

束縛電子を持つ高速軽イオンの エネルギー損失とストラグリング

奈良女子大理

小川英巳

共同研究者

KEK素核研

片山一郎

京都府大人間環境

春山洋一
斉藤 学

京大院工

吉田紘二

京大RIセンター

戸崎充男

KEK加速器

菅井 勲

池上栄胤

福沢文雄

青木 敦

Bethe の阻止能公式 (裸の点電荷に対して)

$$\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi Z_1^2 Z_2 e^4 N_t}{mv^2} \left(\ln \frac{2mv^2}{I} - \ln(1 - \beta^2) - \beta^2 \right)$$

$Z_1(Z_p)$: 入射粒子の原子番号

Z_2 : 標的原子の原子番号

m : 電子の質量

v : 入射粒子の速度

N_t : 標的原子の数密度

I : 標的原子の平均励起エネルギー ($\sim 10 Z_2$ [eV])

$\beta = v/c$

dE/dx は Z_1^2 に比例

束縛電子を持つイオンの
荷電非平衡領域におけるエネルギー損失は ?

- 入射粒子が荷電状態を保ったまま薄膜を透過した時

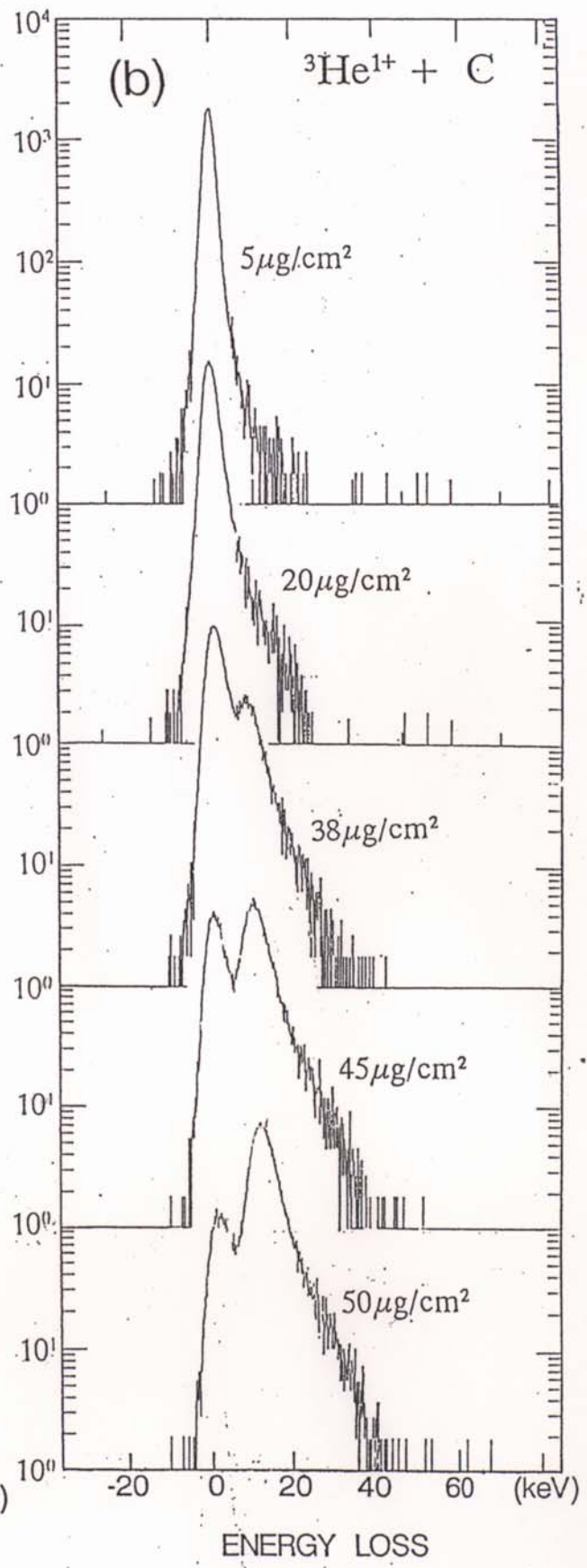
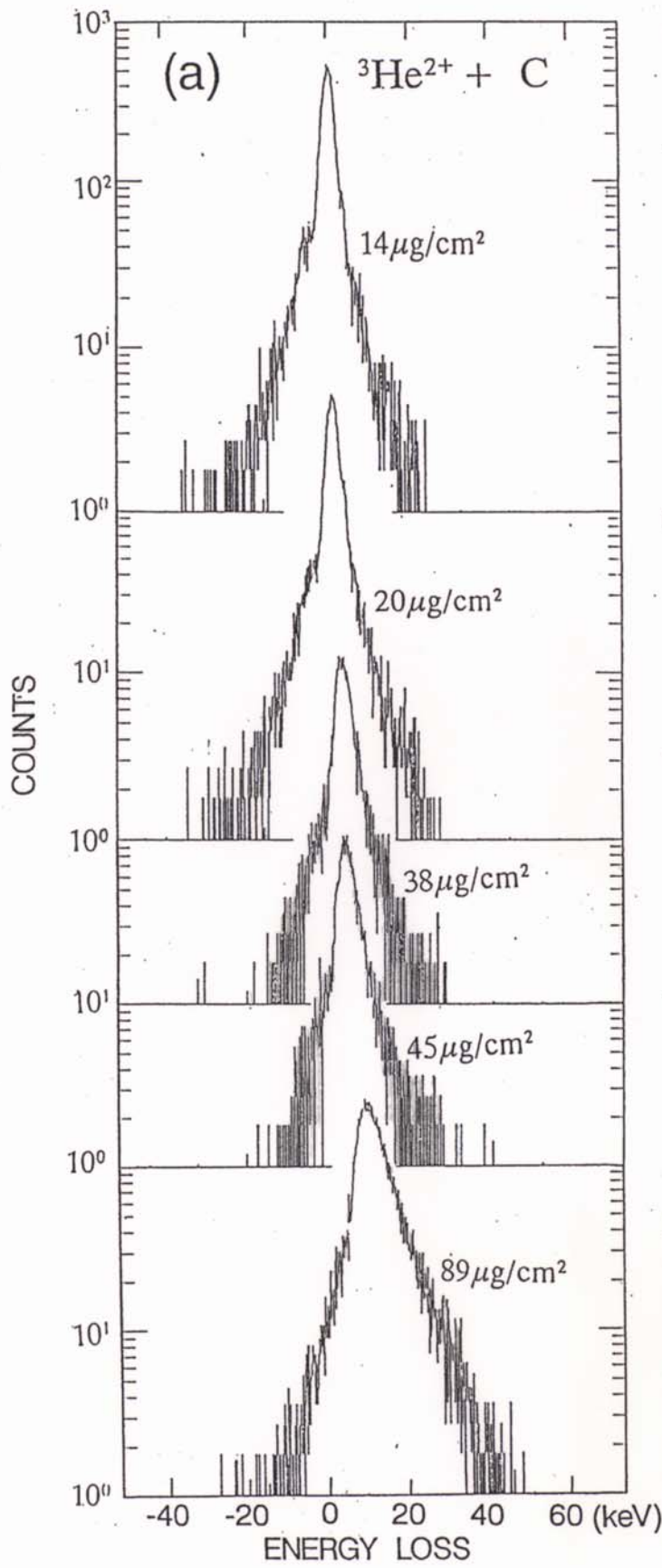
束縛電子の遮蔽効果

