

電磁カスケードモンテカルロコード EGS4 の改良と普及

KEK 放射線科学センター

波戸 芳仁 平山 英夫

yoshihito.namito@kek.jp hideo.hirayama@kek.jp

2002年12月16日

KEK では、SLAC (Stanford Linear Accelerator Center)、ミシガン大、カナダの NRCC (National Research Council of Canada) と国際協同で、電磁カスケードモンテカルロコード EGS (Electron Gamma Shower) の改良に取り組んでいる。EGS コードの概要、KEK での改良、EGS4 研究会や新しいバージョンである EGS5 に向けての取り組みについて紹介する。

1. 名前の由来

EGS は、高エネルギーの電子や光子による電磁カスケードシャワーを計算するモンテカルロ計算コードである。Electron Gamma Shower の頭文字をとって EGS と呼ばれている。EGS では 1 TeV から 1 keV までの光子および 1 TeV から 10 keV までの電子と陽電子の輸送現象を取り扱う。

2. EGS プログラムと改良の研究

EGS は、高エネルギー領域で使用することを目的に長年開発されてきた計算プログラムである。SLAC とスタンフォード大学が共同で開発したバージョン 3 の EGS3 が公開されて以降、広い分野で使用される汎用の計算プログラムとなった。高エネルギー分野では、電子・陽電子衝突型加速器のカリメーターなど検出器設計で広く使用される間に EGS3 は最も標準的な計算プログラムとなったが、同時に医学物理分野などの低エネルギー分野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。

この傾向は、SLAC、KEK と NRCC の共同で作られたバージョン 4 の EGS4 が 1986 年に公開された後一層顕著になり、EGS4 は医学物理分野で最も多く使用されるモンテカルロ計算プログラムとなった。世界中で 6,000 人を越えるユーザーの 6 割以上が医学物理分野の研究者である。EGS4 が公表された以降も、主として低エネルギーでの扱いに関

する研究が継続している。低エネルギー電子の扱いの改良は主としてミシガン大学と NRCC で、低エネルギー光子の扱いの改良は KEK で取り組んでいる。

3. 低エネルギー光子の扱いの改良

低エネルギー光子に関しての主な改良点といくつかの関連事項について述べる。

(a) 直線偏光光子の散乱

数百 keV から数 MeV の光子のコンプトン散乱においては、散乱強度は前方に強く、後方になるに従って弱くなる。ここでは微分散乱断面積は散乱の極角 (polar angle) に強く依存し、光子の偏光ベクトルの影響が現れることは少ない。これに対して、数百 keV 以下の光子のコンプトン散乱や、低エネルギーで重要となるレイリー散乱においては、散乱強度は散乱前後の電気ベクトルの内積にほぼ比例する。このため、放射光などの直線に偏光した低エネルギー光子のシミュレーションでは散乱における直線偏光の影響を考慮することが重要である。また、低エネルギー領域では、線源からの光子が偏光していなくても、一回の散乱で直線に偏光し、それ以降の散乱において直線偏光の影響が現れるため、直線偏光の影響を取り扱う必要がある場合もある。そこで、EGS4 で散乱における直線偏光の影響を取り扱うために、光子の電気ベクトルを粒子の属性に追加し、コンプトン散乱とレイリー散乱において、散乱方位角 (azimuth) 方向の強度分布が電気ベクトルの方向に依存することを計算に含めた。なお、散乱時に散乱後の電気ベクトルも計算し、次の散乱計算で利用する[1]。

KEKB などの高エネルギー加速器では、電子および陽電子ビームから発生する放射光が、ビームダクトなどの損傷、検出器のバックグラウンド、放射線安全など多くの点で問題になる。このような放射光の計算を行う場合には、直線偏光の影響を考慮することが重要である。

(b) コンプトン散乱におけるドップラー広がり

物質内で電子は運動量を持っており、コンプトン散乱において、この電子の散乱前の運動のために散乱光子と反跳電子のエネルギーが広がる「ドップラー広がり」という現象がある。一方、コンプトン散乱光子のエネルギーが散乱角によって変化することはよく知られている。数百 keV から数 MeV の光子のコンプトン散乱においては角度の広がりによるエネルギーの広がりが大きいものに対して、数百 keV 以下のコンプトン散乱ではこの角度によるエネルギーの広がりが比較的小さくなる。そのため、数百 keV 以下ではドップラー広がりが相対的に重要となる。たとえば、Ge 検出器の応答関数の中のコンプトンエッジが、このドップラー広がりの影響のために広がっている[2,3]。

