

KEK Internal 2001-11
December 2001
R

Lecture Note
Education for Radiations
using EGS4PICT32
(Japanese Version)

H. Hirayama and Y. Namito

*High Energy Accelerator Research Organization
1-1 Oho, Tsukubashi, Ibaraki, 305-0801 Japan*



High Energy Accelerator Research Organization

©High Energy Accelerator Research Organization (KEK), 2001

KEK Reports are available from

High Energy Accelerator Research Organization (KEK)
1-1 Oho, Tsukuba-shi
Ibaraki-ken, 305-0801
JAPAN

Phone: +81-29-864-5137
Fax: +81-29-864-4604
E-mail: irdpub@mail.kek.jp
Internet: <http://www.kek.jp>

EGS4PICT32 を使用した放射線教育

平山 英夫、波戸 芳仁

高エネルギー加速器研究機構
305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

1 はじめに

放射線は見えないことが、放射線に対する理解を妨げる大きな要因になっている。その解決策の一つとして、PC 上に表示された放射線の飛跡を活用する方法が考えられる。PC を活用する方法は、受講者が関心を持ちやすく、なおかつ粒子の飛跡情報を調べる事が物質中での放射線の挙動の理解に役立つ事から非常に有益な方法であると思われる。

高エネルギー加速器研究機構では、電磁カスケードモンテカルロコード EGS4[4] で計算した光子、電子及び陽電子の飛跡を表示するシステムを開発してきた [1, 2, 3]。このシステムで表示できる体系は平板と円筒に限定されているが、プログラムサイズが小さい事から、Windows システムの PC さえあれば容易に使用する事ができる。飛跡のデータを作成するプログラムは、本来は EGS4 についての十分な理解がないと作成することは難しいが、扱う問題を限定する事により、対話形式で使用する形にする事ができる。

以下では、飛跡表示システム (EGS4PICT32) の使用方法と放射線教育用に作成した EGS4 ユーザーコード (実行形式のプログラムと物質データ:shield.exe, shield.data, detecc.exe 及び detec.data) と飛跡表示システムによる教育への応用例を示す¹。

実際に講義で PC を使って実習を行う前に、EGS4 やモンテカルロ計算についての最低限の説明や関連する分野でのモンテカルロコードの使用状況についても紹介しておく事、また、できればチェックソース等を使用した実験とここで紹介するシステムを併用して使用する事が望ましい。

2 EGS4 及びモンテカルロ法の簡単な説明

2.1 モンテカルロ法

乱数を用いて行う計算を一般に「モンテカルロ法」と呼ぶ。モンテカルロ法という名称は、1945 年頃 J. von Neumann と S. M. Ulan によって導入されたものである。南ヨーロッパのギャンブルの町、モナコ公国の首都モンテカルロと関連するとも言われている。

モンテカルロ法で物質内での放射線の動きを追跡する場合には、乱数を用いて光子や電子の反応位置、散乱あるいは吸収等の反応の種類、反応後の粒子のエネルギーや方向等を決定する。これを利用して、例えばがん組織への吸収線量評価や、X 線写真の雑音評価などが可能である。人体中の線量分布のような複雑な体系内でのいろいろな相互作用が関与した計算を、モンテカルロ法では比較的容易に行うことができる。放射線シミュレーション分野でのモンテカルロ計算の利用は急速に広がっている。²

2.2 EGS4

EGS4 は、光子・電子・陽電子の輸送計算をモンテカルロ法によって行うコンピュータプログラムである。

EGS4 で扱う物理現象は、光子では光電効果、コンプトン散乱、対生成、レイリー散乱、電子ではモラー散乱、制動輻射、連続減速、陽電子では電子の現象に加えて、バーバー散乱、消滅などである。EGS4 は診断、治療、放射線検出器シミュレーション、遮蔽計算、高エネルギー物理など広い分野で使用されている。

