

「プラズマ科学における分光計測の高度化と原子分子過程研究の新展開」

「原子分子データ応用フォーラムセミナー」

2016.12.21 核融合研

重イオンビームが生成するナノメートルサイズ プラズマの粒子シミュレーション

量子科学技術研究開発機構

森林 健悟

内容

(1) 序論

(2) シミュレーションモデル

(3) ナノサイズプラズマの生成と緩和

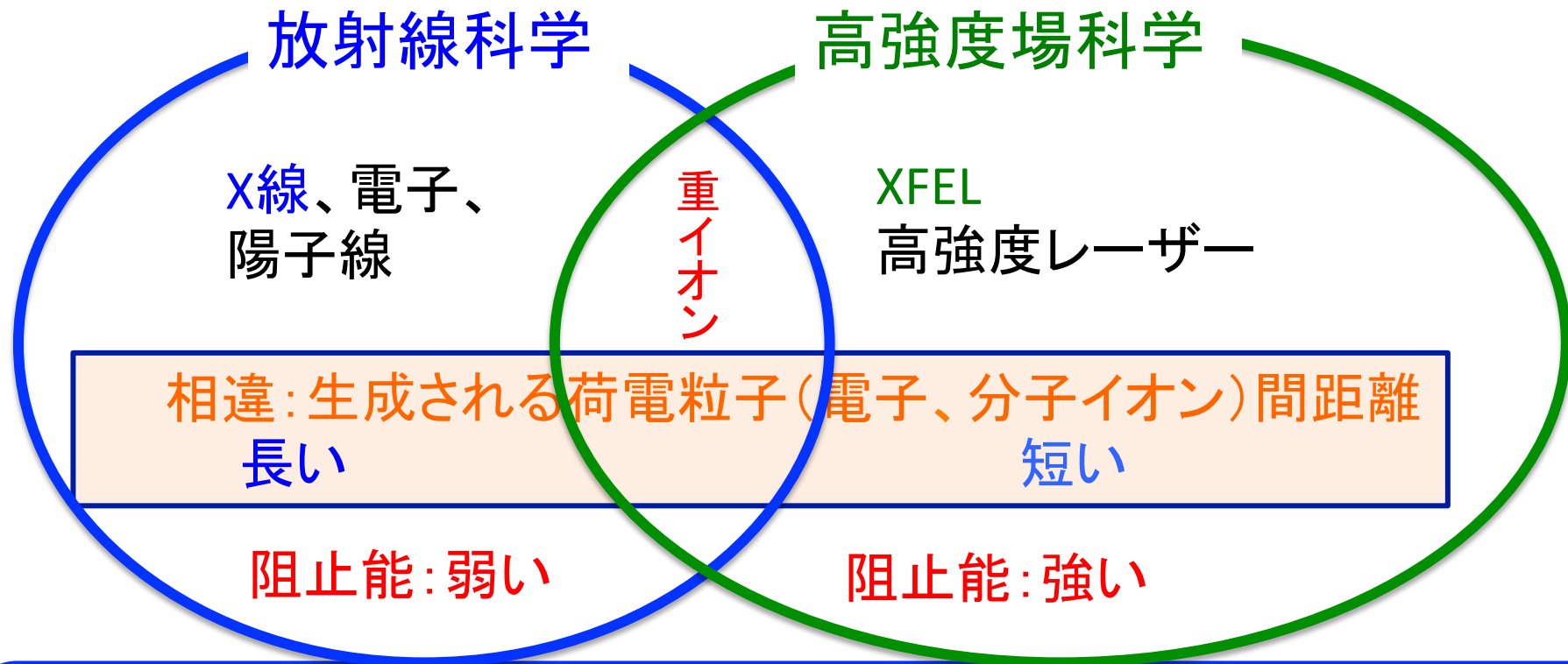
(4) 応用

(5) まとめ

重イオンビーム科学での新規モデルの提案

自然は学問の垣根を知らない(福井謙一先生の名言の1つ)

👉 垣根、学問の分野は正しく設定されているのか??