このコンプトン散乱によるドップラー広がりを扱えるよう、EGS4 中のコンプトン散乱の式をドップラー広がりを考慮したものに入れ替えた。ドップラー広がりは物質中での電子の運動量分布を反映している。そのため、全元素の殻毎の電子の運動量分布をデータベースとして持ち、必要に応じて使用できるようにしてある[4]。

(c) コンプトン散乱における電子束縛効果

物質内の多くの電子は原子核に束縛された軌道電子である。反跳電子の受け取るエネルギーが束縛エネルギー以下の場合、コンプトン散乱は起こらない。上記のコンプトン散乱の計算において、まずコンプトン散乱の標的となる電子の属している殻をサンプリングし、ドップラー広がりを考慮しながら反跳電子エネルギーを計算する。そして反跳電子エネルギーが束縛エネルギーを下回る場合にはその散乱を無視するようにしてある。

(d) L-X 線

L 殻光電効果後に放出される L-X 線を計算する。入射光子エネルギーに依存して副殻 (L_1, L_2, L_3) の光電断面積の比が変化することを考慮した結果、実測とよく一致した[5]。

(e) K および L オージェ電子

K 殻および L 殻光電効果後に放出されるオージェ電子を計算できるようにした。

(f) 化合物、混合物での光電効果後の緩和過程

オリジナルの EGS4 では、化合物、混合物での光電効果において、「どの元素の光電効果が起こったか」という点を計算していなかったため、化合物、混合物から放出される特性 X 線の強度やエネルギーの精度が低かった。そこで、化合物、混合物内の元素の光電効果断面積の比を用い、光電効果が起こったときに元素を特定できるようにした。上

記の L-X 線、オージェ電子の計算と組み合わせ、単体、化合物、混合物の区別なく光電効果後の緩和過程が計算できるようにした。

(g) K 殻電子衝突電離

通常の X 線発生装置では、電子ビームを数十 keV から 200 keV 程度に加速して金属ターゲットに衝突させ、X 線を発生させる。ここで X 線の発生には次の三種類のチャンネルが関与する；

1. 制動輻射
2. 制動輻射光子による光電効果後に発生する特性 X 線
3. 入射電子と内殻電子の衝突による「電子衝突電離」(EII: electron impact ionization) の後に発生する特性 X 線

昔から現代まで多くの数の X 線発生装置が利用されてきたにも拘らず、これら三つのチャンネルの寄与割合、特に特性 X 線が主にどちらのチャンネルで作られるかという点が理解されず、専門誌でも散発的な議論だけが続いていた。

EGS4 では、これらのチャンネルのうち最初の二つは扱えるが三つ目の電子衝突電離が扱えなかった。そこで、EGS4 の改良の一つとして電子による K 殻電子衝突電離と、その後の K-X 線放出を計算できるようにした[6]。

4. 実験との比較

(a) 単色化放射光散乱実験との比較

本研究は、KEK-PF (BL-14c) で実験を行い、その測定結果と EGS4 シミュレーションを比較して必要な改良点を決めている。図 1 に実験装置の概要を示す。10 keV - 40 keV に単色化された放射光をターゲットに入射し、90° 方向に散乱される光子を低エネルギー用 Ge 検出器で測定する。入射光は直線に偏光しており散乱光強度は方位角に依存するので、水平方向と垂直方向にそれぞれ Ge 検出器を置き同時に測定を行う。本実験では、カロリメータに対して校正された自由空気電離箱によって常に入射光子の絶対数をモニターしている。このため、入射光子数 1 個当たりの散乱光子数を直接得ることができ、計算との比較において規格化を要しない。図 2 に黒鉛ターゲットからの散乱光子数の方位角 (ϕ) 依存を示す。直線偏光の影響で散乱光子数が約 10 倍異なること、 $\phi = 0^\circ$ および $\phi = 90^\circ$ において測定と EGS4 シミュレーションがよく一致していることがわかる。なお、直線偏光を無視した場合の EGS4 の結果を破線で示す。この場合、方位角依存は見られず、光子数は直線偏光を考慮した場合の計算値の $\phi = 45^\circ$ での値とほぼ等しくなっている。