- 薄膜内で荷電変換を起こした時

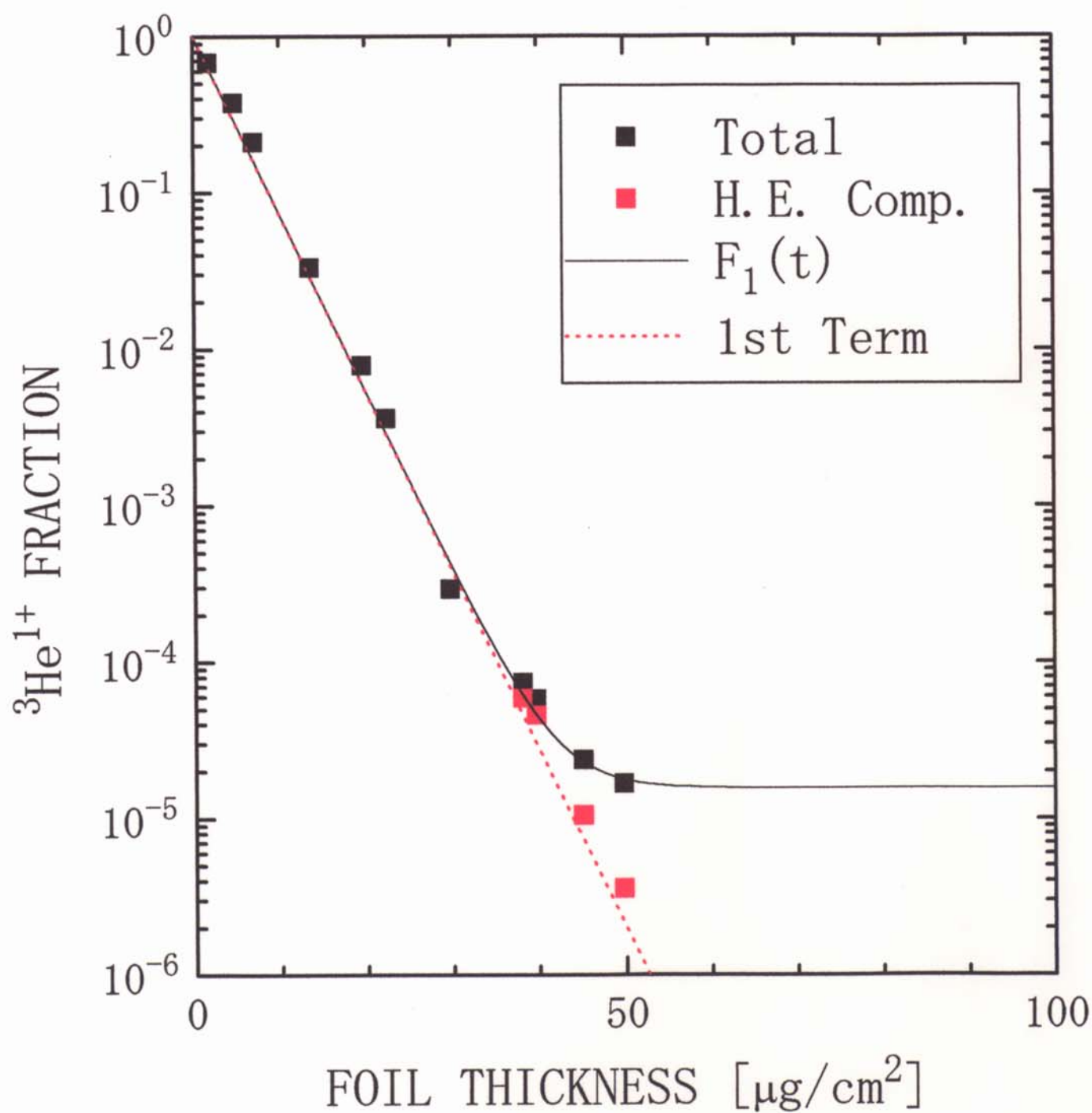
荷電変換に伴うエネルギー損失

約 10-MeV/amu の He, Li, C, O イオン (H^0, He^0) の
炭素薄膜中でのエネルギー損失を RAIDEN で測定

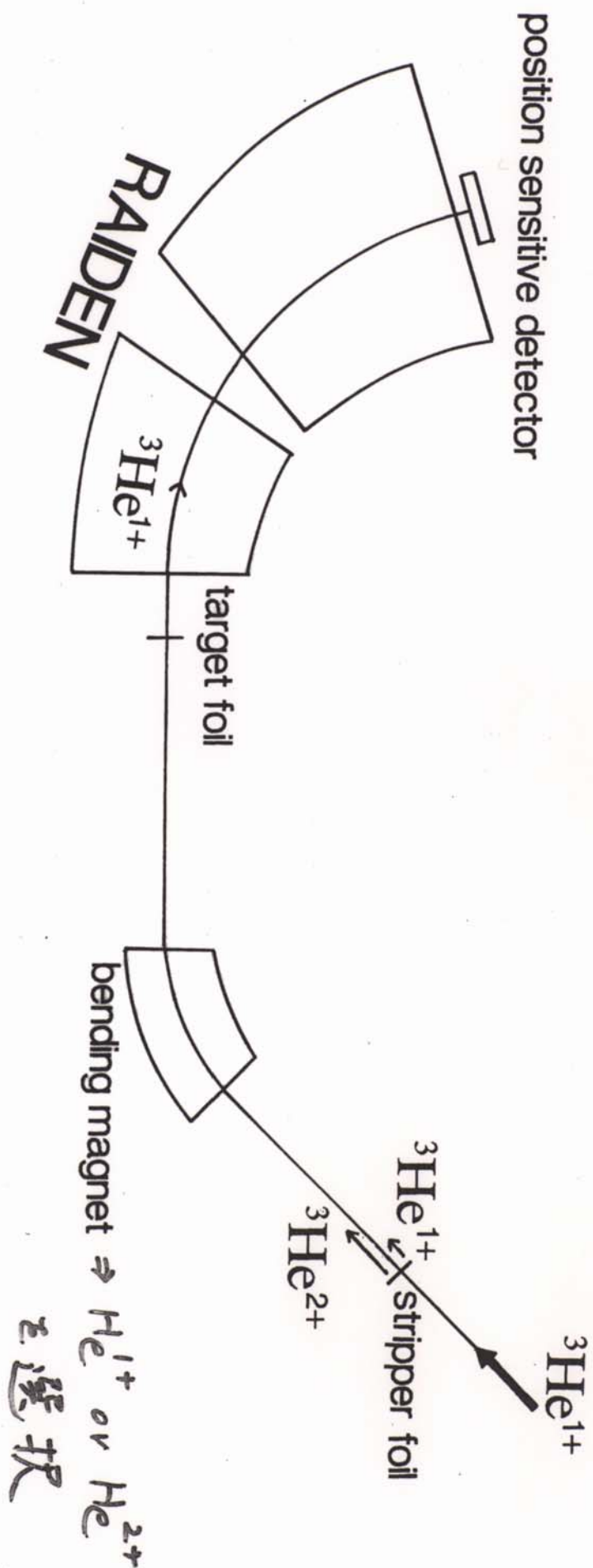
$$(q_{in} = q_{out})$$



$$F_1(t) = \exp(-N_t \sigma_1 t) + (\sigma_c / \sigma_1) \{1 - \exp(-N_t \sigma_1 t)\}$$