3 飛跡表示システム (EGS4PICT32) の使用方法

3.1 EGS4PICT32 の起動

EGS4PICT の最新版である egs4win32.exe を実行すると次の Main Display が表示される。

画面の大きさは、マウスを使用して自由に変更する事ができる。

¹例では、医学物理分野の学生を対象とした授業を想定している。

²モンテカルロ計算による粒子輸送を、簡単な例を含めて実感する事を目的とした講義録 [5] が KEK Internal として出版されている。

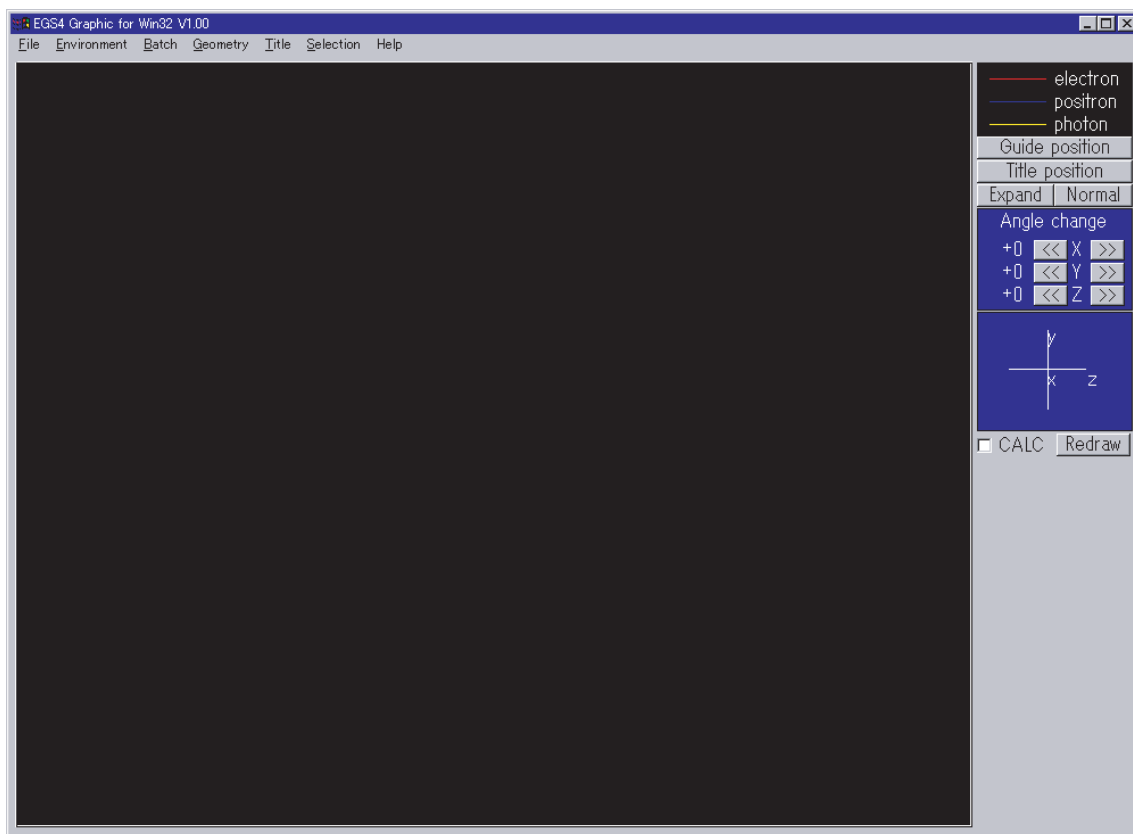


Figure 1: Main display.

Environment は、いくつかの機能を持っている。

1. 放射線の色や線種の変更: electron, positron, photon の右側の “color select” をクリックすると色見本が出るので、使用したい色を選択し、OK で戻る。同様に、“Line select” をクリックすると、線種が表示されるので、使いたい線種を選択する。
2. Display scale: 画面に表示された図の大きさを示すスケールのユニットを変更する。標準は、10cm であるが、数値を入力する事により任意の値に変更する事ができる。
3. Angle change value: 画面を回転する時の単位角度を変更する。標準は 30 度であるが、数値入力又はスケールの矢印で変更できる。
4. Cut-off energy(total in MeV): 表示する粒子のカットオフエネルギーを指定する。光子と電子・陽電子それぞれについて設定する事ができる。設定値以下の粒子の飛跡は表示されない。
5. Background color: 背景の色の指定。通常は、黒となっているが、線の色と同様に好きな色に変える事ができる。Geometry color と Character color も同様である。

CALC 欄を選択すると、コマンドプロンプト (MS-DOS プロンプト) が現れる。

3.2 飛跡計算プログラムの起動

以下では、shield.exe を使用するとして説明を行う。

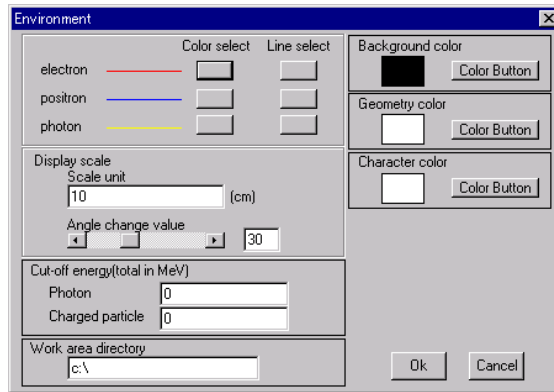


Figure 2: Environment display.

コマンドプロンプト (MS-DOS プロンプト) で、shield.exe を実行する。
 問いに対してパラメータを入力する。

1. **Key in Material number**
 1:Al, 2:Fe, 3:Pb, 4:Air, 5:PMMA, 0:end
 物質番号を入力する。(2)
2. 鉛を選んだ場合には、
 Do you want to produce K X-ray of Lead ? (0:no, 1:yes)
 に対して 0 又は 1 を入力する。
3. **Key in particle type**
 -1:electron, 0:photon, 1:positron, 9:new material
 線源の放射線の種類を入力する。(0)
4. **Key in particle kinetic energy in MeV (0 means new particle)**
 粒子の運動エネルギーを入力する。(0.5)
5. **Key in slab thickness in cm (0 means change energy)**
 遮蔽体の厚さを入力する。(3)
6. 50 個の線源についての計算が終了すると、再び Key in slab thickness in cm (0 means change energy) が表示されるので、File をクリックし、Data file open を選択し、表示データの書かれたファイル (mortjob.pic) を選択し、OK をクリックする。

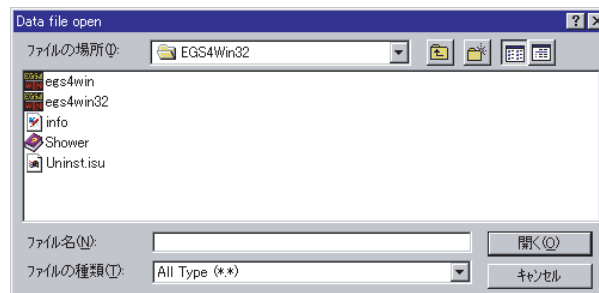


Figure 3: 飛跡ファイル指定画面.

