(b) Si、(c) Ti、(d) Fe ターゲットに入射させたときの、90 度散乱 X 線を Amptek-Si 検出器で測定したエネルギースペクトル。実線は EGS5 コードによる計算値、黒丸は測定値である。

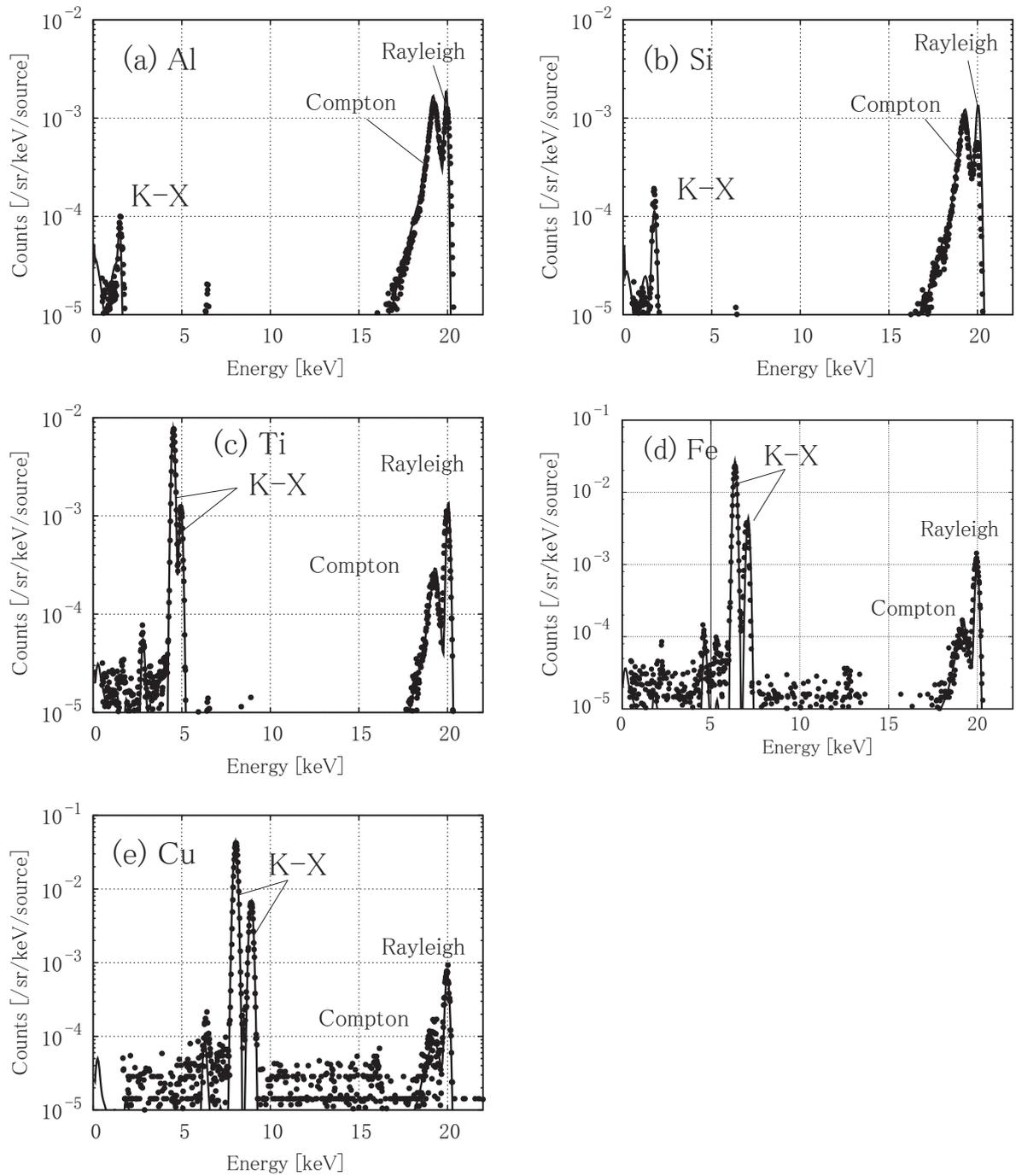


図 3.7: 20 keV の単色 X 線を (a) Al、(b) Si、(c) Ti、(d) Fe、(e) Cu ターゲットに入射させたときの、90 度散乱 X 線を Amptek-Si 検出器で測定したエネルギースペクトル。実線は EGS5 コードによる計算値、黒丸は測定値である。

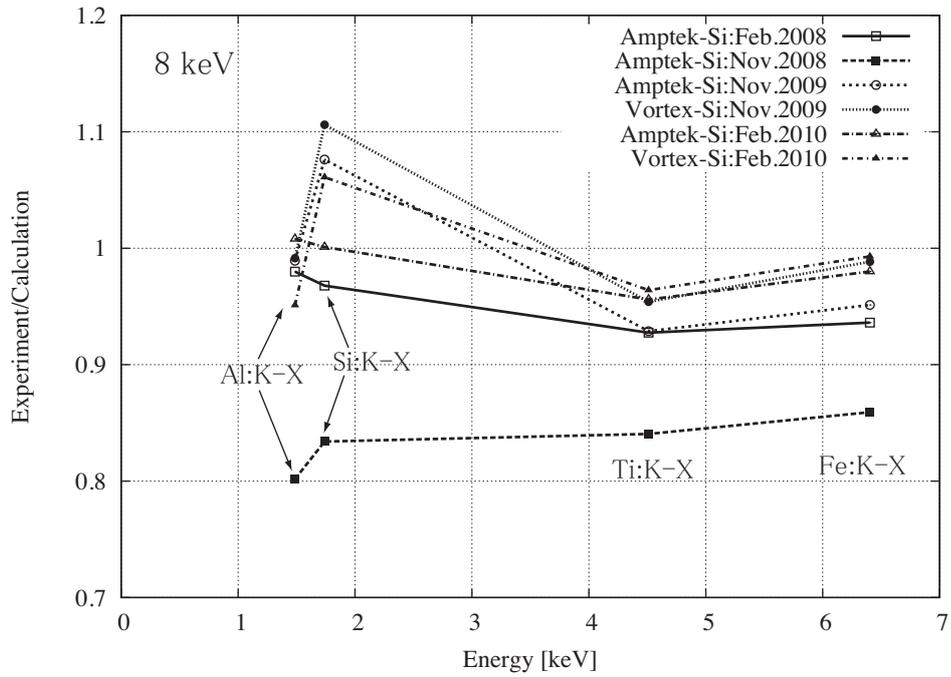


図 3.8: 8 keV の単色 X 線をターゲットに入射させたときの、特性 X 線のカウント数の EGS5 の計算値に対する実験値の比。それぞれの記号は低エネルギーから Al、Si、Ti、Fe の K-X 線を示している。

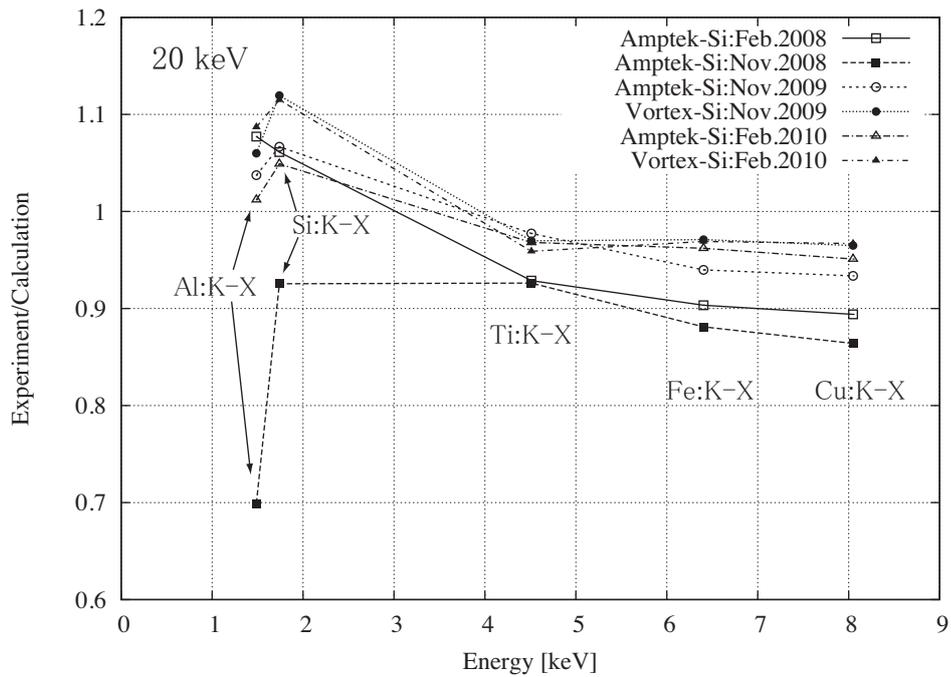


図 3.9: 20 keV の単色 X 線をターゲットに入射させたときの、特性 X 線のカウント数の EGS5 の計算値に対する実験値の比。それぞれの記号は低エネルギーから Al、Si、Ti、Fe、Cu の K-X 線を示している。

第4章 電子後方散乱における電子輸送の検証

4.1 背景および研究目的

本章では、電子輸送の検証のための EGS5 コードによる後方散乱係数の計算に注目した、3つのテーマの研究について述べる。

電子後方散乱係数の比較

1.4.3 で見たように、電子輸送の検証に有効な電子後方散乱係数に関して、EGS5 コードを用いた系統的なベンチマーク計算結果は行われていない。本章では、EGS5 コードを含めた4つの汎用電子・光子輸送コード (EGS5、EGS_{src}、ITS 3.0、PENELOPE) を用いて、2 keV から 20 MeV の領域において、原子番号の低い物質から高い物質まで、系統的な電子後方散乱係数 η のベンチマーク計算を行う。これにより、汎用電子・光子輸送コードの電子後方散乱係数の現状を把握するとともに、EGS5 コードの電子輸送の精度評価を行う。

Tabata の後方散乱実験のシミュレーション

電子後方散乱係数の比較において、EGS5 コードの計算値と実験値に最も差がある Be ターゲットの MeV 領域に注目し、この領域を含み系統的に電子後方散乱係数を測定している Tabata[58] の実験値の再評価を行う。

Molière 多重散乱分布へのスピン相対論効果の適用

EGS5 コードにおける多重散乱角度分布モデルは、NoSpin-Molière モデルと Spin-GS モデルを選択して用いることができる。1.3.3 で述べたように、NoSpin-Molière モデルにはスピン相対論効果が考慮されていないため、電子後方散乱係数などの計算において Spin-GS モデルよりも精度が低下する。一方で、Spin-GS モデルは計算に必要なデータ量が多いため、NoSpin-Molière モデルよりも輸送を行うために必要なデータ作成に時間がかかる。Molière 多重散乱分布は、サンプリングされた多重散乱分布に Mott/Rutherford 比を掛け合わせることで、スピン相対論効果を適用することができる。ここでは、スピン相対論効果を適用した Molière 多重散乱分布 (Spin-Molière) を用いて電子後方散乱係数を計算し、NoSpin-Molière モデル、Spin-GS モデルによる計算値や実験値との比較を行い、Spin-Molière モデルの有用性を検証する。

4.2 電子後方散乱係数の比較

4.2.1 測定データ

これまでに、多くの電子後方散乱実験が行われてきており、後方散乱係数 η は数 keV から数十 MeV の単一エネルギーにおいて $Z = 3$ から 92 までの元素で測定されている。表 4.2.1 に、主な電子後方散乱係数の測定を示す。

4.2.2 計算コードおよび計算条件

ベンチマーク計算には、EGS5、EGSsrc、PENELOPE、ITS 3.0 コードを用いた。表 1.4.3 に、これらの電子・光子輸送コードの電子輸送に用いられているモデルを示す。計算条件は以下のように設定した。

- ターゲットから後方全域 (立体角 2π) に散乱された電子をカウントする。
- カットオフエネルギーは 1 keV に設定する。
- ターゲット厚を半無限厚に設定する。
- 入射電子数は、 η の統計誤差 (1σ) が 2% 以下になるように設定する。
- 入射エネルギーは、3 keV から 20 MeV の範囲で単色エネルギーと設定する。
- 入射電子の形状をペンシルビームとし、電子ビームをターゲット面に対して垂直に入射させる。
- ターゲット物質に、U($Z=92$)、Au($Z=79$)、Ag($Z=47$)、Cu($Z=29$)、Al($Z=13$)、C($Z=6$)、Be($Z=4$) の 7 つを用いる。

表 4.1: 電子後方散乱係数の測定

著者	入射エネルギー [MeV]	ターゲット物質	検出器
Bienlein and Schlosser [59]	0.06, 0.75, 0.1	Al	ファラデーカップ
Bishop [60]	0.005 ~ 0.03	C, Al, Ti, Fe, Cu, Ag, Au, U	ファラデーカップ
Bojarshinov [61]	0.25, 1.2	Fe, Cu, Mo, Bi, Sn	ファラデーカップ
Bronshstein and Dolinin [62]	0.002, 0.003	Be	ファラデーカップ
Cohen and Koral [63]	0.6 ~ 1.8	Al, Fe, Ni, Mo, Ag, Ta, Au	ファラデーカップ
Drescher et al. [64]	0.0093 ~ 0.102	Be, Al, Si, Cu, Ge, Ag, Au, U	電子顕微鏡による イメージコントラスト
Ebert et al. [65]	4.0 ~ 12.0	C, Al, Cu, Ag, Ta, U	ファラデーカップ
Frank [66]	1.75	Al, Cu, Pb	ファラデーカップ
Harder and Ferbert [67]	8.4 ~ 22.2	Al, Cu, Cd, Pb	ファラデーカップ
Harder and Poschet [68]	8.4 ~ 22.2	Al, Cu, Cd, Pb	比例計数管
Hunger and Kuchler [69]	0.004~0.04	B, C, Mg, Si, Ti, V, Cr, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ge, Zr, Ag, Cd, Sn, Sb, Te, Sm, Hf, Ta, W, Pt, Au, Bi, U	電子プローブ・ マイクロアナライザ (EPMA)
Kulenkampff and Rüttiger [70]	0.02, 0.03, 0.04	Al, Cu	ファラデーカップ
Martin et al. [71]	0.044~0.124	Be, Si	シリコン検出器
Nakai et al. [72]	1.0, 2.0	Be, Al, Ag	ファラデーカップ
Neubert et al. [73]	0.015~0.06	Be, C, Al, Ti, Fe, Cu, Nb, Ag, Ta, Au, U	ファラデーカップ
Rester and Derrickson [74]	1.0	Al, Fe, Sn, Au	シリコン検出器
Rester and Rainwater [75]	1.0	Si	シリコン検出器
Saldick and Allen [76]	0.3, 1.0, 2.0	Li, Be, C, Mg, Al, Fe, W, Pt, Pb	線量計
Tabata [58]	3.2 ~ 14	Be, C, Al, Cu, Ag, Au, U	電離箱
Trump and Van de Graaff [77]	0.09 ~ 0.5	C, Al, Fe, W	ファラデーカップ
Wright and Trump [78]	1.0 ~ 3.0	Be, Mg, Al, Cu, Zn, Cd, Au, Pb, U	カロリメータ

表 4.1: 電子後方散乱係数の測定 (続き)

著者	入射エネルギー [MeV]	ターゲット物質	検出器
Agu et al. [79]	0.3 ~ 0.7	Al	不明
Bronshtein and Fraiman [80]	0.0008 ~ 0.004	Be, Al	不明
Cosslett and Thomas [81]	0.01, 0.02	Al, Cu	不明
Glazunov and Guglya [82]	0.6 ~ 1.2	C, Al, Zn, Sn, Pb	不明
Harder and Metzger [83]	10, 20	Cu, Cd, Pb	不明
Jakschik and Jüngst [84]	0.25, 0.5	Al	不明
Kanter [85]	0.01, 0.04, 0.07	Al, Cu	不明
Miller [86]	0.3 ~ 1.45	W, Au	不明
Verdier and Arnal [87]	0.0465 ~ 1.96	Mg, Al, Ti, Cr, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ge, Zr, Nb, Mo, Ag, Cd, Sn, Sb, Ta, W, Pt, Au, Pb, Bi, U	不明

4.2.3 結果および議論

図 4.1-図 4.4 に、それぞれのターゲット物質における後方散乱係数 η の計算値と実験値の比較を示す。計算値と実験値の比較することで以下のことが分かる。

- U から Al において計算値は実験値を良く再現している。
- Be や C の原子番号が小さい物質のターゲットにおいて、原子番号が大きい物質のターゲットよりも実験値間、計算値間ともに差が顕著である。
- Be や C ターゲットの MeV 領域において、EGS5、EGSnrc、PENELOPE コードより ITS 3.0 コードが実験値に近い。
- すべてのターゲット、エネルギー領域において EGS5、EGSnrc、PENELOPE コードは 20% 以内で一致している。

これらのことから、EGS5 コードの電子輸送の妥当性を検証した。

原子番号の小さいターゲットの MeV 領域における実験値との差

計算値と実験値の差が最も顕著なのは、Be ターゲットの MeV 領域である。図 4.4 (b) に、Be ターゲットの 1 MeV から 20 MeV 領域を拡大した後方散乱係数を示す。EGS5、EGSnrc、PENELOPE コードは、実験値を 1.5~2.4 倍過大評価している。一方で ITS 3.0 コードは、1.3 倍程度の過大評価である。次にこれら理由を調べるために、差が最も顕著である Be ターゲットも含めた MeV 領域の後方散乱係数に注目し、より詳細に実験値との比較を行う。

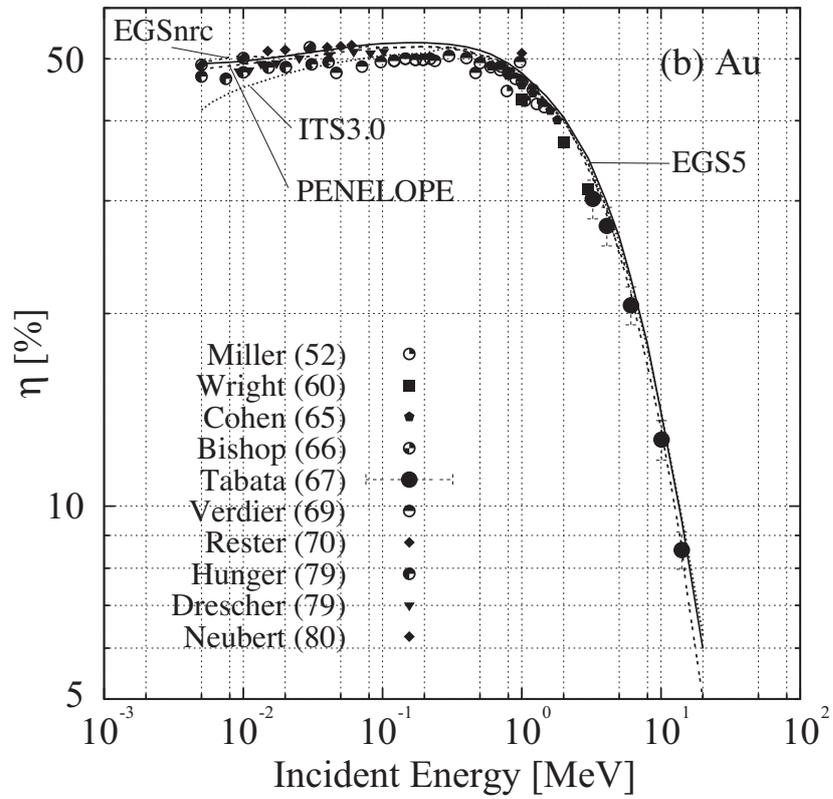
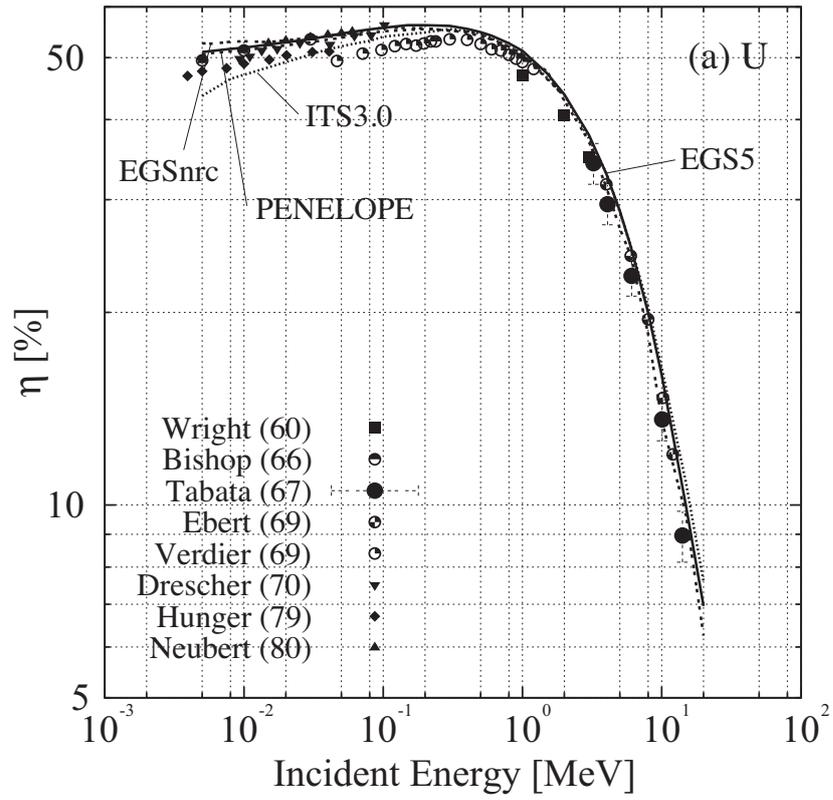


図 4.1: (a) U、(b) Au ターゲットからの後方散乱係数。

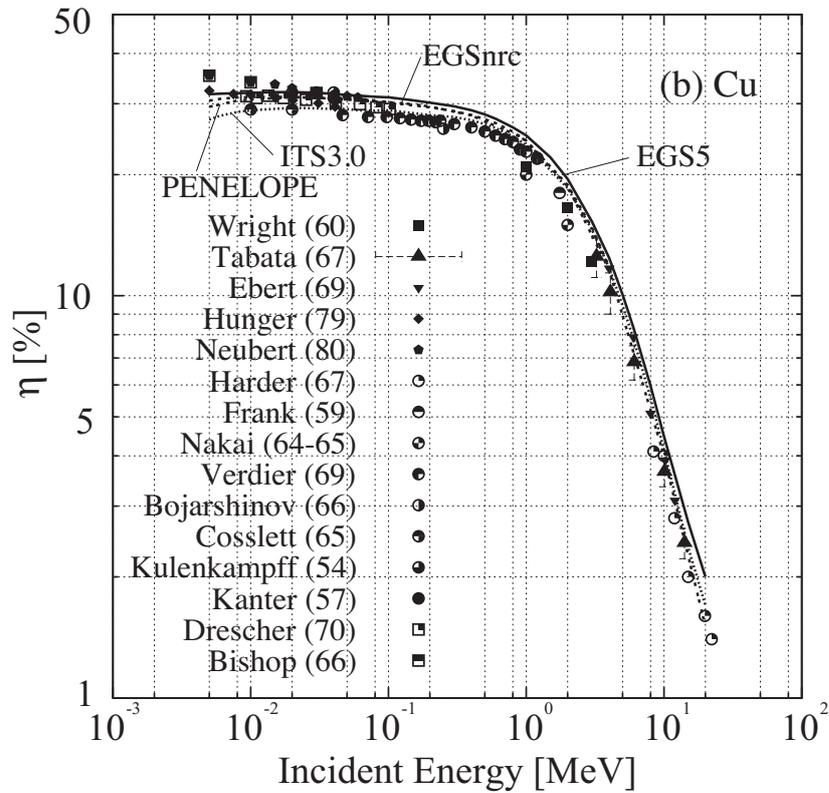
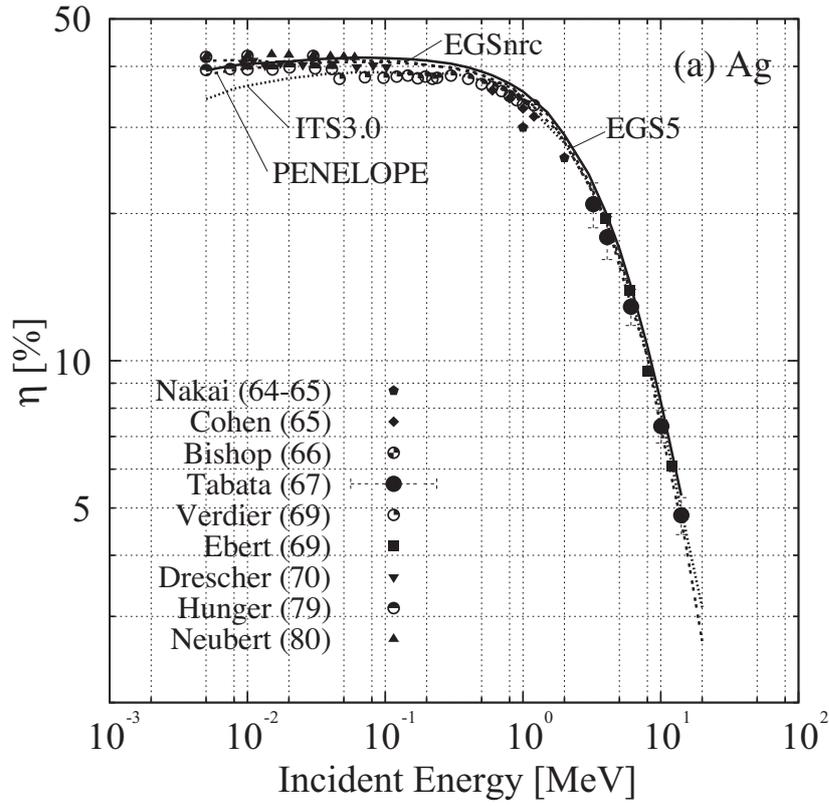


図 4.2: (a) Ag、(b) Cu ターゲットからの後方散乱係数。

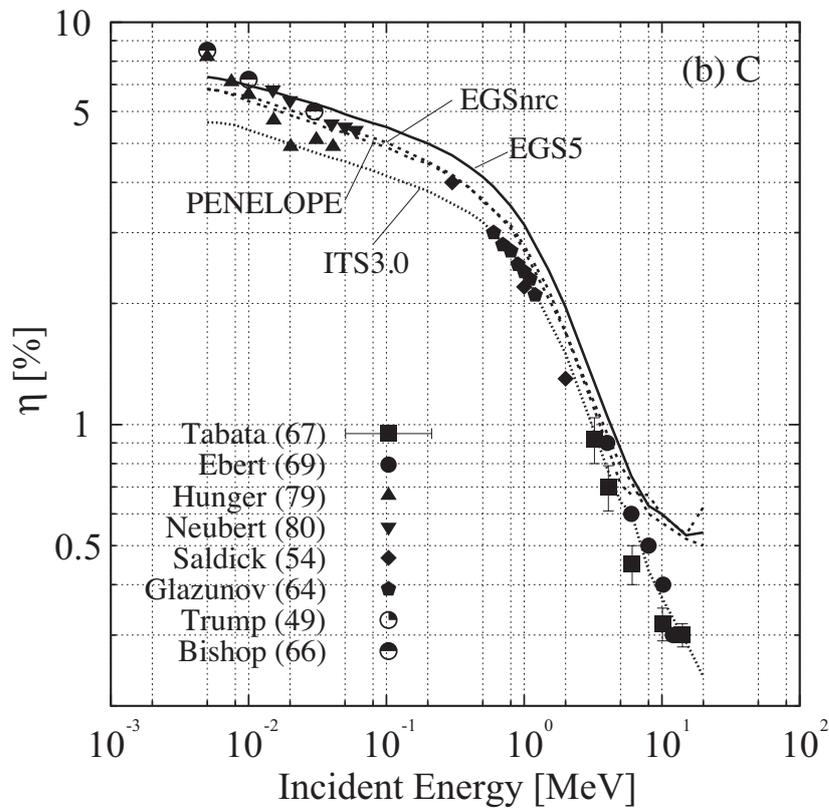
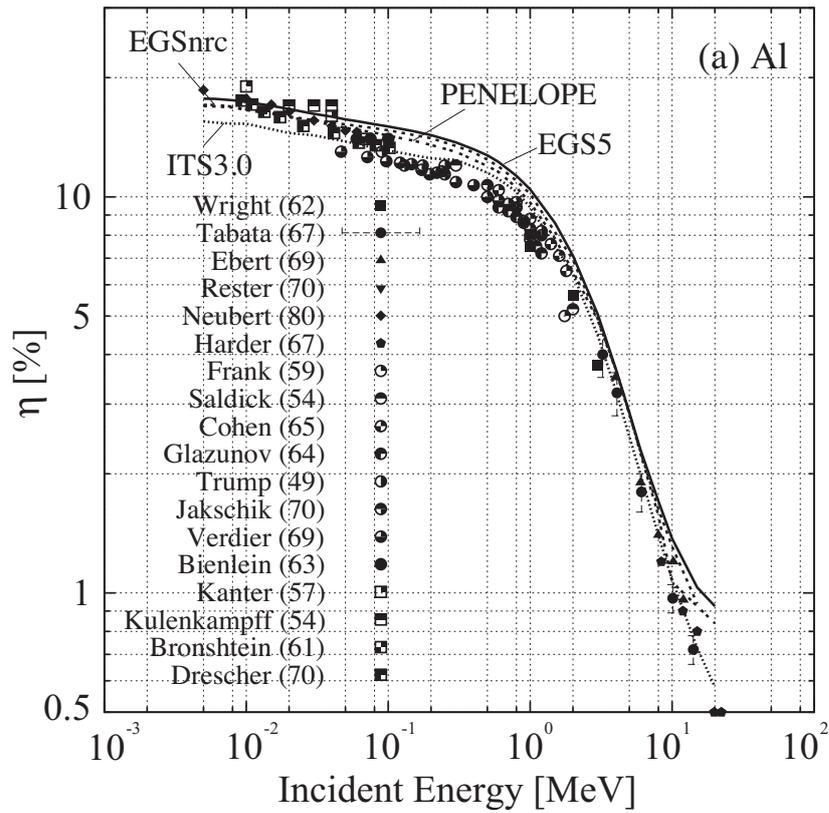