$\text{He}^{1+} \rightarrow \text{He}^{2+} \rightarrow \text{He}^{1+}$ の
 エネルギー損失の測定



$$\Delta E = 6.5 \text{ keV} \approx \frac{1}{2} m v^2$$

平均のエネルギー損失 : $\overline{\Delta E(t)} = \overline{E_0} - \overline{E(t)}$

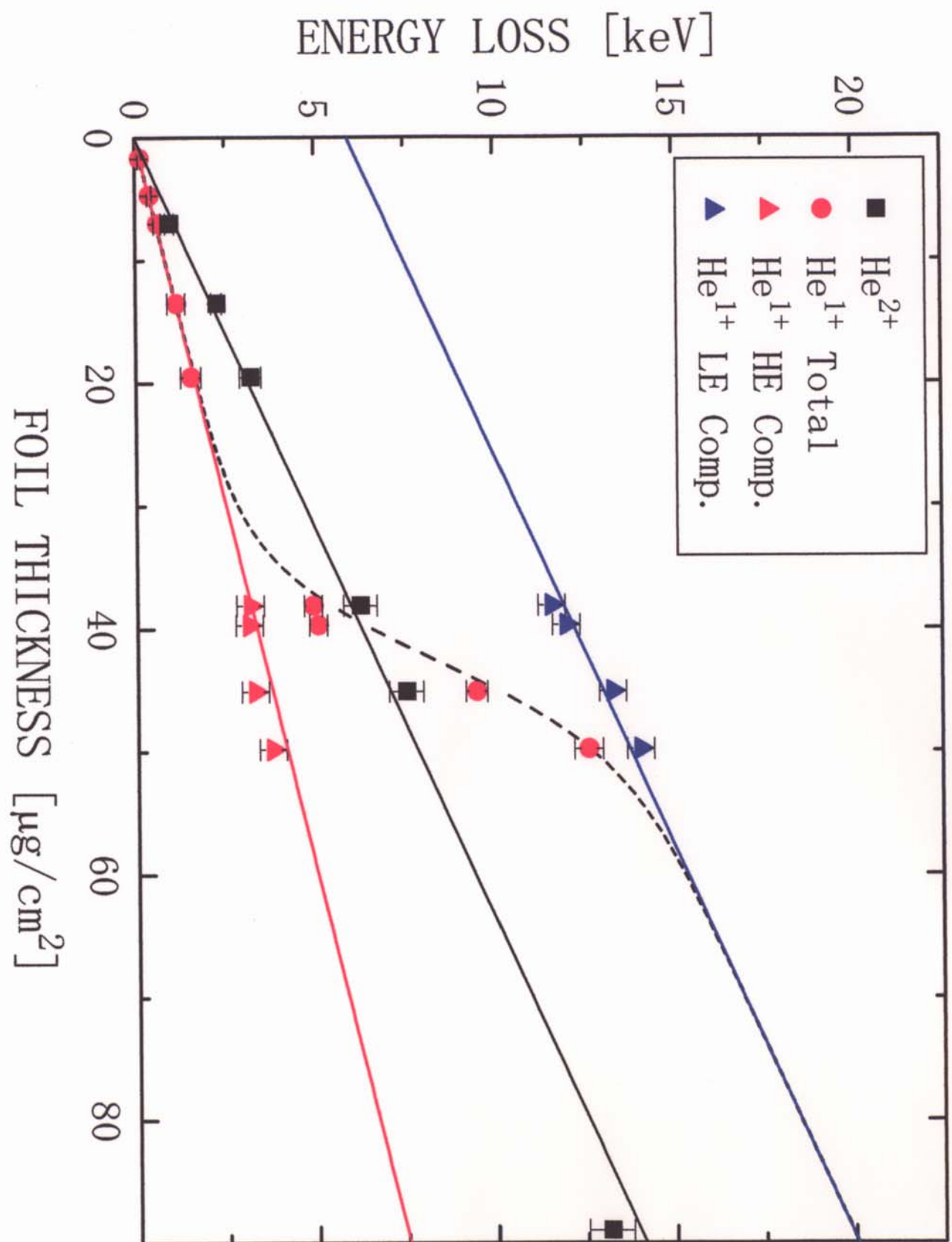
$$\overline{\Delta E(t)} = \frac{\int E Y_0(E) dE}{\int Y_0(E) dE} - \frac{\int E Y_t(E) dE}{\int Y_t(E) dE}$$