7. Redraw をクリックすると、粒子の飛跡が表示される。

表示された飛跡について、次のような操作を行うことができる。

- Expand をクリックするとカーソルが現れるので、拡大したい領域をドラッグして、マウスを放すと拡大画面となる。この操作を繰り返して、更に拡大する事が出来る。

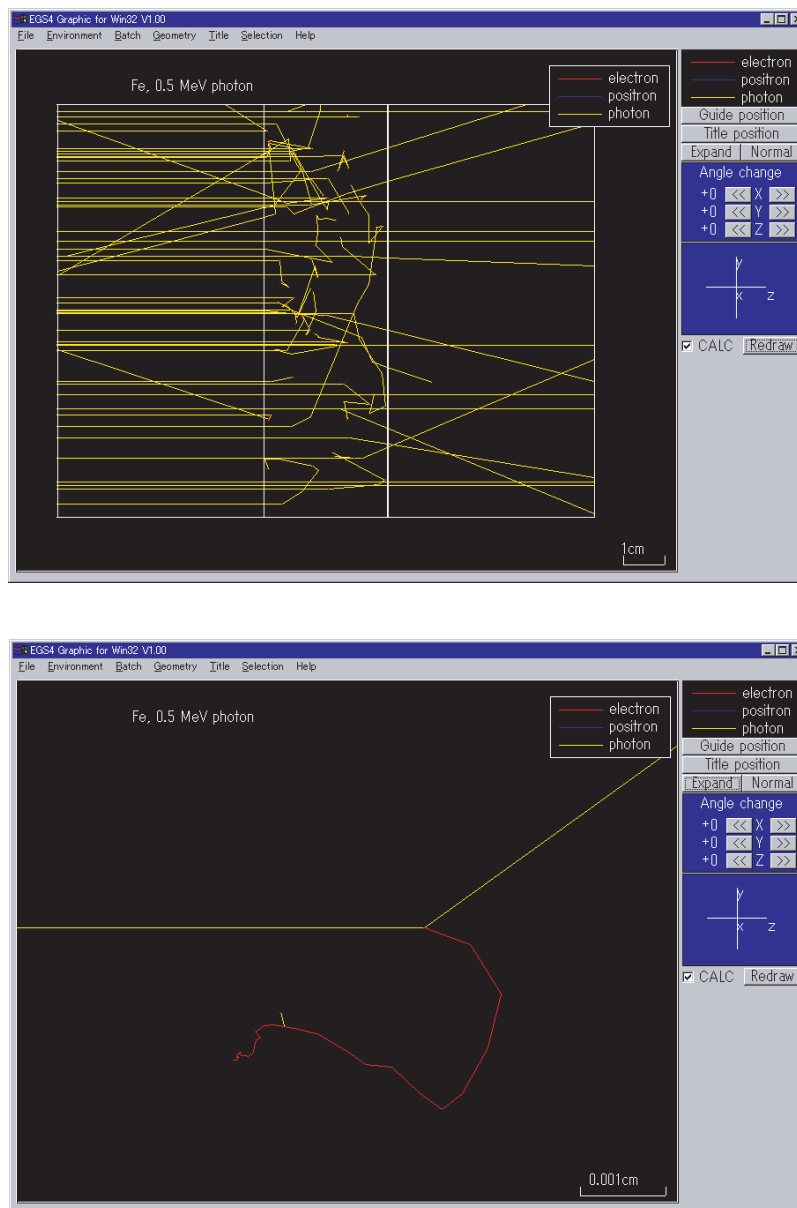


Figure 4: 鉄 3cm に 0.5MeV 光子が 50 個入射した場合の飛跡とその拡大図。

- Angle change の + 又は - をクリックする事により、設定した角度だけ回転する。X-, Y-, Z-軸について設定が可能である。
- Selection をクリックし、Particle selection で、選択を解除すると、その粒子の飛跡を表示しないようにする事ができる。
- Title をクリックすると Title set が現れるので、図につけたいタイトルを設定する事ができる。タイトルを表示する場所は、Title position ボタンをクリックし、表示したい場所のカーソルを移動し、マウスをクリックして指定する。(図 4 の “Fe, 0.5 MeV Photon”)

- Guide position をクリックし、カーソルを表示させたい場所に移動し、マウスをクリックする事により、どの色、どの線がどの粒子を表しているかという表示を図に含める事ができる。(図 4 参照)

4 EGS4PICT32 を使用した放射線に関する教育例

以下では、受講者が個人又は数人で EGS4PICT32 等必要なファイルがインストールされた 1 台の PC を使用できる状況にあるもの仮定している。

4.1 0.1-10 MeV の光子と Al、Fe、Pb との相互作用の調査

EGS4PICT32 と shield.exe を使用する。

A: システムの操作方法の説明 (出来れば、講師が液晶表示などを使用して操作しながら説明する事が望ましい。)

