

電子後方散乱の モンテカルロ計算と実験の比較

総研大 桐原 陽一

KEK 波戸 芳仁、平山 英夫、岩瀬 広

背景と目的

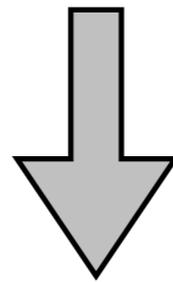
電子後方散乱

- 電磁モンテカルロコード電子輸送ベンチマークとして有用

コードが採用しているモデルの差が出やすい

- いろいろな測定法で多くの実験が行われている

実験データ間で差異が有る



実験データとコードおよびモデルの相互比較
計算モデルの改良

過去の電子後方散乱実験

測定方法

- ターゲットに電子を照射し、後方に散乱された電子を測定する

検出器

- ファラデーカップ、電離箱
Si検出器、EPMA*

入射エネルギー

- 4 keV ~ 14 MeV

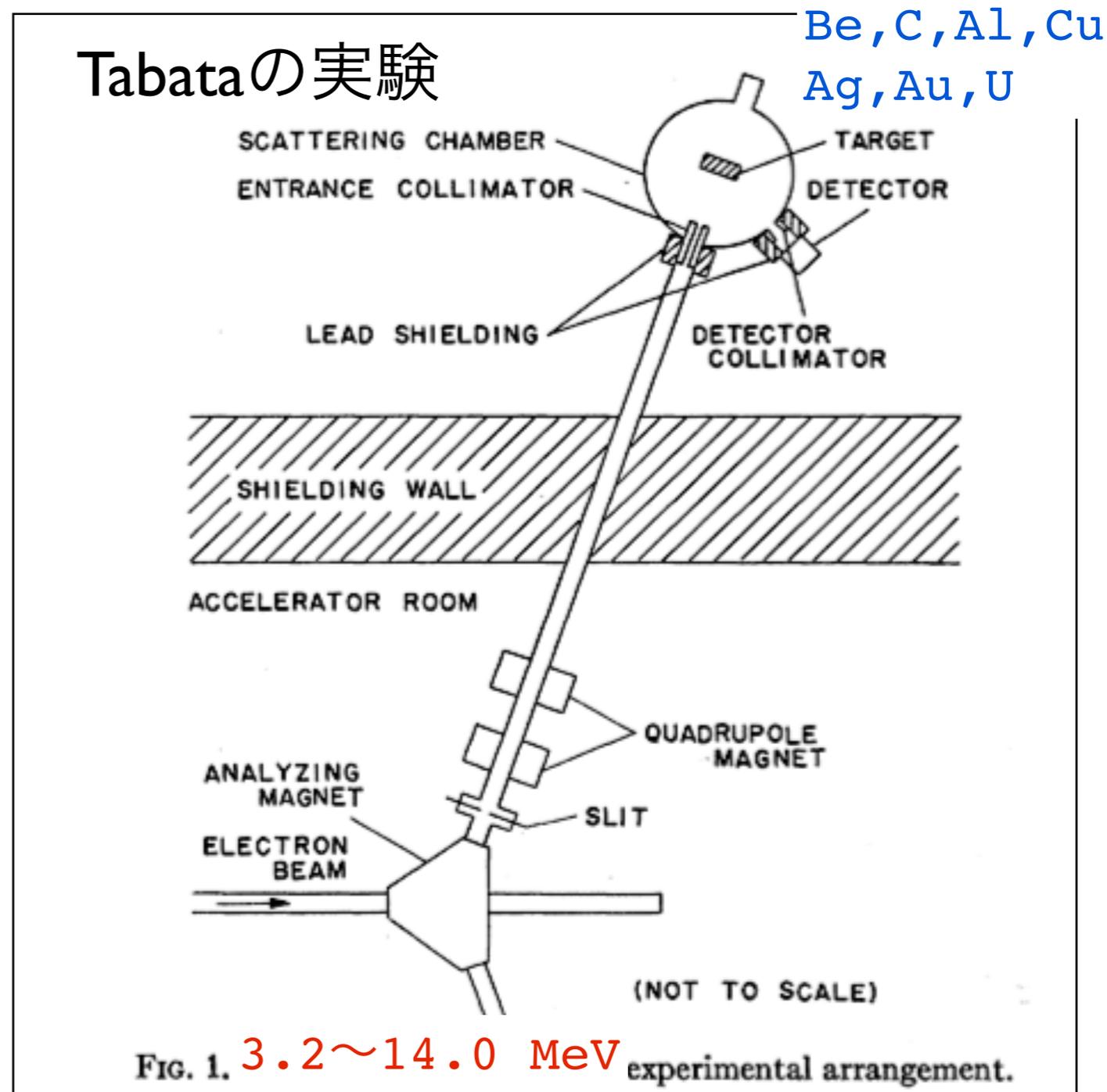
ターゲット

- Be(low Z) ~ U(high Z)
- 厚さは半無限厚

測定量

- 数、エネルギー

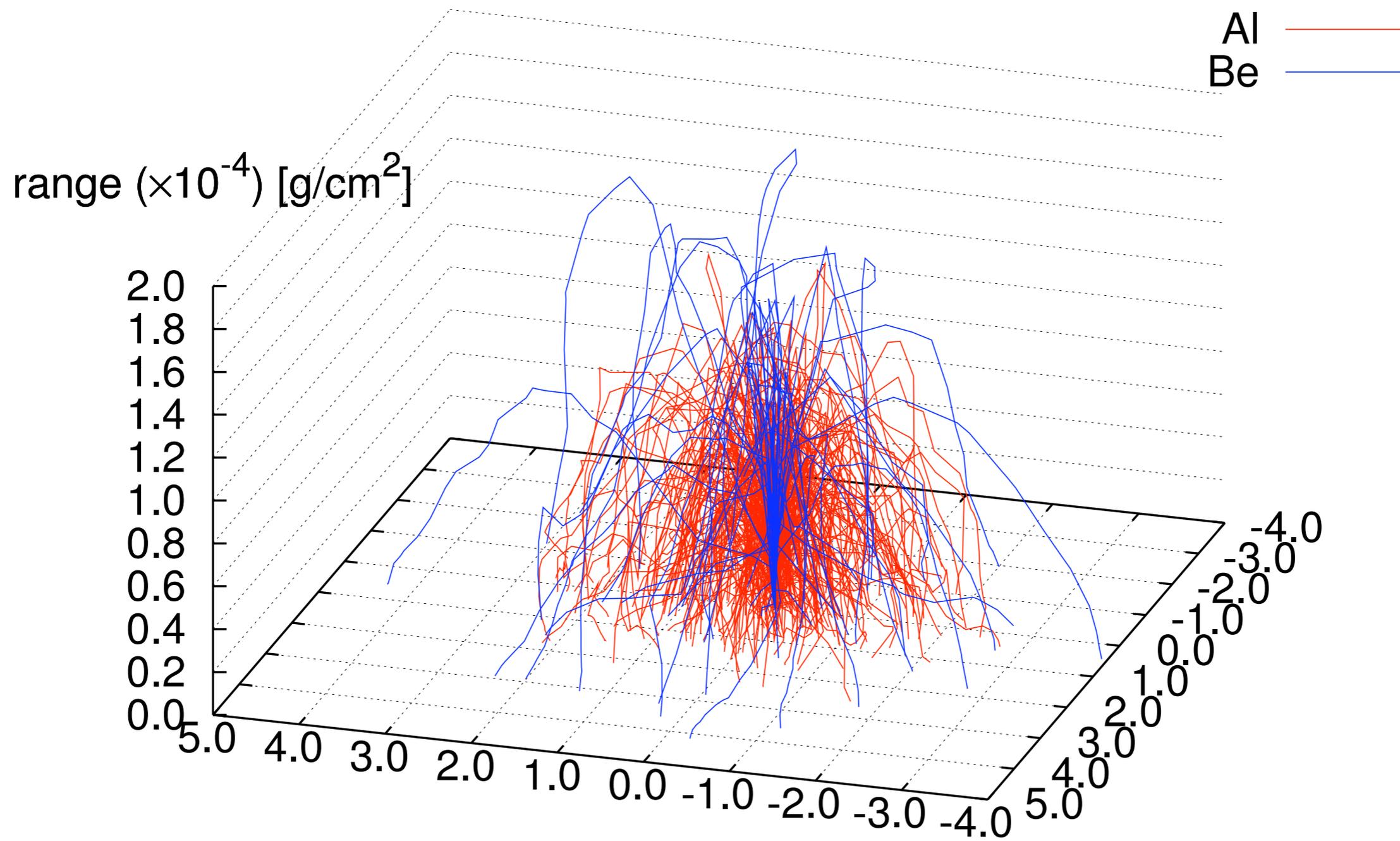
*電子線マイクロプロープアナライザー



T.Tabata, Phys. Rev. 162, 336 (1967)