図 4.3: (a) Al、(b) C ターゲットからの後方散乱係数。

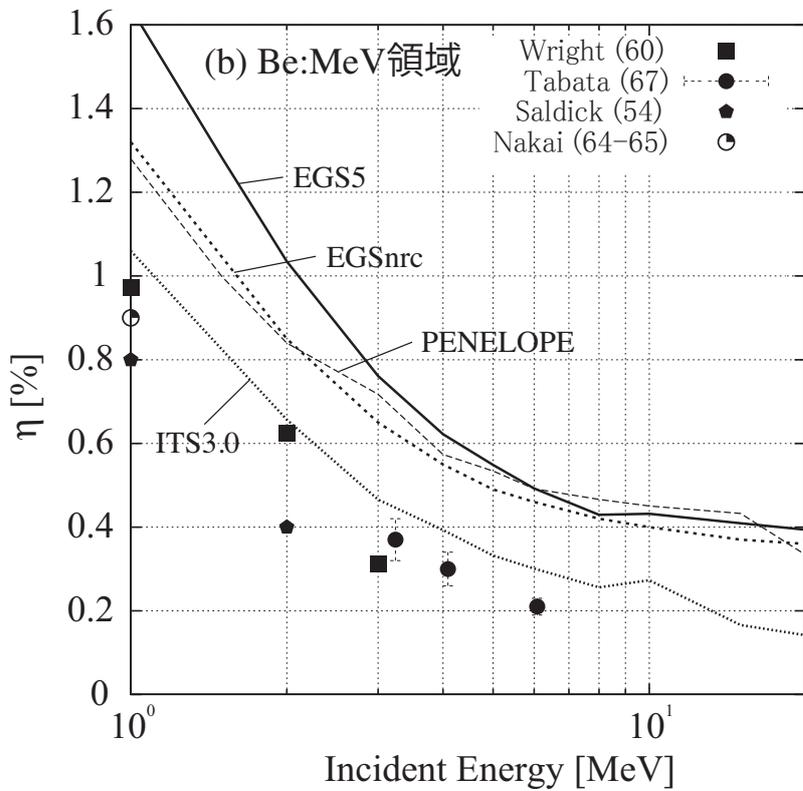
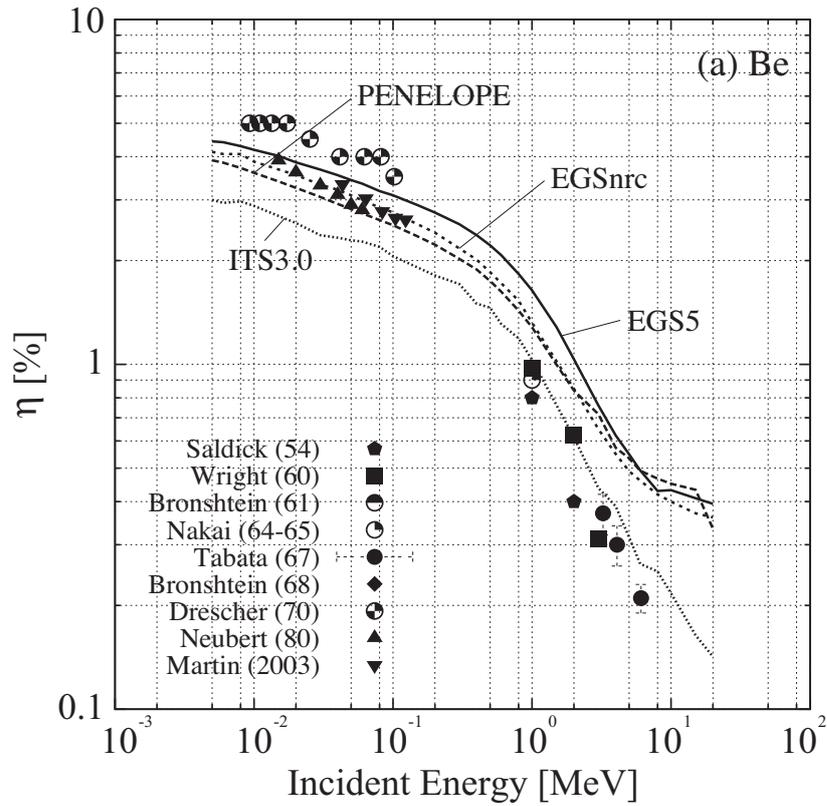


図 4.4: (a) Be ターゲットからの後方散乱係数、(b) は (a) の 1 MeV 以上を拡大したもの。

4.2.4 MeV 領域における後方散乱実験

MeV 領域の電子後方散乱実験は、電離箱、ファラデーカップ、シリコン検出器の 3 種類の検出器をそれぞれ用いて行われている。Tabata[58] は 3.24 ~ 14.1 MeV の電子ビームの後方散乱係数を電離箱を用いて測定した。半無限厚の Be、C、Al、Cu、Ag、Au、U をターゲットとして用いている。電離箱に入射した電子は、電離箱の空気層で増幅されるため、実験的な誤差は小さい。一方で電離箱のアルミ窓を通過できない低エネルギー電子は測定できない。

ファラデーカップを用いた測定は、後方に散乱された電子の全エネルギー領域を測定することができ、電子のエネルギーに依存した検出器のレスポンスの変化は小さい。電子のエネルギーに感度が依存しない測定が可能である。一方で、検出器内の電子は、増幅されないため検出感度は低い。特に原子番号が小さいターゲットにおいて、後方に散乱される電子数は少ないため、実験誤差は大きくなる。一例として、Wright と Trump [78] の測定実験をあげる。彼らは、1、2、3 MeV の電子の後方散乱をファラデーカップを用いて測定した。半無限厚の Be、Mg、Al、Cu、Zn、Cd、Au、Pb、U をターゲットとして用いている。彼らの論文において、この実験における実験的な誤差は明記されていない。そこで、彼らの論文の図にある η の測定値の記号の大きさから、Be ターゲットにおける実験的な誤差を見積もると、約 50%であった。

Rester と Derrickson [74] は、1 MeV の電子が入射したときの後方散乱電子のエネルギースペクトルを Si 検出器を用いて測定した。半無限厚の Al、Fe、Sn、Au をターゲットとして用いている。電子後方散乱係数は、測定された特定の後方角度によるエネルギースペクトルを、角度、エネルギーにおいて積分することで算出している。ここで、Si 検出器の特性のため 100 keV 以上のエネルギーの後方散乱電子を積分している。

これらの中で Tabata の測定は、実験条件が詳細に示されている。また、電離箱において電子が増幅されることにより実験誤差が小さく、原子番号の小さい物質から大きい物質までの系統的に測定が行われている。これらのことから、Tabata の測定値を MeV 領域の後方散乱係数の測定値のなかでもっとも信頼できる値と考え、EGS5 コードと比較する対象として選んだ。

また前項で見たように、ITS 3.0 コードは、Be ターゲットに対して 1.3 倍の過大評価をしており、これは EGS5 コードを含めた他の計算コードよりも実験値に近い値である。さらに、1.4.3 で述べたように、Ito らによって ITS 3.0 コードのベンチマーク計算が行われており、この計算値は Tabata の測定値を良く再現していることが報告されている [40]。これらのことから、次章では実験と計算の条件を一致させることに注意しながら、EGS5 コードを用いて後方散乱電子を計算し、Tabata の測定値との比較を行った。さらに ITS 3.0 コードを用いた計算も行った。

4.3 Tabataの後方散乱実験のシミュレーション

4.3.1 計算方法

はじめに Tabata が用いた電子後方散乱の測定手法と、その測定に付随した後方散乱電子の平均エネルギー E_{av} 、電離箱の測定電流増倍係数 $f_{tabata}(E_{av})$ 、電子後方散乱係数 η_{tabata} 、電離箱の出力 I_{tabata} について説明する。

Tabata の測定

ターゲットから後方に散乱された電子を電離箱で測定する場合、電子は電離箱の空気層を通ることで測定電流が増倍される (図 4.5 参照)。Tabata は、電離箱において測定電流が増倍される係数 f_{tabata} を後方散乱平均エネルギー E_{av} の関数と仮定した。ま

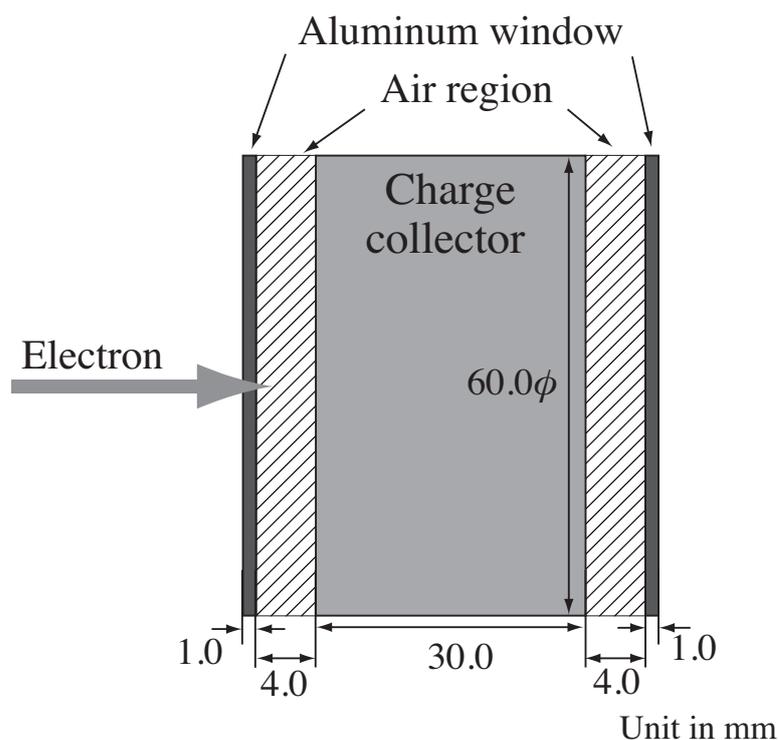


図 4.5: 電離箱の計算体系。直径 60.0 mm、厚さ 30.0 mm のアルミニウム板 (電荷コレクター) を、厚さ 1.0 mm のアルミホイルで挟んでいる。電荷コレクターとそれぞれのアルミホイル間の距離は約 4.0 mm であり、大気圧の空気で満たされている。

た、 E_{av} を、電子ビームのソースエネルギーとターゲットの原子番号の関数であると仮定した。Tabata は次に述べる手順で $f_{tabata}(E_{av})$ を見積もった。まず、すべてのターゲット物質の E_{av} を、

- Wright と Trump[78] が測定した Al、Cu、Pb ターゲットの 1 、 2 、 3 MeV 入射電子エネルギーの E_{av} の比から両対数における直線外挿し、Tabata が用いた入射電子エネルギーに対する E_{av} を算出した (図 4.6 (a) 参照)。

- 上で求めた Al、Cu、Pb の E_{av} をもとに、原子番号における内外挿によりすべてのターゲットと入射電子エネルギーにおける E_{av} を算出した (図 4.6 (b) 参照)。

次に、金ターゲットにおける後方散乱電子を電離箱とファラデーカップを用いて測定した。このときファラデーカップによる測定において、測定電流の増幅は起こらない。そして、金ターゲットにおける $f_{tabata}(E_{av})$ を、電離箱で得た測定値をファラデーカップで得た測定値で割ることにより見積もった。図 4.7 に、Tabata が見積もった Au ターゲットにおける測定電流増倍係数 $f_{tabata}(E_{av})$ を示す。Tabata は、図 4.7 の曲線を用いてすべてのターゲットと入射電子エネルギーにおける $f_{tabata}(E_{av})$ を算出した。

Tabata は電子後方散乱係数を、

$$\eta_{tabata} = I_{tabata}/f_{tabata}(E_{av}) \quad (4.1)$$

と計算した。ここで、 I_{tabata} は電離箱の出力である。Tabata の論文の中で、 E_{av} と $f_{tabata}(E_{av})$ の数値データは明記されていないため、Tabata が示した上記の方法に従い、これらの値を見積もった。 E_{av} と $f_{tabata}(E_{av})$ の値を、図 4.8 と図 4.9 にそれぞれ示す。

EGS5 と ITS 3.0 コードによる E_{av} の計算

半無限厚のターゲットからの後方散乱電子のエネルギースペクトル $d\eta(E)/dE$ は、後方全域に渡ってカウントしている。図 4.10 に EGS5 コードと ITS 3.0 コードで計算した、6.08 MeV のエネルギーによる Be と Au ターゲットからのエネルギースペクトルを示す。Be ターゲットでは、低エネルギー領域の電子が支配的である。一方 Au ターゲットでは、電子エネルギーの分布はおおよそフラットである。次に図 4.10 から得られた $d\eta(E)/dE$ の値から E_{av} を見積もった。図 4.8 に、Tabata の方法で求めた E_{av} と EGS5 と ITS 3.0 コードで求めた E_{av} の比較を示す。Tabata の方法で求めた E_{av} は、EGS5 と ITS 3.0 コードの計算値よりも大きく、それらの差は入射エネルギーが大きく原子番号が小さくなるほど顕著である。これは Tabata が E_{av} を見積もるために用いた内外挿の方法が、無視できない誤差を持つことを示唆する。これに起因して、 $f_{tabata}(E_{av})$ も同様の無視できない誤差を持つと考えられる。

電離箱の出力と電子後方散乱係数

Tabata の測定値と比較するため、電離箱の出力 I と後方散乱係数 η を、EGS5 コードと ITS 3.0 コードを用いて算出した。はじめに、電離箱の空気層内の吸収エネルギー E_{ab-IC} を計算した。図 4.5 に E_{ab-IC} の計算に用いた電離箱の体系を示す。入射電子のエネルギーが E のときの電離箱のレスポンス $R(E)$ は、

$$R(E) = \frac{E_{ab-IC}}{3.4 \times 10^{-5} \text{MeV}} \quad (4.2)$$

で与えられる。ここで、 $3.4 \times 10^{-5} \text{MeV}$ は、電子に対する空気の W 値である [88]。図 4.11 に、EGS5 コードと ITS 3.0 コードを用いて見積もった $R(E)$ を示す。0.15 MeV 以

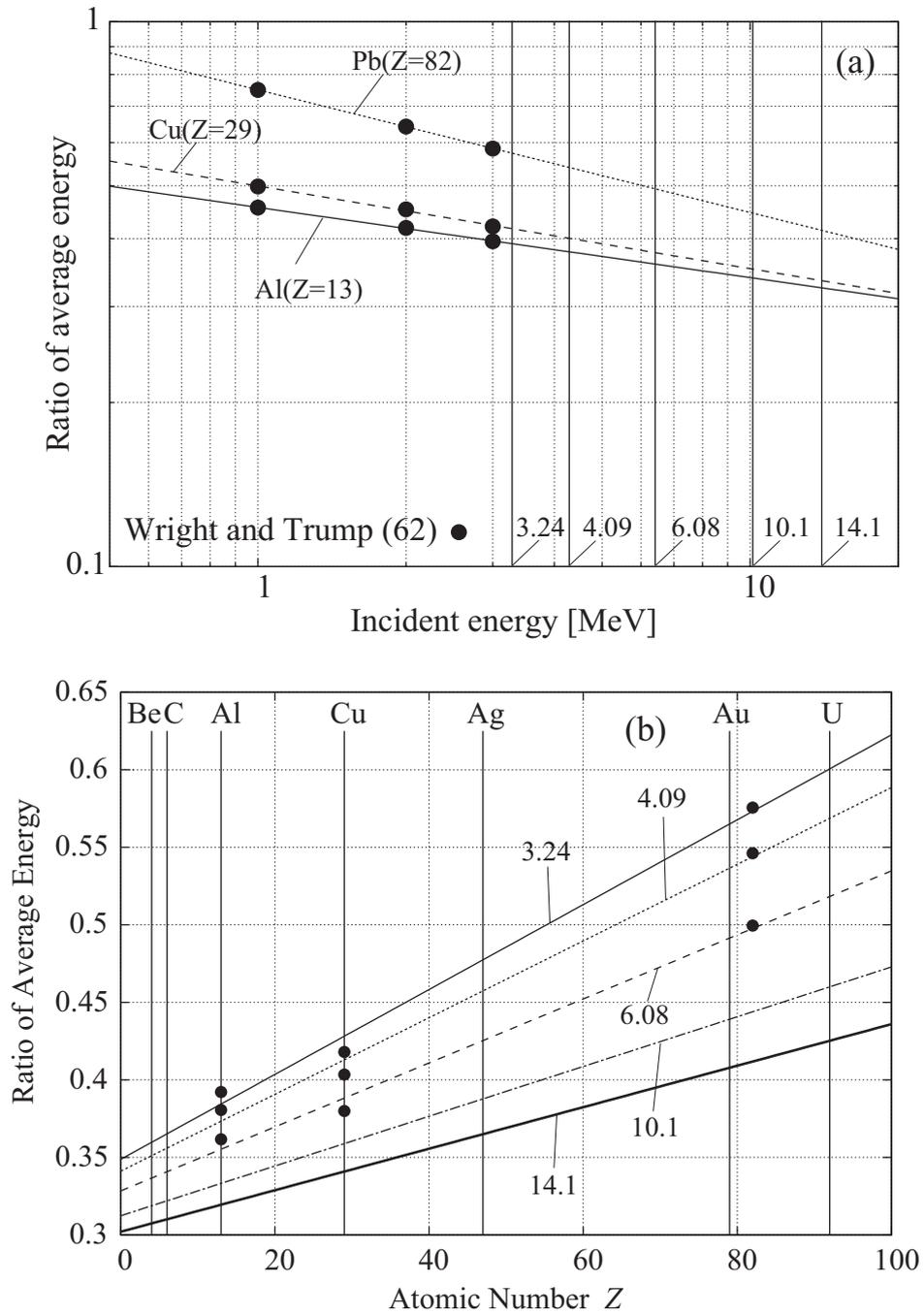


図 4.6: (a) 後方散乱電子の平均エネルギー E_{av} の比の入射エネルギー依存、(b) 平均エネルギー E_{av} の比の Z 依存。黒丸は Wright と Trump[78] の測定値を示す。

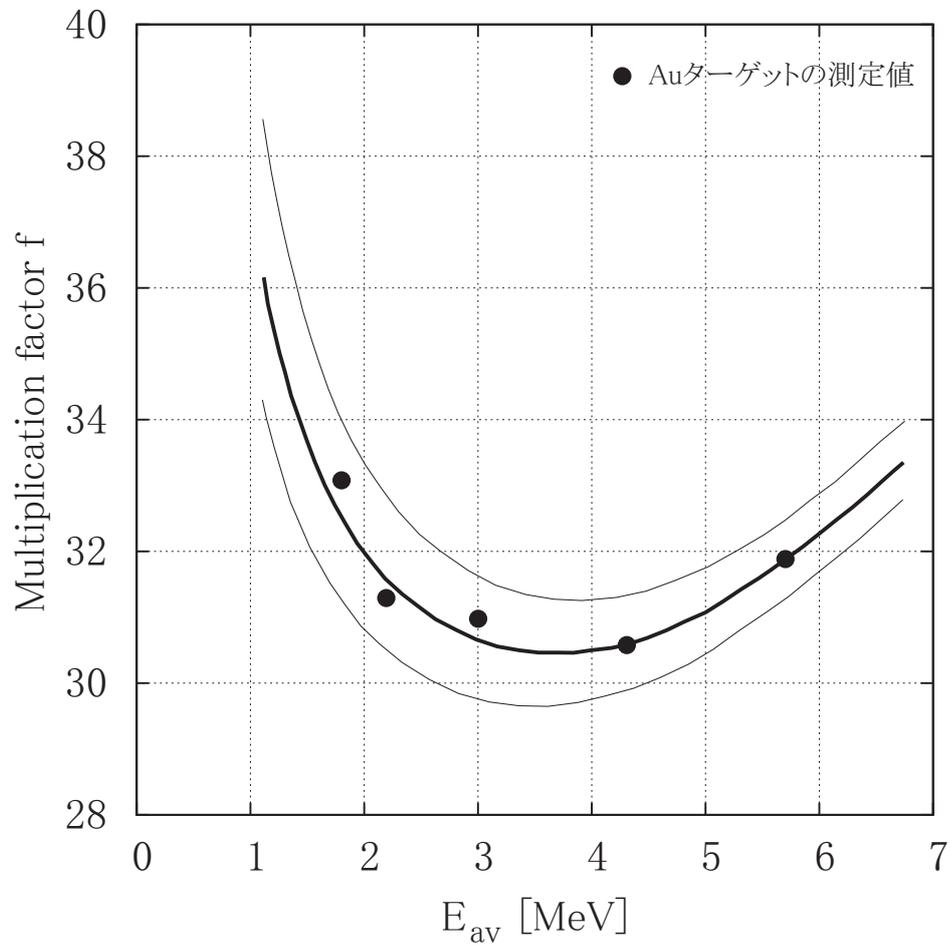


図 4.7: 後方散乱電子の平均エネルギー E_{av} に対する測定電流増倍係数 $f_{\text{tabata}}(E_{av})$ の変化。([58] の図 2 から読み取った値)。黒丸は Au ターゲットでの測定値を示す。

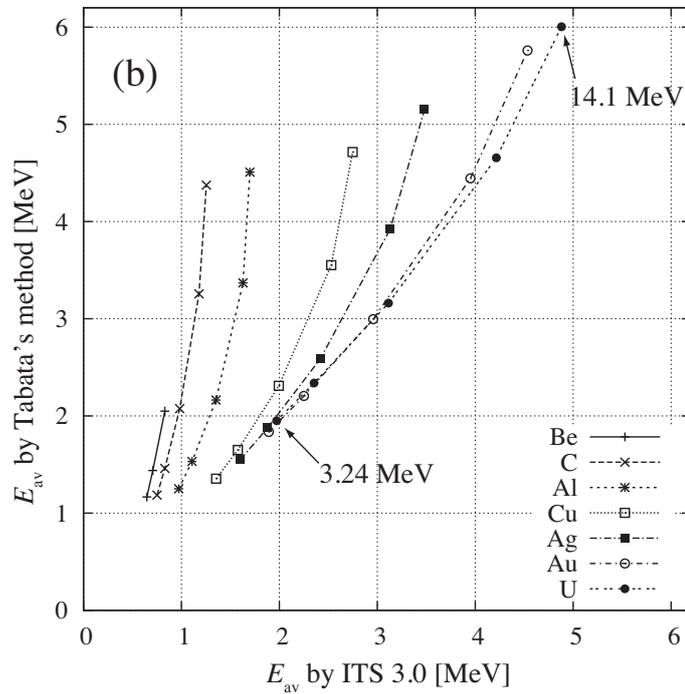
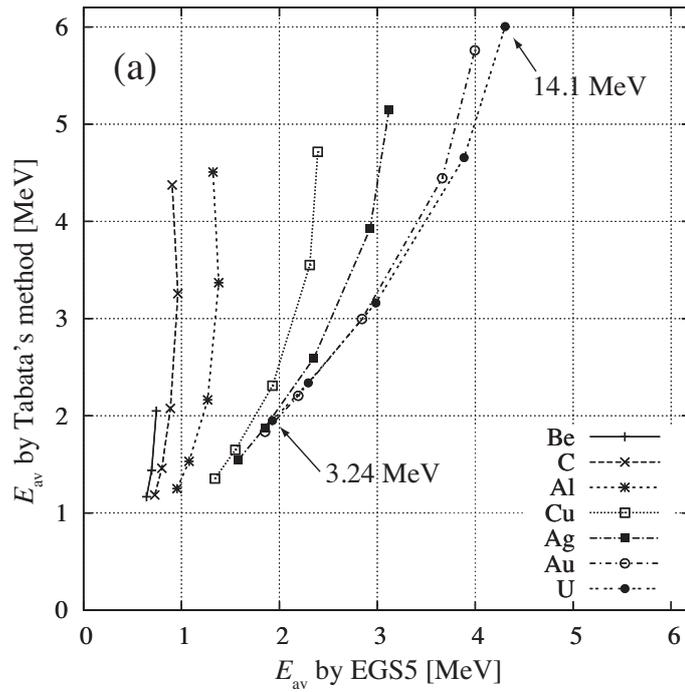


図 4.8: それぞれのターゲットにおける後方散乱電子の平均エネルギー E_{av} の比較。横軸は (a) EGS5 コード、(b) ITS 3.0 コードによる E_{av} を示し、縦軸は Tabata の方法で見積もった E_{av} である。記号は低エネルギー側から 3.24、4.08、6.09、10.1、14.1 MeV の入射電子エネルギーを示す。Be ターゲットについては、3.24、4.08、6.09 MeV のみを示している。

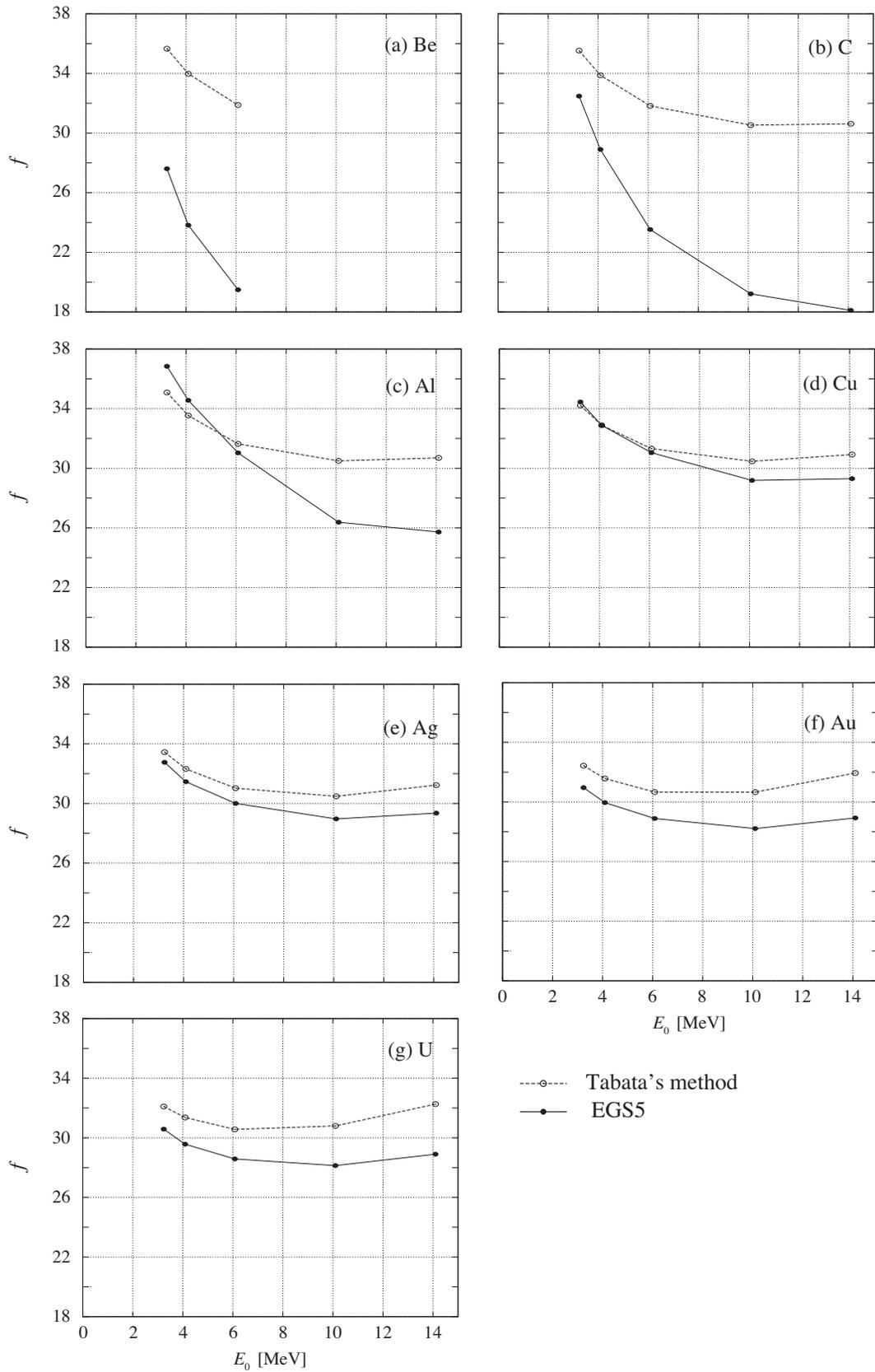


図 4.9: (a) Be、(b) C、(c) Al、(d) Cu、(e) Ag、(f) Au、(g) U ターゲットにおける測定電流増倍係数 f の比較。

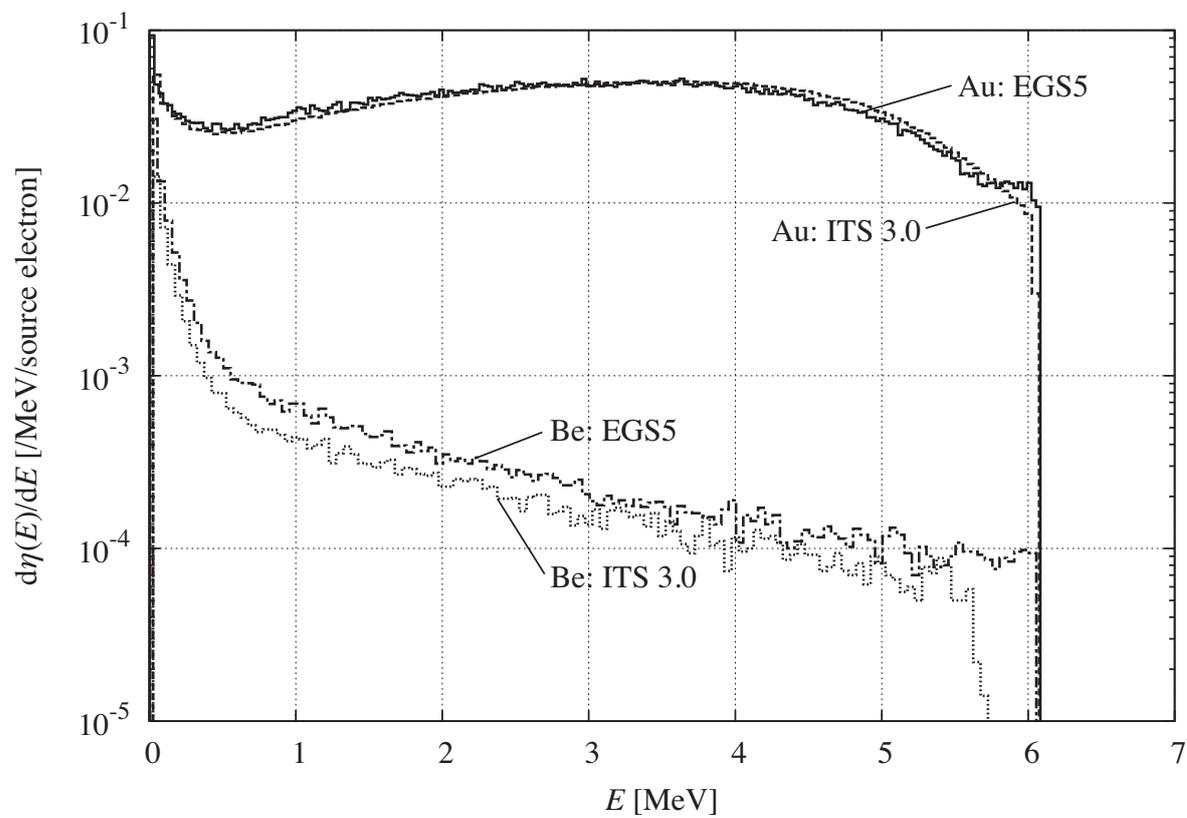


図 4.10: 6.98 MeV の入射電子エネルギーにおける Be と Au ターゲットからの後方散乱電子のエネルギースペクトル。

下のエネルギーを持った電子は電離箱のアルミ窓を通過することができないため、これ以下の $R(E)$ の値はゼロである。 $R(E)$ は約 0.3 MeV でピークに達する。0.3 MeV 付