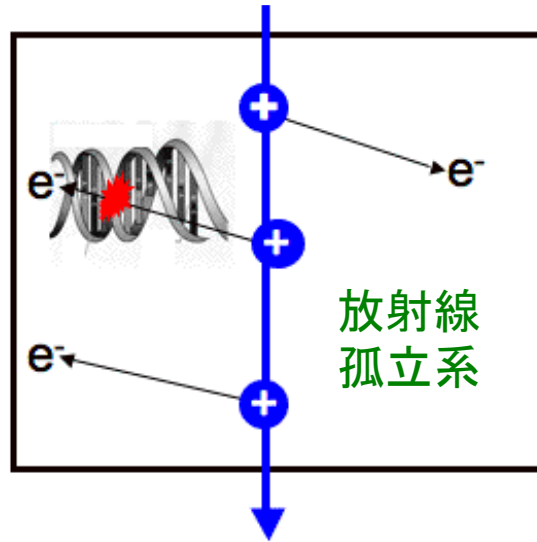


仮説: 強い阻止能の重イオンはÅに集光したXFELと類似

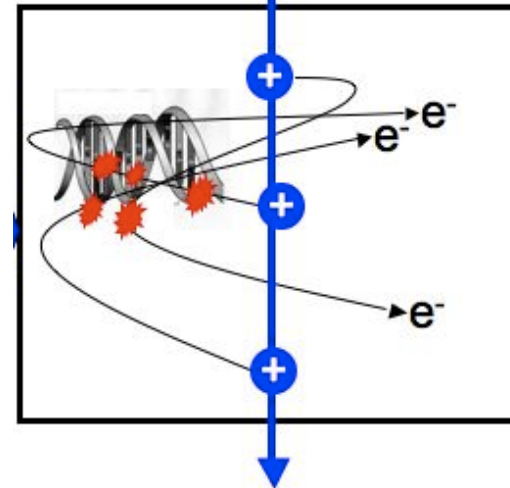
→ XFELでのシミュレーションモデルを重イオンビーム科学に適用。

新規モデル、研究の目的

従来のシミュレーションモデル



提案する新規モデル



戻ってくる電子 → ナノサイズのプラズマを生成

(特徴) プラズマが非常に狭い領域で発生:

(1) 原子レベルでの詳細なシミュレーション可能

(プラズマ生成・緩和過程の理解を深める?)

