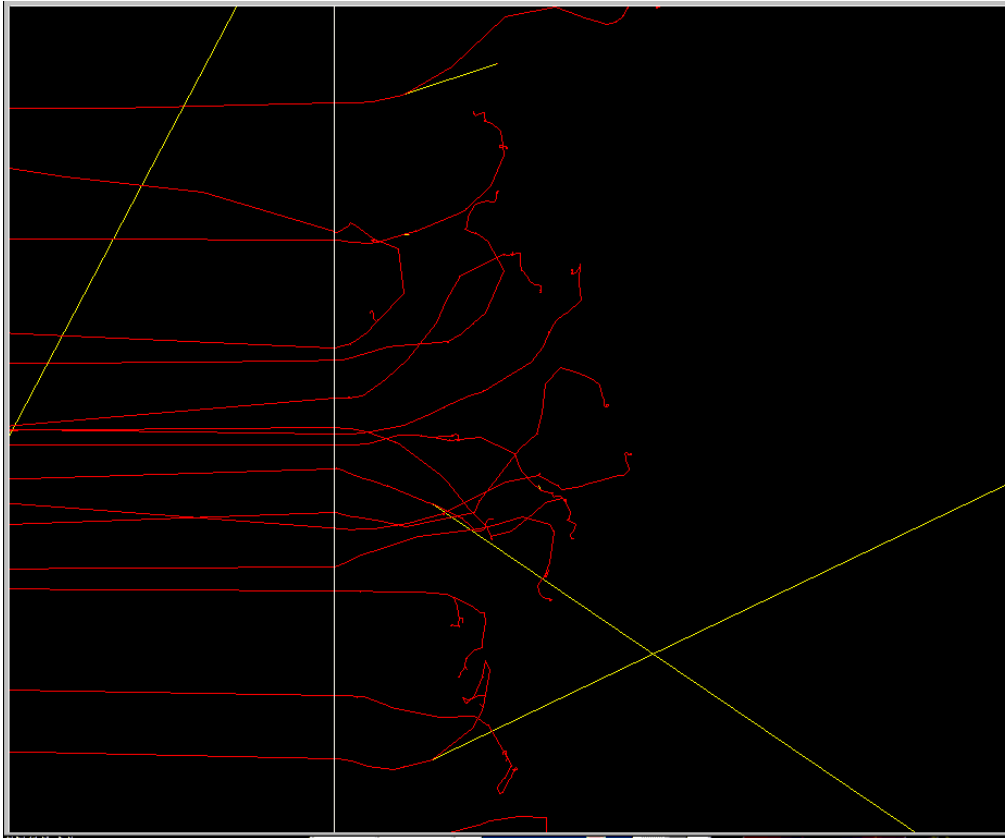


電子の物質中での輸送計算

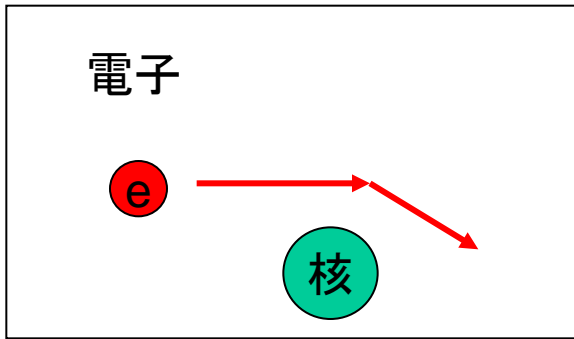


- 相互作用
- 近似
- 輸送方法

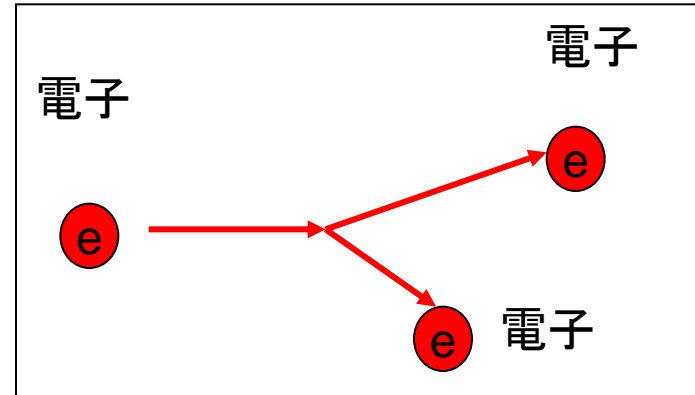
(KEK) 波戸、平山 (ミシガン大) A.F.Bielajew

Last modified on 2014.10.16

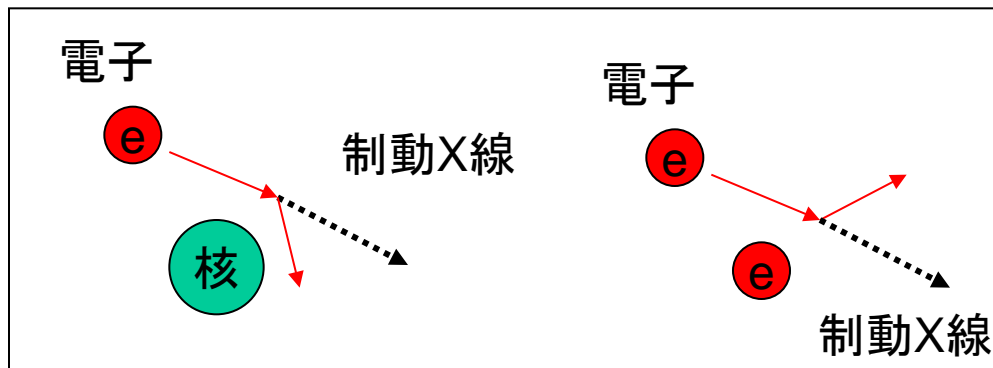
電子と原子核、電子との相互作用



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。

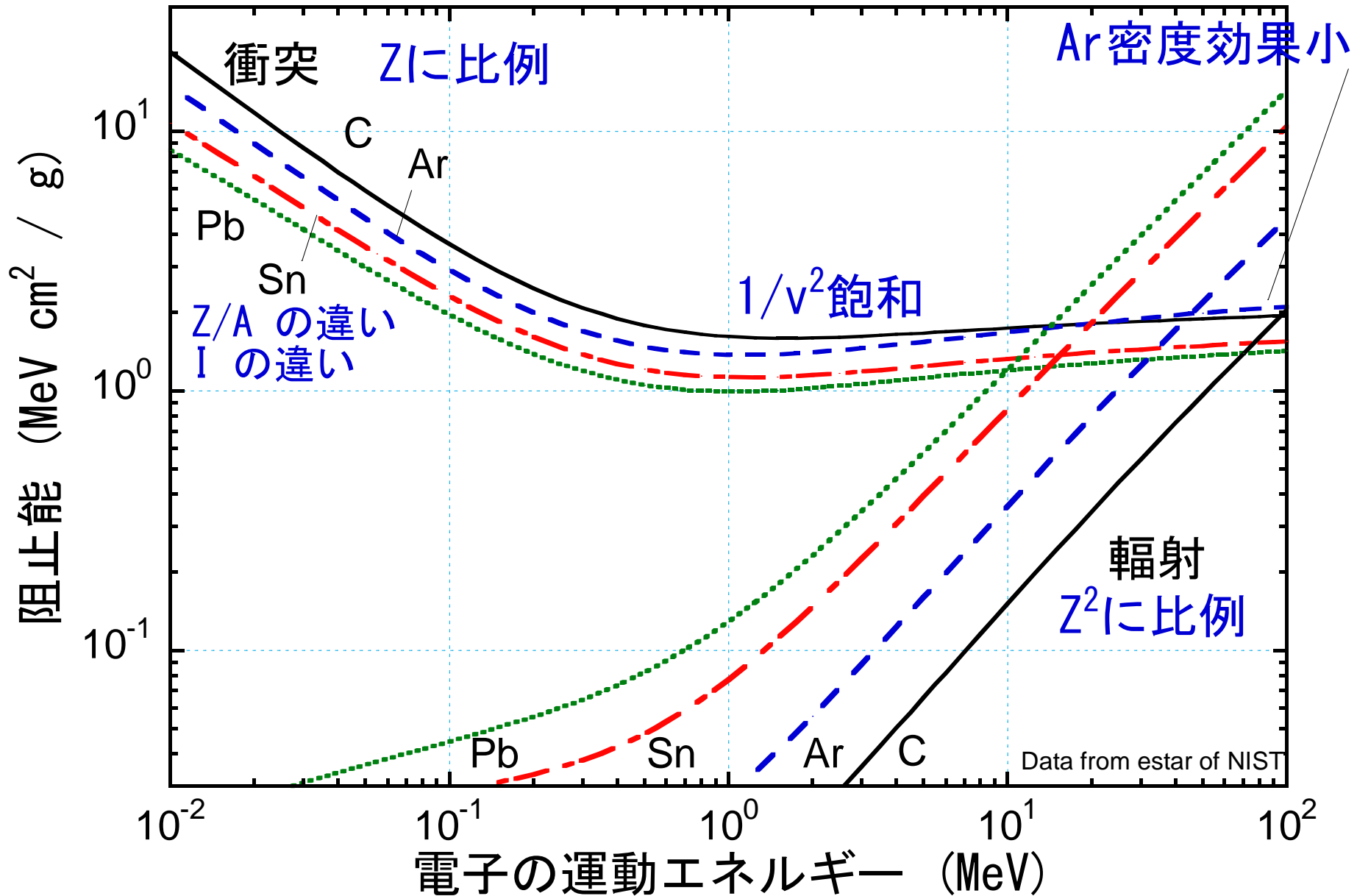


2. 電子と電子の非弾性散乱
: エネルギーを失う。

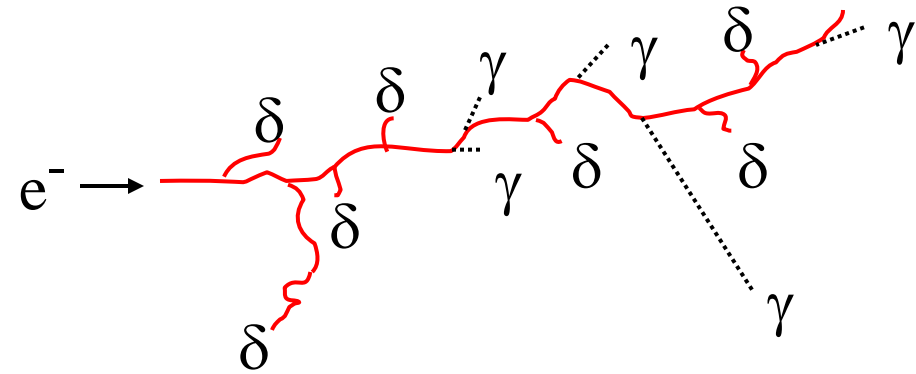


3. 制動X線の発生

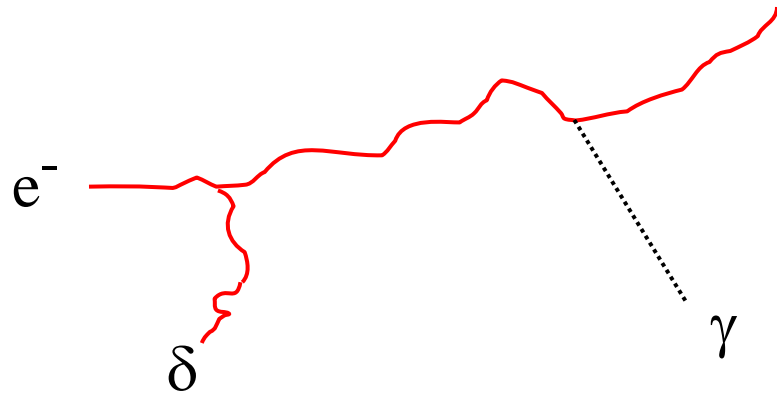
電子に対する阻止能 (非制限)