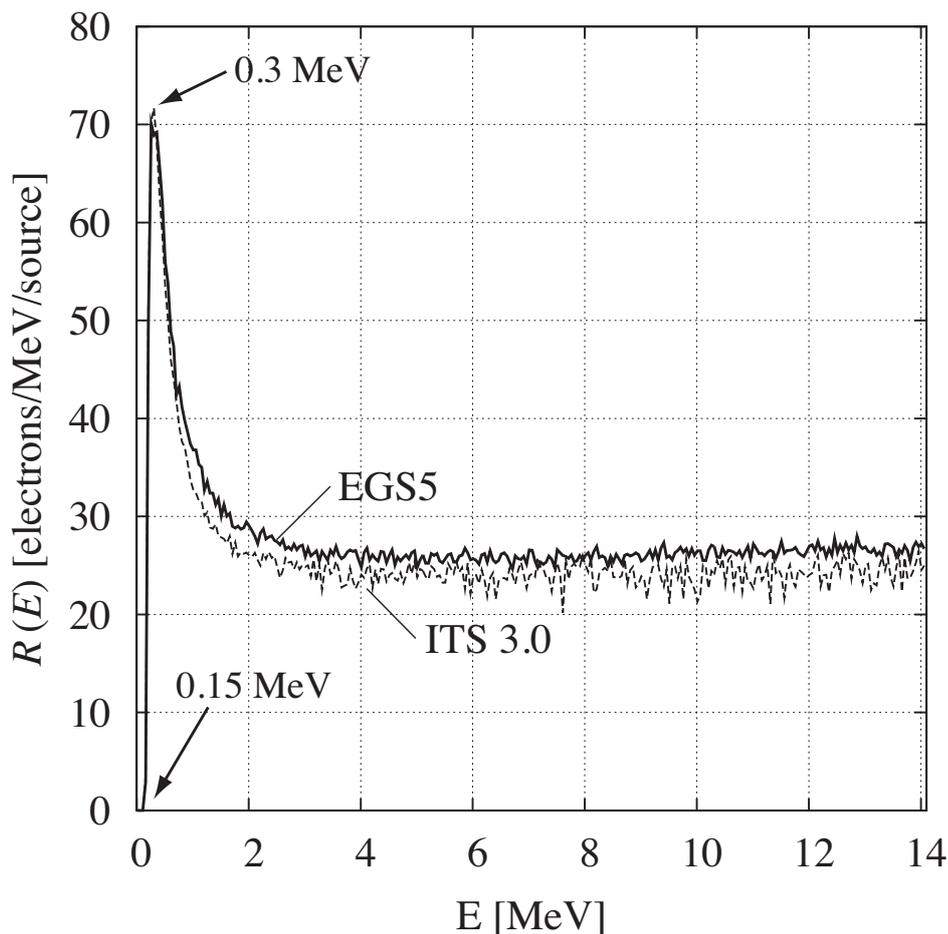


図 4.11: 入射電子エネルギーにおける電離箱のレスポンス。実線が EGS5 計算、破線が ITS 3.0 計算を示す。

近のエネルギーを持った電子は、電離箱のアルミ窓を通過するときエネルギーが低下する。このときのエネルギーの電子の阻止能は大きくなり、空気層に付与するエネルギーも大きくなるためピークとして見える。電離箱の出力の計算値は、

$$I = \int_{E_{\text{cut}}}^{E_0} \frac{d\eta(E)}{dE} R(E) dE \quad (4.3)$$

で与えられる。ここで、 E_0 は、ターゲットに入射する電子ビームのエネルギーである。 E_{cut} はカットオフエネルギーであり、計算では 1 keV に設定している。EGS5 コードによる計算値 (I_{EGS5}) と ITS 3.0 コードによる計算値 ($I_{\text{ITS3.0}}$) を、式 (4.3) を用いて計算した。

また電子後方散乱係数は、

$$\eta = \int_{E_{\text{cut}}}^{E_0} \frac{d\eta(E)}{dE} dE \quad (4.4)$$

で与えられる。EGS5コードによる計算値(η_{EGS5})とITS 3.0コードによる計算値($\eta_{\text{ITS3.0}}$)を、式(4.4)を用いて計算した。

4.3.2 結果および議論

I と η の比

図4.12に I_{tabata} に対する I_{EGS5} の比と、 I_{tabata} に対する $I_{\text{ITS3.0}}$ の比をそれぞれ示す。 I_{EGS5} と I_{tabata} 、 $I_{\text{ITS3.0}}$ と I_{tabata} はそれぞれ1.5倍と1.3倍以内で一致している。その差は、Beターゲットの場合に最大であり、原子番号の増加とともに1に近づく。ここで $I_{\text{EGS5}}/I_{\text{tabata}}$ よりも $I_{\text{ITS3.0}}/I_{\text{tabata}}$ の値が1に近い。この差の理由は、次節にて述べる。

図4.13に η_{tabata} に対する η_{EGS5} の比と、 η_{tabata} に対する $\eta_{\text{ITS3.0}}$ の比をそれぞれ示す。 η_{EGS5} と η_{tabata} 、 $\eta_{\text{ITS3.0}}$ と η_{tabata} はそれぞれ2.4倍と1.5倍以内で一致している。ここで $I_{\text{EGS5}}/I_{\text{tabata}}$ よりも $\eta_{\text{EGS5}}/\eta_{\text{tabata}}$ の値が1に近い。この違いは、電離箱のレスポンスが前者の比($I_{\text{EGS5}}/I_{\text{tabata}}$)の計算で考慮されているためである。

EGS5とITS3.0コードのエネルギーロスステップの差

1.3.4で述べたように、電子・光子輸送計算コードにおけるエネルギーロスステップは、ITS 3.0コードが採用しているClass Iモデルと、EGS5コードが採用しているClass IIモデルがある。図4.14にITS 3.0とEGS5コードの電子輸送のエネルギーロスステップの概念図を示す。ITS 3.0コードにおいて、Beのような原子番号の低い物質($N_{\text{substep}} = 2$)は、Auのような原子番号の高い物質($N_{\text{substep}} = 13$)よりもサブステップ間隔が広い。また、電子は後方に散乱されてターゲット表面に戻ってくる間に、少なくとも二つのサブステップを通過しなければ行けない(図4.14のA点からB点の間)。一方EGS5コードのエネルギーロスステップは、ランダムなステップ間隔である。このため、ITS 3.0コードにおける後方散乱電子の経路長は、EGS5コードのそれよりも長い。結果として、ITS 3.0コードによる後方散乱電子の数は、EGS5コードの場合よりも少なくなる。特に、Beターゲットなどの原子番号の小さい(サブステップ間隔が広い)物質においてその差は顕著である。ITS 3.0コードにて、Beターゲットにおけるステップ当たりの電子エネルギーロス、式(1.13)により約8.3%である。6.08 MeVの入射電子エネルギーにおいて、後方散乱電子の最大エネルギーは5.58 MeVであり、この値は図4.10で示したBeターゲットにおけるITS 3.0コードのスペクトルの最大値に相当する。

EGS5とITS 3.0コードに用いた計算の電子のカットオフエネルギーは1 keVに設定しており、このエネルギー以下になると電子のヒストリーは終了する。しかしながら、ITS 3.0コードにおいて、このカットオフエネルギーとは別に入射エネルギーに依存した実効的なカットオフエネルギーが存在する。ITS 3.0コードにおいて、メジャーステップ数の初期値は64に設定されている。 $E_0 = 6.08$ MeVのとき、式(1.13)により $E_{64} = 0.028$ MeVであり、この値はITS 3.0コードにおける実効的なカットオフエネルギーである。一方で、後方散乱のエネルギースペクトルの低エネルギー領域は、原子番号の小さいターゲットにおいて支配的である(図4.10参照)。このため、原子番号の

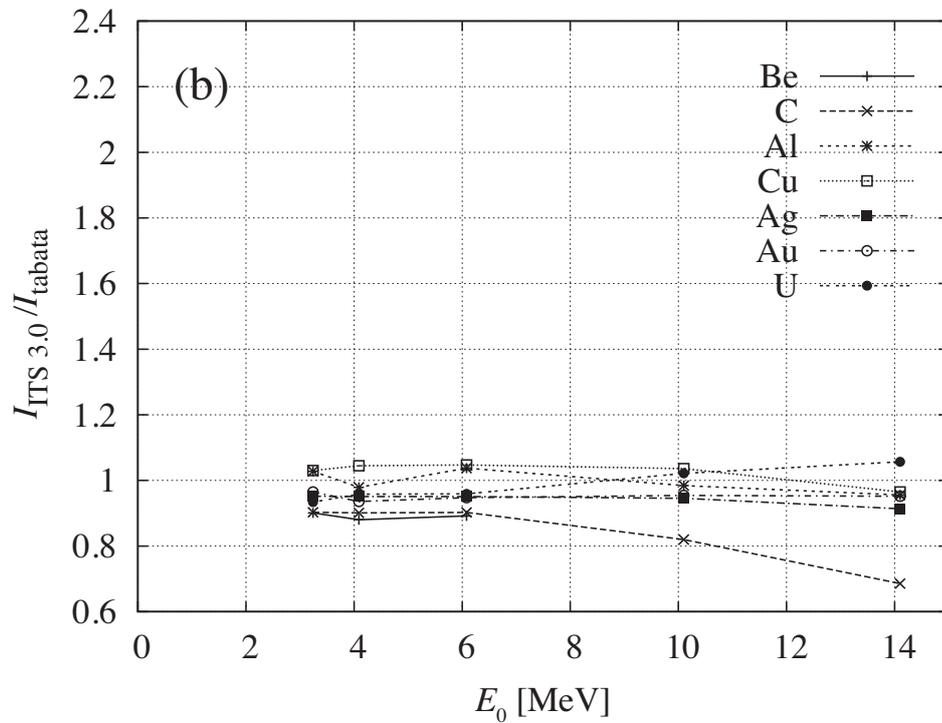
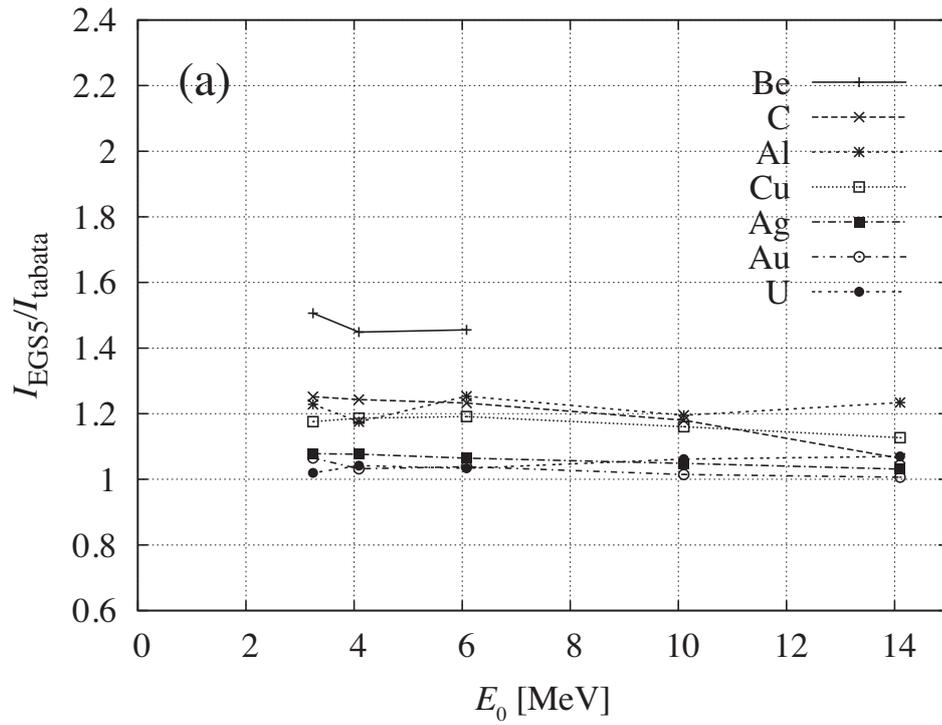


図 4.12: (a) I_{tabata} に対する I_{EGS5} の比、および (b) I_{tabata} に対する $I_{\text{ITS3.0}}$ の比。

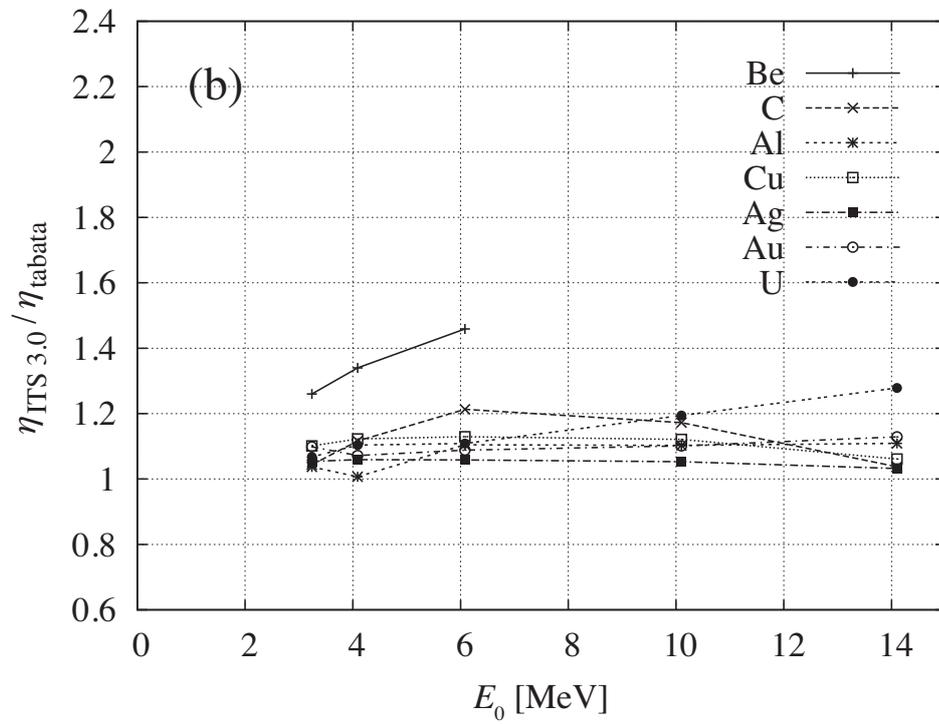
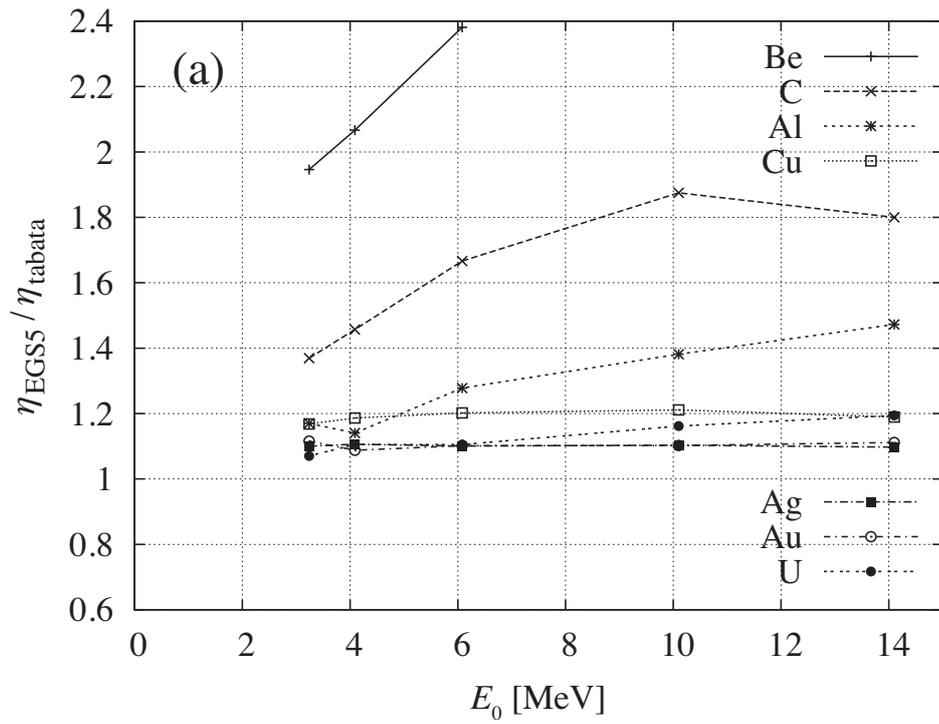


図 4.13: (a) η_{tabata} に対する η_{EGS5} の比、および (b) η_{tabata} に対する $\eta_{\text{ITS3.0}}$ の比。

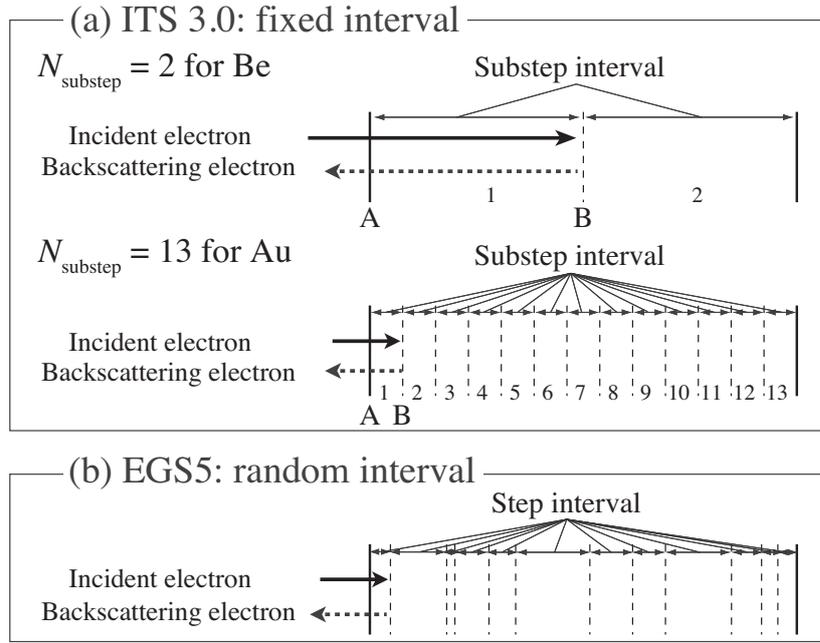


図 4.14: (a) ITS 3.0 コード、(b) EGS5 コードにおける電子輸送のエネルギーロスステップの概念図。

小さい物質において、この実効的なカットオフエネルギーは後方散乱電子に大きく影響を及ぼす。図 4.15 に 6.08 MeV の電子が Be ターゲットに入射する場合の N_{substep} の関数とした $\eta_{\text{ITS3.0}}$ を示す。 η_{tabata} と $\eta_{\text{EGS5-0.028}}$ も比較のため合わせてプロットしている。ここで $\eta_{\text{EGS5-0.028}}$ は、ITS 3.0 コードの計算と同じ実効的なカットオフエネルギーで比較するため、 $E_{\text{cut}} = 0.028$ MeV に設定した場合の EGS5 コードを用いた計算値である。 N_{substep} が 2 のデフォルト値の場合、 $\eta_{\text{ITS3.0}}$ は $\eta_{\text{EGS5-0.028}}$ よりも η_{tabata} に近い。このことは、Ito らによる ITS 3.0 コードを用いた計算が Tabata の実験値と良く一致していたことの原因を示している。しかしながら、 N_{substep} の増加とともに $\eta_{\text{ITS3.0}}$ は増加し、 $N_{\text{substep}} = 32$ のときには $\eta_{\text{EGS5-0.028}}$ により近い。 $N_{\text{substep}} = 32$ における $\eta_{\text{ITS3.0}}$ の値は、 $N_{\text{substep}} = 2$ のときの値よりもより正確であると考えられる。従って、ITS 3.0 の計算結果が Be ターゲットに関して $I_{\text{ITS3.0}}$ と一致していたことは、 N_{substep} の影響による偶然の結果であったということが出来る。

EGS5 による電離箱の測定電流増倍係数 f の計算

前節において、原子番号が小さい物質における $\eta_{\text{ITS3.0}}$ は、実効的なカットオフエネルギーとサブステップの間隔が広いことに起因して、過小に計算することを指摘した。このことから、これ以降は Tabata の測定値と EGS5 コードの計算値のみを比較する。EGS5 コードによる計算値を用いて電離箱による測定電流増倍係数を、

$$f_{\text{EGS5}} = I_{\text{EGS5}} / \eta_{\text{EGS5}} \quad (4.5)$$

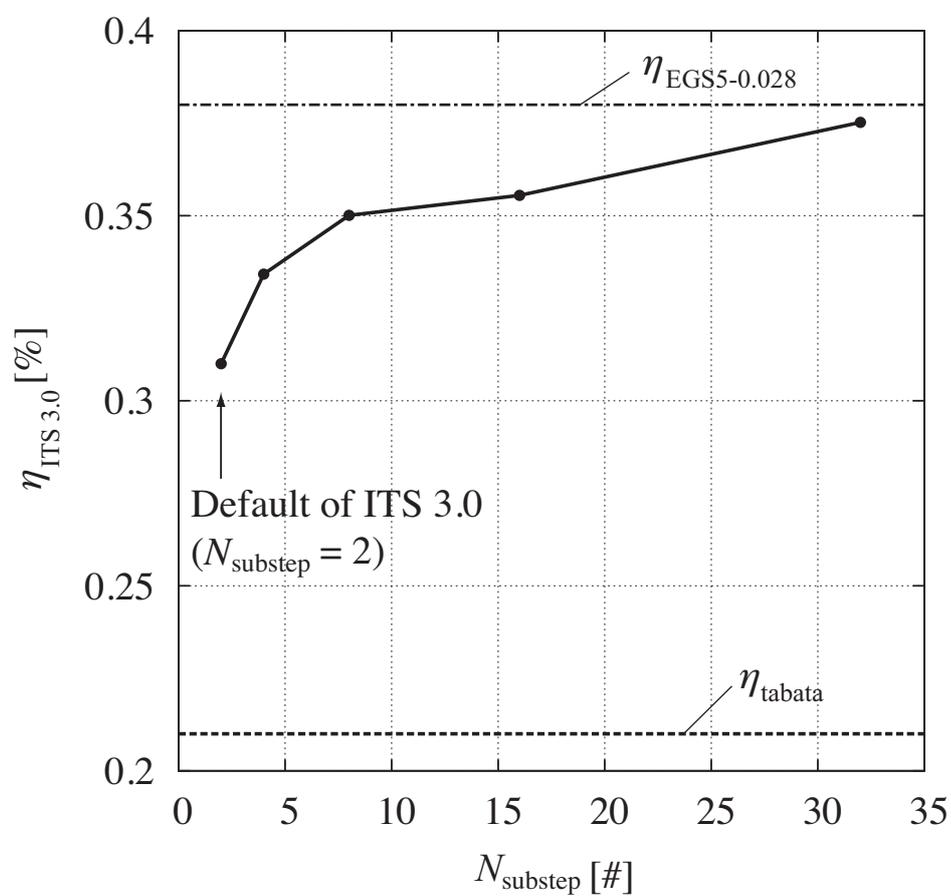


図 4.15: 入射電子エネルギーが 6.08 MeV の Be ターゲットにおける N_{substep} の関数としての $\eta_{\text{ITS}3.0}$ の変化。実線および黒丸は $\eta_{\text{ITS}3.0}$ 、破線は η_{tabata} 、一点鎖線は $\eta_{\text{EGS5-0.028}}$ を示す。

として求めた。図 4.9 に入射エネルギーを関数とした f_{EGS5} と $f_{\text{tabata}}(E_{\text{av}})$ を示す。 f_{EGS5} と $f_{\text{tabata}}(E_{\text{av}})$ の差は、Be と C の原子番号の小さいターゲットにおいて最も大きく、この差はターゲットの原子番号が増えるにつれて減少する。Be ターゲットにおけるエネルギースペクトルの低エネルギー領域は、Au ターゲットの場合よりも支配的であり (図 4.10 参照)、また、電離箱のレスポンスは約 0.3 MeV 付近でピークに達し、0.15 MeV 以下はゼロである (図 4.11 参照)。エネルギースペクトルは、式 (4.2) で得られるレスポンスによって増倍される。電離箱のレスポンスは、低エネルギー領域 (~ 2 MeV) で変化が大きいため、原子番号の小さいターゲットの f_{EGS5} に対して、大きく影響を及ぼす。結果として、原子番号の小さいターゲットにおける f_{EGS5} は、原子番号の高いターゲットのそれよりも小さい。これは、金ターゲットにおいて算出した $f_{\text{tabata}}(E_{\text{av}})$ をすべてのターゲットにおいて適用したことが、原子番号の小さいターゲットにおいて無視できない誤差をもつことを示唆する。

EGS5 コードと Tabata によって得られた E_{av} の値は、Au や U のような原子番号の高いターゲットにおいて最大 1.5 倍の差がある。しかし電子のエネルギーにおける電離箱のレスポンスは、0.3 MeV 以上のエネルギーにおいてほとんど変化しない (図 4.11 参照)。それゆえ、Au や U のような原子番号の大きいターゲットにおいて、電離箱のレスポンスの影響を受けないため、 $f_{\text{tabata}}(E_{\text{av}})$ と f_{EGS5} 間の差は小さい。

計算値による電子後方散乱係数の補正

表 4.2 に二つの実験値 (η_{tabata} 、 $\eta_{\text{corrected-tabata}}$) と EGS5 コードによる計算値 η_{EGS5} を示す。 η_{tabata} は、Tabata が与えた電子後方散乱係数の実験値である。また、 $\eta_{\text{corrected-tabata}}$ は、

$$\eta_{\text{corrected-tabata}} = I_{\text{tabata}}/f_{\text{EGS5}} \quad (4.6)$$

で与えられる。 $\eta_{\text{corrected-tabata}}$ は、便宜上他の実験値や計算値と比較するために示している。 $f_{\text{tabata}}(E_{\text{av}})$ と f_{EGS5} の差に起因して、 $\eta_{\text{corrected-tabata}}$ は、 η_{tabata} よりも大きい。Au ($Z = 79$) ターゲットにおける $\eta_{\text{corrected-tabata}}$ は、ファラデーカップを用いて測定された値であり、補正する必要はない。ここでは、EGS5 コードによる計算の妥当性を評価するために、Au ターゲットにおける $\eta_{\text{corrected-tabata}}$ を示している。式 (4.5) と (4.6) から、 $\eta_{\text{EGS5}}/\eta_{\text{corrected-tabata}}$ と $I_{\text{EGS5}}/I_{\text{tabata}}$ は同一である。結果として、すべてのターゲットとエネルギーにおいて $\eta_{\text{EGS5}}/\eta_{\text{corrected-tabata}}$ の比は、1.5 以下である。

表 4.2: 後方散乱係数

Z	エネルギー [MeV]	後方散乱係数 [%]		
		η_{tabata}	$\eta_{\text{corrected-tabata}}$	η_{EGS5}
4	3.24	0.37 ± 0.05	0.48	0.72
	4.09	0.30 ± 0.04	0.43	0.62
	6.08	0.21 ± 0.02	0.34	0.50
6	3.24	0.92 ± 0.12	1.01	1.26
	4.09	0.70 ± 0.09	0.82	1.02
	6.08	0.45 ± 0.05	0.61	0.75
	10.1	0.32 ± 0.03	0.51	0.60
	14.1	0.30 ± 0.02	0.51	0.54
13	3.24	4.0 ± 0.5	3.81	4.68
	4.09	3.2 ± 0.4	3.11	3.65
	6.08	1.8 ± 0.2	1.84	2.30
	10.1	0.97 ± 0.08	1.12	1.34
	14.1	0.72 ± 0.06	0.86	1.06
29	3.24	12.5 ± 1.4	12.41	14.6
	4.09	10.2 ± 1.2	10.20	12.1
	6.08	6.84 ± 0.67	6.90	8.22
	10.1	3.65 ± 0.30	3.81	4.42
	14.1	2.43 ± 0.21	2.56	2.89
47	3.24	20.9 ± 2.2	21.34	23.0
	4.09	17.9 ± 1.8	18.39	19.8
	6.08	12.9 ± 1.1	13.34	14.2
	10.1	7.35 ± 0.56	7.73	8.11
	14.1	4.83 ± 0.42	5.14	5.30
79	3.24	30.2 ± 2.1	(31.64)*	33.7
	4.09	27.4 ± 1.9	(28.88)	29.8
	6.08	20.6 ± 1.4	(21.87)	22.7
	10.1	12.7 ± 0.9	(13.80)	14.0
	14.1	8.54 ± 0.57	(9.43)	9.49
92	3.24	34.2 ± 2.5	35.90	36.6
	4.09	29.5 ± 2.1	31.29	32.6
	6.08	22.8 ± 1.6	24.39	25.2
	10.1	13.6 ± 1.0	14.89	15.8
	14.1	8.96 ± 0.82	10.00	10.7

*Au ($Z = 79$) ターゲットにおける値は妥当性の検証のために示す。

4.4 Molière 多重散乱分布へのスピン相対論効果の適用

4.4.1 計算方法

EGS5 コードにおける Spin-Molière モデルのサンプリングは、Idoeta と Legarda[26] によって提供された原子番号、電子エネルギー、散乱角度の関数の Mott/Rutherford 比を用いて、以下の手順で行った。

1. EGS5 コードの既存部分である NoSpin-Molière モデルを用いて、散乱角度をサンプリングにより決定する。
2. Z 、 E 、散乱角度 θ における Mott/Rutherford 比を計算する。
3. 乱数 ξ ($0 \leq \xi \leq 1$) を生成する。
4. 乱数 $\xi < \text{Mott/Rutherford 比}$ の場合、1. に戻る。

上記の手順における Spin-Molière モデルを組み込んだ計算プログラムとフローチャートは補遺 C に示す。

4.4.2 結果と議論

図 4.16 に Spin-GS モデル、NoSpin-Molière モデル、Spin-Molière モデルを用いて計算した電子後方散乱係数を示す。理論的には、keV 領域において Molière モデルに比べて GS モデルの精度がよい。これは、Molière モデルは 100 回以上の弾性散乱を起こす経路長が必要であるが、keV 領域では弾性散乱の回数が少なくなり、計算精度が低下するためである。keV 領域において、二つの Molière モデル (NoSpin-Molière、Spin-Molière) の計算値が振動しているのはこれに起因している。

また、理論的に MeV 領域においてスピン相対論効果の影響が大きい。MeV 領域において、スピン相対論効果を考慮しているモデル (Spin-GS、Spin-Molière) が良く一致し、NoSpin-Molière モデルと差があるのはこのためである。このことから Spin-Molière モデルは、MeV 領域において Spin-GS の代替として使用することが可能である。