1. egs4win32 のアイコンをダブルクリックする。
2. EGS4 Graphic for Win32 の CALC をクリックする。
3. コマンドプロンプト (MS-DOS プロンプト) が現れるので、shield と入力する。³
4. Key in Material Number に対して、1 を入力。(これは、Al を意味する。)
5. Key in Particle Type に対して、0 を入力。(これは光子を意味する。)
6. Key in particle kinetic energy in MeV (0 means new particle) に対して、0.1 を入力。
7. Key in slab thickness in cm (0 means change energy) に対して、1.0 を入力。
8. Key in slab thickness in cm (0 means change energy) が現れたら、表示システムに戻り、Data file open を選択し、表示データの書かれたファイル (mortjob.pic) を選択し、OK をクリックする。
9. Redraw をクリックすると、粒子の飛跡が表示される。
10. 非散乱線と散乱線を数える。
11. 厚さが 1 cm の場合には、1 番目と 2 番目に多い反応の種類を調べる。
12. 反応の種類の設定は、図 5 を参照する。
13. X 線を発生する光電吸収とコンプトン散乱の識別法
 - Environment において、光子のカットオフエネルギーを、K X-線の最も高いエネルギーより、少し高い値に設定する。鉛の場合は、0.088MeV にする。
 - Redraw を行った際に、書かれない光子は、光電吸収後に発生した X 線であり、消えない場合にはコンプトン散乱と判定する。
14. 調査が終了すれば、CALC をクリックして、コマンドプロンプト (MS-DOS プロンプト) に戻り、7以降を繰り返す。(2 回目以降は、8 の操作は不要)
15. エネルギーを変更する場合は、7で0を入力すると、6になるので、ここで次に調べたいエネルギーを入力する。
16. 物質を変える場合には、エネルギーとして0を入力する。5になるので、ここで9を入力すると4になる。以下同じ事を繰り返す。

B: 受講者への課題例

1. 平板に光子が入射した場合に、相互作用をせずに透過する光子の割合 (P) および相互作用をした後で透過する光子の割合 (S) を求めよ。平板の材質は、Al、Fe、Pb、光子エネルギーは 0.1、1.0、10.0 MeV とする。平板の厚さは、1、2、5、10 cm とする。shield.exe では入射粒子数は 50 である。飛跡が重なっていて正確に数えることが困難な場合には概算でよい。
1 cm の場合にのみ、1 番目と 2 番目に多く起こる反応は何か? 数えて記録せよ。必要に応じて拡大機能を使用せよ。

³shield.exe と shield.dat は共に、egs4win32 と同じディレクトリーの置かれているものとする。

- 厚さの関数として、P を片対数プロットせよ。(厚さ 0 cm に対する 1 の印もプロットせよ。) さらに、指数関数で回帰計算を行え。この回帰曲線の傾きから平板に光子が入射した場合に、P が最初の 1/e になる厚さを求めよ ($e=2.72$)。この厚さを「光子の平均自由行程」(mfp) と呼ぶ。平均自由行程の物質およびエネルギー依存について考察せよ。また、平均自由行程の物理的意味について述べよ。(ヒント：片対数で回帰計算したのはなぜか?)
- 物質を Pb、エネルギーを 60、80、100、120 keV として平均自由行程を求め、そのエネルギー依存を考察せよ。
- $(P+S)/P$ は光子数の「再生係数」と呼ばれる量である。再生係数の厚さ、エネルギー、物質依存について考察せよ。
- エネルギーと物質によって光子と物質の主な相互作用がどのように変化するか考察せよ。また、放射線診断、治療で各相互作用がどのように利用されたり、雑音になったりしているか述べよ。
- 今回求めた Al, Fe, Pb の 1 MeV 光子に対する平均自由行程の値と、Al, Fe, Pb の平均自由行程の理論値との比較を行え。⁴

C: 理論値

得られた平均自由行程等との比較のための理論値を以下に示す。

Al, $\rho=2.699\text{g/cm}^3$

| Energy | μ/ρ | $\lambda = 1/\mu$ | Photo/Total | Compt/Total | Rayl./Total |
|---------|------------|-------------------|-------------|-------------|-------------|
| 0.1MeV | 0.1704 | 2.17cm | 0.11 | 0.84 | 0.05 |
| 1.0MeV | 0.06146 | 6.03cm | | 1.00 | |
| 10.0MeV | 0.02318 | 16.0cm | | 0.64 | |

Fe, $\rho=7.874\text{g/cm}^3$

| Energy | μ/ρ | $\lambda = 1/\mu$ | Photo/Total | Compt/Total | Rayl./Total |
|---------|------------|-------------------|-------------|-------------|-------------|
| 0.1MeV | 0.3717 | 0.342cm | 0.55 | 0.37 | 0.08 |
| 1.0MeV | 0.05995 | 2.12cm | 0.006 | 0.99 | 0.004 |
| 10.0MeV | 0.02994 | 4.24cm | 0.0004 | 0.48 | |

Pb, $\rho=11.35\text{g/cm}^3$

| Energy | μ/ρ | $\lambda = 1/\mu$ | Photo/Total | Compt/Total | Rayl./Total |
|---------|------------|-------------------|-------------|-------------|-------------|
| 0.1MeV | 5.549 | 0.0159cm | 0.95 | 0.02 | 0.03 |
| 1.0MeV | 0.07102 | 1.24cm | 0.26 | 0.71 | 0.03 |
| 10.0MeV | 0.04972 | 1.77cm | 0.01 | 0.25 | 0.0006 |