凝縮近似(Condensed Random Walk)



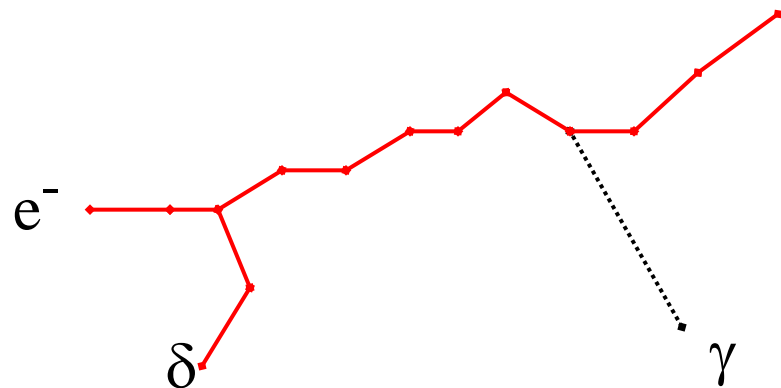
現実 MFP: nm単位
(連続減速なし)



連続減速近似

δ 線、制動放射:

>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？

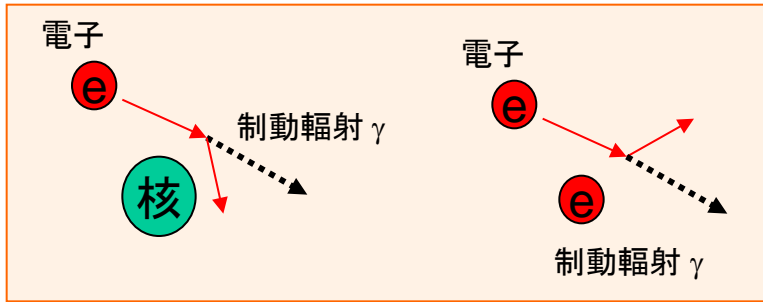


ユーザー入力のしきいエネルギー (AE, AP)を用いる

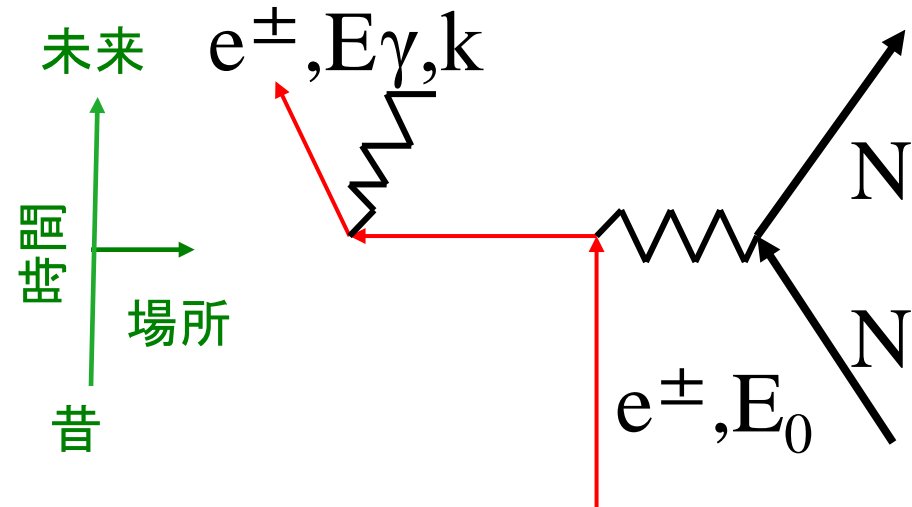
- 重大な相互作用 (大影響) : 個別サンプリング
 - モラー/バーバー散乱 (2次粒子エネルギー $> AE$)
 - 制動放射 (光子エネルギー $> AP$)
 - 飛行中および静止時の消滅
 - 軽微な相互作用 (小影響) : まとめてサンプリング
 - モラー/バーバー散乱 (2次粒子エネルギー $< AE$)
 - 制動放射 (光子エネルギー $< AP$)
 - 原子励起
 - 多重クーロン散乱
- } エネルギー
吸収

