

EGS5 の概要  
(Electron Gamma Shower Version 5)

平山 英夫、波戸 芳仁

KEK, High Energy Accelerator  
Research Organization

# History of EGS system

Period	Program	Language	Authors
1963~1965	SHOWER1	Fortran	Nagel
1966	SHOWER2	Fortran	Nicoli
1967~1972	SHOWER3/PREPRO	Fortran	Ryder, Talwar, Nelson
1970~1972	SHOWER4/SHINP	Fortran	Ford
1974	EGS1/PEGS1	Fortran	Ford, Nelson
1975	EGS2/PEGS2	Mortran 2	Ford, Nelson
1976~1977	EGS3/PEGS3(SLAC-210)	Mortran 2	Ford, Nelson
1982~1985	EGS4/PEGS4(SLAC-265)	Mortran 3	Nelson, Hirayama, Rogers
2004	EGS5(SLAC-R-730/UC-407 and KEK Report 2004-5)	Fortran	Hirayama, Namito, Bielajew, Wilderman and Nelson

# EGS5 Code System

- 任意の元素、化合物及び混合物中での電子・陽電子及び光子の輸送をシミュレーションすることができる。
- 物質データは、EGS5システムの一部であるpegs5により、計算し、EGS5で使用する。
- 光子と電子・陽電子とも、決められた離散的なステップではなく、ランダムにサンプリングしたステップにより移動する。
- 電子・陽電子の適用エネルギー範囲は、低Z物質では1keVから高Z物質では数十keVから数千GeV
- 光子の適用エネルギー範囲は、1keVから数千GeV

# EGS5 システムで扱っている電子・陽電子反応

- 制動輻射 (低エネルギーでの Elwert 補正は考慮していない)
  - 散乱角の詳細サンプリング(オプション)
- 電子・電子散乱(Møller 散乱)
- 陽電子・電子散乱(Bhabha 散乱)
- 陽電子消滅(飛行中及び静止時)と消滅  $\gamma$  線
- 電子衝突電離
- 多重散乱 (*i.e.*, クーロン散乱)。散乱角は、連続分布からサンプリング。サンプリングは、多重散乱の理論の制限範囲内でランダムに決められた任意のステップについて行われる。
- 連続エネルギー損失 (カットオフエネルギー以下の制動輻射 + カットオフエネルギー以下の二次電子を生じる電子・電子、陽電子・電子散乱を含む)

# 制動輻射(Bremsstrahlung)

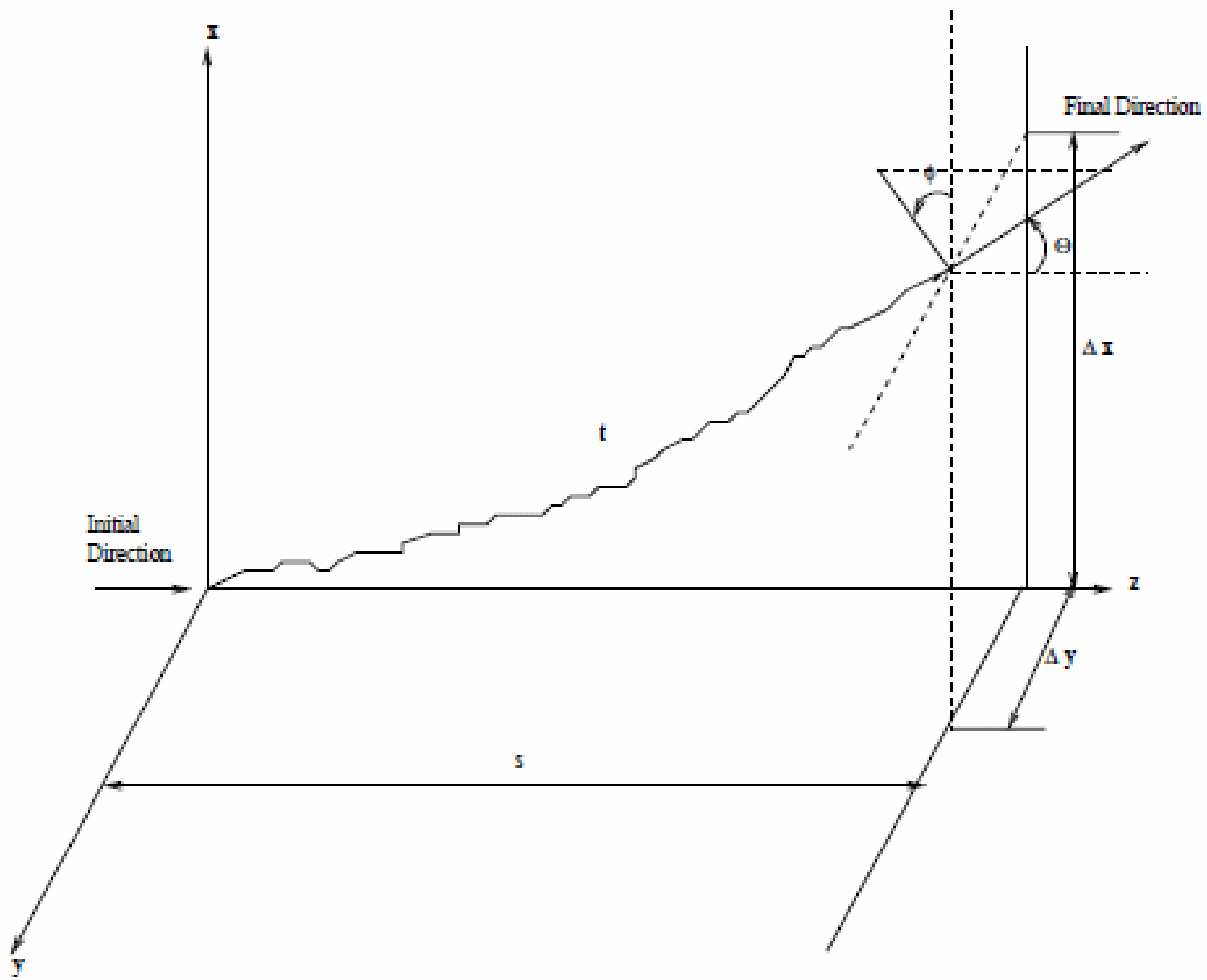
- 電子・陽電子が原子核のクーロン場で大きな加速を受け、エネルギーを電磁波として放出する。この電磁波を制動輻射(Bremsstrahlung)という。
- 制動輻射の確率は、エネルギーが高くなると共に大きくなり、高エネルギーでは主要な反応になる。
- Egs5では、カットオフエネルギー以下の制動輻射は、連続的なエネルギー付与として扱われる。
- デフォルトのegs5では、制動放射の角度は、入射電子に対して $\theta = m/E$ としている。(m:電子の静止エネルギー、E:電子の全エネルギー)
- オプションの設定により、詳細な角度分布からサンプリングすることが可能

# 電子・電子(Møller)散乱及び 陽電子・電子(Bhabha)散乱

- 電子又は陽電子が物質中の電子と衝突する反応
- EGS5では、電子・陽電子のカットオフエネルギー以上の二次電子を生じる場合に、散乱として扱う
  - カットオフエネルギー以下の電子は、連続的なエネルギー付与として扱われる
  - 生成した二次電子は、デルタ線と呼ばれる
- 電子・電子散乱では、入射電子と散乱電子の区別がつかないので、デルタ線の最大エネルギーは、入射電子の運動エネルギーの1/2
- 陽電子・電子散乱では、二次電子は入射陽電子の全ての運動エネルギーを得ることが可能

# 多重散乱の扱い

- 電子・陽電子(以下、総称して電子)は、物質中で非常に多数回の弾性散乱をする。
  - 散乱断面積が大きい。(mfpが短い)
  - 個々の散乱を扱うことは、原理的には可能であっても、計算時間との関係で特別な場合を除いて実際的ではない。
- Condensed History Techniqueの使用
  - 電子の飛跡を短いステップに分け、多重散乱モデルを使用して、直線距離から実際の飛程の変換、方向や位置の変化を組み入れ





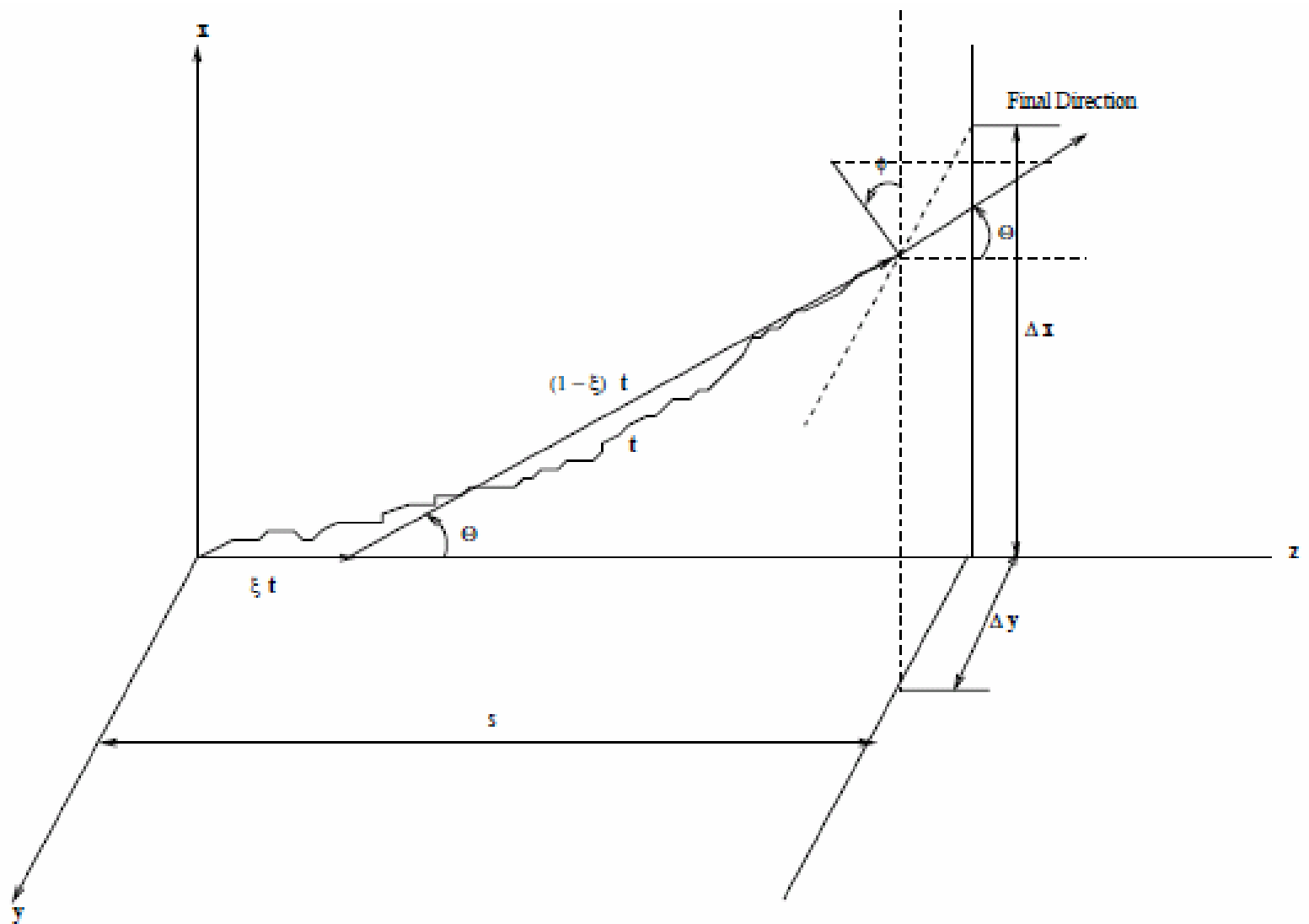


Figure 2: Random hinge transport mechanics.