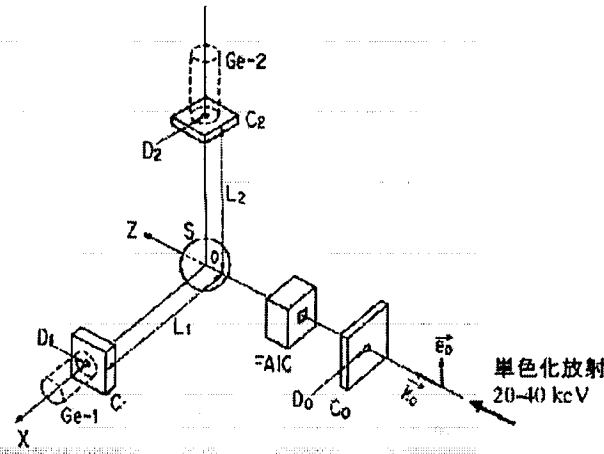


図1 単色化放射光散乱実験概要

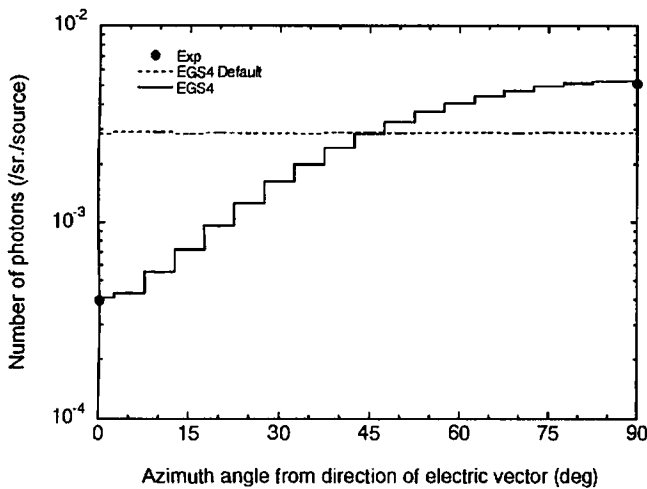


図2 黒鉛ターゲットからの光子数の散乱方位角依存

図3に黒鉛ターゲットからの光子スペクトルを示す。ここでの実験値をエネルギーについて積分したものが図2の実験値と等しい。EGS4では計算を二段階に分割して行っている。第一段階ではターゲットから放出される光子のエネルギースペクトルを求める。第二段階ではこのスペクトルを入力データとしてGe検出器の有感領域での吸収エネルギーを求める。EGS4による計算結果は、黒鉛ターゲット内での入射光子のレイリー散乱、コンプトン散乱および多重散乱、Ge検出器からのK-X線エスケープによるサブピーク、Ge検出器内でのコンプトン散乱部分などについて測定をよく再現している。

図4に鉛ターゲットからの光子スペクトルを示す。ドップラー広がり の考慮により、コンプトン散乱部分のピーク形状の測定と計算との一致がよくなった。多重散乱部分も同様にドップラー広がり の考慮により、よく再現されている。レイリー散乱とコンプトン散乱部分の強度については直線偏光光子の散乱を考慮したことにより、測定と計算がよく一致した。また、L-X線についても測定と計算がよく一致している。