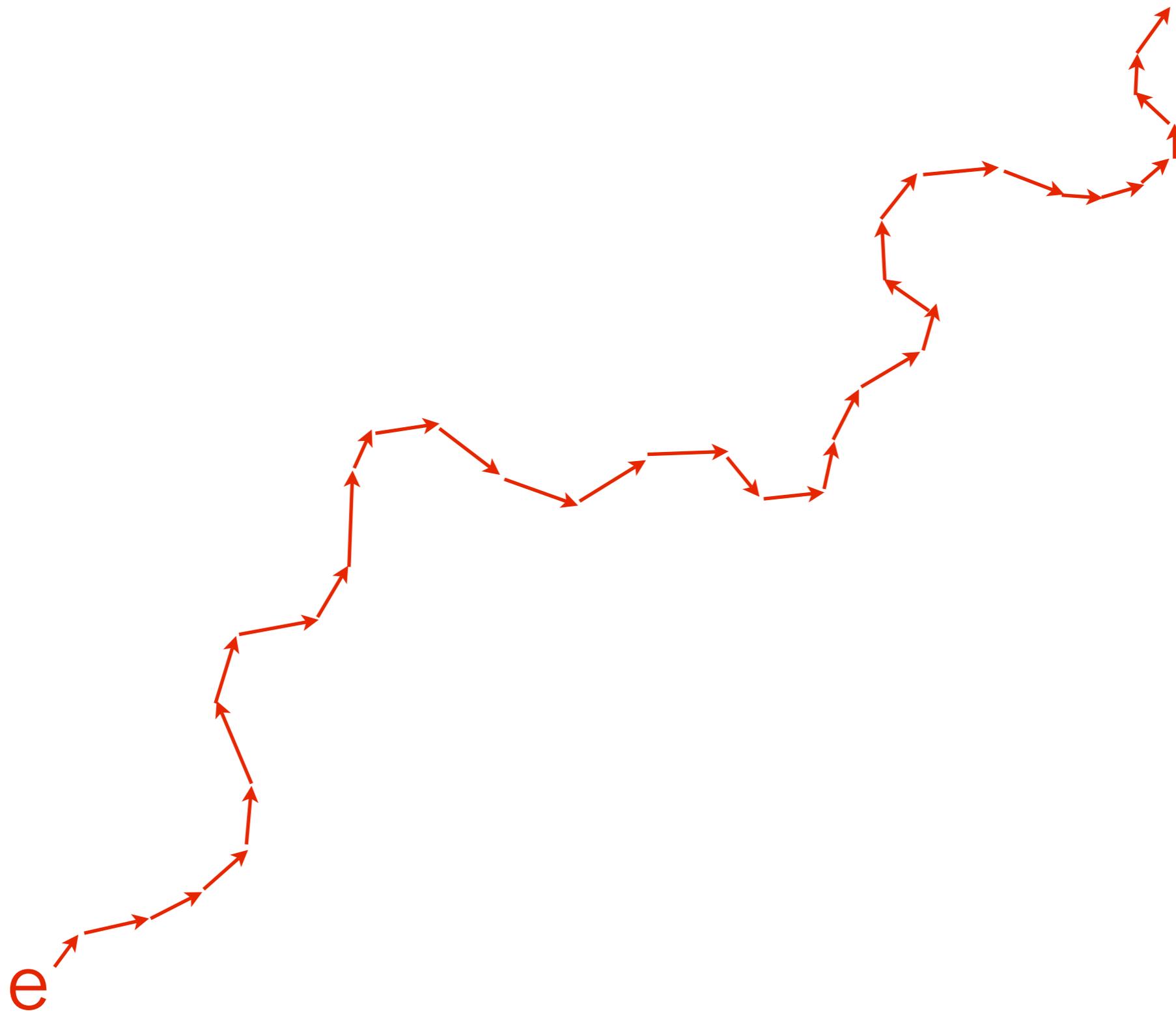
電子輸送散乱モデル

後方散乱電子の軌跡

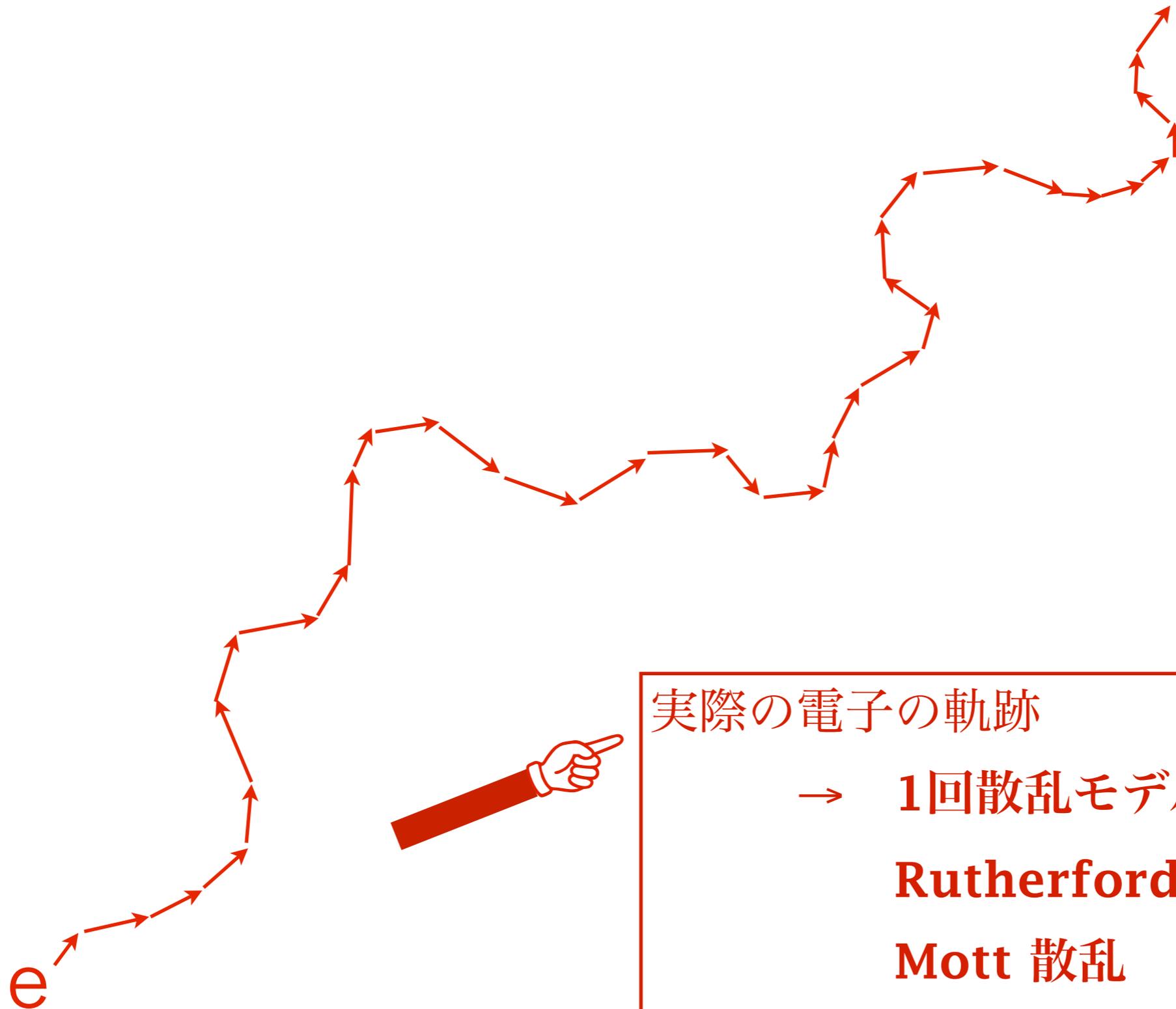


電子の散乱モデル

電子の散乱モデル



電子の散乱モデル



実際の電子の軌跡

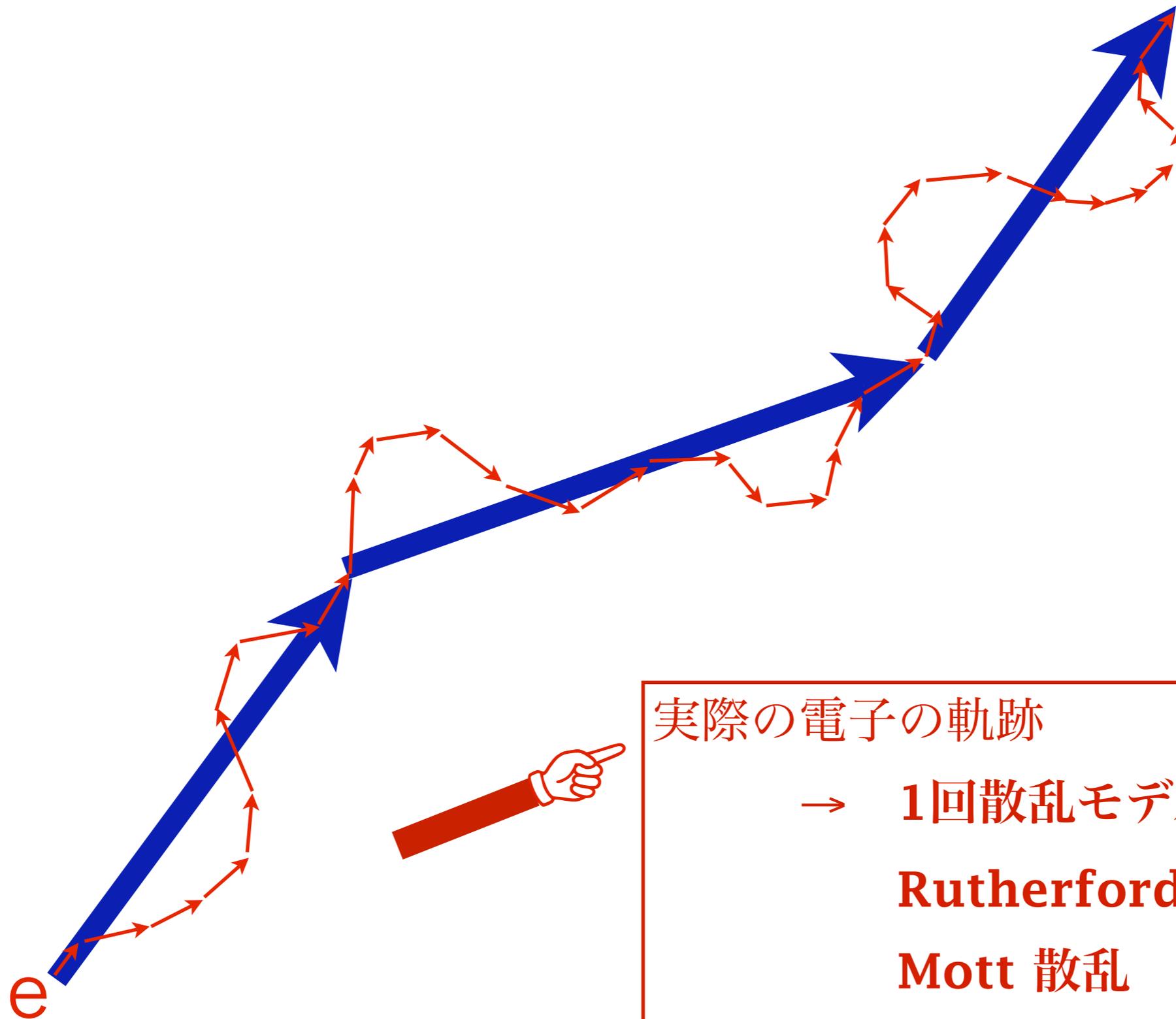
→ 1回散乱モデルで再現できる

Rutherford 散乱

Mott 散乱

微小区間のため全てを再現するにはコスト高

電子の散乱モデル



実際の電子の軌跡

→ 1回散乱モデルで再現できる

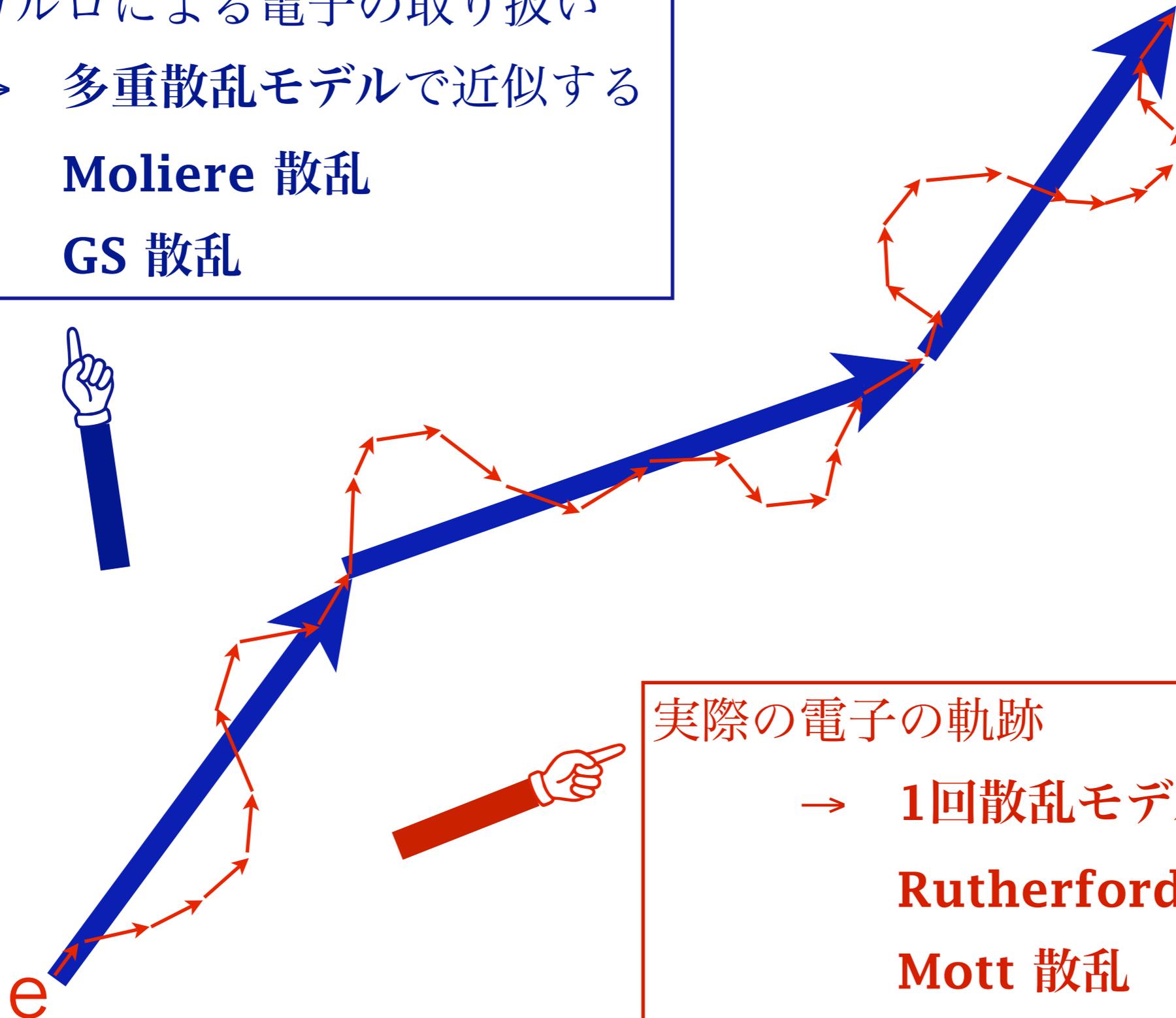
Rutherford 散乱

Mott 散乱

微小区間のため全てを再現するにはコスト高

電子の散乱モデル