(2) 放射線生物学(重粒子線がん治療)・イオン加工に重要

(研究の目的) プラズマの生成・緩和過程とその応用を調べる

内容

(1) 序論

(2) シミュレーションモデル

(3) ナノサイズプラズマの生成と緩和

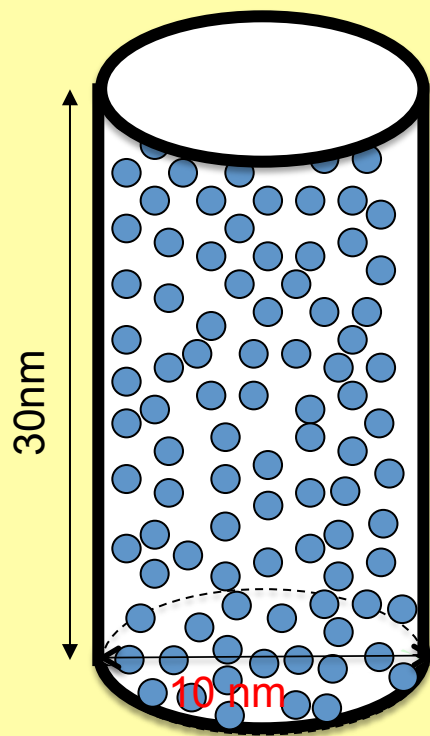
(4) 応用

(5) まとめ

シミュレーションモデル

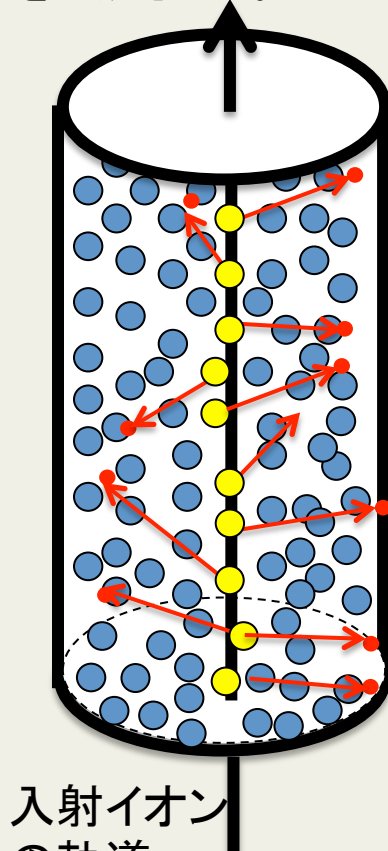
(1) 標的の設定

● 水分子



液体密度設定

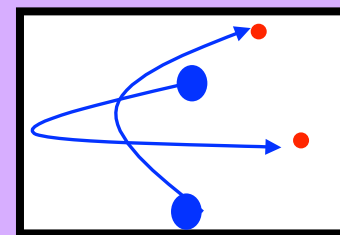
(2) イオンを照射し、
水分子イオンと二次電子
を生成させる。



入射イオン
の軌道

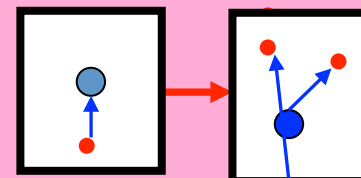
● 水分子イオン
● 二次電子

(3) 二次電子の運動



個々の二次電子と個々の荷電粒子との間のクーロン相互作用をニュートン方程式で解く。

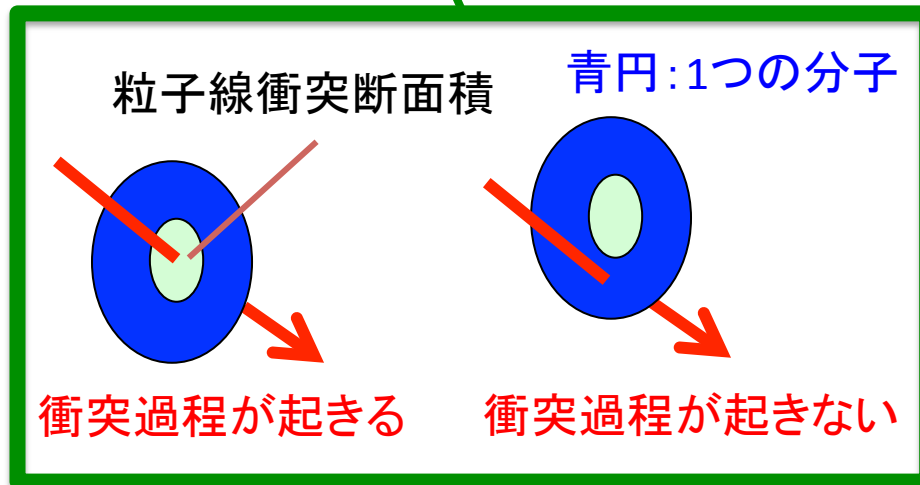
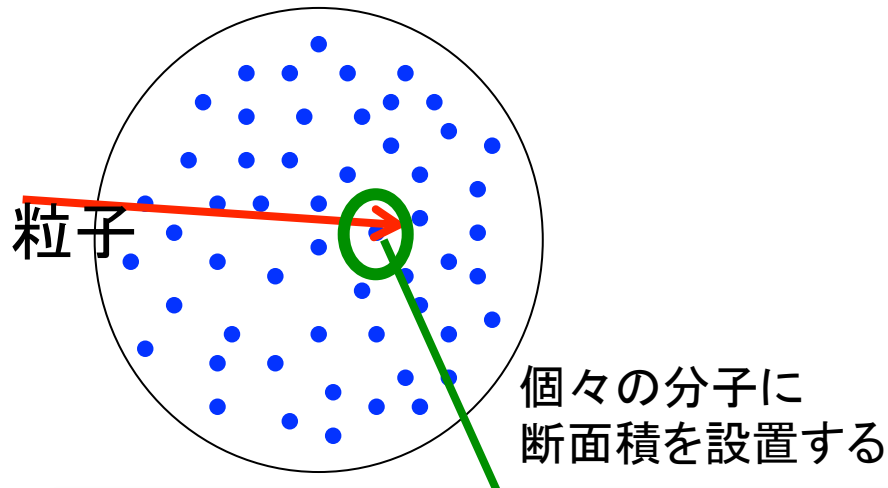
(4) 電子衝突過程



