

第3回EGSワークショップ in 関西
大阪大学銀杏会館3F 大会議室(2009年10月3日)

EGS5コードで扱う電子・光子と 物質との相互作用

KEK 波戸芳仁・平山英夫

Last modified on 2009.9.24

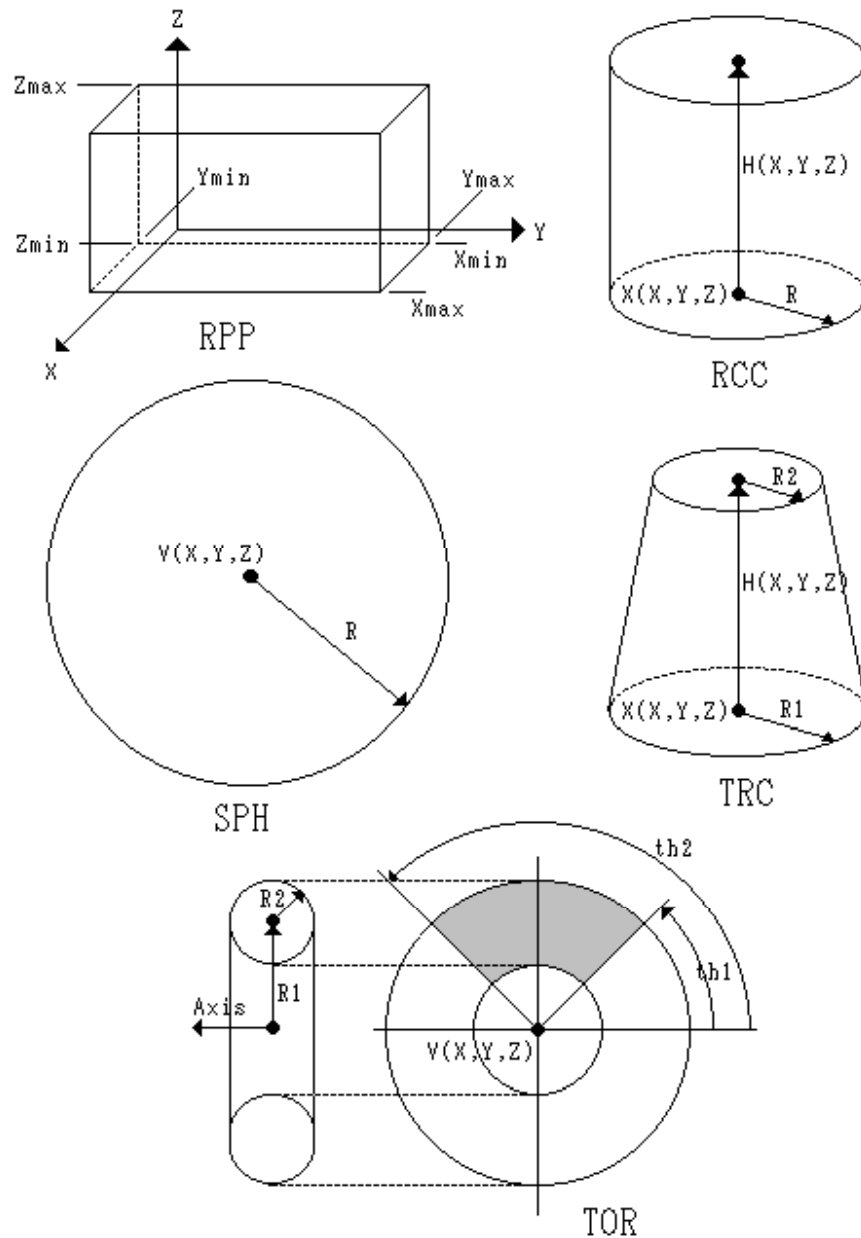
EGS システムの歴史

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
2006	EGS5(SLAC-R-730 and KEK Report 2005-8)	Fortran	Hirayama, Namito, Bielajew, Wilderman and Nelson

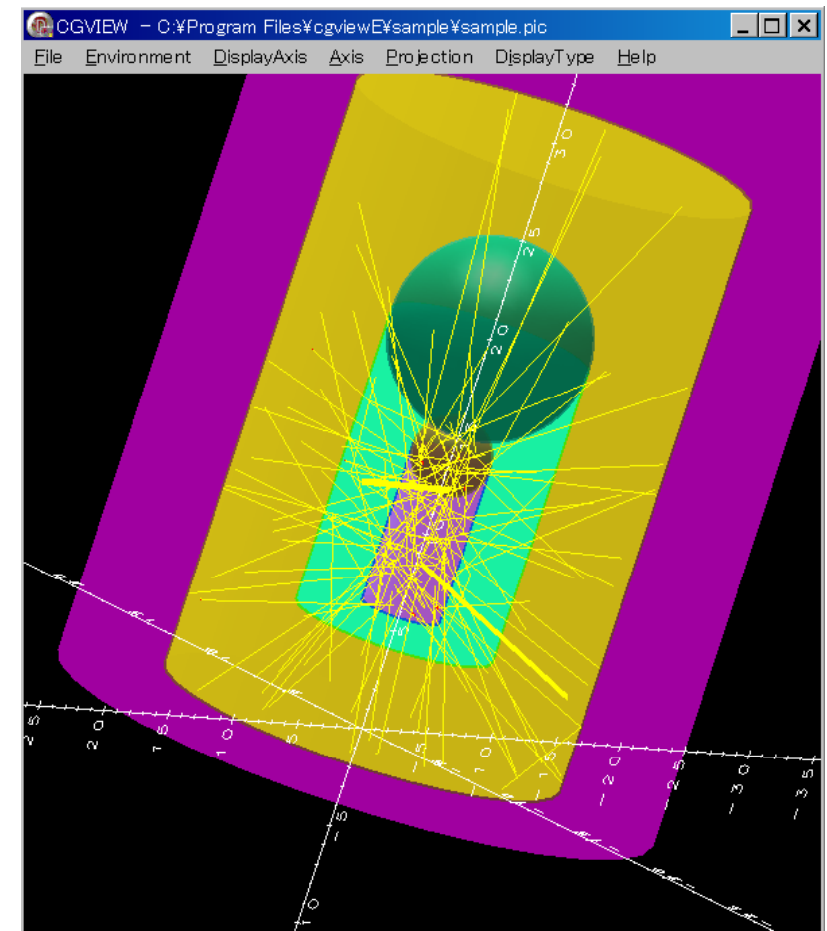
EGSについて

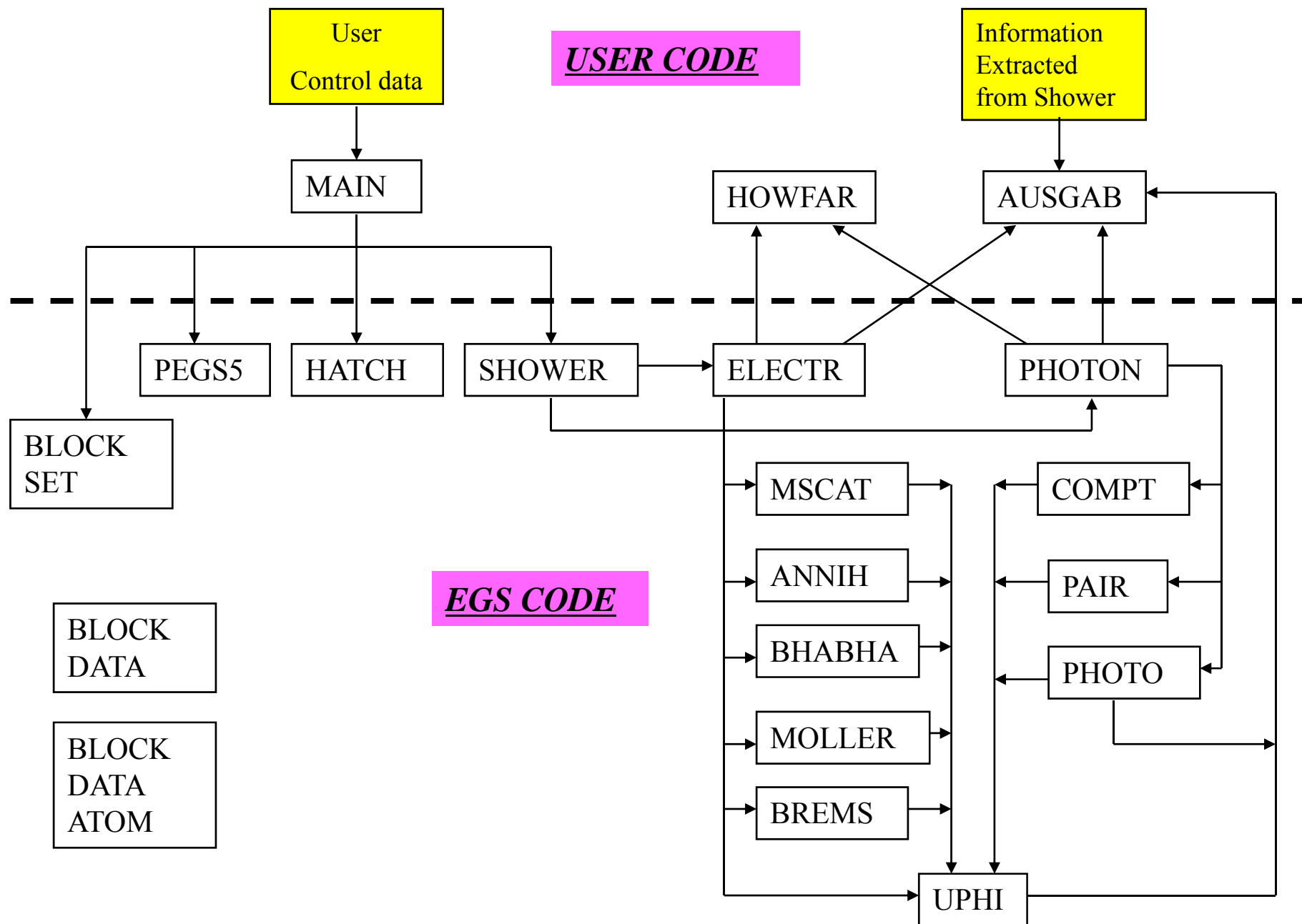
- モンテカルロ粒子輸送シミュレーションコード
- 電子・光子と物質との相互作用
- エネルギー範囲: $10^3\text{eV} - 10^{12}\text{eV}$.
- EGS5: 2006年公開. 著者: Hirayama, Namito, Bielajew, Wilderman, and Nelson.
- プラットホーム: Linux, Cygwin と Windows-PC.
- 組合せジオメトリー (CG) を使用可能
 - ジオメトリーチェックプログラム(CGVIEW) を使用可能.
 - ジオメトリーの準備と他の計算準備を分離
- 電磁場中での電子の輸送