# 電子の移動に伴うエネルギー変化 を加味したrandom hinge

- “t”を使用したrandom hinge は、電子のエネルギー変化を含めた実際の状況との比較で、平均直線距離 $\langle s \rangle$ を過小評価し、位置の変位( $\langle \Delta x^2 + \Delta y^2 \rangle$ )を過大評価
- Scattering strength  $K_1(t)$ を用いたrandom hinge

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

$$G_l(t) = 2\pi \int_{-1}^1 d\mu \Sigma(\mu; t) [1 - P_l(\mu)]$$

$\Sigma(\mu; t)$ : (空間依存)巨視的単一弾性散乱断面積

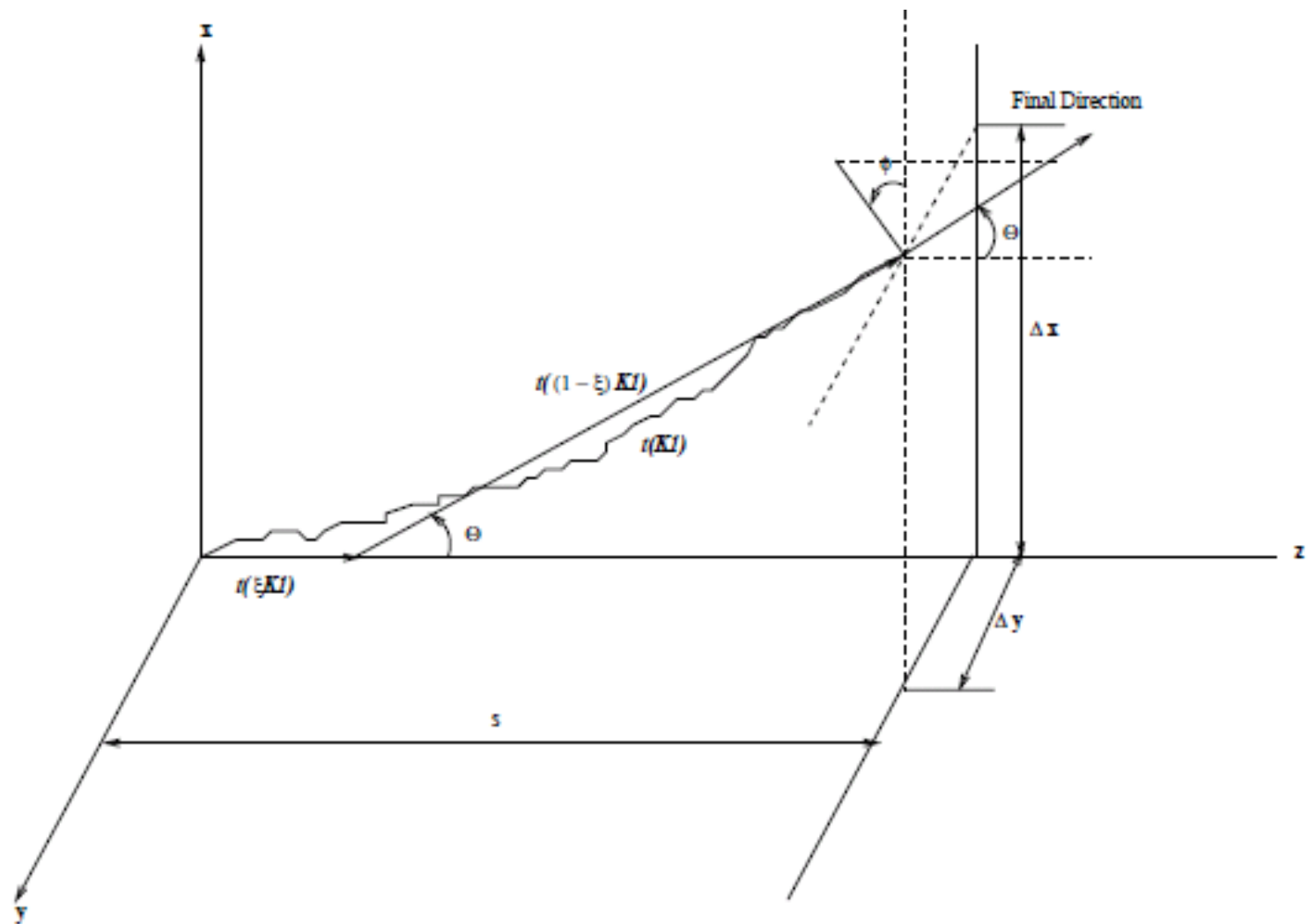


Figure 3: Modified random hinge transport mechanics.

# Energy Hingeの導入

- 電子は移動に伴い連続的にエネルギーが変化することから、扱いが複雑になる。
- Energy hingeの導入 (energyステップ間のエネルギーを、乱数を用いてステップ間の一ヶ所で集中的に付与)により、energy hinge ポイント以外でのエネルギーの変化を不必要に
  - 光子と同じ様な扱いに

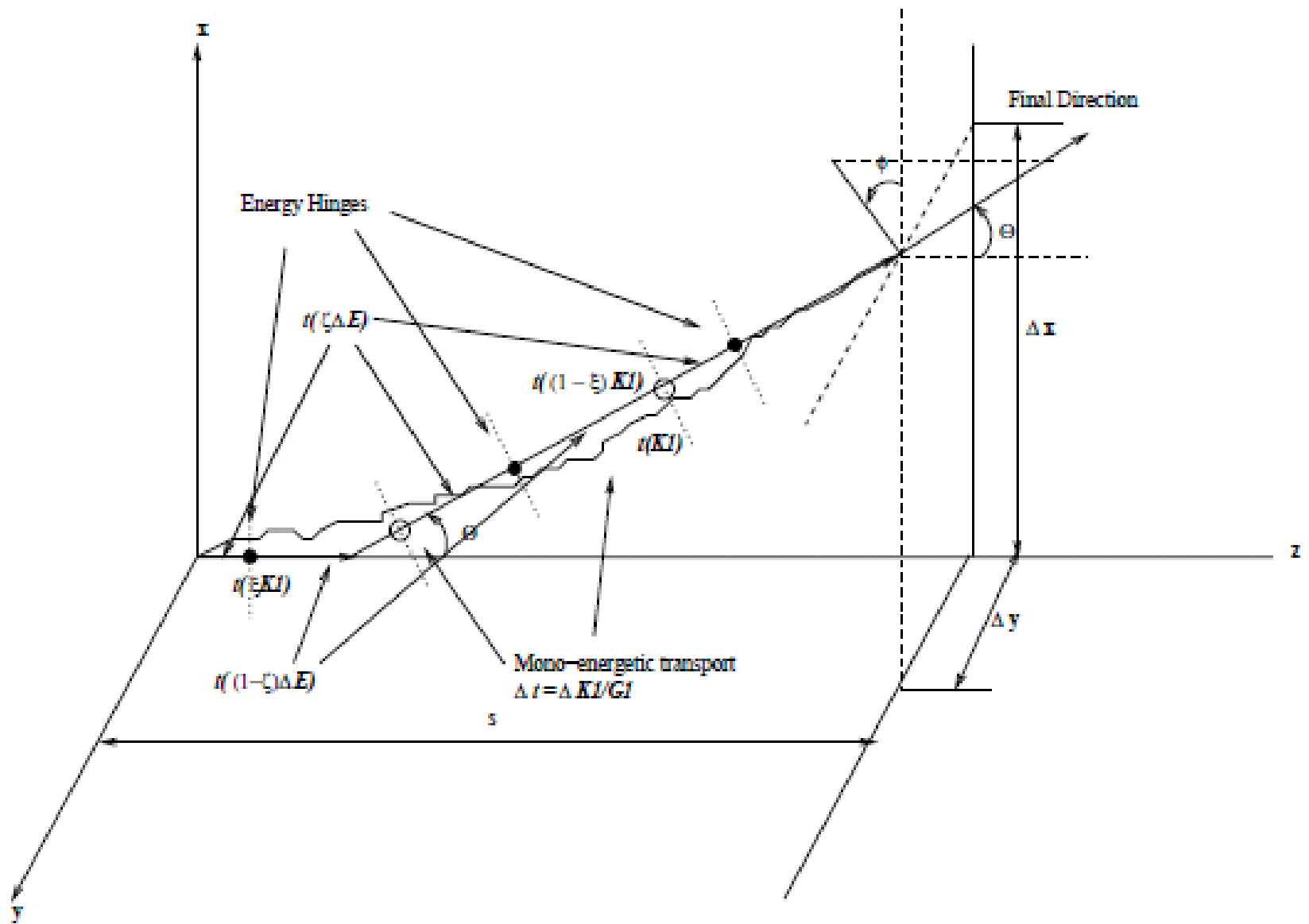
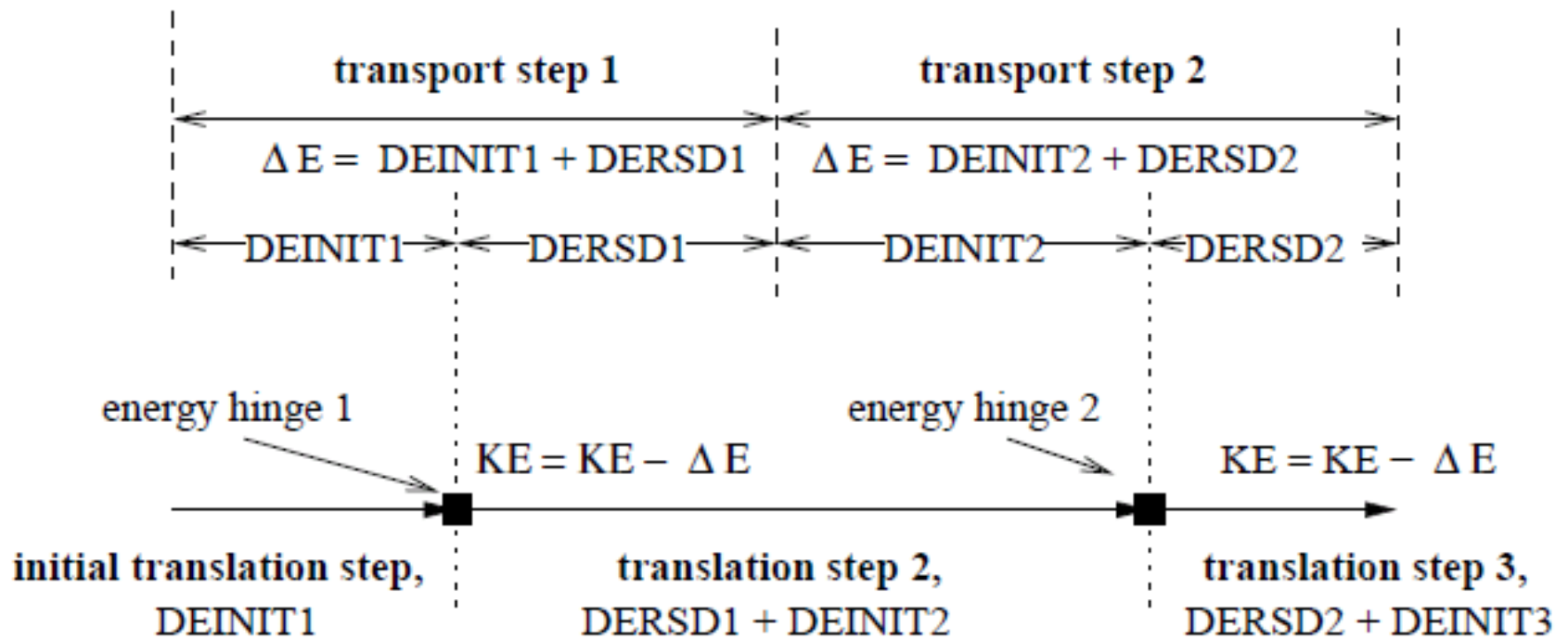
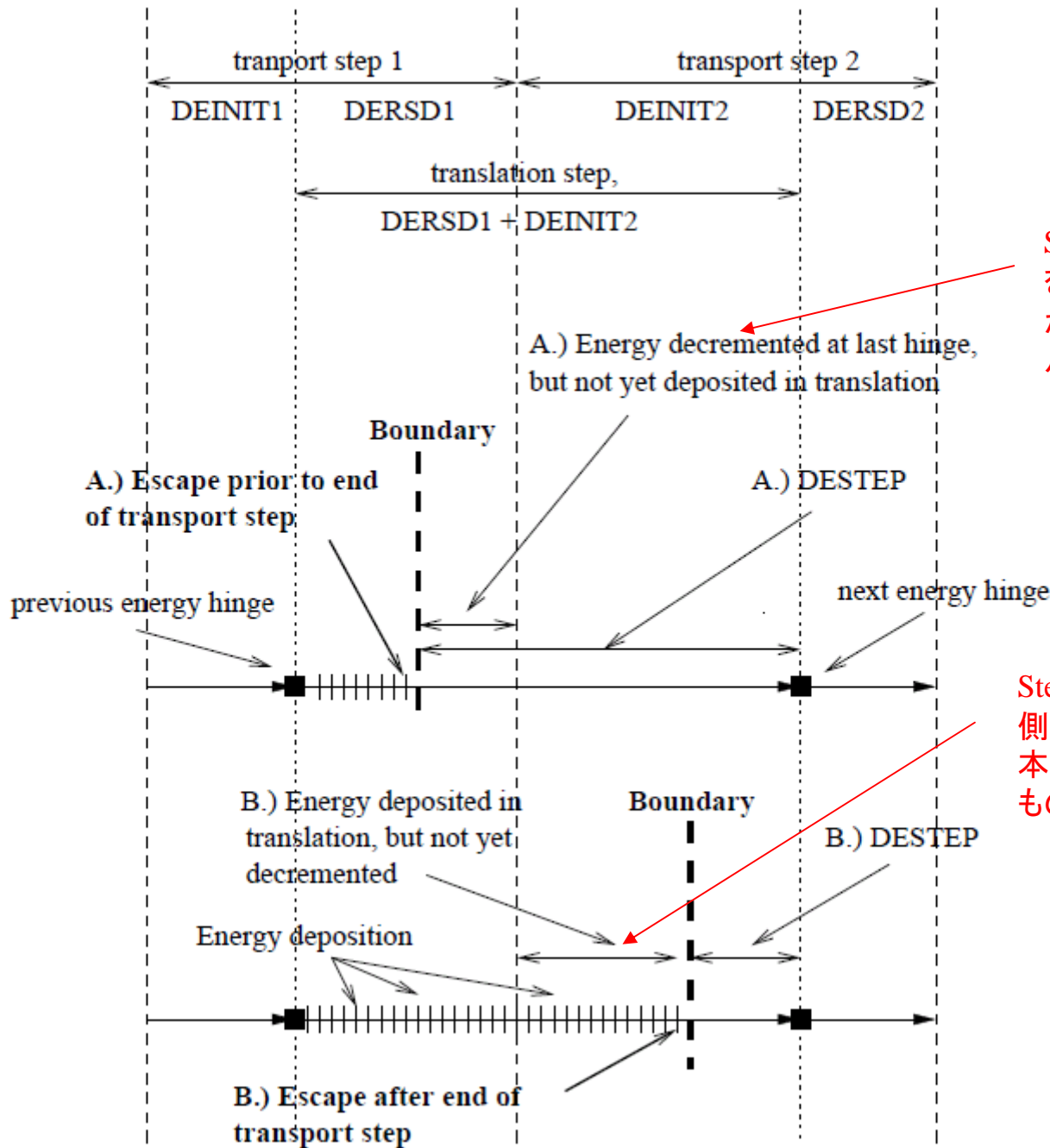


Figure 4: Dual hinge transport mechanics.