モンテカルロによる電子の取り扱い
→ 多重散乱モデルで近似する
Moliere 散乱
GS 散乱



実際の電子の軌跡
→ 1回散乱モデルで再現できる
Rutherford 散乱
Mott 散乱

微小区間のため全てを再現するにはコスト高

多重散乱モデル

電子が物質を通過するとき、原子核との多数の弾性散乱をモデル化したもの

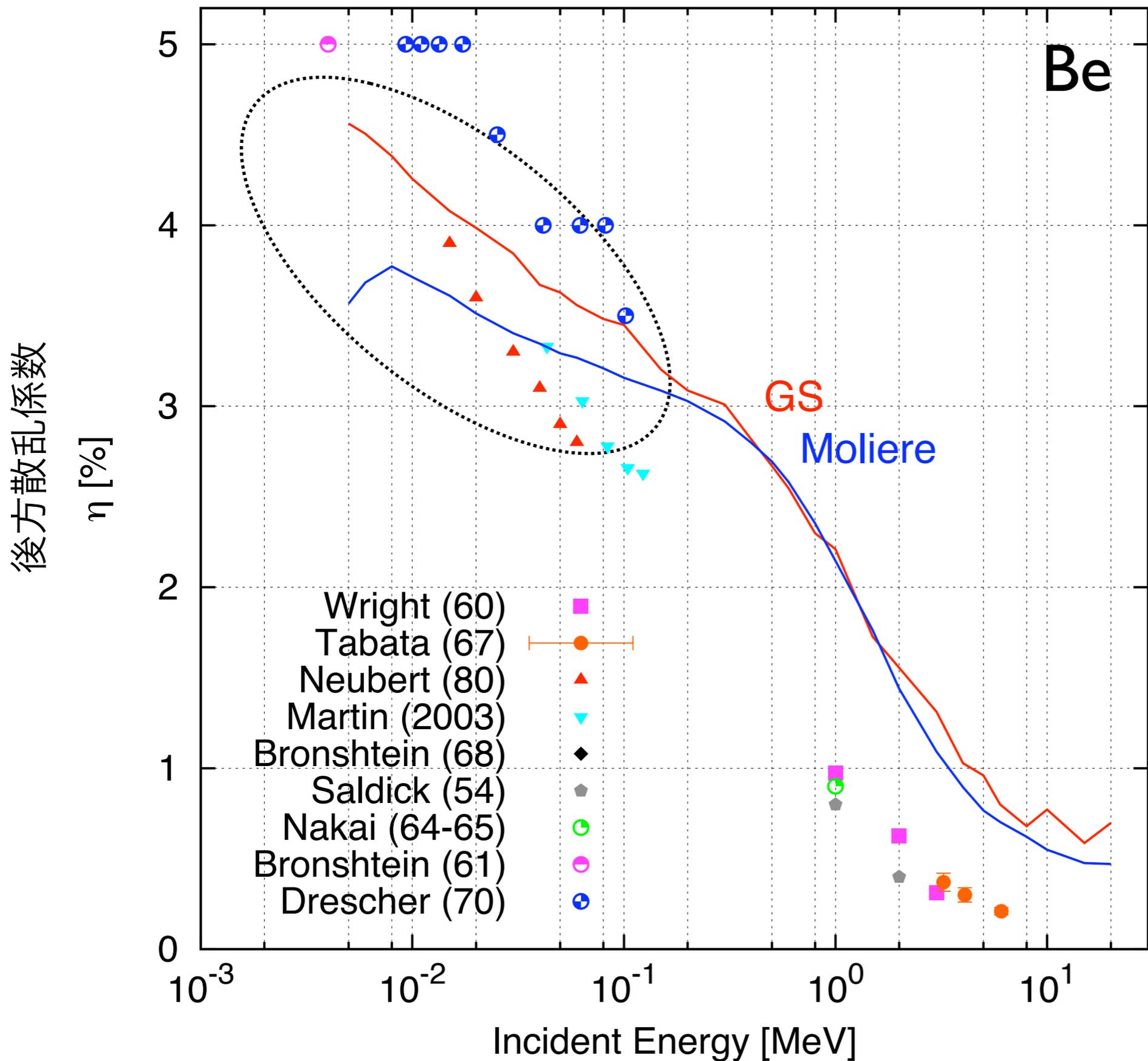
Moliere多重散乱

- 乱数のサンプリングが単純
- 小角度(20°)以下で使用
- すくなくとも100回以上の弾性散乱の経路長が必要

Goudsmit-Saunderson (GS) 多重散乱

- Moliereより乱数のサンプリングが複雑
- 全散乱角に制限なしで使用
- 様々な弾性散乱断面積で使用可能
- 20 MeV以上は適用不可(数値計算が収束しない)