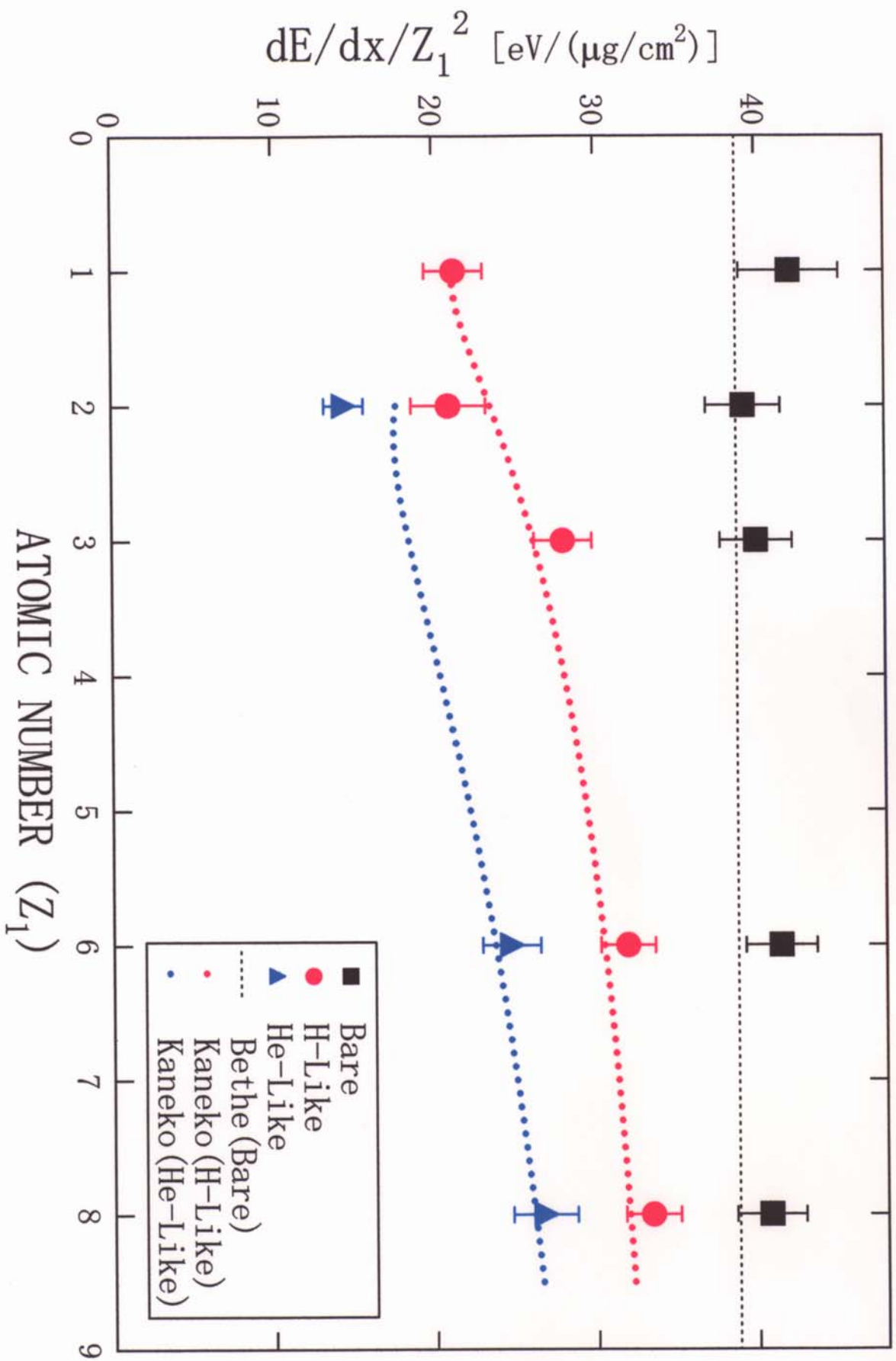
$\overline{E_0}$: 入射ビームの平均エネルギー

$\overline{E(t)}$: 厚さ t の薄膜透過後の平均エネルギー

$Y_0(E)$: 入射ビームのエネルギー分布

$Y_t(E)$: 厚さ t の薄膜透過後のエネルギー分布





ストラグリング

エネルギー損失分布の平均値のまわりのゆらぎ (分散)

$$\Omega^2(t) = \frac{\int (E - \overline{E(t)})^2 Y_t(E) dE}{\int Y_t(E) dE} - \frac{\int (E - \overline{E_0})^2 Y_0(E) dE}{\int Y_0(E) dE}$$

裸の入射イオンに対するストラグリングの公式

Bohr の式 (自由電子との衝突) $\Omega^2(t) = 4\pi Z_1^2 Z_2 e^4 N_t t$

Bethe-Livingston の式 (電子の束縛を考慮)