水分子の電離、励起を取り扱う。
電子のエネルギーは起こる過程によりエネルギーを失う: 動径線量計算に使用

粒子(イオン、電子)線衝突過程の取り扱い方、 二次電子の初期エネルギーの決め方

- 分子



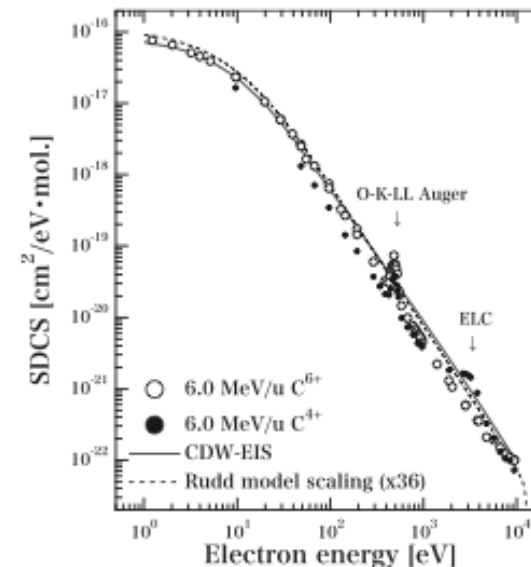
粒子が断面積を通過したときのみ
衝突過程が起きるとする

粒子線衝突電離が起きると以下の計算をする

$$\frac{\int_0^{E_{se}} f(E'_{se}) dE'_{se}}{\int_0^{\infty} f(E'_{se}) dE'_{se}} = R_n$$