Moliere多重散乱とGS多重散乱の比較



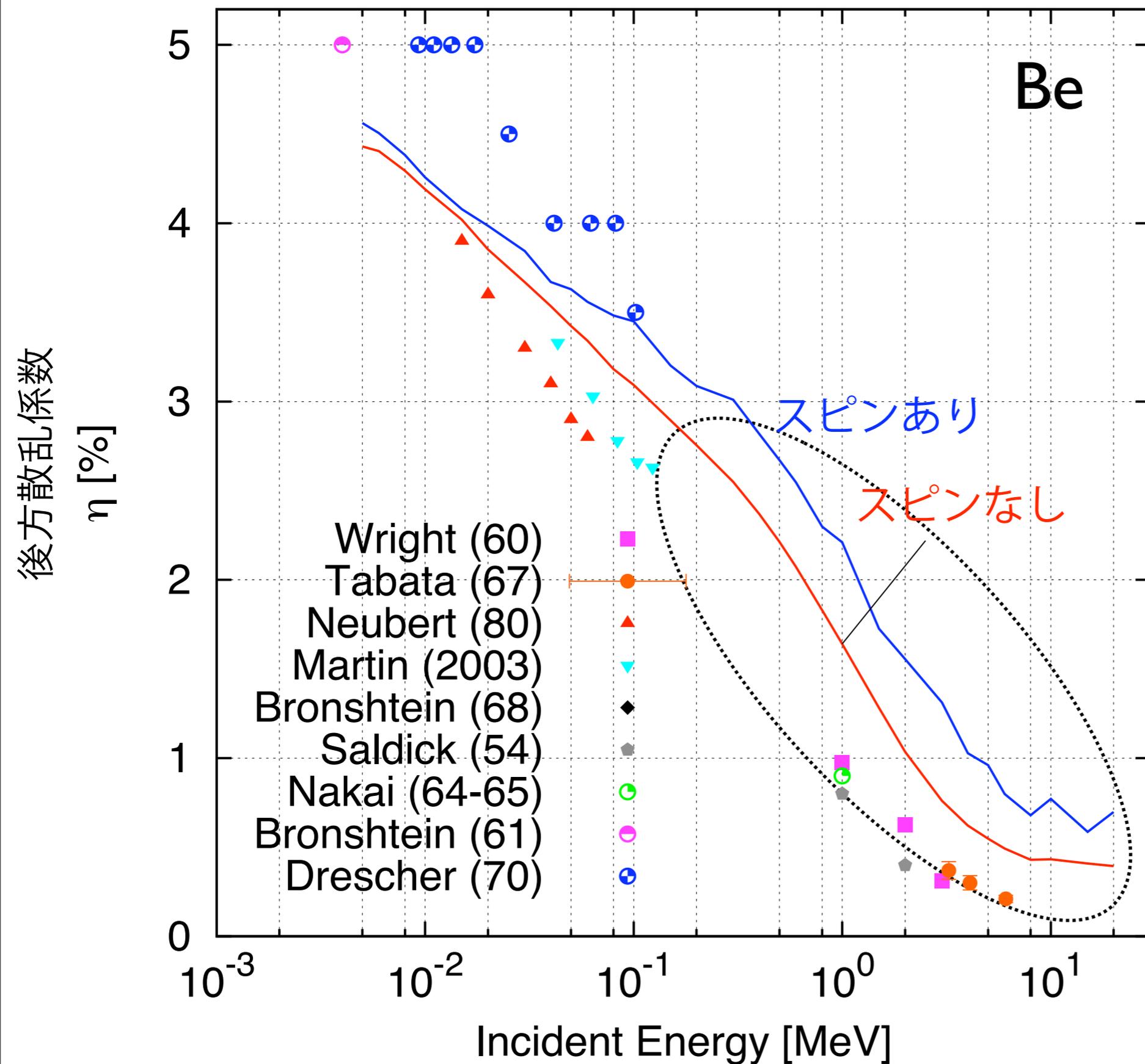
- keV領域で差異
- 高エネルギーでは差が小さい

スピン相対論効果を含めた散乱断面積

スピン相対論効果 (Mott散乱)

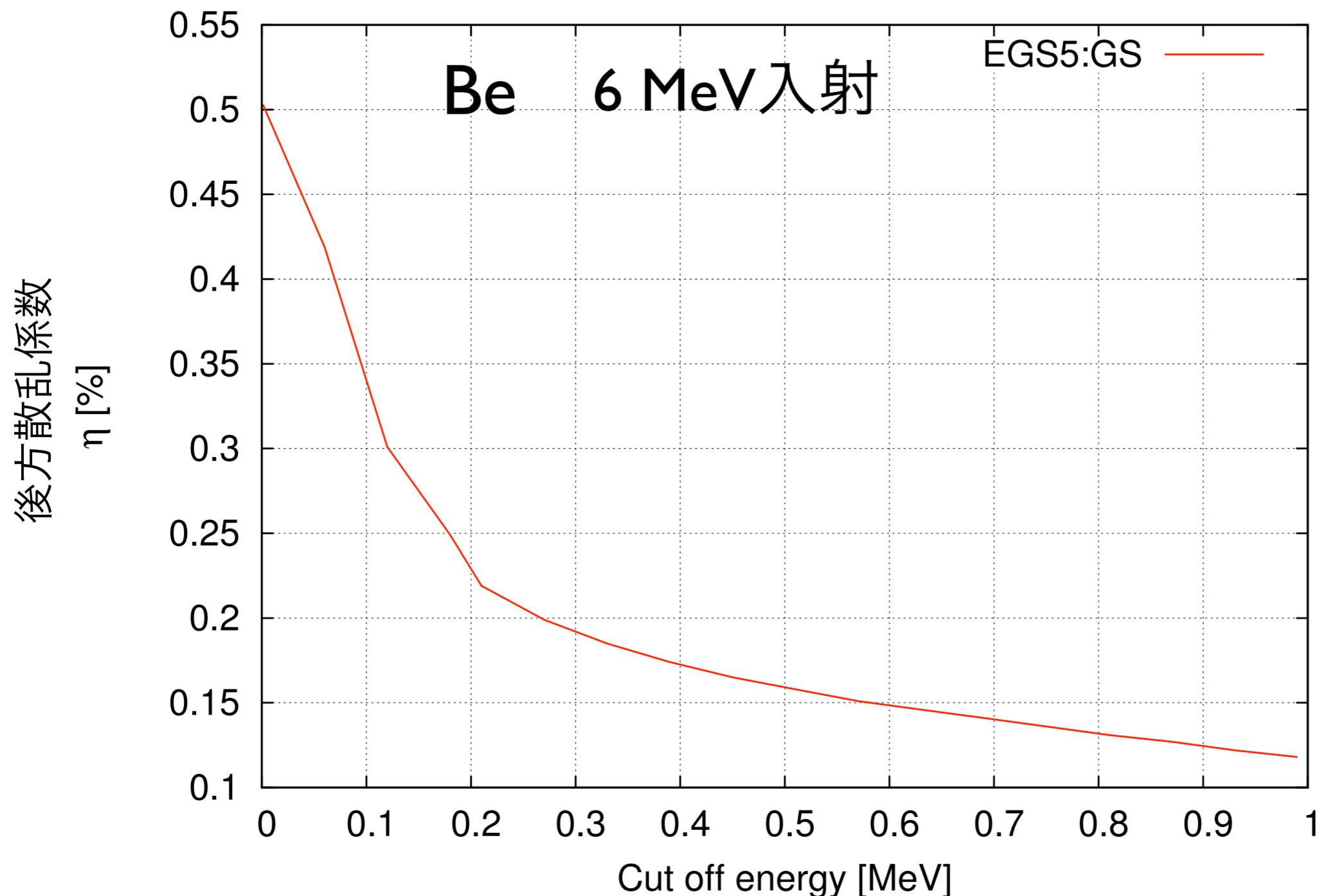
- 電子のスピン $1/2$ を考慮
- 相対論的エネルギーでRutherford散乱を変更

Spin相対論効果の影響



- MeV領域で差異
- 低エネルギーほど差は小さい

エネルギーカットオフの影響



カットオフの値によって後方散乱係数が大きく変わる

全計算コードでカットオフを **1 keV** に統一

実験データと電磁モンテカルロコードの比較

電磁モンテカルロコード

- **EGS5** (Electron Gamma Shower version 5)
- **EGSnrc** (Electron Gamma Shower NRC)
- **PENELOPE**
(PENetration and Energy LOss of Positrons and Electrons)
 - スペイン バルセロナ大学にて作成
- **ITS 3.0**
(INtegrated TIGER Series of coupled electron/photon version 3.0)
 - ETRANの後継

各コードの電子散乱モデル

コード	電子多重散乱モデル	スピン相対論効果
EGS5	Moliere	無
	GS	有
EGSnrc	GS 一回散乱は個別	有
PENELOPE	GS(小角) 個々に計算(大角)	有
ITS 3.0	GS	有

すべてのコードでGS、スピンあり、

cut off 1 keVで計算

計算方法

計算体系

入射エネルギー

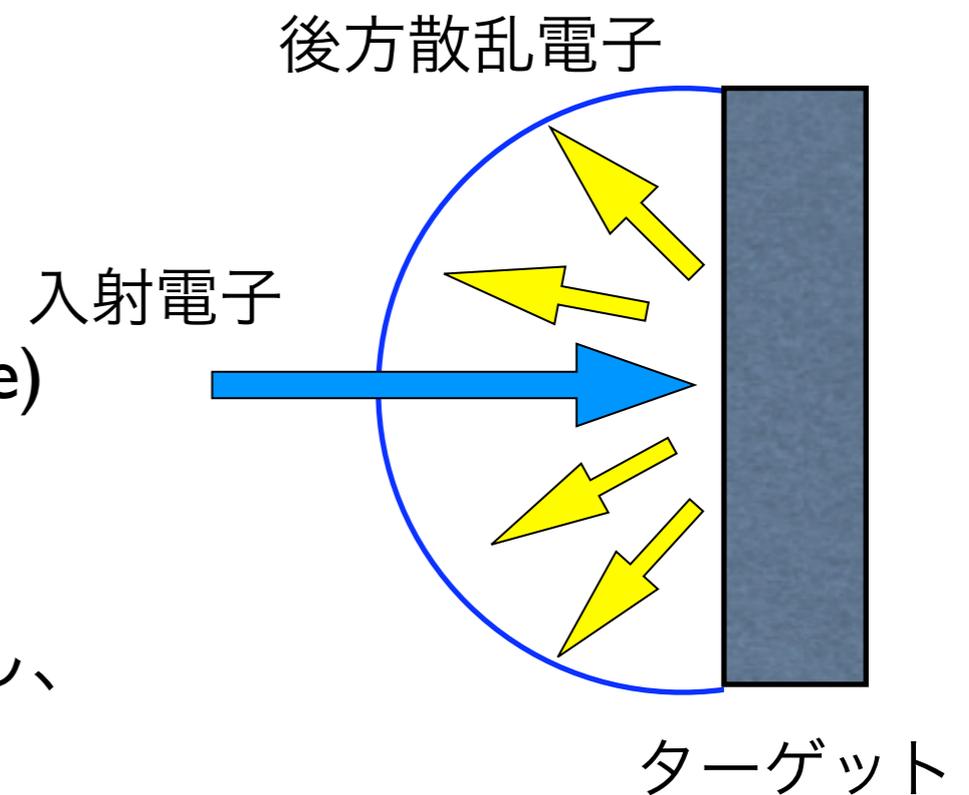
- 2keV~20 MeV

ターゲット

- Be, Al, Ag, Au
- Saturation thickness (CSDA range)