Transport Steps,  $\Delta E = E \times \text{ESTEPE}$



Translation Steps, between random hinge points



Step 1のhinge pointでエネルギーをboundary内側で付与しているが、本来は、次の領域でのエネルギー付与となるべきもの

Step 2のhinge pointでboundaryの外側に付与することになっているが、本来は、内側の領域に付与すべきもの

# Step sizeのコントロール

- 多重散乱に関するstep sizeの制御
  - エネルギー損失の割合に対応するstep size
    - $\epsilon_{\text{frac}}$ (最高エネルギー)、 $\epsilon_{\text{frac1}}$ (カットオフエネルギー) ---途中のエネルギーについてはlog内挿
    - どの程度小さくとれば良いのかを決める目安を付けにくい
  - スコアする領域の大きさに対応するパラメーター“Characteristic Distance”による制御
    - Characteristic Distanceに対応する $K1(E)$ をpegsで計算し、各エネルギーに対応する $K1(E)$ をstep sizeとして使用
    - 当該物質で構成するリージョンに対応する大きさという目安が可能



# Energy Hinge の制御

- estepe – 最高エネルギーの電子の場合について  $\Delta E = e * \text{estepe}$  に対応する長さを energy hinge とする
- estepe2 – 同様にカットオフエネルギーの電子について  $\Delta E = e * \text{estepe2}$  に対応する長さを energy hinge とする
- 他のエネルギーについては、log内挿で割合を決定

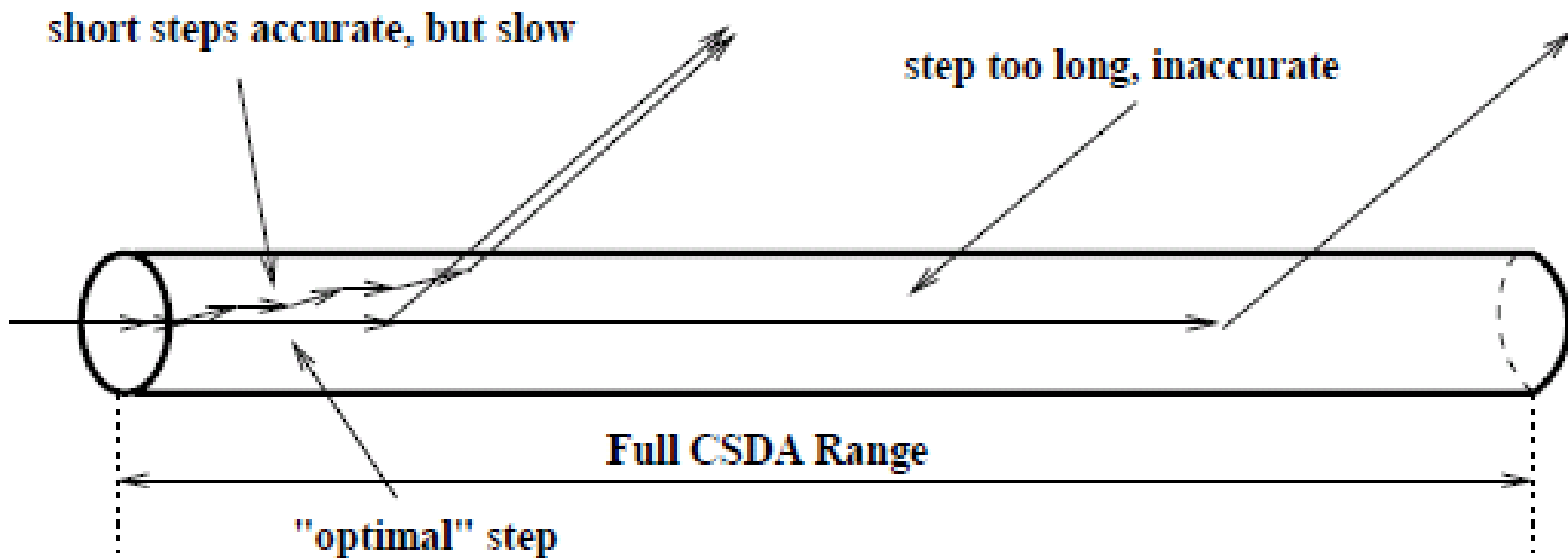
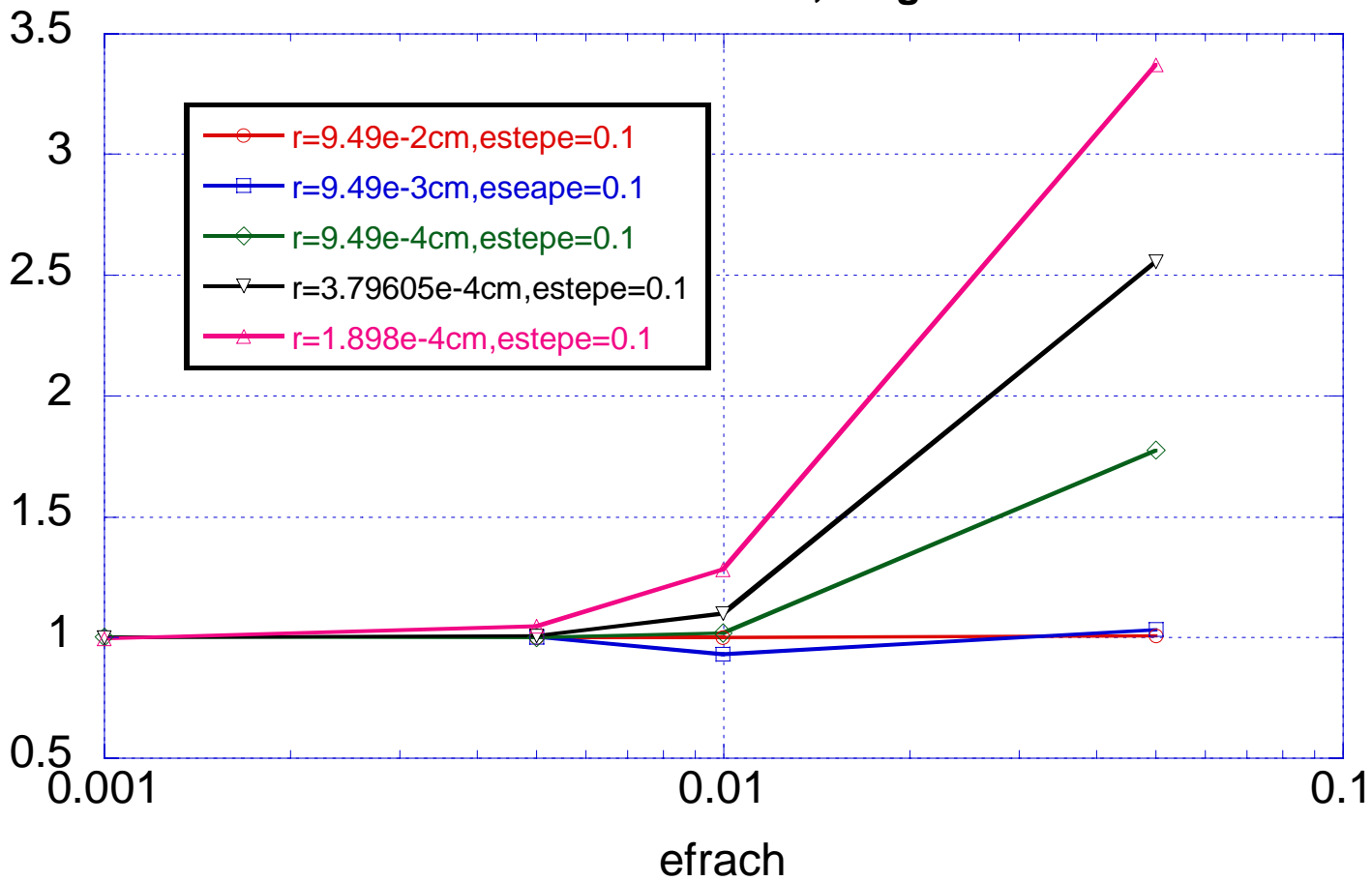


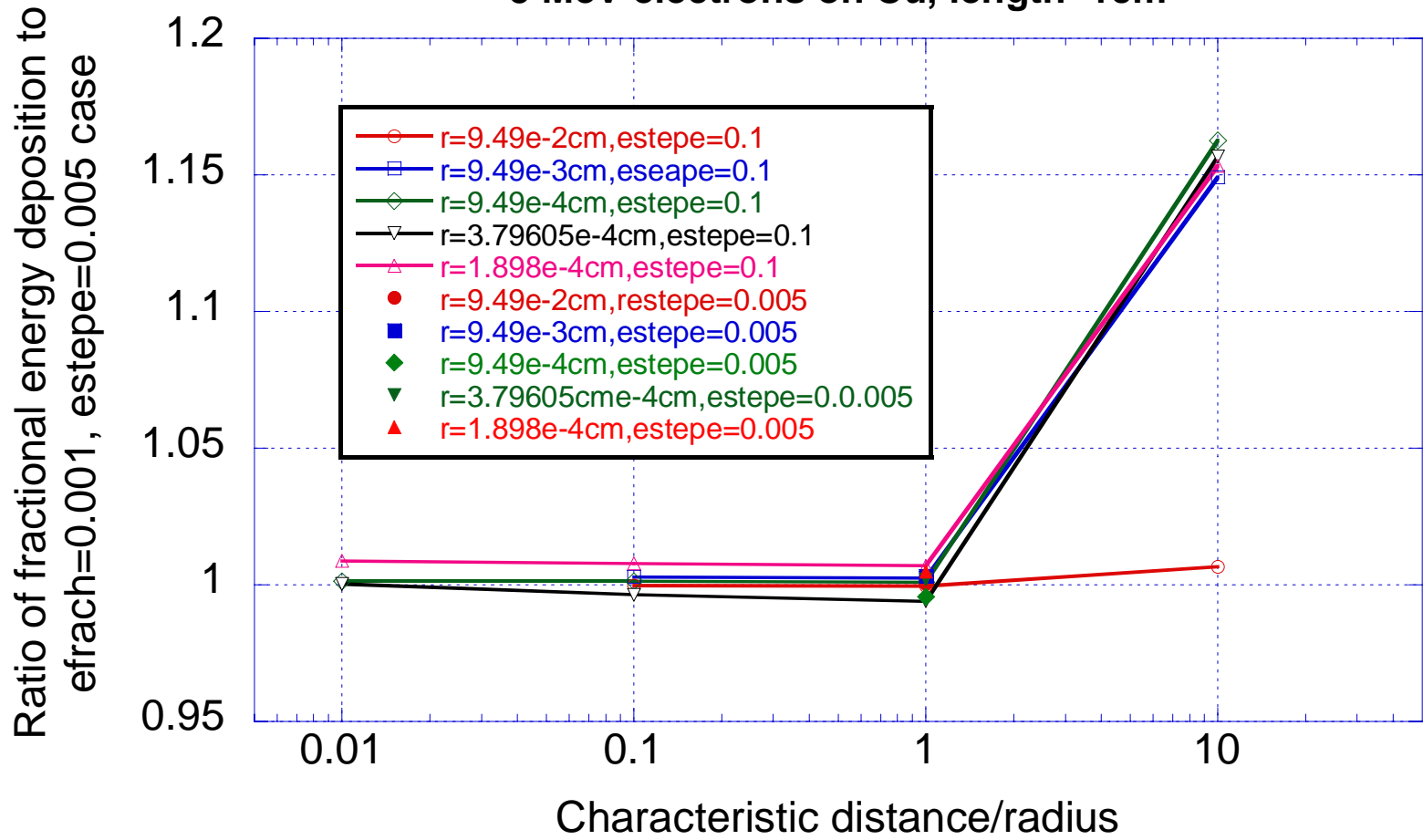
Figure 2.15: Schematic illustrating the broomstick problem.

### 5 MeV electrons on Cu, length =1cm

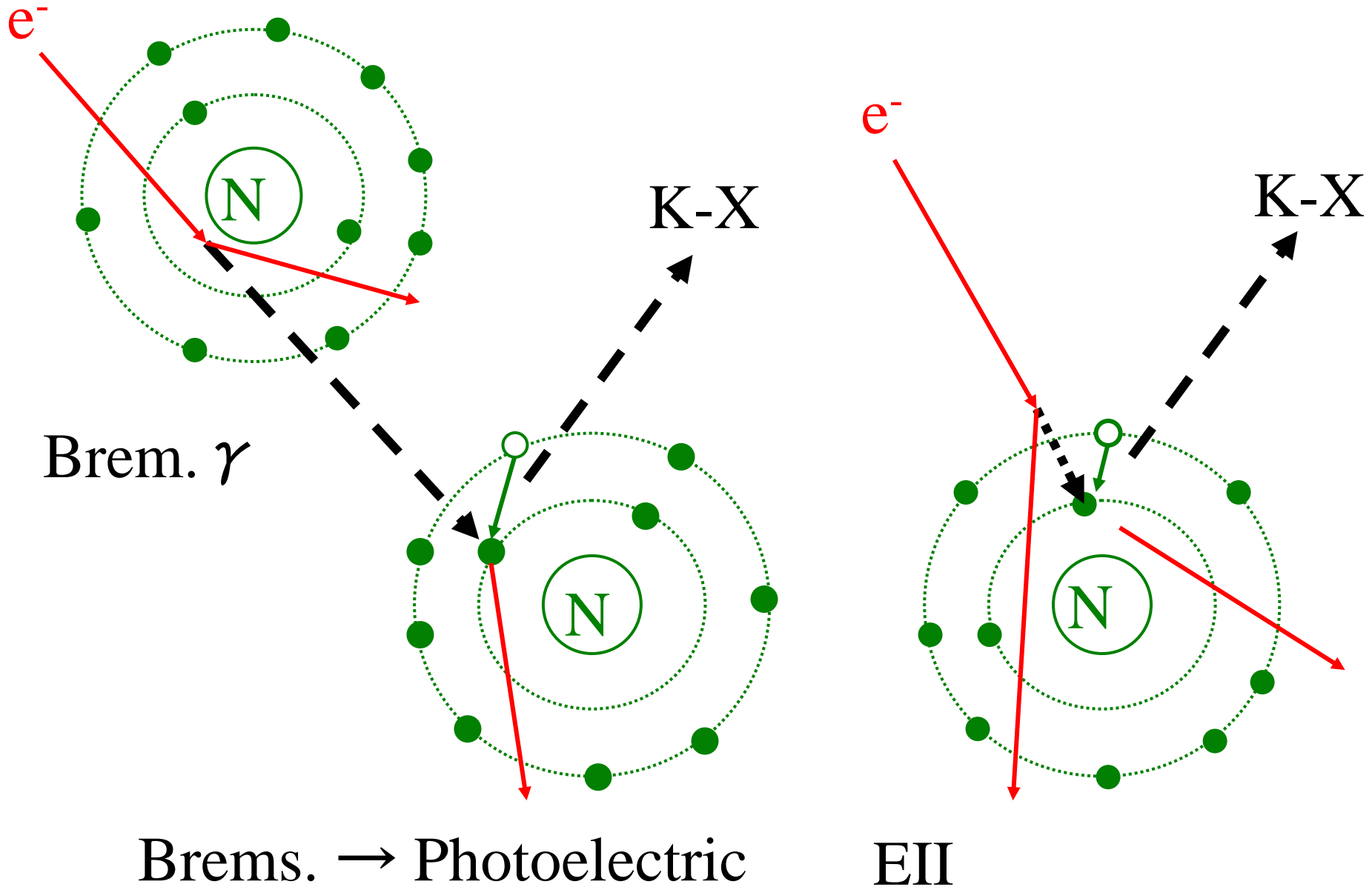
Ratio of fractional energy deposition to  
efrach=0.001, estepe=0.005 case