高エネルギーで Bohr の式 に一致

ストラグリングは 膜厚 t 及び Z_1^2 に比例

$$\Delta E = \int_0^T dt N \sum E_n d\sigma_n$$

$$\Omega^2 = \int_0^T dt N \sum E_n^2 d\sigma_n$$

T : target thickness

N : number density of target atoms

E_n : excitation energy of n -th excited state

$d\sigma_n$: excitation cross section to n -th excited state

ストラグリングでは、エネルギー損失に比べて
 E_n の大きな衝突（近接衝突）からの寄与が大きい

遠隔衝突:

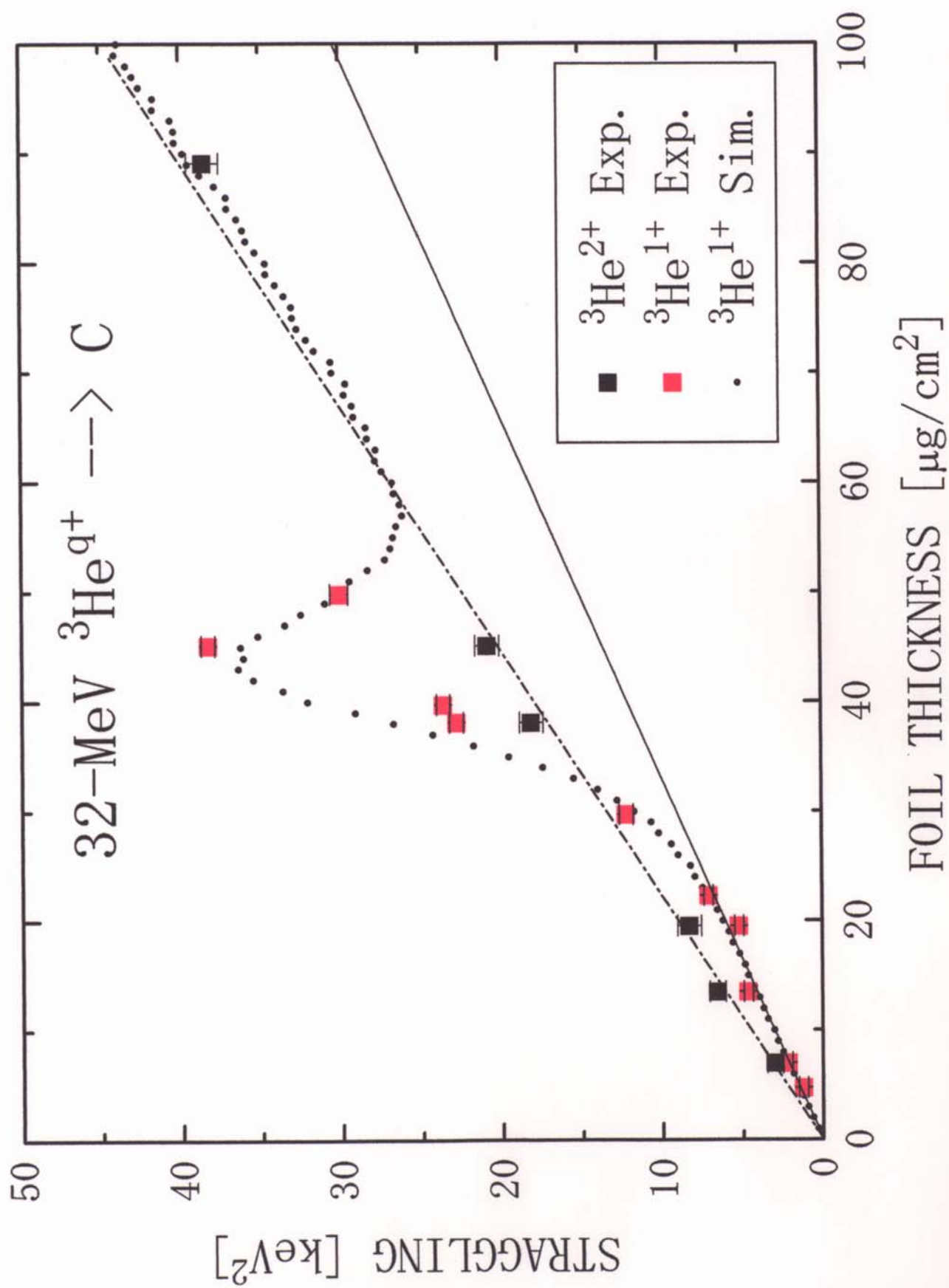
束縛電子の遮蔽効果により、

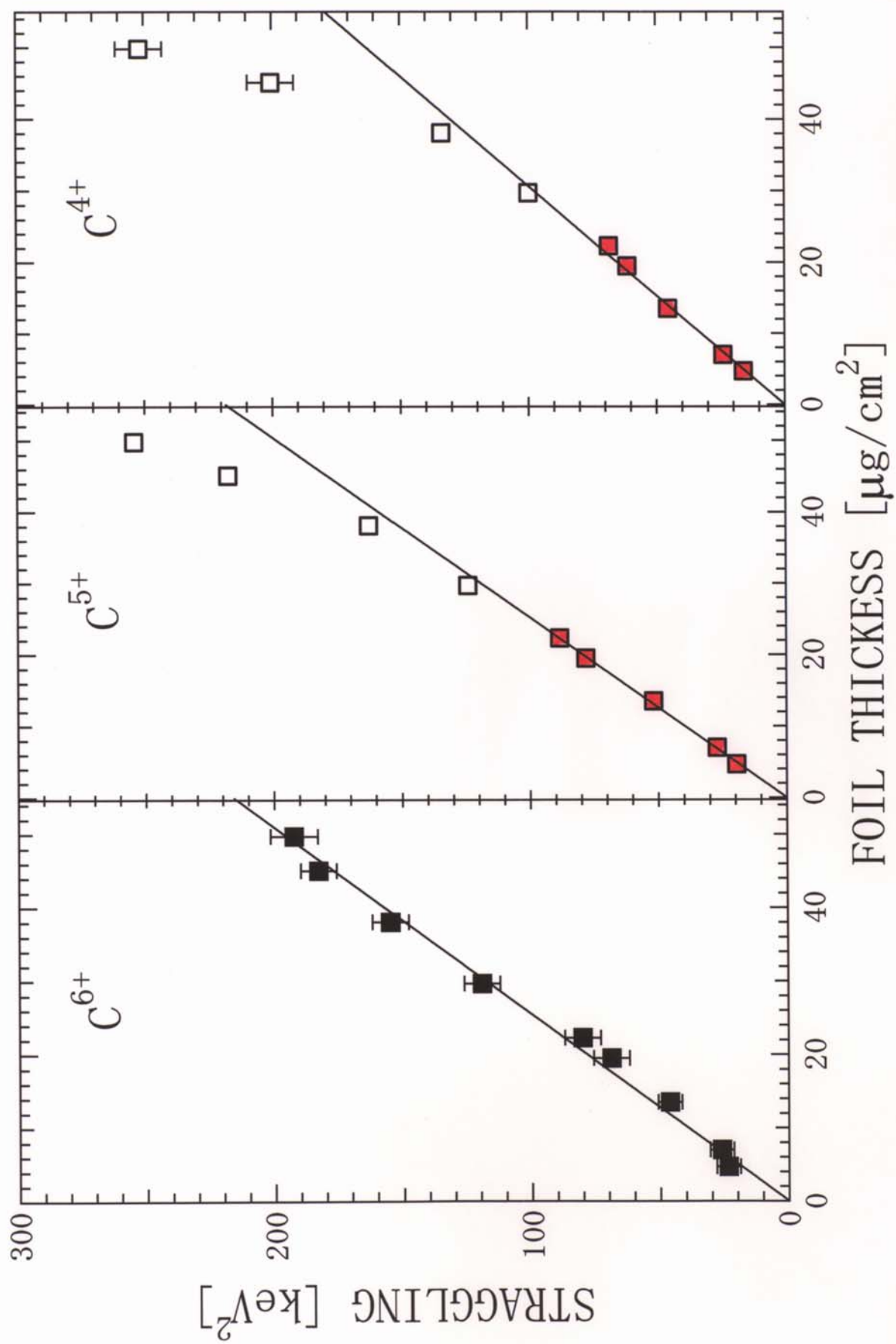
$d\sigma_n$ for 'clothed' $\ll$ $d\sigma_n$ for 'bare'