個別に扱う相互作用

制動放射



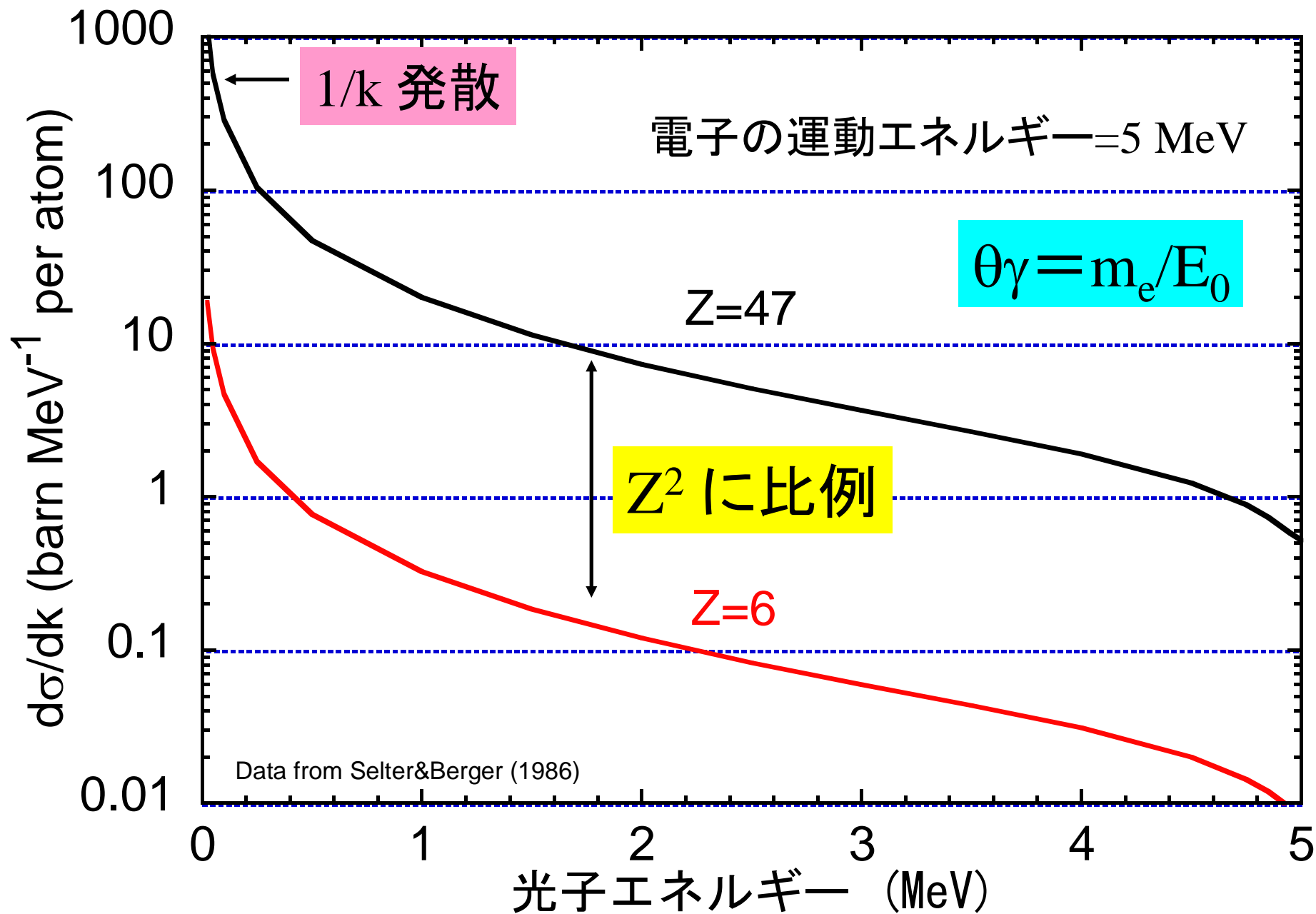
$$E_0 = E + k$$



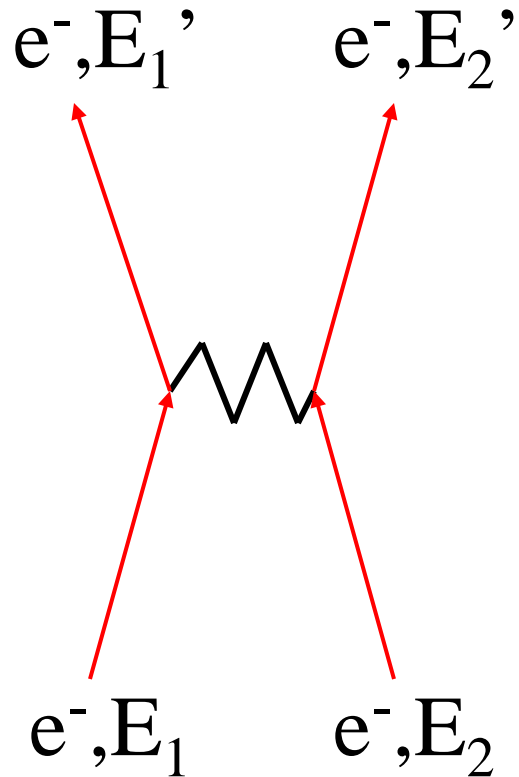
ファインマン図

- 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

制動輻射光子微分断面積例



モラー散乱

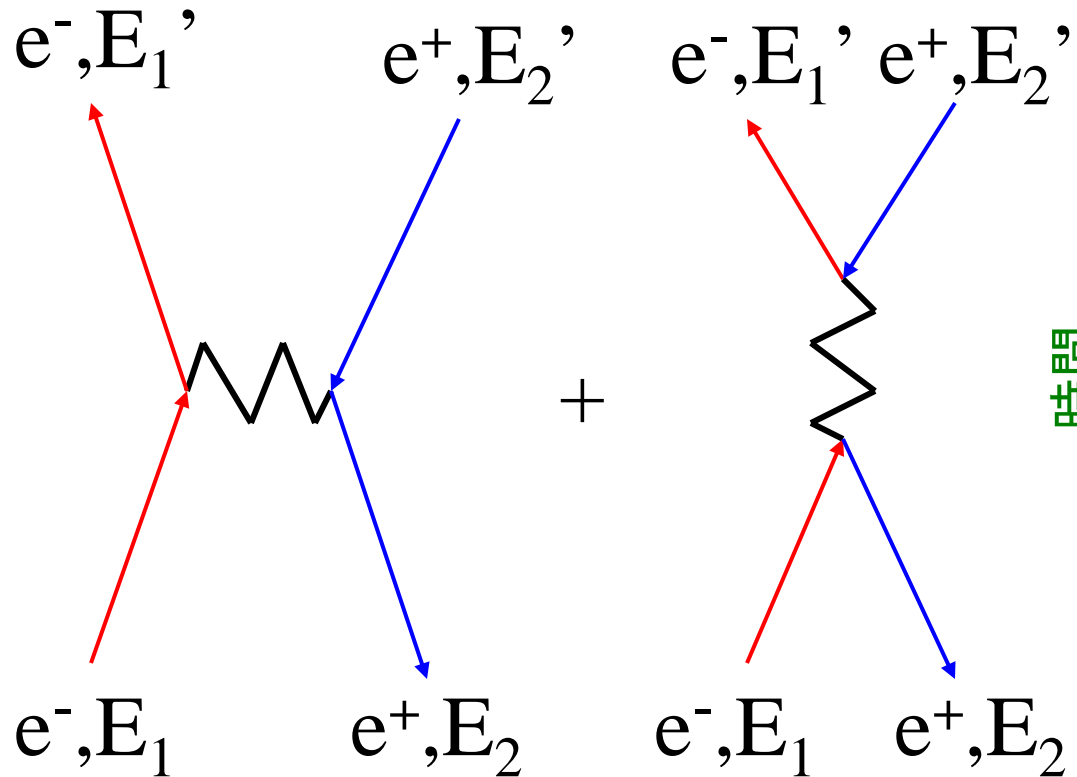


同種粒子:

しきい: $2(AE-RM)$

- $1/v^2$
- Z に比例
- ターゲット e^- は自由

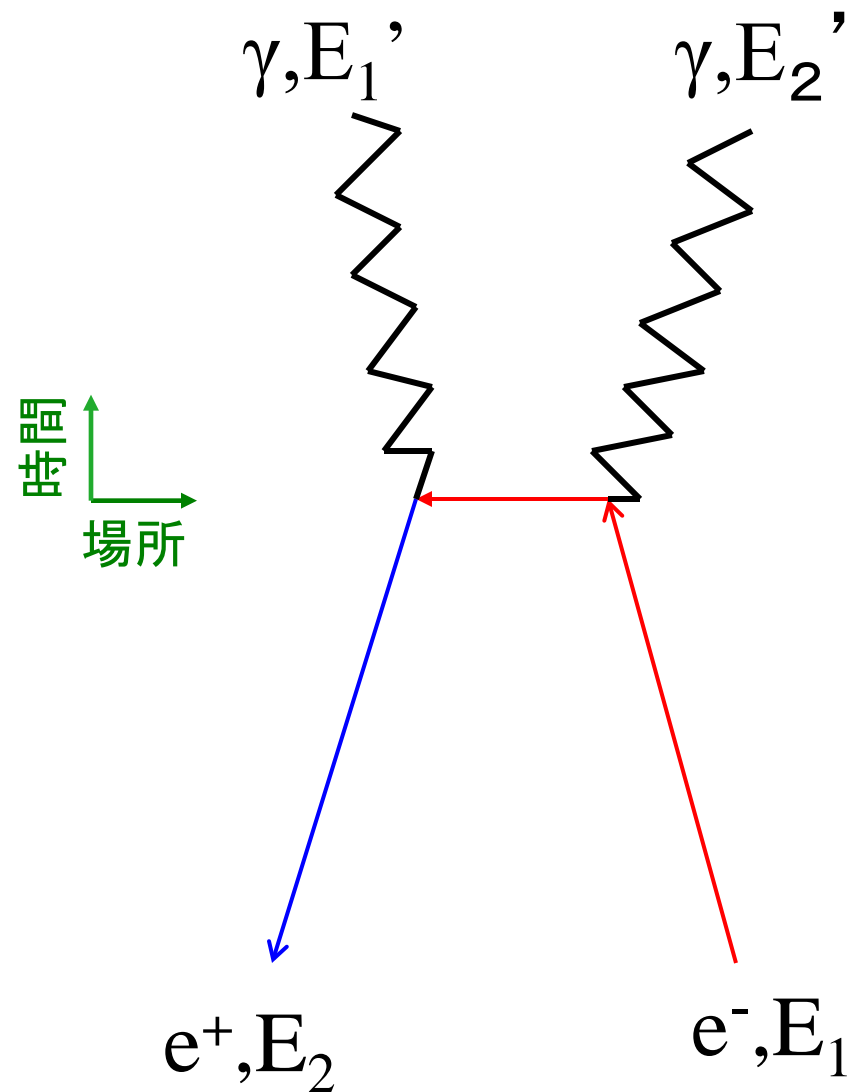
バーバー散乱



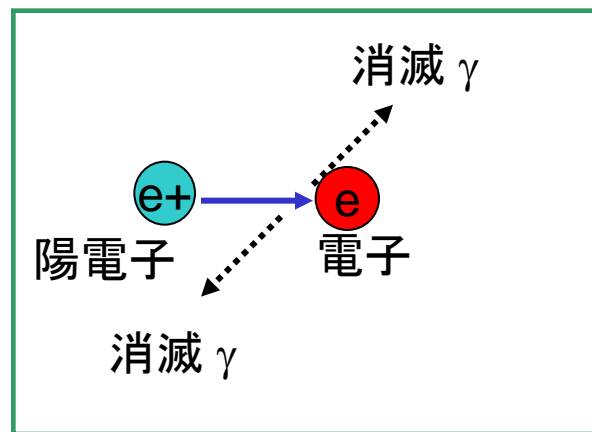
異種粒子: しきい: $AE-RM$

- egs5での詳しい扱い (opt)
 - モラー散乱におけるK-X線生成 (電子衝突電離)

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^+ 停止・消滅
- 残りの移動は無視
- 束縛無視



統計的にグルーピングして扱う相互作用

- 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)

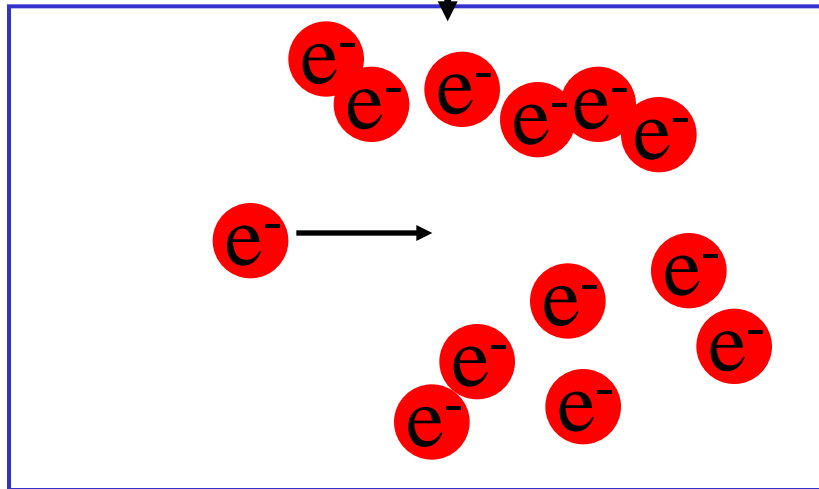
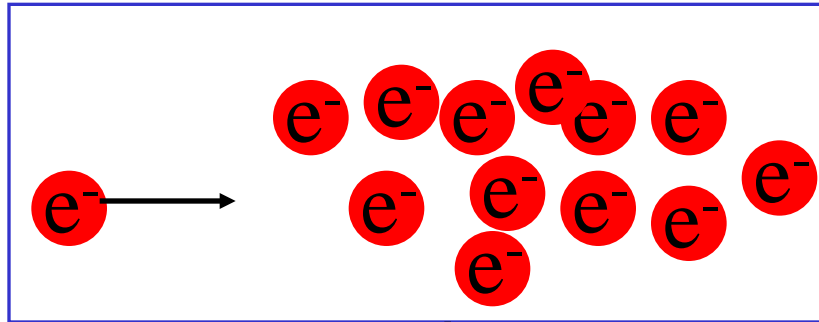
- ベーテ・ブロッホ理論 + 密度効果
- K殻エネルギーの十分上
- 電子数に比例 $\propto Z_{av}$

2. 放射エネルギー損失 (e^\pm 同一視)

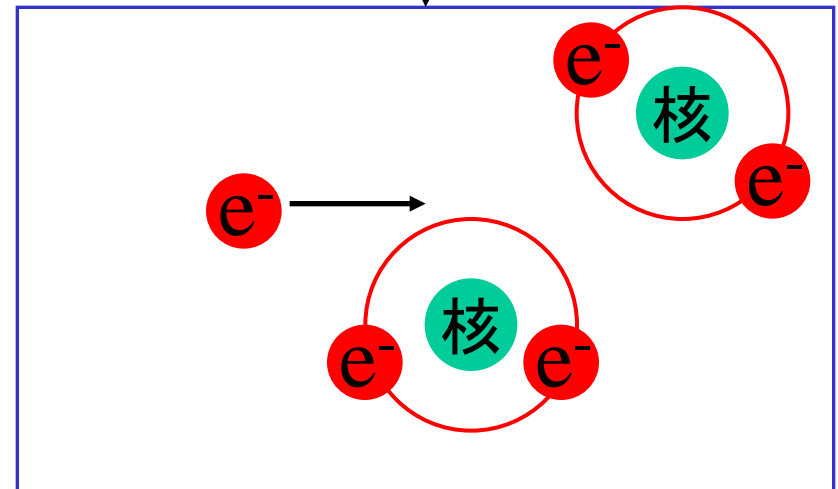
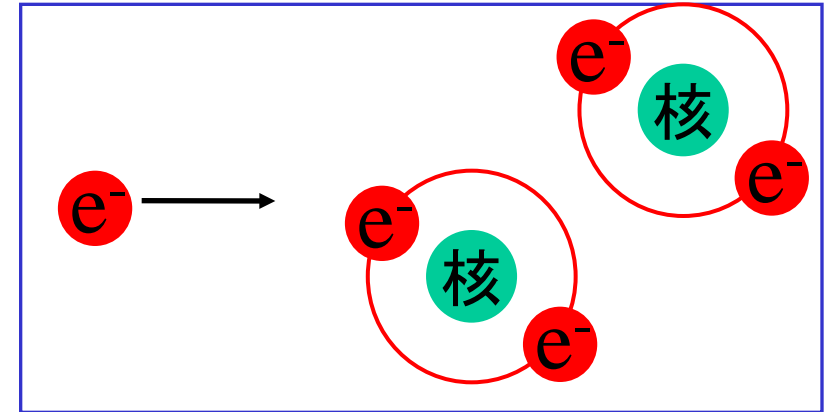
- 制動放射断面積の積分
- 制動放射と同じ近似