スコア

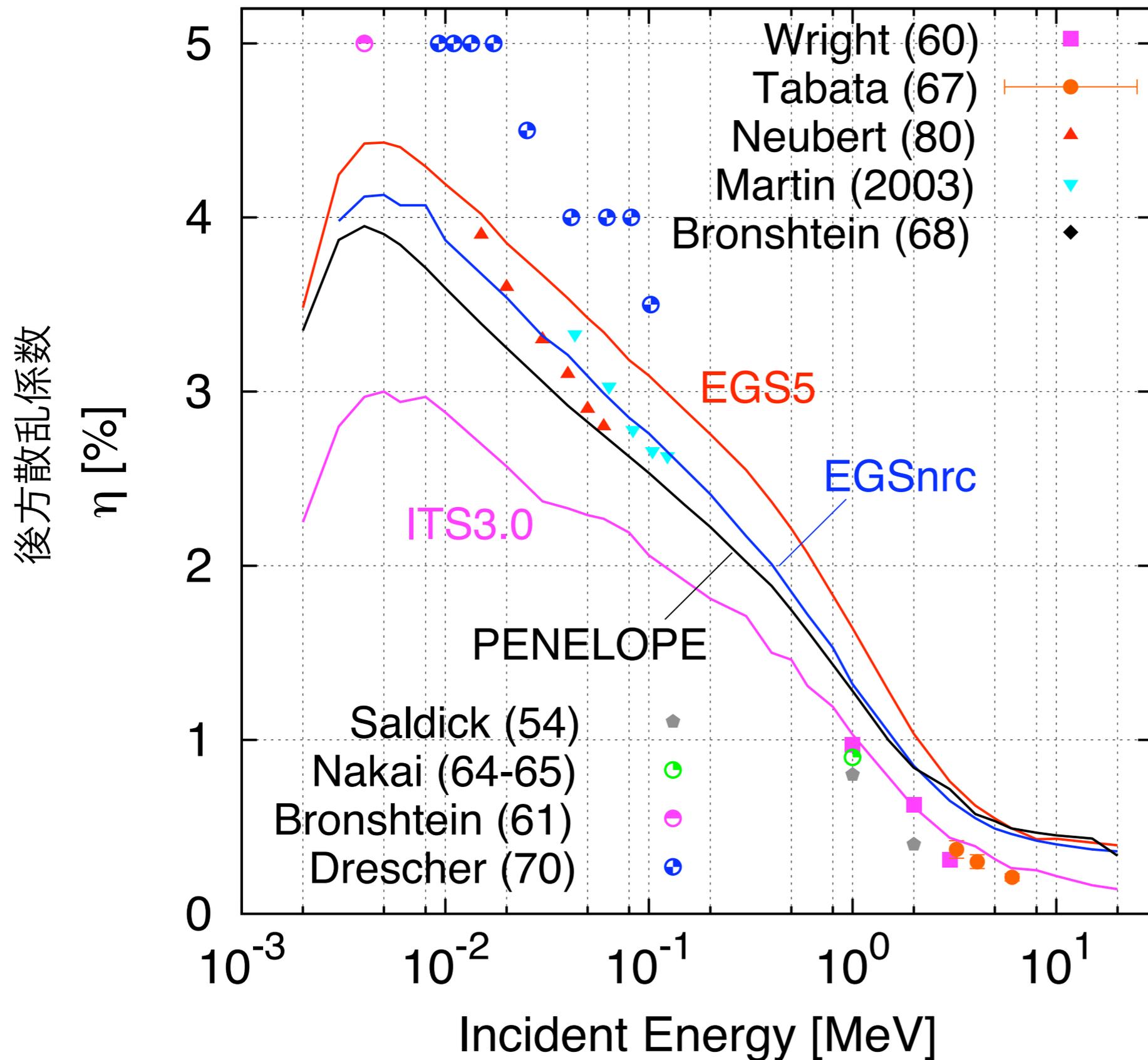
- 後方全面(2π)の散乱数を計測し、
後方散乱係数を計算



$$\text{後方散乱係数} = N/N_0$$

- 入射した電子数に対して後方へ散乱された比率
- 2%以内の統計誤差(1σ)で計算

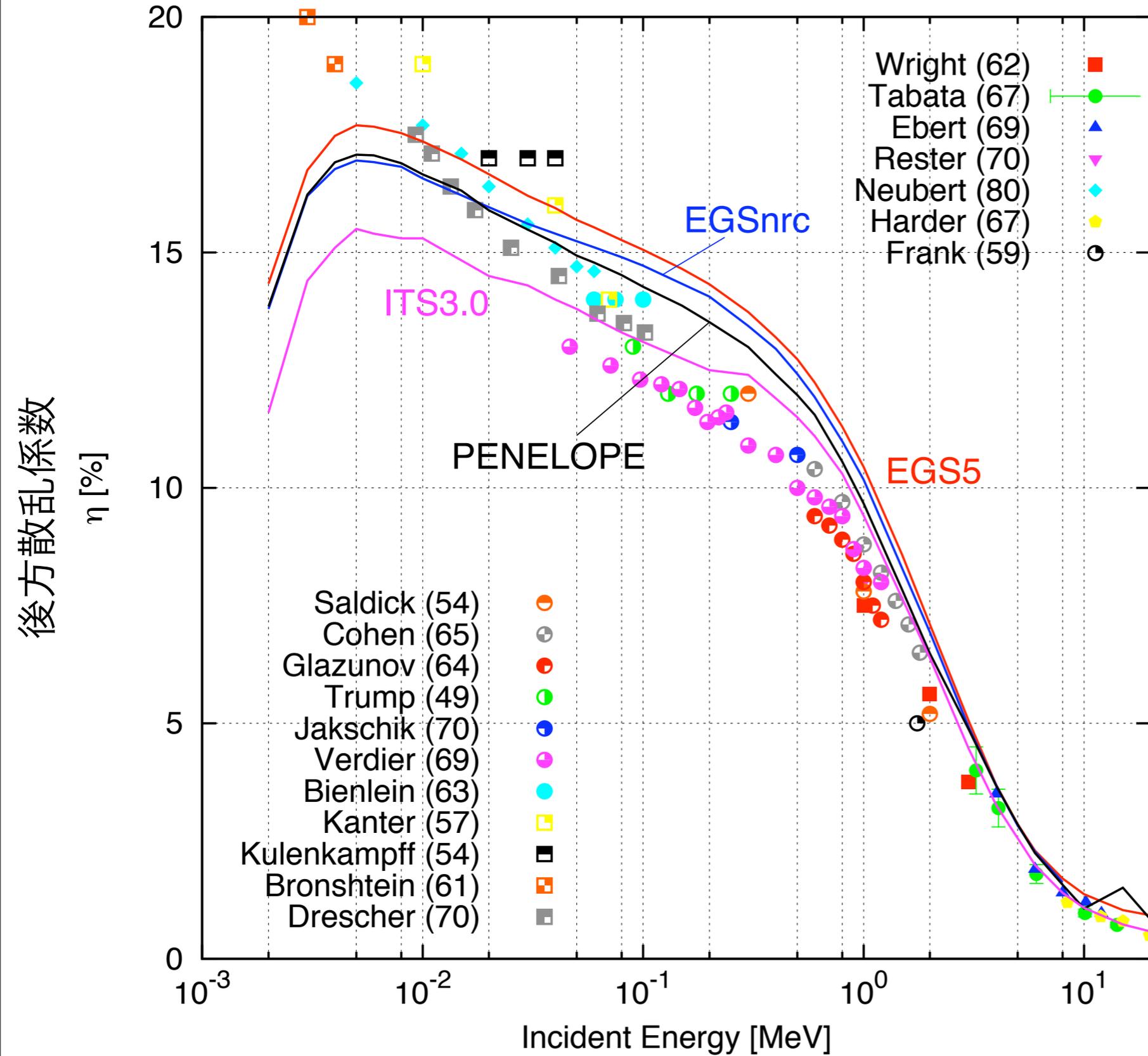
電子後方散乱係数 $\text{Be}(Z=4)$



•ITS 3.0が全体的に小さい

•実験データ間、計算値ともに差が顕著

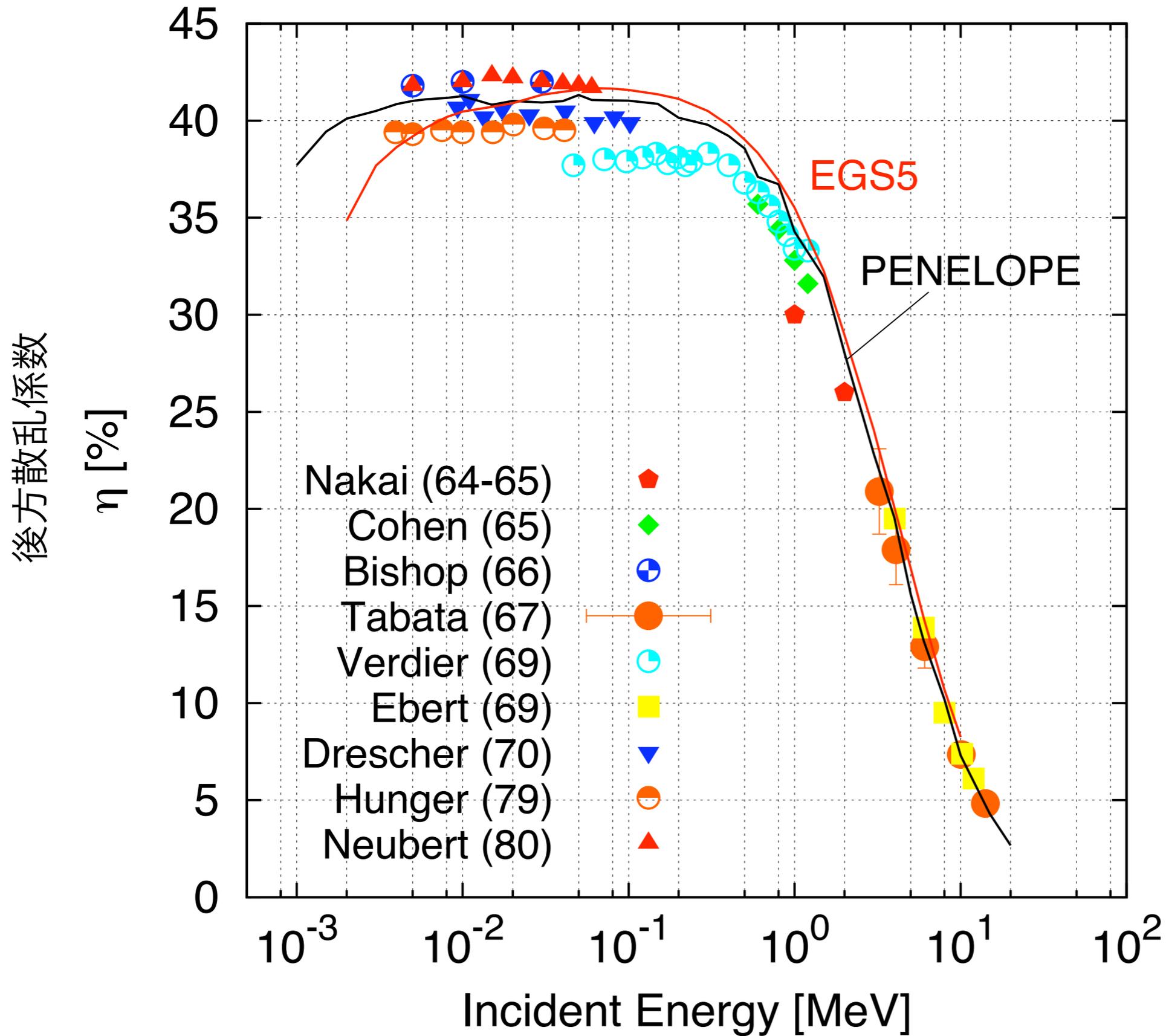
電子後方散乱係数 AI (Z=13)