乱数

二次電子の初期エネルギーとなる



内容

(1) 序論

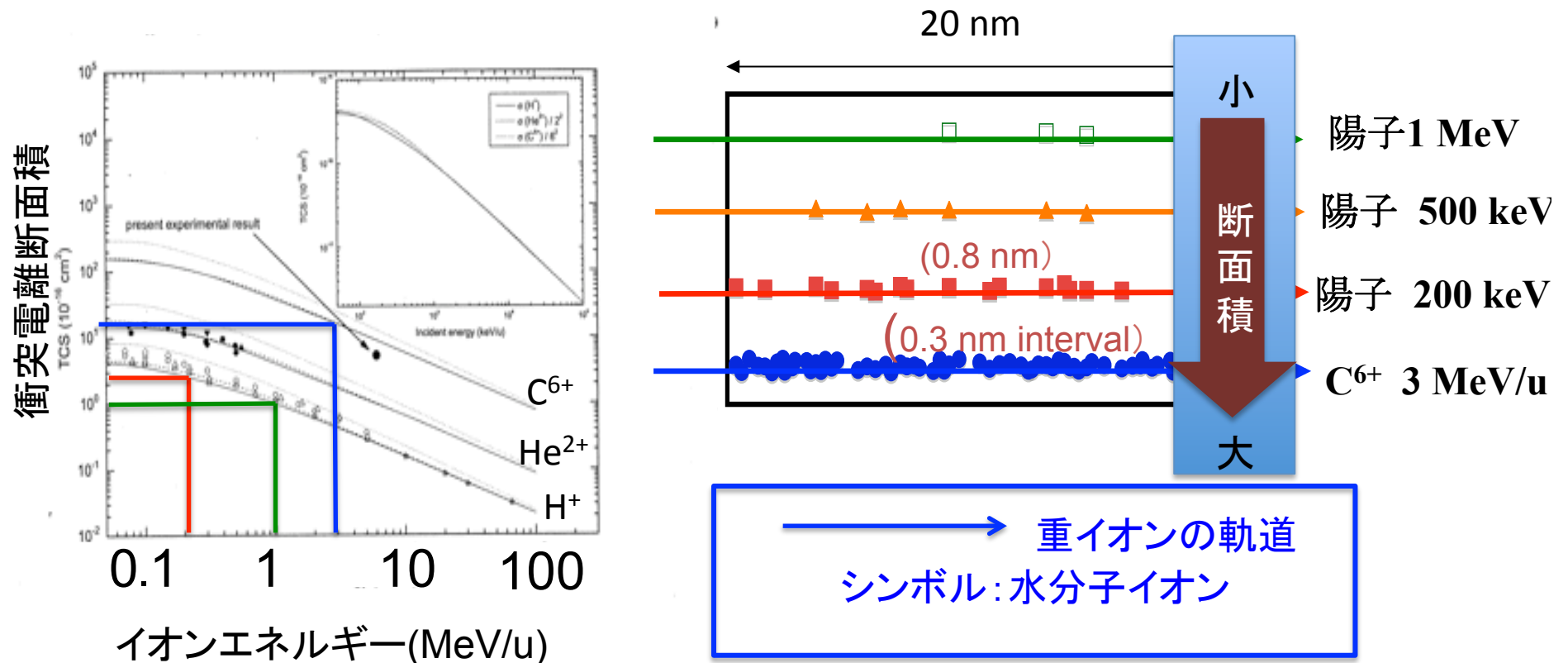
(2) シミュレーションモデル

(3) ナノサイズプラズマの生成と緩和

(4) 応用

(5) まとめ

重イオン照射で生成する分子イオン



C.D. Cappello et al., nucl.Ins.Meth.Phys.Res.B, **267**, 781 (2009) K. Morbayashi, Phys.Rev.A, **84**, 012702 (2011).

入射イオンによる衝突電離が起きる間隔(平均自由行程)の理論式と一致:
シミュレーションが正常に動作していることを確認

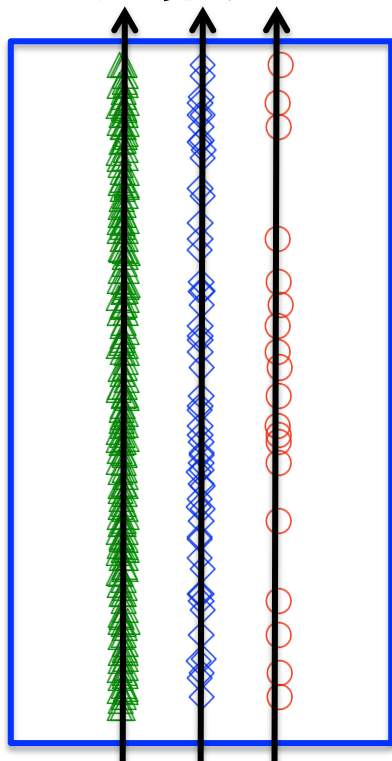
$$\tau = \frac{1}{n\sigma_{\text{ion}}}$$