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

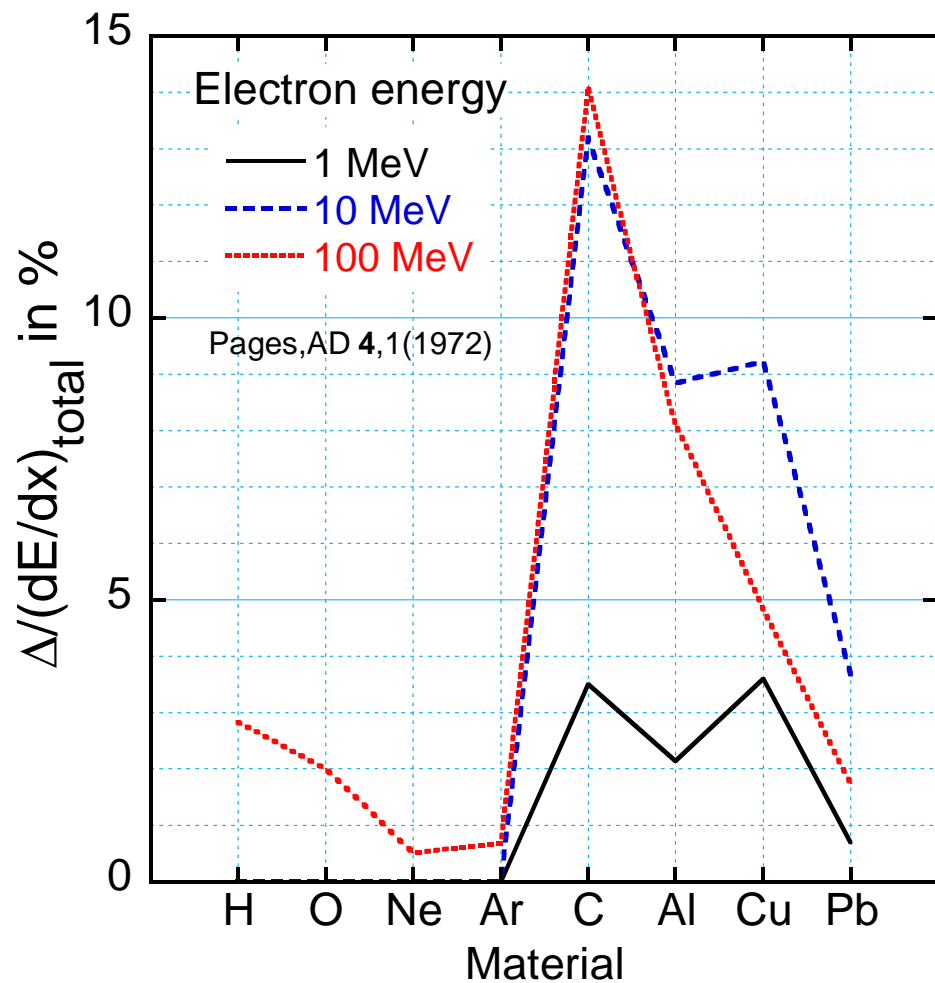
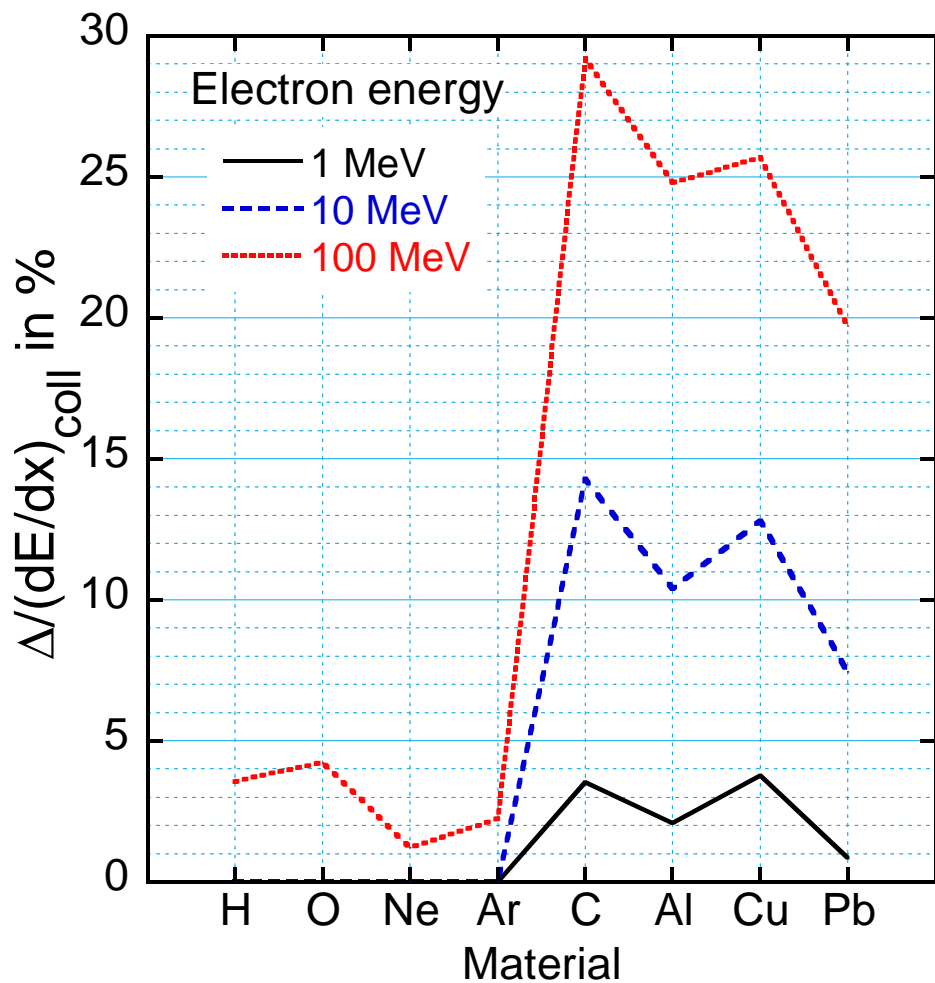


導体での大きな分極 (ex. 黒鉛)



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。(全阻止能誤差 $<2\%$)
 - Z と ρ のみを用いる。

エネルギー吸収

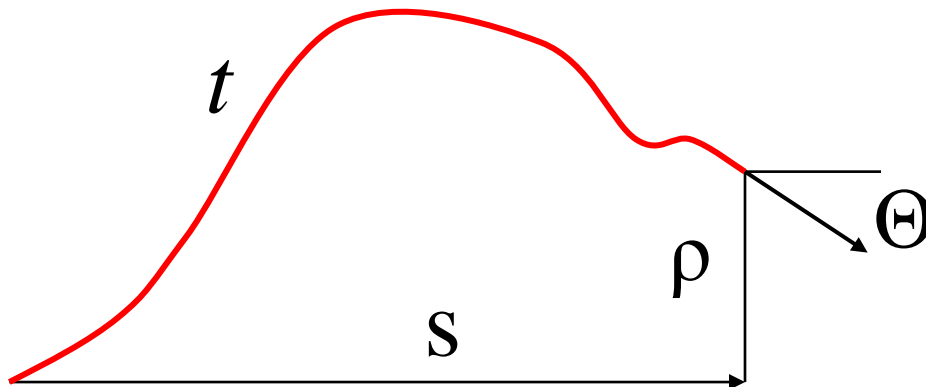
e^{\pm} が「 t 」だけ動くときのエネルギー吸収

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

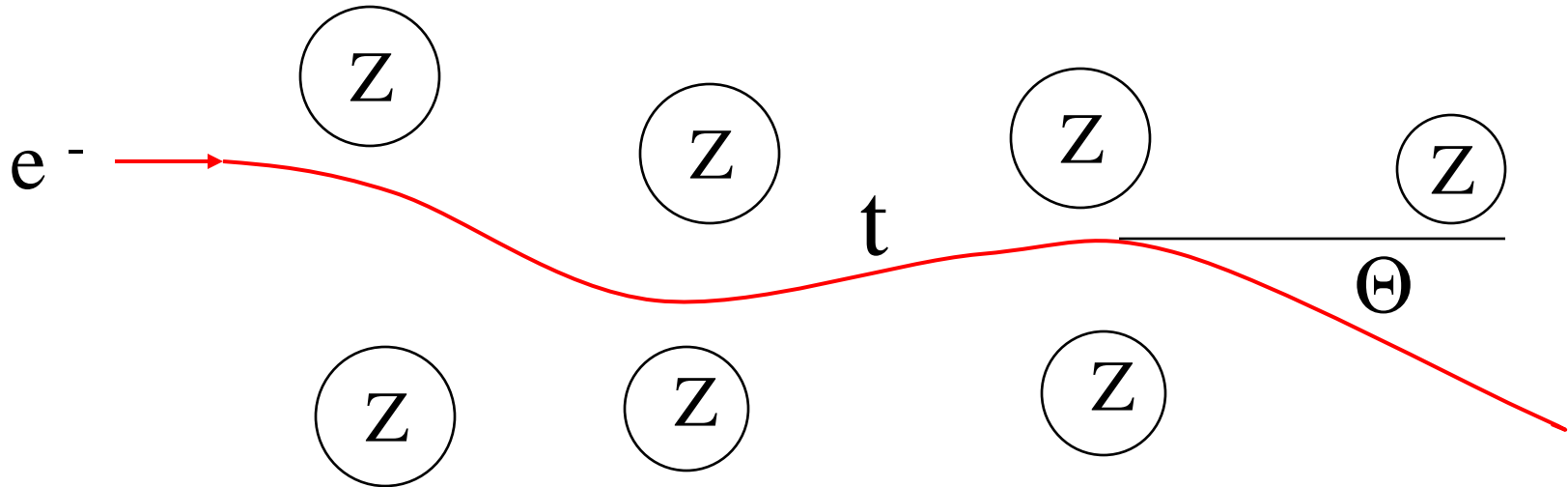
$$-\left(\frac{dE_{\pm}}{dx}\right)_{\text{阻止能}}^{\text{制限付き}} = -\left(\frac{dE_{\pm}}{dx}\right)_{\text{以下の輻射}}^{\text{カットオフ}} - \left(\frac{dE_{\pm}}{dx}\right)_{\text{以下の衝突}}^{\text{カットオフ}}$$