●MeVの領域ではコード間の差が小さい

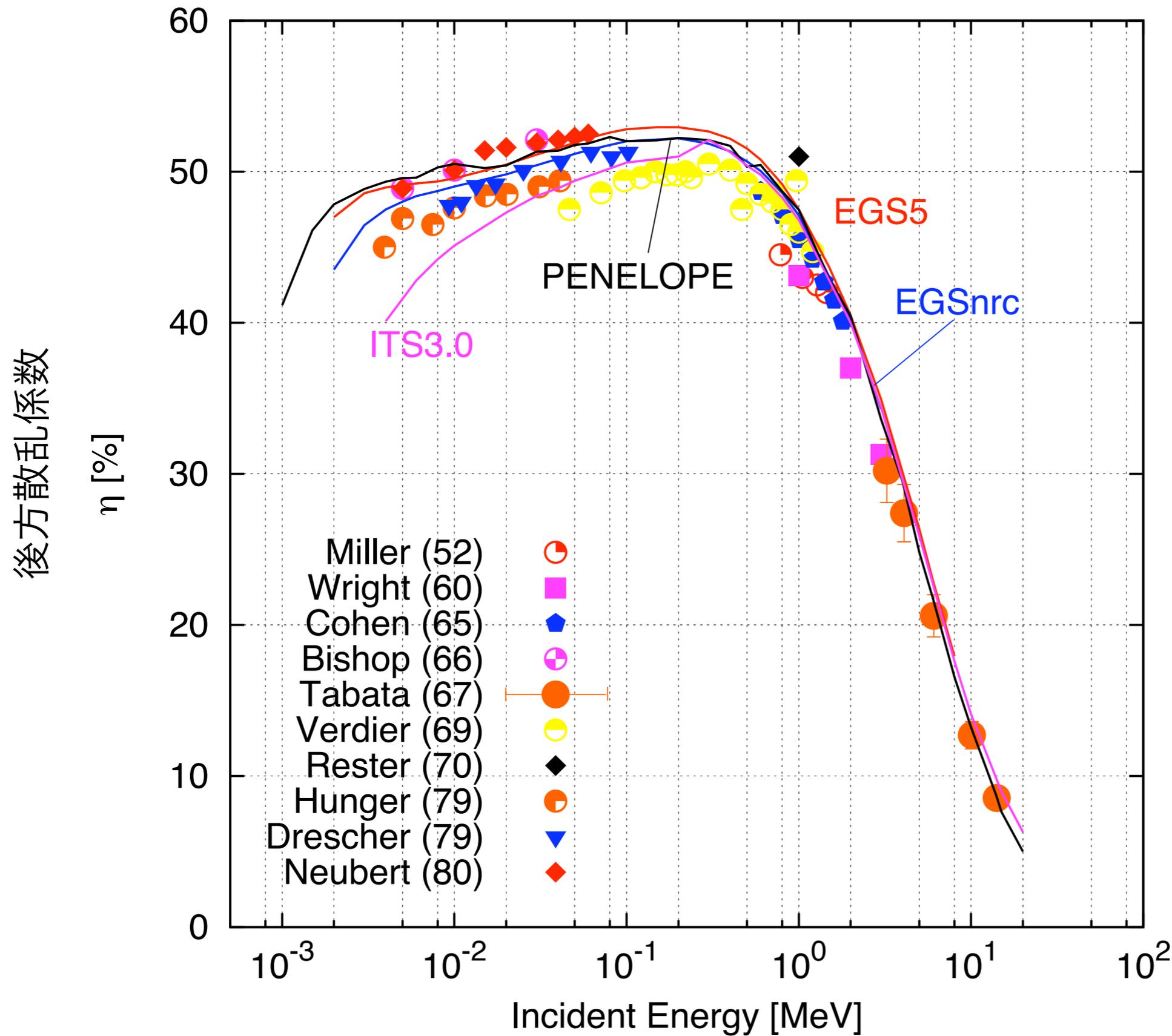
●実験値をよく再現

電子後方散乱係数 A_g ($Z=47$)



- MeVの領域ではコード差が小さい
- 実験値をととてもよく再現

電子後方散乱係数 Au (Z=79)



•MeVの領域では
差が小さい

•実験値を
とてもよく再現

Molieremultiple scattering to spin relativistic effects are applied

Rutherford断面積とMott断面積

Rutherford断面積

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = Z^2 r_0^2 \frac{(1 - \beta^2)}{\beta^4} \frac{1}{(1 - \cos \theta)^2}$$