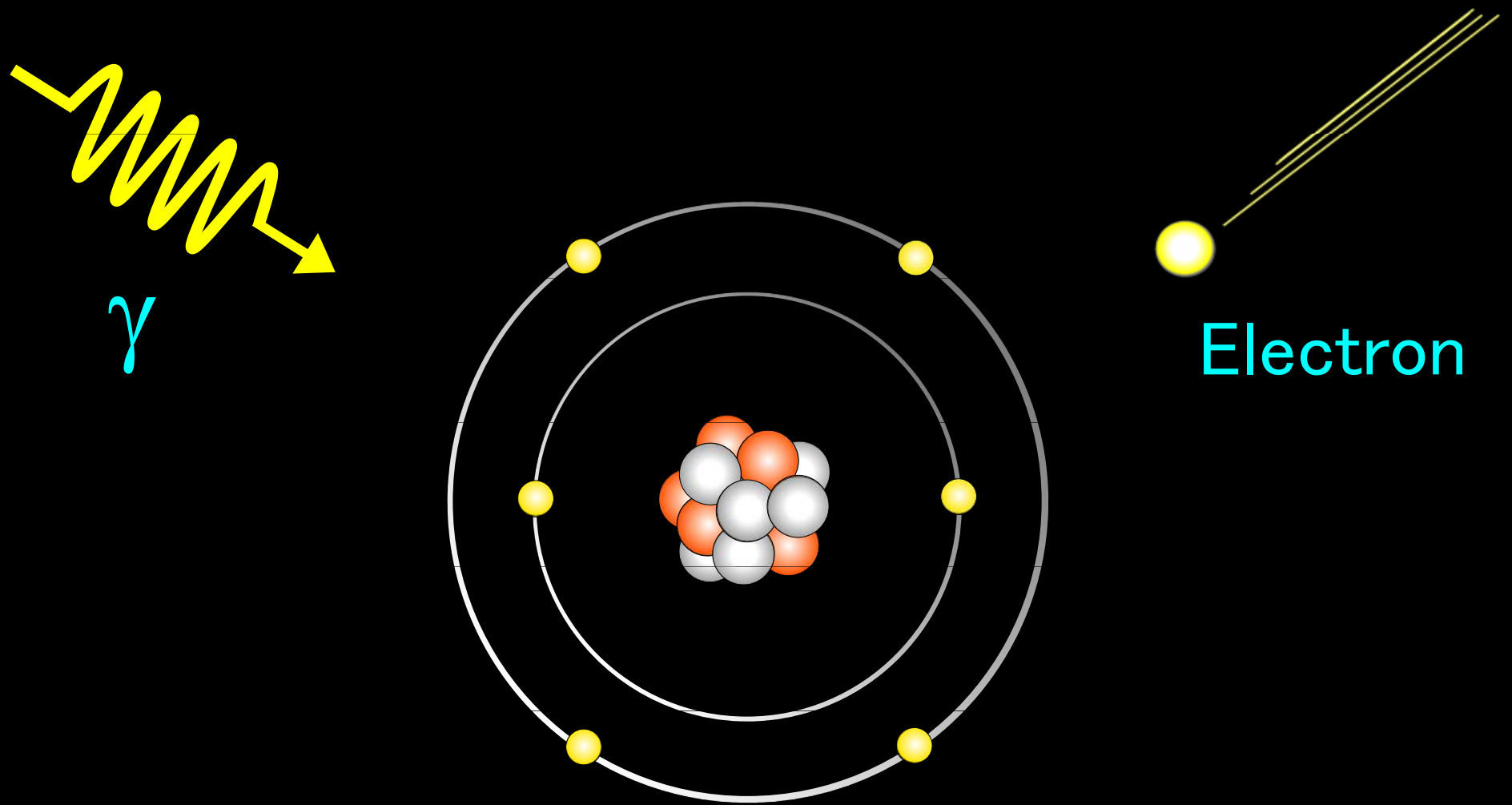
組合せジオメトリー CG



1. 変数を用いて BODY を指定
2. Bodyの演算(AND, OR, OUTSIDE)を用いてZONEを指定
3. ZONEに対して物質を指定



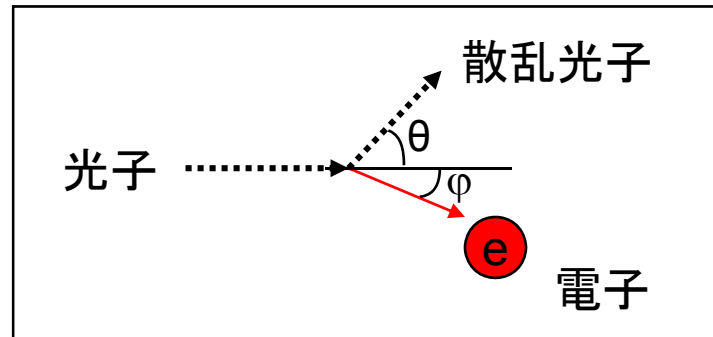




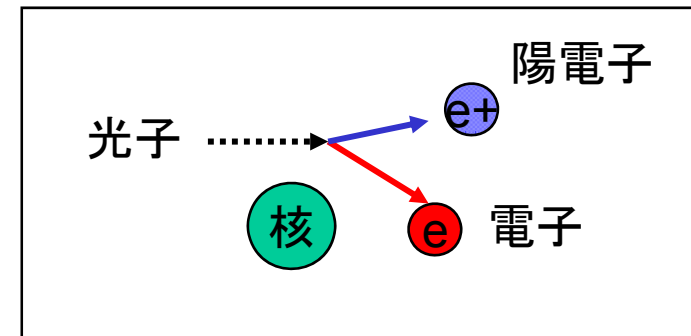
光子および電子と相互作用するものは何か？
単一の原子？電子？原子核？

光子モンテカルロシミュレーション

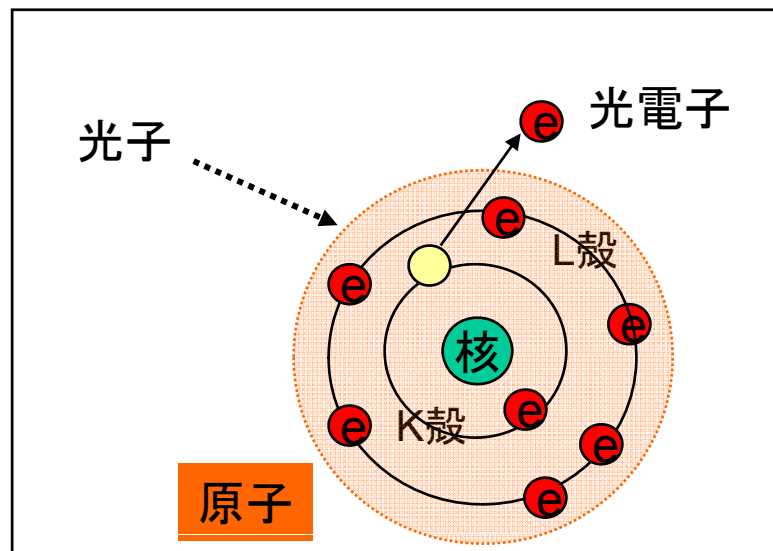
ガンマ線と電子・原子核・原子との反応



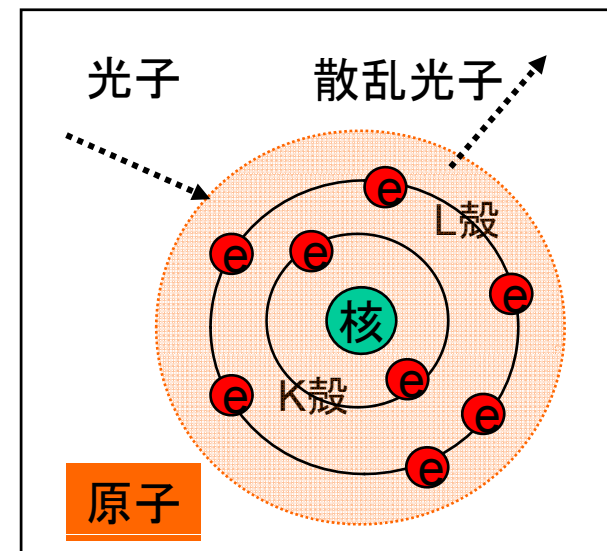
コンプトン散乱



電子対生成

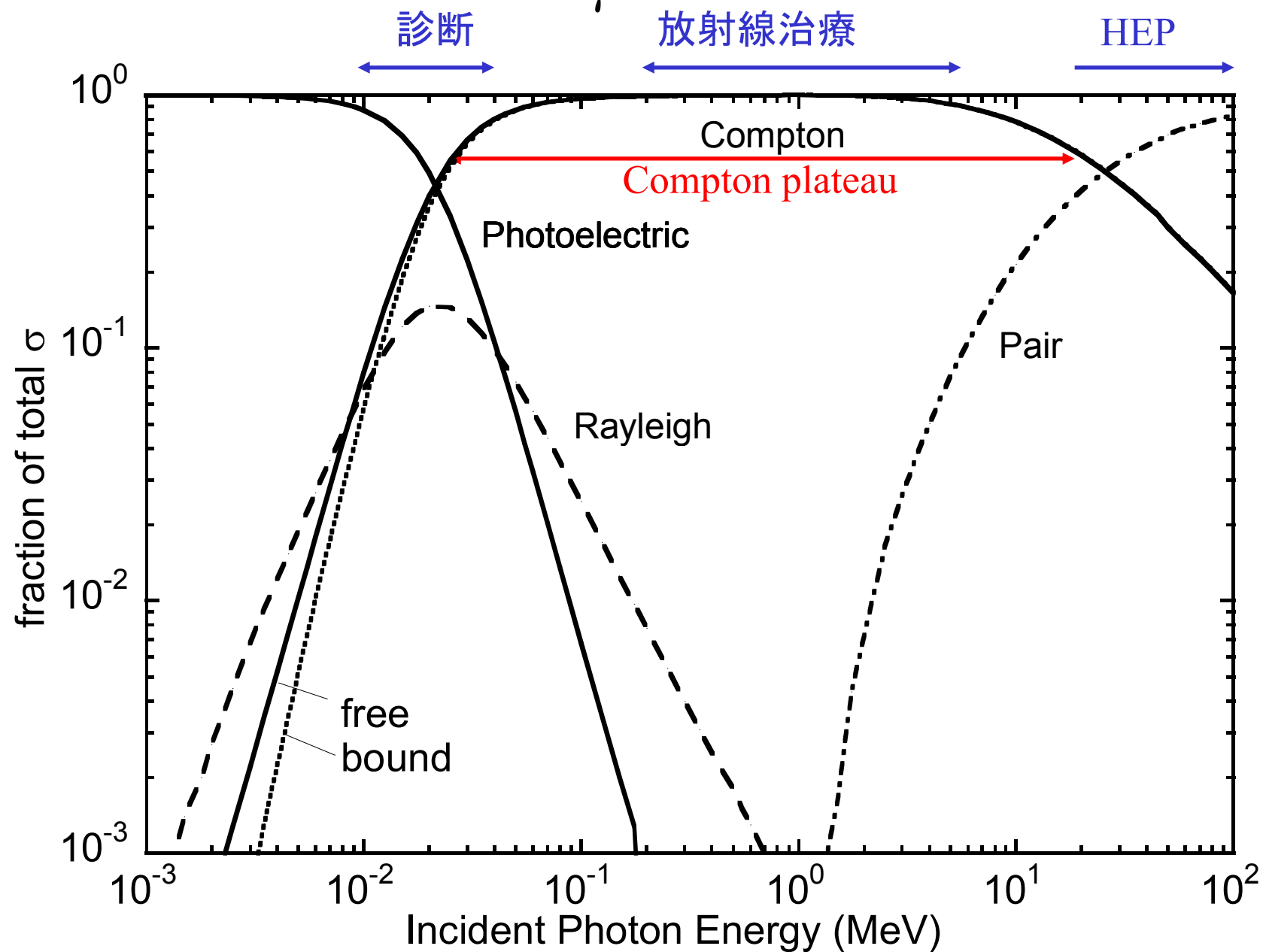


光電効果

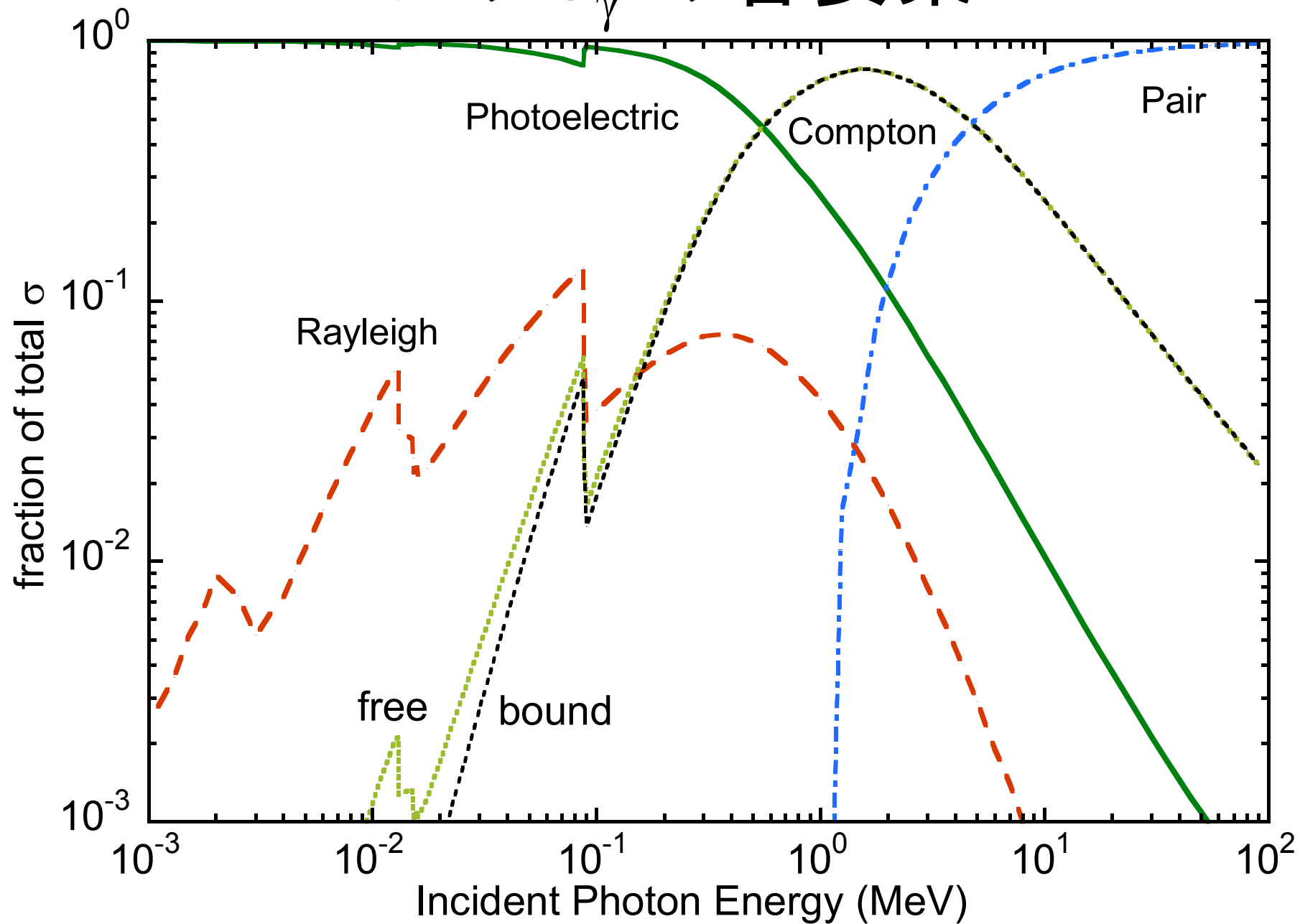


レイリー散乱

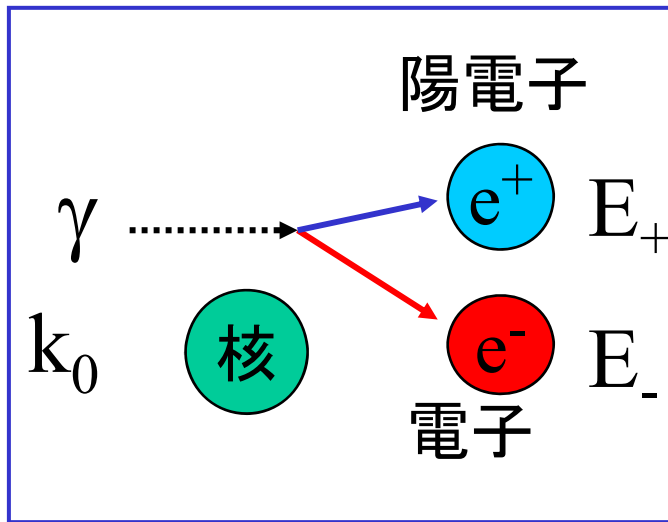
C の σ_γ の各要素



Pb の σ_γ の各要素



対生成



$$k_0 = E_+ + E_-$$

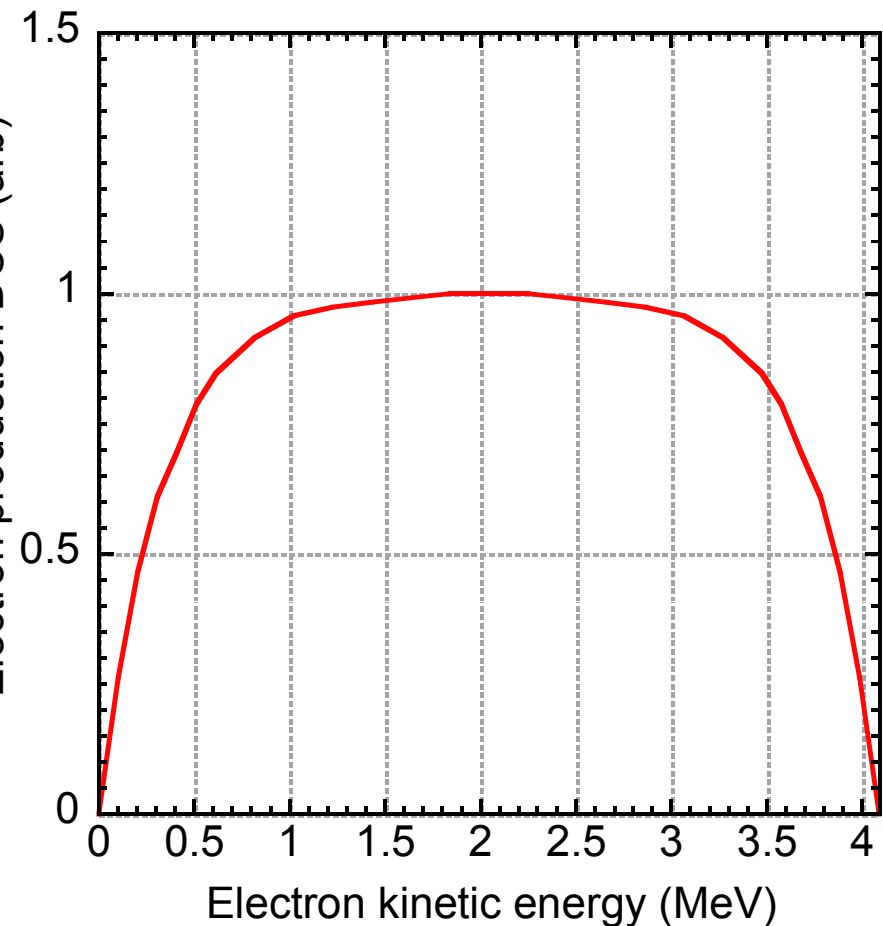
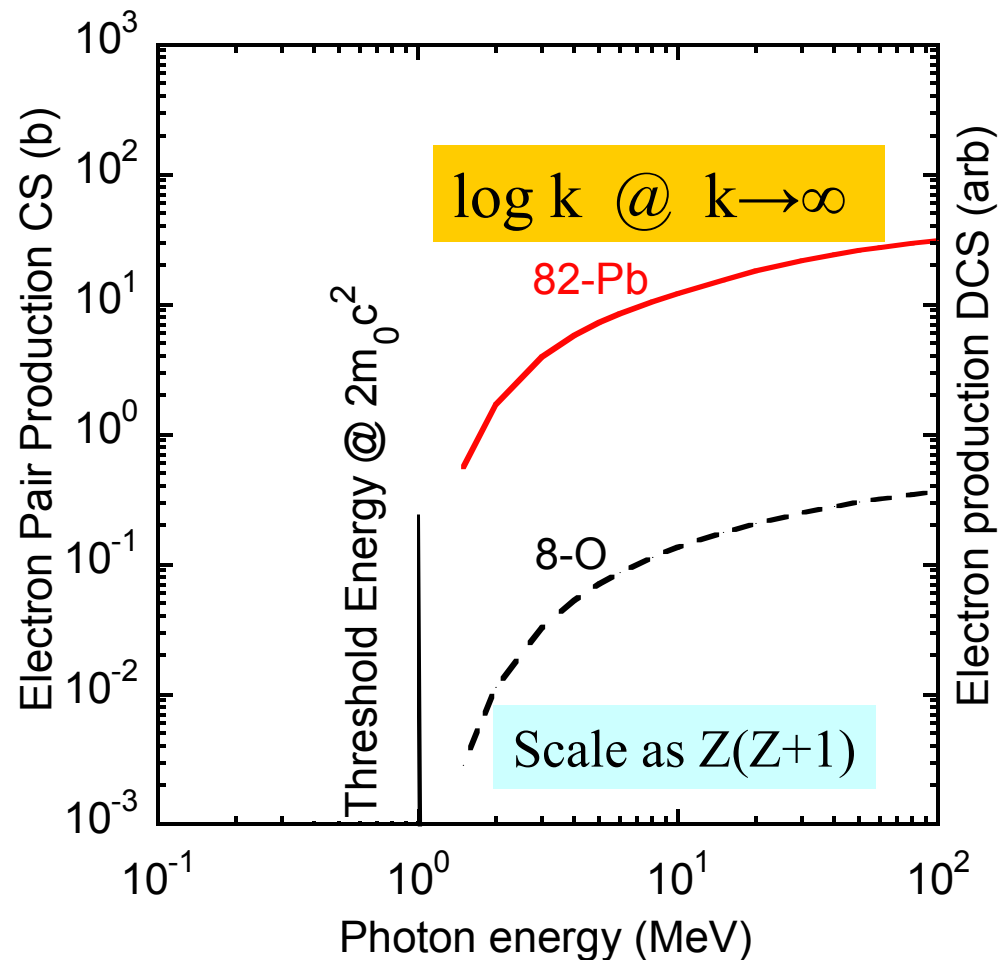
略図

- 原子核の場での相互作用
- 消滅と $e^+ - e^-$ 対の生成
- 3重対分布は無視 (全 σ_{pair} で考慮)
- PHOTX CS
- デフォルト $\theta = m_0 c^2 / k_0$
- 現実的な角度分布: オプション

対生成(続き)

電子-陽電子対生成断面積

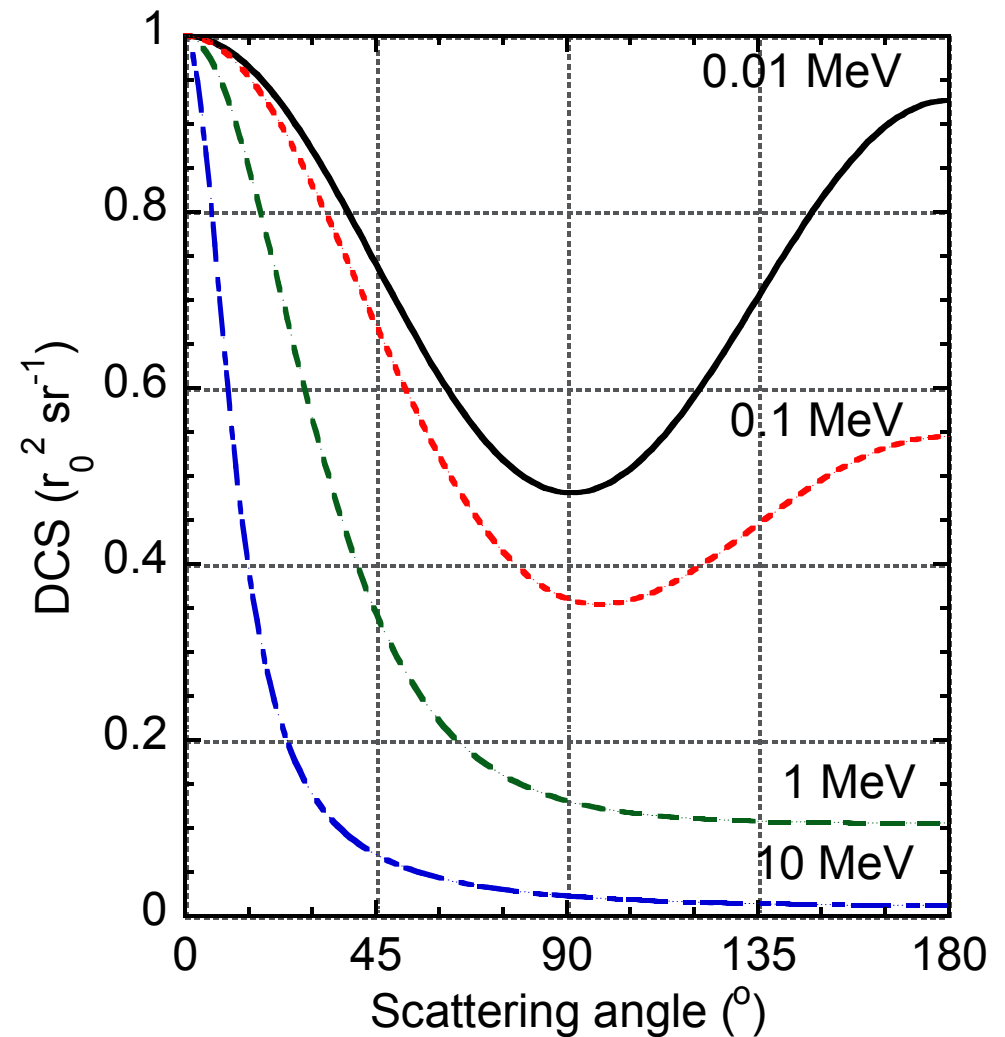
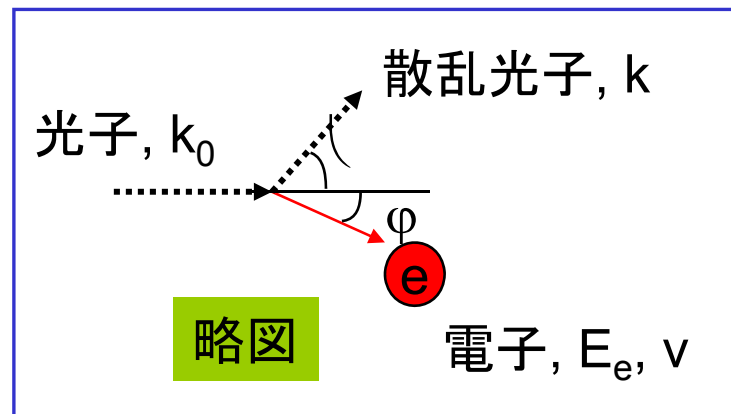
5.11 MeV γ の対生成での
電子エネルギー分布



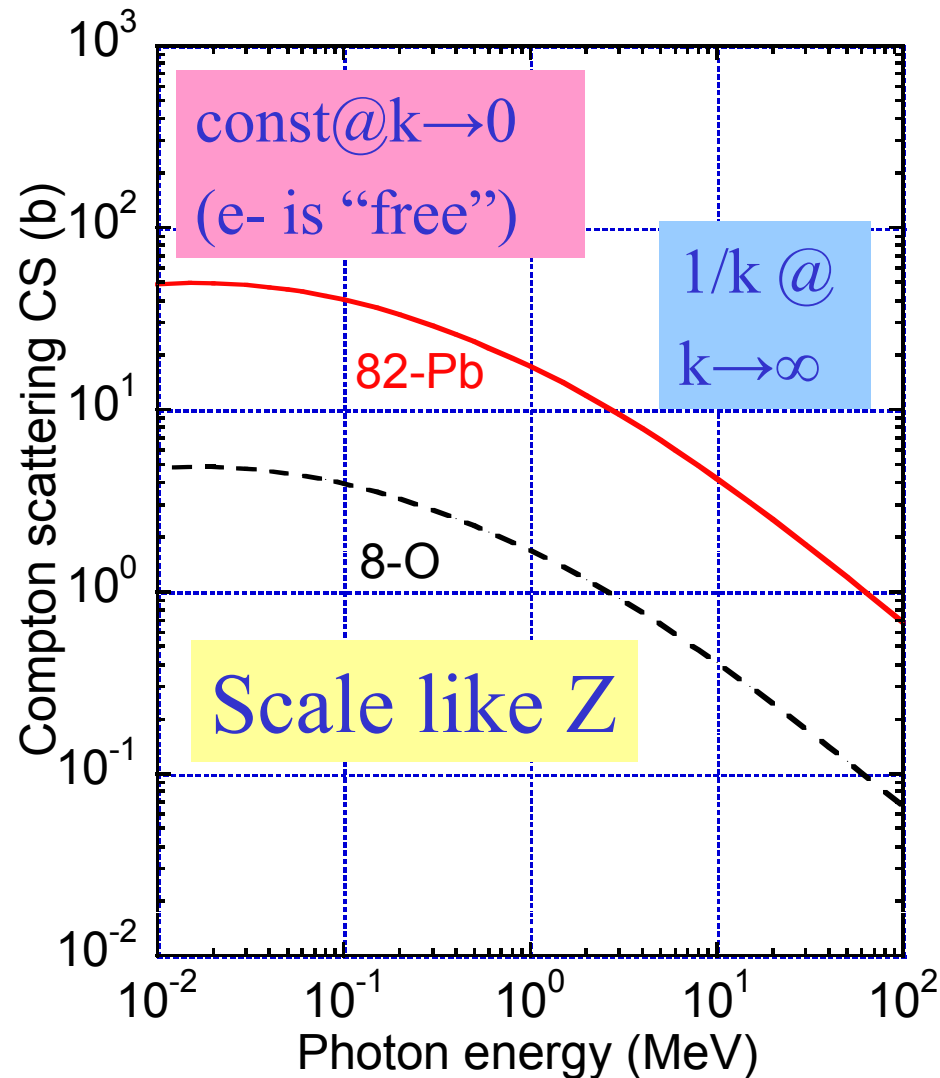
コンプトン散乱

クライン-仁科 $d\sigma$

$$k_0 + m_e = k + E_e$$



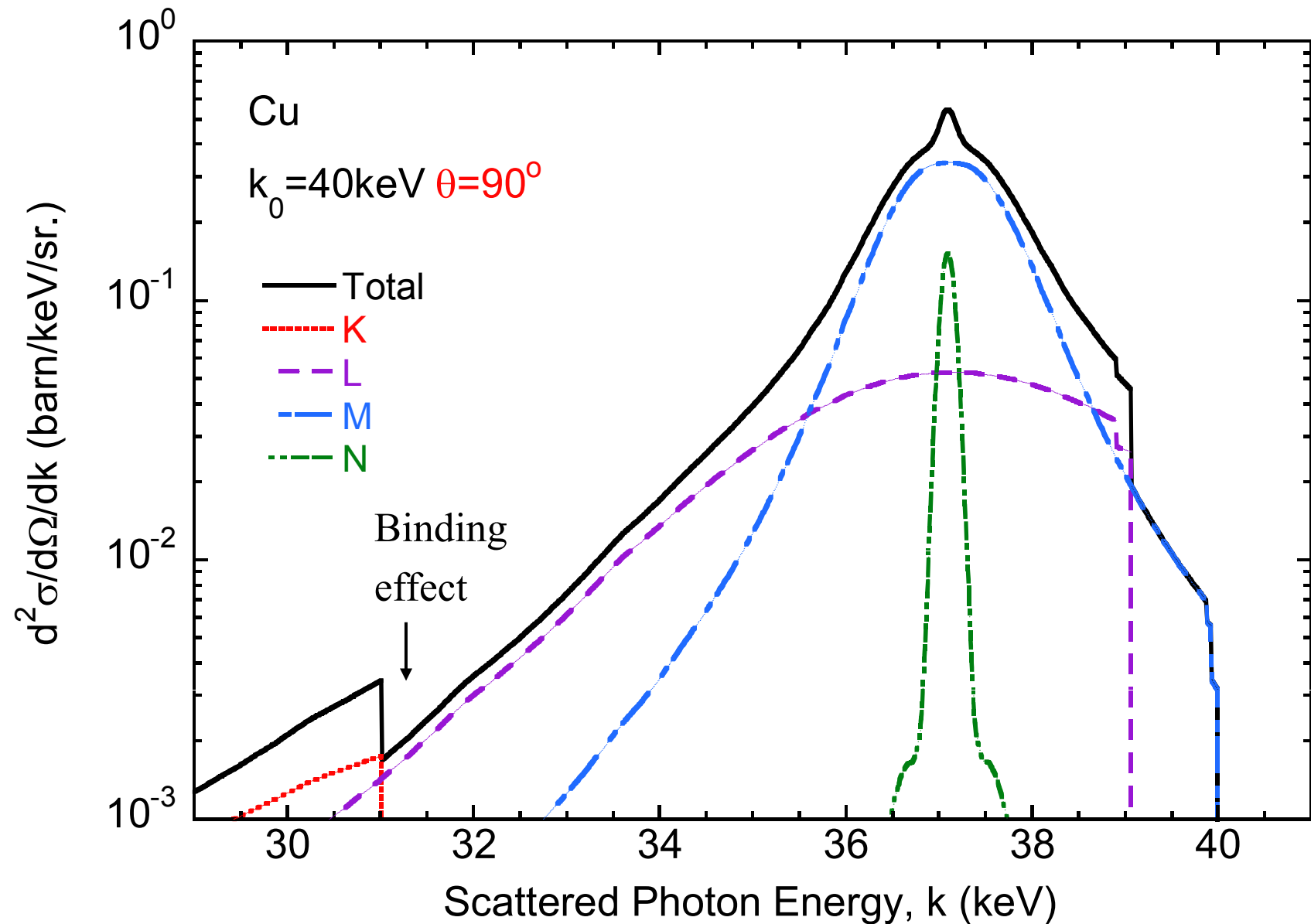
コンプトン散乱(続き')