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

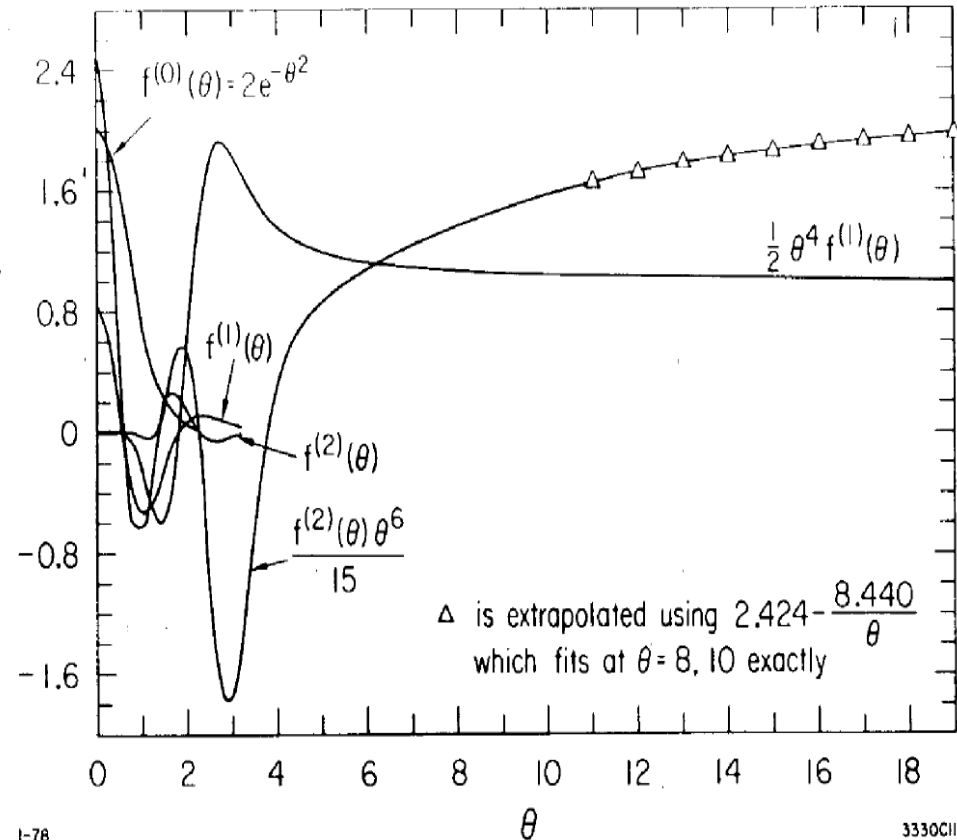
- Fermi-Eyges 理論
- Goudsmit-Saunderson理論 : EGS5
- モリエールの小角長ステップ理論:
EGS4, PRESTA, EGS5

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

- ルジャンドル関数で散乱断面積を展開
- 係数 $f(E, Z, t, \theta) \rightarrow$ 大きなデータベースが必要
- すべての散乱角で正確(制限なし)

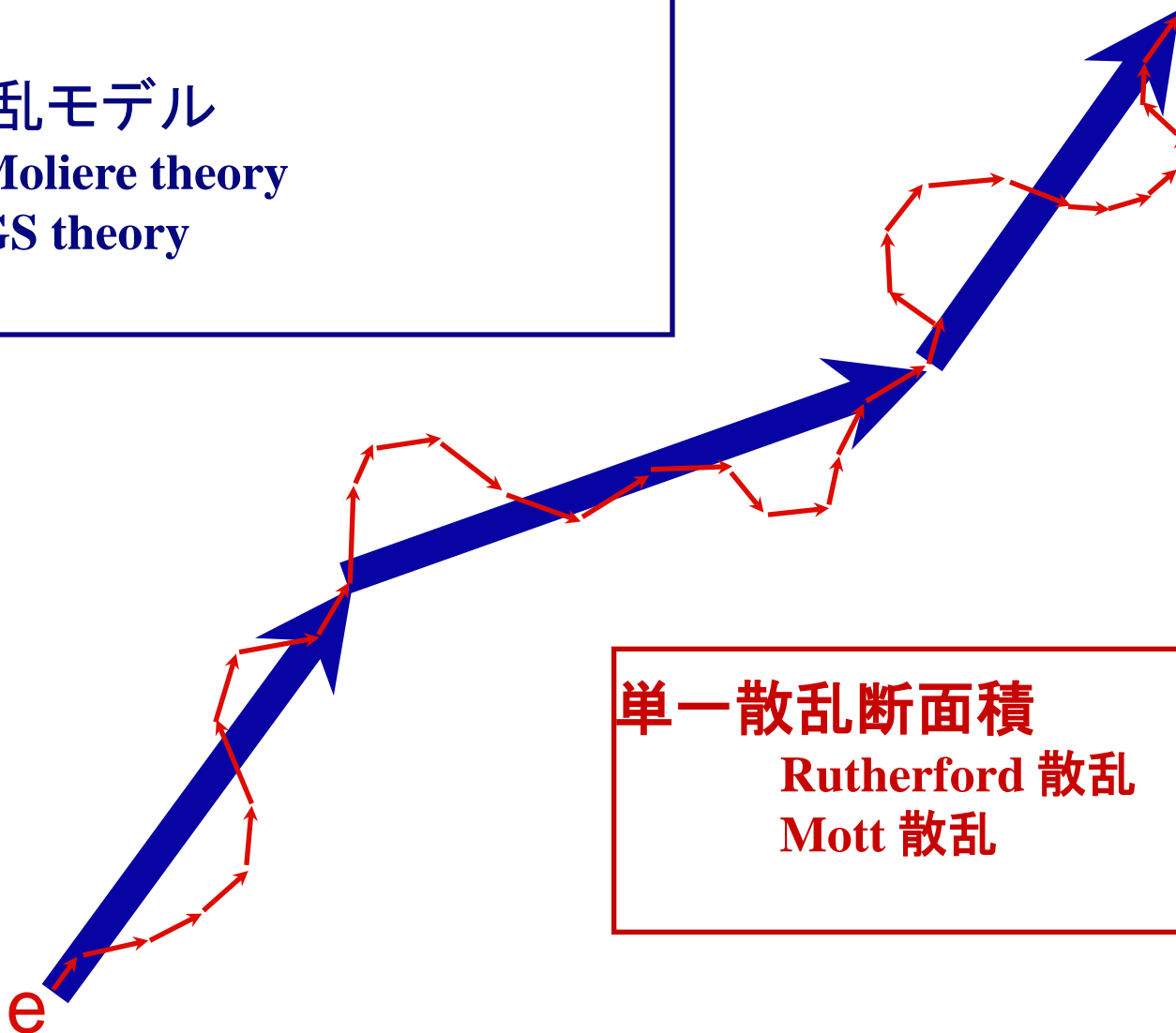
Moliere 理論 (中精度, 中制限, 簡単)

- 散乱角 $\Theta(E, Z, t)$ 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)