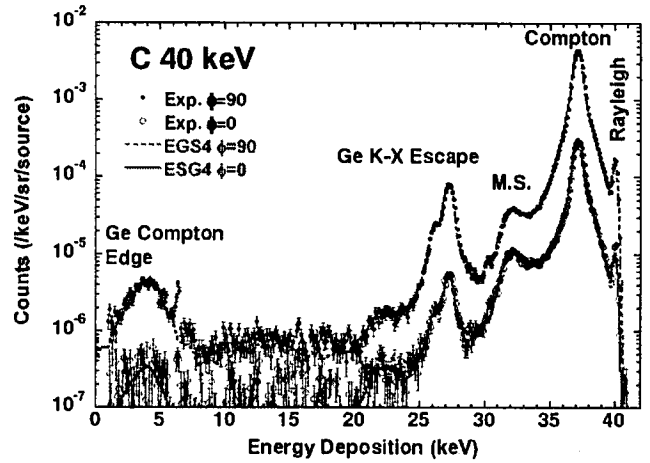


図3 黒鉛ターゲットによる散乱光子スペクトル

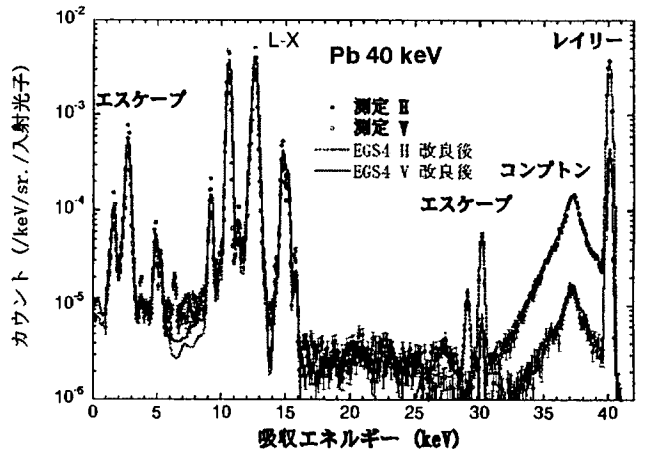
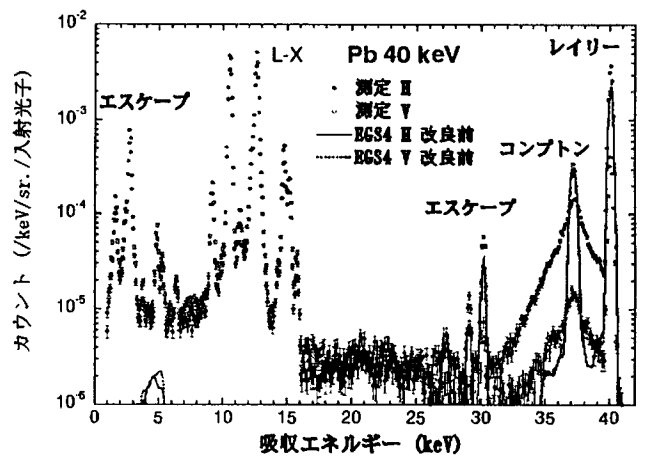


図4 鉛ターゲットによる散乱光子スペクトル 改良前後の計算結果と実験との比較。HとVはそれぞれ horizontal($\phi = 90^\circ$)と vertical($\phi = 0^\circ$)を示す。

(b) 電子ビーム入射実験との比較

EIIの組み込みの妥当性を調べるために、10 keV - 3 MeVの電子ビームがいろいろなターゲットに入射した際にターゲットから放出されるK-X線強度を系統的に計算し、図5

に示すように実験値とよく一致する結果を得た。そのときの K - X 線の由来を調べることで、Al などの軽い原子では EII によるものが大半であること、Au などの重い原子では制動輻射を経由するものが多いことがわかった。