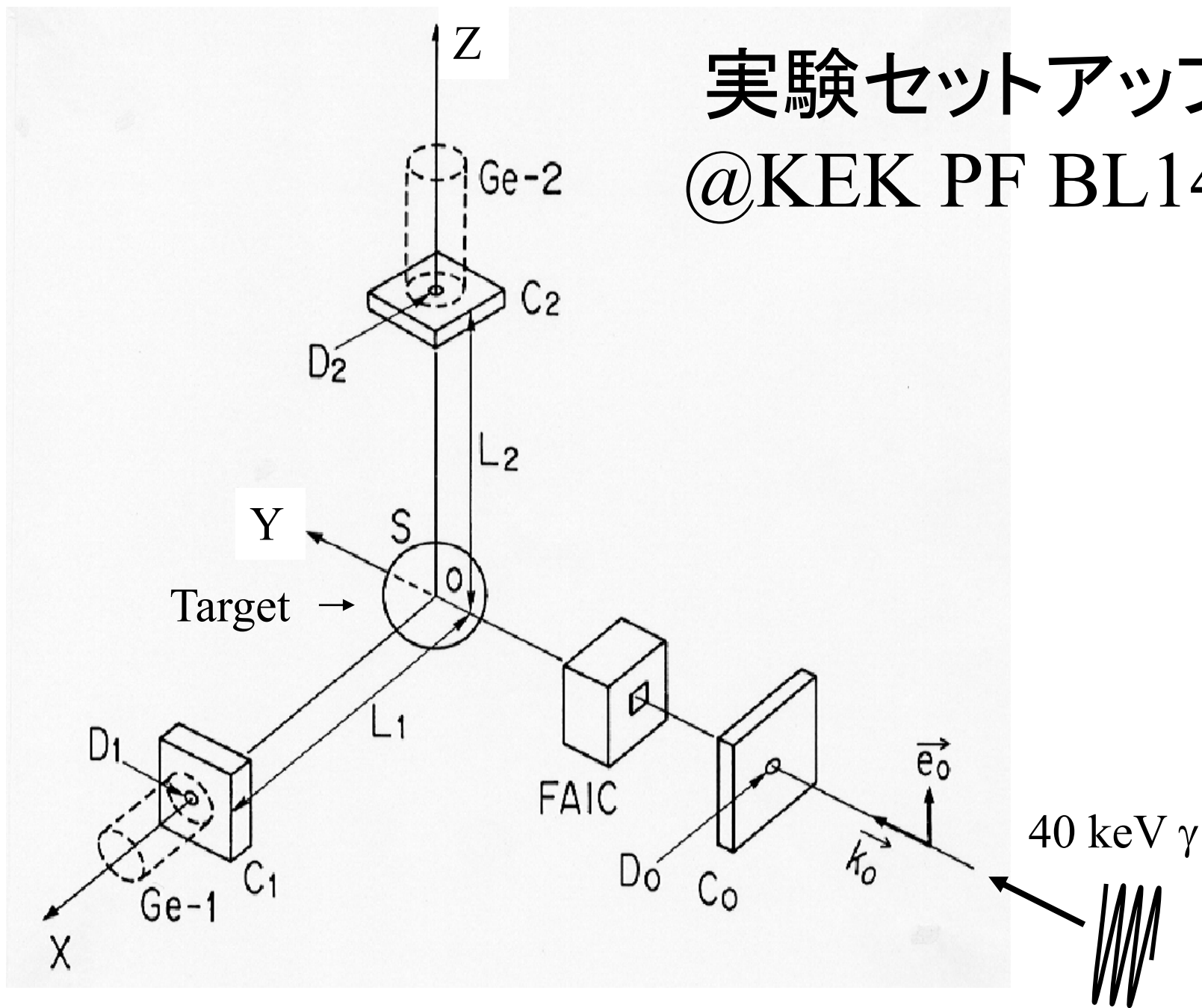
Optional treatment in egs5

- 束縛効果 (0 @ $k \rightarrow 0$)
- ドップラー広がり
 - e^- の衝突前の運動に起因
- 直線偏光光子散乱

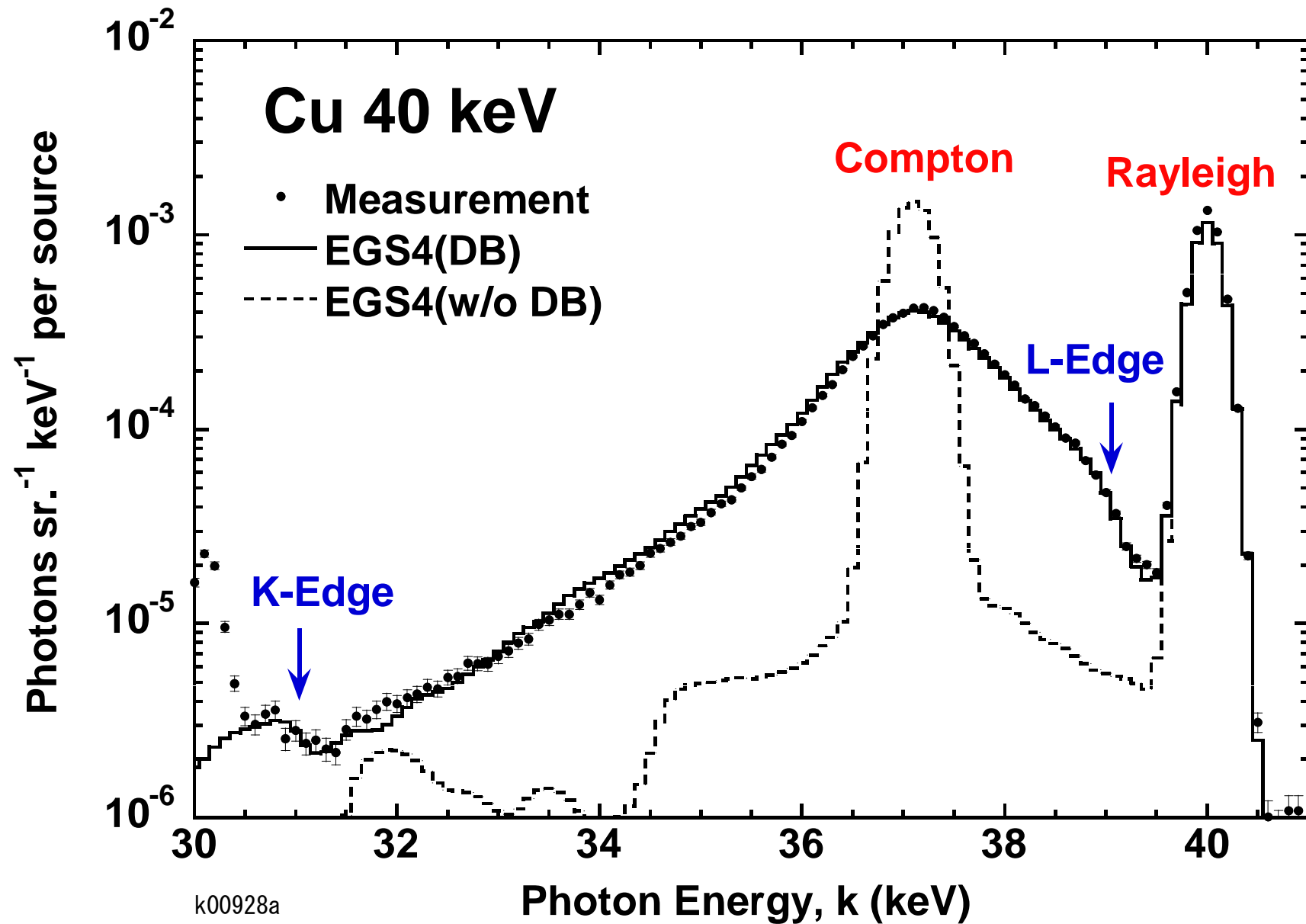
二重微分コンプトン散乱断面積



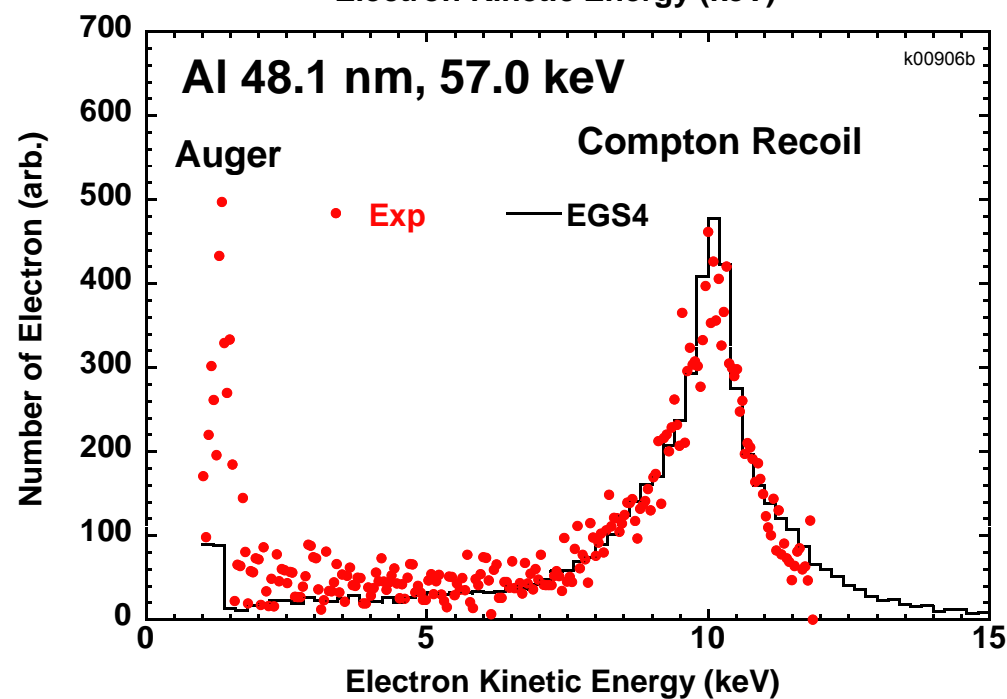
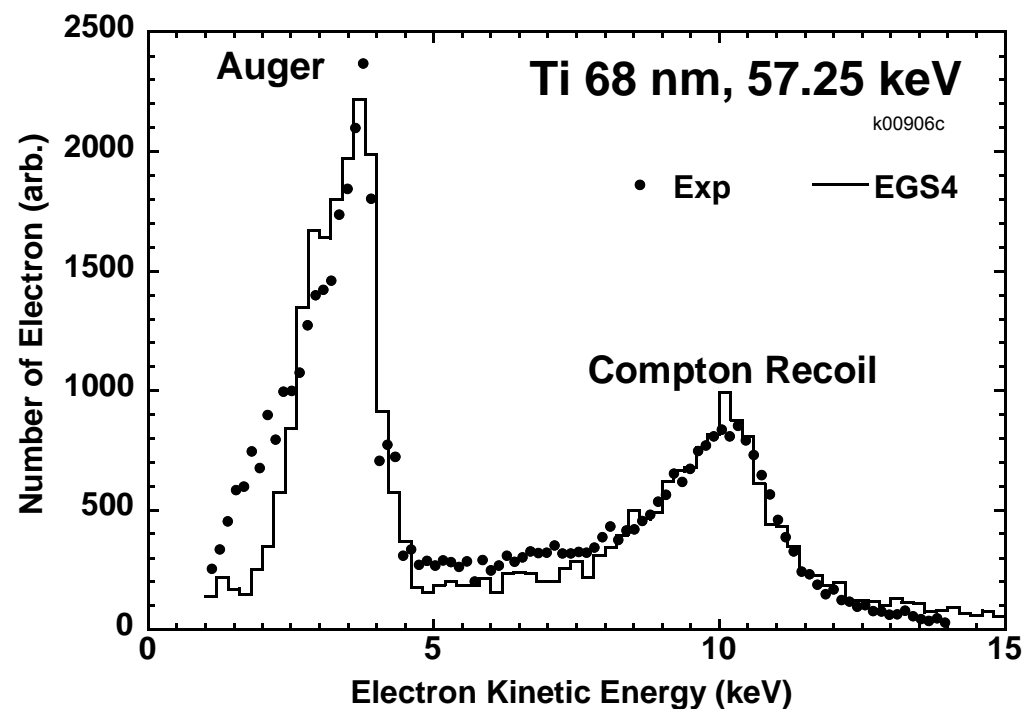
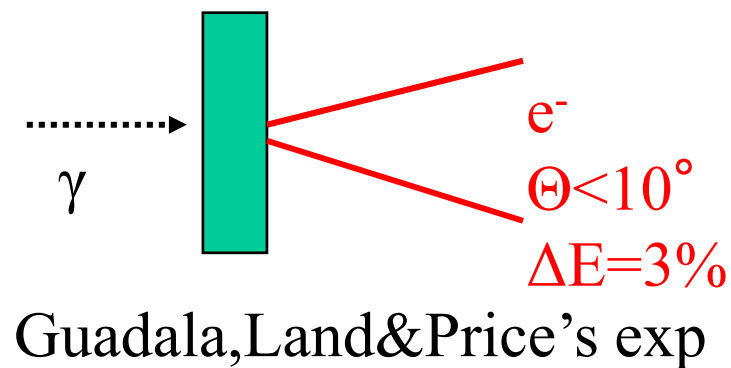
実験セットアップ @KEK PF BL14c



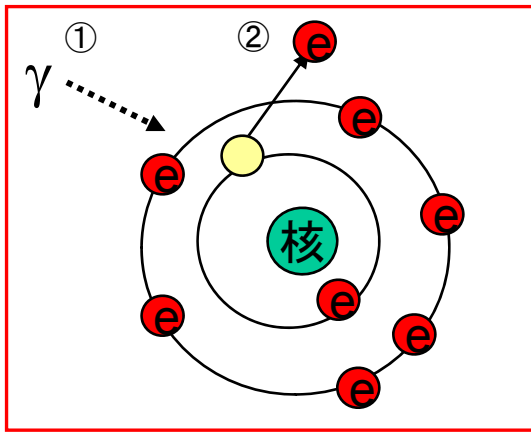
Cu, 40 keV (EGS4+LP+DB=EGS5)