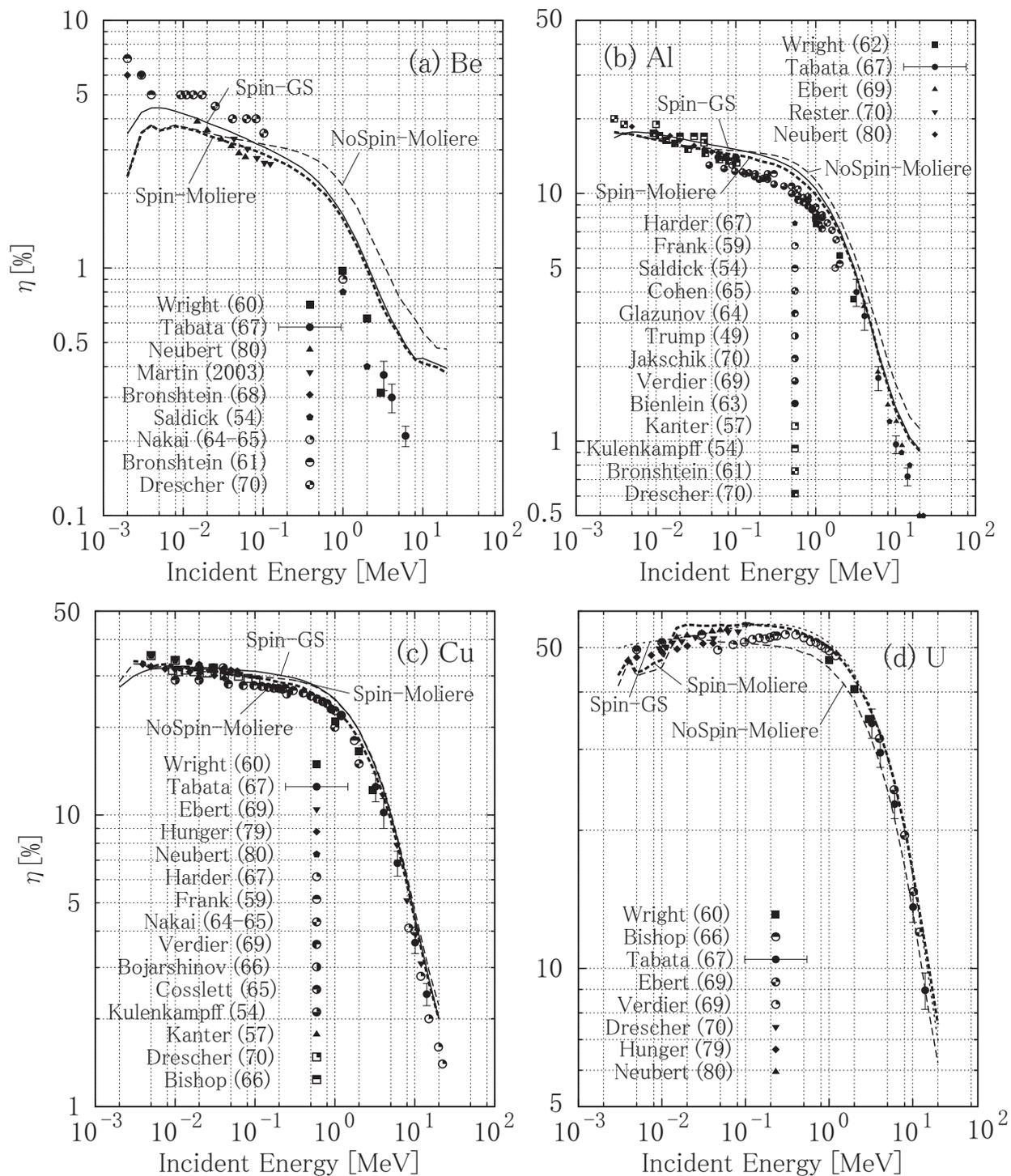


図 4.16: Spin-GS モデル、NoSpin-Molière モデル、Spin-Molière モデルによる (a) Be、(b) Al、(c) Cu、(d) U ターゲットの電子後方散乱係数。

4.5 まとめ

本研究は以下で述べる3つのテーマに分けて、EGS5コードの電子輸送の検証を行った。

電子後方散乱係数のベンチマーク計算

EGS5コードにおける電子輸送の検証として、他の汎用電子・光子輸送計算コード(EGSnrc, ITS 3.0, PENELOPE)とともに電子後方散乱係数のベンチマーク計算を行い、実験値との比較を行った。EGS5、EGSnrc、PENELOPEコードは、すべてのターゲット、エネルギー領域において20%以内で一致した。実験値との比較では、UからAlにおいて良く再現した。一方、BeやCなどの原子番号が低いターゲットにおいて、実験値間、計算値間ともに差が顕著であった。このような実験値間に差がある領域において、どの計算コードが正しいか判断するためには、個々の実験値と個別に比較し、その実験の測定条件と同じ条件下で計算する必要がある。また、原子番号が小さくなるにつれ、計算値間、実験値間および計算値と実験値の間の差は顕著となる。このなかで、BeターゲットのMeV領域において、EGS5コードの計算値と実験値の差が最も大きい。

EGS5コードによるTabataの後方散乱実験の再評価

上記のことから、BeターゲットのMeV領域を含み系統的に電子後方散乱係数を測定しているTabataの実験値に注目し、Tabataが後方散乱電子の測定に用いた電離箱の感度の再評価を行った。これにより、EGS5コード計算と同条件下の測定量で比較することが可能となった。Tabataの実験値とEGS5コードによる計算値の差は、再評価前で最大2.4倍だったものが再評価後には1.5倍以内で一致した。

ITS 3.0コードにおける電子後方散乱係数の値は、電子輸送における実効的なカットオフエネルギーと広いサブステップ間隔のため、過小に値を見積もっていた。この値が、再評価前のTabataの測定値と偶然近い値を示していた。電子後方散乱係数のベンチマーク計算において、計算値が実験値を再現すれば、その計算に用いている電子・光子輸送計算コードの電子輸送モデルやその取扱いは妥当であると判断できる。しかしながらその前提として、提供されている実験値と計算値は同条件下の測定量であることが重要である。

Molière多重散乱分布へのスピン相対論効果の適用

EGS5コードにSpin-Molièreモデルを適用し、電子後方散乱係数の計算を行った。スピン相対論効果の影響が大きいMeV領域では、Spin-Molièreモデルの計算はSpin-GSモデルの計算と良く一致した。Spin-GSモデルは、数十MeV以上の計算において、ルジャンドル多項式の収束が悪くなり、計算に必要なデータ作成に非常に時間が必要となる。このことから、Spin-Molièreモデルは、数十MeV以上の電子輸送の計算において、Spin-GSモデルの代替として利用可能である。

結論

これら3つテーマの電子輸送による研究によって、EGS5コードの電子後方散乱係数の系統的な比較ができ、EGS5コードの用いている電子輸送モデルの妥当性を検証した。

第5章 結論

本研究では、電子・光子輸送計算コード EGS5 の高エネルギーと低エネルギーへの拡張と、既存のエネルギー領域における電子輸送の検証のため、以下に示す3つのテーマを行った。

LPM 効果および誘電による抑制効果の組み込み

EGS5 コードの高エネルギー領域への拡張のために、LPM 効果と誘電による抑制効果を組み込んだ。この抑制効果を組み込んだ EGS5 コードは、Anthony らが示した 8 GeV、25 GeV 電子の制動放射における LPM および誘電による抑制効果の実験値を良く再現した。また、Hansen らが示した 149、207、287 GeV 電子の制動放射における LPM 効果の実験値を良く再現した。高エネルギー領域では、制動放射と電子対生成が支配的であるため、これらの過程に寄与する LPM および誘電による抑制効果が重要である。その抑制効果の影響をはっきりと受ける実験値を EGS5 コードの計算値が良く再現したことから、EGS5 コードはこのエネルギー領域で、精度良い計算が可能となったといえる。このことにより、EGS5 コードは数十 GeV 以上のエネルギー領域における、放射検出器開発や遮へい計算に利用することができる。

放射光施設における低エネルギー散乱 X 線の測定

EGS5 コードの 8 keV 以下の光子輸送の検証のために、KEK-PF においてターゲットからの特性 X 線の測定実験を行った。測定には、真空チェンバーに直接設置可能な Si 検出器を用いることで、これまでの Ge 検出器では測定が困難であった、より低エネルギーの特性 X 線の測定が可能となった。4 回のマシンタイム (2008 年 2 月、11 月、2009 年 11 月、2010 年 2 月) において、8 keV と 20 keV の単色 X 線を、2 種類の Si 検出器 (Amptek-Si、Vortex-Si) を用いて計 6 回の特性 X 線の測定を行った。これらの測定にて、これまで EGS5 コードの検証として得ることができていなかった、2 keV 以上の特性 X 線の測定データを得た。EGS5 の計算値は、2008 年 11 月の Amptek-Si 以外の実験値を 11% 以内で再現している。

2008 年 11 月の Amptek-Si の実験値は、8 keV 入射の場合、EGS5 の計算値は実験値を 13 ~ 20% 過大評価している。また、20 keV 入射光子の場合、Si の K-X 線より高いエネルギーにおいて 10% 以内で一致しているものの、Al の K-X 線において 30% の過大評価となっている。この実験における再現性の条件を調査し、この測定値の過小評価の原因を明確にする必要がある。これまでの測定は、8 keV 以下の特性 X 線のみを対象にしており、EGS5 コードが採用している特性 X 線の蛍光収率とその取扱いのみ

の検証を行った。ドップラー広がりや束縛コンプトンの近似的な取扱いを組み込んだ EGS5 コードは、Namito らによって 8 keV 以上において実験値を良く再現することが示された。今後 8 keV 以下においてもコンプトン散乱の測定を行い、EGS5 コードの計算値を検証する必要がある。

電子後方散乱における電子輸送の検証

EGS5 コードにおける電子輸送の検証として、他の汎用電子・光子輸送計算コード (EGSnrc, ITS 3.0, PENELOPE) とともに電子後方散乱係数のベンチマーク計算を行い、実験値との比較を行った。EGS5、EGSnrc、PENELOPE コードは、すべてのターゲット、エネルギー領域において 20% 以内で一致した。EGS5 コードと他の計算コードは、原子番号の大きい物質の MeV 領域において実験値を良く再現している。また、原子番号が小さい物質になるにつれ、計算値間、実験値間および計算値と実験値の間の差は顕著となる。このなかで、Be ターゲットの MeV 領域において、EGS5 コードの計算値と実験値の差が最も大きい。一方、Be や C などの原子番号が低いターゲットにおいて、実験値間、計算値間ともに差が顕著であった。このような実験値間に差がある領域において、どの計算コードが正しいか判断するためには、個々の実験値と個別に比較し、その実験の測定条件と同じ条件下で計算する必要がある。

この電子後方散乱係数の比較において、EGS5 コードの計算値と実験値に最も差があった Be ターゲットの MeV 領域に注目し、この領域を含み系統的に電子後方散乱係数を測定している Tabata[58] の実験値の再評価を行った。これにより、EGS5 コード計算と同条件下の測定量で比較することが可能となった。Tabata の実験値と EGS5 コードによる計算値の差は、再評価前で最大 2.4 倍だったものが再評価後には 1.5 倍以内で一致した。

EGS5 コードに、新たに Molière 多重散乱分布モデルにスピン相対論効果を適用し (Spin-Molière)、既存の二つのモデル (NoSpin-Molière、Spin-GS) と合わせて電子後方散乱係数の計算を行った。スピン相対論効果の影響が大きい MeV 領域では、Spin-Molière モデルの計算は Spin-GS モデルの計算と良く一致した。Spin-GS モデルは、数十 MeV 以上の計算において、ルジャンドル多項式の収束が悪くなり、計算に必要なデータ作成に長い時間が必要となる。このことから、Spin-Molière モデルは、数十 MeV 以上の電子輸送の計算において、Spin-GS モデルの代替として利用可能である。これらの電子輸送における研究によって、EGS5 コードの電子後方散乱係数の系統的な比較ができ、EGS5 コードの用いている電子輸送モデルの妥当性を検証した。

本研究によって、EGS5 コードの既存の電子輸送の精度検証を行い、またより広範囲のエネルギー領域に適用が可能となったことから、EGS5 コードの汎用性を向上させた。

補遺 A 変数および定数

本論文で使用した主な変数および定数をまとめて示す。定数の値は”Review of Particle Properties” [89] から引用した。

表 A.1: 変数一覧表

記号	内容	単位
k_0	入射光子エネルギー	MeV
k_c	散乱光子エネルギー	MeV
m	電子の静止質量	MeV/ c^2
X_0	放射長	cm
n	電子密度	electron/cm ³
Z	原子番号	
A	原子量	
τ	mc^2 を単位とした電子の運動エネルギー	
β	光の速さに対する電子の速さの比	
N	単位体積あたりの原子数	atom/cm ³
E_-	生成電子のエネルギー	MeV
E_+	生成陽電子のエネルギー	MeV
k	放出光子エネルギー	MeV

表 A.2: 定数一覧表

記号	内容	値
c	光の速さ	299 792 458 m s ⁻¹
mc^2	電子の静止エネルギー	0.510 999 06 MeV
r_0	電子の古典論的半径	$2.817 940 92 \times 10^{-15}$ m
\hbar	プランク換算定数	$6.582 122 0 \times 10^{-22}$ MeV s
N_a	アボガドロ定数	$6.022 141 5 \times 10^{23}$ mol ⁻¹
α	微細構造定数	$7.297 352 533 \times 10^{-3}$
e	電気素量	$1.602 176 462 \times 10^{-19}$ C