### 5 MeV electrons on Cu, length=1cm

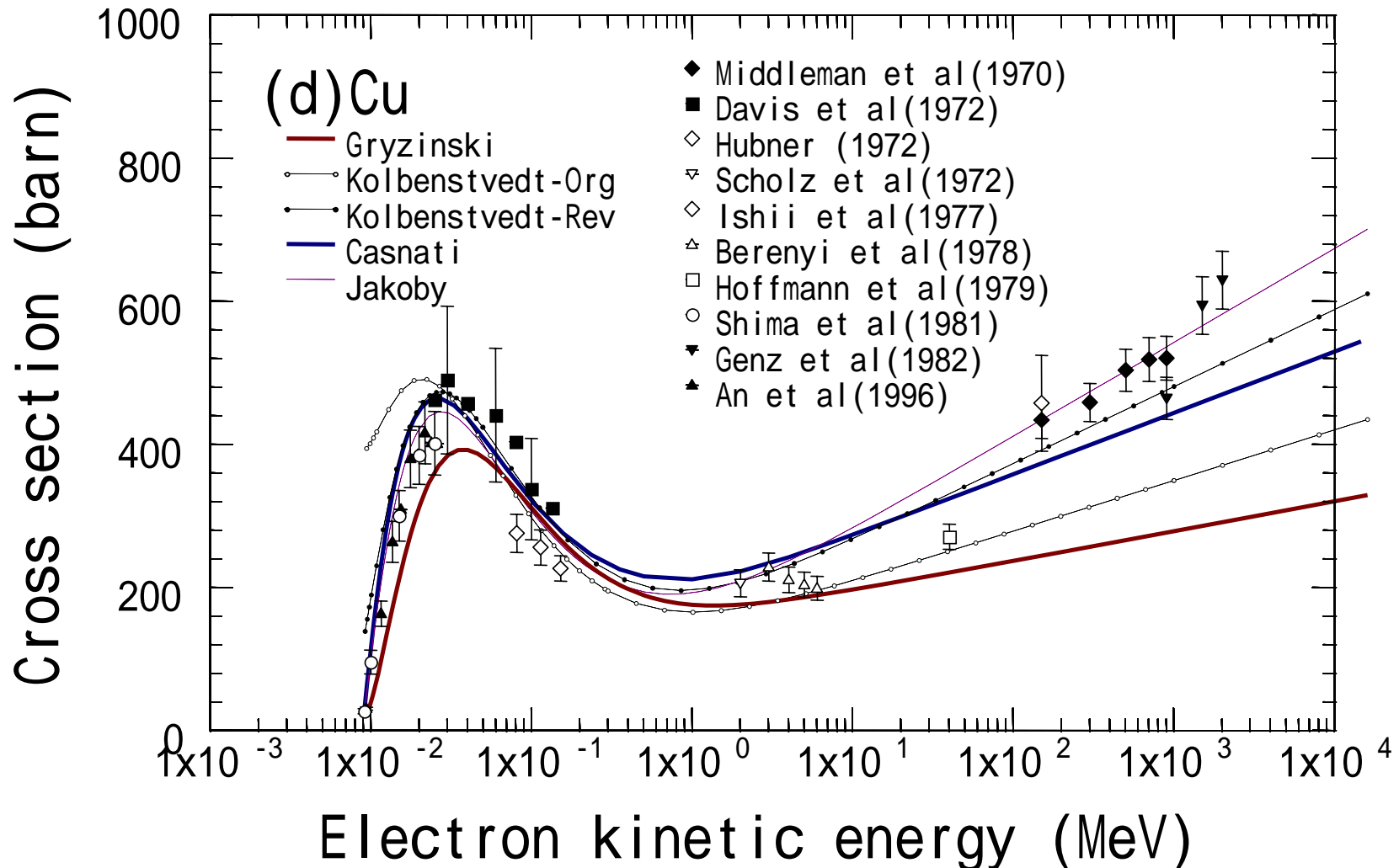


# What is electron impact ionization (EII)?



# K shell EII cross section of Cu

file:k801cu



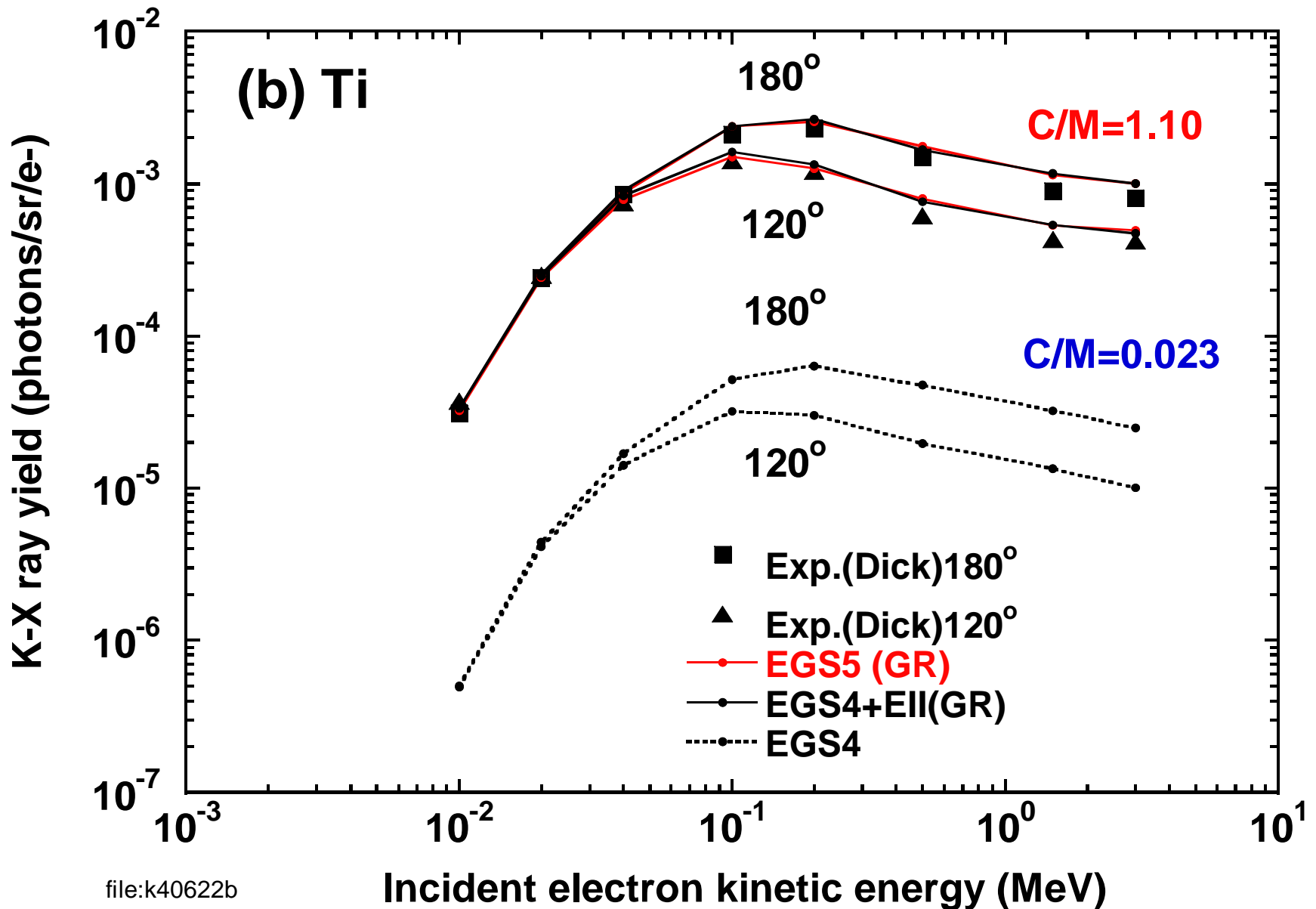
# K shell EII cross section

1. Gryzinski: Semi classical + Relativistic factor
2. Kolbenstvedt  
Binary collision + Photo effect by virtual  $\gamma$
3. Kolbenstvedt rev: Rev for ultra-relativistic  $e^-$
4. Casnati: Bethe's formula + Relativistic factor + Fit to measurements
5. Jakoby: Empirical formula
6. Scofield:  
First Born approximation, numerical calculation,  
relativistic effect



1-5: Included in egs5, recommend: 1,3,4

# K X-ray yield for Ti





# EGS5 システムで扱っている光子の反応

- 電子対生成
  - 散乱角の詳細なサンプリング(オプション)
- コンプトン散乱
  - ドップラー広がり及び直線偏光(オプション)
- レイリー散乱(オプション)
  - 直線偏光(オプション)
- 光電吸収
  - 化合物及び混合物を含むK- 及び L- 特性X線とオー  
ジエ電子(オプション)
  - 光電子の角度分布サンプリング(オプション)

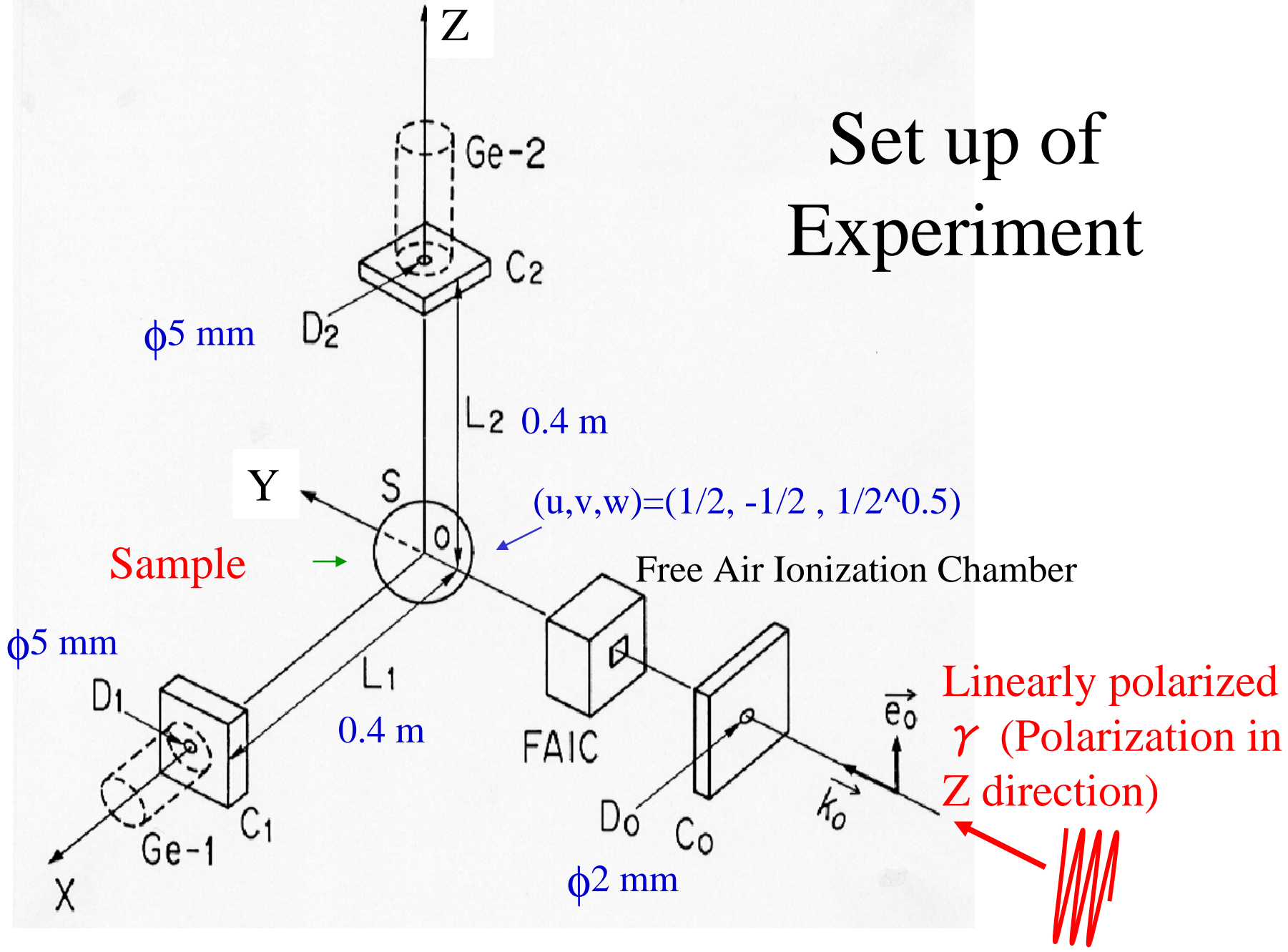
# 電子対生成

- 原子核のクーロン場の中で光子が消滅して、1対の電子と陽電子が生成される現象
- デフォルトのegs5では、散乱角は、近似的に $\theta = m/k$  ( $m$ :電子の静止質量、 $k$ :入射光子のエネルギー)としている。
- 制動輻射の場合と同様に、オプションの設定により、詳細な散乱角をサンプリングにより決定することができる。