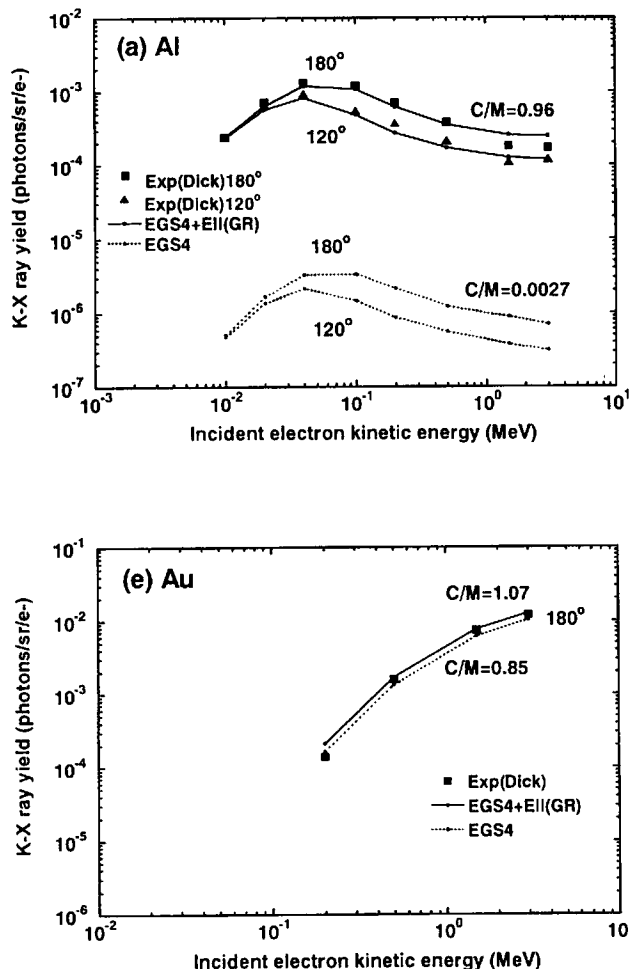


図5 AlとAuターゲットから発生する K - X 線の強度
 マーカーは測定値、実線と破線はそれぞれ EII を考慮している
 EGS4 と、無視している EGS4 の計算結果。

5. 国内の普及拠点としての KEK の役割

EGS の様な汎用の計算プログラムの使い方を理解することは、近くにそのプログラムのことをよく知っている人がいないと一般的には難しいことである。KEK では単に EGS の開発に力を注ぐだけでなく、1991 年から毎年「EGS4 研究会」を主催し、EGS4 を使用した研究成果を持ち寄って交流するとともに、その機会を利用して EGS4 の講習会を開催し、日本国内での EGS の普及拠点としても活動している。講習会には、若い人を中心に毎年 50 人以上の人が参加している。

ほとんどの学会や研究会が専門分野別に開催されているのと対照的に「EGS4」研究会は、EGS4 という手段をキー

ワードとした、専門分野を問わない研究会という特徴をもっている。そのため、ほとんど話を聞く機会のない他の研究分野の研究の状況を聞くことができる。意外な分野で自分が行っているのと似た研究が行われていることを知り、他分野での研究から自分の研究のヒントを得ることもあり、特に若い研究者には貴重な場となっている。

研究会で発表された内容は、世界中の EGS4 ユーザーにとっても有益な情報を多く含んでいることから、研究会の報告集には海外からも多くの送付依頼が寄せられている。この他、プログラム、マニュアルの配布、使用上の質問への回答などを行っている。

EGS4 に関する情報は次のサイトからダウンロードできる。

- プログラム :
ftp://ftp.kek.jp/kek/kek_egs4/
- マニュアル :
<http://ccwww.kek.jp/kek/rad/egs4/lecture.html>
- 国内向けの EGS4 に関連した情報 :
http://ccwww.kek.jp/kek/rad/center/egs4_japan.htm

6. 飛跡表示ソフトと教育現場での活用

EGS4 の普及に役立っているものの一つに、光子や電子の物質中での軌跡を、計算対象のジオメトリーとともに Windows 計算機の画面に表示する飛跡表示ソフト「EGS4PICT」がある。

このシステムは、物質中での放射線の飛跡を PC の画面に表示し、部分的な拡大や回転などの操作を行うことができる。PC の速度の向上に伴い、ふるまいの計算をして飛跡を表示することも可能になった。KEK では、一般公開時の入場者に放射線に対する理解を深めてもらうため、このシステムを使用している。まず、放射線が様々な物質によって減少する状況を放射線源と放射線検出器を用いて経験してもらい、その後、この表示システムを用いて物質内での放射線のふるまいを説明している。

粒子のふるまいの可視化は、放射線に対する学生の教育にも活用されている。PC による表示システムは、学生が興味を持って接するということが相まって、放射線に対する理解を深める面で非常に効果的である。東京都立保健科学大学、名古屋大学、熊本大学などいくつかの大学ではこの特徴を活かして EGS4PICT を放射線物理の教材として利用している。

EGS4PICT を利用した放射線教育の例と EGS4PICT は次のサイトにある。

[http://ccwww.kek.jp/
kek/rad/center/education.html](http://ccwww.kek.jp/kek/rad/center/education.html)

7. EGS5 およびその後の課題

KEK での改良を含め、EGS4 公開後なされた改良を集大成し新たなバージョン EGS5 として公開するための作業が SLAC、ミシガン大学と KEK の共同で行われている。このプロジェクトには、EGS5 を完成させることと、ユーザーに使いやすい環境を提供するグラフィカル・ユーザー・インターフェイスの作成という二つのテーマが設定されている。KEK では、EGS5 に向けてこれまでに改良してきた低エネルギー光子に関連した部分の整備を行った。