⁴⁶⁰C₆₀ の線による実験を行っている場合には、実験値と比較させて考察させても良い。

4.2 放射線検出器によるガンマ線のエネルギー測定の実シミュレーション

EGS4PICT32 と放射線検出器によるガンマ線のエネルギー測定をシミュレートする `detecc.exe` を使用する。検出器は、直径 3 インチ (7.62 cm) の円筒形状で、検出器の厚さ及び検出器の種類は、受講者が選ぶことができる。検出器の種類としては、Ge, NaI 及び BGO が用意されている。以下の例では、3 インチ厚さの NaI を想定している。

A: システムの操作方法の説明

1. `egs4win32` のアイコンをダブルクリックする。
2. EGS4 Graphic for Windows の CALC をクリックする。
3. コマンドプロンプト (MS-DOS プロンプト) が現れるので、`detecc` と入力する。⁵
4. Key in absorbed energy spectrum form
に対して、希望するフォーマットを選択する。0 の場合はエネルギービンの中心のエネルギーとレスポンスの値が、1 の場合はエネルギー下限とエネルギー上限のついて同じレスポンスの値が出力される。どちらを選ぶかは、使用するグラフソフトに依存する。
5. Key in Material number (1:Ge, 2:NaI, 3:BGO, 0:End of run) に対して、2 を入力。(これは、NaI を意味する。)
6. Key in Particle type (-1:electron, 0:photon, 1:positron) に対して、0 を入力。(これは光子を意味する。)
7. Key in slab thickness in cm
(0.0 means change energy) に対して、7.62 を入力。
8. Key in particle kinetic energy in MeV
(0.0 means change material and particle) に対して、1 を入力。(これは、1.0MeV を意味する)
9. Key in number of cases (0 means change thickness) に対して、1 を入力する。
10. 計算が終了すると再び
Key in number of cases (0 means change thickness)
が現れるので、表示システムに戻り、Data file open を選択し、表示データの書かれたファイル (`mortjob.pic`) を選択し、OK をクリックする。
11. Redraw をクリックすると、粒子の飛跡が表示される。
12. 飛跡をスケッチし、反応の種類、検出器内ですべての粒子が吸収されたかどうかと吸収エネルギーを記録する。(必要であれば、拡大の機能を使用する。)
13. X 線を発生する光電吸収とコンプトン散乱の識別法
 - Environment において、光子のカットオフエネルギーを、K X-線の最も高いエネルギーより、少し高い値に設定する。NaI の場合は、I の K X-線が該当するので、0.04MeV にする。
 - Redraw を行った際に、書かれない光子は、光電吸収後に発生した X 線であり、消えない場合にはコンプトン散乱と判定する。
14. 記録が終了すれば、CALC をクリックして、コマンドプロンプト (MS-DOS プロンプト) に戻り、9 以降を繰り返す。
15. 20 回行ったら、Key in number of cases (0 means change thickness) に対して、5000 を入力し、吸収エネルギー分布を調べる。(吸収エネルギー分布は、`mortjob.17o` というファイルに出力されている。)
16. 終了したら、Key in number of cases (0 means change thickness) に対して、0 を入力し、8 以降を繰り返す。

⁵ `detecc.exe` と `detec.dat` は共に、`egs4win32` と同じディレクトリーの置かれているものとする。

B: 受講者への課題例

1. detecc.exe を使用して NaI 平板に 1 MeV の光子を 1 個ずつ入射させ、飛跡をスケッチし、反応の種類、検出器内ですべての粒子が吸収されたかどうかと吸収エネルギーを記録せよ。これを 20 回行え。(図 7 及び 8) (粒子が側面から逃げたかどうかは、Y 軸周りに 90° 回転させて調べる。)
20 回の記録の後、次の点を考察せよ。
 - (a) 検出器内で粒子がすべて吸収される場合の吸収エネルギーはいくらか？
 - (b) 検出器で粒子の一部が吸収される場合の吸収エネルギーはいくらか？
 - (c) 粒子が検出器を素通りする場合の吸収エネルギーはいくらか？
2. 上記条件で、粒子数を 5000 個に増やして吸収エネルギー分布を計算せよ。(図 9) また全効率とピーク効率を記録せよ。ピーク効率は、入射エネルギーの全部が吸収される確率である。全効率は、吸収エネルギー分布の合計である。
 - (a) 全エネルギー吸収ピークは、飛跡観察におけるどのような反応に対応しているか。
 - (b) 他のピークがある場合、どのような反応に対応するか。(ヒント: K-X 線 ($K_\alpha=0.028$, $K_\beta=0.033$)、または消滅ガンマ線 (0.511 MeV) が逃げる場合にピークとなる。)
 - (c) 連続部分は、飛跡観察でのどのような反応に対応しているか。また、この部分はなぜピークとならず連続的な分布となるか？
3. 光子エネルギーを 0.3 MeV および 3.0 MeV に変更して 1 MeV と同じように飛跡スケッチと吸収エネルギーの計算を行え。
4. 連続エネルギー部分の右端のエネルギーとピークエネルギーの差 (ΔE) は何に起因するか？ ΔE を入射エネルギーの関数としてプロットし、理論式と比較せよ。
(ヒント) コンプトン散乱光子エネルギー k_c (MeV) は入射光子エネルギー k_0 (MeV) と散乱角 θ から次の式で計算できる。 $k_c = k_0 / \{1 + k_0(1 - \cos \theta)/0.511\}$ ここで $\theta = 180^\circ$ の時、 k_c は最小になる。この k_c の最小値が上記理論式である。
5. 全効率およびピーク効率が入射エネルギーによってどのように変わるか考察せよ。
6. その他、NaI の応答関数やその基礎である相互作用について問題を設定し、それについて考察せよ。