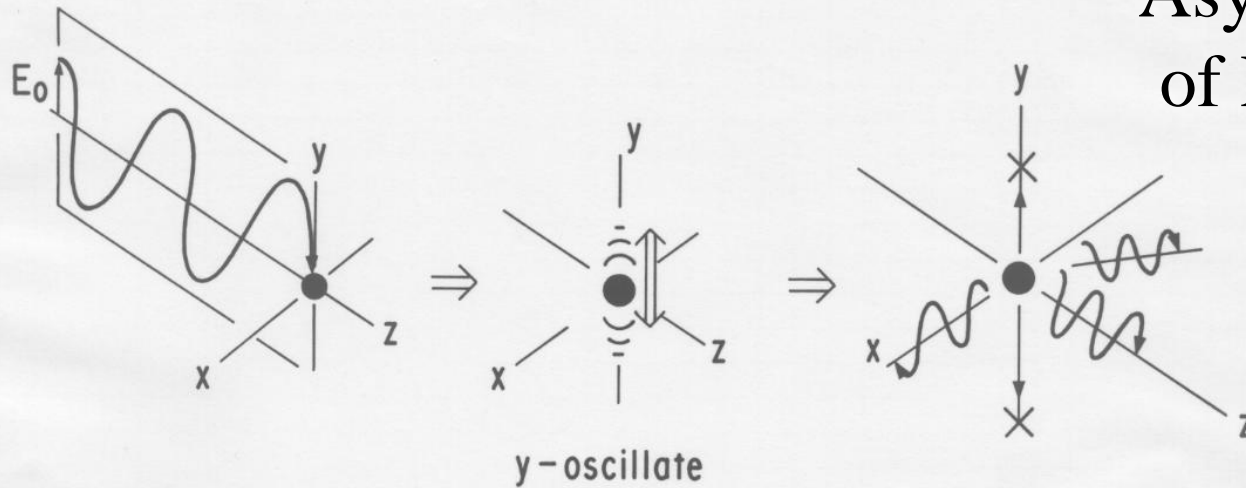
# 低エネルギー光子の扱い

- KEKにおいてEGS4の改良した低エネルギー光子の扱いは、egs5に組み込まれ、オプションフラグの設定により使用できるようになっている。
- 以下の反応
  - 散乱における直線偏光
  - コンプトン散乱におけるドップラー広がり
  - 化合物、混合物を含めた、K、L-X線及びオージェ電子の発生
  - 実験データとの比較により検証

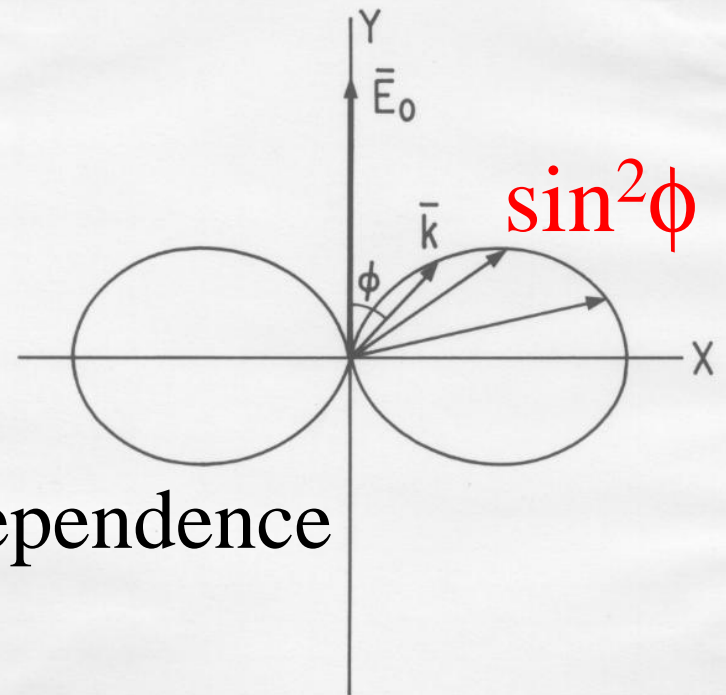
# Set up of Experiment



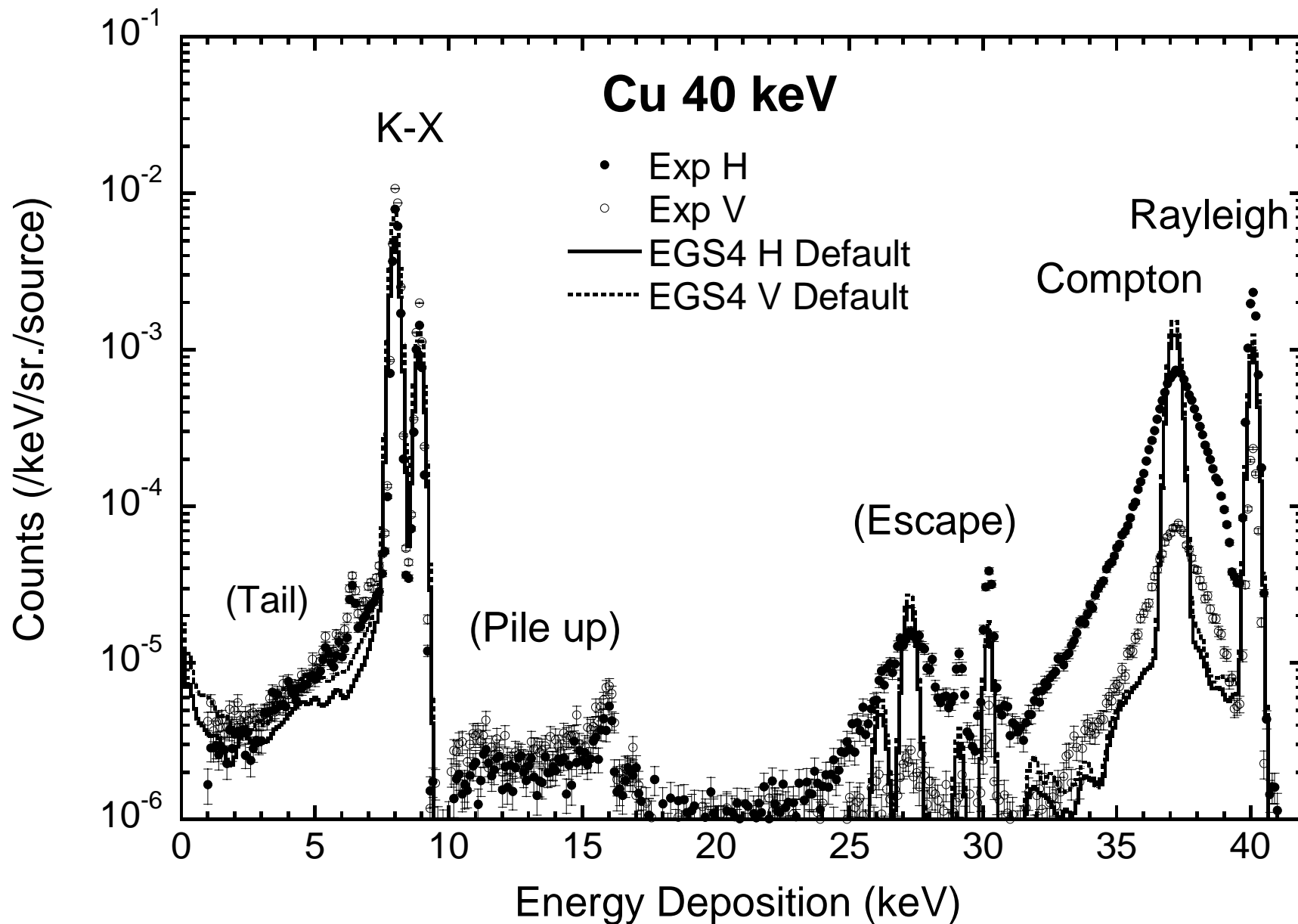
# Asymmetric scattering of Linearly Polarized Photon



Azimuth angle dependence  
( $\theta=90^\circ$ )

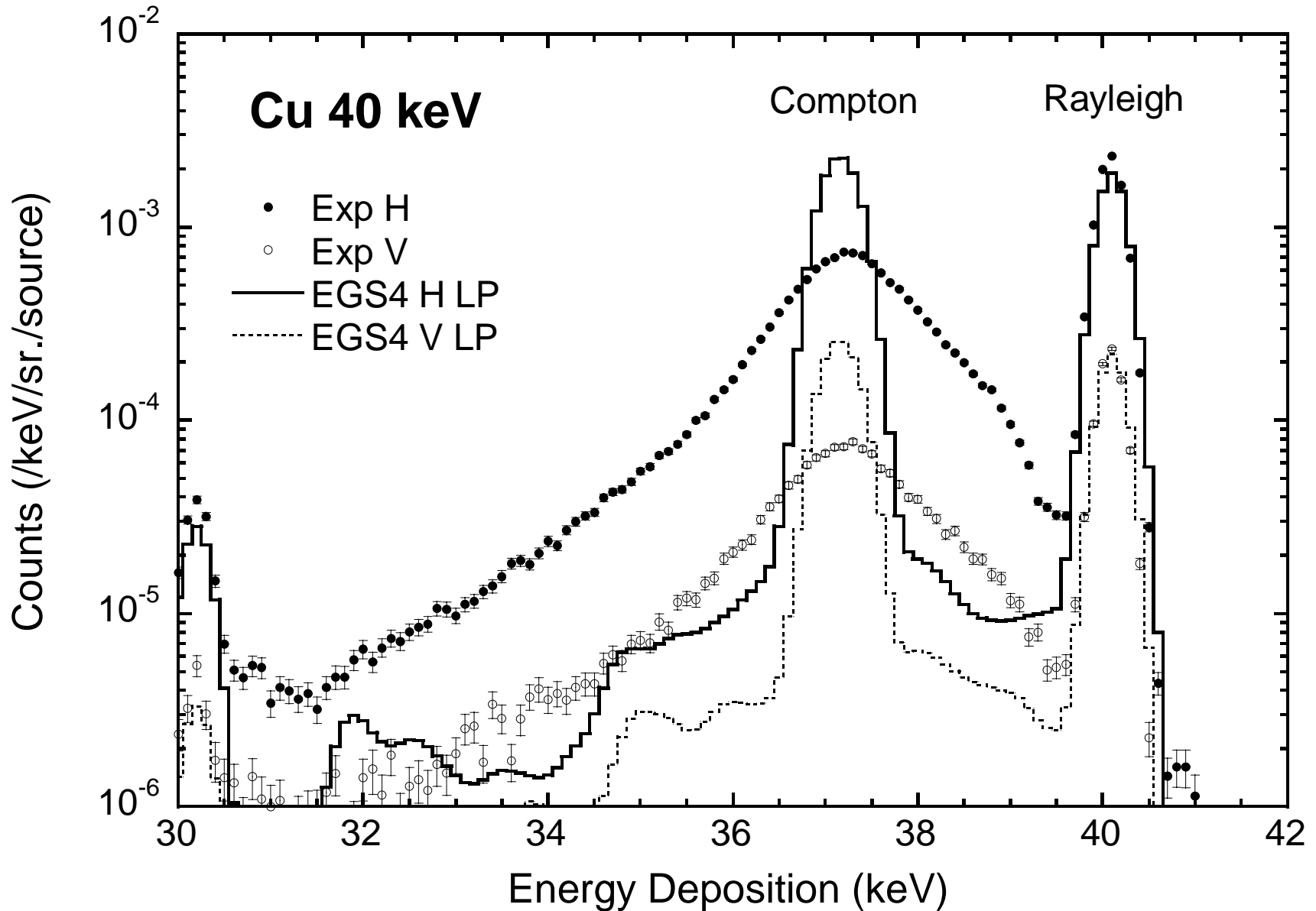


# Cu, 40 keV (Exp versus Default EGS4)



# Cu, 40 keV (Exp. vs EGS4+LP)

file:k90421c



# Compton scattering by Bound Electron

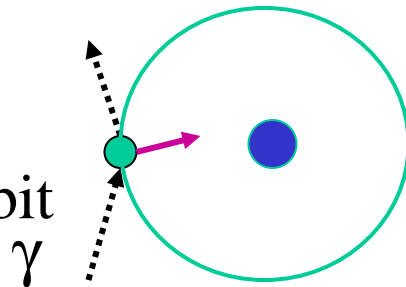
- Doppler broadening of scattered photon energy

Scattering is prohibited if energy imparted electron  $<$  binding energy

- Differential cross section  $(d\sigma/d\Omega)_{bC}$ : Decrease at forward

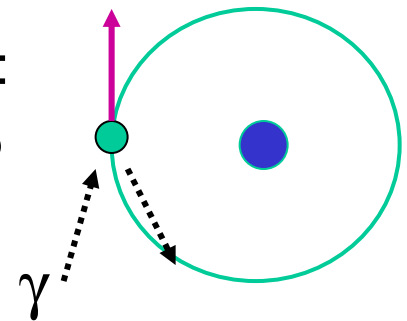
Small angle:

Tends to prohibit



Large angle:

Tends not to prohibit

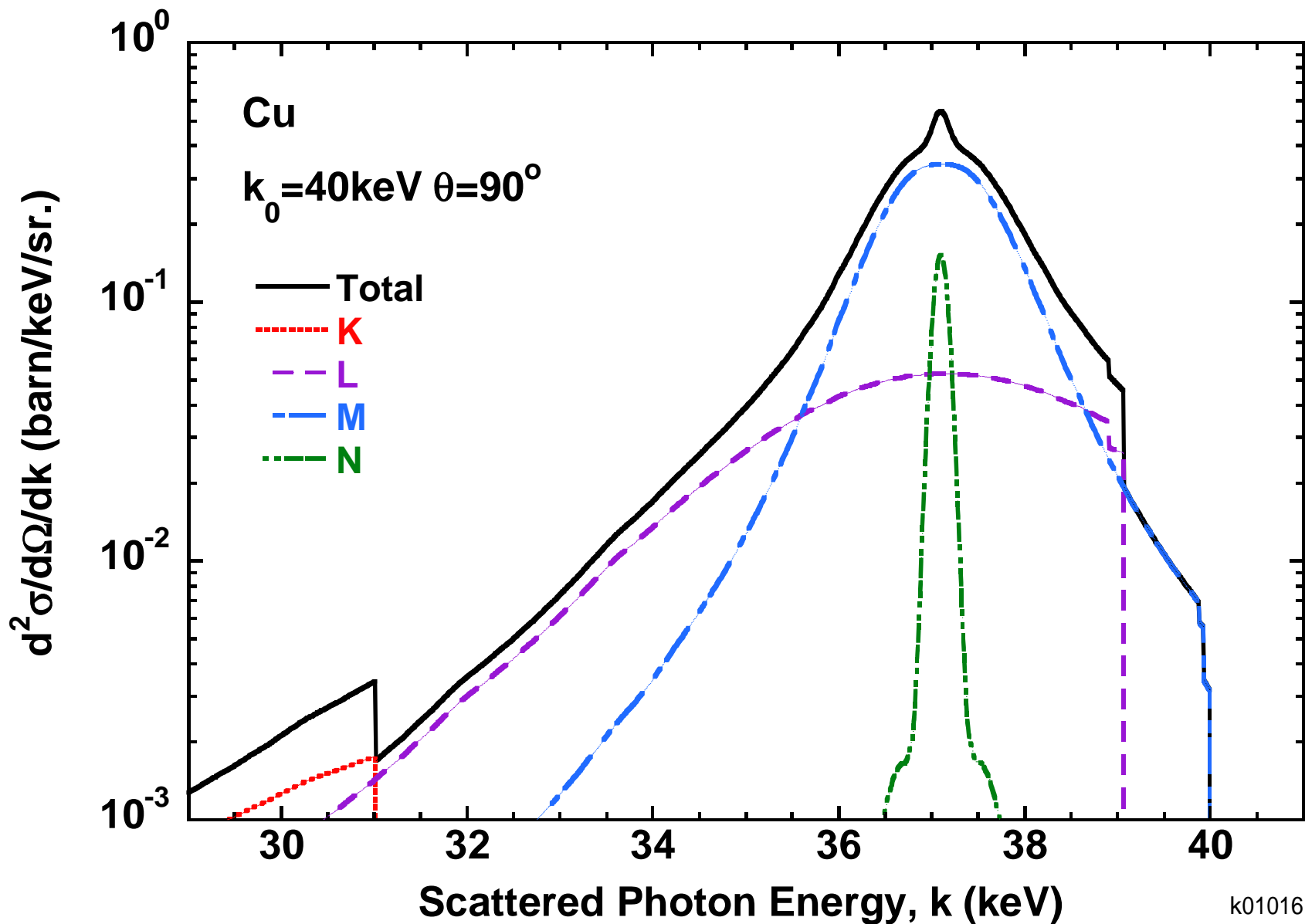


- Total cross section  $\sigma_{bC}$ : Decrease

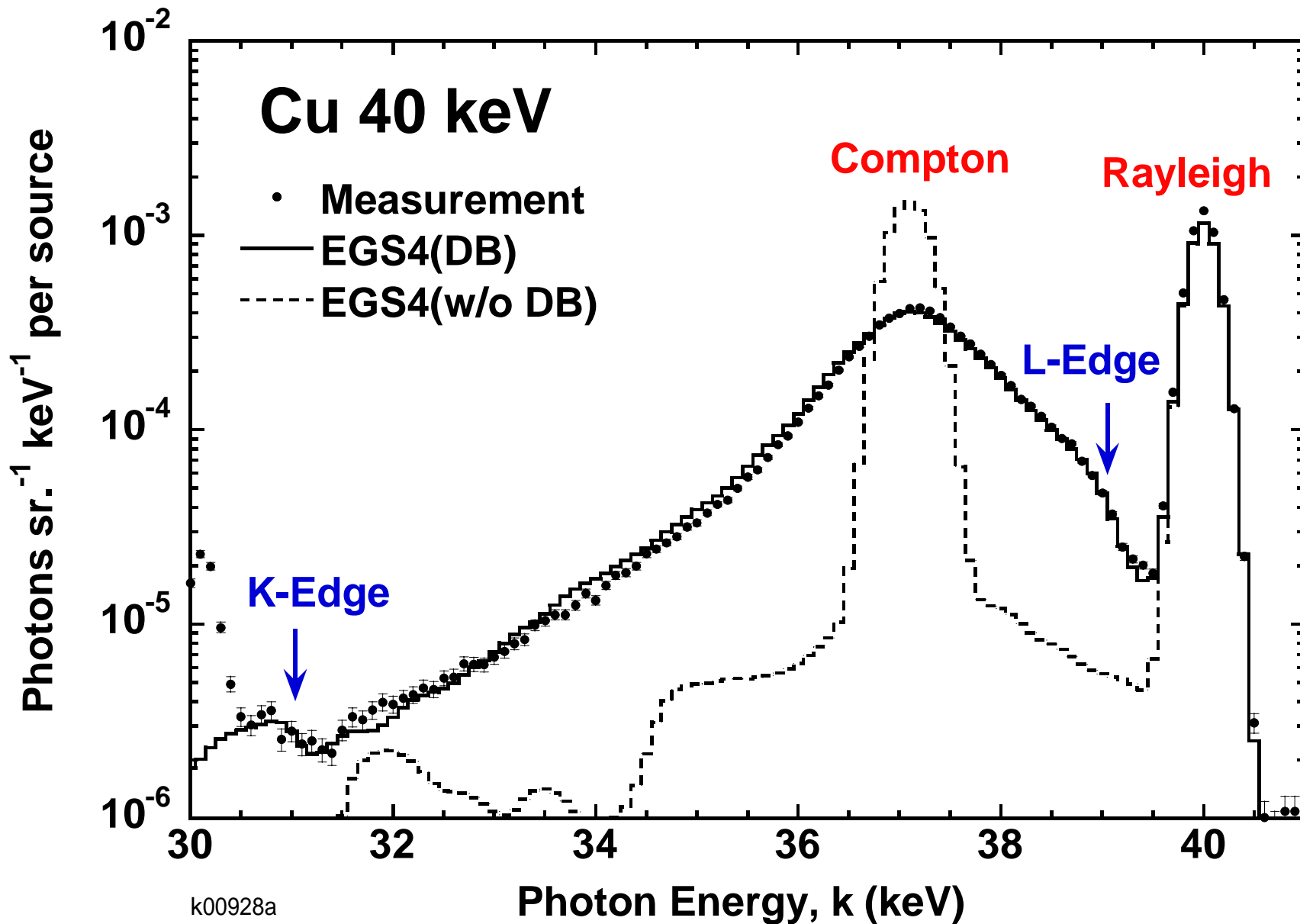
$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{bC} = \int_0^{k_i^{\max}} \left(\frac{d^2\sigma}{d\Omega dk}\right) dk, \quad \sigma_{bC} = \int_{4\pi} \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{bC} d\Omega$$