補遺 B LPMと誘電による抑制効果の計算プログラム

本章では、2章のLPMと誘電による抑制効果断面積の組み込みにおいて、EGS5コードの修正および追加を行った箇所のフローチャートおよびプログラムリストを示す。

B.1 フローチャート

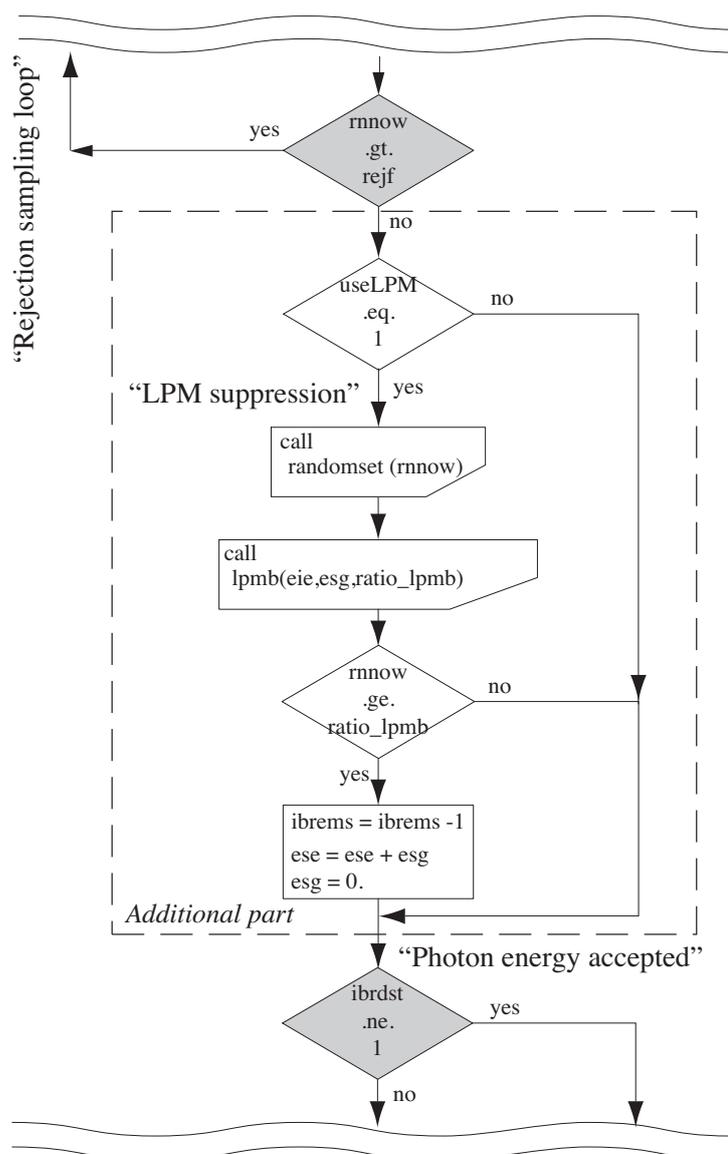


図 B.1: BREMS サブルーチンの追加箇所。

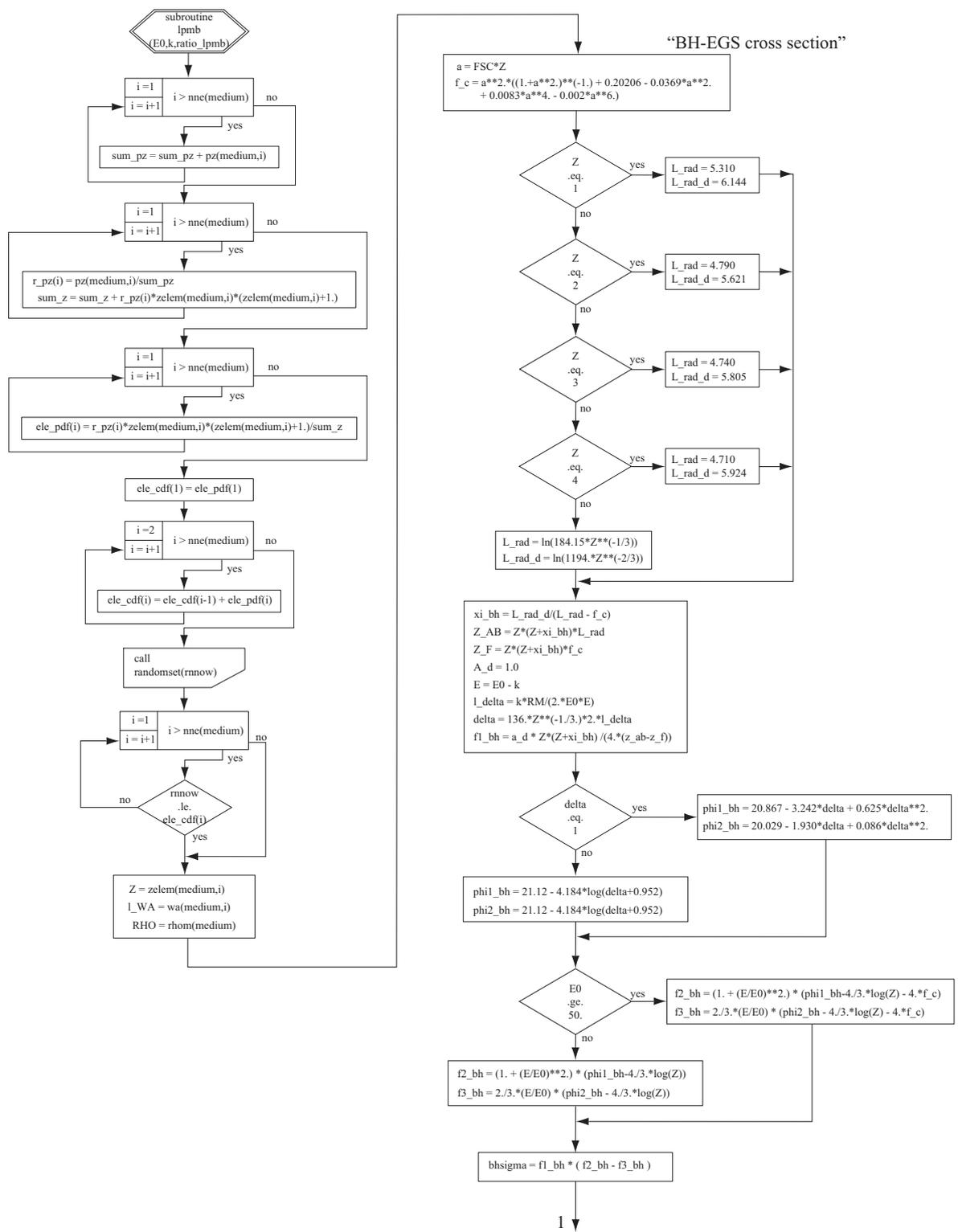


図 B.2: RMGBH サブルーチン。

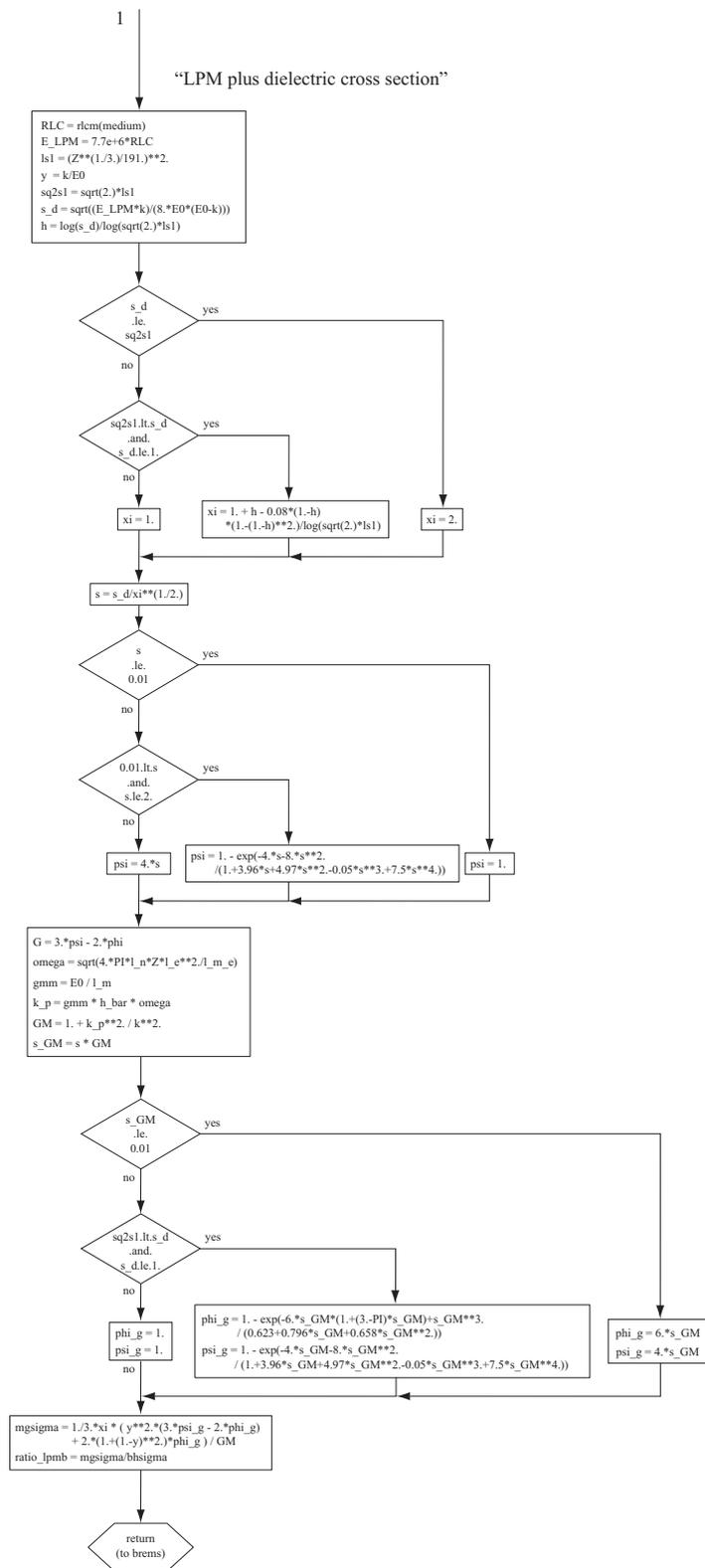


図 B.2: RMGBH サブルーチン (続き)。

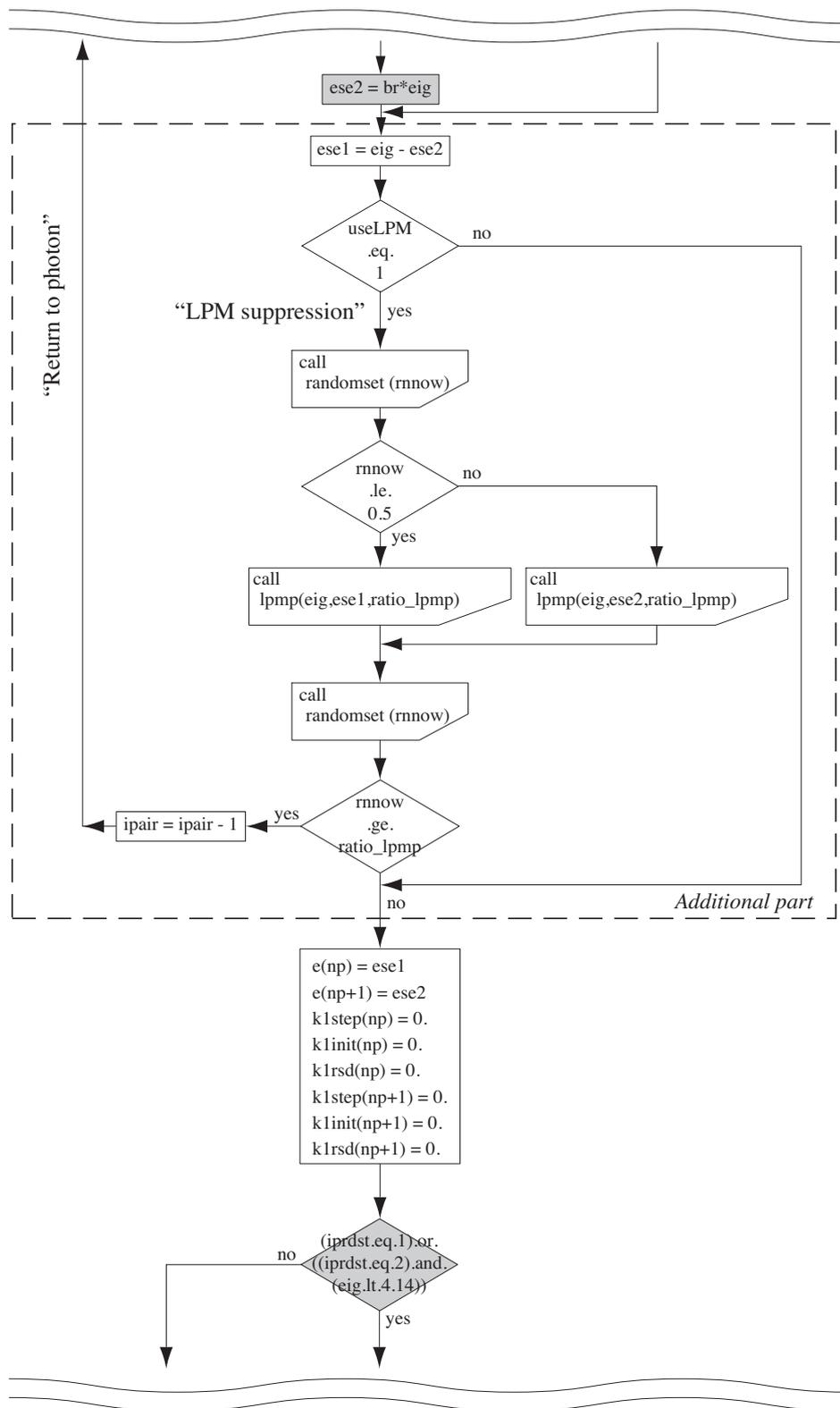


図 B.3: PAIR サブルーチンの追加箇所。

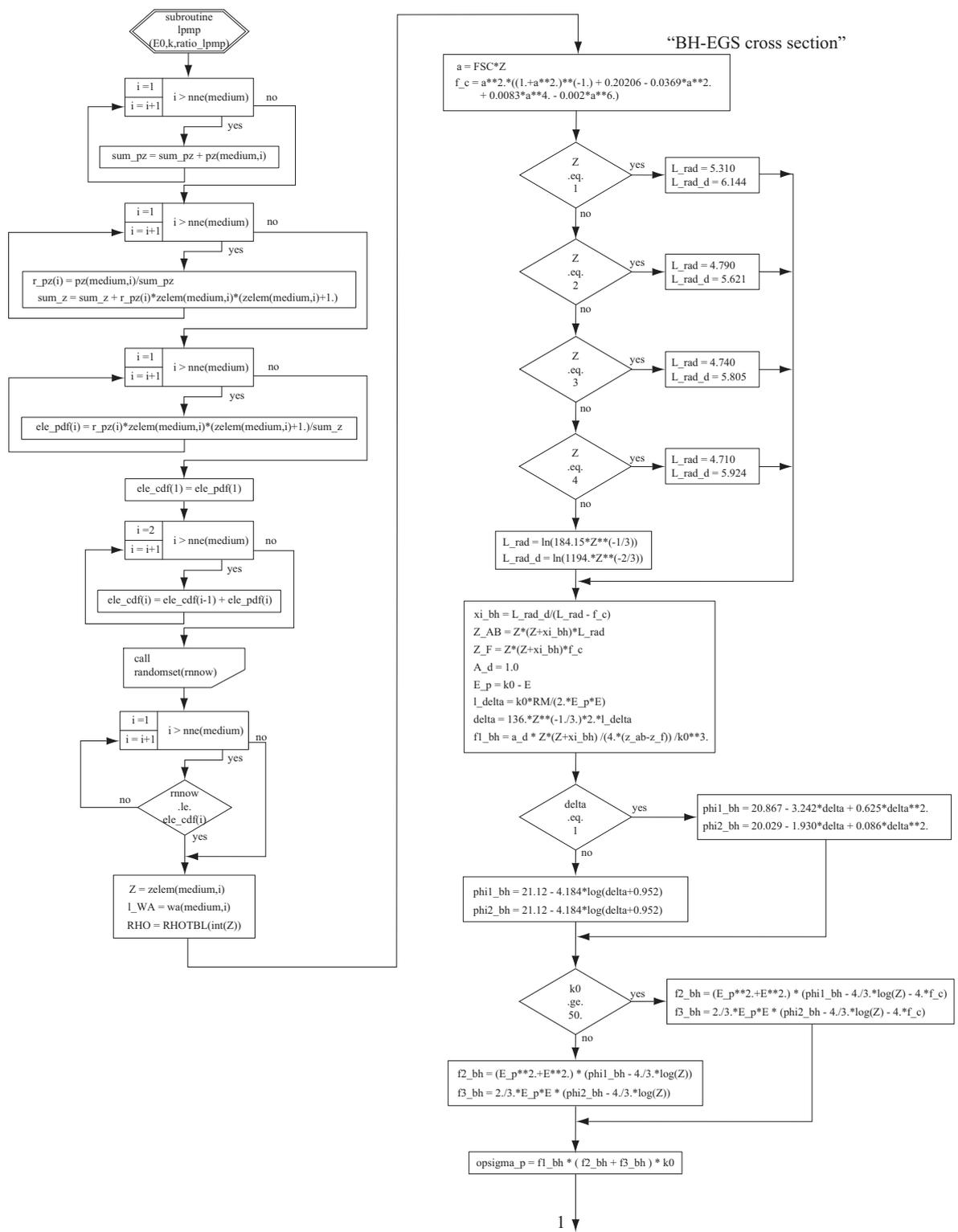


図 B.4: MGOP サブルーチン。

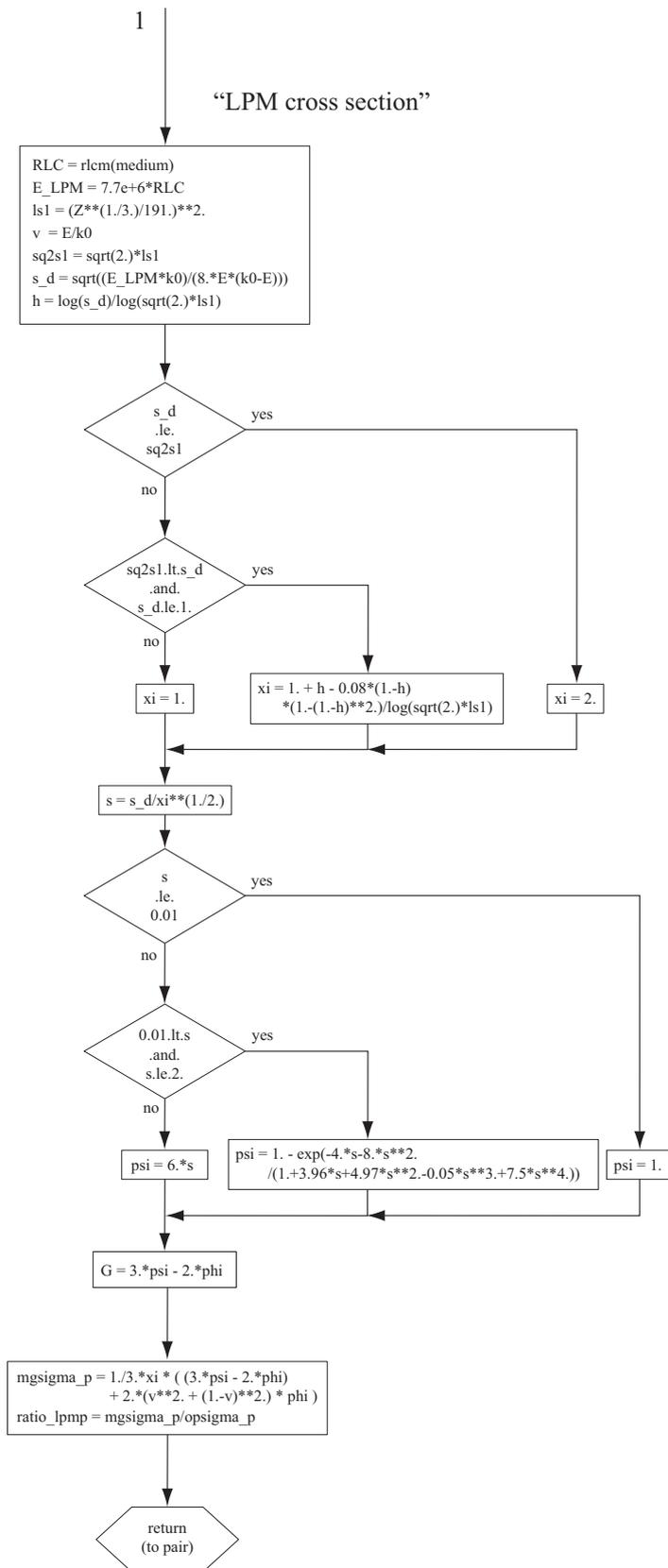


図 B.4: MGOP サブルーチン (続き)。

B.2 プログラムリスト

B.2.1 BREMS サブルーチン

```
!-----egs5_brems.f-----
! Version: 051219-1435
! Reference: SLAC-R-730/KEK-2005-8
!-----
!23456789|123456789|123456789|123456789|123456789|123456789|123456789|12

subroutine brems

implicit none

include 'include/egs5_h.f'           ! Main EGS5 "header" file

include 'include/egs5_brempr.f'     ! COMMONs required by EGS5 code
include 'include/egs5_stack.f'
include 'include/egs5_thresh.f'
include 'include/egs5_uphiot.f'
include 'include/egs5_useful.f'

include 'include/counters.f'       ! Additional (non-EGS5) COMMONs

include 'include/egs5_media.f'     ! for useLPM

real*8 rnow,rnow1,rnow2           ! Arguments

real*8                               ! Local variables
* eie,                               ! Total energy of incident electron
* esg,                               ! Energy of secondary photon
* ese,                               ! Total energy of secondary electron
* abrems,p,h,br,delta,refj,ztarg,tteie,ttese,esedei,y2max,
* rjarg1,rjarg2,rjarg3,y2tst,y2tst1,rejmin,rejmid,rejmax,rejtop,
* rejtst,t

integer lvx,lv10,lv1,ldistr

real*8 AILN2,AI2LN2               ! Local parameters
data
* AILN2/1.44269E0/,                 ! 1/ln2
* AI2LN2/0.7213475E0/              ! 1/2ln2

c -----
c Added by Y. Kirihara 13.June.2009
c Rejection by Migdal/Bethe-Heitler
c -----
real*8 ratio_mgbh
integer useLPM

ibrems = ibrems + 1              ! Count entry into subroutine

eie = e(np)
np = np + 1
if (eie .lt. 50.0) then         ! Choose Bethe-Heitler distribution
  lvx = 1
  lv10 = 0
else                             ! Choose Coulomb-corrected Bethe Heitler distribution
  lvx = 2
  lv10 = 3
end if
abrems = float(int(AILN2*log(eie/ap(medium))))

! Start of main sampling-rejection loop
1 continue
  call randomset(rnow)

! Start of (1-br)/br
```

```

! subdistribution sampling
if (0.5 .lt. (abrems*alphi(lvx,medium) + 0.5)*rnnow) then
  call randomset(rnnow)
  idistr = abrems*rnnow
  p = pwr2i(idistr+1)
  lvl = lvl0 + 1
  call randomset(rnnow)
  if (rnnow .ge. AI2LN2) then
2    continue
    call randomset(rnnow)
    call randomset(rnnow1)
    call randomset(rnnow2)
    h = max(rnnow1,rnnow2)
    br = 1.0 - 0.5*h
    if (rnnow .gt. 0.5/br) go to 2
  else
    call randomset(rnnow)
    br = rnnow*0.5
  end if
  br = br*p
! Start of 2br subdistribution sampling
else
  call randomset(rnnow1)
  call randomset(rnnow2)
  br = max(rnnow1,rnnow2)
  lvl = lvl0 + 2
end if

esg = eie*br
if (esg .lt. ap(medium)) go to 1

ese = eie - esg
if (ese .lt. RM) go to 1
del = br/ese
! Check that Adelta
! and Bdelta > 0

if (del .ge. delpos(lvx,medium)) go to 1
delta = delcm(medium)*del
if (delta .lt. 1.0) then
  rejf = dl1(lvl,medium) + delta*(dl2(lvl,medium) +
*   delta*dl3(lvl,medium))
  else
  rejf = dl4(lvl,medium) + dl5(lvl,medium)*
*   log(delta + dl6(lvl,medium))
  end if
  call randomset(rnnow)
  if (rnnow .gt. rejf) go to 1

c -----
c Added by Y. Kiriara 14.June.2009
c Rejection by Migdal/Bethe-Heitler
c -----
c useLPM is to include the LPM effect in the bremsstrahlung.
c 0: not use.
c 1: rejection by rmgbh (the ratio of LPM and BH-EGS)
c 2: check subroutine branching ratio
call randomset(rnnow)
if (useLPM.eq.0) then
  go to 10
else if (useLPM.eq.1) then
  call rmgbh(eie,esg,ratio_mgbh)
  if (rnnow.ge.ratio_mgbh) then
    ! forget brems. ever existed.
    ibrems = ibrems - 1
    ese = ese + esg
    esg = 0.
  end if
else if (useLPM.eq.2) then
  call check_lpm(eie,esg,ratio_mgbh)
end if

```

```

10  continue
c  -----

! Set up new photon
if (ibrdst .ne. 1) then      ! Polar angle is m/E (default)
  theta = RM/eie
else                          ! Sample polar angle
  ztarg = zbrang(medium)
  tteie = eie/RM
  ttese = ese/RM
  esedei = ttese/tteie
  y2max = (PI*tteie)**2
  rjarg1 = 1.0 + esedei**2
  rjarg2 = 3.0*rjarg1 - 2.0*esedei
  rjarg3 = ((1.0 - esedei)/(2.0*tteie*esedei))**2
  y2tst1 = (1.0 + 0.0e0)**2
  rejmin = (4.0 + log(rjarg3 + ztarg/y2tst1))*
*   (4.0*esedei*0.0e0/y2tst1 - rjarg1) + rjarg2
  y2tst1 = (1.0 + 1.0e0)**2
  rejmid = (4.0 + log(rjarg3 + ztarg/y2tst1))*
*   (4.0*esedei*1.0e0/y2tst1 - rjarg1) + rjarg2
  y2tst1 = (1.0 + y2max)**2
  rejmax = (4.0 + log(rjarg3 + ztarg/y2tst1))*
*   (4.0*esedei*y2max/y2tst1 - rjarg1) + rjarg2
  rejtop = max(rejmin,rejmid,rejmax)

5  continue
   call randomset(rnnow)
   y2tst =rnnow/(1.0 - rnnow + 1.0/y2max)
   y2tst1 = (1.0 + y2tst)**2
   rejtst = (4.0 + log(rjarg3 + ztarg/y2tst1))*
*   (4.0*esedei*y2tst/y2tst1 - rjarg1) + rjarg2
   call randomset(rnnow)
   if (rnnow .gt. (rejtst/rejtop)) go to 5
   theta = sqrt(y2tst)/tteie
end if

call uphi(1,3)                ! Set direction cosines for photon
                              ! Put lowest energy particle on top of stack
if (esg .le. ese) then
  iq(np) = 0
  e(np) = esg
  e(np-1) = ese
  k1step(np) = 0.
  klinit(np) = 0.
  k1rsd(np) = 0.
else
  iq(np) = iq(np-1)
  iq(np-1) = 0
  e(np) = ese
  e(np-1) = esg
  t = u(np)
  u(np) = u(np-1)
  u(np-1) = t
  t = v(np)
  v(np) = v(np-1)
  v(np-1) = t
  t = w(np)
  w(np) = w(np-1)
  w(np-1) = t
  k1step(np) = k1step(np-1)
  k1step(np-1) = 0.
  klinit(np) = klinit(np-1)
  klinit(np-1) = 0.
  k1rsd(np) = k1rsd(np-1)
  k1rsd(np-1) = 0.

end if

! -----

```

```

return                                ! Return to ELECTR
end                                    ! -----

!-----last line of egs5_brems.f-----

```

B.2.2 PAIR サブルーチン

```

!-----egs5_pair.f-----
! Version: 051219-1435
! Reference: SLAC-R-730/KEK-2005-8
!-----
!23456789|123456789|123456789|123456789|123456789|123456789|123456789|12

subroutine pair

implicit none

include 'include/egs5_h.f'           ! Main EGS5 "header" file

include 'include/egs5_brempr.f'     ! COMMONs required by EGS5 code
include 'include/egs5_stack.f'
include 'include/egs5_thresh.f'
include 'include/egs5_uphiot.f'
include 'include/egs5_useful.f'

include 'include/counters.f'       ! Additional (non-EGS5) COMMONs

include 'include/egs5_media.f'     ! for useLPM

real*8 rnow,rnow1,rnow2,rnow3      ! Arguments

real*8                               ! Local variables
* eig,                               ! Energy of incident photon
* ese1,                             ! Total energy of secondary electron #1
* ese2,                             ! Total energy of secondary electron #2
* br,del,delta,rejf,ese,pse,ztarg,tteig,ttese,ttpse,esedei,eseder,
* ximin,rejmin,ya,xitry,galpha,gbeta,ximid,rejmid,rejtop,xitst,
* rejtst,rtest
integer lvx,lv10,lv1,ichrg

c -----
c Added by Y. Kirihara 02.Aug.2009
c Rejection by Migdal/Original-PEGS
c -----

real*8 ratio_mgop

ipair = ipair + 1                   ! Count entry into subroutine

eig = e(np)

if (eig .le. 2.1) then              ! Below 2.1 MeV (approximate)
  call randomset(rnow)              ! KEK method for smoothing
  ese2 = RM + rnow*(eig/2. - RM)    ! connection at boundary
else
  if (eig .lt. 50.) then            ! Above 2.1 MeV - sample
    lvx = 1
    lv10 = 0
  else
    lvx = 2
    lv10 = 3
  end if
  ! Start of main sampling-rejection loop
1 continue
  call randomset(rnow1)
  call randomset(rnow)

  ! Start of 12(br-0.5)**2
  ! subdistribution sampling

```

```

if (rnnow .ge. bpar(lvx,medium)) then
  lvl = lvl0 + 1
  call randomset(rnnow2)
  call randomset(rnnow3)
  br = 0.5*(1.0 - max(rnnow1,rnnow2,rnnow3))

                                ! Start of uniform subdistribution sampling
else
  lvl = lvl0 + 3
  br = rnnow1*0.5
end if

                                ! Check that br, Adelta
                                ! and Cdelta > 0

if(eig*br .lt. RM) go to 1
del = 1.0/(eig*br*(1.0 - br))
if (del .ge. delpos(lvx,medium)) go to 1
delta = delcm(medium)*del
if (delta .lt. 1.0) then
  rejf = dl1(lvl,medium) + delta*(dl2(lvl,medium) +
*      delta*dl3(lvl,medium))
  else
  rejf = dl4(lvl,medium) + dl5(lvl,medium)*
*      log(delta + dl6(lvl,medium))
end if
call randomset(rnnow)
if (rnnow .gt. rejf) go to 1

ese2 = br*eig
end if

                                ! Set up secondary electron #1
                                ! (electron #2 has lower energy)
ese1 = eig - ese2

c -----
c Added by Y. Kirihara 02.Aug.2009
c Rejection by Migdal/Original-PEGS
c -----
c useLPM is use the LPM effect.
c 0: not use.
c 1: rejection by rmgop (the ratio of Migdal and Original-PEGS)
c 2: check rmgop subroutine
if (useLPM.eq.0) then
  go to 10
else if (useLPM.eq.1) then
  call randomset(rnnow)
  if(rnnow.le.0.5) then
    call rmgop(eig,ese1,ratio_mgop)
  else
    call rmgop(eig,ese2,ratio_mgop)
  end if
  call randomset(rnnow)
  if (rnnow.ge.ratio_mgop) then
    ! forget pair production ever existed.
    ipair = ipair - 1
    return
  end if
end if
10 continue
c -----

e(np) = ese1
e(np+1) = ese2
k1step(np) = 0.
k1init(np) = 0.
k1rsd(np) = 0.
k1step(np+1) = 0.
k1init(np+1) = 0.
k1rsd(np+1) = 0.

                                ! Sample to get polar angles

```

```

! of secondary electrons
! Sample lowest-order angular distribution
if ((iprdst .eq. 1) .or.
*   ((iprdst .eq. 2) .and. (eig .lt. 4.14))) then

do ichrg=1,2
  if (ichrg .eq. 1) then
    ese = ese1
  else
    ese = ese2
  end if
  pse = sqrt(max(0.D0,(ese - RM)*(ese + RM)))
  call randomset(rnnow)
  costhe = 1.0 - 2.0*rnnow
  sinthe = RM*sqrt((1.0 - costhe)*(1.0 + costhe))/
*   (pse*costhe + ese)
  costhe = (ese*costhe + pse)/(pse*costhe + ese)
  if (ichrg .eq. 1) then
    call uphi(2,1)
  else
    np = np + 1
    sinthe = -sinthe
    call uphi(3,2)
  end if
end do

call randomset(rnnow)
if (rnnow .le. 0.5) then
  iq(np) = 1
  iq(np-1) = -1
else
  iq(np) = -1
  iq(np-1) = 1
end if
return

! Sample from Motz-Olsen-Koch
! (1969) distribution

else if ((iprdst .eq. 2) .and.
*   (eig .ge. 4.14)) then
  ztarg = zbrang(medium)
  tteig = eig/RM

do ichrg=1,2
  if (ichrg .eq. 1) then
    ese = ese1
  else
    ese = ese2
  end if
  ttese = ese/RM
  ttpse = sqrt((ttese - 1.0)*(ttese + 1.0))
  esedei = ttese/(tteig - ttese)
  eseder = 1.0/esedei
  ximin = 1.0/(1.0 + (PI*ttese)**2)
  rejmin = 2.0 + 3.0*(esedei + eseder) - 4.00*(esedei +
*   eseder + 1.0 - 4.0*(ximin - 0.5)**2)*(1.0 +
*   0.25*log(((1.0 + eseder)*(1.0 + esedei)/
*   (2.0*tteig)**2 + ztarg*ximin**2))
  ya = (2.0/tteig)**2
  xitry = max(0.01D0,max(ximin,min(0.5D0,sqrt(ya/ztarg))))
  galpha = 1.0 + 0.25*log(ya + ztarg*xitry**2)
  gbeta = 0.5*ztarg*xitry/(ya + ztarg*xitry**2)
  galpha = galpha - gbeta*(xitry - 0.5)
  ximid = galpha/(3.0*gbeta)
  if (galpha .ge. 0.0) then
    ximid = 0.5 - ximid + sqrt(ximid**2 + 0.25)
  else
    ximid = 0.5 - ximid - sqrt(ximid**2+0.25)
  end if
  ximid = max(0.01D0,max(ximin,min(0.5D0,ximid)))
  rejmid = 2.0 + 3.0*(esedei + eseder) - 4.0*(esedei +

```

```

*          eseder + 1.0 - 4.0*(ximid - 0.5)**2)*(1.0 +
*          0.25*log(((1.0 + eseder)*(1.0 + esedei)/
*          (2.0*tteig)**2 + ztarg*ximid**2))
  rejtop = 1.02*max(rejmin,rejmid)

2      continue
      call randomset(xitst)
      rejst = 2.0 + 3.0*(esedei + eseder) - 4.0*(esedei +
*          eseder + 1.0 - 4.0*(xitst - 0.5)**2)*(1.0 +
*          0.25*log(((1.0 + eseder)*(1.0 + esedei)/
*          (2.0*tteig)**2 + ztarg*xitst**2))
      call randomset(rtest)
      theta = sqrt(1.0/xitst - 1.0)/ttese
      if ((rtest .gt. (rejtst/rejtop) .or.
*          (theta .ge. PI))) go to 2

      sinthe=sin(theta)
      costhe=cos(theta)
      if (ichrg .eq. 1) then
        call uphi(2,1)
      else
        np = np+1
        sinthe = -sinthe
        call uphi(3,2)
      end if
    end do

    call randomset(rnnow)
    if (rnnow .le. 0.5) then
      iq(np) = 1
      iq(np-1) = -1
    else
      iq(np) = -1
      iq(np-1) = 1
    end if
    return

! Polar angle is m/E (default)
else
  theta=RM/eig
end if

call uphi(1,1)          ! Set direction cosines for electron #1

np = np + 1
sinthe = -sinthe

call uphi(3,2)          ! Set direction cosines for electron #2

! Randomly decide which particle is "positron"
call randomset(rnnow)
if (rnnow .le. 0.5) then
  iq(np) = 1
  iq(np-1) = -1
else
  iq(np) = -1
  iq(np-1) = 1
end if

return                  ! -----
                        ! Return to PHOTON
                        ! -----

end

!-----last line of egs5_pair.f-----

```

B.2.3 RMGBH サブルーチン

```
!----- egs_rmgbh.f -----
```

```

!-----
! PROGRAMMERS: Y. Kiriwara *
!               Department of Accelerator Science, *
!               The Graduate University for Advanced Studies, *
!               1-1, Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801 *
!               Japan *
! *
!               E-mail: kyoichi@post.kek.jp *
!-----

subroutine rmgbh(E0,k,ratio_mgbh)

implicit none

include 'include/egs5_h.f'          ! COMMONs required by EGSD5 code
include 'include/egs5_media.f'
include 'include/egs5_brempr.f'
include 'include/egs5_uption.f'
include 'include/egs5_useful.f'

real*8 AN,FSC,R0,RLC,Z_AB,Z_f,A_d,a,l_delta,delta,f_c,L_rad_d,
*      L_rad,xi_bh,E,phi1_bh,phi2_bh,f1_bh,f2_bh,f3_bh,bhsigma

real*8 k,E0,y,E_LPM,s_d,h,xi,s,phi,psi,G,sq2s1,ls1,
*      mgsigma,ratio_mgbh

real*8 h_bar,l_c,l_m_e,l_m,l_e,l_n,y_diel,max_y,k_p,gmm,omega,
*      GM,s_GM,phi_g,psi_g,dielsigma

c -----
c Branching ratio as a function of an element.
c -----
! for Branching ratio
integer i
real*8 rnnow          ! Arguments
real*8 sum_pz,sum_z,r_pz(MXEL),
*      ele_pdf(MXEL),ele_cdf(MXEL)
real*8 Z,l_WA,RHO

sum_pz = 0.d0
sum_z  = 0.d0

do i=1,nne(medium)
  sum_pz = sum_pz + pz(medium,i)
end do

do i=1,nne(medium)
  r_pz(i) = pz(medium,i)/sum_pz
  sum_z = sum_z + r_pz(i)*zelem(medium,i)*(zelem(medium,i)+1.)
end do

do i=1,nne(medium)
  ele_pdf(i) = r_pz(i)*zelem(medium,i)*(zelem(medium,i)+1.)/sum_z
end do

c -----
c Calculate cdf from pdf
c -----

ele_cdf(1) = ele_pdf(1)
do i=2,nne(medium)
  ele_cdf(i) = ele_cdf(i-1) + ele_pdf(i)
end do

call randomset(rnnow)
do i=1,nne(medium)
  if (rnnow.le.ele_cdf(i)) then

```

```

        go to 100
      end if
    end do
100  continue

      Z   = zelem(medium,i)
      L_WA = wa(medium,i)
      RHO = rhom(medium)

c ----- Start of EGS-BH cross section -----
c According to the EGS5 CODE SYSTEM p.37 - 54
c -----
      AN = 6.02214199D+23      ! Avogadro's number
      FSC = 7.297360155253394E-003 ! fine structure constant
      RO = 2.817943337446684E-013 ! Electric charge

      ! Eq. (2.53) from the EGS5 CODE SYSTEM
      a = FSC*Z
      f_c = a**2.*((1.+a**2.))**(-1.) + 0.20206 - 0.0369*a**2.
      *      + 0.0083*a**4. - 0.002*a**6.)

      ! Eq. (2.57) from the EGS5 CODE SYSTEM
      if (Z.eq.1.) then
        L_rad = 5.310
        L_rad_d = 6.144
      else if (Z.eq.2.) then
        L_rad = 4.790
        L_rad_d = 5.621
      else if (Z.eq.3.) then
        L_rad = 4.740
        L_rad_d = 5.805
      else if (Z.eq.4.) then
        L_rad = 4.710
        L_rad_d = 5.924
      else
        L_rad = log(184.15*Z**(-1./3.))
        L_rad_d = log(1194.*Z**(-2./3.))
      end if

      ! Eq. (2.57) from the EGS5 CODE SYSTEM
      xi_bh = L_rad_d / (L_rad - f_c)

      ! No. 80 in Tab. 2.1 from the EGS5 CODE SYSTEM
      Z_AB = Z*(Z+xi_bh)*L_rad
      ! No. 40 in Tab. 2.1 from the EGS5 CODE SYSTEM
      Z_f = Z*(Z+xi_bh)*f_c

      ! when E0 > 50, A' = 1.
      A_d = 1.0

      E = E0 - k
      l_delta = k*RM/(2.*E0*E)
      delta = 136.*Z**(-1./3.)*2.*l_delta

c ----- first factor -----
      f1_bh = a_d * Z*(Z+xi_bh) / (4.*(z_ab-z_f))

c ----- phi1 and phi2 -----
      if(delta.le.1.) then
        phi1_bh = 20.867 - 3.242*delta + 0.625*delta**2.
        phi2_bh = 20.029 - 1.930*delta + 0.086*delta**2.
      else
        phi1_bh = 21.12 - 4.184*log(delta+0.952)
        phi2_bh = 21.12 - 4.184*log(delta+0.952)
      end if

c ----- second and third factor -----
      if (E0.ge.50.) then
        f2_bh = (1. + (E/E0)**2.) * (phi1_bh-4./3.*log(Z) - 4.*f_c)

```

```

    f3_bh = 2./3.*(E/E0) * (phi2_bh - 4./3.*log(Z) - 4.*f_c)
else
    f2_bh = (1. + (E/E0)**2.) * (phi1_bh-4./3.*log(Z))
    f3_bh = 2./3.*(E/E0) * (phi2_bh - 4./3.*log(Z))
end if

c ----- Original PEGS cross section for bremsstrahlung -----
    bhsigma = f1_bh * ( f2_bh - f3_bh )

c ----- End of BH cross section -----

c ----- Start of LPM plus dielectric cross section -----
    RLC = rlc(medium)

    E_LPM = 7.7e+6*RLC          ! E_LPM [MeV]

    ls1 = (Z**(1./3.)/191.)**2.
    y = k/E0                    ! k/E0 photon / electron
    sq2s1 = sqrt(2.)*ls1

c ----- s'(x) -----
    s_d = sqrt((E_LPM*k)/(8.*E0*(E0-k)))

c ----- h(x) -----
    h = log(s_d)/log(sqrt(2.)*ls1)

c ----- xi(x) -----
    if (s_d.le.sq2s1) then
        xi = 2.
    else if (sq2s1.lt.s_d .and. s_d.le.1.) then
        xi = 1. + h - 0.08*(1.-h)*(1.-(1.-h)**2.)/log(sqrt(2.)*ls1)
    else
        xi = 1.
    end if

c ----- s(x) -----
    s = s_d/(xi)**(1./2.)

c ----- phi(x) -----
    if (s.le.0.01) then
        phi = 6.*s
    else if (0.01.lt.s .and. s.lt.2.) then
        phi = 1. - exp(-6.*s*(1.+(3.-PI)*s)+s**3.
*                /(0.623+0.796*s+0.658*s**2.))
    else
        phi = 1.
    end if

c ----- psi(x) -----
    if (s.le.0.01) then
        psi = 4.*s
    else if(0.01.lt.s .and. s.lt.2.) then
        psi = 1. - exp(-4.*s-8.*s**2.
*                /(1.+3.96*s+4.97*s**2.-0.05*s**3.+7.5*s**4.))
    else
        psi = 1.
    end if

c ----- G(x) -----
    G = 3.*psi - 2.*phi

c ----- Dielectric factor -----
c # Plank's constant/2*PI [MeV s]
    h_bar = 6.582e-22

c # speed of light [cm/sec.]
    l_c = 2.997925e+10

c # electron mass [g]
    l_m_e = 9.1091e-28

```

```

c   # electron mass c**2 [g]
    l_m = l_m_e * l_c**2. / (1.602e-19 * 1.0e+13)

c   # electronic charge [esu]
    l_e = 4.80298e-10

c   # atomic number per unit volume
    l_n = AN * RHO / l_WA

    omega = sqrt(4.*PI*l_n*Z*l_e**2./l_m_e)

    gmm = E0 / l_m
    k_p = gmm * h_bar * omega
    GM = 1. + k_p**2. / k**2.
    s_GM = s * GM

c   write(51,*)"Z, E0, k_p : ",Z,E0,k_p

c ----- phi_g(x) and Psi_g(x) -----
    if(s_GM.le.0.01) then
        phi_g = 6.*s_GM
        psi_g = 4.*s_GM
    else if(0.01.lt.s_GM .and. s_GM.lt.2.) then
        phi_g = 1. - exp(-6.*s_GM*(1.+(3.-PI)*s_GM)+s_GM**3.
*           / (0.623+0.796*s_GM+0.658*s_GM**2.))
        psi_g = 1. - exp(-4.*s_GM-8.*s_GM**2.
*           / (1.+3.96*s_GM+4.97*s_GM**2.-0.05*s_GM**3.+7.5*s_GM**4.))
    else
        phi_g = 1.
        psi_g = 1.
    end if

c ----- Migdal plus dielectric cross section -----
    mgsigma = 1./3.*xi * ( y**2.*(3.*psi_g - 2.*phi_g)
*       + 2.*(1.+(1.-y)**2.)*phi_g ) / GM

c ----- End of LPM cross section -----

c ----- LPM/BH-EGS -----
    ratio_mgbh = mgsigma/bhsigma

                                ! -----
    return                                ! Return to collis
                                ! -----

end

```

B.2.4 RMGOP サブルーチン

```

!----- ratio_mgop.f -----
!
! PROGRAMMERS:  Y. Kiriwara *
!               Department of Accelerator Science, *
!               The Graduate University for Advanced Studies, *
!               1-1, Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801 *
!               Japan *
! *
!               E-mail:      kyoichi@post.kek.jp *
!-----

subroutine rmgop(k0,E,ratio_mgop)

implicit none

include 'include/egs5_h.f'      ! COMMONs required by EGS5 code
include 'include/egs5_media.f'

```

```

include 'include/egs5_brempr.f'
include 'include/egs5_uption.f'
include 'include/egs5_useful.f'

real*8 AN,FSC,R0,RLC,k0,E,v,E_LPM,ls1,s_d,h,xi,s,phi,psi,G,sq2s1,
*      mgsigma_p,opsigma_p,ratio_mgop

real*8 Z_AB,Z_f,A_d,a,l_delta,delta,f_c,L_rad_d,L_rad,xi_bh,E_p,
*      phi1_bh,phi2_bh,f1_bh,f2_bh,f3_bh

c -----
c Branching ratio as a function of an element.
c -----
      ! for Branching ratio
      integer i
      real*8 rnnow                                ! Arguments
      real*8 sum_pz,sum_z,r_pz(MXEL),
*      ele_pdf(MXEL),ele_cdf(MXEL)
      real*8 Z,l_WA,RHO,RHOTBL(100)

      data RHOTBL/0.0808,0.19,0.534,1.85,2.5,2.26,1.14,1.568,1.5,1.0, 0.
*9712,1.74,2.702,2.4,1.82,2.07,2.2,1.65,0.86,1.55,3.02,4.54, 5.87,7
* .14,7.3,7.86,8.71,8.90,8.9333,7.140,5.91,5.36,5.73,4.80, 4.2,3.4,1
* .53,2.6,4.47,6.4,8.57,9.01,11.50,12.20,12.50,12.,10.5, 8.65,7.30,7
* .31,6.684,6.24,4.93,2.7,1.873,3.5,6.15,6.90,6.769, 7.007, 1. ,7.54
* ,5.17,7.87,8.25,8.56,8.80,9.06,9.32,6.96,9.85, 11.40,16.60,19.30,2
* 0.53,22.48,22.42,21.45,19.30,14.19,11.85, 11.34,9.78,9.30, 1. ,4.,
* 1. ,5., 1. ,11.0,15.37,18.90, 20.5,19.737,11.7,7.,1. , 1. , 1. ,
*1./

      sum_pz = 0.d0
      sum_z = 0.d0

      do i=1,nne(medium)
        sum_pz = sum_pz + pz(medium,i)
      end do

      do i=1,nne(medium)
        r_pz(i) = pz(medium,i)/sum_pz
        sum_z = sum_z + r_pz(i)*zelem(medium,i)*(zelem(medium,i)+1.)
      end do

      do i=1,nne(medium)
        ele_pdf(i) = r_pz(i)*zelem(medium,i)*(zelem(medium,i)+1.)/sum_z
      end do

c -----
c Calculate cdf from pdf
c -----

      ele_cdf(1) = ele_pdf(1)
      do i=2,nne(medium)
        ele_cdf(i) = ele_cdf(i-1) + ele_pdf(i)
      end do

      call randomset(rnnow)
      do i=1,nne(medium)
        if (rnnow.le.ele_cdf(i)) then
          go to 100
        end if
      end do
100 continue

      Z = zelem(medium,i)
      l_WA = wa(medium,i)
      RHO = RHOTBL(int(Z))

c ----- Start of EGS-BH cross section -----