単一散乱と多重散乱の概念図

多重散乱モデル
Moliere theory
GS theory

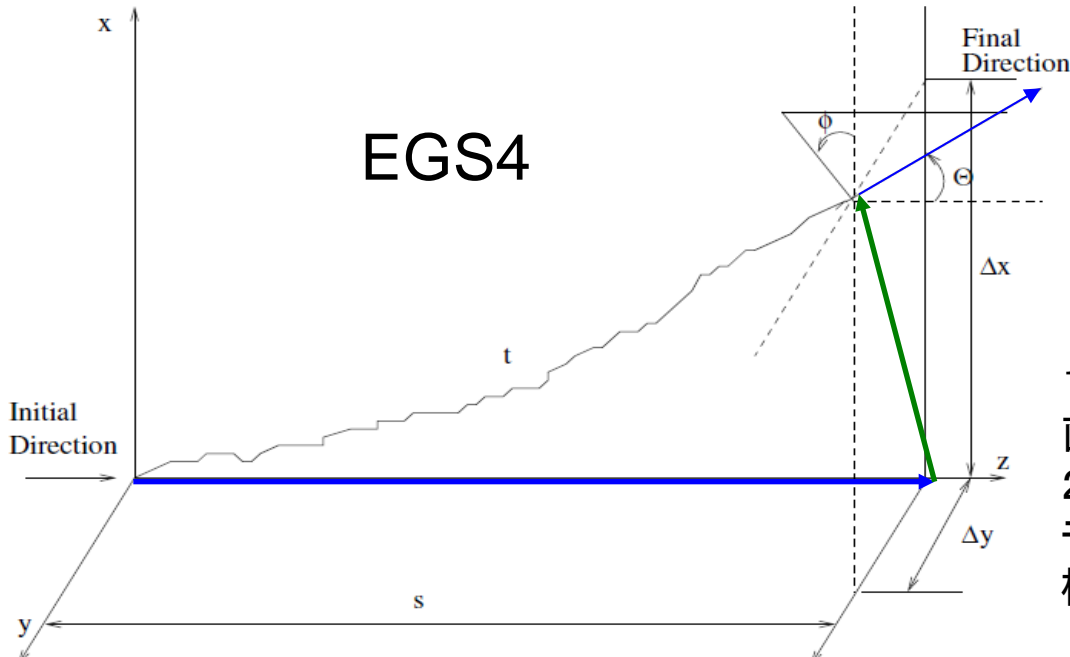


単一散乱断面積
Rutherford 散乱
Mott 散乱

EGS5の電子輸送

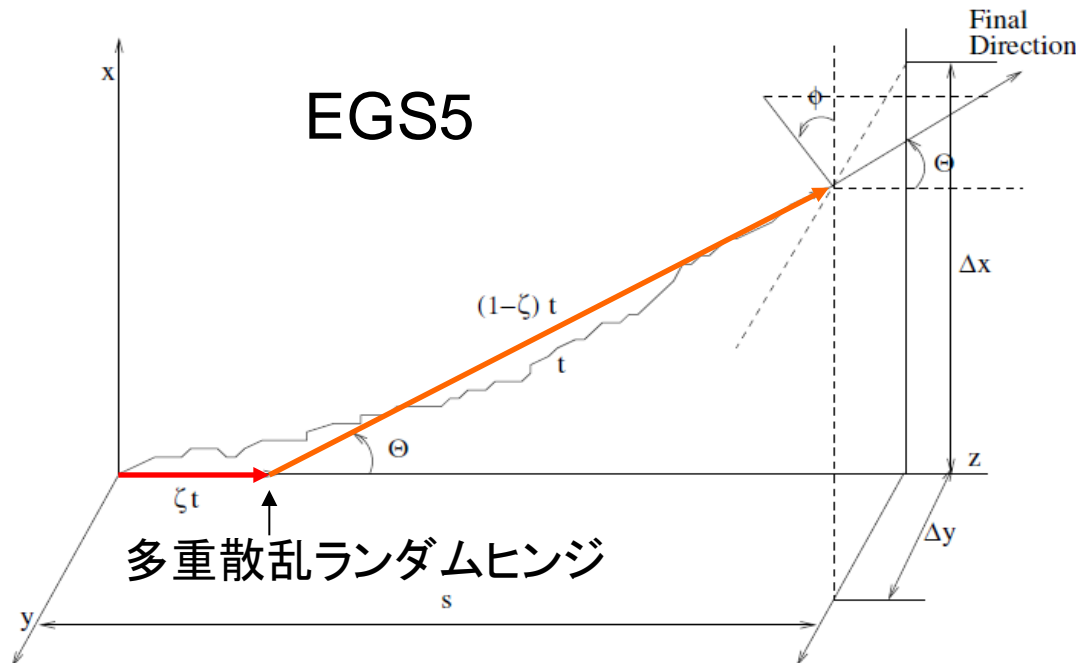
- 弾性散乱断面積
 - Rutherford CS (Default)(=EGS4)
 - 原子核と電子の間のクーロン相互作用
 - Mott CS
 - スピン相対論効果を考慮。
- 多重散乱
 - Moliere 理論 (Default)(=EGS4)
 - Goudsmit-Saunderson theory (GS)
- 多重散乱ステップ内での輸送機構
 - 二重蝶番 (Dual Hinge)

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)

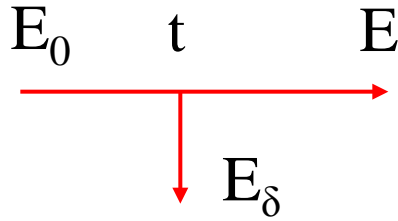
EGS5のステップ内輸送機構(2)

- ζt と $(1-\zeta)t$ からなるヒンジモデルの代わりに、
scattering strength $\zeta K_1(t)$ と $(1-\zeta)K_1(t)$ からなるヒンジモデルを用いる。
 - エネルギー損失を考慮するため。
- “**エネルギー損失ヒンジ**” を導入し、 K_1 を求めるための G_1 の積分を単純化
 - エネルギー損失ヒンジ間でエネルギーは不変
- “**Characteristic dimension**” を導入し、適切なステップ長の設定を容易に。

Simple

Accurate

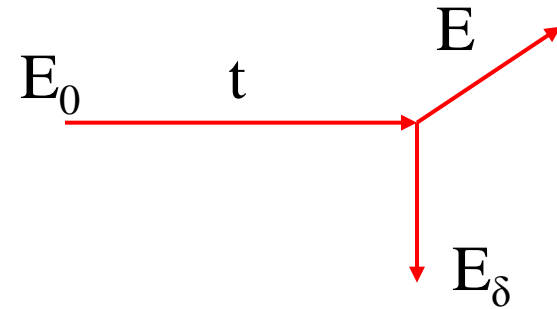
クラス I (ITS,MCNP)
相関なしのエネルギー損失



$$E = E_0 - \Delta E(t)$$

$$E_{\text{dep}} = \Delta E(t) - E_\delta$$

クラス II (EGS, Penelope)
相関ありのエネルギー損失



$$E = E_0 - t L_{\text{col}}^{\text{AE}} - E_\delta$$

$$E_{\text{dep}} = t L_{\text{col}}^{\text{AE}}$$

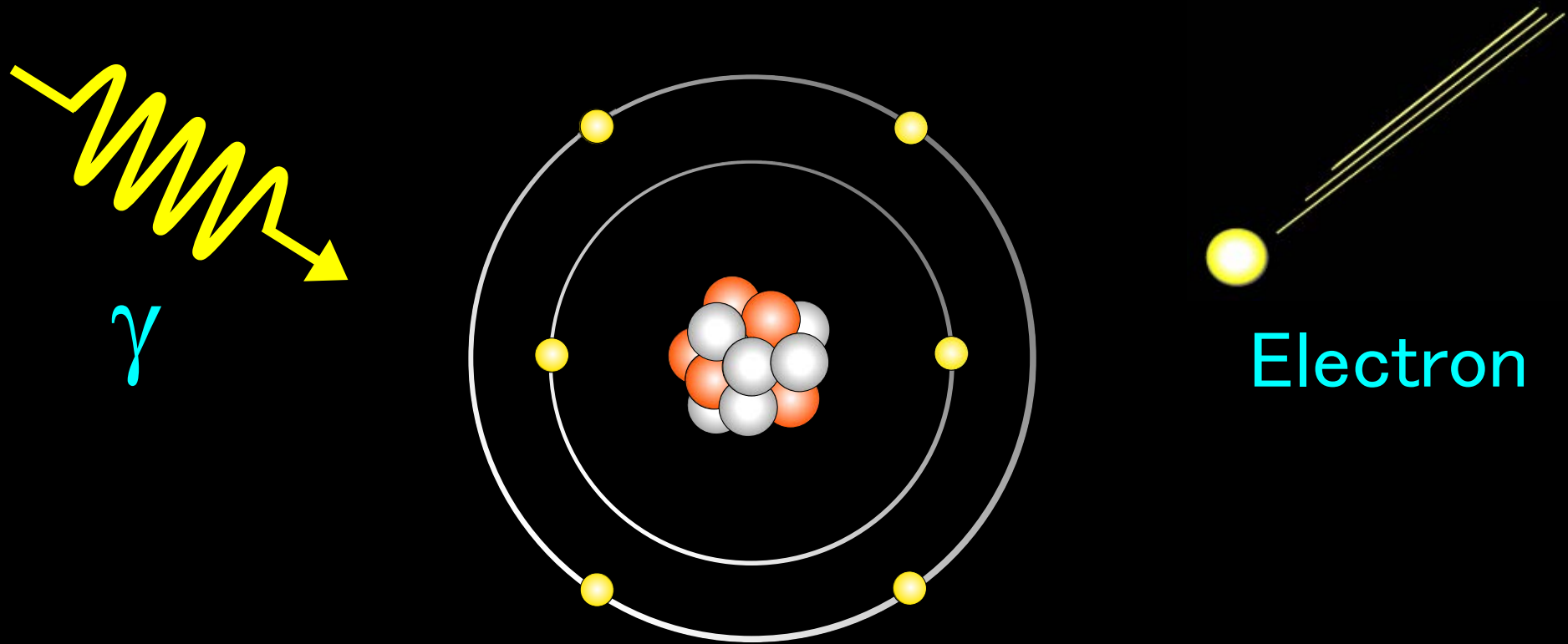
- $\Delta E(t)$: エネルギー損失ストラグリング分布からサンプリングしたエネルギー損失
- $L_{\text{col}}^{\text{AE}}$: AE以下の2次粒子に対する制限付き衝突阻止能

t : 固定長さ (最大エネルギーの関数) @ITS,
変数 @ EGS, Penelope

電子輸送モデルの比較

コード	スピン	M.S. モデル	Class	ステップ内輸送機構
EGS5	×	Moliere	2	Dual Hinge Characteristic dimension
	○	GS		
EGSnrc	○	GS	2	1回散乱の分離.
Penelope	○	GS	2	Dual Hinge 大角散乱の分離
ITS 3.0 #	○	GS	1	