# Double Differential Compton Cross Section



# Cu, 40 keV (EGS4+LP+DB=EGS5)

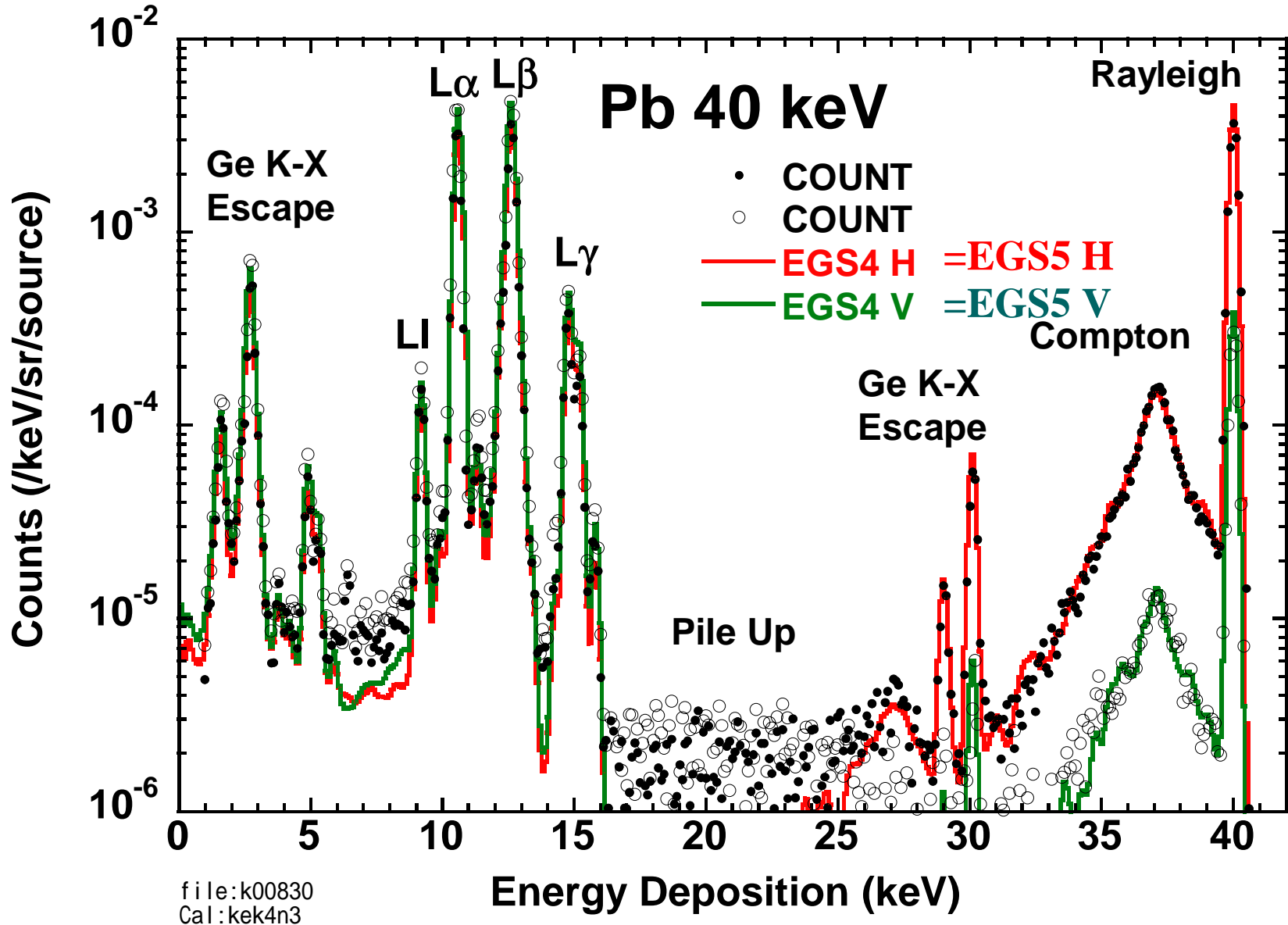


# EGS5での光電吸収断面積の扱い

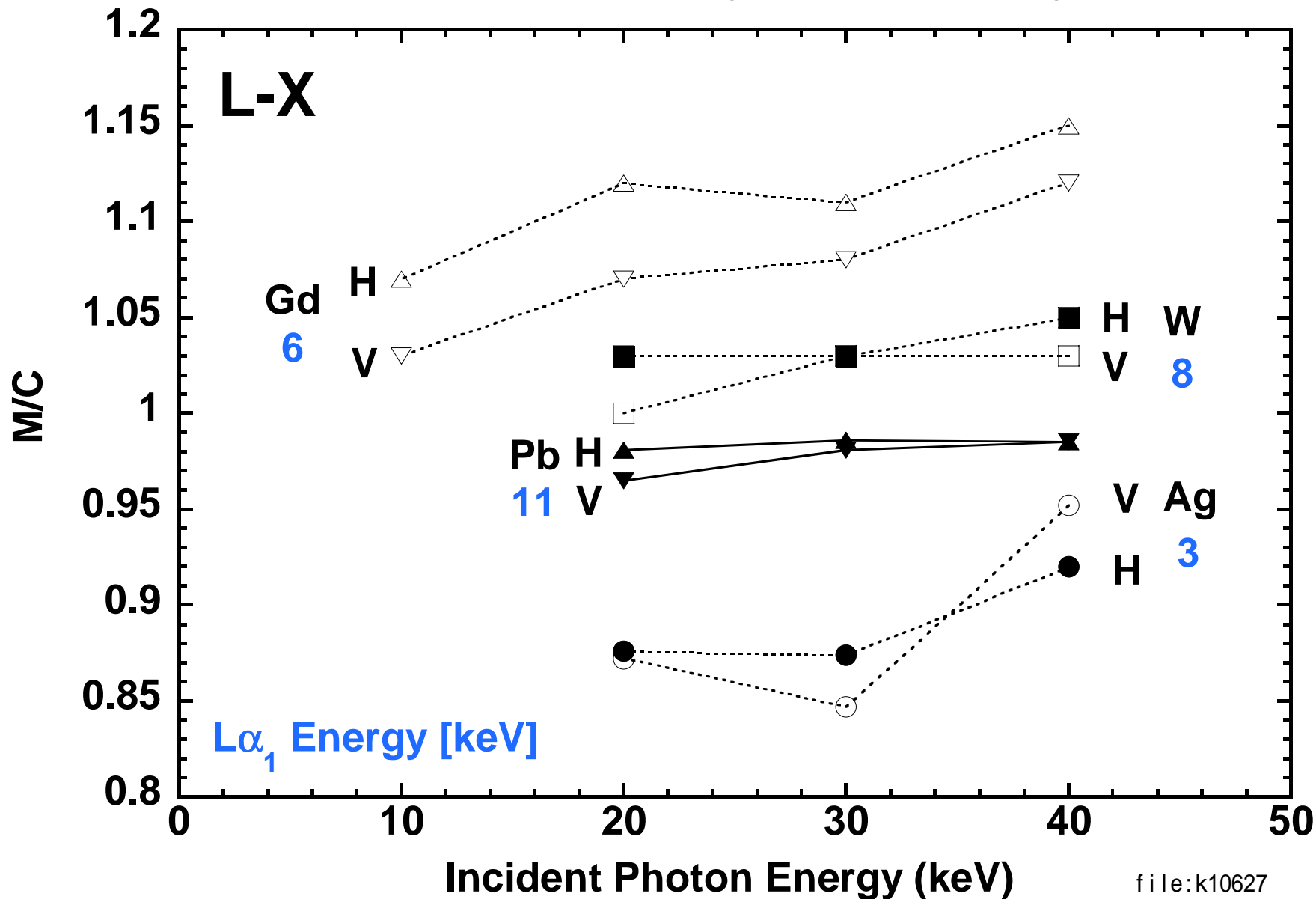
- K-, L1-, L2-, L3 及びその他のサブシェル光電吸収断面積は、PHOTOXデータベースを基にlog-logプロットを3次元多項式フィッティングした結果をEGS5のBLOCK DATAとしている。
- EGS5では、上記データにより、各元素及び各シェルの分岐費比を求め、光電吸収を起こした元素及びシェルを決定する。
- この方法により、任意の化合物、混合物について、特性X線やオージェ電子の扱いが可能に

# Photon spectrum from Pb target

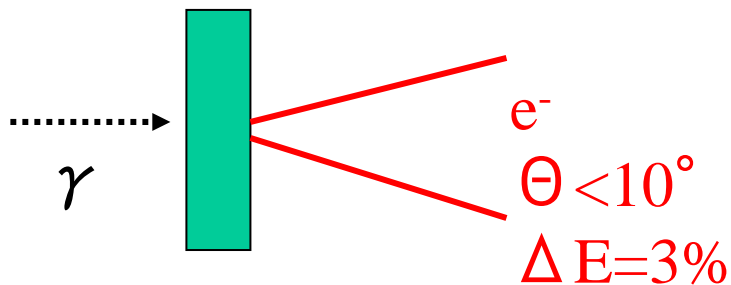
EGS4 (General Treatment of PE) = EGS5



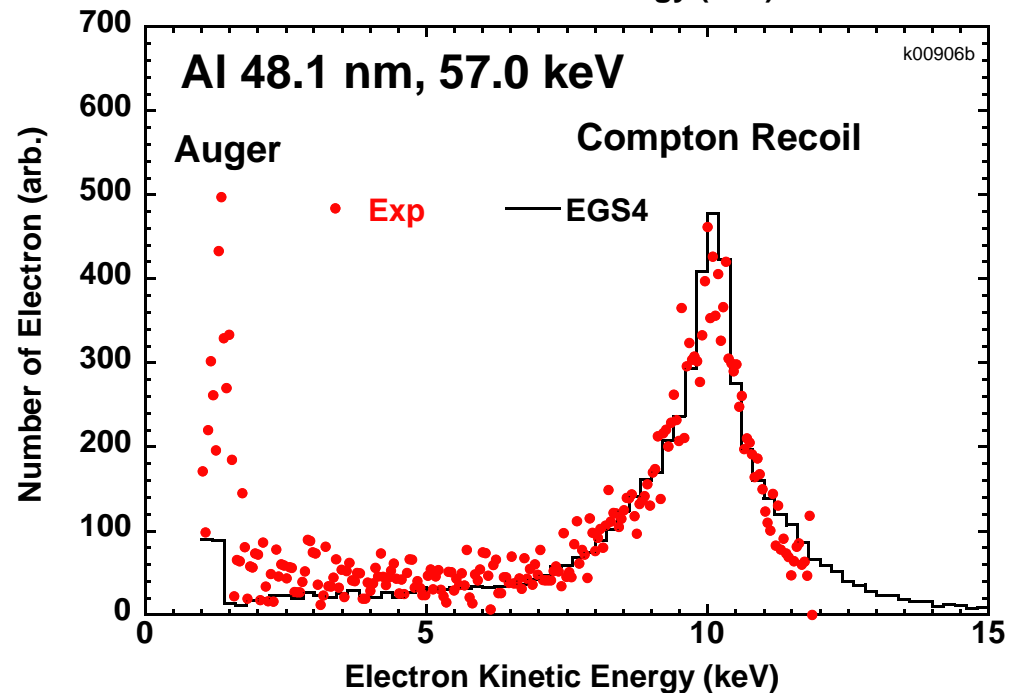
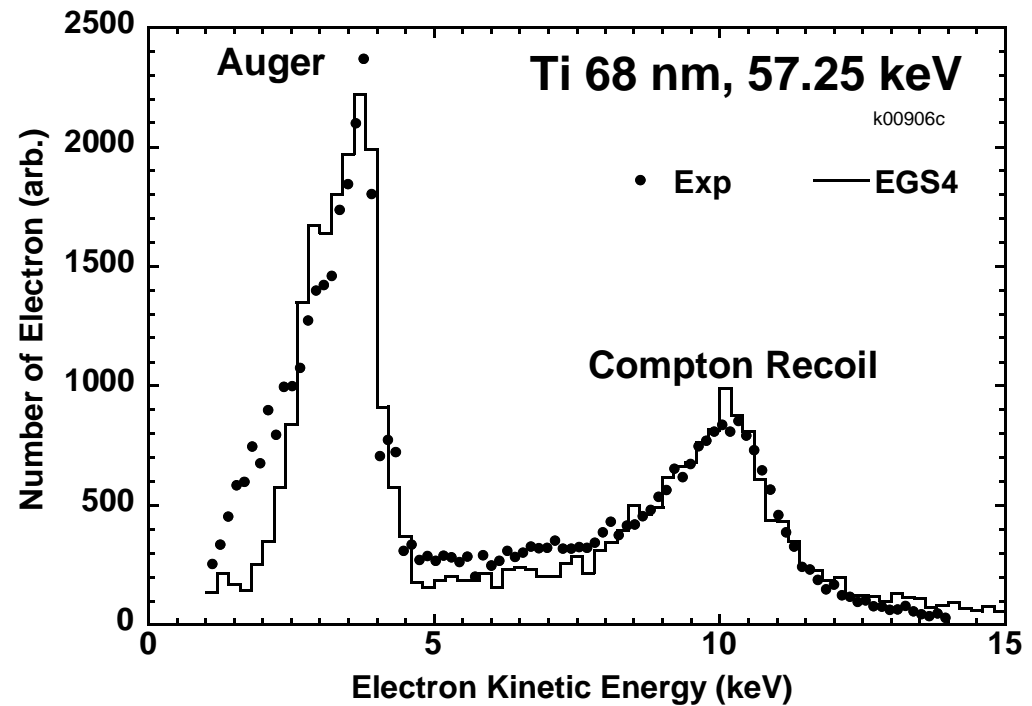
# M/C of L X ray intensity

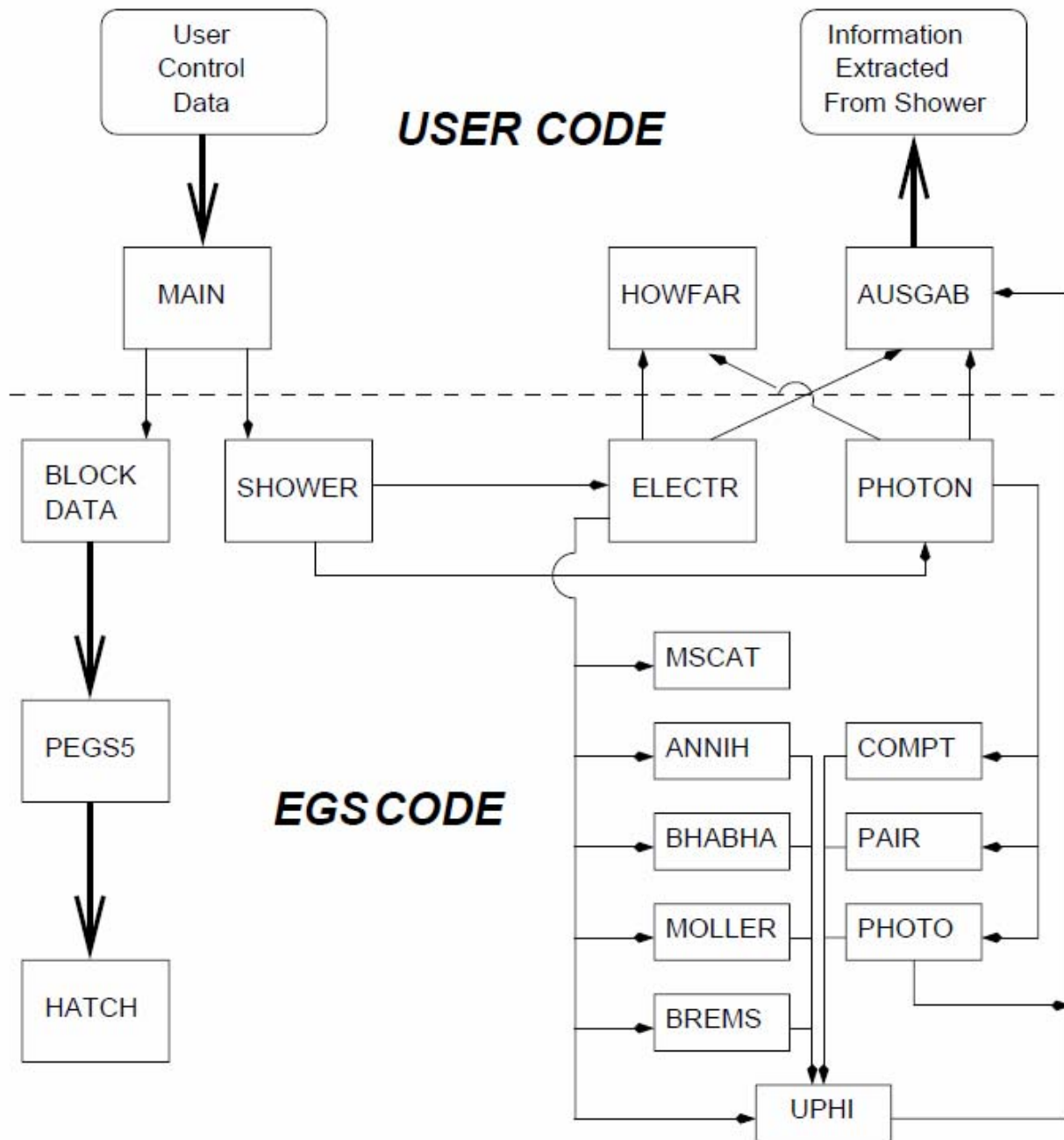


# Example of Auger electron spectrum



Guadala, Land & Price's exp





# デフォルトでは、AUSGAB がcall される条件

- 粒子が移動する場合 (IARG=0)
- 粒子が、PEGS5で設定したカットオフエネルギー(AE, AP)よりは高いが、EGS5で設定したカットオフエネルギー(ECUT,PCUT)以下になり追跡を終了する場合 (IARG=1, EGS cutoff)
- 粒子が、PEGS5で設定したカットオフエネルギー(AE, AP)以下になり追跡を終了する場合 (IARG=2, PEGS cutoff)
- ユーザーの設定(通常は、HOWFARで)により追跡を終了する場合 (IARG=3)
- 光電吸収が起きた場合 (IARG=4)
- IAUSFLフラグを設定することにより、どの様な反応の前後でAUSGABをcallすることができる。