```

```

c According to the EGS5 CODE SYSTEM p.37 - 54
c -----
AN = 6.02214199D+23      ! Avogadro's number
FSC = 7.297360155253394E-003 ! fine structure constant
R0 = 2.817943337446684E-013 ! Electric charge

! Eq. (2.53) from the EGS5 CODE SYSTEM
a = FSC*Z
f_c = a**2.*((1.+a**2.)**(-1.) + 0.20206 - 0.0369*a**2.
*      + 0.0083*a**4. - 0.002*a**6.)

! Eq. (2.57) from the EGS5 CODE SYSTEM
if (Z.eq.1.) then
  L_rad = 5.310
else if (Z.eq.2.) then
  L_rad = 4.790
else if (Z.eq.3.) then
  L_rad = 4.740
else if (Z.eq.4.) then
  L_rad = 4.710
else
  L_rad = log(184.15*Z**(-1./3.))
end if

! Eq. (2.57) from the EGS5 CODE SYSTEM
if (Z.eq.1.) then
  L_rad_d = 6.144
else if (Z.eq.2.) then
  L_rad_d = 5.621
else if (Z.eq.3.) then
  L_rad_d = 5.805
else if (Z.eq.4.) then
  L_rad_d = 5.924
else
  L_rad_d = log(1194.*Z**(-2./3.))
end if

! Eq. (2.57) from the EGS5 CODE SYSTEM
xi_bh = L_rad_d / (L_rad - f_c)

! No. 80 in Tab. 2.1 from the EGS5 CODE SYSTEM
Z_AB = Z*(Z+xi_bh)*L_rad
! No. 40 in Tab. 2.1 from the EGS5 CODE SYSTEM
Z_f = Z*(Z+xi_bh)*f_c

! when E0 > 50, A' = 1.
A_d = 1.0

! RLC from PEGS data
c RLC = 1./((AN*RHO/l_WA)*4.0*FSC*R0**2*(Z_AB-Z_F) )
RLC = rlc(medium)

E_p = k0 - E
l_delta = k0*RM/(2.*E_p*E)
delta = 136.*Z**(-1./3.)*2.*l_delta

c ----- phi1 -----
if(delta.le.1.) then
  phi1_bh = 20.867 - 3.242*delta + 0.625*delta**2.
else
  phi1_bh = 21.12 - 4.184*log(delta+0.952)
end if

c ----- phi2 -----
if(delta.le.1.) then
  phi2_bh = 20.029 - 1.930*delta + 0.086*delta**2.
else
  phi2_bh = 21.12 - 4.184*log(delta+0.952)
end if

```

```

c ----- first factor -----
f1_bh = a_d * Z*(Z+xi_bh) / (4.*(z_ab-z_f)) / k0**3.

c ----- second factor -----
if (k0.ge.50.) then
  f2_bh = (E_p**2.+E**2.) * (phi1_bh - 4./3.*log(Z) - 4.*f_c)
else
  f2_bh = (E_p**2.+E**2.) * (phi1_bh - 4./3.*log(Z))
end if

c ----- third factor -----
if (k0.ge.50.) then
  f3_bh = 2./3.*E_p*E * (phi2_bh - 4./3.*log(Z) - 4.*f_c)
else
  f3_bh = 2./3.*E_p*E * (phi2_bh - 4./3.*log(Z))
end if

c ----- Original PEGS cross section for pair production -----
opsigma_p = f1_bh * ( f2_bh + f3_bh ) * k0

c ----- End of BH cross section -----

c ----- Start of LPM cross section -----
E_LPM = 7.7e+6*RLC          ! E_LPM [MeV]

ls1 = (Z**(1./3.)/191.)**2.
v = E/k0                    ! E/k0 e-(e+) / photon
sq2s1 = sqrt(2.)*ls1

c ----- s'(x) -----
s_d = sqrt((E_LPM*k0)/(8.*E*(k0-E)))

c ----- h(x) -----
h = log(s_d)/log(sqrt(2.)*ls1)

c ----- xi(x) -----
if (s_d.le.sq2s1) then
  xi = 2.
else if (sq2s1.lt.s_d .and. s_d.le.1.) then
  xi = 1. + h - 0.08*(1.-h)*(1.-(1.-h)**2.)/log(sqrt(2.)*ls1)
else
  xi = 1.
end if

c ----- s(x) -----
s = s_d/(xi)**(1./2.)

c ----- phi(x) -----
if (s.le.0.01) then
  phi = 6.*s
else if (0.01.lt.s .and. s.lt.2.) then
  phi = 1. - exp(-6.*s*(1.+(3.-PI)*s)+s**3.
*          / (0.623+0.796*s+0.658*s**2.))
else
  phi = 1.
end if

c ----- psi(x) -----
if (s.le.0.01) then
  psi = 4.*s
else if (0.01.lt.s .and. s.lt.2.) then
  psi = 1. - exp(-4.*s-8.*s**2.
*          / (1.+3.96*s+4.97*s**2.-0.05*s**3.+7.5*s**4.))
else
  psi = 1.
end if

c ----- G(x) -----
G = 3.*psi - 2.*phi

```

```

c ----- Migdal cross section for pair production -----
      mgsigma_p = 1./3.*xi * ( (3.*psi - 2.*phi)
      *          + 2.*(v**2. + (1.-v)**2.) * phi )
c ----- End of LPM cross section -----

c ----- Migdal/Bethe-Heitler
      ratio_mgop = mgsigma_p/opsigma_p
c ----- End of BH cross section -----

      return                                ! -----
                                           ! Return to collis
                                           ! -----

      end

```

B.2.5 LPM 計算用ユーザープログラム

```

!*****
!***** KEK, High Energy Accelerator Research *
!***** Organization *
!*** uc-LPM-dielectric ***** *
!***** EGS5.0 USER CODE - 30 Jan. 2010/1700 *
!*****
!* This is a general User Code based on the cg geometry scheme.
!*****
! *
! PROGRAMMERS: H. Hirayama *
! Applied Research Laboratory *
! KEK, High Energy Accelerator Research Organization *
! 1-1, Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801 *
! Japan *
! *
! E-mail: hideo.hirayama@kek.jp *
! Telephone: +81-29-864-5451 *
! Fax: +81-29-864-4051 *
! *
! Y. Namito *
! Radiation Science Center *
! Applied Research Laboratory *
! KEK, High Energy Accelerator Research Organization *
! 1-1, Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801 *
! Japan *
! *
! E-mail: yoshihito.namito@kek.jp *
! Telephone: +81-29-864-5489 *
! Fax: +81-29-864-1993 *
! *
! Modified: Y. Kiriwara *
! Department of Accelerator Science, *
! The Graduate University for Advanced Studies, *
! 1-1, Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801 *
! Japan *
! *
! E-mail: kyoichi@post.kek.jp *
!*****
!23456789|123456789|123456789|123456789|123456789|123456789|123456789|12
!-----
!----- main code -----
!-----
! Step 1: Initialization
!-----

      implicit none

! -----
! EGS5 COMMONs

```

```

! -----
include 'include/egs5_h.f'           ! Main EGS "header" file

include 'include/egs5_bounds.f'
include 'include/egs5_brempr.f'
include 'include/egs5_edge.f'
include 'include/egs5_media.f'
include 'include/egs5_misc.f'
include 'include/egs5_thresh.f'
include 'include/egs5_uphiot.f'
include 'include/egs5_useful.f'
include 'include/egs5_usersc.f'
include 'include/egs5_userxt.f'
include 'include/randomm.f'

! -----
! Auxiliary-code COMMONs
! -----
include 'auxcommons/aux_h.f'       ! Auxiliary-code "header" file

include 'auxcommons/edata.f'
include 'auxcommons/etaly1.f'
include 'auxcommons/instuf.f'
include 'auxcommons/lines.f'
include 'auxcommons/nfac.f'
include 'auxcommons/watch.f'

! -----
! cg related COMMONs
! -----
include 'auxcommons/geom_common.f' ! geom-common file
integer irinn

common/totals/                      ! Variables to score
* depe,deltae,spec(3,100),emin,nbin

common/gscore/esumg                 ! Variables to score
real*8 esumg

real*8 depe,deltae,spec

!**** real*8                          ! Arguments
real*8 totke
real*8 rnow,etot
real*8 esumt

real*8                               ! Local variables
* availke,avpe,avph,avspe,avspg,avspp,avte,desci2,pefs,pef2s,
* rr0,sigpe,sigte,sigph,sigspg,sigspe,sigspp,tefs,tef2s,wtin,wtsun,
* xi0,yi0,zi0

real*8
* phs(100),ph2s(100),specs(3,100),spec2s(3,100)

real                               ! Local variables
* elow,ehigh,rdet,rtcov,rtgap,tcov,t det,tgap

real
* tarray(2),tt,tt0,tt1,cputime

integer
* i,idin,ie,ifti,ifto,ii,iiz,imed,ireg,isam,
* izn,nlist,j,k,n,ner,ntype

character*24 medarr(1)

integer nbin
real*8 emin,emax

! -----

```

```

!   Open files
!   -----
!
!   Units 7-26 are used in pegs and closed.  It is better not
!   to use as output file.  If they are used, they must be opened
!-----

      open(6,FILE='egs5job.out',STATUS='unknown')
      open(4,FILE='egs5job.inp',STATUS='old')
      open(39,FILE='detect_spc.dat',STATUS='unknown')

!   =====
!   call counters_out(0)
!   =====

!-----
! Step 2: pegs5-call
!-----

!   -----
!   Define media before calling PEGS5
!   -----

      nmed=1

!   =====
!   call block_set                ! Initialize some general variables
!   =====

      medarr(1)='AU                '

      do j=1,nmed
        do i=1,24
          media(i,j)=medarr(j)(i:i)
        end do
      end do

      chard(1) = 2.0e-2          ! automatic step-size control

      write(6,*) 'chard =',(chard(j),j=1,nmed)

!   -----
!   Run KEK PEGS5 before calling HATCH
!   -----
      write(6,100)
100  FORMAT(' PEGS5-call comes next'/)

!   =====
!   call pegs5
!   =====

!-----
! Step 3: Pre-hatch-call-initialization
!-----

      write(6,*) 'Read cg-related data'

!-----
!   Initialize CG related parameters
!-----
c   npreci=0          ! PICT data mode for CGView in free format

      ifti = 4        ! Input unit number for cg-data

      write(6,fmt="( ' CG data' )")
      call geomgt(ifti,6) ! Read in CG data
      write(6,fmt="( ' End of CG data',/ )")

!-----
!   Get nreg from cg input data
!-----

```

```

nreg=izonin

! Read material for each refion from egs5job.data
read(4,*) (med(i),i=1,nreg)
write(6,*) 'nreg:',nreg

! Set option except vacuum region
do i=1,nreg-1
  if(med(i).ne.0) then
    iphter(i) = 1      ! Switches for PE-angle sampling
    iedgfl(i) = 1     ! K & L-edge fluorescence
    iauger(i) = 1     ! K & L-Auger
    iraylr(i) = 0     ! Rayleigh scattering
    lpolar(i) = 0     ! Linearly-polarized photon scattering
    incohr(i) = 0     ! S/Z rejection
    iprofr(i) = 0     ! Doppler broadening
    impacr(i) = 0     ! Electron impact ionization
  end if
  ibrdst = 1
  ibrspl = 0
c   nbrspl = 50
end do

! -----
! Added by Y. Kirihara
! Flag of the LPM effect
! -----
uselPM = 1

! -----
! Random number seeds. Must be defined before call hatch
! or defaults will be used.  inseed (1- 2^31)
! -----
luxlev = 1
inseed=1
write(6,120) inseed
120  FORMAT(/,' inseed=',I12,5X,
*      ' (seed for generating unique sequences of Ranlux)')

! =====
! call rlxunit ! Initialize the Ranlux random-number generator
! =====

!-----
! Step 4: Determination-of-incident-particle-parameters
!-----
! Define initial variables for incident particle normally incident
! on the slab
  iqin=-1          ! Incident particle charge - electrons
  ekein=2.5e+4     ! 25 GeV : Incident electron energy
c  ekein=8.0e+3    ! 8 GeV : Incident electron energy
  xin=0.0          ! Source position
  yin=0.0
  zin=-1.0
  uin=0.0          ! Moving along z axis
  vin=0.0
  win=1.0
  irin=0          ! Starting region (0: Automatic search in CG)
  wtin=1.0        ! Weight = 1 since no variance reduction used

! pdf data for many source
c -----
c log bin
  nbin = 100
  emax = 1.0e+3
  emin = 0.1
  deltae = dlog(emax/emin)/nbin

!-----
! Get source region from cg input data

```

```

!-----
!
      if(irin.le.0.or.irin.gt.nreg) then
        call srzone(xin,yin,zin,iqin+2,0,irin)
        call rstnxt(iqin+2,0,irin)
      end if

!-----
! Step 5:  hatch-call
!-----
!-----
! Maximum total energy of an electron for this problem must be
! defined before hatch call
      emaxe = ekein + RM          ! photon

      write(6,130)
130  format(/' Call hatch to get cross-section data')

! -----
! Open files (before HATCH call)
! -----
      open(UNIT=KMPI,FILE='pgs5job.pegs5dat',STATUS='old')
      open(UNIT=KMPO,FILE='egs5job.dummy',STATUS='unknown')

      write(6,140)
140  FORMAT(/' HATCH-call comes next',/)

! =====
! call hatch
! =====

! -----
! Close files (after HATCH call)
! -----
      close(UNIT=KMPI)
      close(UNIT=KMPO)

! -----
! Print various data associated with each media (not region)
! -----
      write(6,150)
150  FORMAT(/' Quantities associated with each MEDIA:')
      do j=1,nmed
        write(6,160) (media(i,j),i=1,24)
160  FORMAT(/,1X,24A1)
        write(6,170) rhom(j),rlcm(j)
170  FORMAT(5X,' rho=',G15.7,' g/cu.cm      rlc=',G15.7,' cm')
        write(6,180) ae(j),ue(j)
180  FORMAT(5X,' ae=',G15.7,' MeV      ue=',G15.7,' MeV')
        write(6,190) ap(j),up(j)
190  FORMAT(5X,' ap=',G15.7,' MeV      up=',G15.7,' MeV',/)
      end do

! -----
! Print media and cutoff energies assigned to each region
! -----
      do i=1,nreg
        if (med(i) .eq. 0) then
          write(6,200) i
200  FORMAT(' medium(',I3,')=vacuum')
        else
          write(6,210) i,(media(ii,med(i)),ii=1,24),ecut(i),pcut(i)
210  FORMAT(' medium(',I3,')=',24A1,
*          'ecut=',G10.5,' MeV, pcut=',G10.5,' MeV')
! -----
! Print out energy information of K- and L-X-rays
! -----
          if (iedgfl(i) .ne. 0) then          ! Output X-ray energy
            ner = nne(med(i))
            do iiz=1,ner

```

```

        izn = zelem(med(i),iiz) ! Atomic number of this element
        write(6,220) izn
220      FORMAT(' X-ray information for Z=',I3)
        write(6,230) (ekx(ii,izn),ii=1,10)
230      FORMAT(' K-X-ray energy in keV',/,
*          4G15.5,/,4G15.5,/,2G15.5)
        write(6,240) (elx1(ii,izn),ii=1,8)
240      FORMAT(' L-1 X-ray in keV',/,4G15.5,/,4G15.5)
        write(6,250) (elx2(ii,izn),ii=1,5)
250      FORMAT(' L-2 X-ray in keV',/,5G15.5)
        write(6,260) (elx3(ii,izn),ii=1,7)
260      FORMAT(' L-3 X-ray in keV',/,4G15.5,/,3G15.5)
        end do
        end if
        end if
        end do
        write(6,fmt="( ' CG data' )")

```

```

!-----
! Step 6: Initialization-for-howfar
!-----
!-----
! Step 7: Initialization-for-ausgab
!-----

```

```

        ncount = 0
        ilines = 0
        nwrite = 10
        nlines = 10
        idin = -1
        totke = 0.
        wtsum = 0.

!      =====
        call ecnsv1(0,nreg,totke)
        call ntally(0,nreg)
!      =====

        write(6,270)
270      format(/,' Energy/coordinates/direction cosines/etc.',/,
*          6X,'e',16X,'x',14X,'y',14X,'z'/
*          1X,'u',14X,'v',14X,'w',9X,'iq',4X,'ir',3X,'iarg',/)

!      Zero the variables
        depe=0.D0
        pefs=0.D0
        pef2s=0.D0
        tefs=0.D0
        tef2S=0.D0
        do j=1,nbin
            phs(j)=0.D0
            ph2s(j)=0.D0
            do ntype=1,3
                spec(ntype,j)=0.D0
                specs(ntype,j)=0.D0
                spec2s(ntype,j)=0.D0
            end do
        end do

!      Set histories
c      ncases=1.0e+8
        ncases=1.0e+9

        tt0=tarray(1)

```

```

!-----
! Step 8: Shower-call
!-----

```

```

! Write batch number

do i=1,ncases                                ! -----
! Start of shower call-loop
! -----

! -----
! Select incident energy
! -----

wtin = 1.0

esumg = 0.d0

wtsum = wtsum + wtin                        ! Keep running sum of weights
etot = ekein + iabs(iqin)*RM                ! Incident total energy (MeV)
if(iqin.eq.1) then                          ! Available K.E. (MeV) in system
  availke = ekein + 2.0*RM                  ! for positron
else                                          ! Available K.E. (MeV) in system
  availke = ekein                          ! for photon and electron
end if

totke = totke + availke                    ! Keep running sum of KE

! -----
! Select incident angle
! -----

! -----
! Print first NWRITE or NLINES, whichever comes first
! -----
if (ncount .le. nwrite .and. ilines .le. nlines) then
  ilines = ilines + 1
  write(6,280) etot,xin,yin,zin,uin,vin,win,iqin,irin,idin
280  FORMAT(4G15.7/3G15.7,3I5)
end if

! =====
! call shower (iqin,etot,xin,yin,zin,uin,vin,win,irin,wtin)
! =====

do ntype=1,3
  do ie=1,nbin
    if (ntype.eq.1) then
      elow = exp( ( ie - 1 ) * deltae ) * emin
      ehigh = exp( ie * deltae ) * emin
      if (esumg.ge.elow .and. esumg.lt.ehigh) then
        spec(ntype,ie) = spec(ntype,ie) + 1
      end if
      specs(ntype,ie)=specs(ntype,ie)+spec(ntype,ie)
      spec2s(ntype,ie)=spec2s(ntype,ie) +
*       spec(ntype,ie)*spec(ntype,ie)
      spec(1,ie)=0.D0
    end if
    specs(ntype,ie)=specs(ntype,ie)+spec(ntype,ie)
    spec2s(ntype,ie)=spec2s(ntype,ie)+
*     spec(ntype,ie)*spec(ntype,ie)
    spec(ntype,ie)=0.D0
  end do
end do

ncount = ncount + 1                        ! Count total number of actual cases

end do                                     ! -----
! End of CALL SHOWER loop
! -----

tt1=tarray(1)

```

```

        cputime=tt1-tt0
        write(6,300) cputime
300    format(' Elapsed Time (sec)=',G15.5)

!-----
! Step 9:  Output-of-results
!-----

        write(6,310) ncount,ncases,totke
310    FORMAT(/,' Ncount=',I10,' (actual cases run)',/,
*        ' Ncases=',I10,' (number of cases requested)',/,
*        ' TotKE =',G15.5,' (total KE (MeV) in run)')

        if (totke .le. 0.D0) then
            write(6,320) totke,availke,ncount
320    FORMAT(/,' Stopped in MAIN with TotKE=',G15.5,/,
*        ' AvailKE=',G15.5, /,' Ncount=',I10)
            stop
            end if

            tdet=7.62
            rdet=3.81
            tcov=0.1
            rtcov=0.1
            tgap=0.5
            rtgap=0.5
            write(6,330) tdet,rdet,tcov,rtcov,tgap,rtgap
330    FORMAT(/' Detector length=',G15.5,' cm'/
*        ' Detector radius=',G15.5,' cm'/
*        ' Al cover thickness=',G10.2,' cm'/
*        ' Al cover side thickness=',G10.2,' cm'/
*        ' Front gap =',G10.2,' cm'/ ' Side gap =',G10.2,' cm'/)

            write(6,340) ekein
340    FORMAT(' Results for ',G15.5,'MeV photon'/)

! -----
! Calculate average and its deviation
! -----

! -----
! Peak efficiency
! -----

        avpe = pefs/ncount
        pef2s=pef2s/ncount
        sigpe=dsqrt((pef2s-avpe*avpe)/ncount)
        avpe = avpe*100.0
        sigpe = sigpe*100.0
        write(6,350) avpe,sigpe
350    FORMAT(' Peak efficiency =',G11.4,'+-',G9.2,' %')

! -----
! Total efficiency
! -----

        avte = tefs/ncount
        tef2s = tef2s/ncount
        sigte = dsqrt((tef2s-avte*avte)/ncount)
        avte = avte*100.0
        sigte = sigte*100.0
        write(6,360) avte,sigte
360    FORMAT(' Total efficiency =',G11.4,'+-',G9.2,' %')

! -----
! Particle spectrum.  Incident particle spectrum to detector.
! -----

        write(6,400)
400    FORMAT('# Particle spectrum crossing the detector plane'/
*        ',# ',28X,'particles/MeV/source photon'/
*        '# Upper energy [MeV]',6X,' Gamma +- error ',9X,
*        ' Electron +- error ', 6X,' Positron +- error')

```

```

write(39,405)
405  FORMAT('# Particle spectrum crossing the detector plane'/
*      ',# ',28X,'particles/MeV/source photon'/
*      '# Upper energy [MeV]',6X,' Gamma +- error ',9X,
*      ' Electron +- error ', 6X,' Positron +- error')

do ie=1,100
c -----
c log bin
  elow = exp( (ie-1)*deltae ) * emin
  ehigh = exp( ie*deltae ) * emin
c -----
  if (elow .gt. ekein ) go to 420

! -----
! Gamma spectrum per MeV per source
! -----

  avspg = specs(1,ie)/ncount
  spec2s(1,ie)=spec2s(1,ie)/ncount
  sigspg=dsqrt((spec2s(1,ie)-avspg*avspg)/ncount)

! -----
! Electron spectrum per MeV per source
! -----

  avspe = specs(2,ie)/ncount
  spec2s(2,ie)=spec2s(2,ie)/ncount
  sigspe=dsqrt((spec2s(2,ie)-avspe*avspe)/ncount)

! -----
! Positron spectrum per MeV per source
! -----

  avspg = specs(3,ie)/ncount
  spec2s(3,ie)=spec2s(3,ie)/ncount
  sigspg=dsqrt((spec2s(3,ie)-avspg*avspg)/ncount)

410  write(6,410) ehigh,avspg,sigspg,avspe,sigspe,avspg,sigspg
      FORMAT(' ',G10.5,' ',3(' ',G12.5,' ',G12.5))

415  write(39,415) ehigh,avspg,sigspg,avspe,sigspe,avspg,sigspg
      FORMAT(' ',G10.5,' ',3(' ',G12.5,' ',G12.5))
end do

420  continue

nlist=1

! =====
! call ecnsv1(nlist,nreg,totke)
! call ntally(nlist,nreg)
! =====

! =====
! call counters_out(1)
! =====

stop

end

!-----last line of main code-----
!-----ausgab.f-----
! Version: 080708-1600
! Reference: SLAC-265 (p.19-20, Appendix 2)
!-----
!23456789|123456789|123456789|123456789|123456789|123456789|123456789|12

```

```

! -----
! Required subroutine for use with the EGS5 Code System
! -----
! A AUSGAB to:
!
! 1) Score energy deposition
! 2) Score particle information enter to detector from outside
! 3) Print out particle transport information
! 4) call plotxyz if imode=0
! -----

subroutine ausgab(iarg)

implicit none

include 'include/egs5_h.f'           ! Main EGS "header" file

include 'include/egs5_epcont.f'     ! COMMONs required by EGS5 code
include 'include/egs5_misc.f'
include 'include/egs5_stack.f'
include 'include/egs5_useful.f'

include 'auxcommons/aux_h.f'       ! Auxiliary-code "header" file

include 'auxcommons/etaly1.f'      ! Auxiliary-code COMMONs
include 'auxcommons/lines.f'
include 'auxcommons/ntaly1.f'
include 'auxcommons/watch.f'

common/totals/                     ! Variables to score
* depe,deltae,spec(3,100),emin,nbin

common/gscore/esum                 ! Variables to score
real*8 esum

real*8 depe,deltae,spec,emin,elow,ehigh,ee,pe

integer                             ! Arguments
* iarg,nbin

real*8                               ! Local variables
* edepwt

integer
* ie,iql,irl,ntype

! -----
! Set some local variables
! -----
irl = ir(np)
iql = iq(np)
edepwt = edep*wt(np)

! -----
! Keep track of energy deposition (for conservation purposes)
! -----
if (iarg .lt. 5) then
  esum(iql+2,irl,iarg+1) = esum(iql+2,irl,iarg+1) + edepwt
  nsum(iql+2,irl,iarg+1) = nsum(iql+2,irl,iarg+1) + 1
end if

! -----
! Score energy deposition inside imaginary detector
! -----
if (irl.eq.2) then
  depe = depe + edepwt
! -----

```

```

! Score particle information if it enters from outside
! -----
! if (irl.ne.iroid .and. iarg .eq. 0) then

      if (iql .eq. 0) then          ! photon
        ntype=1
        esumg = esumg + e(np)

      elseif (iql .eq. -1) then    ! electron
        ntype=2
        do ie=1,nbin
          elow = exp( ( ie - 1 ) * deltae ) * emin
          ehigh = exp( ie * deltae ) * emin
          ee = e(np) - RM
          if (ee.ge.elow .and. ee.lt.ehigh) then
            spec(ntype,ie) = spec(ntype,ie) + wt(np)
          end if
        end do

      else                          ! positron
        ntype=3
        do ie=1,nbin
          elow = exp( ( ie - 1 ) * deltae ) * emin
          ehigh = exp( ie * deltae ) * emin
          pe = e(np) - RM
          if (pe.ge.elow .and. pe.lt.ehigh) then
            spec(ntype,ie) = spec(ntype,ie) + wt(np)
          end if
        end do
      end if
    end if

! -----
! Print out stack information (for limited number cases and lines)
! -----
! if (ncount .le. nwrite .and. ilines .le. nlines) then
!   ilines = ilines + 1
!   write(6,100) e(np),x(np),y(np),z(np),u(np),v(np),w(np),
! *       iql,irl,iarg
100  FORMAT(4G15.7/3G15.7,3I5)
! end if

! -----
! Print out particle transport information (if switch is turned on)
! -----
! if (iwatch .gt. 0) call swatch(iarg,iwatch)
! -----

return

end

!-----last line of ausgab.f-----
!-----howfar.f-----
! Version: 070627-1600
! Reference: T. Torii and T. Sugita, "Development of PRESTA-CG
! Incorporating Combinatorial Geometry in EGS4/PRESTA", JNC TN1410 2002-201,
! Japan Nuclear Cycle Development Institute (2002).
! Improved version is provided by T. Sugita. 7/27/2004
!-----
!23456789|123456789|123456789|123456789|123456789|123456789|123456789|12
! -----
! Required (geometry) subroutine for use with the EGS5 Code System
! -----
! This is a CG-HOWFAR.
! -----

```

```

subroutine howfar
implicit none

c
include 'include/egs5_h.f'      ! Main EGS "header" file
include 'include/egs5_epcont.f' ! COMMONs required by EGS5 code
include 'include/egs5_stack.f'
include 'auxcommons/geom_common.f' ! geom-common file

c
c
integer i,j,jjj,ir_np,nozone,jty,kno
integer irnear,irnext,irlold,irlfg,itvlf,ihitcg
double precision xidd,yidd,zidd,x_np,y_np,z_np,u_np,v_np,w_np
double precision tval,tval0,tval00,tval10,tvalmm,delhow
double precision atvaltmp
integer iq_np

c
ir_np = ir(np)
iq_np = iq(np) + 2

c
if(ir_np.le.0) then
write(6,*) 'Stopped in howfar with ir(np) <=0'
stop
end if

c
if(ir_np.gt.izonin) then
write(6,*) 'Stopped in howfar with ir(np) > izonin'
stop
end if

c
if(ir_np.EQ.izonin) then
idisc=1
return
end if

c
tval=1.d+30
itvalm=0

c
c
body check
u_np=u(np)
v_np=v(np)
w_np=w(np)
x_np=x(np)
y_np=y(np)
z_np=z(np)

c
do i=1,nbody(ir_np)
nozone=ABS(nbzone(i,ir_np))
jty=itblty(nozone)
kno=itblno(nozone)
c
rpp check
if(jty.eq.ityknd(1)) then
if(kno.le.0.or.kno.gt.irppin) go to 190
call rppcg1(kno,x_np,y_np,z_np,u_np,v_np,w_np)
c
sph check
elseif(jty.eq.ityknd(2)) then
if(kno.le.0.or.kno.gt.isphin) go to 190
call sphcg1(kno,x_np,y_np,z_np,u_np,v_np,w_np)
c
rcc check
elseif(jty.eq.ityknd(3)) then
if(kno.le.0.or.kno.gt.irccin) go to 190
call rcccg1(kno,x_np,y_np,z_np,u_np,v_np,w_np)
c
trc check
elseif(jty.eq.ityknd(4)) then
if(kno.le.0.or.kno.gt.itrcin) go to 190
call trccg1(kno,x_np,y_np,z_np,u_np,v_np,w_np)
c
tor check
elseif(jty.eq.ityknd(5)) then
if(kno.le.0.or.kno.gt.itorin) go to 190
call torcg1(kno,x_np,y_np,z_np,u_np,v_np,w_np)

```

```

c   rec check
      elseif(jty.eq.ityknd(6)) then
        if(kno.le.0.or.kno.gt.irecin) go to 190
        call reccg1(kno,x_np,y_np,z_np,u_np,v_np,w_np)
c   ell check
      elseif(jty.eq.ityknd(7)) then
        if(kno.le.0.or.kno.gt.iellin) go to 190
        call ellcg1(kno,x_np,y_np,z_np,u_np,v_np,w_np)
c   wed check
      elseif(jty.eq.ityknd(8)) then
        if(kno.le.0.or.kno.gt.iwedn) go to 190
        call wedcg1(kno,x_np,y_np,z_np,u_np,v_np,w_np)
c   box check
      elseif(jty.eq.ityknd(9)) then
        if(kno.le.0.or.kno.gt.iboxin) go to 190
        call boxcg1(kno,x_np,y_np,z_np,u_np,v_np,w_np)
c   arb check
      elseif(jty.eq.ityknd(10)) then
        if(kno.le.0.or.kno.gt.iarbin) go to 190
        call arbcg1(kno,x_np,y_np,z_np,u_np,v_np,w_np)
c   hex check
      elseif(jty.eq.ityknd(11)) then
        if(kno.le.0.or.kno.gt.ihexin) go to 190
        call hexcg1(kno,x_np,y_np,z_np,u_np,v_np,w_np)
c   haf check
      elseif(jty.eq.ityknd(12)) then
        if(kno.le.0.or.kno.gt.ihafin) go to 190
        call hafcg1(kno,x_np,y_np,z_np,u_np,v_np,w_np)
c   tec check
      elseif(jty.eq.ityknd(13)) then
        if(kno.le.0.or.kno.gt.itecin) go to 190
        call teccg1(kno,x_np,y_np,z_np,u_np,v_np,w_np)
c   gel check
      elseif(jty.eq.ityknd(14)) then
        if(kno.le.0.or.kno.gt.igelin) go to 190
        call gelcg1(kno,x_np,y_np,z_np,u_np,v_np,w_np)
c
c**** add new geometry in here
c
      end if
190  continue
      end do
c
      irnear=ir_np
      if(itvalm.eq.0) then
        tval0=cgeps1
        xidd=x_np+tval0*u_np
        yidd=y_np+tval0*v_np
        zidd=z_np+tval0*w_np
310  continue
          if(x_np.ne.xidd.or.y_np.ne.yidd.or.z_np.ne.zidd) goto 320
          tval0=tval0*10.d0
          xidd=x_np+tval0*u_np
          yidd=y_np+tval0*v_np
          zidd=z_np+tval0*w_np
          go to 310
320  continue
c   write(*,*) 'srzone:1'
      call srzone(xidd,yidd,zidd,iq_np,ir_np,irnext)
c
      if(irnext.ne.ir_np) then
        tval=0.0d0
        irnear=irnext
      else
        tval00=0.0d0
        tval10=10.0d0*tval0
        irlold=ir_np
        irlfg=0
330  continue
          if(irlfg.eq.1) go to 340