Z:原子番号

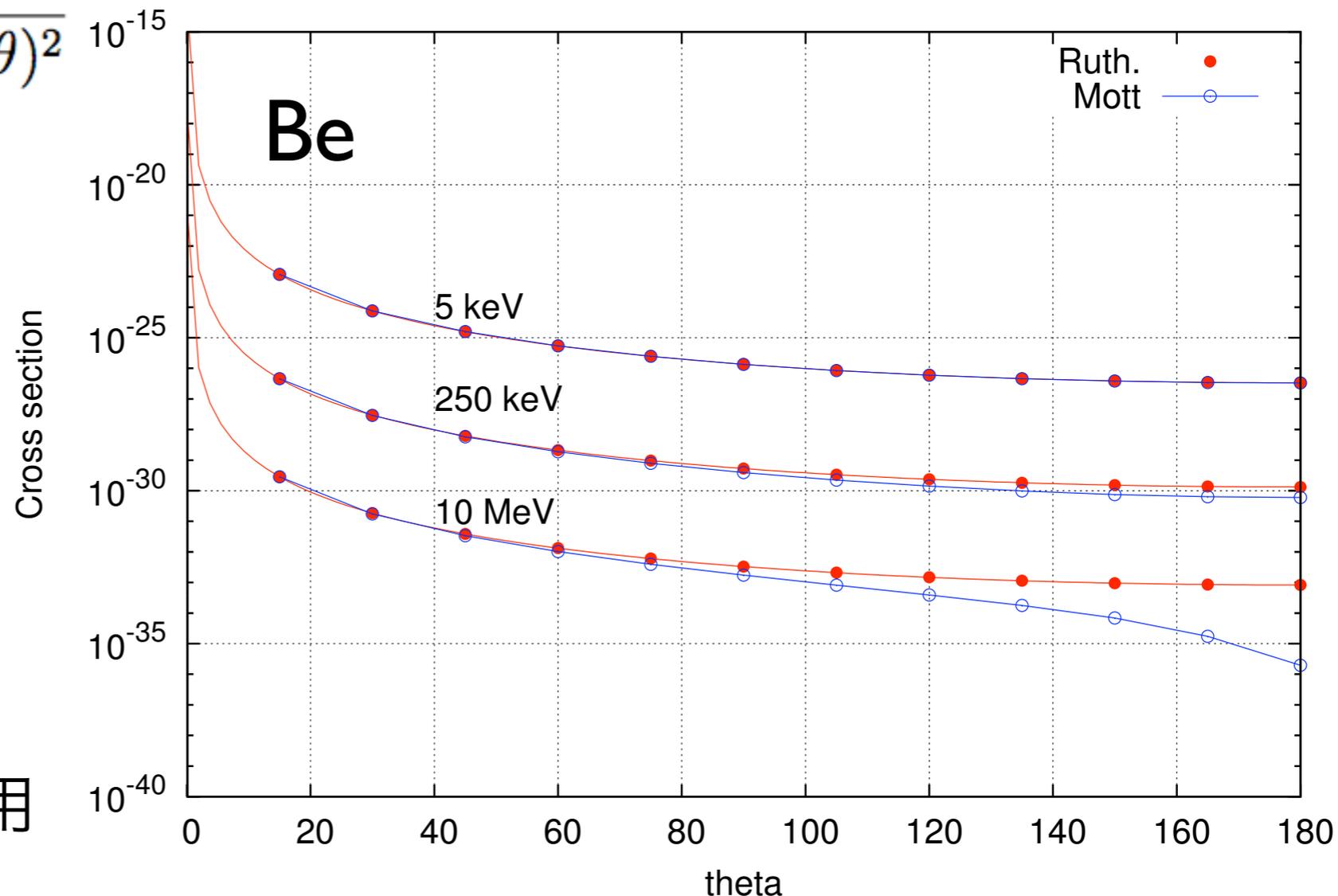
r_0 :古典電子半径

β :光速に対する電子の速度

θ :散乱角

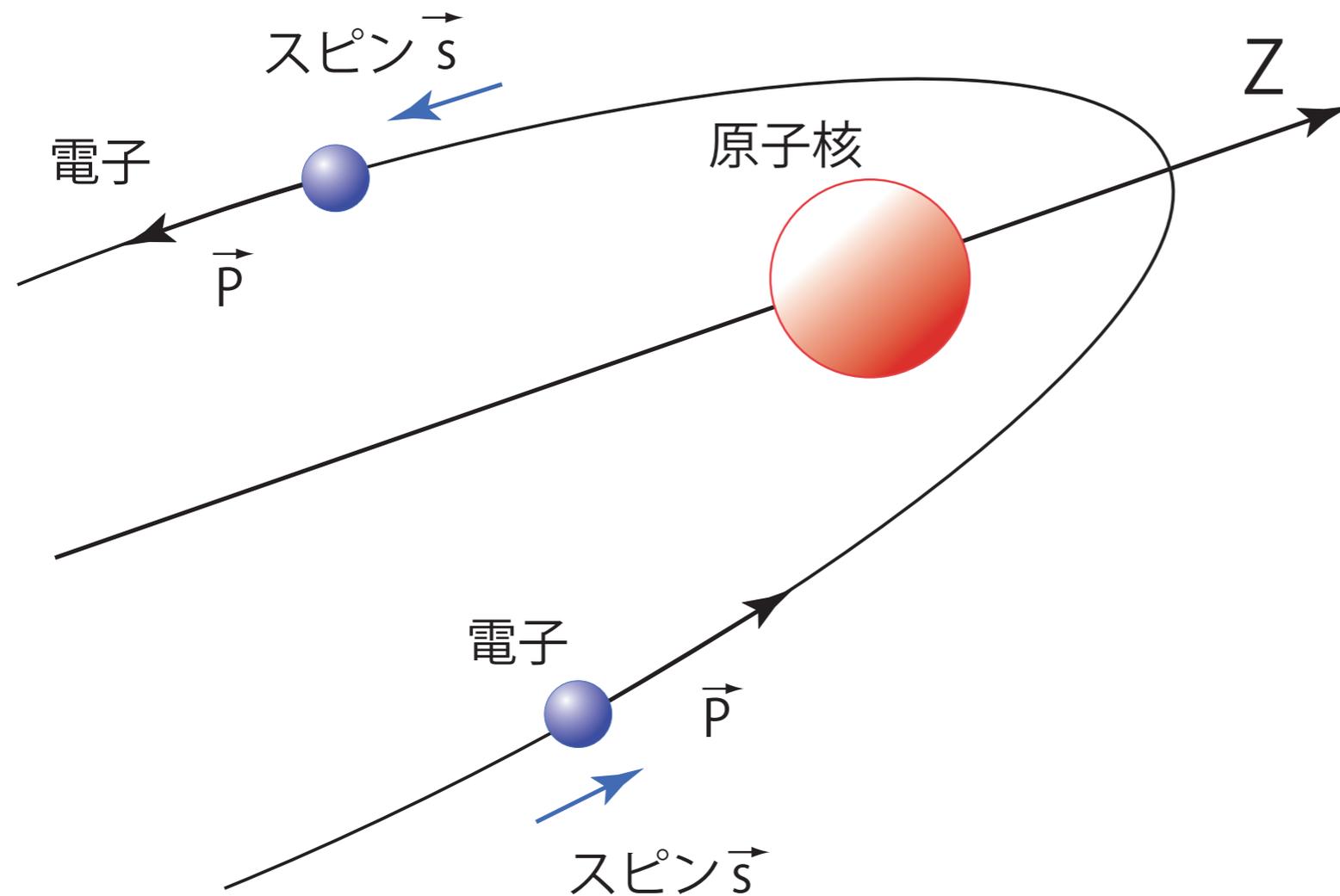
Mott断面積

- Rutherford断面積に
- **スピン相対論効果**を適用したもの

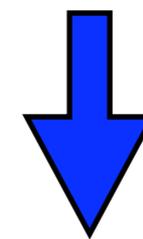


スピン相対論効果を含めた散乱断面積

$\beta \rightarrow 1$ (相対論領域)での電子 180° 散乱の考察



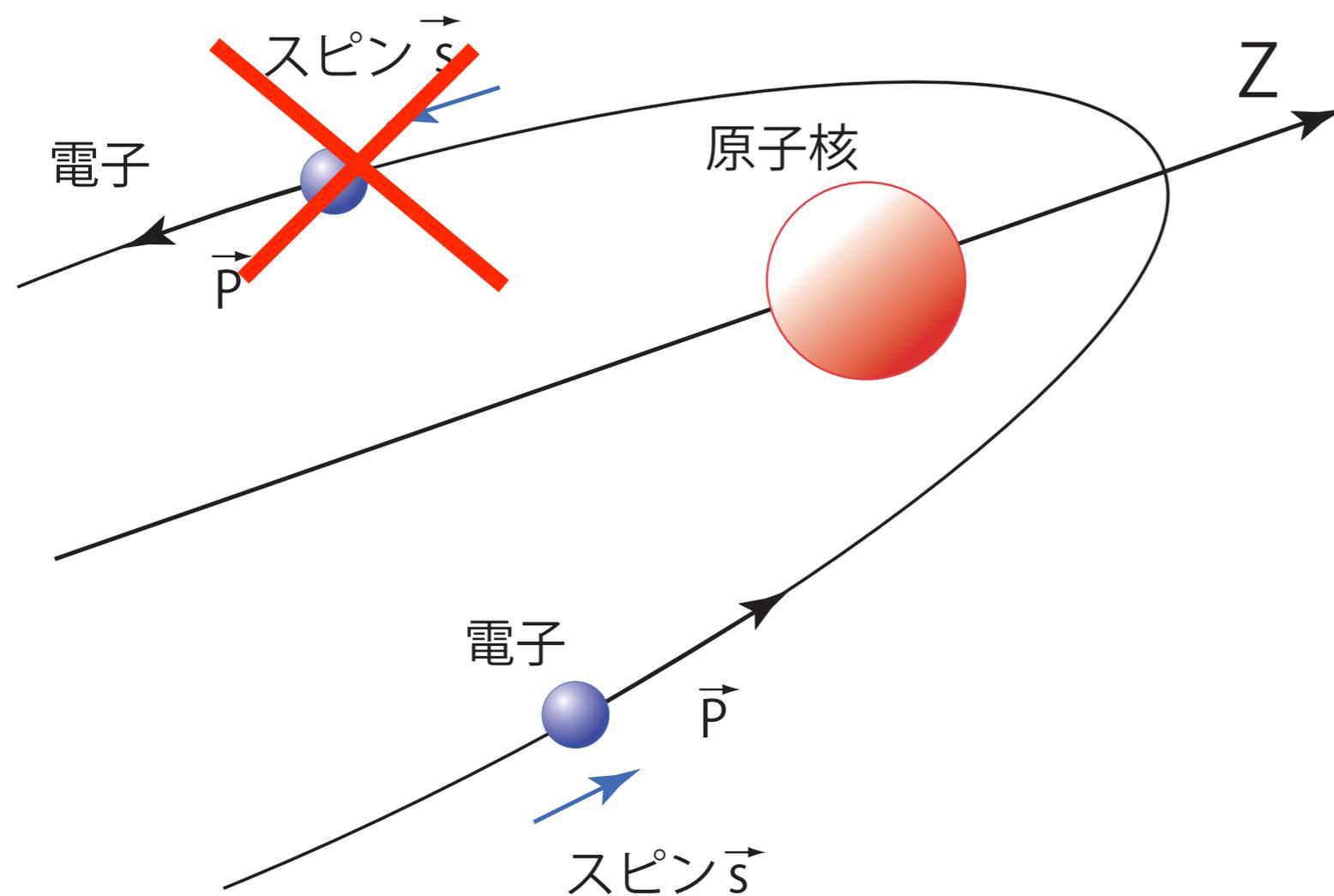
スピンの運動方向 \vec{p}
への射影は**保存量**
スピン0の原子核では、
角運動量のz方向を変える効果は
ない



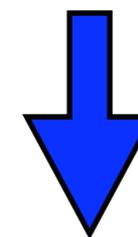
180° 方向には散乱不可

スピン相対論効果を含めた散乱断面積

$\beta \rightarrow 1$ (相対論領域)での電子 180° 散乱の考察



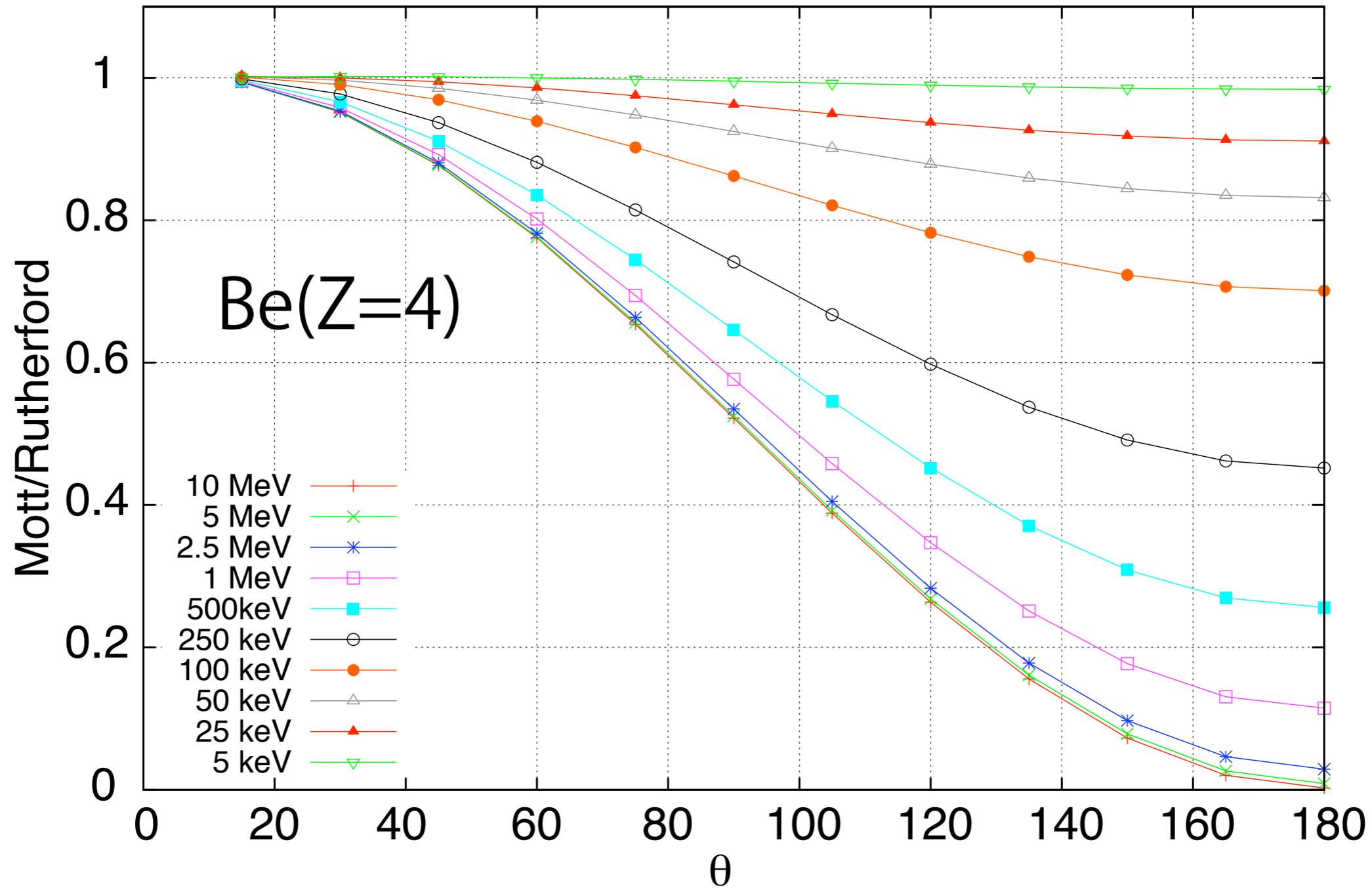
スピンの運動方向 \vec{p}
への射影は**保存量**
スピン0の原子核では、
角運動量のz方向を変える効果は
ない