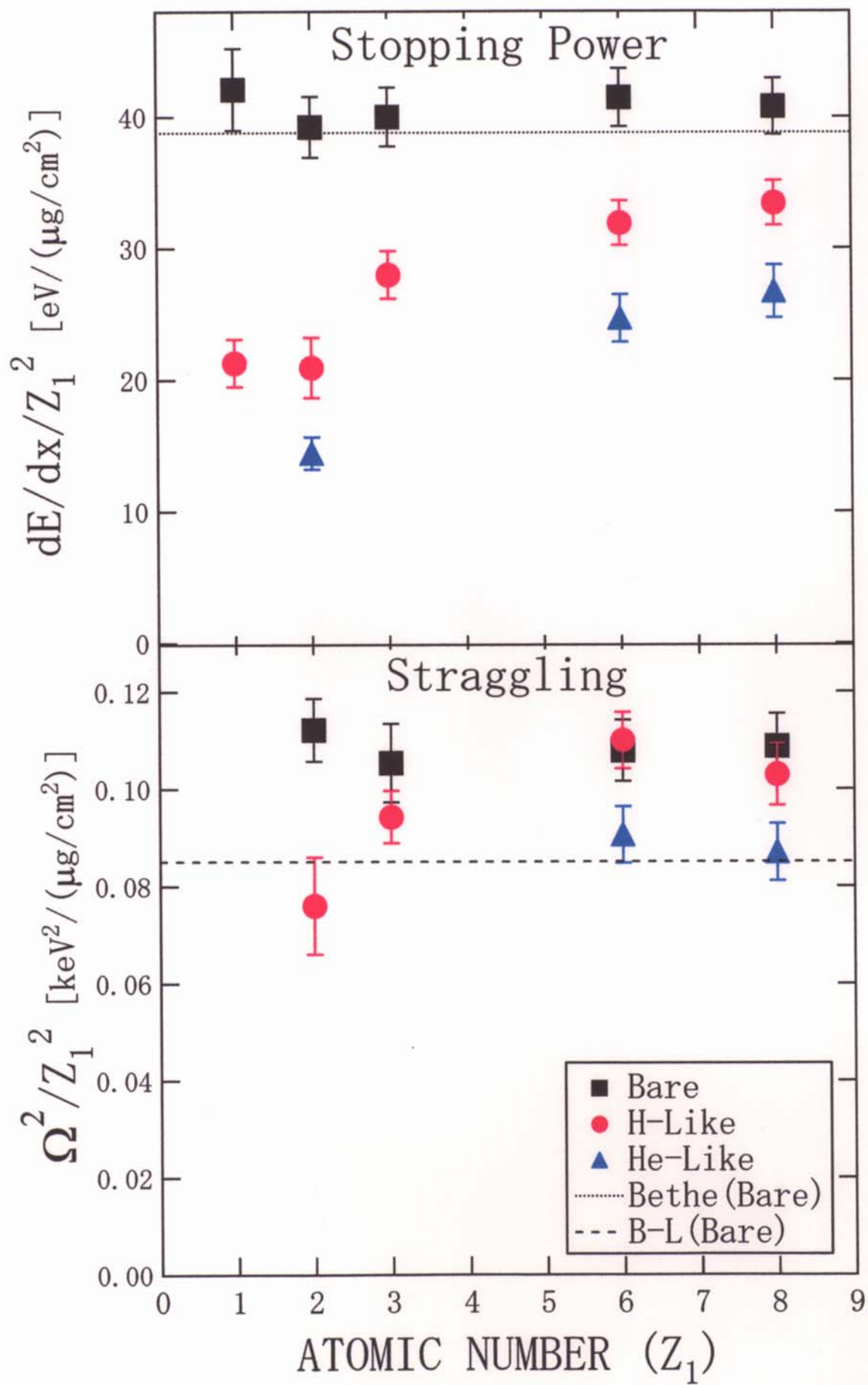
近接衝突

遠隔衝突に比べて、束縛電子の遮蔽効果は小さい

束縛電子を持つイオンのストラグリングにおいては
 近接衝突からの寄与が相対的に大きくなっている







ストラグリング測定値の誤差について

標的膜の膜厚の不均一性

$$\Omega_{\text{exp}}^2(t) = \Omega_{\text{true}}^2(t) + (S \delta t)^2$$

$\Omega_{\text{exp}}^2(t)$: 厚さ t の薄膜に対するストラグリング測定値

$\Omega_{\text{true}}^2(t)$: 厚さ t の均一な薄膜に対するストラグリング

S : 阻止能

δt : 薄膜の厚さ分布の標準偏差

膜厚の不均一性は、薄い膜ほど大きい

ストラグリング測定値は、膜厚 t に比例して増加

第2項は、 Z_1^4 に比例

実験値と理論値の相対誤差は、 Z_1 に依らずほぼ一定

RAIDEN の Focal Line と位置検出器とのずれ

MQ 調整により、スペクトル幅が最小となる条件を搜したが、入射ビームを使った調整であったため、感度が良くなかった

薄膜透過後のビームは多重散乱によって広がる

over- or under-focus によるにせのストラグリング

==> その大きさは、膜厚にほぼ比例するので
測定結果と矛盾しない

まとめ

束縛電子を持つ10-MeV/amu の軽イオンの荷電非平衡領域における炭素薄膜中でのエネルギー損失とストラグリングを測定

- He^{1+} のエネルギー損失とストラグリングは、荷電凍結状態での阻止能、荷電変換衝突及びその際のエネルギー損失を考慮することで定量的に説明できる。
- 荷電凍結したH-like及びHe-like 軽イオンに対する阻止能は、Born近似による理論計算で再現できる。
- 裸のイオンのストラグリングの測定値は、Bethe-Livingston 理論による計算値に比べて～30% 大きな値となる。
(Focal lineと位置検出器のずれによる可能性大)
- 荷電凍結状態でのイオンのストラグリングにどの程度の荷電状態依存性が見られるか。