```

```

        tval00=tval00+tval10
        if(tval00.gt.1.0d+06) then
            write(6,9000) iq(np),ir(np),x(np),y(np),z(np),
&                u(np),v(np),w(np),tval00
9000 format(' TVAL00 ERROR : iq,ir,x,y,z,u,v,w,tval=',
&          2I3,1P7E12.5)
            stop
        end if
        xidd=x_np+tval00*u_np
        yidd=y_np+tval00*v_np
        zidd=z_np+tval00*w_np
        call srzold(xidd,yidd,zidd,irlold,irlfg)
        go to 330
340    continue
c
    tval=tval00
    do j=1,10
        xidd=x_np+tval00*u_np
        yidd=y_np+tval00*v_np
        zidd=z_np+tval00*w_np
c        write(*,*) 'srzone:2'
        call srzone(xidd,yidd,zidd,iq_np,irlold,irnext)
        if(irnext.ne.irlold) then
            tval=tval00
            irnear=irnext
        end if
        tval00=tval00-tval0
    end do
    if(ir_np.eq.irnear) then
        write(0,*) 'ir(np),tval=',ir_np,tval
    end if
end if
else
    do j=1,itvalm-1
        do i=j+1,itvalm
            if(atval(i).lt.atval(j)) then
                atvaltmp=atval(i)
                atval(i)=atval(j)
                atval(j)=atvaltmp
            endif
        enddo
    enddo
    itvlf=0
    tvalmn=tval
    do jjj=1,itvalm
        if(tvalmn.gt.atval(jjj)) then
            tvalmn=atval(jjj)
        end if
        delhow=cgeps2
        tval0=atval(jjj)+delhow
        xidd=x_np+tval0*u_np
        yidd=y_np+tval0*v_np
        zidd=z_np+tval0*w_np
410    continue
        if(x_np.ne.xidd.or.y_np.ne.yidd.or.z_np.ne.zidd) go to 420
        delhow=delhow*10.d0
        tval0=atval(jjj)+delhow
        xidd=x_np+tval0*u_np
        yidd=y_np+tval0*v_np
        zidd=z_np+tval0*w_np
        go to 410
420    continue
c        write(*,*) 'srzone:3'
        call srzone(xidd,yidd,zidd,iq_np,ir_np,irnext)
        if((irnext.ne.ir_np.or.atval(jjj).ge.1.).and.
&          tval.gt.atval(jjj)) THEN
            tval=atval(jjj)
            irnear=irnext
            itvlf=1
            goto 425

```

```

        end if
    end do
425  continue
    if(itvlfq.eq.0) then
        tval0=cgmnst
        xidd=x_np+tval0*u_np
        yidd=y_np+tval0*v_np
        zidd=z_np+tval0*w_np
430  continue
        if(x_np.ne.xidd.or.y_np.ne.yidd.or.z_np.ne.zidd) go to 440
            tval0=tval0*10.d0
            xidd=x_np+tval0*u_np
            yidd=y_np+tval0*v_np
            zidd=z_np+tval0*w_np
            go to 430
440  continue
        if(tvalmn.gt.tval0) then
            tval=tvalmn
        else
            tval=tval0
        end if
    end if
end if
ihitcg=0
if(tval.le.ustep) then
    ustep=tval
    ihitcg=1
end if
if(ihitcg.eq.1) THEN
    if(irnear.eq.0) THEN
        write(6,9200) iq(np),ir(np),x(np),y(np),z(np),
        & u(np),v(np),w(np),tval
9200 format(' TVAL ERROR : iq,ir,x,y,z,u,v,w,tval=',2I3,1P7E12.5)
        idisc=1
        itverr=itverr+1
        if(itverr.ge.100) then
            stop
        end if
        return
    end if
    irnew=irnear
    if(irnew.ne.ir_np) then
        call rstnxt(iq_np,ir_np,irnew)
    endif
end if
return
end
!-----last line of subroutine howfar-----

C ----- uc_LPM_dielectric.inp -----
ELEM
&INP IAPRIM=0,IBOUND=1,INCOH=1,ICPROF=0 /END
AU
AU
ENER
&INP AE=0.611,UE=3.0e+4,AP=0.1,UP=3.0e+4 /END
TEST
&INP /END
PWLF
&INP /END
DECK
&INP /END

C ----- uc_LPM_dielectric.data -----
RPP 1 -5.00 5.00 -5.00 5.00 0.00 0.020
RPP 2 -5.00 5.00 -5.00 5.00 50.00 100.00
RPP 3 -10.00 10.00 -10.00 20.00 -2.00 110.00
RPP 4 -11.00 11.00 -11.00 21.00 -3.00 111.00
END
Z1 +1

```

```
Z2    +2
Z3    +3  -1 -2
Z4    +4  -3
END
1 0 0 0
```

補遺 C Spin-Molière モデルの計算プログラム

本章では、4章の Spin-Molière の組み込みにおいて、EGS5 コードの修正および追加を行った箇所のフローチャートおよびプログラムリストを示す。このプログラムは、単元素の物質にのみ適用可能である。

C.1 フローチャート

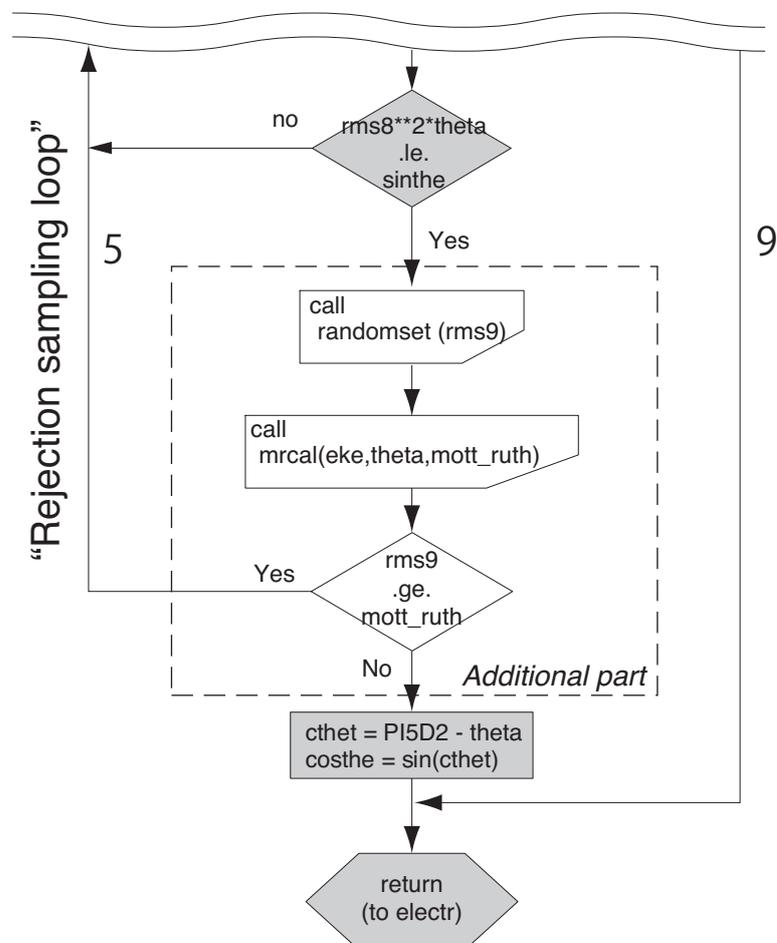


図 C.1: MSCAT サブルーチンの追加箇所。

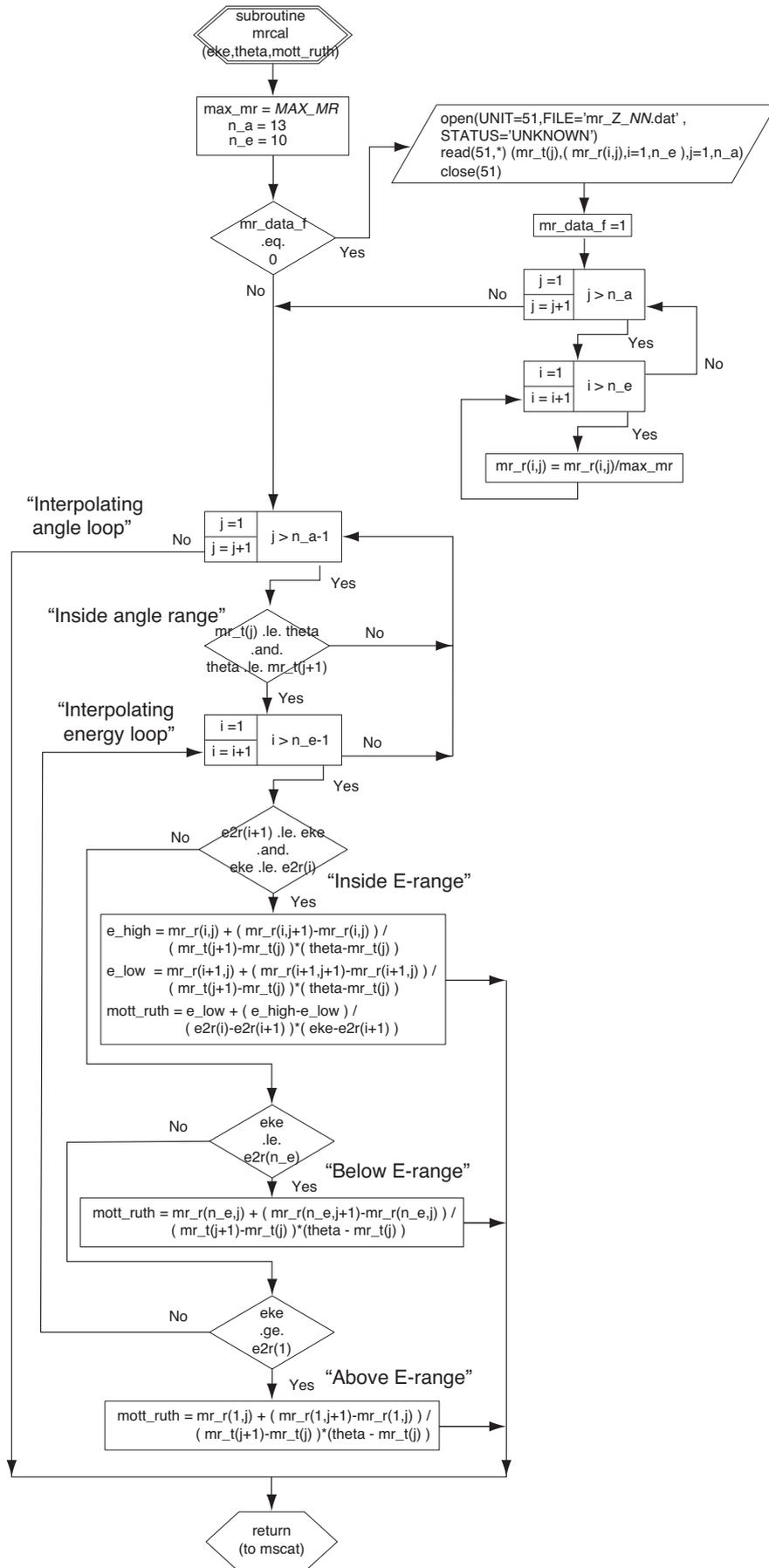


図 C.2: MRCAL サブルーチン。

C.2 プログラムリスト

C.2.1 MSCAT サブルーチン

```
!-----egs5_mscat.f-----
! Version: 060313-1005
! Reference: SLAC-R-730/KEK-2005-8
!-----

!-----
! Modified by Y.Kirihara 06.July.2008
! Include Mott/Ruth rejection
! Rejection for cos2(theta/2)
!-----
!23456789|123456789|123456789|123456789|123456789|123456789|123456789|12

subroutine mscat

implicit none

include 'include/egs5_h.f'           ! Main EGS5 "header" file

include 'include/egs5_elec.in.f'    ! COMMONs required by EGS5 code
include 'include/egs5_epcont.f'
include 'include/egs5_misc.f'
include 'include/egs5_ms.f'
include 'include/egs5_mults.f'
include 'include/egs5_media.f'
include 'include/egs5_stack.f'
include 'include/egs5_thresh.f'
include 'include/egs5_uphi.in.f'
include 'include/egs5_uphiot.f'
include 'include/egs5_useful.f'
include 'include/egs5_userpr.f'
include 'include/egs5_usersc.f'

include 'include/counters.f'        ! Additional (non-EGS5) COMMONs

real*8 rms1,rms2,rms3,rms4,rms5,rms6,rms7,rms8      ! Arguments

real*8                                               ! Local variables
* g21,g22,g31,g32,g2,g3,
* bm1,bm2,bi,bmd,xr,eta,thr,cthet
integer i21,i22,i31,i32

integer iegrid, iamu, iprt, ik1, im
real*8 decade,delog,demod, xmu, xi, b1,c1, x1,x2, fject,fmax
real*8 ktot

c -----
c Added by Y. Kirihara 06.July.2008
c Parameter mott_ruth and rms9
c using Mott/Ruth rejection at line 204-206
c -----
real*8 mott_ruth,rms9
integer useSpinM

imscat = imscat + 1           ! Count entry into subroutine
im = medium

! GS multiple scattering distribution. Optional,
! and kinetic energy must be less than 100 MeV.

if(useGSD(im).ne.0 .and. eke.lt.msgrid(nmsgrd(im),im)) then

    if(iq(np) .eq. -1) then
        iprt = 1
    else

```

```

    iprt = 2
endif

!--> find the correct energy interval
delog = DLOG10(eke*1.d6)
demod = MOD(delog,1.d0)
decade = delog - demod
iegrid = nmsdec(im) * (decade - initde(im) + demod) - jskip(im)

if(iegrid .ge. nmsgprd(im)) iegrid = nmsgprd(im) - 1

!--> randomly select which energy point to use
fject = (eke - msgprd(iegrid,im)) /
&      (msgprd(iegrid+1,im) - msgprd(iegrid,im))
call randomset(xi)
if(xi .lt. fject) iegrid = iegrid + 1

!--> find the correct K1 interval
ktot = klrsd(np) + klinit(np)
ik1 = DLOG(ktot/klgrd(iprt,1)) / dk1log(iprt) + 1
if(ik1 .gt. NK1) then
    ik1 = NK1-1
else if(ik1 .le. 0) then
    ik1 = 1
endif

!--> randomly select which interval to use
fject = (ktot - klgrd(iprt,ik1)) /
&      (klgrd(iprt,ik1+1) - klgrd(iprt,ik1))
call randomset(xi)
if(xi .lt. fject) ik1 = ik1 + 1

!--> first check for no-scatter probability
call randomset(xi)
if(xi.lt.pnoscat(iprt,iegrid,ik1,im)) return

!--> get the angular interval
call randomset(xi)
iamu = xi * neqp(im) + 1
!--> if we're in the last bin, get the sub-bin number
if(iamu .eq. neqp(im)) then
    call randomset(xi)
    if(xi .lt. ecdf(2,iprt,iegrid,ik1,im)) then
        iamu = 1
    else
        call findi(ecdf(1,iprt,iegrid,ik1,im),xi,neqa(im)+1,iamu)
    endif
    iamu = iamu + neqp(im) - 1
endif

b1 = ebms(iamu,iprt,iegrid,ik1,im)
eta = eetams(iamu,iprt,iegrid,ik1,im)
x1 = eamu(iamu,iprt,iegrid,ik1,im)
x2 = eamu(iamu+1,iprt,iegrid,ik1,im)

c1 = (x2 + eta) / (x2 - x1)
!   fmax = 1.d0 + b1 * (x2 - x1)**2
fmax = 1.d0 + .25d0 * b1 * (x2 - x1)**2

!--> rejection loop
6   continue
    !--> sample Wentzel shape part of fit
    call randomset(xi)
    xmu = ((eta * xi) + (x1 * c1)) / (c1 - xi)
    !--> rejection test
    fject = 1.d0 + b1 * (xmu - x1) * (x2 - xmu)
    call randomset(xi)
    if(xi * fmax .gt. fject) go to 6

costhe = 1.d0 - 2.d0 * xmu

```

```

    sinthe = DSQRT(1.d0 - costhe * costhe)
    iskpms = 0
    return

!--> user or lower limit initiated skip of MS
else if (nomsct(ir(np)).eq.1 .or. iskpms.ne.0) then
    sinthe = 0.
    costhe = 1.
    theta = 0.
    noscat = noscat + 1
    iskpms = 0
    return

end if

xr = sqrt(gms*tvstep*b)

! Set bi (B-inverse) that will be used in sampling
! (bi must not be larger than 1/lambda=1/2)
if (b .gt. 2.) then
    bi = 1./b
else
    bi = 0.5
end if
bmd = 1. + 1.75*bi
bm1 = (1. - 2./b)/bmd
bm2 = (1. + 0.025*bi)/bmd

! -----
1 continue ! Loop for Bethe correction factor (or other) rejection
! -----

call randomset(rms1)
if (rms1 .le. bm1) then ! Gaussian, F1
    call randomset(rms2)
    if (rms2 .eq. 0.) then
        rms2 = 1.E-30
    end if
    thr = sqrt(max(0.D0, -log(rms2)))
else if (rms1 .le. bm2) then ! Tail, F3
    call randomset(rms3)
    call randomset(rms4)
    eta = max(rms3, rms4)
    i31 = b0g31 + eta*b1g31
    g31 = g310(i31) + eta*(g311(i31) + eta*g312(i31))
    i32 = b0g32 + eta*b1g32
    g32 = g320(i32) + eta*(g321(i32) + eta*g322(i32))
    g3 = g31 + g32*bi ! Rejection function
    call randomset(rms5)
    if (rms5 .gt. g3) go to 1
    thr = 1./eta
else ! Central correction, F2
    call randomset(rms6)
    thr = rms6
    i21 = b0g21 + thr*b1g21
    g21 = g210(i21) + thr*(g211(i21) + thr*g212(i21))
    i22 = b0g22 + thr*b1g22
    g22 = g220(i22) + thr*(g221(i22) + thr*g222(i22))
    g2 = g21 + g22*bi ! Rejection function
    call randomset(rms7)
    if (rms7 .gt. g2) go to 1
end if

theta = thr*xr ! Real angle (thr is the reduced angle)
if (theta .ge. PI) go to 1

sinthe = sin(theta)
call randomset(rms8)
if (rms8**2*theta .le. sinthe) go to 2
go to 1

```

```

2   continue
   cthet = PI5D2 - theta
   costhe = sin(cthet)

c   -----
c   Added by Y. Kiriwara 06,17.July.2008
c   Rejection by Mott/Ruth:cos2(theta/2)
c   and call linear interpolation of Mott/Ruth ratio subroutine "mrcal"
c   -----
c useSpinM is use Moliere including spin effect.
c   0: not use.
c   1: cos2(theta/2)
c   2: Mott/Ruth subroutine "mrcal"
   useSpinM = 2
   call randomset(rms9)
   if (useSpinM.eq.0) then
     go to 3
   else if (useSpinM.eq.1) then
     mott_ruth = ( cos(theta/2) )**2
     if (rms9 .ge. mott_ruth) go to 1
   else if (useSpinM.eq.2) then
     call mrcal(eke,theta,mott_ruth)
     if (rms9 .ge. mott_ruth) go to 1
   end if
3   continue
c   -----

                                     ! -----
return                                     ! Return to ELECTR
                                     ! -----

end

```

!-----last line of egs5_mscat.f-----

C.2.2 MRCAL サブルーチン

```

!-----egs5_mrcal.f-----
!-----
! PROGRAMMERS: Y. Kiriwara *
!               Radiation Science Center *
!               Applied Science Laboratory *
!               KEK, High Energy Accelerator Research Organization *
!               1-1, Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801 *
!               Japan *
! *
!               E-mail: kyoichi@post.kek.jp *
!-----
subroutine mrcal(eke,theta,mott_ruth)

implicit none

integer i,j,n_a,n_e,n_c
real*8 mr_t(13),mr_r(10,13),theta,mott_ruth,e2r(10),eke,max_mr
real*8 e_low,e_high

max_mr = 2.226216          ! Max Mott/Ruth

n_a = 13                  ! column: Number of Angle
n_e = 10                  ! row: Number of Energy

! Energy 1:10, 2:5, 3:2.5, 4:1.0, 5:0.5, 6:0.25, 7:0.1, 8:0.05,
!           9:0.025, 10:0.005 in [MeV]
data e2r/10.,5.,2.5,1.0,0.5,0.25,0.1,0.05,0.025,0.005/

open(UNIT= 51,FILE='mr_Z_79.dat',STATUS='unknown')
read(51,*) ( mr_t(j),( mr_r(i,j),i=1,n_e ),j=1,n_a)

```

```

do j=1,n_a
  do i=2,n_e
    mr_r(i,j) = mr_r(i,j)/max_mr
  end do
end do

close(51)

-----
c----- Interpolation algorithm -----
c-----
do j = 1,n_a-1      ! angle loop :column
  if ( mr_t(j).lt.theta .and. theta.lt.mr_t(j+1) ) then
    do i = 1,n_e-1  ! energy loop :row
      if ( e2r(i+1).lt.eke .and. eke.lt.e2r(i) ) then

        e_high = mr_r(i,j) + ( mr_r(i,j+1)-mr_r(i,j) )
*          / ( mr_t(j+1)-mr_t(j) )*( theta-mr_t(j) )

        e_low  = mr_r(i+1,j) + ( mr_r(i+1,j+1)-mr_r(i+1,j) )
*          / ( mr_t(j+1)-mr_t(j) )*( theta-mr_t(j) )

        mott_ruth = e_low + ( e_high-e_low )
*          / ( e2r(i)-e2r(i+1) )*( eke-e2r(i+1) )

        ! just energy
        else if ( eke.eq.e2r(i) .and. i.ne.1 .and. i.ne.n_e ) then
          mott_ruth = mr_r(i,j) + ( mr_r(i,j+1)-mr_r(i,j) )
*          / ( mr_t(j+1)-mr_t(j) )*(theta - mr_t(j) )

          ! energy less than 0.005 MeV
          else if ( i.eq.1 .and. eke.le.e2r(n_e) ) then
            mott_ruth = mr_r(n_e,j) + ( mr_r(n_e,j+1)-mr_r(n_e,j) )
*            / ( mr_t(j+1)-mr_t(j) )*(theta - mr_t(j) )

            ! energy greater than 10.0 MeV
            else if ( i.eq.1 .and. eke.ge.e2r(1) ) then
              mott_ruth = mr_r(1,j) + ( mr_r(1,j+1)-mr_r(1,j) )
*              / ( mr_t(j+1)-mr_t(j) )*(theta - mr_t(j) )

            end if
          end do      ! end energy loop

        else if ( mr_t(j).eq.theta ) then ! just theta
          do i = 1,n_e-1  ! energy loop
            if ( e2r(i+1).lt.eke .and. eke.lt.e2r(i) ) then
              mott_ruth = mr_r(i+1,j) + ( mr_r(i,j)-mr_r(i+1,j) )
*              / ( e2r(i)-e2r(i+1) )*( eke-e2r(i+1) )

            else if ( eke.eq.e2r(i) ) then ! just energy
              mott_ruth = mr_r(i,j)

              ! energy less than 0.005
              else if ( i.eq.1 .and. eke.le.e2r(n_e) ) then
                mott_ruth = mr_r(n_e,j)

                ! energy greater than 10.0
                else if ( i.eq.1 .and. eke.ge.e2r(1) ) then
                  mott_ruth = mr_r(1,j)

                end if
              end do
            end if
          end do
        end do
      end if
    end do
  end do
end do
-----

return                                     ! -----
                                           ! Return to mscat
                                           ! -----

```

end

C.2.3 Spin-Molière 計算用ユーザプログラム

```
*****
***** High Energy Accelerator Research Organization*
*** u c r e s t e r *** *
***** EGS5.0 USER CODE - 11 Sep 2006/1315 *
!* This is a simple plane geometry. *
*****
!
! PROGRAMMERS: H. Hirayama and Y. Namito *
! Radiation Science Center *
! Applied Science Laboratory *
! KEK, High Energy Accelerator Research Organization *
! 1-1, Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801 *
! Japan *
!
! E-mail: hideo.hirayama@kek.jp *
! Telephone: +81-29-864-5489 *
! Fax: +81-29-864-1993 *
! Based on ucrtz_homog by Nelson and James. *
!
*****
! Modified by Y.Kirihara 22.May.2008 *
! Target materials are AL and Be. *
! Energis are 1.0 and 6.0 MeV. *
! The bin of Reflected electron was changed to per 1 keV. *
*****
! This user code to get energy spectrum of transmitted or refrected *
! electrons compared with measurements by Rester et al. *
! Use Ranlux random number generator. *
! The following shows the geometry *
*****
!
! ----- *
! 1-Dimensional Plane Z Geometry (ucsamp15 example) *
! ----- *
!
! Y (X into page) *
! ^ *
! | *
! | Au or | Vacuum *
! | Be | *
! | *
! 6 MeV | *
! =====>+-----> Z *
! electron 0 0.1, 0.22, 0.31, 0.32, 0.62 g/cm^2 Au *
! 0.15, 0.31, 0.27, 0.75 g/cm^2 Be *
*****
!23456789|123456789|123456789|123456789|123456789|123456789|123456789|12
!-----
!----- main code -----
!-----
! Step 1. Initialization
!-----

implicit none

! -----
! EGS5 COMMONs
! -----
include 'include/egs5_h.f' ! Main EGS "header" file
```

```

include 'include/egs5_bounds.f'
include 'include/egs5_brempr.f'
include 'include/egs5_edge.f'
include 'include/egs5_elec.in.f'
include 'include/egs5_media.f'
include 'include/egs5_misc.f'
include 'include/egs5_scpw.f'
include 'include/egs5_thresh.f'
include 'include/egs5_uphiot.f'
include 'include/egs5_useful.f'
include 'include/egs5_usersc.f'
include 'include/egs5_uservr.f'
include 'include/egs5_userxt.f'
include 'include/randomm.f'

! -----
! Auxiliary-code COMMONs
! -----
include 'auxcommons/lines.f'

common/passit/zthick
real*8 zthick

common/totals/espec(6,100),wiang(6),deltae,trans(100),refr(100),
*      angd(18),wiangd(6),bs_deltae
real*8 espec,deltae,wiang,trans,refr,angd,wiangd,bs_deltae

real*8 ei,ekin,etot,totke,xi,yi,zi,      ! Arguments
*      ui,vi,wi,wti,inc_e

real*8 esour(2),especs(6,100),espec2s(6,100),tal(5),tbe(4)
real*8 angds(18),angd2s(18)
real*8 transs(100),trans2s(100),refrs(100),refr2s(100)
real*8 elow,especerr,eupp,sang,thick,alow,aupp,angderr

real tarray(2)

real t0,t1,timecpu,tt          ! Local variables
real cfac,etime
integer i,idinc,ie,imat,iqi,iri,ithick,j,k,ncases,ipegs,isen
character*24 medarr(2)

character buffer(72)
integer hasGS,nfmeds
real*8
* chard0,efrch0,efrc10,ue0,ae0,
* dedx0,eavail,eke,elke,eloss,kinit0,lelke,scpow0,tmscat0

data tal/0.03717,0.08178,0.11524,14.0,14.0/
! Al:0.10,0.22,0.31,0.32,37.66 g/cm^2, rho=2.69
data tbe/7.764d-03,0.016046,0.019151,14.0/
! Be: 0.15,0.31,0.37,25.9 g/cm^2, rho=1.848

c-----
c Reflected and angular distribution , modified by Y.Kirihara 26.Jun.2008
c-----
!      cos theta corresponding to 90.0, 105.0, 120.0, 135.0, 150.0, 165.0, 180.0
data wiang/-0.25882,-0.5,-0.70711,-0.86603,-0.96593,-1.0/

c !      cos theta corresponding to 97.5, 112.5, 127.5, 142.5, 157.5, 172.5
c      data wiang/-0.13053,-0.38268,-0.60876,-0.79335,-0.92388,-0.99144/

!      cos theta corresponding to 90 to 180 degrees with 15 degree interval
data wiangd/-0.25882,-0.5000,-0.70711,-0.86603,-0.96593,-1.0/

!      Source energy in MeV
data esour/1.0,6.0/

! -----
!      Open files

```

```

! -----
open(UNIT= 1,FILE='egs5job.out',STATUS='unknown')
open(UNIT= 2,FILE='egs5job.hist',STATUS='unknown')
open(UNIT= 12,FILE='energy.dat',STATUS='unknown')
open(UNIT= 21,FILE='bs_E_PDF.hist',STATUS='unknown')

! =====
call counters_out(0)
! =====

!-----
! Step 2: pegs5-call
!-----
! =====
call block_set           ! Initialize some general variables
! =====

! -----
! define media before calling PEGS5
! -----

nmed=2
medarr(1)='AU           '
medarr(2)='BE           '

do j=1,nmed
do i=1,24
media(i,j)=medarr(j)(i:i)
end do
end do

c-----
c Material is imat=1 for AU and imat=2 for Be.
imat=1
c Chard is slabthickness.
cfac=1

c Target thick is 14.0 cm.
ithick=4
thick=tbe(ithick)
chard(1)=tal(1)*cfac
chard(2)=thick*cfac

! -----
! Run PEGS5 before calling HATCH
! -----
write(1,100)
100 FORMAT(' PEGS5-call comes next')

! =====
call pegs5
! =====

!-----
! Step 3: Pre-hatch-call-initialization
!-----

! -----
! Set of option flag for region 2
! 1: on, 0: off
! -----
nreg=3

med(1)=0
med(2)=imat
med(3)=0

ecut(2)= 0.0      ! egs cut off energy for electrons
pcut(2)= 0.0      ! egs cut off energy for photons
iphter(2) = 0     ! Switches for PE-angle sampling

```

```

iedgfl(2) = 0      ! K & L-edge fluorescence
iauger(2) = 0      ! K & L-Auger
iraylr(2) = 0      ! Rayleigh scattering
lpolar(2) = 0      ! Linearly-polarized photon scattering
incohr(2) = 0      ! S/Z rejection
iprofr(2) = 0      ! Doppler broadening
impacr(2) = 0      ! Electron impact ionization

! -----
! Random number seeds. Must be defined before call hatch.
! ins (1- 2^31)
! -----
inseed=1
luxlev=1

! =====
call rluxinit ! Initialize the Ranlux random-number generator
! =====

!-----
! Step 4: Determination-of-incident-particle-parameters
!-----
iqi=-1
xi=0.0
yi=0.0
zi=0.0
ui=0.0
vi=0.0
wi=1.0
iri=2
wti=1.0

ncases=1.0e+5
idinc=-1
c read(5,*) isen
c if(isen.le.0.or.isen.gt.2) then
c   write(6,*) 'You must select from 1 - 2 !'
c   go to 20
c end if
c ekin=esour(isen)
c-----
c Incident energy is 6.0 MeV.
read(12,*) inc_e
ekin=inc_e
ei=ekin+RM
deltae = ekin*0.01

!-----
! Step 5: hatch-call
!-----
! Total energy of incident source particle must be defined before hatch
! Define possible maximum total energy of electron before hatch
if (iqi.ne.0) then
  emaxe = ei          ! charged particle
else
  emaxe = ei + RM    ! photon
end if

c-----
c Not use GS, use Moliere
c write(6,*) 'Use GS. 1:yes, other use Moliier'
c read(5,*) useGSD(1)
useGSD(1)=0

! -----
! Open files (before HATCH call)
! -----
open(UNIT=KMPI,FILE='pgs5job.pegs5dat',STATUS='old')
open(UNIT=KMPO,FILE='egs5job.dummy',STATUS='unknown')