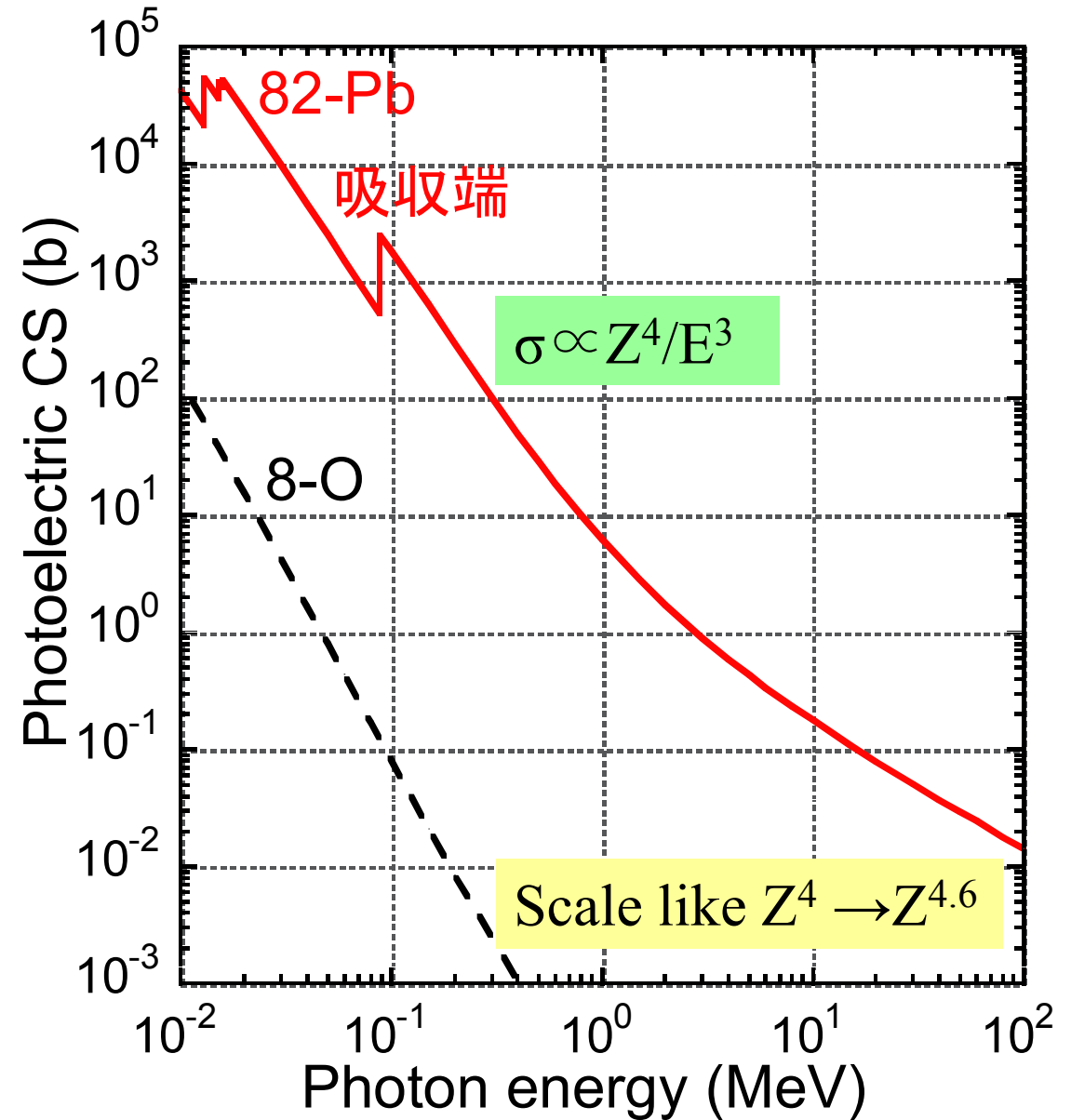
オージェ電子 スペクトルの例



光電効果

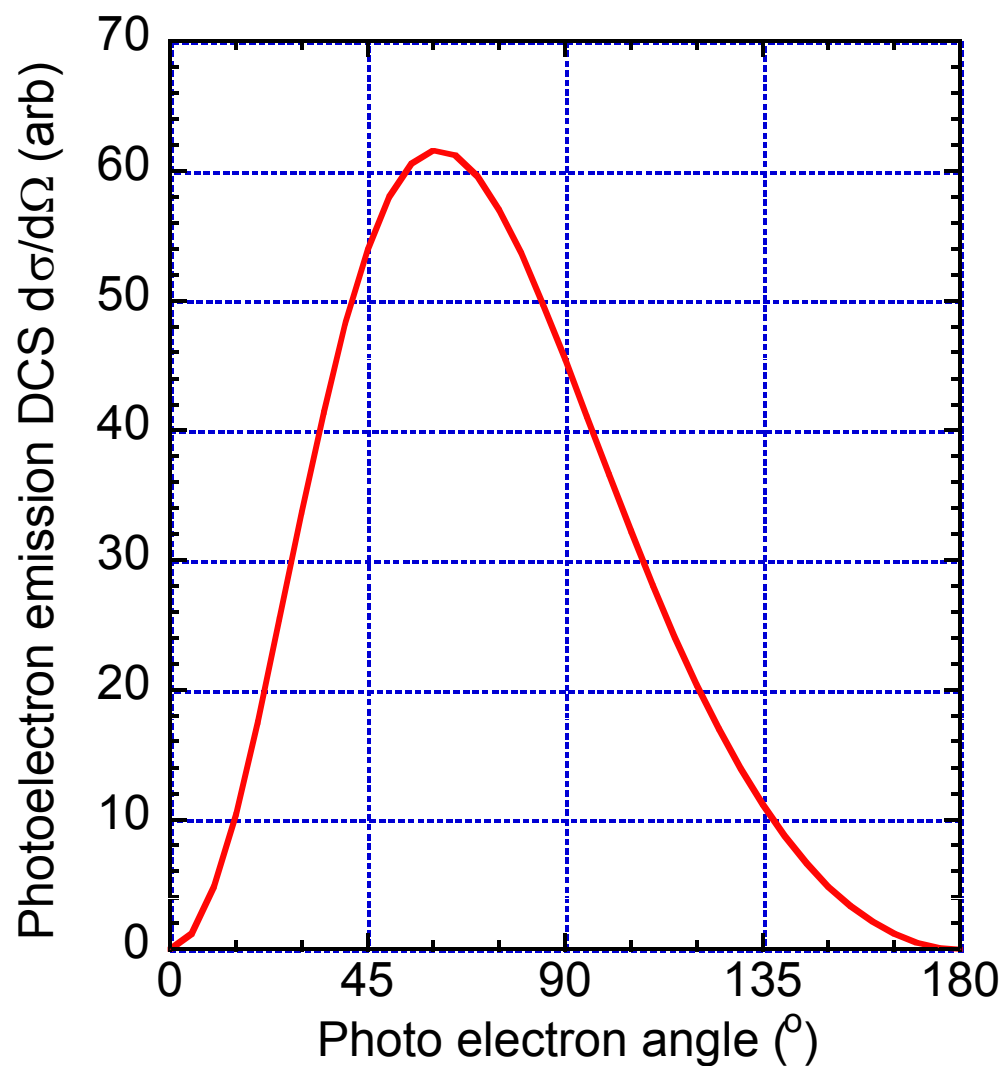


$$k_0 + E_N = E_- + E_N^*$$



光電効果 (続き)

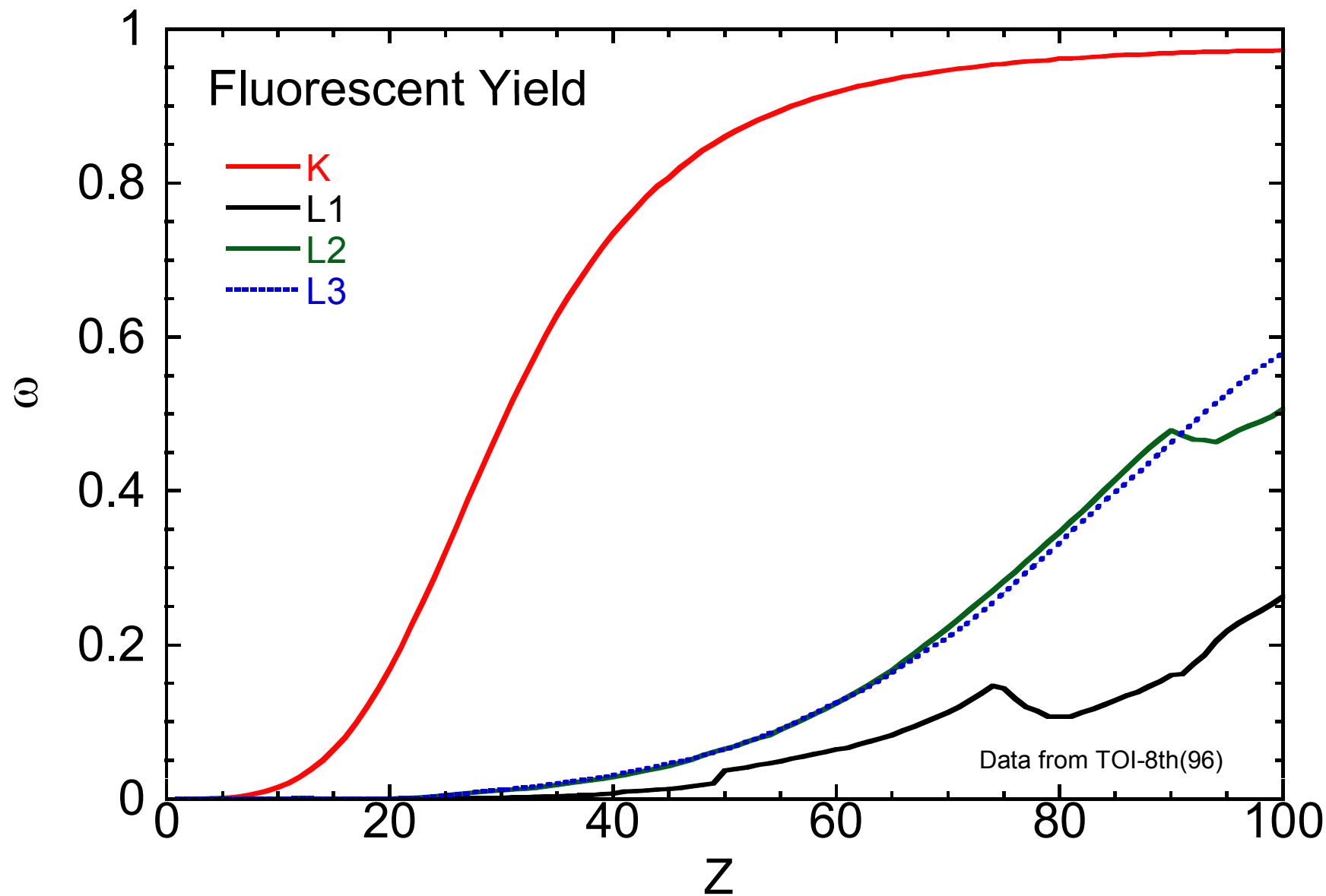
$\theta=0!$ (より詳しい角度分布: オプション)



入射エネルギー: 20 keV

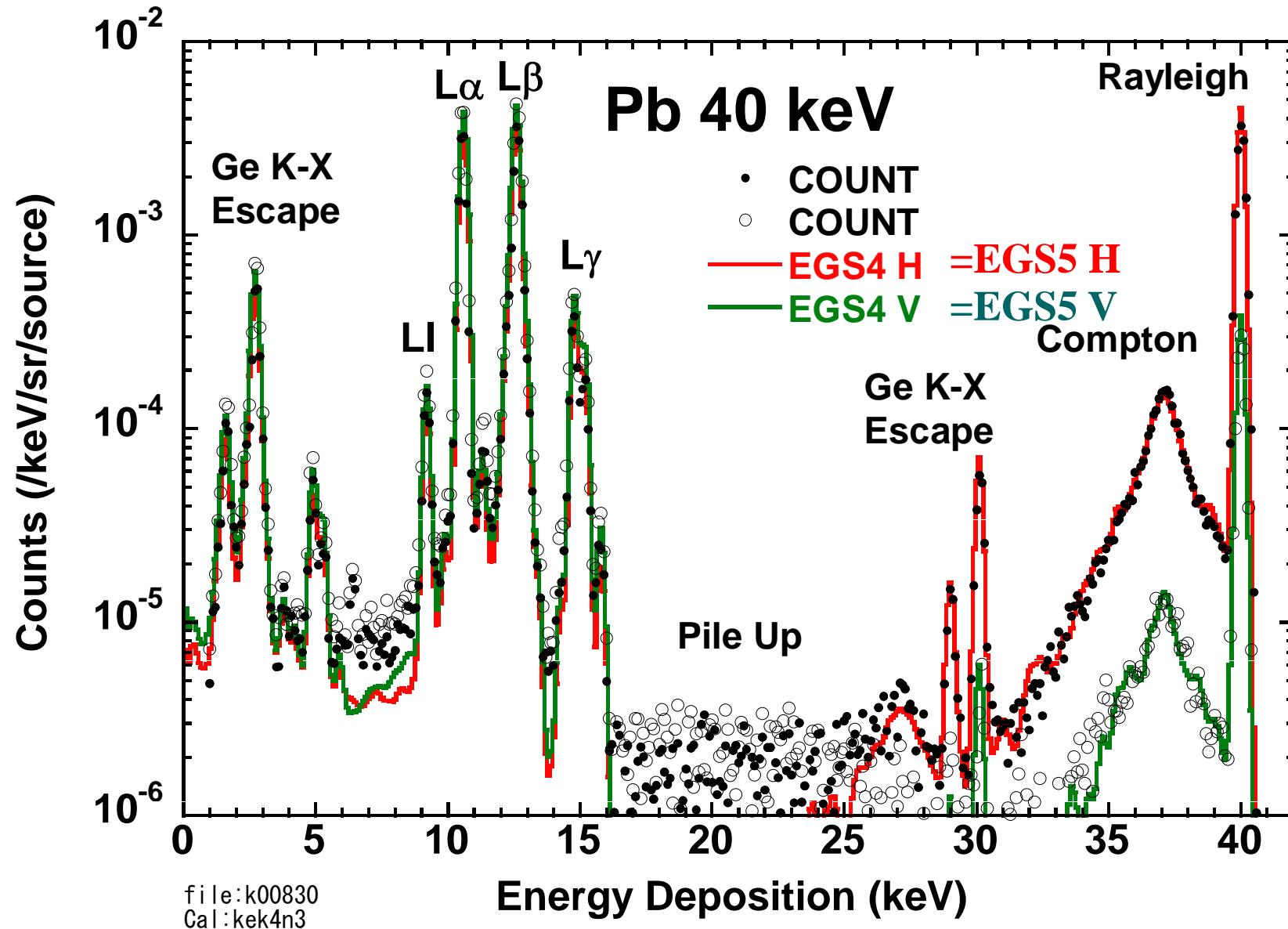
電離した原子の緩和 (egs5でのオプション)

- K殻とL殻からの蛍光X線とオージェ電子



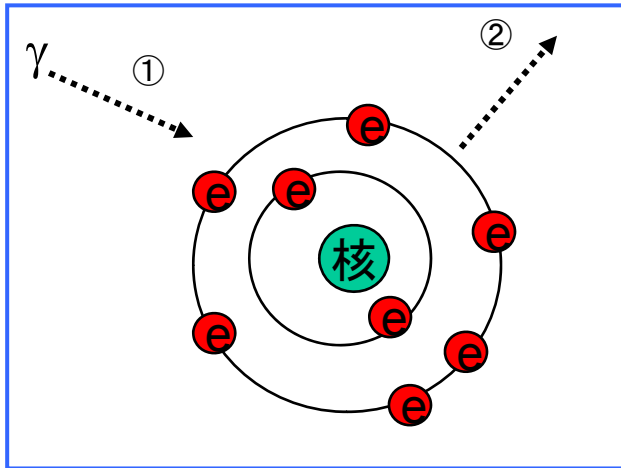
Pb ターゲット からの光子スペクトル

EGS4 (光電効果改良版) = EGS5

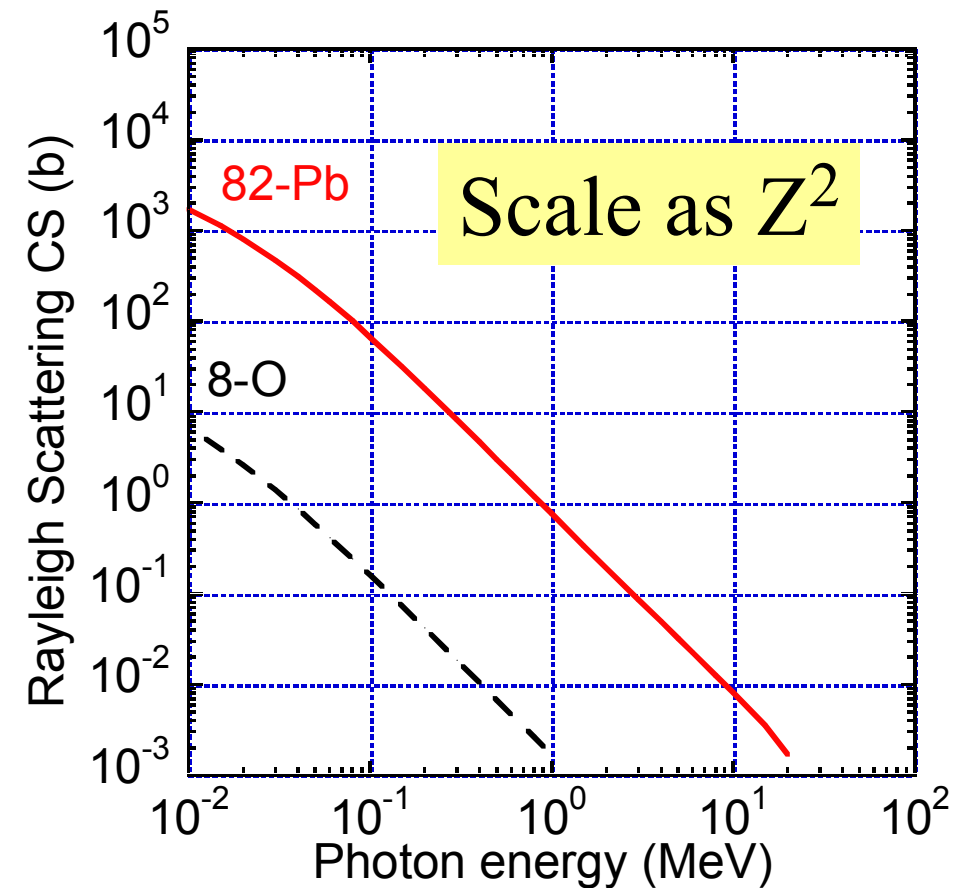


レイリー散乱

- 弾性過程
- 独立原子近似



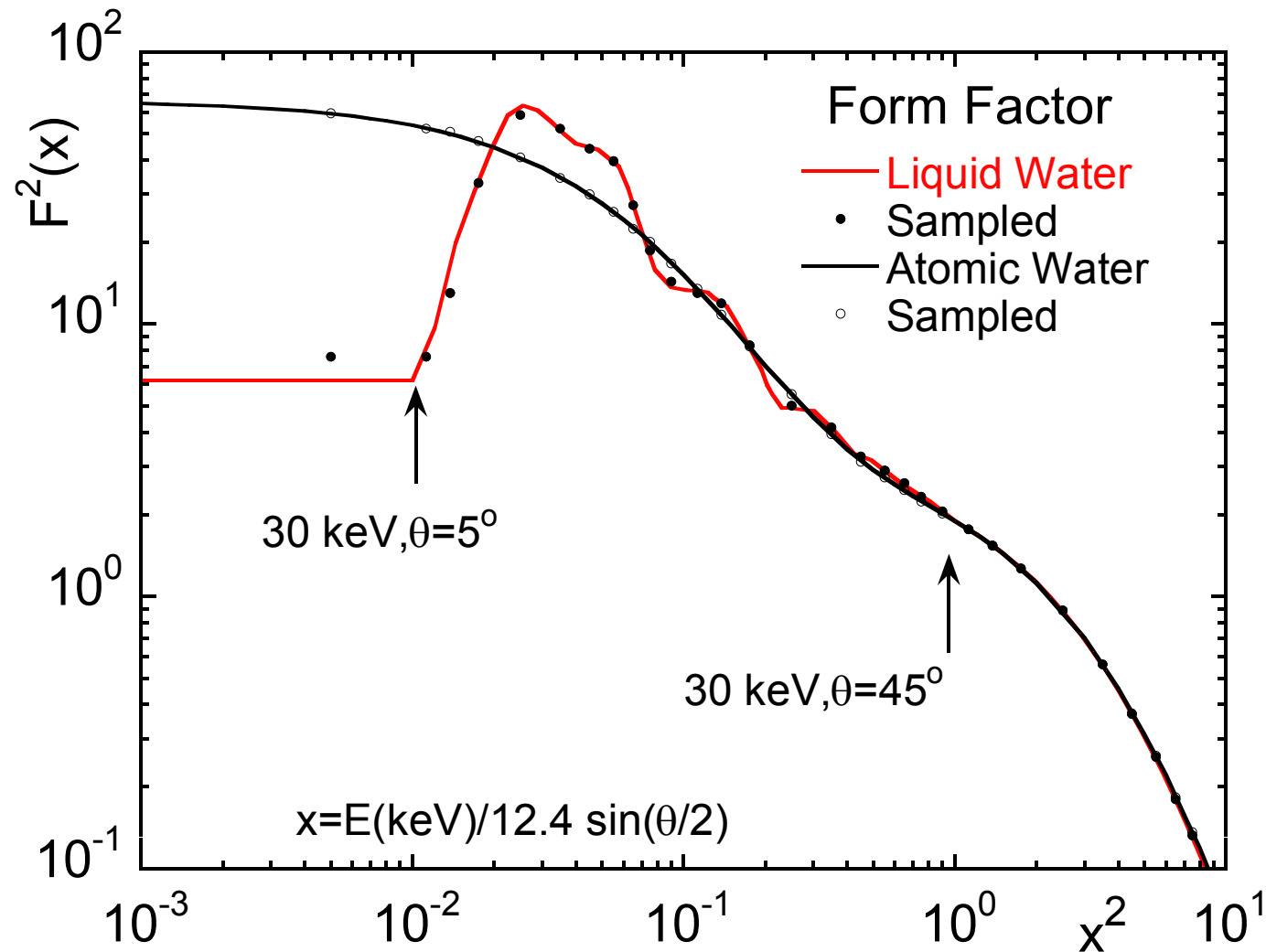
$$k_0 + E_N = k_0 + E_N$$



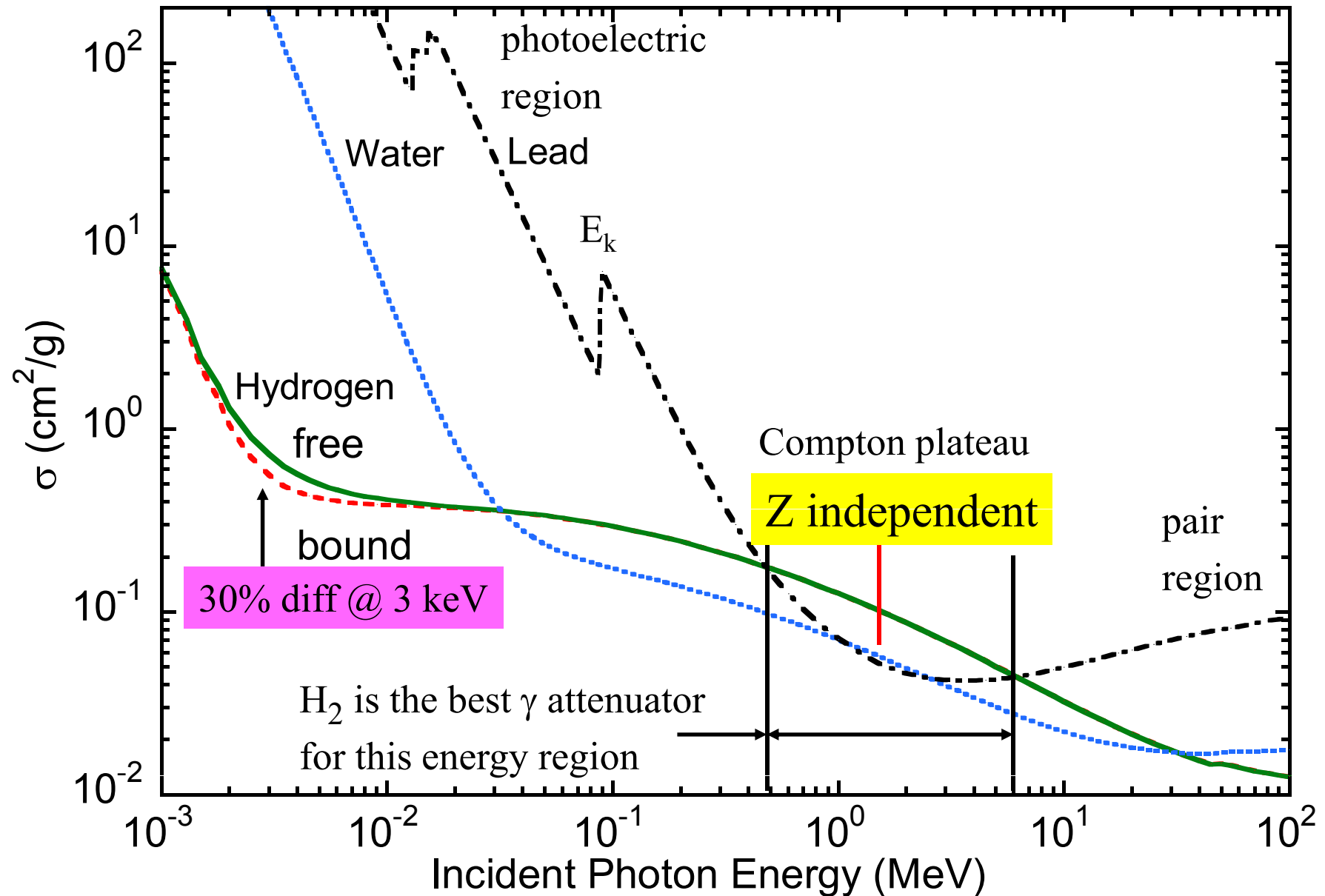
レイリー散乱(続き:オプション)