n : 水分子の数密度

σ_{ion} : イオン衝突電離断面積

重イオン照射で生成する分子イオンのが作り出す電場

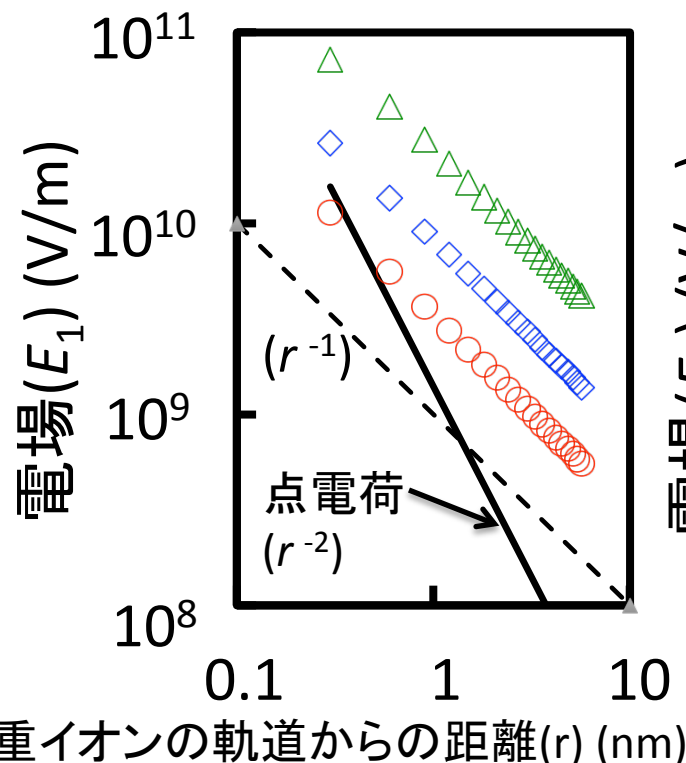
(1)水分子イオンの生成場所



イオンの平均生成間隔距離

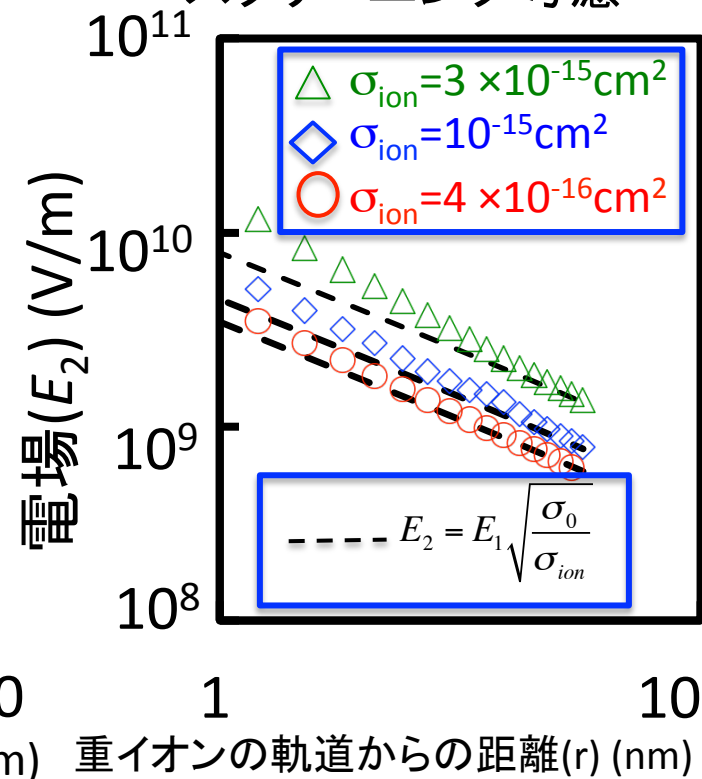
$\tau \propto \frac{1}{\sigma_{ion}}$ (平均自由行程)に一致