```

```

write(1,130)
130 FORMAT(/,' HATCH-call comes next',/)

! =====
! call hatch
! =====

medium=imat
!--> Get energy grid parameters
eke = ekin
elke = log(eke)
lelke = eke1(medium)*elke + eke0(medium)

if(iqi .eq. -1) then
  dedx0 = ededx1(lelke,medium)*elke + ededx0(lelke,medium)
  scpow0 = escpw1(lelke,medium)*elke + escpw0(lelke,medium)
else
  dedx0 = pdedx1(lelke,medium)*elke + pdedx0(lelke,medium)
  scpow0 = pscpw1(lelke,medium)*elke + pscpw0(lelke,medium)
end if

!--> Get scattering strength
if(iqi .eq. -1) then
  kinit0 = ekini1(lelke,medium)*elke + ekini0(lelke,medium)
else
  kinit0 = pkini1(lelke,medium)*elke + pkini0(lelke,medium)
end if

!--> steps can be scaled by region
if(k1Lscl(2).ne.0.d0 .and. k1Hscl(2).ne.0.d0) then
  kinit0 = kinit0 * (k1Lscl(2) + k1Hscl(2) * elke)
end if

tmecat0=kinit0/scpow0

! -----
! Close files (after HATCH call)
! -----
close(UNIT=KMPI)
close(UNIT=KMPO)

! -----
! Print various data associated with each media (not region)
! -----
write(1,140)
140 FORMAT(/,' Quantities associated with each MEDIA:')
do j=1,nmed
  write(1,150) (media(i,j),i=1,24)
150  FORMAT(/,1X,24A1)
  write(1,160) rhom(j),rlcm(j)
160  FORMAT(5X,' rho=',G15.7,' g/cu.cm    rlc=',G15.7,' cm')
  write(1,170) ae(j),ue(j)
170  FORMAT(5X,' ae=',G15.7,' MeV    ue=',G15.7,' MeV')
  write(1,180) ap(j),up(j)
180  FORMAT(5X,' ap=',G15.7,' MeV    up=',G15.7,' MeV',/)
end do

!-----
! Step 6: Initialization-for-howfar
!-----
zthick=thick

! zthick is slab thickness in cm

!-----
! Step 7: Initialization-for-ausgab
!-----
! icsda =0 ! Non-zero means without hard collision.

do i=1,6

```

```

c      do ie=1,50
        do ie=1,100
            espec(i,ie)=0.D0
            especs(i,ie)=0.D0
            espec2s(i,ie)=0.D0
        end do
    end do

c      do ie=1,50
        do ie=1,100
            trans(ie)=0.D0
            transs(ie)=0.d0
            trans2s(ie)=0.d0
            refr(ie)=0.d0
            refrs(ie)=0.D0
            refr2s(ie)=0.D0
        end do

        do ie=1,18
            angd(ie)=0.D0
            angds(ie)=0.d0
            angd2s(ie)=0.d0
        end do

        nlines=0
        nwrite=15

!-----
! Step 8: Shower-call
!-----

        tt=etime(tarray)
        t0=tarray(1)

        write(1,190)
190    format(/,' Shower Results:',///,7X,'e',14X,'z',14X,'w',10X,
1      'iq',3X,'ir',2X,'iarg',/)

        do i=1,ncases

            if (nlines.lt.nwrite) then
                write(1,200) i,ei,zi,wi,iqi,iri,idinc
200    format(i2,3G15.7,3I5)
                nlines=nlines+1
            end if

            call shower(iqi,ei,xi,yi,zi,ui,vi,wi,iri,wti)

            do j=1,6
c          do ie=1,50
                do ie=1,100
                    especs(j,ie)=especs(j,ie)+espec(j,ie)
                    espec2s(j,ie)=espec2s(j,ie)+espec(j,ie)*espec(j,ie)
                    espec(j,ie)=0.d0
                end do
            end do

c          do ie=1,50
                do ie=1,100
                    transs(ie)=transs(ie)+trans(ie)
                    trans2s(ie)=trans2s(ie)+trans(ie)*trans(ie)
                    trans(ie)=0.d0
                    refrs(ie)=refrs(ie)+refr(ie)
                    refr2s(ie)=refr2s(ie)+refr(ie)*refr(ie)
                    refr(ie)=0.d0
                end do

                do ie=1,18
                    angds(ie)=angds(ie)+angd(ie)
                    angd2s(ie)=angd2s(ie)+angd(ie)*angd(ie)
                    angd(ie)=0.d0
                end do
            end do
        end do

```

```

        end do

    end do

    tt=etime(tarray)
    t1=tarray(1)

    timecpu=t1-t0
    write(1,210) timecpu
210  format(/,' Elapsed Time (sec)=' ,1PE12.5)

!-----
! Step 9:  Output-of-results
!-----

    totke=ncases*ekin
    write(1,220) ekin,ncases
220  format(/,' Incident kinetic energy of electron=' ,F12.4,' MeV' ,/,
    *' Number of cases in run=' ,I7/)

    if(useGSD(1).eq.1) then
        write(1,*) 'GS model is used.'
        write(2,*) 'GS model is used.'
    end if

    if(chard(2).ne.0.0) then ! use characteristic distance
        write(1,*) 'med(2),char(2)=' ,med(2),char(2)
        write(2,*) 'med(2),char(2)=' ,med(2),char(2)
        eloss=dedx0*char(2)/ekin
        write(1,*) 'ue(2)=' ,ue(2)
        write(1,*) 'dedx0(for ekin)*char(2)/ekin =',eloss
    else
        open(UNIT=17,FILE='pgs5job.msfit',STATUS='old')
        read(17,*) nfmcds
        do i=1,med(2)
            read(17,'(72a1)') buffer
            read(17,*) hasGS, charD0, efrch0, efrcl0, ue0, ae0
        end do
        write(1,*) 'efrach and efrac1=' ,efrch0,efrcl0
        write(2,*) 'efrach and efrac1=' ,efrch0,efrcl0
        close(17)
    end if

    write(1,*) 'kinit0, tmscat0 for ekin =' ,kinit0,tmscat0

    write(1,*) ' AE and AP =' ,AE(1),AP(1)

    if(imat.eq.1) then
        write(1,*) 'Aluminum plate. ek(MeV), thick(cm)',ekin,zthick
        write(2,*) 'Aluminum plate. ek(MeV), thick(cm)',ekin,zthick
    else
        write(1,*) 'Be plate. ek(MeV), thick(cm)',ekin,zthick
        write(2,*) 'Be plate. ek(MeV), thick(cm)',ekin,zthick
    end if

    write(1,*) ' chard and zthick (in cm) =' ,chard(imat),zthick

    write(1,*) 'Transmit spectrum. electrons/MeV'
    write(2,*) 'Transmit spectrum. electrons/MeV'

    do ie=1,100
        eupp=ie*deltae
        elow=(ie-1)*deltae
        if(elow.gt.ekin) go to 250
        transs(ie)=transs(ie)/ncases
        trans2s(ie)=trans2s(ie)/ncases
        especerr=dsqrt((trans2s(ie)-transs(ie)*transs(ie))/ncases)
        transs(ie)=transs(ie)/deltae
        especerr=especerr/deltae
        write(1,230) eupp,transs(ie),especerr
230  format(' Upper energy (' ,G10.4,'MeV)=' ,G15.5,'+-' ,G15.5,

```

```

*          '/MeV/Sr/source')
  write(2,240) elow,transs(ie)
  write(2,240) eupp,transs(ie)
240  format(G15.5,' ',G15.5)
  end do

250  write(1,*) 'Reflected spectrum. electrons/MeV'
  write(2,*) 'Reflected spectrum. electrons/MeV'
  write(21,*) '#Reflected spectrum. electrons/MeV'

c    do ie=1,50
  do ie=1,100
    eupp=ie*deltae
    elow=(ie-1)*deltae
    if(elow.gt.ekin) go to 260
    refrs(ie)=refrs(ie)/ncases
    refr2s(ie)=refr2s(ie)/ncases
    especerr=dsqrt((refr2s(ie)-refrs(ie)*refrs(ie))/ncases)
    refrs(ie)=refrs(ie)/deltae
    especerr=especerr/deltae
    write(1,230) eupp,refrs(ie),especerr
    write(2,240) elow,refrs(ie)
    write(2,240) eupp,refrs(ie)
    write(21,255) elow,eupp,refrs(ie),especerr
255  format(G15.5,' ',G15.5,' ',G15.5,' ',G15.5)
  end do

260  continue

c-----
c Angular distribution modified by Y.Kirihara 26.Jun.2008
c-----
  write(1,270)
270  format('/ Angular distribution of transmitted electrons',
*        ' above 10keV')
  write(2,270)

c    do ie=1,18
  do ie=1,6 !15deg. (90-180:reflected)
    if(ie.eq.1) then
      sang=2.0*PI*(1.0-wiangd(1))
    else
      sang=2.0*PI*(wiangd(ie-1)-wiangd(ie))
    end if

    alow=90.0+(ie-1)*15.0
    aupp=90.0+ie*15.0
    angds(ie)=angds(ie)/ncases
    angd2s(ie)=angd2s(ie)/ncases
    angderr=dsqrt((angd2s(ie)-angds(ie)*angds(ie))/ncases)
    angds(ie)=angds(ie)/sang
    angderr=angderr/sang
    write(1,280) aupp,angds(ie),angderr
280  format(' Upper angle (',G10.4,'degree)=' ,G15.5,'+-',G15.5,
*        '/Sr/source')
    write(2,240) alow,angds(ie)
    write(2,240) aupp,angds(ie)
  end do

  do i=1,6
    if(i.eq.1) then
      sang=2.0*PI*(0.0-wiang(1))
      write(1,*) '97.5 degree. (90-105 degrees)'
      write(2,*) '97.5 degree. (90-105 degrees)'
    elseif(i.eq.2) then
      sang=2.0*PI*(wiang(1)-wiang(2))
      write(1,*) '112.5 degree. (105-120 degrees)'
      write(2,*) '112.5 degree. (105-120 degrees)'
    elseif(i.eq.3) then
      sang=2.0*PI*(wiang(2)-wiang(3))

```

```

        write(1,*) '127.5 degree. (120-135 degrees)'
        write(2,*) '127.5 degree. (120-135 degrees)'
    elseif(i.eq.4) then
        sang=2.0*PI*(wiang(3)-wiang(4))
        write(1,*) '142.5 degree. (135-150 degrees)'
        write(2,*) '142.5 degree. (135-150 degrees)'
    elseif(i.eq.5) then
        sang=2.0*PI*(wiang(4)-wiang(5))
        write(1,*) '157.5 degree. (150-165 degrees)'
        write(2,*) '157.5 degree. (150-165 degrees)'
    elseif(i.eq.6) then
        sang=2.0*PI*(wiang(5)-wiang(6))
        write(1,*) '172.5 degree. (165-180 degrees)'
        write(2,*) '172.5 degree. (165-180 degrees)'
    end if
    do ie=1,100
        eupp=ie*deltae
        elow=(ie-1)*deltae
        if(elow.gt.ekin) go to 290
        especs(i,ie)=especs(i,ie)/ncases
        espec2s(i,ie)=espec2s(i,ie)/ncases
        especerr=dsqrt((espec2s(i,ie)-especs(i,ie)*especs(i,ie))
*           /ncases)
        especs(i,ie)=especs(i,ie)/sang/deltae
        especerr=especerr/sang/deltae
        write(1,230) eupp,especs(i,ie),especerr
        write(2,240) elow,especs(i,ie)
        write(2,240) eupp,especs(i,ie)
    end do
290  continue
    end do

    stop
    end

!-----last line of main code-----

!-----ausgab.f-----
! Version: 040830-1800
! Reference: SLAC-730, KEK-2004-5 (Appendix 2)
!-----
!23456789|123456789|123456789|123456789|123456789|123456789|123456789|12
!-----
! Required subroutine for use with the EGS5 Code System
!-----
! A simple AUSGAB to:
!
! 1) Score energy deposition
! 2) Print out stack information
! 3) Print out particle transport information (if switch is turned on)
!
!-----

subroutine ausgab(iarg)

implicit none

include 'include/egs5_h.f'           ! Main EGS "header" file

include 'include/egs5_epcont.f'     ! COMMONs required by EGS5 code
include 'include/egs5_stack.f'
include 'include/egs5_useful.f'
include 'auxcommons/lines.f'

common/totals/espec(6,100),wiang(6),deltae,trans(100),refr(100),
*   angd(18),wiangd(6),bs_deltae
real*8 espec,deltae,wiang,trans,refr,angd,wiangd,bs_deltae

integer iarg                       ! Arguments

```

```

integer iang,ie

! -----
! Add enegy spectrun if electron leaks to region 1 or 3
! -----
if(iq(np).eq.-1.and.ir(np).ne.2) then ! electron at region 1 or 3
  ie=(e(np)-RM)/deltae + 1
  if(ie.gt.100) ie=100

  if(ir(np).eq.1) then ! Refrection
    refr(ie)=refr(ie)+wt(np)

c-----
c Angular distribution modified by Y.Kirihara 26.Jun.2008
c-----
    do iang=1,6
      if(w(np).ge.wiangd(iang)) go to 90
    end do
90   if(iang.gt.6) iang=6
      angd(iang)=angd(iang)+wt(np)

      if(w(np).ge.wiang(1)) then
        iang = 1      ! 97.5 degree
      elseif(w(np).le.wiang(1).and.w(np).ge.wiang(2)) then
        iang = 2      ! 112.5 degrees
      elseif(w(np).le.wiang(2).and.w(np).ge.wiang(3)) then
        iang = 3      ! 127.5 degrees
      elseif(w(np).le.wiang(3).and.w(np).ge.wiang(4)) then
        iang = 4      ! 142.5 degrees
      elseif(w(np).le.wiang(4).and.w(np).ge.wiang(5)) then
        iang = 5      ! 157.5 degrees
      elseif(w(np).le.wiang(5).and.w(np).ge.wiang(6)) then
        iang = 6      ! 172.5 degrees
      else
        go to 100
      end if

      espec(iang,ie)=espec(iang,ie)+ wt(np)
    else
      ! Transmission
      trans(ie)=trans(ie)+wt(np)

    end if
  end if

! -----
! Print out stack information (for limited number cases and lines)
! -----

100  if (nlines.lt.nwrite) then
120  write(1,120) e(np),z(np),w(np),iq(np),ir(np),iarg
      FORMAT(3G15.7,3I5)
      nlines=nlines+1
    end if

    return
  end

!-----last line of ausgab.f-----

!-----howfar.f-----
! Version: 040902-1630
! Reference: SLAC-730, KEK-2004-5 (Appendix 2)
!-----
!23456789|123456789|123456789|123456789|123456789|123456789|123456789|12
!-----
! Required (geometry) subroutine for use with the EGS5 Code System
!-----
! This is a 1-dimensional plane geometry.
!-----

```

```

subroutine howfar

implicit none

include 'include/egs5_h.f'           ! Main EGS "header" file

include 'include/egs5_epcont.f'     ! COMMONs required by EGS5 code
include 'include/egs5_stack.f'

common/passit/zthick
real*8 zthick

real*8 deltax                       ! Local variables
integer irnxt

if (ir(np).ne.2) then
  idisc = 1
  return
end if

dnear(np) = dmin1(z(np),zthick-z(np))

!-----
! Particle going parallel to planes
!-----
  if(w(np).eq.0) return

!-----
! Check forward plane first since shower heading that way
! most of the time
!-----
  if (w(np).gt.0.0) then
    deltax=(zthick-z(np))/w(np)
    irnxt=3

!-----
! Otherwise, particle must be heading in backward direction.
!-----
  else
    deltax=-z(np)/w(np)
    irnxt=1
  end if

  if (deltax.le.ustep) then
    ustep=deltax
    irnew=irnxt
  end if

  return
end

!-----last line of howfar.f-----

C ----- uc_Spin_Moliere.inp -----
ELEM
  &INP EFRACH=0.1,EFRACL=0.1 /END
AU
  AU
AU
ENER
  &INP AE=0.512,AP=0.010,UE=50.000,UP=50.0 /END
PWLF
  &INP /END
DECK
  &INP /END
ELEM
  &INP EFRACH=0.1,EFRACL=0.1 /END
BE
  BE
BE
ENER
  &INP AE=0.512,AP=0.010,UE=50.000,UP=50.0 /END

```

PWLF
&INP /END
DECK
&INP /END

参考文献

- [1] H. Hirayama, Y. Namito, A. F. Bielajew, S. J. Wilderman and W. R. Nelson, "The EGS5 Code System." Report SLAC-R-730 and KEK Report 2005-8, (2005).
- [2] I. Kawrakow and D. W. O. Rogers, The EGSnrc Code System: Monte Carlo Simulation of Electron and Photon Transport, Ionizing Radiation Standards National Research Council of Canada, NRCC Report PIRS-701 (2006).
- [3] F. Salvat, J. M. Fernández-Varea, E. Acosta and J. Sempau, PENELOPE - A Code System for Monte Carlo Simulation of Electron and Photon Transport, Nuclear Energy Agency OECD/NEA, Issy-les-Moulineaux, France, (2001).
- [4] J. A. Halbleib, R. P. Kensek, T. A. Mehlhorn, G. D. Valdez, S. M. Seltzer and M. J. Berger, ITS version 3.0: The Integrated TIGER Series of Coupled Electron/Photon Monte Carlo Transport Codes. Report SAND91-1634, Sandia Nat. Labs, (1992).
- [5] X-5 Monte Carlo Team, MCNP - A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5, LA-UR-03-1987. Los Alamos National Laboratory: Los Alamos, USA, (2003).
- [6] A. Fassò, A. Ferrari, J. Ranft, P. R. Sala, G. R. Stevenson and J. M. Zazula, FLUKA92 Proc. Workshop on Simulating Accelerator Radiation Environments, Santa Fe (New Mexico), 11-15 January 1993, Los Alamos report **LA-12835-C**, 134 (1994).
- [7] S. Agostinelli *et al.*, Nucl. Instr. Meth. A **506**, 250 (2003).
- [8] PHOTX. Photon interaction cross-section library for 100 elements. Data Package DLC-136/PHOTX, Radiation Shielding Information Center, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN, (1995).
- [9] R. B. Firestone and V. S. Shirley, editors. Table of Isotopes. Wiley & Sons, New York, 8th edition, (1996).
- [10] O. Klein and Y. Nishina, "Über die streuung von strahlung durch freie electronen nach der neuen relativistischen quantendynamik von Dirac", Z. Phys. **52**, 853-868 (1929).

- [11] H. A. Bethe and W. Heitler, "On the stopping of fast particles and the creation of positive electrons," Proc. R. Soc. London, Ser. A **146**, 83 (1934).
- [12] C. Møller, Passage of hard beta rays through matter. *Ann. Physik*, 14:531, (1932).
- [13] H. J. Bhabha, Scattering of passage of swift corpuscular rays through matter. *Ann. Physik*, 5:325, (1930).
- [14] W. Heitler, *The Quantum Theory of Radiation*. Clarendon Press, Oxford, (1954).
- [15] G.Z. Molière, *Z. Naturforsch.* **2a**, 133 (1947) .
- [16] S.A. Goudsmit, J.L. Saunderson, *Phys. Rev.* **57**, 24 (1940) .
- [17] S.A. Goudsmit, J.L. Saunderson, *Phys. Rev.* **58**, 36 (1940) .
- [18] National Institute of Standards and Technology, "XCOM: Photon Cross Sections Database", <http://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/html/xcom1.html> (last access 2010.01)
- [19] Y. Namito, S. Ban and H. Hirayama, *Nucl. Instr. Meth. A* **349**, 489-494 (1994).
- [20] Y. Namito, S. Ban and H. Hirayama, *Phys. Rev. A* **51**, 3036-3043 (1995).
- [21] Y. Namito, S. Ban and H. Hirayama, *Nucl. Instr. Meth. A* **332**, 277-283 (1993).
- [22] H. Messel and D. F. Crawford, *Electron-Photon Shower Distribution Function*. Pergamon Press, Oxford, (1970).
- [23] T. M. Jenkins, W. R. Nelson, A. Rindi, A. E. Nahum and D. W. O. Rogers, editors, *Monte Carlo Transport of Electrons and Photons*, Plenum Press, New York, (1989).
- [24] H. A. Beth, *Phys. Rev.* **89**, 1256 (1953).
- [25] N. F. Mott and H. S. W. Massey, "The Theory of Atomic Collisions", Oxford University Press, London, (1949).
- [26] R. Idoeta and F. Legarda, *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res.* **B71**, 116-125 (1992).
- [27] B. ポッフ、K. リーツ、C. ショルツ、F. サッチャ、柴田 利明 訳, "素粒子・原子核物理入門", シュプリンガー・フェアラーク東京株式会社, 1997, p. 56.
- [28] L. D. Landau and I. J. Pomeranchuk, *Doklady Akad. Nauk SSSR* **92**, No. 3, 535 (1953).
- [29] A. B. Migdal, *Phys. Rev.* **103**, 1811 (1956).

- [30] M. L. Ter-Mikaelian, *High Energy Electromagnetic Processes in Condensed Media*, John Wiley, New York, 1972.
- [31] S. Klein, Rev. Mod. Phys. **71**, 1501 (1999).
- [32] P. L. Anthony *et al.*, Phys. Rev. D **56** 1373 (1997).
- [33] H. D. Hansen *et al.*, Phys. Rev. D **69**, 032001 (2004).
- [34] W. R. Nelson and C. Field, Nucl. Instr. Meth. A **572** 1083 (2007).
- [35] D. W. O. Rogers and A. F. Bielajew, Med. Phys. **13** (5) 687 (1986).
- [36] E.S.M Ali, D. W. O. Rogers, Phys. Med. Biol. **53**, 1527 (2008).
- [37] E.S.M Ali, D.W.O. Rogers, J. Phys. D: Appl. Phys. **41** 055505 (2008).
- [38] M. J. Berger and S. M. Seltzer, Nat. Bur. Stand. Reports 9836 and 9837 (1986); also Computer Code Collection 107, Oak Ridge Radiation Shielding Information Center (1968).
- [39] S. M. Seltzer and M. J. Berger, Nucl. Instr. and Meth., **119**, 157 (1974).
- [40] R. Ito, P. Andreo, T. Tabata, Bull. Univ. Osaka Prefect. **41** 69 (1993).
- [41] C. R. Edwards and P. J. Mountford, The British Journal of Radiology, **72** 196 (1999).
- [42] D. P. Gierga, "Electron Photon Calculations using MCNP", PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology, (1998).
- [43] R. Jeraj, "Suitability Study of MCNP Monte Carlo Program for Use in Medical Physics", Nuclear Energy in Central Europe '98 51, (1998).
- [44] J. Sempau, J. M. Fernández-Varea, E. Acosta and F. Salvat Nucl. Instr. Meth. B **207** 107 (2003).
- [45] E. Acosta, X. Llovet and F. Salvat, Appl. Phys. Lett. **80** 3228 (2002).
- [46] U. Chica, M. Anguiano and A. M. Lallena, Physica Medica, **25** 51 (2009).
- [47] E. Benedito, J. M. Fernández-Varea and F. Salvat Nucl. Instr. Meth. B **174** 91 (2001).
- [48] J. Baró, J. Sempau, J. M. Fernández-Varea and F. Salvat, Nucl. Instr. and Meth. B, **100**, 31 (1995).
- [49] A. Ferrari, P. R. Sala, R. Guaraldi and F. Padoani Nucl. Instr. Meth. B **71** 412 (1992).

- [50] B. A. Faddegon, M. Asai, J. Perl, C. Ross, J Sempau, J. Tinslay and F. Salvat Med. Phys. **35** (10) 4308 (2008).
- [51] B. Rossi and K. Greisen, Rev. Mod. Phys. **13**, 240 (1941).
- [52] E. L. Feinberg and I. Pomeranchuk, "High-energy inelastic diffraction phenomena," Nuovo Cimento Suppl. A1 series X **III**, 652, (1956).
- [53] T. Stanev, Ch. Vankov, R. E. Streitmatter, R. W. Ellsworth and T. Bowen, Phys. Rev. D **25**, 1291 (1982).
- [54] J. D. Jackson, *Classical Electrodynamics*, 2nd ed. (Wiley, New York, 1975), p.687.
- [55] H. D. Hansen, U. I. Uggerhøj, C. Biino, S. Ballestrero, A. Mangiarotti, P. Sona, T. J. Ketel, and Z. Z. Vilakazi, Phys. Rev. Lett. **91** 014801-1 (2003).
- [56] A. Mangiarotti, S. Ballestrero, P. Sona and U. I. Uggerhøj, Nucl. Inst. Meth. B **266** 5013 (2008).
- [57] H. Nakashima, S. Tanaka, M. Yoshizawa, H. Hirayama, S. Ban, Y. Namito, and N. Nariyama, Nucl. Inst. Meth. A **310** 696 (1991).
- [58] T. Tabata, Phys. Rev. **162** 336 (1967).
- [59] J. J. Bienlein and G. Schlosser, Zeitschrift für Physik **174**, 91 (1963)
- [60] H. E. Bishop, *Optique de Rayons X et Microanalyse*, ed. R. Castaing, P. Deschamps and J. Philibert (Hermann, Paris, 1966) p. 153. (cited in [[73]).
- [61] L. M. Bojarshinov, At. Energy SSSR **21**, 42 (1966).
- [62] I. M. Bronshtein and V. A. Dolinin, Soviet Phys.-Solid State **9**, 2133 (1968).
- [63] A. J. Cohen and K. F. Koral, NASA Report TN D-2782, **21** (1965).
- [64] H. Drescher, L. Reimer and H. Seidel, Z. Angew. Phys. **29** (6) 331 (1970).
- [65] P. J. Ebert, A. F. Lauzon and E. M. Lent, Phys. Rev., **183** 422 (1969).
- [66] V. H. Frank, Z. Naturforsch. **14a** (1959)
- [67] D. Harder and H. Ferbert, Phys. Letters **9**, 233 (1964).
- [68] D. Harder and G. Poschet, Phys. Letters **24B**, 519 (1967).
- [69] H. J. Hunger and L. Küchler, Phys. Stat. Sol. **56** (a), K45 (1979).
- [70] H. Kulenkampff and K. Rüttiger, Z. Physik **137**, 426 (1954).
- [71] J. W. Martin et al., Phys. Rev. C **68**, 055503 (1960).

- [72] Y. Nakai, K. Matsuda, T. Takagaki, K. Kimura, Ann. Rep. Japan Assoc. Rad. Res. Polym. **6** 7 (1964-1965).
- [73] G. Neubert and S. Rogaschewski, Phys. Stat. Sol. **59** (a), 35 (1980).
- [74] D. H. Rester and J. H. Derrickson, Nucl. Instr. and Meth., **86**, 261 (1970).
- [75] D. H. Rester and W. J. Rainwater, Jr, Nucl. Instr. and Meth., **41**, 51 (1966).
- [76] J. Saldick and A. O. Allen, J. Chem. Phys., **22**, 438 and 1777 (1954).
- [77] J. G. Trump and R. J. Van de Graaff, Phys. Rev. **75**, 44 (1949).
- [78] K. A. Wright and J. G. Trump, J. Appl. Phys., **33**, 687 (1962).
- [79] B. N. C. Agu, T. Burdett and E. Matsukawa, Proc. Phys. Soc. (London) **71** 201 (1958).
- [80] I. M. Bronshtein and B. S. Fraiman, Soviet Phys. - Solid State **3**, 1188 (1961) .
- [81] V. E. Cosslett and R. N. Thomas, Brit. J. Appl. Phys. **16**,779 (1965).
- [82] P. Ya. Glazunov and V. G. Guglya, Soviet Phys. Dokl. **159**, 632 (1964).
- [83] D. Harder and L. Metzger, Z. Naturforsch. **23a**, 1675 (1968).
- [84] J. Jakschik and K. P. Jüngst, Nucl. Instr. Meth. **79**, 240 (1970).
- [85] H. Kanter, Ann. Physik **20**, 144 (1957).
- [86] B. L. Miller, Rev. Sci. Instr. **23**, 401 (1952).
- [87] P. Verdier and F. Arnal, Compt. Rend. **268** 1101 (1969).
- [88] International Commission on Radiation Units and Measurements: National Bureau of Standards Handbook **62** (1957).
- [89] "Review of Particle Properties", Phys. Rev. D **50**, 1173 (1994).

謝辞

本研究の課程において、波戸芳仁准教授(高エネルギー加速器研究機構放射線科学センター、以下「KEK 放射線」)には、終始懇切な指導と鞭撻を頂き、本論文をまとめるに際して、親身な助言と力強い励ましを頂いた。また、平山英夫教授(高エネルギー加速器研究機構共通基盤研究施設)には、指導と鞭撻はもとより個々の研究テーマに対して明確な目的を示して頂いた。本研究は、この二人の指導によるところが大であり、深く感謝するものである。

伴秀一教授(KEK 放射線)には、国際会議、学会発表、本論文の作成において多くの助言と指導を頂いた。佐々木慎一教授(KEK 放射線)、宇野彰二教授(高エネルギー加速器研究機構素粒子原子核研究所)、佐々木節教授(高エネルギー加速器研究機構計算科学センター)と坂本幸夫主任研究員(日本原子力研究開発機構)には、本論文の審査過程において多くの助言と指導を頂いた。

中村尚司名誉教授(東北大学大学院工学研究科)には、高エネルギー加速器研究機構放射光実験施設(以下、「KEK-PF」)でのX線散乱実験、大阪大学核物理研究センター(以下「RCNP」)の中性子遮へい実験、北海道大学45MeV電子線形加速器施設(以下、「北大LINAC」)での電子散乱実験において、多くの助言と指導を頂いた。

萩原雅之助教(KEK 放射線)には、KEK-PFでのX線散乱実験、RCNPの中性子遮へい実験において、放射線の測定技術を懇切に指導頂いた。岩瀬広助教(KEK 放射線)には、RCNPの中性子遮へい実験において、中性子輸送計算手法を懇切に指導頂いた。佐波俊哉准教授(KEK 放射線)には、博士論文発表、研究会発表に関して貴重な助言、指導を頂いた。また、この三人には博士課程における研究への取り組み方について多くの助言を頂いた。

多幡達夫名誉教授(大阪府立大学)には、電子の後方散乱において貴重なデータを提供して頂いた。また、投稿論文作成にあたり多くの助言を頂いた。兵藤一行講師(高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所)には、KEK-PFでのX線散乱実験で、BL14Cのビームラインの担当者として実験を助けて頂いた。高橋一智技師(KEK 放射線)には、KEK-PFでのX線散乱実験で深夜遅くまで実験を助けて頂いた。また、精度良い測定データを取得するための貴重な助言を頂いた。大石晃嗣博士(清水建設)、小迫和明氏(清水建設)、高田真志研究員(放射線医学研究所)には、北大LINACでの電子散乱実験で、共同実験者として大変お世話になった。中塚隆郎教授(岡山商科大学)、桶井一秀助教(川崎医科大学)には、電子の多重散乱モデルについて貴重な助言を頂いた。

齋藤究助教(KEK 放射線)には、学生生活を有意義に送るための様々な助言を頂いた。また、KEK 放射線の方々には学生生活を送る上で多数助けて頂いた。

松島良一氏(当時、株式会社エクサ)には、退職し博士課程へ進学するときに強く後押しして頂いた。

最後に、社会人から学生に戻った私を暖かく、力強く支えてくれた家族に深く感謝します。