Adopted as electron transport of MCNP



光子と電子の反応対象

単一の原子、電子、原子核

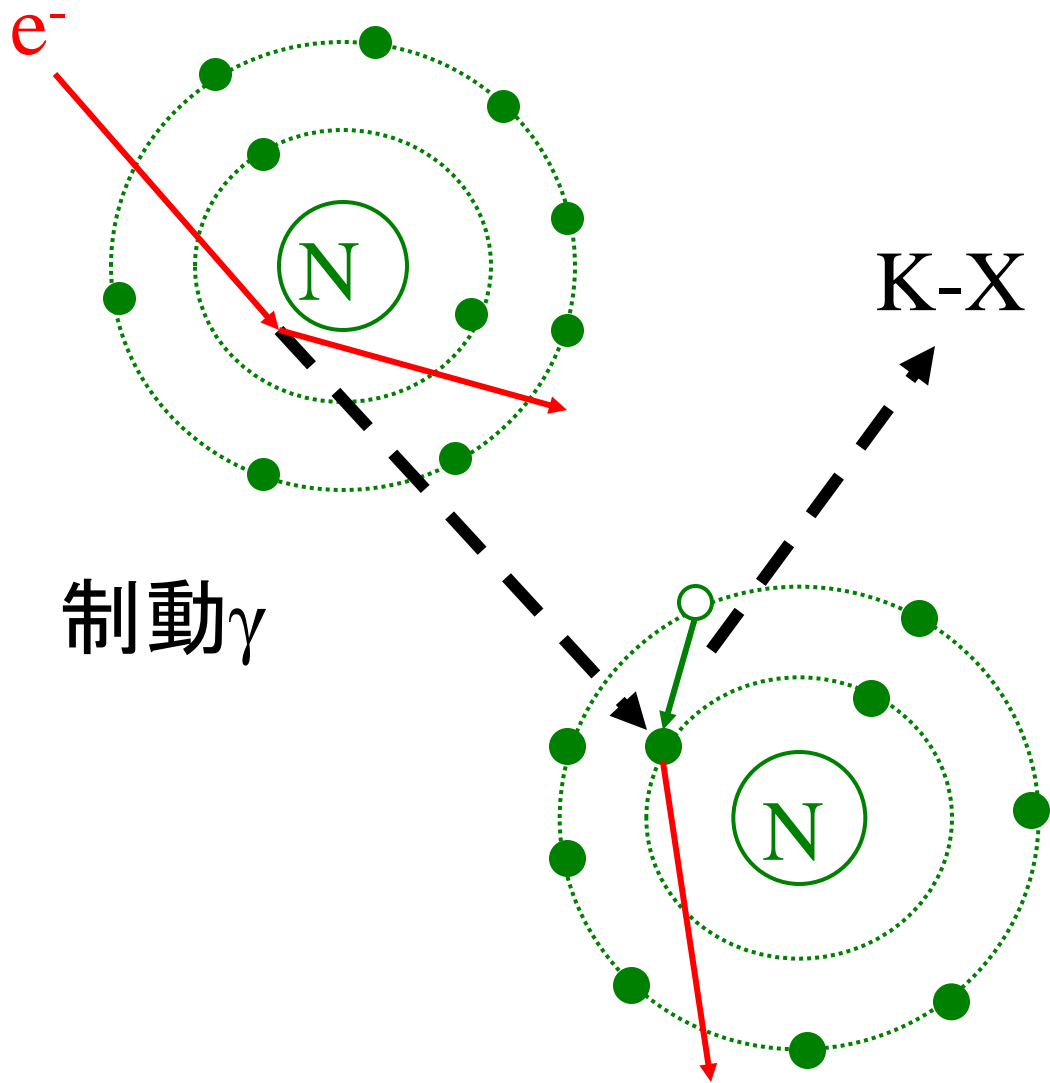
例外

- 密度効果
- レイリー散乱における干渉効果

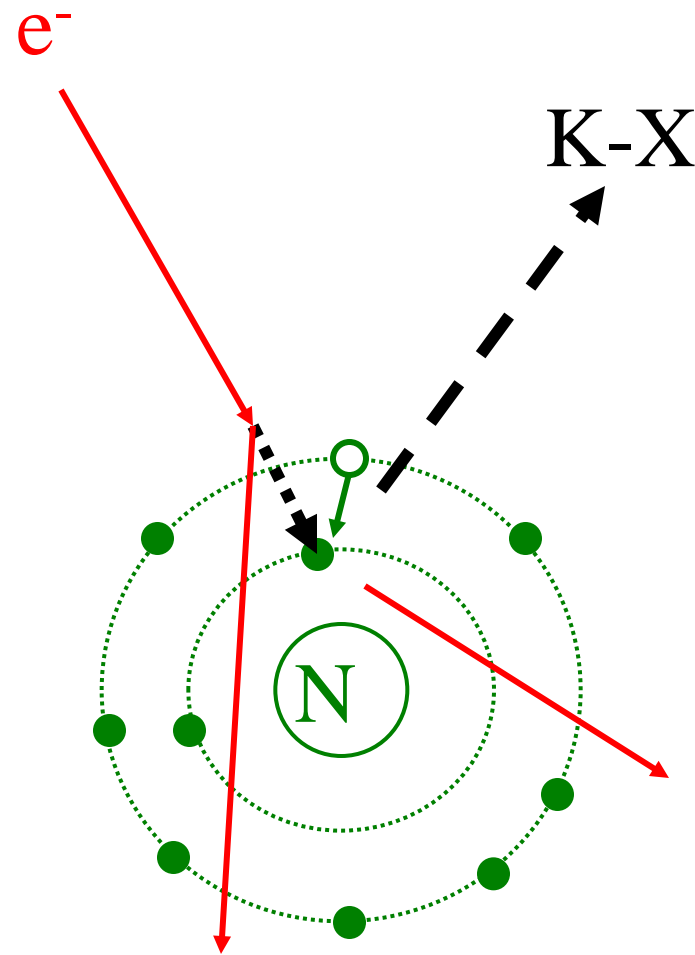
補足

- 電子衝突電離
- α, β, γ 線のしゃへい

電子衝突電離 (EII)



制動 γ \rightarrow 光電効果



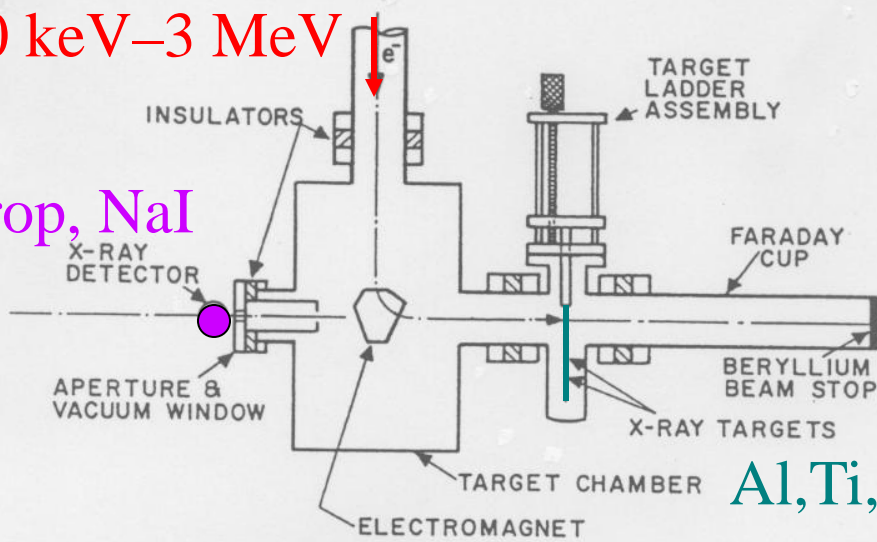
EII

Dick et al (1973)'s exp set up

10 keV–3 MeV

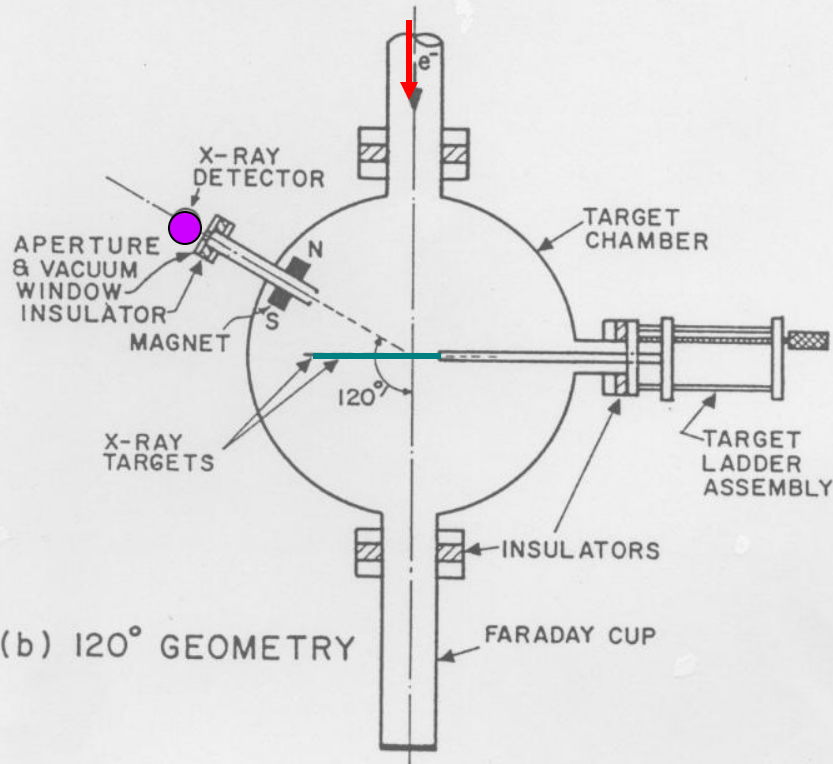
e^-

Prop, NaI



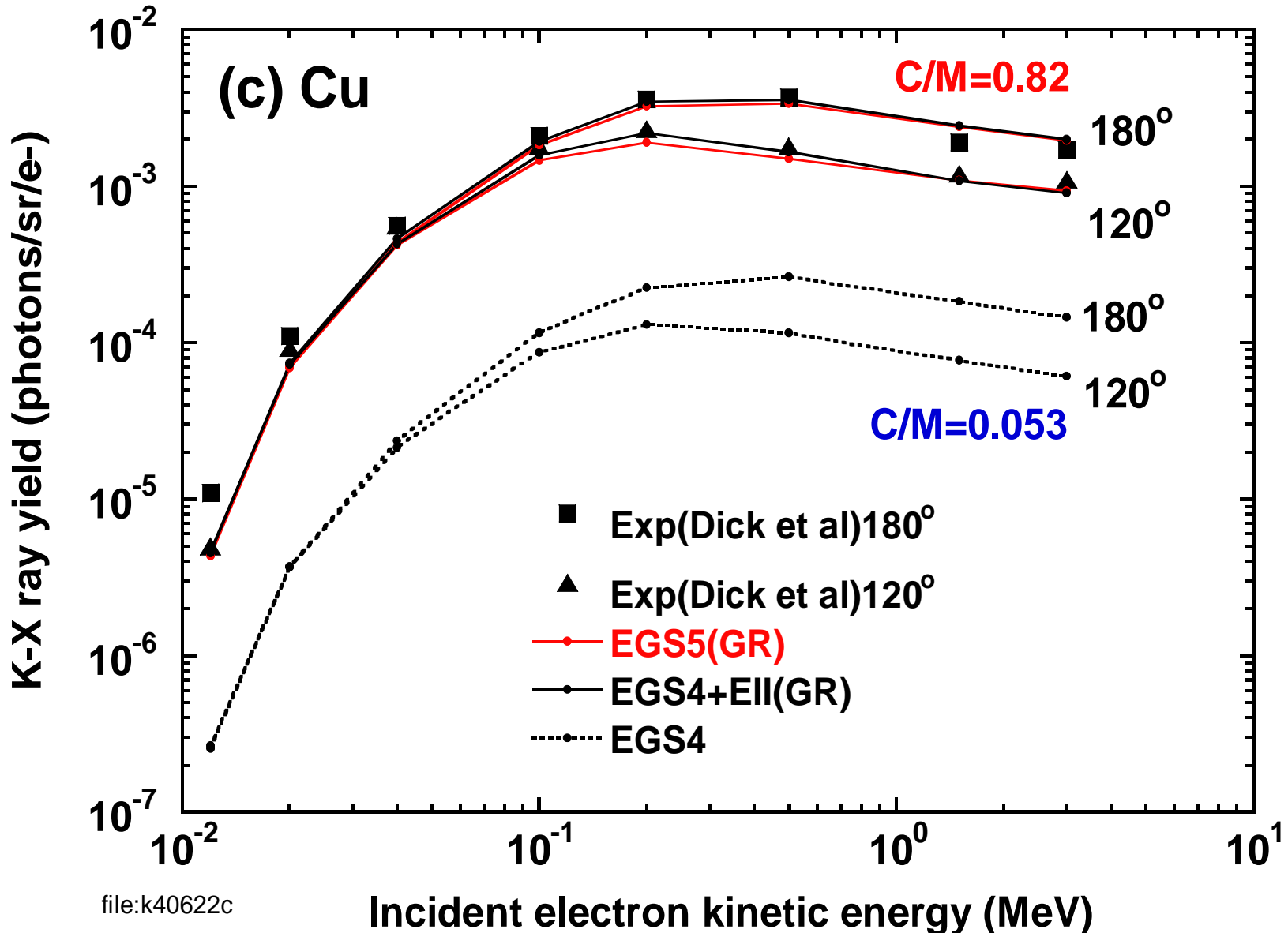
Al, Ti, Cu, Ag, Au

(a) 180° GEOMETRY



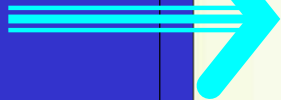
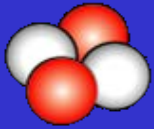
(b) 120° GEOMETRY