近在原子間の干渉効果

- 媒質: 脂肪、筋肉、腎臓、肝臓、血、PMMA、水



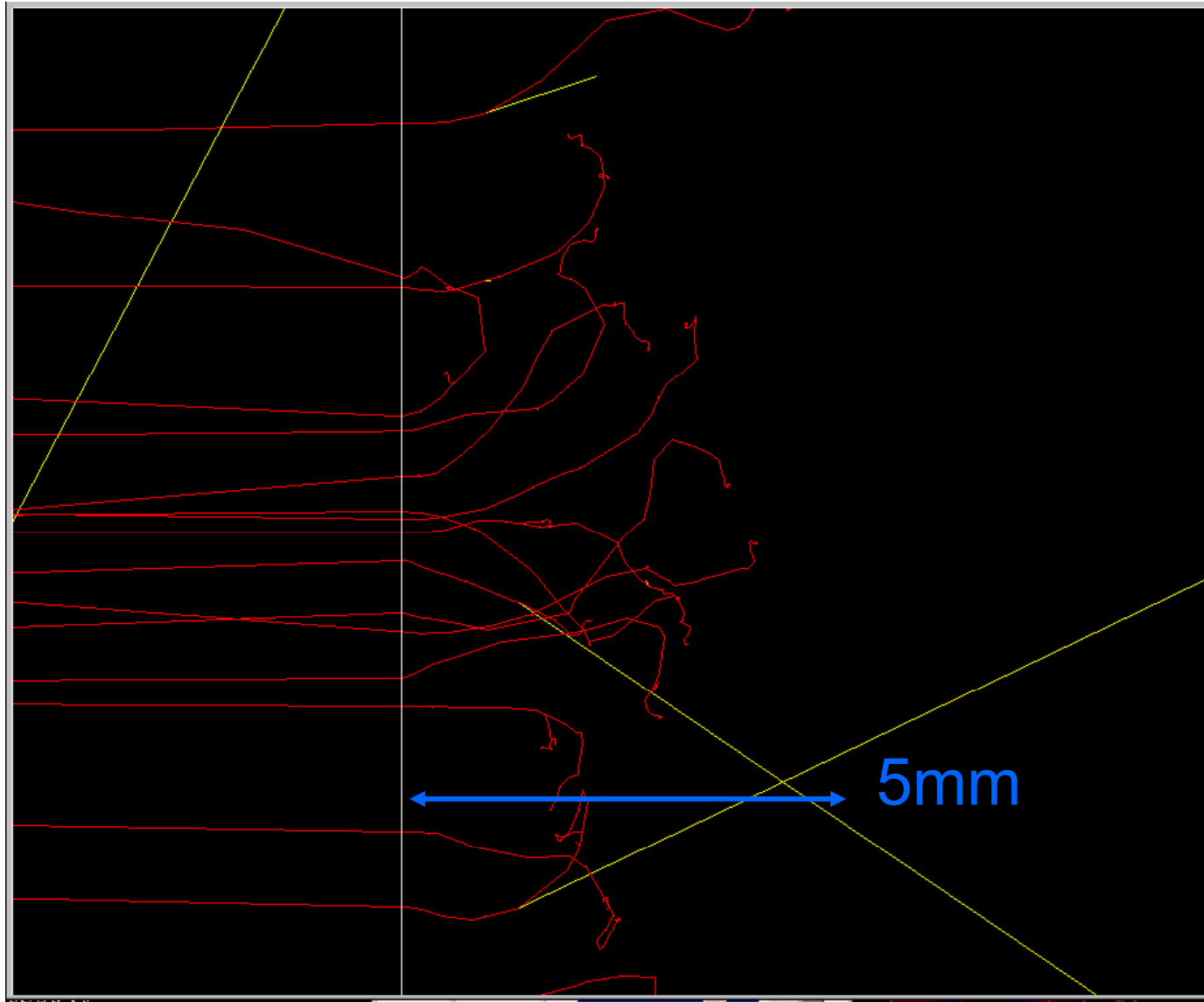
全光子 Σ 対 光子エネルギー



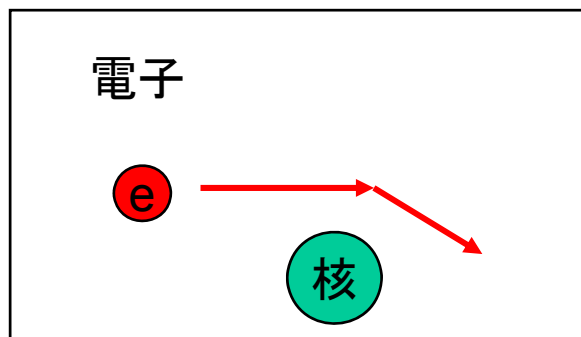
End of Photon Monte Carlo
Simulation

電子モンテカルロシミュレーション

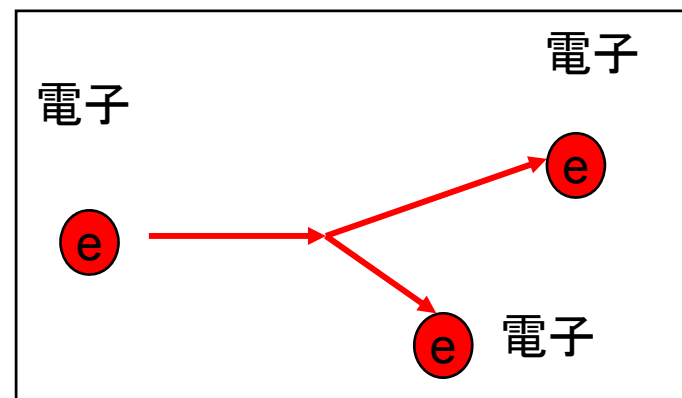
- 相互作用
- 近似
- 輸送方法



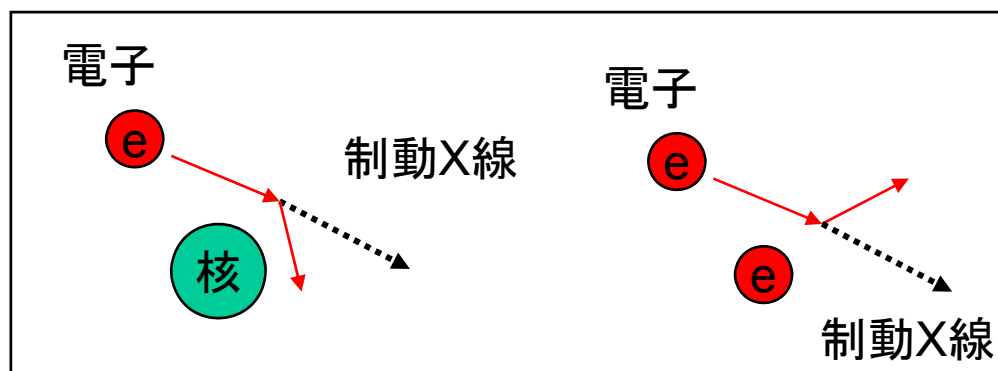
電子と原子核、電子との相互作用



1. 原子核による電子の散乱
(ラザフォード散乱): 方向を大きく変える。

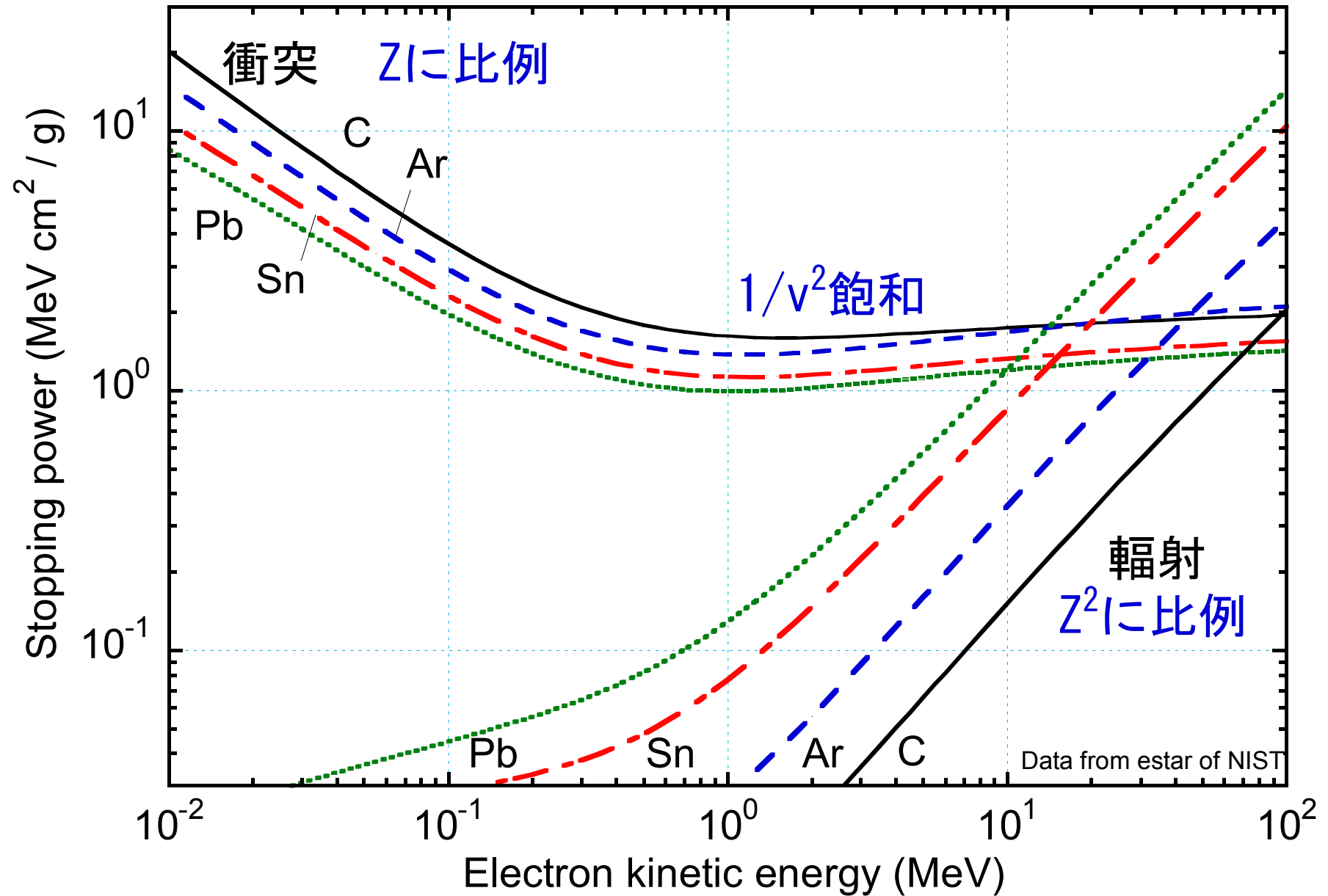


2. 電子と電子の非弾性散乱
エネルギーを失う。

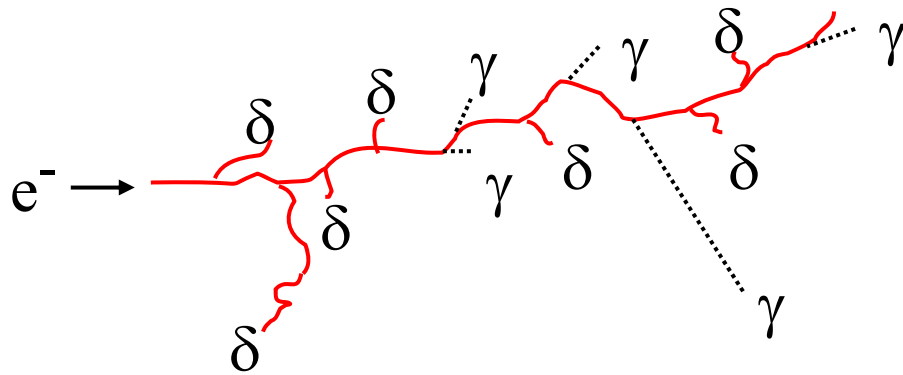


3. 制動X線の発生

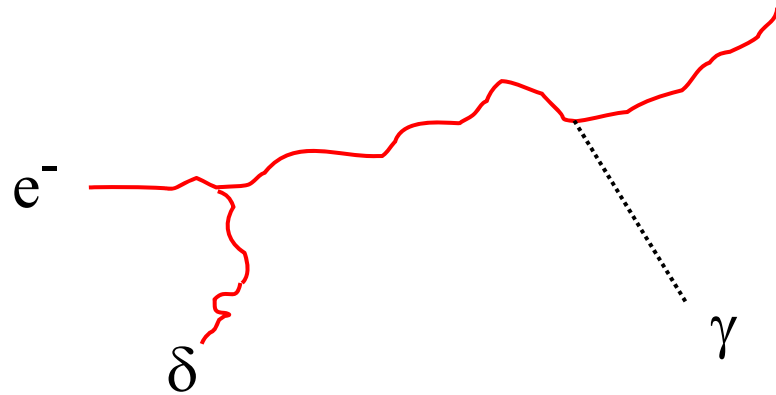
電子に対する阻止能 (非制限)



凝縮近似(Condensed Random Walk)

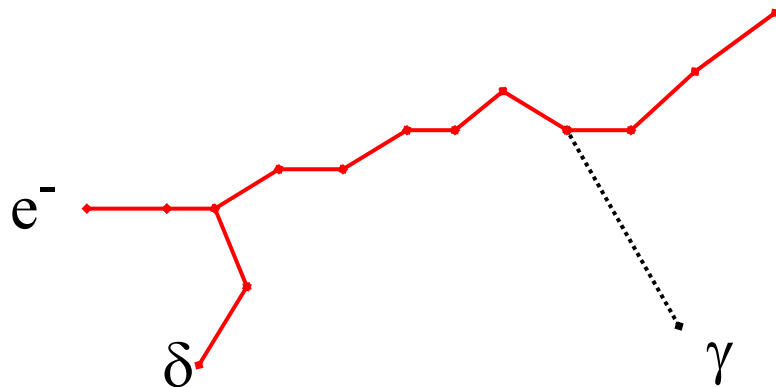


現実 MFP:nm単位
(連続減速なし)



連続減速近似

δ 線、制動輻射:
>しきいエネルギーのみ



多重散乱近似

多重散乱角 $\theta_{ms}(E, Z, t)$
モリエール理論

重大相互作用と連続近似をどう両立させるか？



ユーザー入力のしきいエネルギー (AE, AP)を用いる

- 重大な相互作用 (大影響) : 個別サンプリング

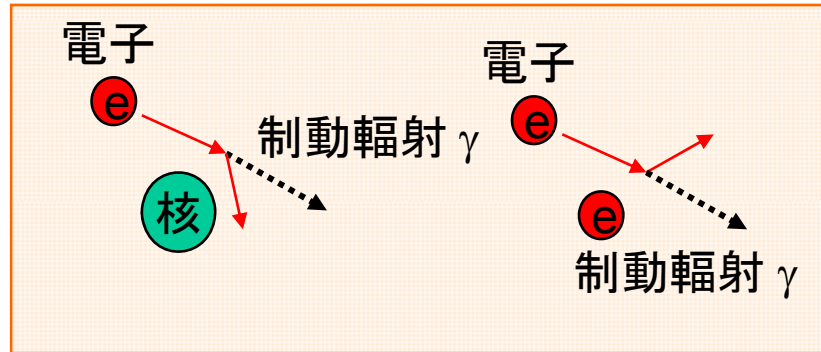
- モラー／バーバー散乱 (2次粒子エネルギー $> AE$)
- 制動輻射 (光子エネルギー $> AP$)
- 飛行中および静止時の消滅

- 軽微な相互作用 (小影響) : まとめてサンプリング

- モラー／バーバー散乱 (2次粒子エネルギー $< AE$)
 - 制動輻射 (光子エネルギー $< AP$)
 - 原子励起
 - 多重クーロン散乱
- } エネルギー吸収

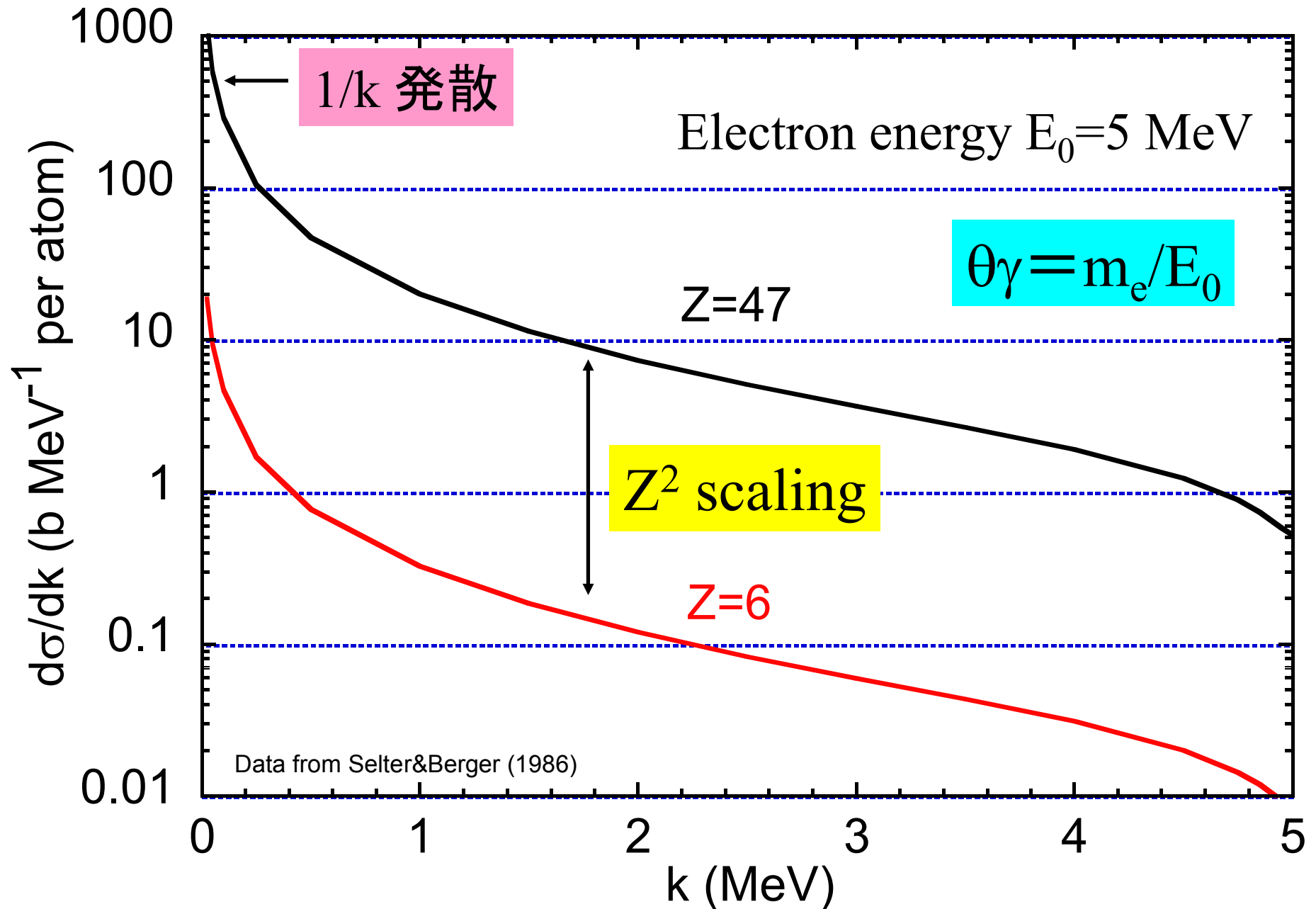
個別に扱う相互作用

制動輻射

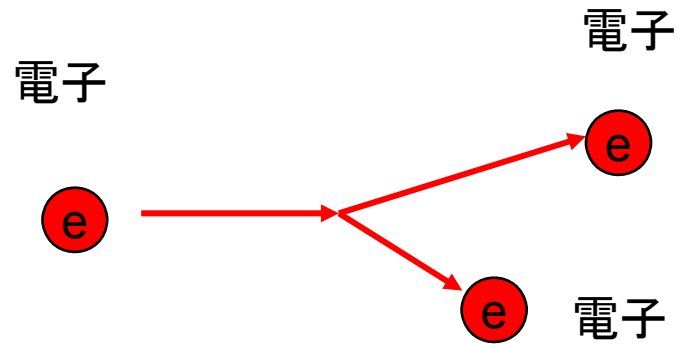


- Z^2 に比例
- 3 体角度分布無視
 - $Z^2 \rightarrow Z(Z+\xi(Z))$
- <50 MeV ICRU-37に規格化
- >50 MeV Extremely Relativistic Limit
- ミグダル効果無視 >10 GeV
- TF スクリーニング
- e^- , e^+ 同一視
- e^\pm 方向不変