(2)電場：電子のスクリーニング無視



$$E_1 \propto \frac{\sigma_{ion}}{r}$$

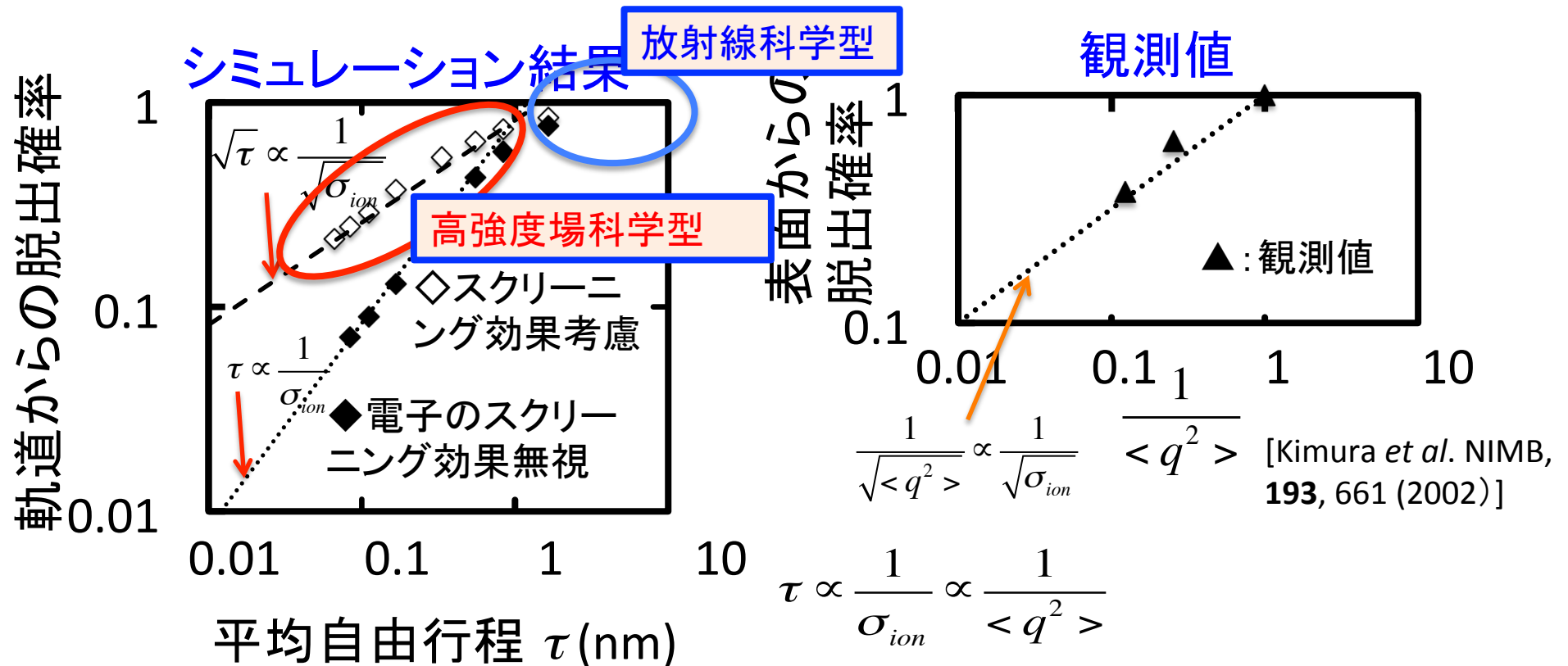
(3)電場：電子のスクリーニング考慮



$$E_2 = E_1 \sqrt{\frac{\sigma_0}{\sigma_{ion}}} \propto \frac{\sqrt{\sigma_{ion}}}{r}$$

成果：重イオン照射で誘発される電場の簡便式の導出に成功

二次電子が電場から脱出する確率



成果: 二次電子の脱出確率の簡便式の導出に成功。
実験値の傾向を再現することにも成功。

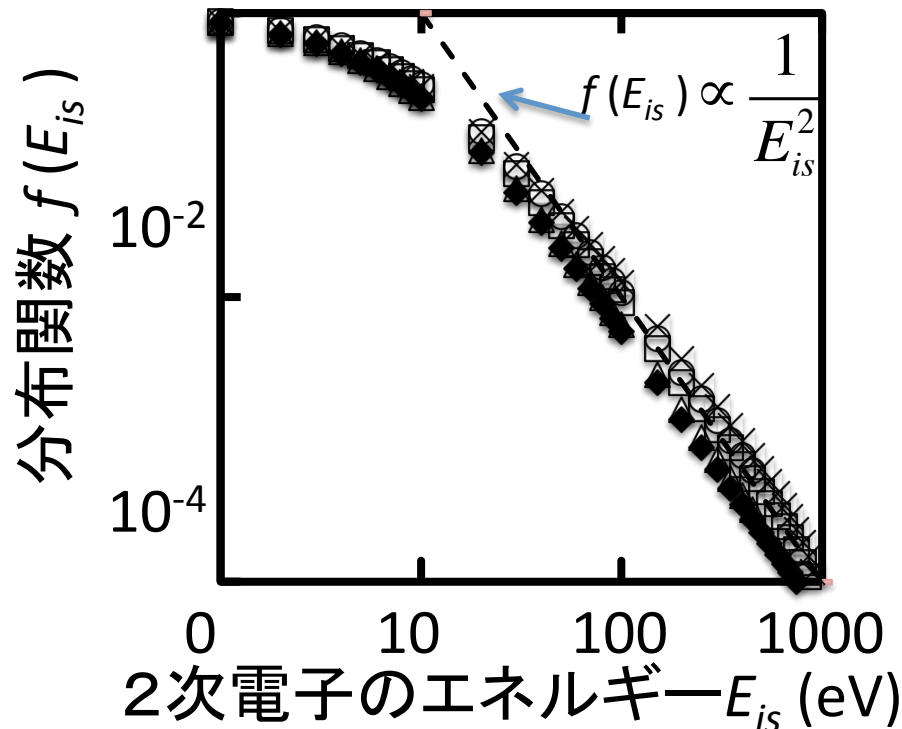
K. Moribayashi, J. Phys. Soc. Jpn., in press (2016.12)