5 必要なファイルの入手方法

KEK 放射線化学センターホームページから pict_edu.exe をダウンロードする。
(<http://rcwww.kek.jp/research/shield/education/index.html>)
リンク切れ等の場合には、「EGS 放射線教育」というキーワードで検索する。
PCにおいて、pict_edu.exe を実行すると以下のファイルを得ることができる。

- egs4win32.exe
- info.\$\$\$
- Shower.hlp
- shield.exe
- shield.dat
- detecc.exe
- detecc.dat

6 おわりに

以上では、医学物理の学生を対象とした講義への適用例を紹介したが、他分野の受講者への適用も可能であるし、このシステムで別の課題を設定することも可能である。

又、当然の事ながら、課題や対象は分野によって異なる。EGS4 に使用を理解すれば、それぞれの目的にあった飛跡を作成するユーザーコードを作る事は難しい事ではない。

本システムを使った講義が様々な場所で行われ、放射線に対する理解を深める役に立つことを期待している。

References

- [1] H. Hirayama, Y. Namito, S. Ban, R. Ikeda and Y. Tokuda, “EGS4 Shower Display System, EGS4PICT(2), Windows Version”, *KEK Internal 94-10* (1994).
- [2] H. Hirayama, Y. Namito, S. Ban, R. Ikeda and Y. Tokuda, “EGS4 Shower Display System (EGS4PICT), Windows Version 2.0”, *KEK Internal 96-9* (1996).
- [3] H. Hirayama, Y. Namito, S. Ban, N. Numajiri and R. Ikeda, “EGS4 Shower Display System (EGS4PICT), Windows 32bit Version”, to be published as KEK Internal.
- [4] W. R. Nelson, H. Hirayama, D. W. O. Rogers, “The EGS4 Code System”, *SLAC-265* (1985).
- [5] H. Hirayama and Y. Namito, “Lecture Notes of Radiation Transport Calculation by Monte Carlo Method”, *KEK Internal 2000-20* (2001).

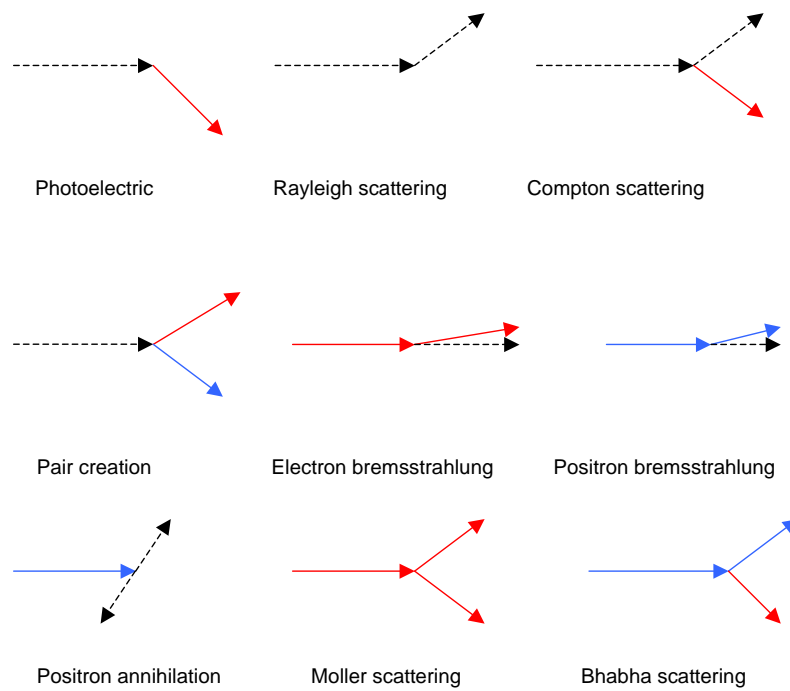


Figure 5: 各反応の模式図。光子：黒破線、電子：赤字実線、陽電子：青実線 (ディスプレイでは、光子は通常、黄色実線で示されている。)

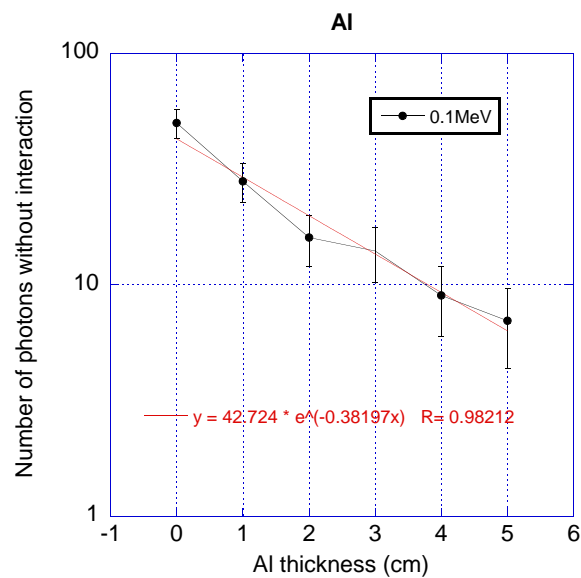


Figure 6: 減衰曲線のプロット例.