今後、光子輸送計算に関してさらに研究、改良を行うべき課題を三つあげる。一つ目は、高エネルギー物理の分野からでリアコライダーの開発に関連する軸偏向陽電子発生シミュレーションである。このシミュレーションを行うには、表 1 の項目 1~3 に示すような現象を取り扱う必要がある。

二つ目は、光子の「干渉」である。干渉のもっとも身近な例は、ブラッグ散乱である。これは、結晶中の原子によるレイリー散乱が干渉により強度を増すものである。表 1 の項目 4 のミグダル効果は、GeV 領域で制動輻射の断面積が増大し、電子の原子核による散乱前の制動輻射と、散乱後の制動輻射の間の干渉が起こり制動輻射光子のスペクトルが大きく変化する現象である。この他に、単結晶で陽電子ビームを発生させる場合に重要となる、チャネリング放射光やコヒーレント放射光[7]も干渉に関連している。これまで、EGS では個々の光子または電子と原子の相互作用を扱ってきた。複数の光子が関与する干渉を、断面積変更などにより扱えるのか、それともこの枠組みを変更しなければならないのか、検討する必要がある。

表 1 高エネルギー領域での EGS の今後の改良課題

項目	現象
1	円偏光光子のコンプトン散乱、レイリー散乱
2	円偏光光子からの対生成による軸偏極陽電子生成
3	軸偏極陽電子の輸送中の減偏極
4	ミグダル効果

三つ目の課題はさらに「低エネルギー」である。EGS4 および EGS5 のエネルギーの下限は光子が 1 keV、電子が 10 keV である。こういったエネルギー領域では光子、電子

とも飛程が短く実験と計算の比較が難しい。また化学組成による影響が強い、関与する殻の数が多いなどの困難がある。しかし、生物実験などでの需要があるので、今後、これより低いエネルギーの領域まで計算したり、実験との比較により精度を評価したりすることも重要な課題である。

8. さらに詳しい情報

EGS4 に関するさらに詳しい情報は下記にある。

- EGS4 の英語ホームページ (KEK) :
[http://ccwww.kek.jp/
kek/rad/egs4/egs.html](http://ccwww.kek.jp/kek/rad/egs4/egs.html)
- EGS4 の英語ホームページ (SLAC) :
<http://www.slac.stanford.edu/egs/>
- 一般向けの EGS4 の英語での解説 (ホームページ上での対話形式による EGS4 の実行や飛跡表示などがある) :
<http://www2.slac.stanford.edu/vvc/egs/>
- EGS4 研究会のホームページ :
[http://ccwww.kek.jp/
kek/rad/center/egsken.html](http://ccwww.kek.jp/kek/rad/center/egsken.html)

参考文献

- [1] Y. Namito, S. Ban, and H. Hiratama, "Implementation of linearly-polarized photon scattering into EGS4 code", Nucl. Instrum. Methods **A332**, 277-283 (1993).
- [2] G. F. Knoll, "放射線計測ハンドブック 第 2 版", 木村逸朗・阪井英次訳 日刊工業社 (1991) 図 13.9, 同第 3 版 (2001) 図 13.9.
- [3] J. Felsteiner, S. Kahane and B. Rosner, Nucl. Instrum. and Meth., **118**, 253 (1974).
- [4] Y. Namito, S. Ban and H. Hirayama, "Implementation of the Doppler broadening of a Compton-scattered photon into the EGS4 code", Nucl. Instrum. Methods. **A349**, 489-494 (1994).
- [5] H. Hirayama and Y. Namito, "Implementation of a General Treatment of Photoelectric-Related Phenomena for Compounds or Mixtures in EGS4", KEK Internal 2000-3 (2000).
- [6] Y. Namito and H. Hirayama, "Implementation of the electron impact ionization into the EGS4 code", Nucl. Instrum. and Meth. **A423**, 238-246 (1999).
- [7] [http://www.kek.jp/
newskek/2002/novdec/crystal.html](http://www.kek.jp/newskek/2002/novdec/crystal.html)