K X-ray yield for Cu



紙 アルミ板 鉛ブロック

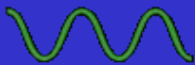
α ray



β ray



γ ray



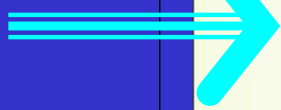
放射線の透過

紙

アルミ板

鉛ブロック

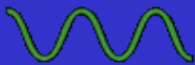
α ray



β ray



γ ray



Implicit feeling

Low Z

Middle Z

HighZ

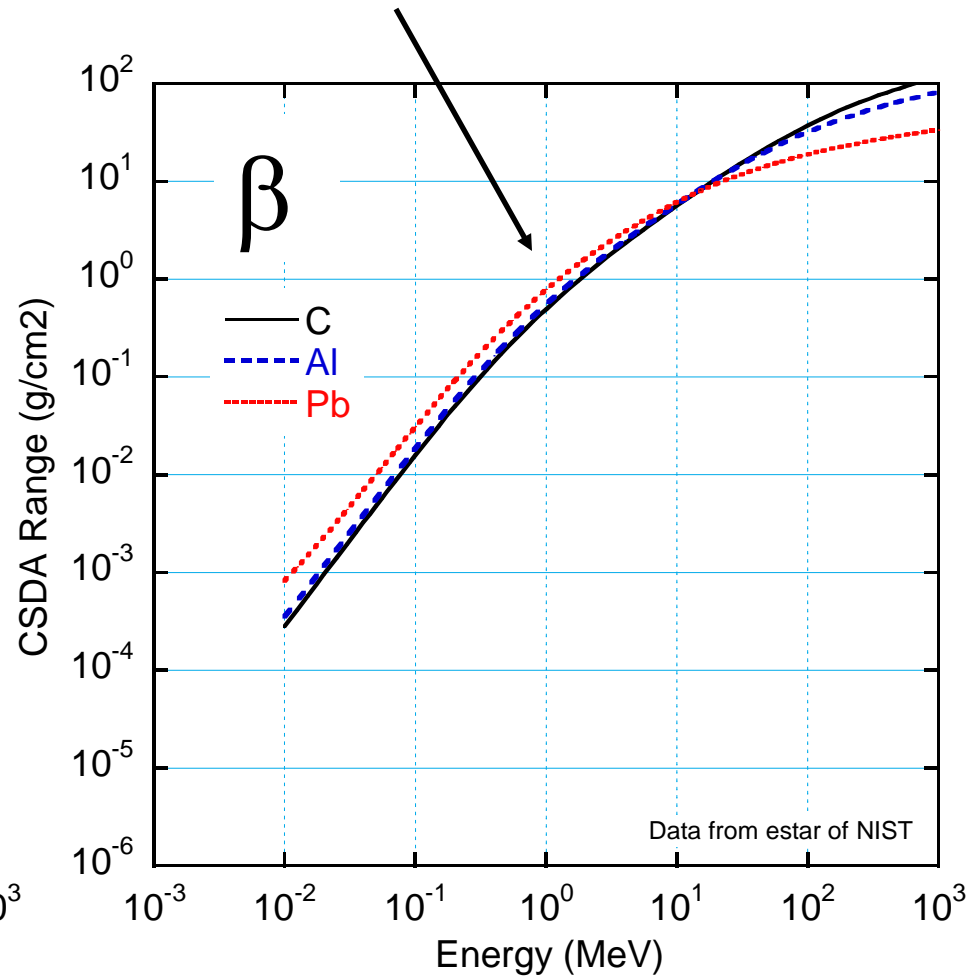
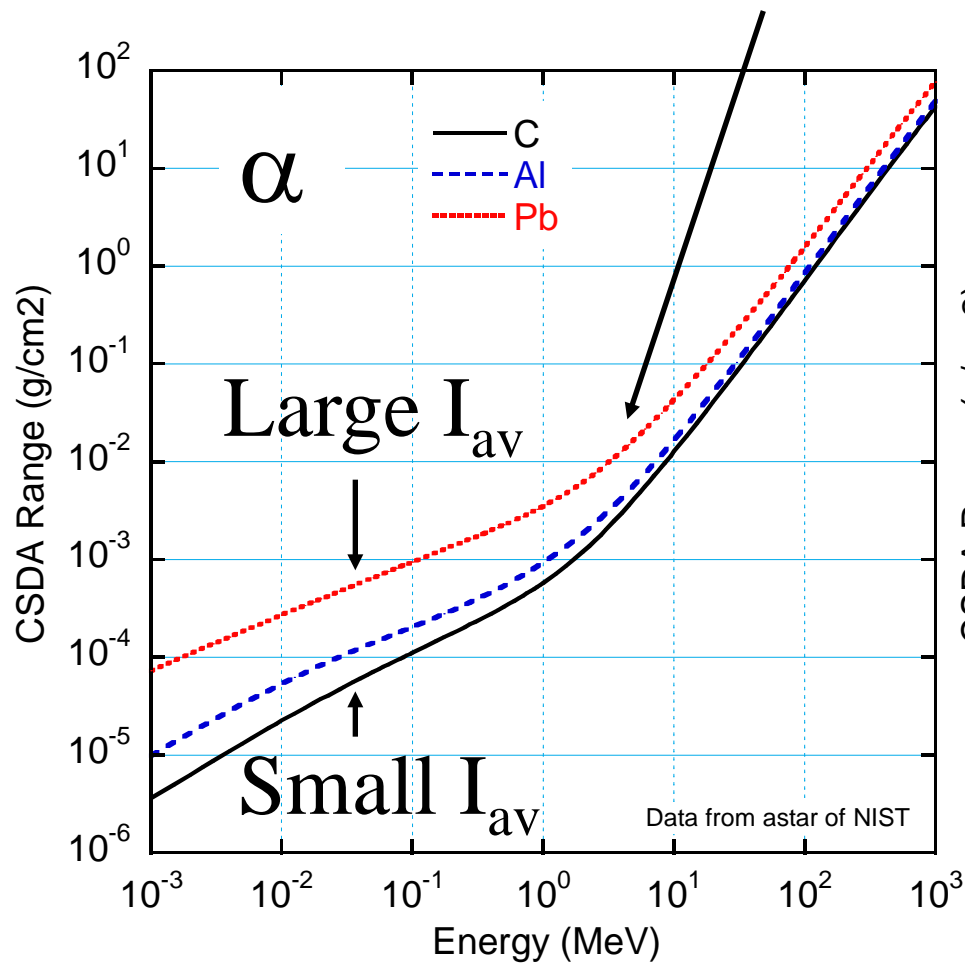
Long range

Middle range

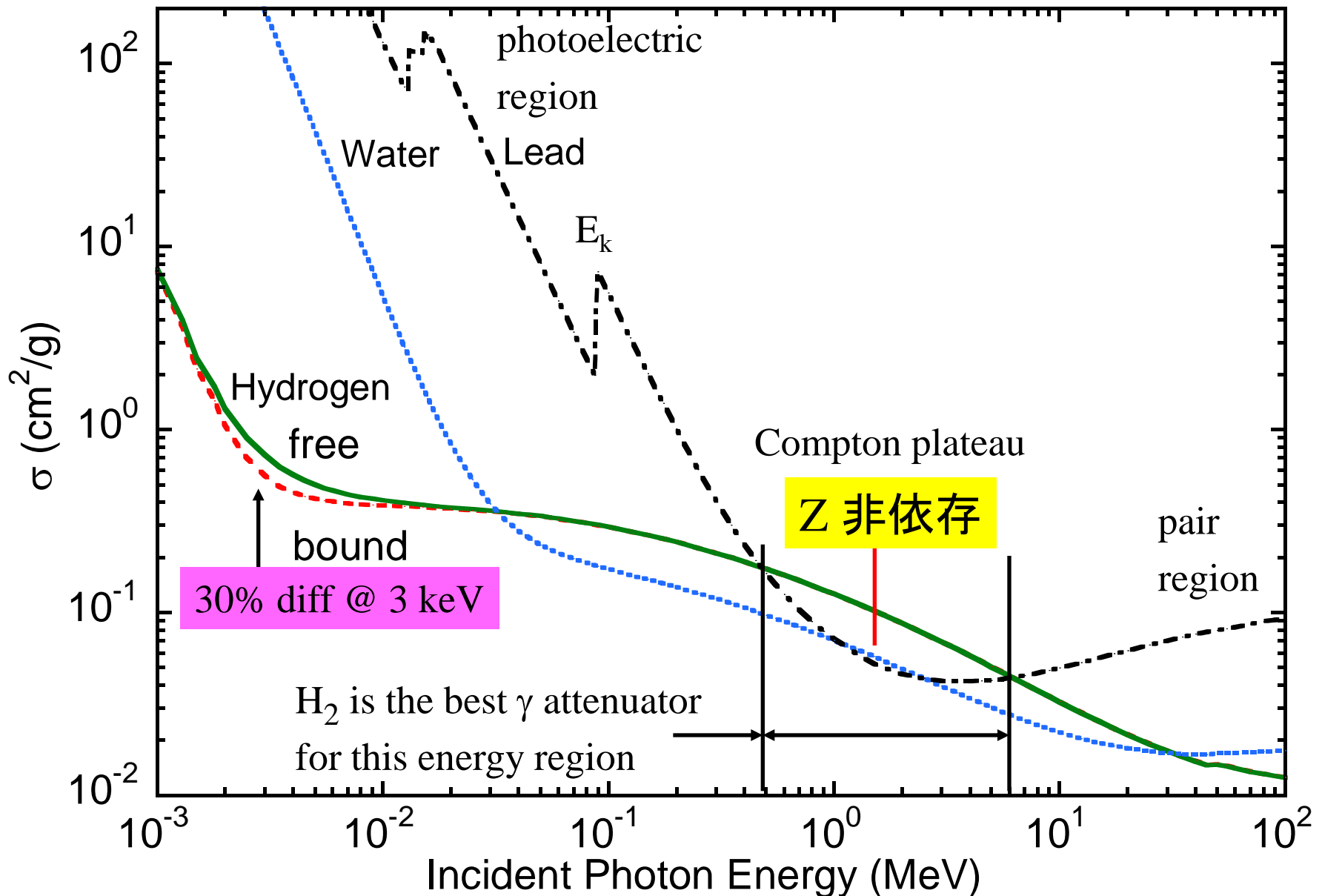
Short MFP

α 線と β 線のCSDA飛程

(ほとんど) Z非依存



Total photon Σ vs γ -energy



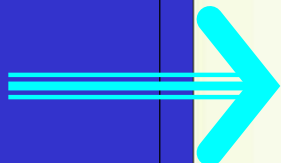
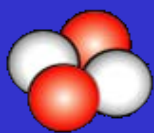
放射線の透過

紙

アルミ板

鉛ブロック

α ray



β ray



γ ray



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