制動輻射光子微分斷面積例



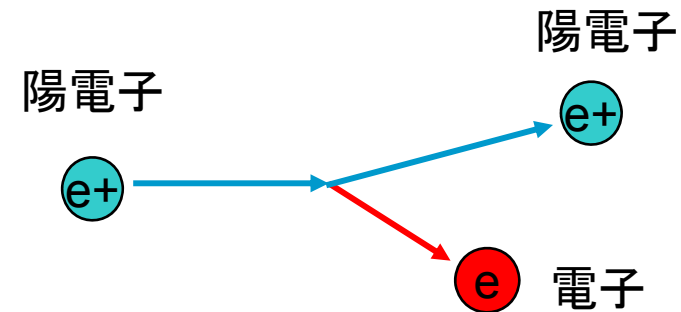
モラー散乱



同種粒子:しきい:2(AE-RM)

- $1/v^2$
- Z に比例
- ターゲット e^- は自由

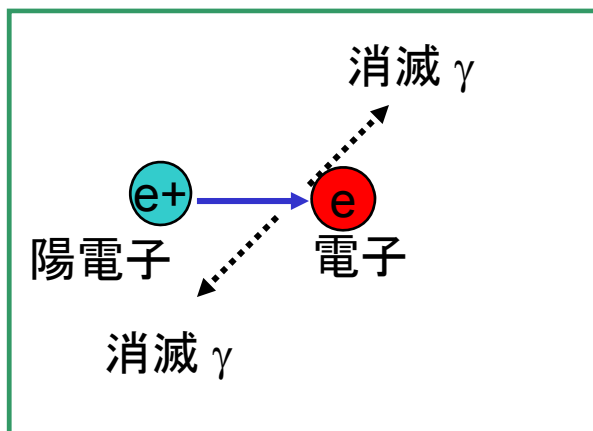
バーバー散乱



異種粒子:しきい:AE-RM

- Optional treatment in egs5
 - K-X ray production in Moller (Electron Impact Ionization)

消滅



- 飛行中および静止時

- $e^+e^- \rightarrow n\gamma (n>2)$ 無視

- $e^+e^- \rightarrow \gamma N^*$ 無視

- ECUTで e^+ 消滅

残りの移動は無視

- 束縛無視

統計的にグルーピング化して扱う相互作用

- 連続的なエネルギー損失
- 多重散乱

「連続」エネルギー損失

1. 衝突エネルギー損失 (e^\pm 区別)

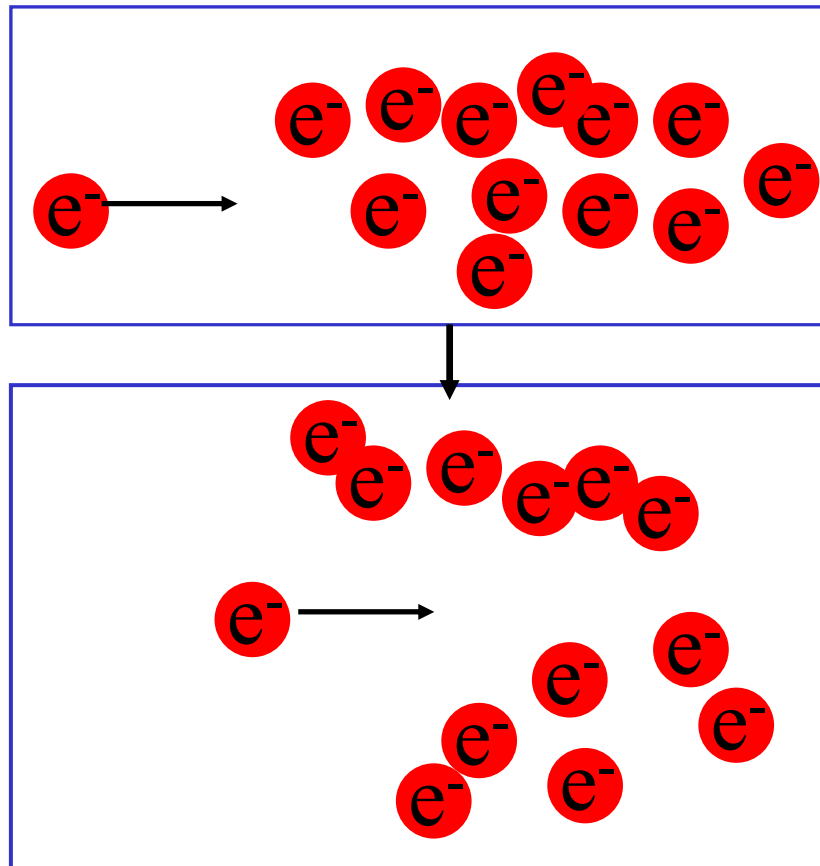
- ベーテ・ブロッコ理論 + 密度効果
- K殻エネルギーの十分上
- 電子数に比例 $\propto Z\alpha v$

2. 放射エネルギー損失 (e^\pm 同一視)

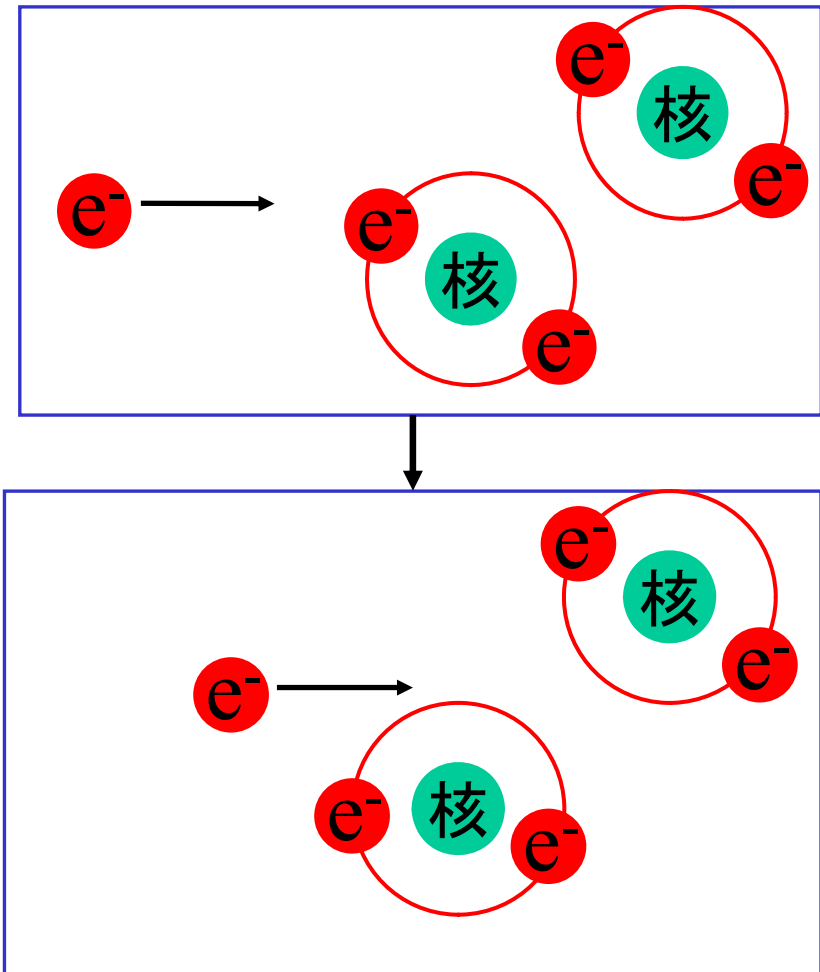
- 制動輻射断面積の積分
- 制動輻射と同じ近似

密度効果

入射電子のため物質が分極し、衝突阻止能が減少

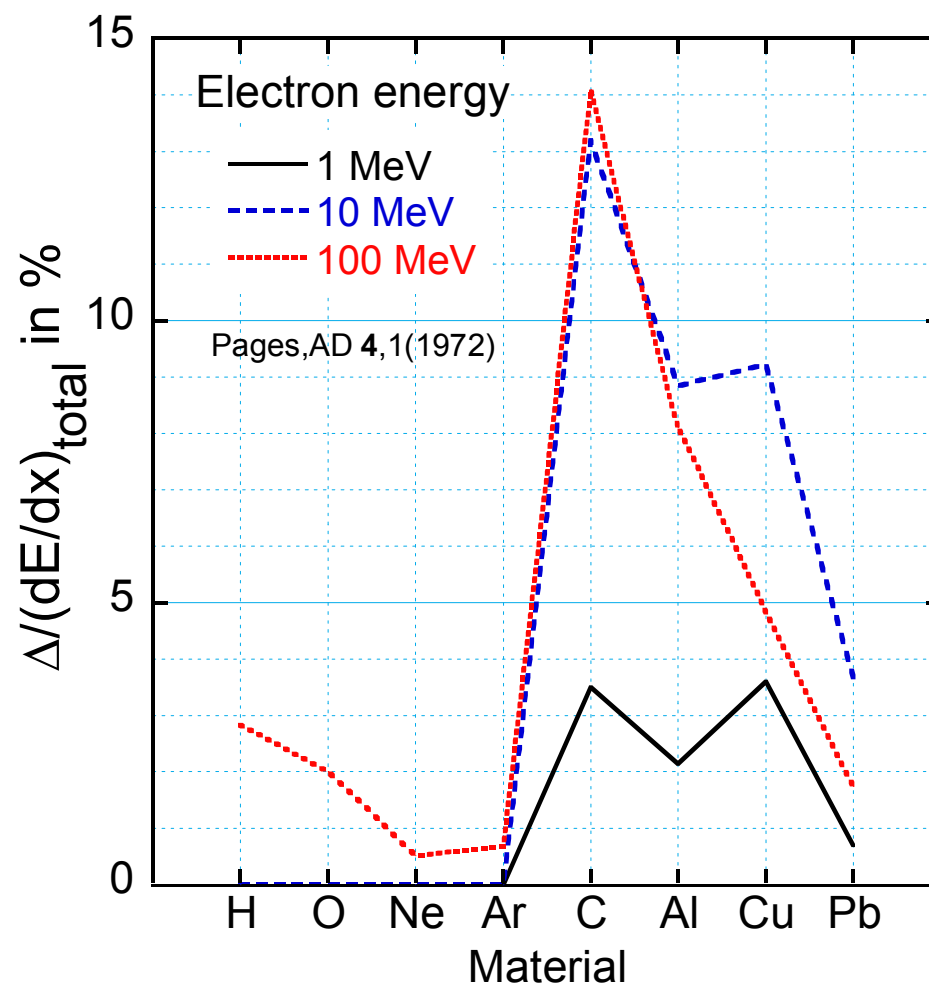
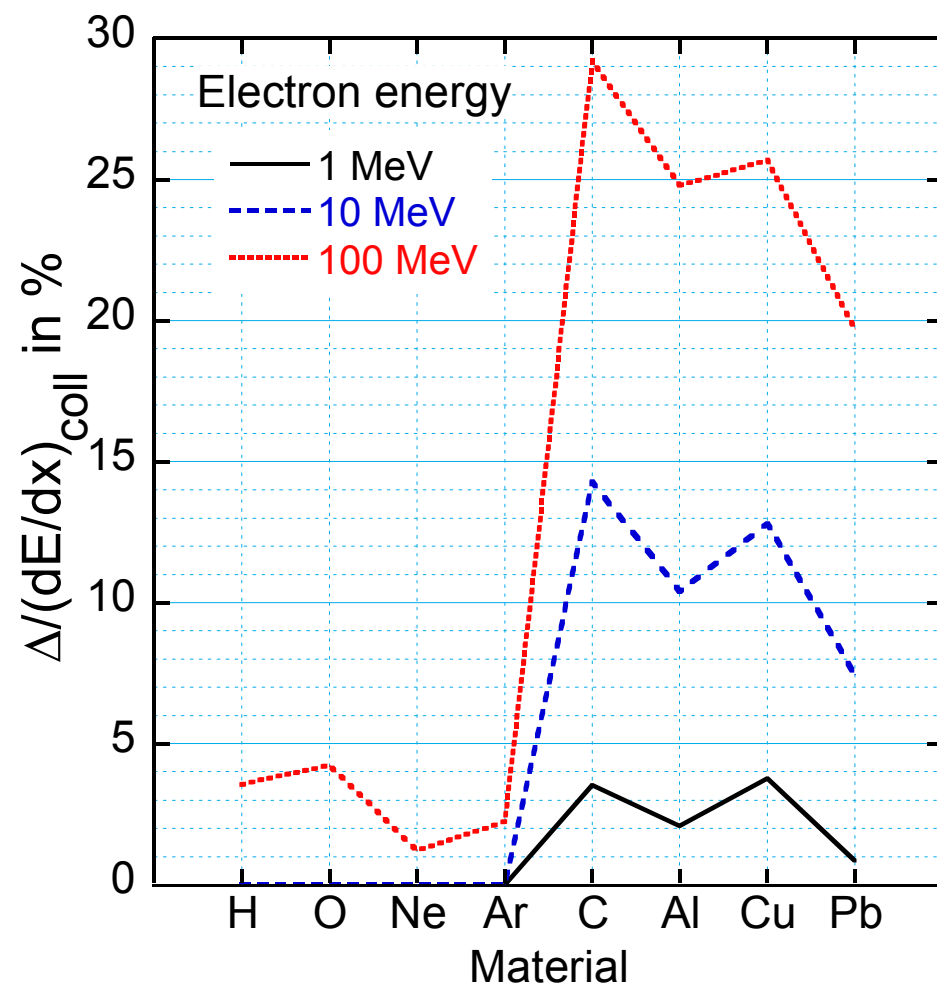


導体での大きな分極 (ex. 黒鉛)



希ガスでの小さな分極 (ex. アルゴン)

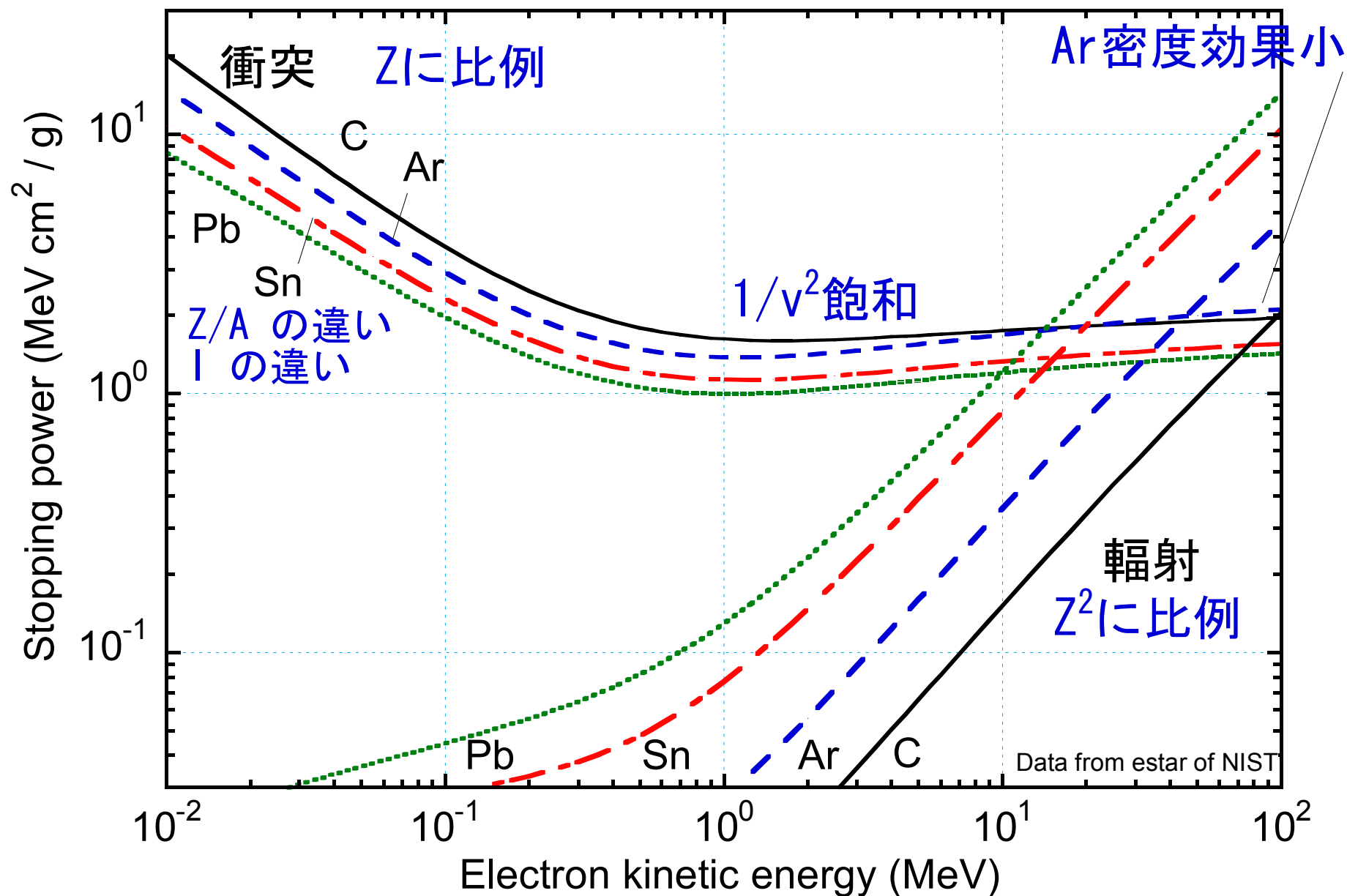
密度効果と阻止能の比



egs5での密度効果

- Berger, Seltzer, and Sternheimer
 - 278 物質のパラメータを内蔵
- Sternheimer and Peierls
 - 一般的扱い
 - 正確さは少し劣る。 Z と ρ のみを用いる

電子に対する阻止能 (非制限)



エネルギー吸収

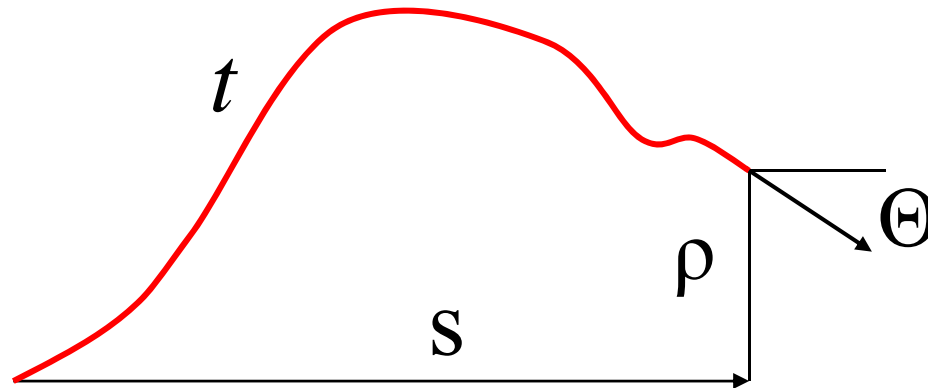
e^\pm が「 t 」だけ動くときのエネルギー吸収

$$= - \left(dE_{\pm} / dx \right)_{\text{阻止能}}^{\text{制限付き}} \times t$$

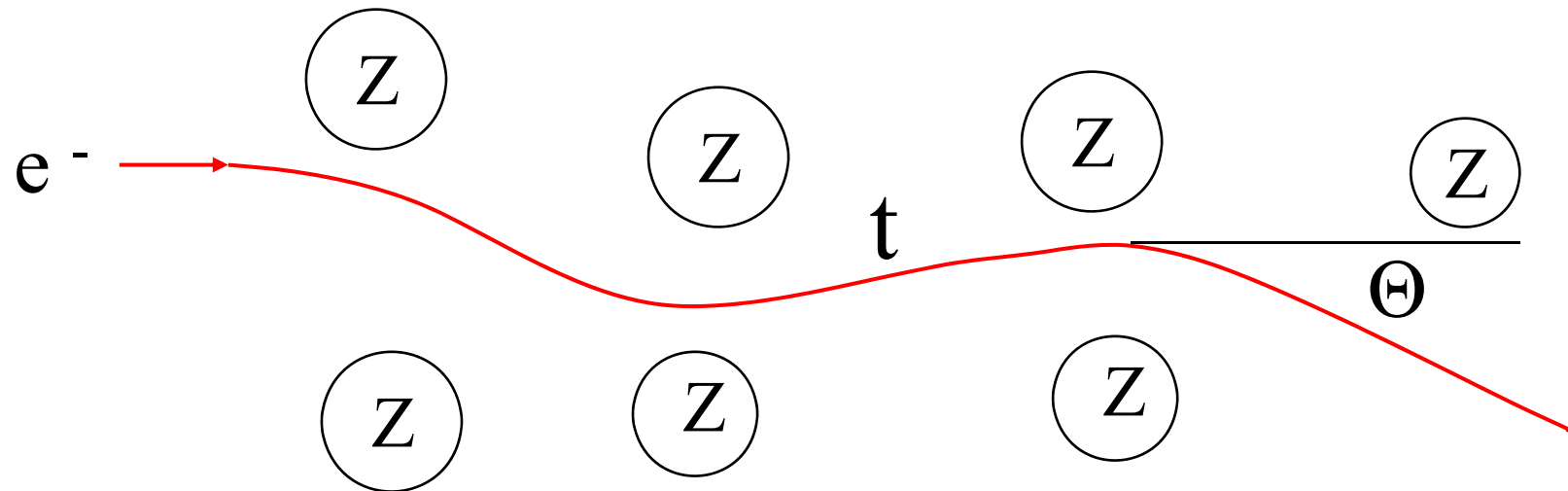
$$- \left(dE_{\pm} / dx \right)_{\text{阻止能}}^{\text{制限付き}} = - \left(dE_{\pm} / dx \right)_{\text{以下の輻射}}^{\text{カットオフ}} - \left(dE_{\pm} / dx \right)_{\text{以下の衝突}}^{\text{カットオフ}}$$