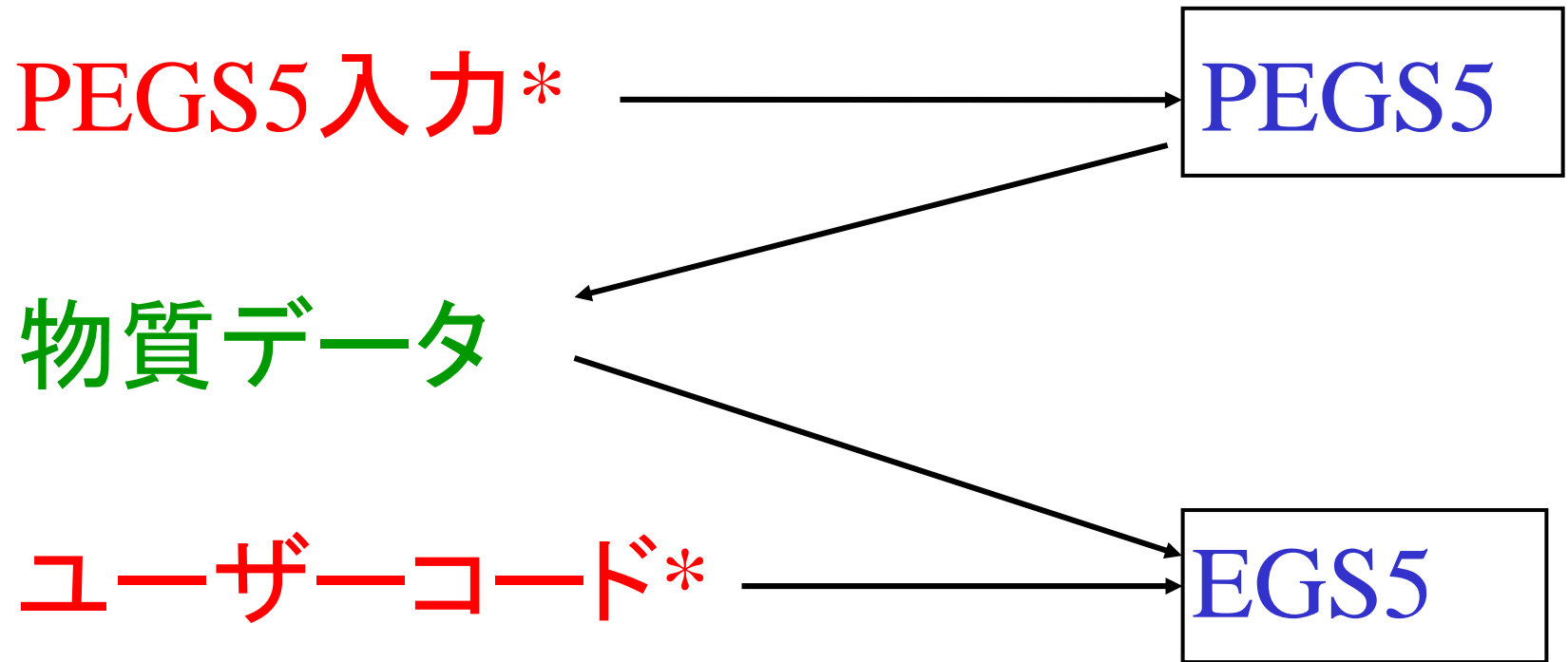
# egs5の反応オプション(リージョン毎に設定)

- iphter: 光電子の角度分布(0:off, 1:sampling)
- iedgfl: 特性X線(0:off, 1:発生)
- iauger: Auger 電子(0:off, 1:発生)
- iraylr: レイリー散乱(0:off, 1:含める)
- lpolar: 直線偏光(0:off, 1:扱う)
- incohr: 0:自由電子との散乱、1:束縛電子との散乱
- iprofr: コンプトンプロファイル(0:off, 1:扱う)
- impacr: EII(0:off, 1:含める)
- ibrdst: 制動輻射の発生角度(0:デフォルト値, 1:サンプリング)
- iprdst: 電子対生成の発生角度(0:デフォルト値, 1:サンプリング)

# Pegsの扱い

- EGS4では、PEGS4で事前に物質データを作成し、その結果をEGS4で使用するのを標準としていた。
- egs5では、pegs5をサブルーティンの一つとして扱い、egs5に実行時に物質データを計算して使用するのを標準とした。
  - 問題に応じたpegs5の条件設定が容易
  - pegs5の入力データをegs5の入力データの一つとしてユーザーコードとペアで使用することから、対応が判りやすい

# PEGS5とEGS5



\* egs5runで指定

# カスケードの追跡法

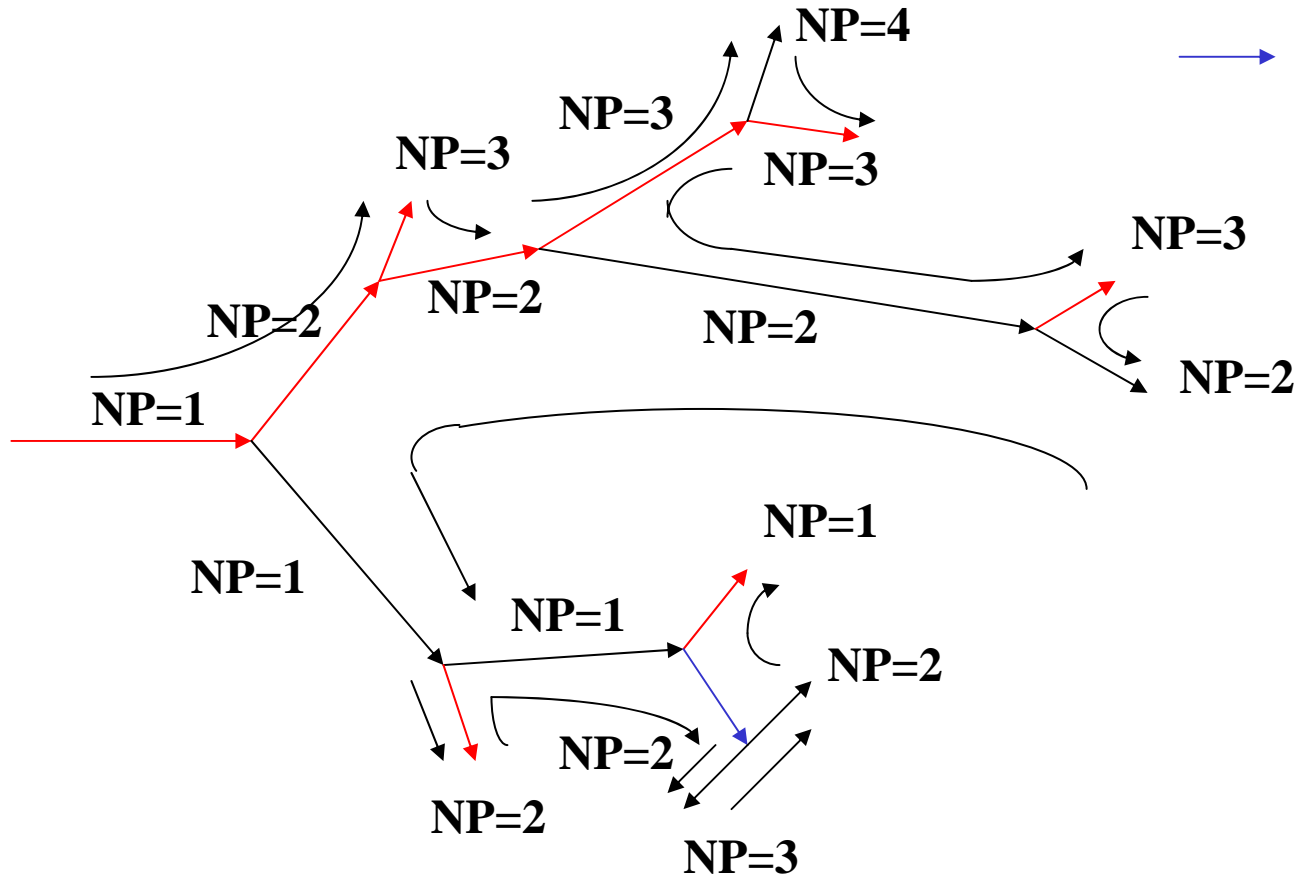
- 電磁相互作用では、反応毎に粒子の数が2倍になる。
- EGS5では、スタック番号NPを使用して以下のように粒子を追跡している。
  - 線源粒子のスタック番号NPを1とする。
  - 相互作用後、全エネルギーの小さい粒子に、スタック番号NP+1を、高い方の粒子にスタック番号NPを割り当てる
  - スタック番号の大きい粒子(NP+1)を先に追跡する
  - 粒子の追跡が終了すると、直前のスタック番号が1小さい粒子(NP-1)を次に追跡する
  - スタック番号 NP=1の粒子の追跡が終了すると、ヒストリーの終了とする。

NP:Stack number

→ Electron

→ Photon

→ Positron

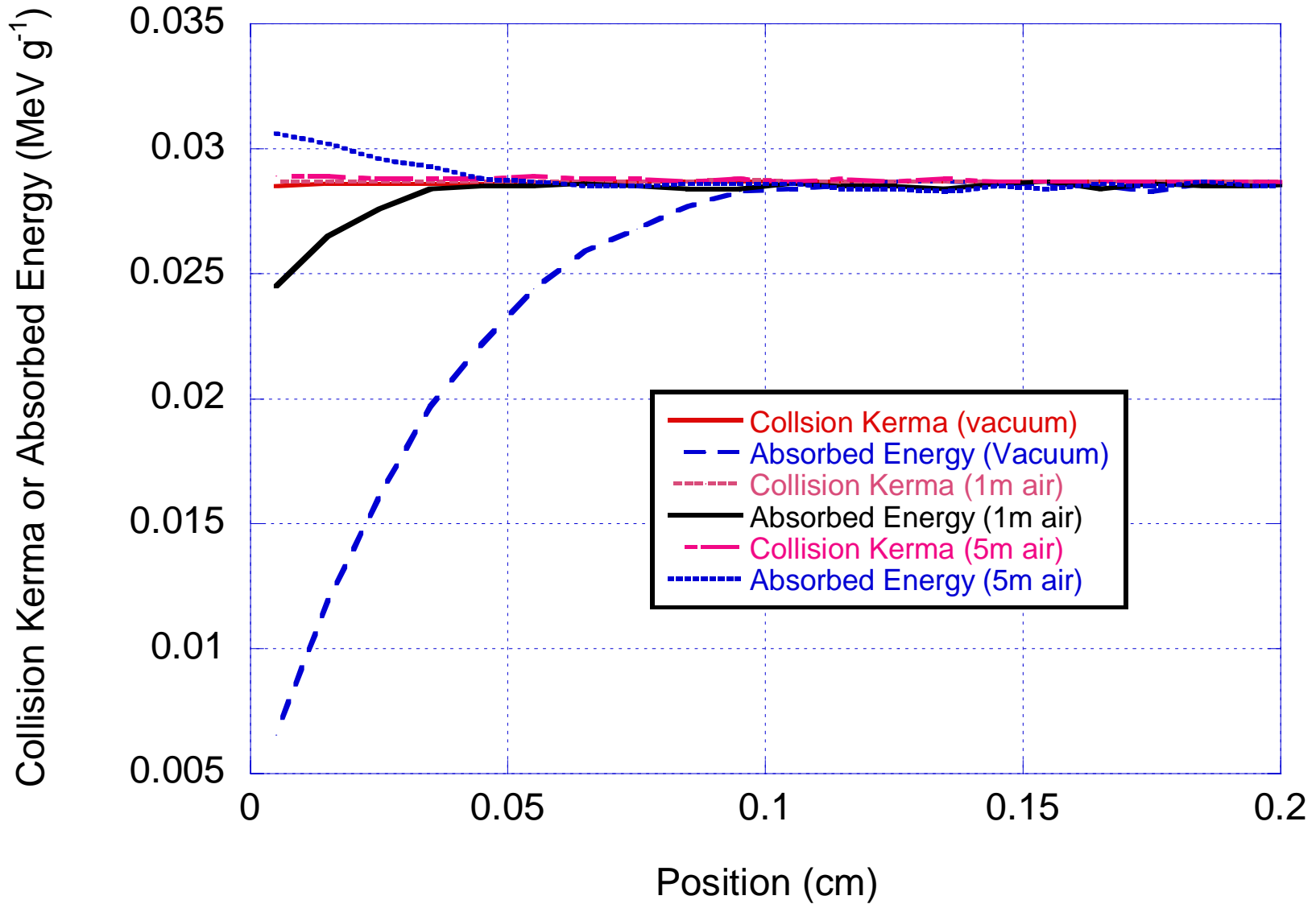


EGS5におけるカスケードの追跡

# EGS5の応用

- 電子、陽電子、光子に関する計算であれば、どの様な問題にも応用できる
- どの様な量を求めたいのかを明確にして、参考となるユーザーコードから、自分の課題のためのユーザーコードを作成して使用
  - 線源や体系の標準化は可能であるが、計算で求める量は、個々に異なる
  - モデル化を検討することも重要
- 計算結果を検証する姿勢が重要
  - モンテカルロ計算は、パラメータ等を間違っても「答え」が出る場合が多い
  - はじめて試みる計算では、できるだけ「条件が明確で、自分の目的とする計算に近い実測値(あるいは、自分で測定をした結果)との比較を行い、計算を検証することが必要

# Inside Aluminum, 1MeV $\gamma$ -ray



1MeVの平行ガンマ線によるアルミニウム中での  
衝突カーマと吸収エネルギーの比較(EGS4による計算結果)

# 応答特性計算の結果を解釈する上での 留意点(1)

- 応答計算で得られる結果(多くの場合、検出器中での吸収エネルギー分布)と実際の信号との間には、様々な物理現象が介在しており、多くの場合、エネルギーや強度が既知の線源による校正を介した相対的な比較となる。
- ガンマ線の情報による応答計算を使用する場合(エネルギーフルエンスと質量エネルギー吸収係数から吸収エネルギーを計算する場合)には、使用の前提となっている条件が、適用可能かどうかの判断が必要である。



# 応答特性計算の結果を解釈する上での 留意点(2)

- 電子の輸送を考慮した応答計算では、線源容器や途中の空気中で発生する荷電粒子の影響について調べておく必要がある。
- 実測で得られる信号は、センサーである検出器部分だけでなく、信号の増倍系等を含んだものであるが、センサーとしての特性と、回路計まで含めた特性とは区別して考える必要がある。様々な検出器の吸収エネルギーや検出感度等の特性を比較検討する場合には、基本的にセンサーとしての検出器部分の特性について行うべきである。
  - 高エネルギーX線CT用の検出器の検討において、シンチレーション検出器の場合に、使用する光ダイオードの変換効率を含めて、検出器中での吸収エネルギーが論じられている場合があるが、吸収エネルギーの様なセンサーとしての検出器と特性比較と、システムとしての特性は分けて検討する必要がある。