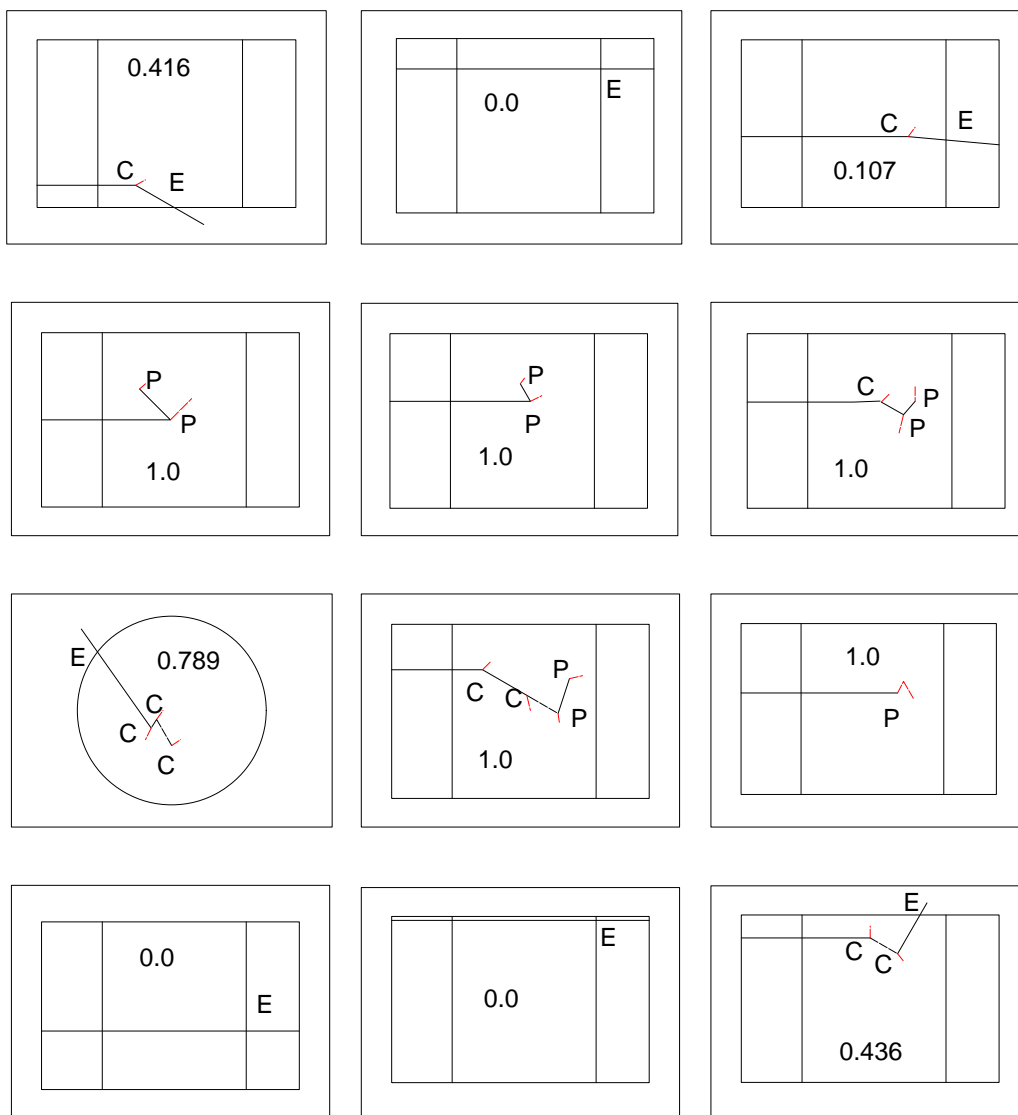


Figure 7: 飛跡の記録例。電子の飛跡は、一般的に短くて見えにくいので、実際よりも長く書いている。電子の飛跡は、一般的に短くて見えにくいので、実際よりも長く書いている。図中の C, P, E は、それぞれコンプトン散乱、光電効果、検出器外への逃げを示す。また、コマンドプロンプト (MS-DOS プロンプト) に表示された吸収エネルギーも図中に記録している。