平均エネルギー損失： Gauss分布による

吸収線量 (Gy)=エネルギー吸収(J)/質量(kg)



多重散乱角

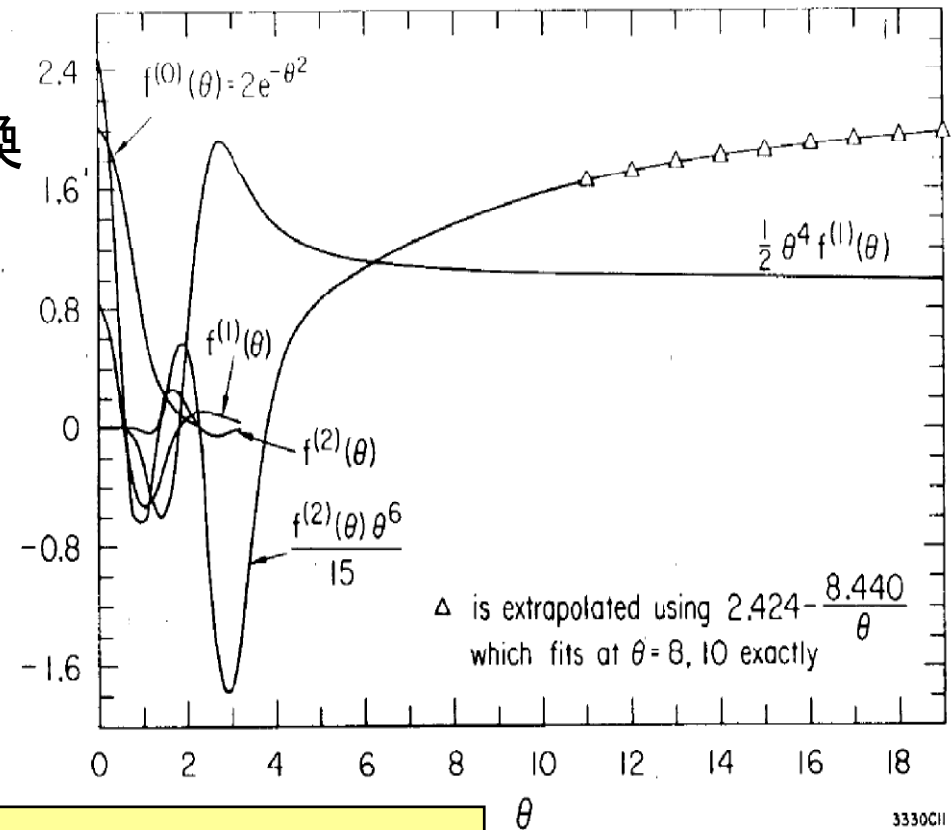


$f(\Theta)=?$: t だけの移動後の多重散乱角分布

- Fermi-Eyges 理論
- Goudsmit-Saunderson理論 : EGS5
- モリエールの小角長ステップ理論:
EGS4, PRESTA, EGS5

Moliere 理論 (中精度、中制限, 簡単)

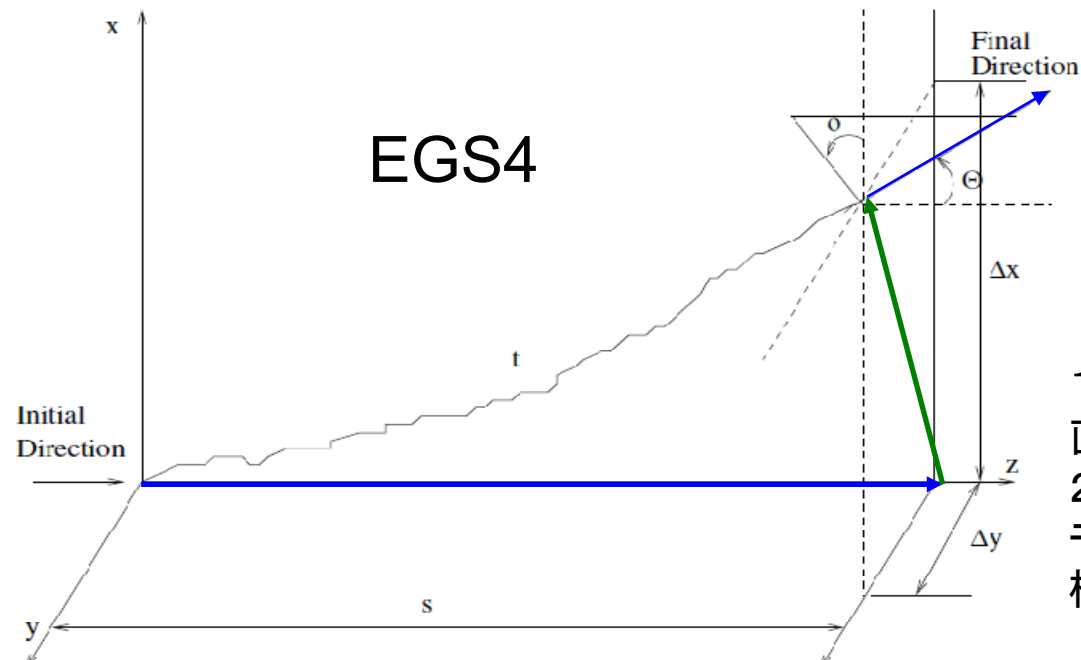
- 散乱角 Θ (E,Z,t)を換算角 θ に変換
- $f^{(n)}(\theta)$ の単一セットを使用→ 簡単
- 小角度 ($<20^\circ$) で良い近似
- 長い t が必要 (>100 elastic mfp)



Goudsmit-Saunderson (GS) theory (高精度, 少制限, 煩雑)

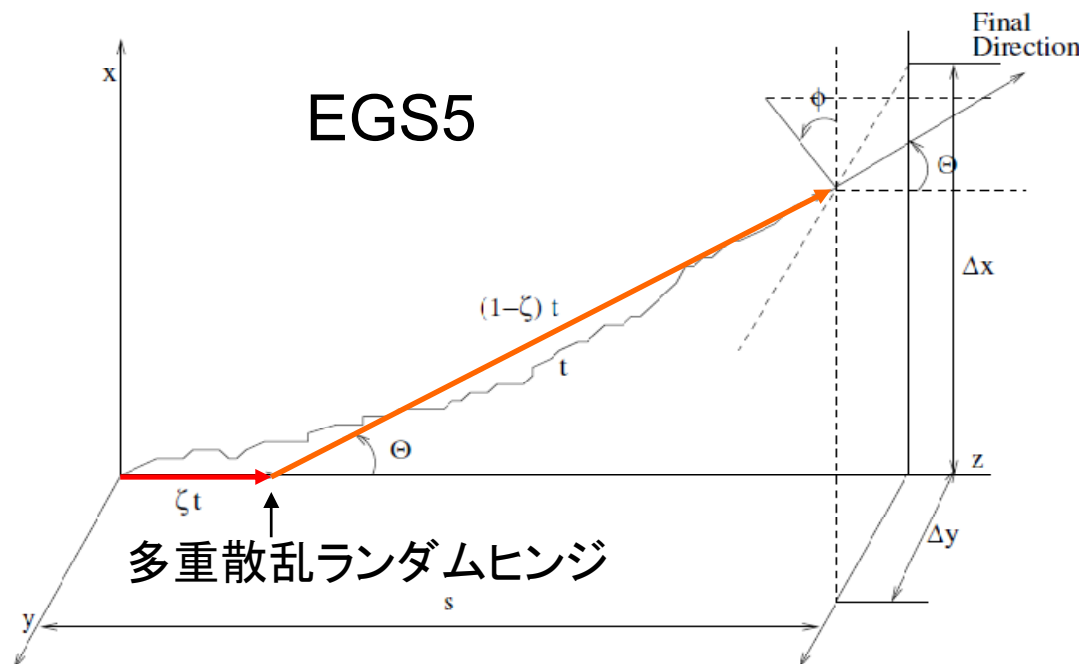
- Legendre関数での散乱CSの展開
- 係数 $f(E, Z, t, \theta) \rightarrow$ 大きなデータベース要
- すべての散乱角で正確(制限なし)

ステップ内での輸送



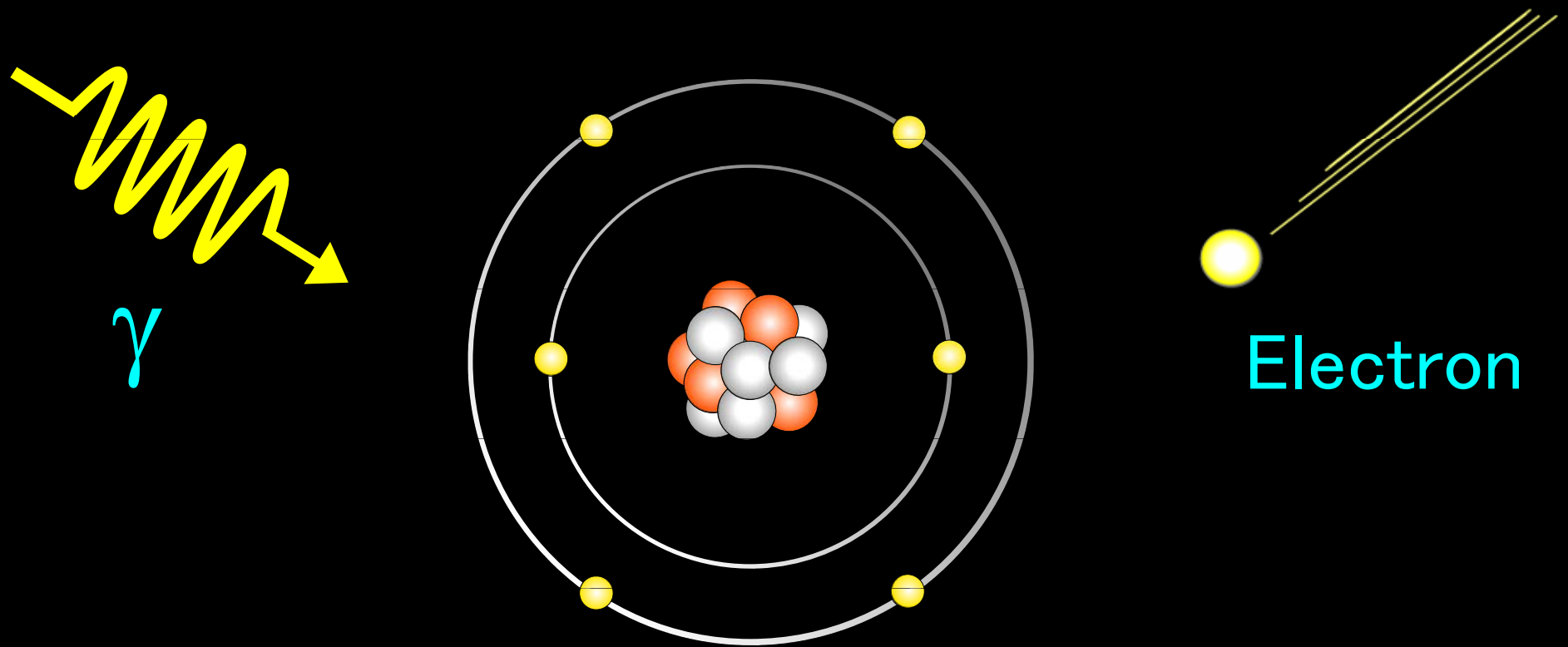
ミシガン大で開発
(協力:KEK)

1. 多重散乱ステップサイズ(s : 直線距離)を決める。
2. 直線距離(s) 移動後に、多重散乱モデルを用い、曲線距離(t)、散乱角(θ)、横変位($\Delta x^2 + \Delta y^2$)を求める。



1. 曲線距離 t 内で1点をランダムサンプリングし「多重散乱蝶番点」とする。
2. 同点で、多重散乱モデルにより電子の方向を屈曲させる。

この Random hingeモデルで、 $\langle t/s \rangle$ 及び $\langle \Delta x^2 + \Delta y^2 \rangle$ を適切に計算できる。(ただし移動に伴うエネルギー損失を無視した場合)



光子と電子の反応対象

単一の原子、電子、原子核

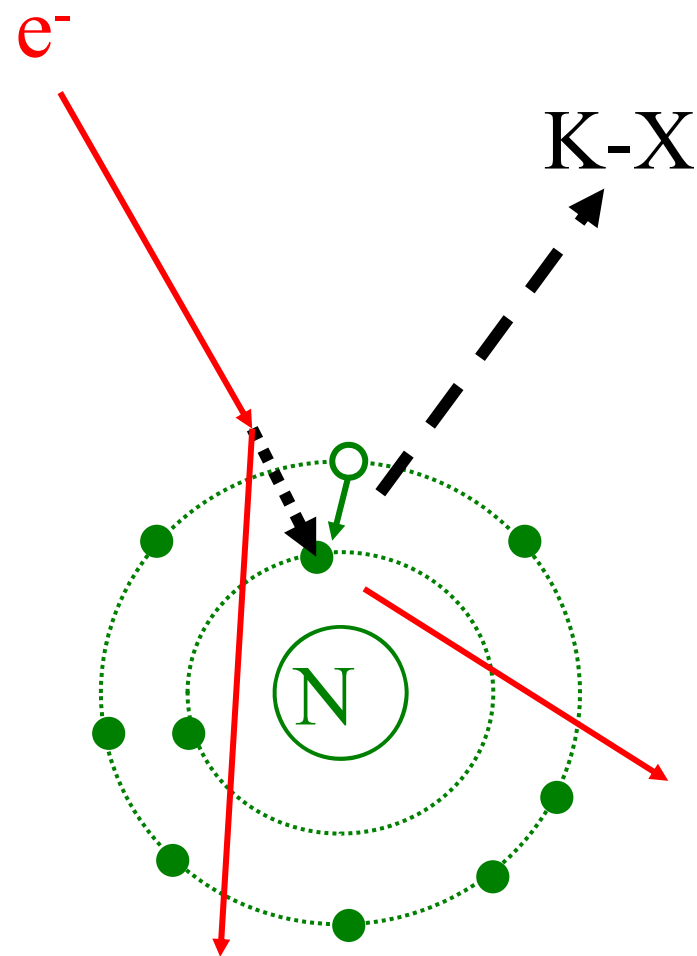
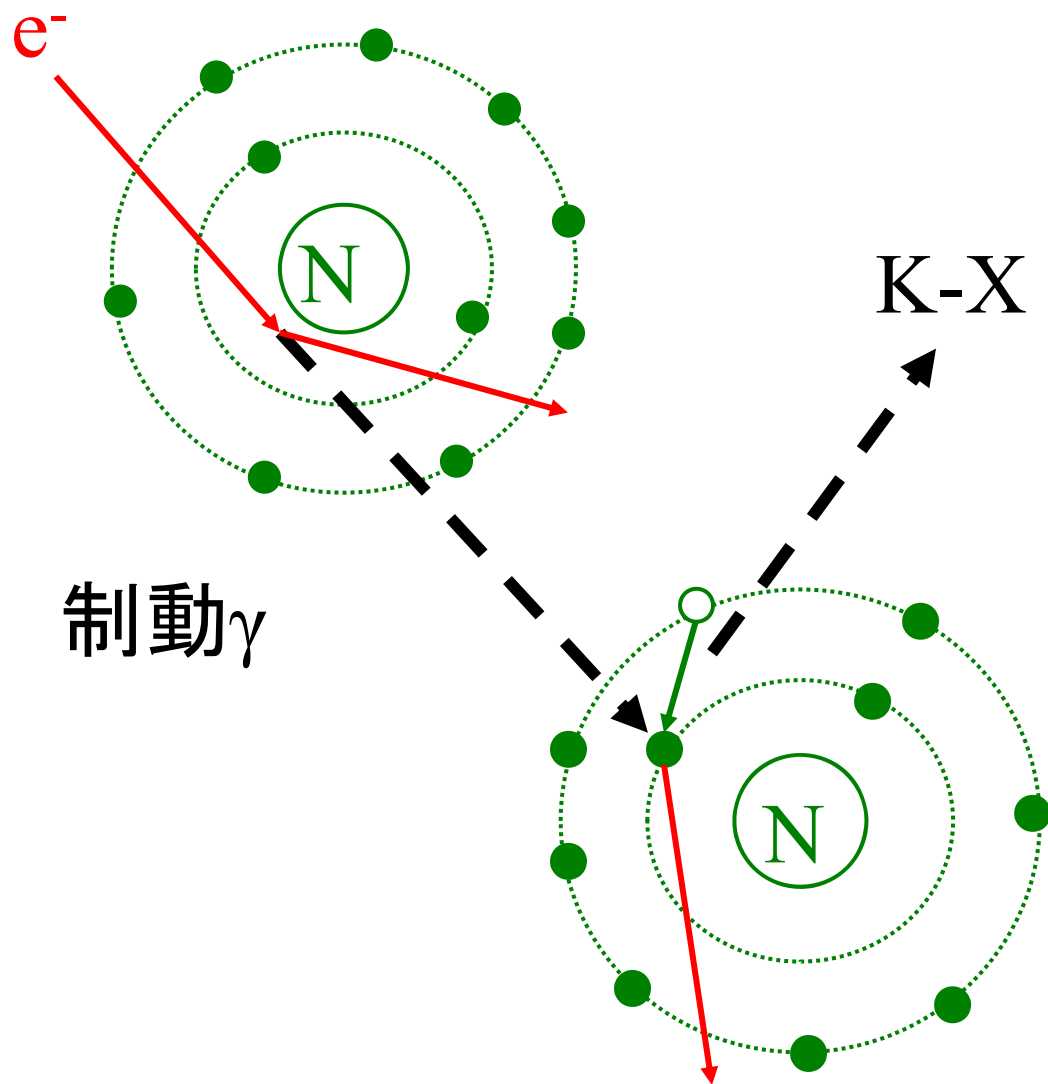
例外

- 密度効果
- レイリー散乱における干渉効果

補足

- 電子衝突電離
- α, β, γ 線のしゃへい

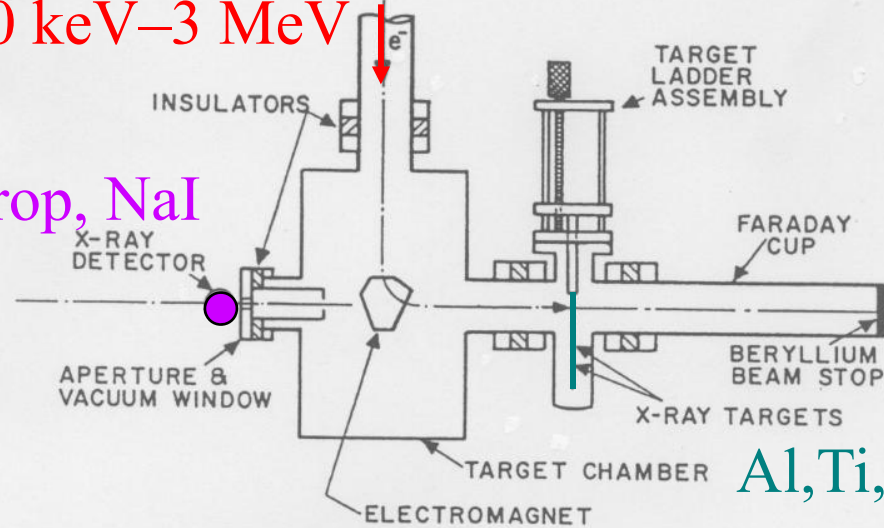
電子衝突電離 (EII)