180°方向には散乱不可

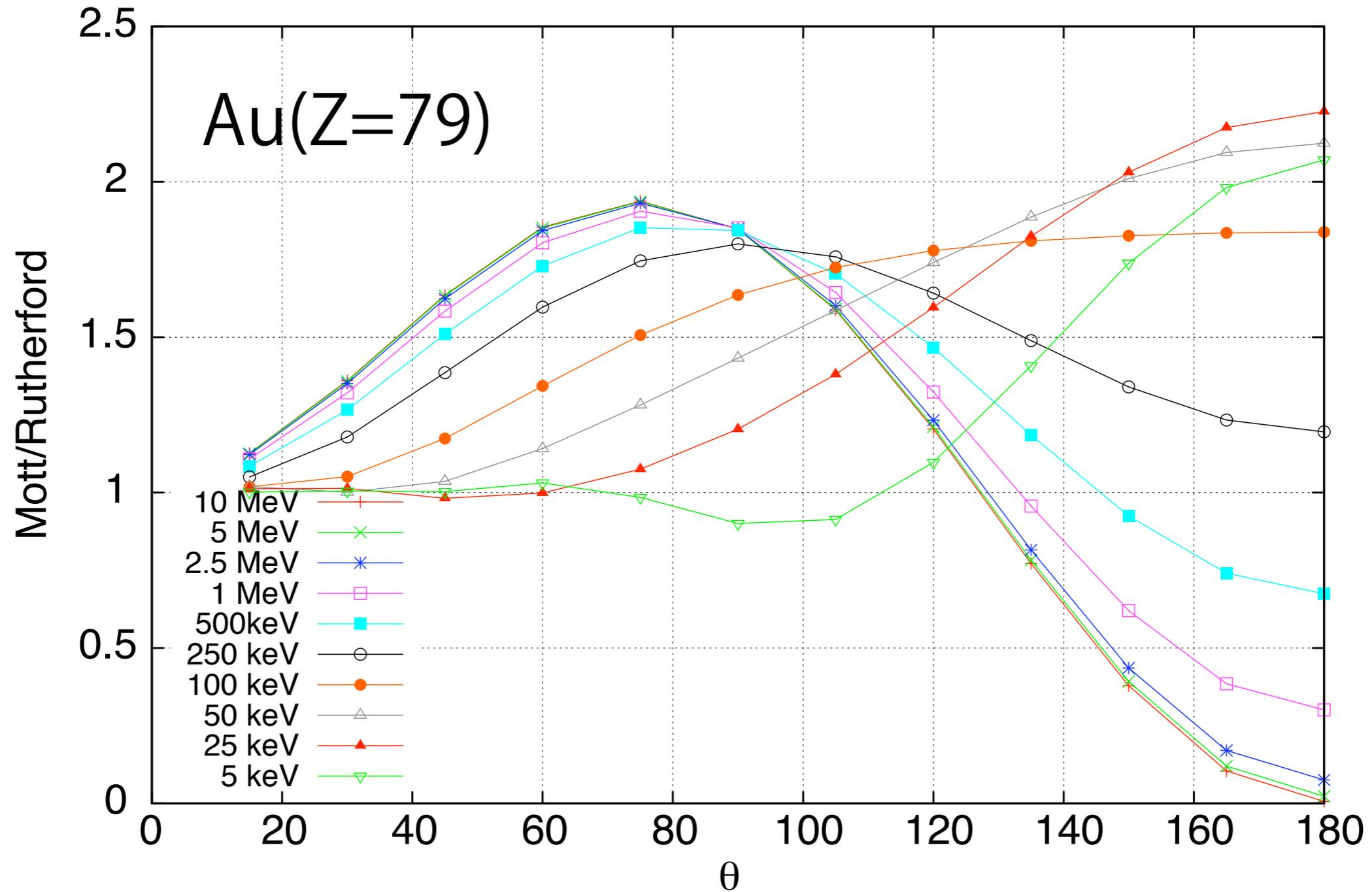
スピンの効果(Mott/Rutherford の比)

Rutherford散乱をMott散乱に補正するための係数



エネルギーが高くなるほど180°方向の散乱が減少

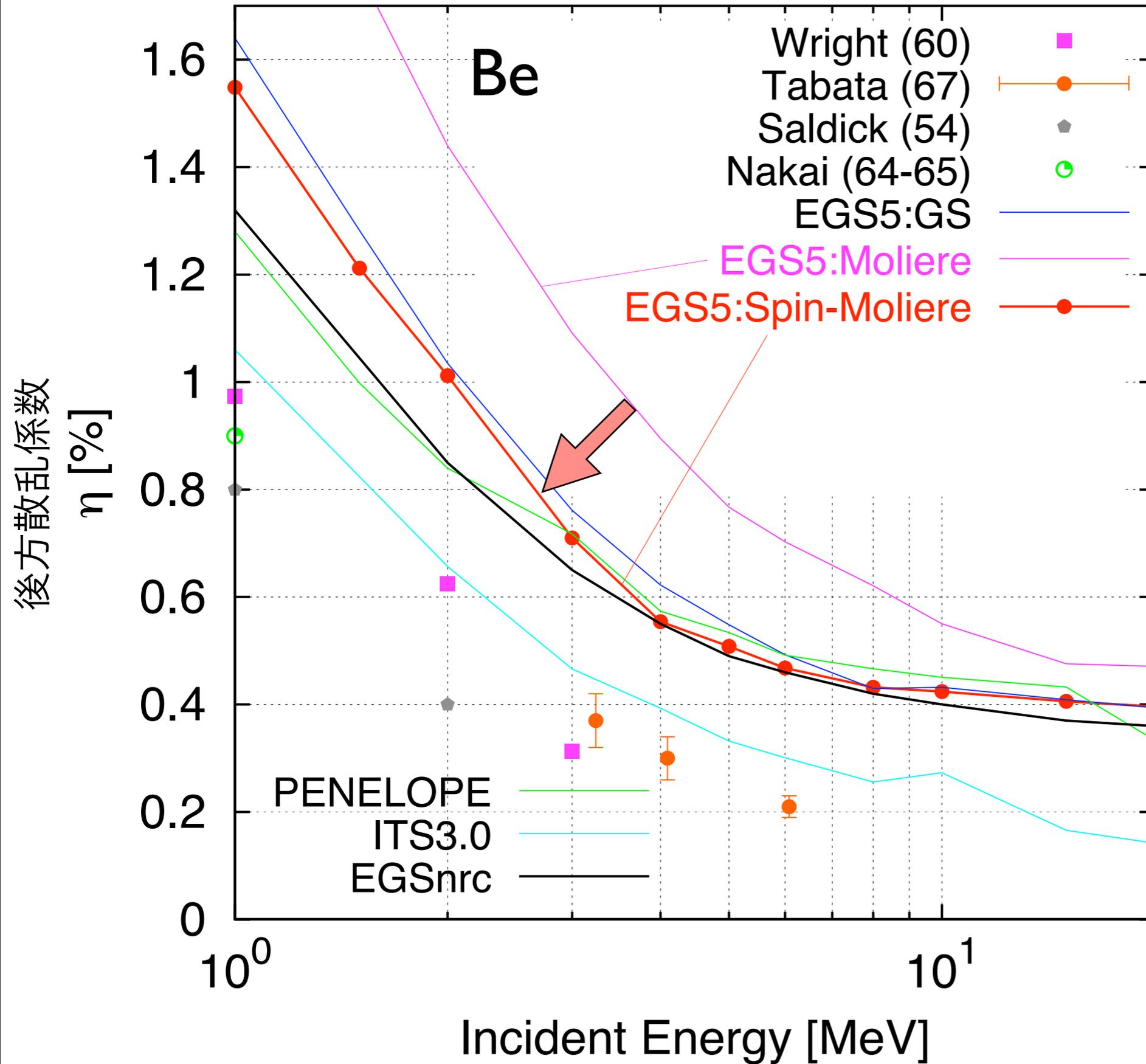
スピンの効果(Mott/Rutherford の比)



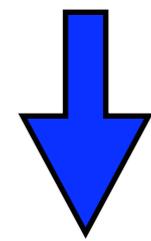
エネルギーが高くなるほど **180°方向の散乱が減少**

散乱角が大きくなると **一度増加し、その後減少**

スピン相対論効果の適用



●スピン効果を入
れることによ
り高エネルギー
での後方散乱が
減少した



スピンGSとよく一致

まとめ

電子の輸送散乱モデルの比較

- keV領域でMoliereとGS多重散乱に差異
- 軽い元素でMeV領域にSpin相対論効果による差異

実験データと電磁モンテカルロコードの比較

- 軽い元素で実験データと計算値ともに差が顕著
- 重い元素ではどのコードも実験データをよく再現している

Moliere多重散乱にSpin相対論効果を適用

- Beの1 MeV以上でSpin-GSとよい一致を示した

今後の方針

- 重い元素における **スピン相対論効果** の理解
- EGS における Spin-GS と Spin-Molierre の **計算時間** の比較
- 電子輸送における各コードのモデルの理解

參考資料

スピン相対論効果の適用

EGS5のMoliere多重散乱に棄却法を用いてスピン効果を適用

- 乱数を振り、Mott/Ruthより小さい場合は再度多重散乱を計算
- Mott/Ruthの最大値で規格化