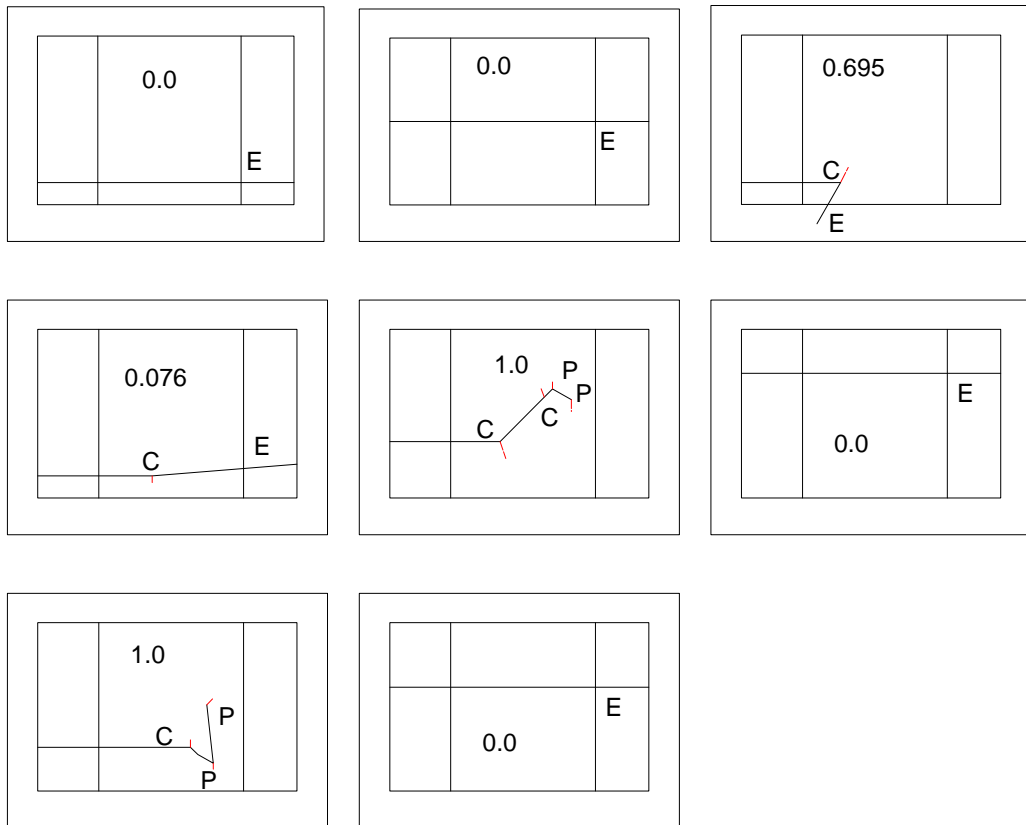


Figure 8: 飛跡の記録例。電子の飛跡は、一般的に短くて見えにくいので、実際よりも長く書いている。図中の C, P, E は、それぞれコンプトン散乱、光電効果、検出器外への逃げを示す。また、コマンドプロンプト (MS-DOS プロンプト) に表示された吸収エネルギーも図中に記録している。

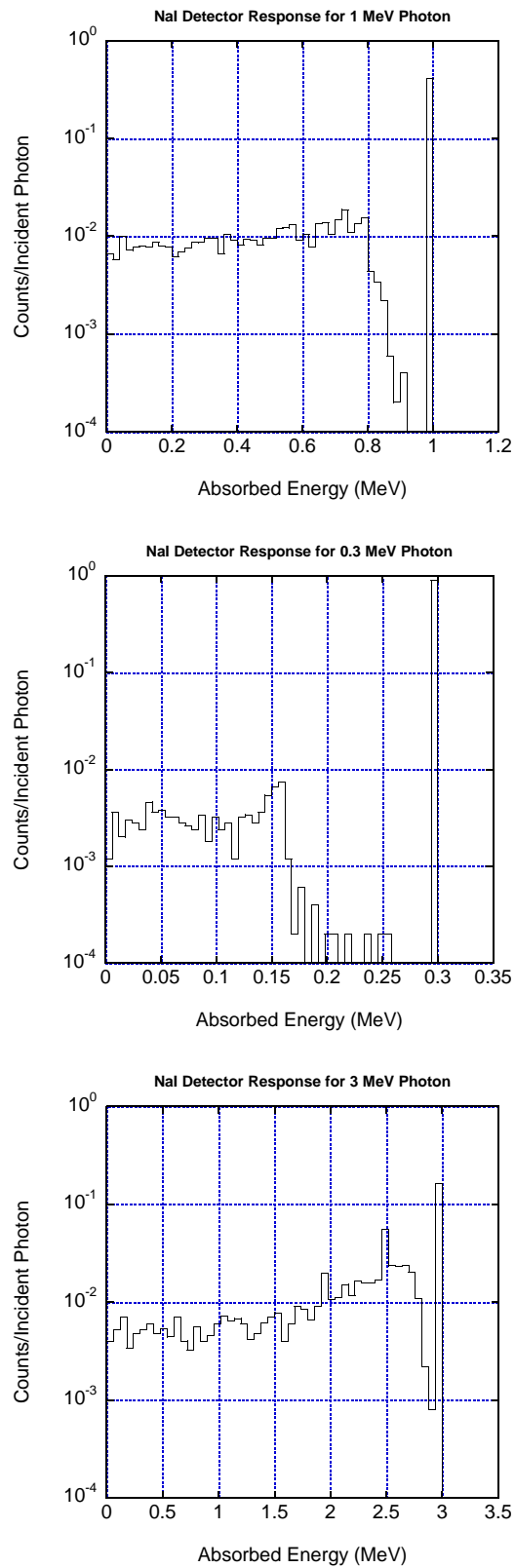


Figure 9: 1MeV, 0.3 MeV 及び 3MeV 光子に対する吸収エネルギー分布。