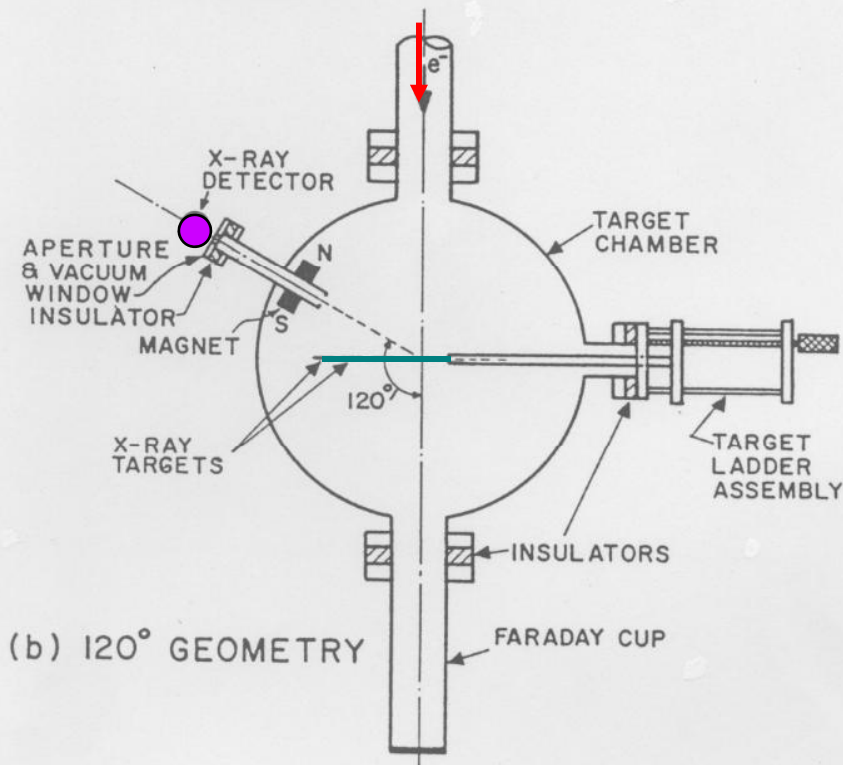
10 keV–3 MeV

e^-

Prop, NaI



(a) 180° GEOMETRY

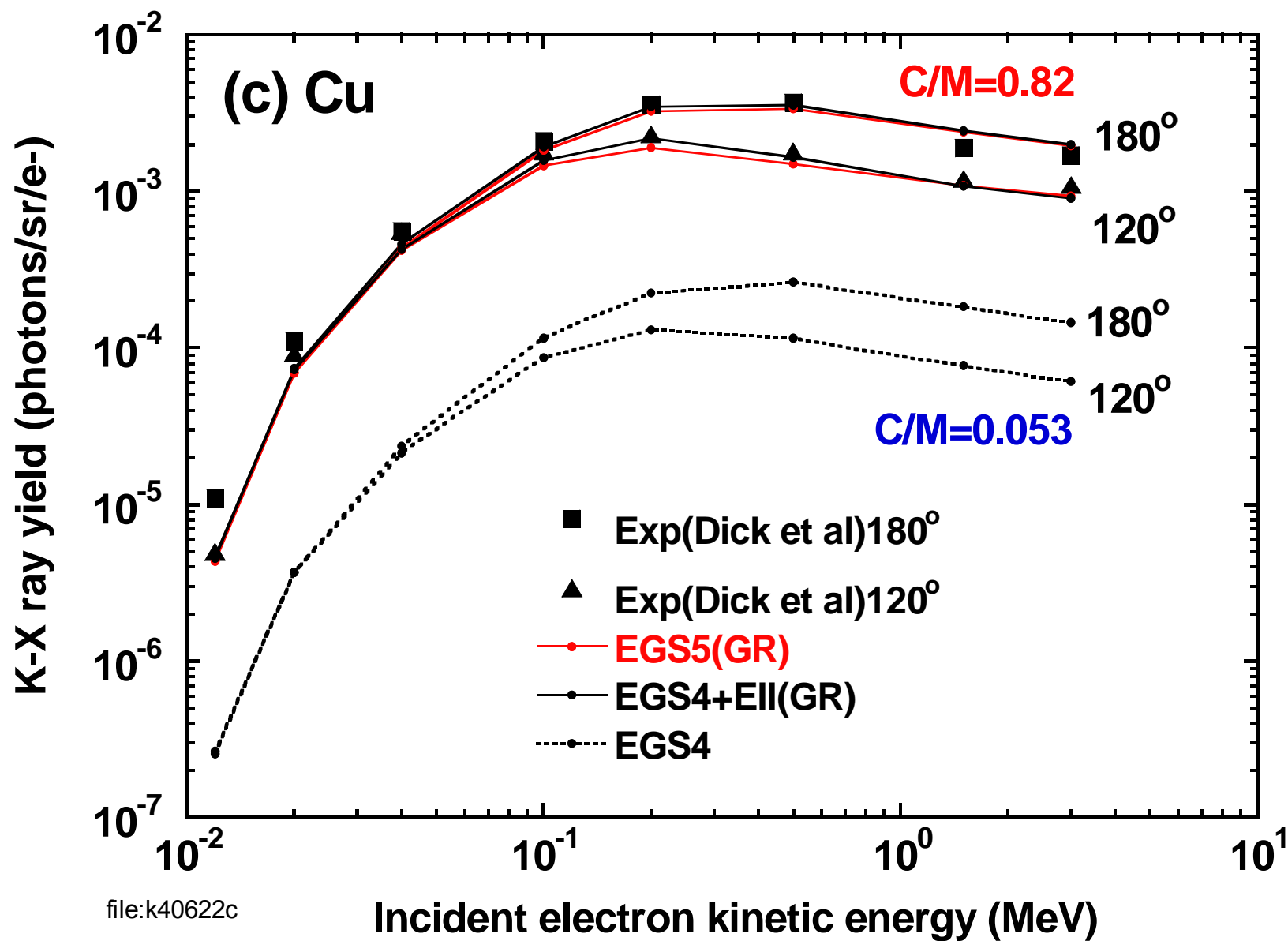


(b) 120° GEOMETRY

Dick et al (1973)'s
exp set up

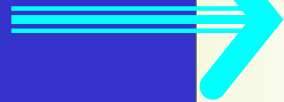
Al, Ti, Cu, Ag, Au

K X-ray yield for Cu

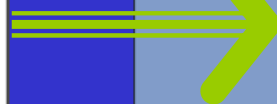


・紙 アルミ板 鉛ブロック

・ α ray



・ β ray



・ γ ray



・ 放射線の透過

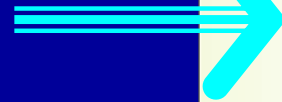
放射線の透過

紙

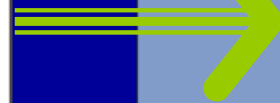
アルミ板

鉛ブロック

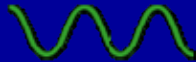
・ α ray



・ β ray



・ γ ray



・空気→

・低Z

・長い飛程

・中程度のZ

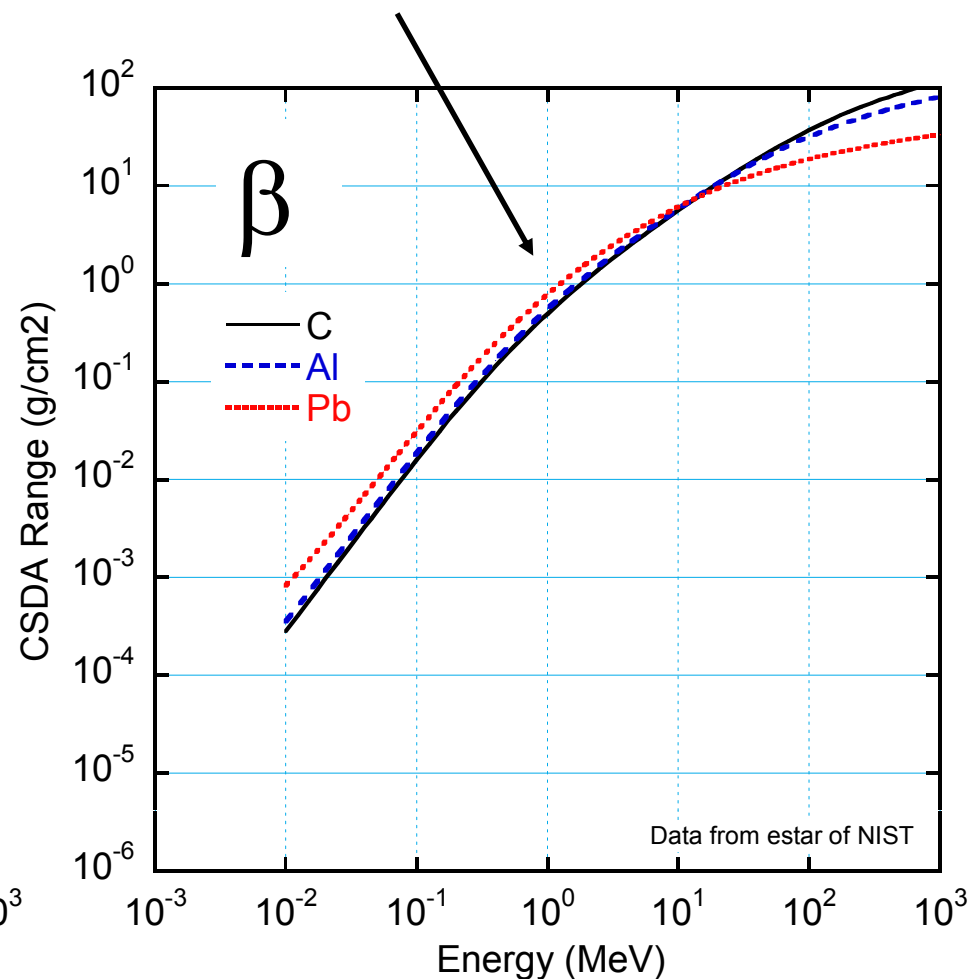
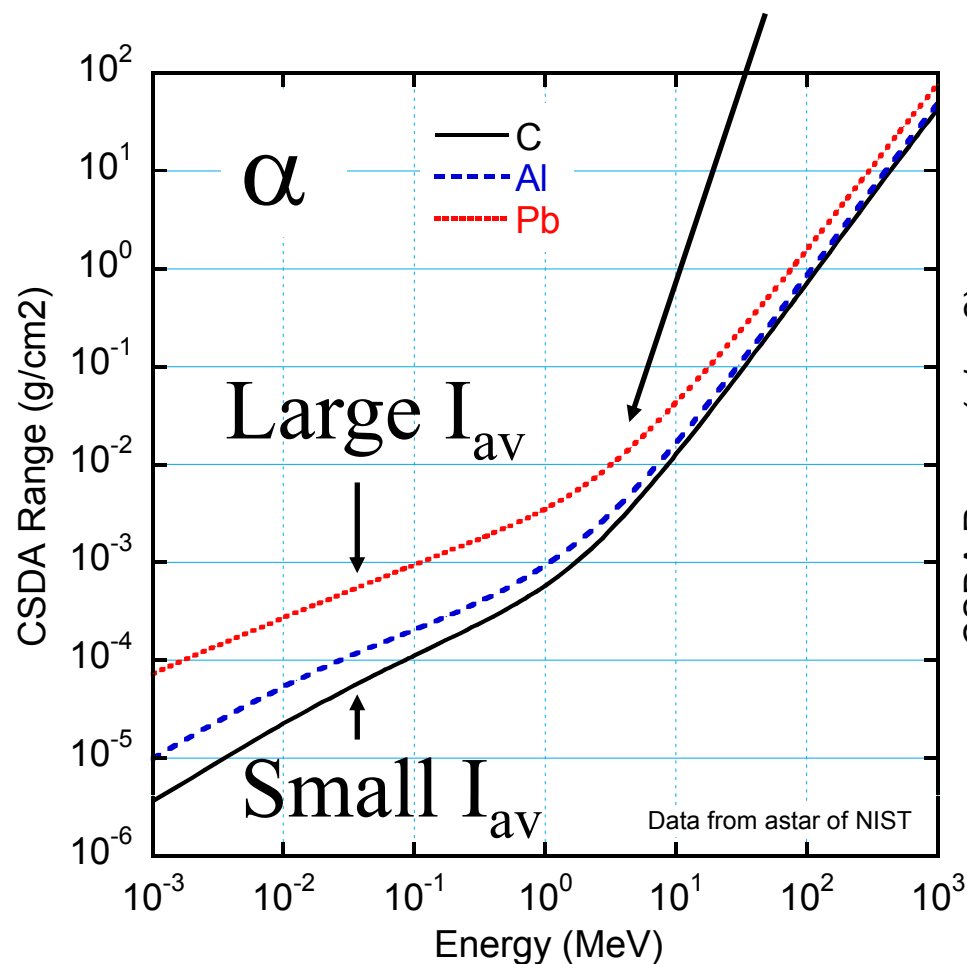
・中程度の飛程

・高Z

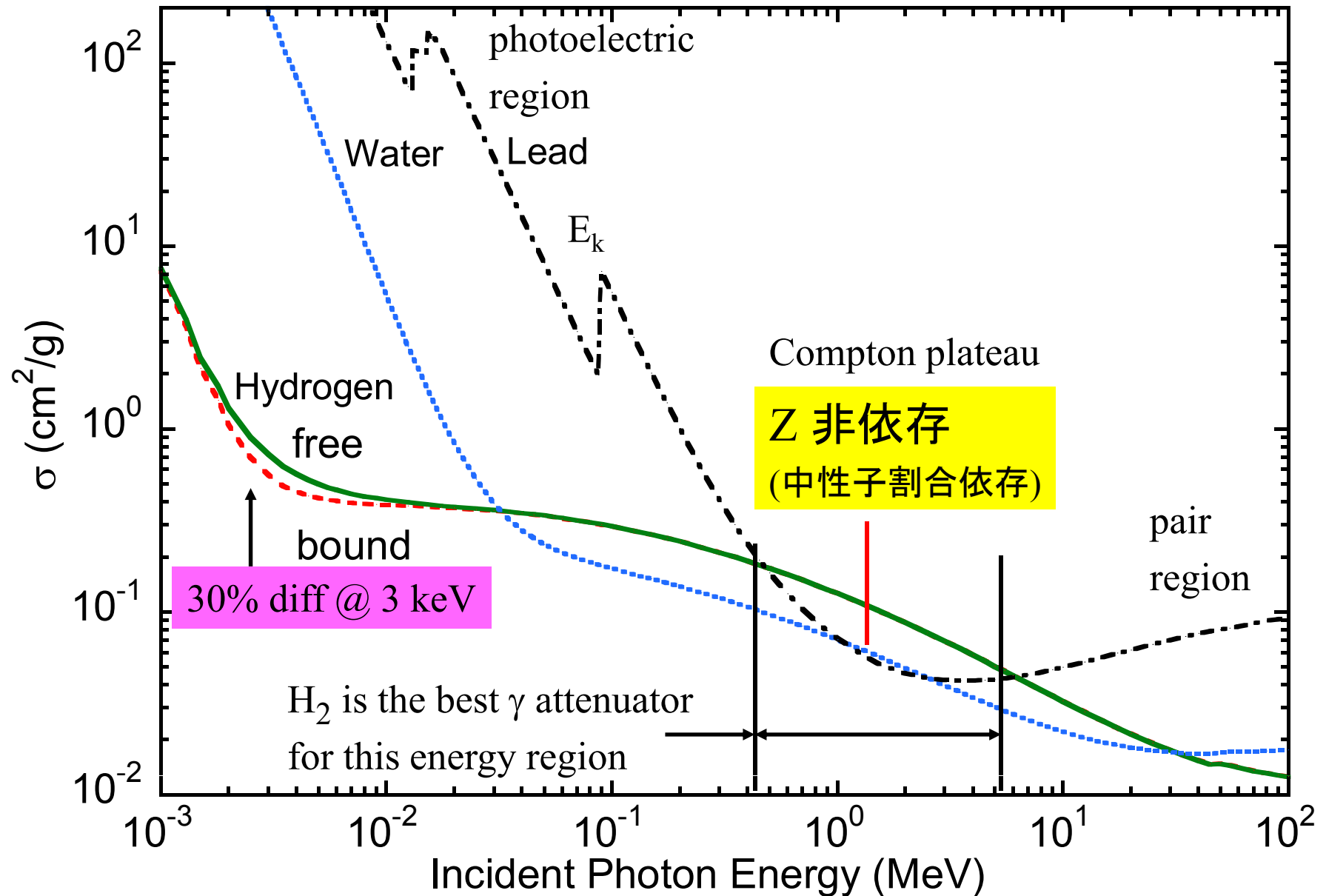
・短いMFP

α 線と β 線のCSDA飛程

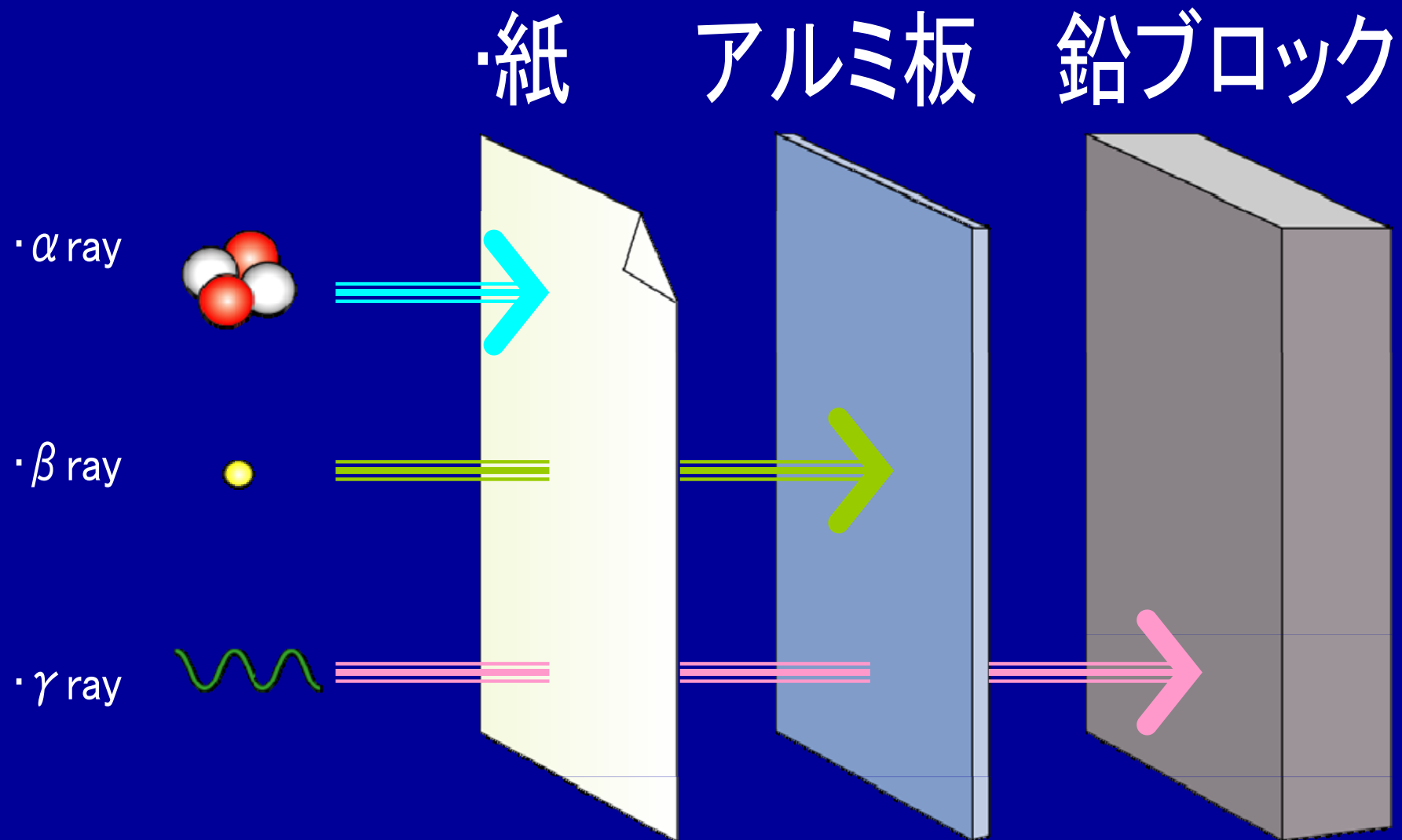
(ほとんど) Z非依存



Total photon Σ vs γ -energy



放射線の透過



実際には、 α 線や β 線の飛程 (g/cm^2) または γ 線の平均自由行程は、(ほとんど) Z 非依存!

End of Electron Monte Carlo Simulation