二次電子が電場から脱出する確率(考察)

$$\text{脱出確率} \sim \frac{\int_{E_{is,min}}^{E_{is,max}} f(E_{is}) dE_{is}}{\int_0^{E_{is,max}} f(E_{is}) dE_{is}} \propto \int_{E_{is,min}}^{E_{is,max}} \frac{1}{E_{is}^2} dE_{is} \sim \frac{1}{E_{is,min}} \quad (\text{for } E_{is,min} > 30 \text{ eV})$$

$E_{is,min}$: 脱出できる二次電子の最小のエネルギー

二次電子の初期エネルギー分布



$E_{is,min} \propto$ 重イオン照射で生成する電場

$$\propto \sigma_{ion} \propto \frac{1}{\tau} \quad (\text{電子のスクリーニング無視})$$

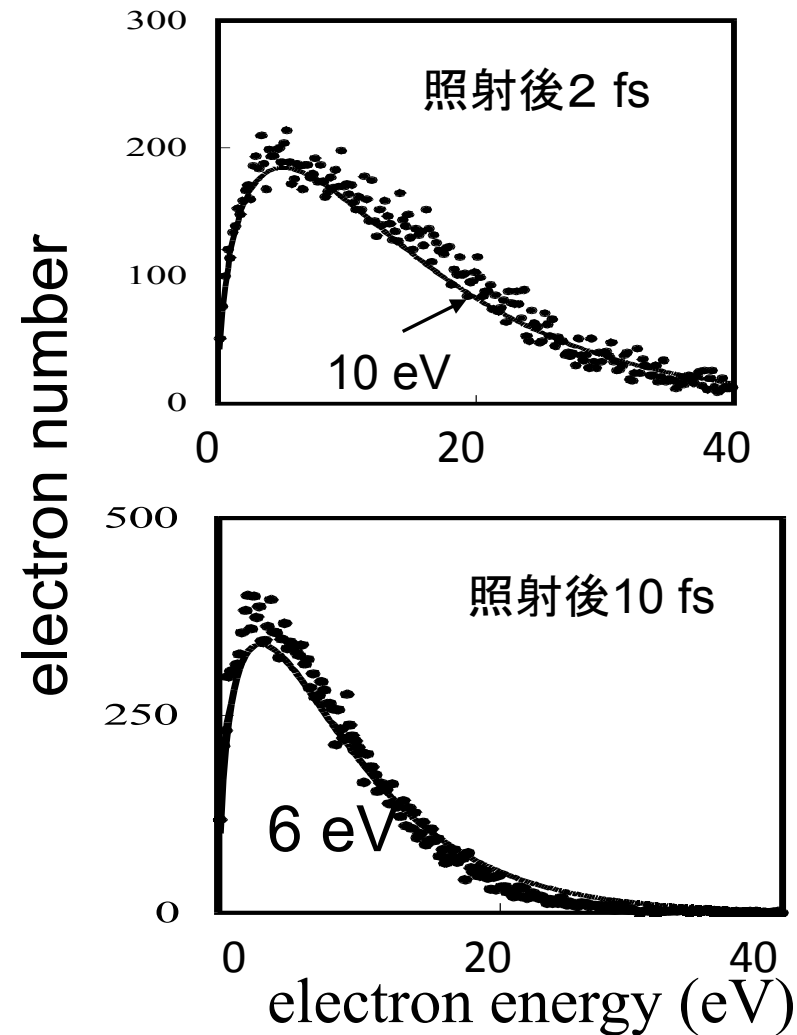
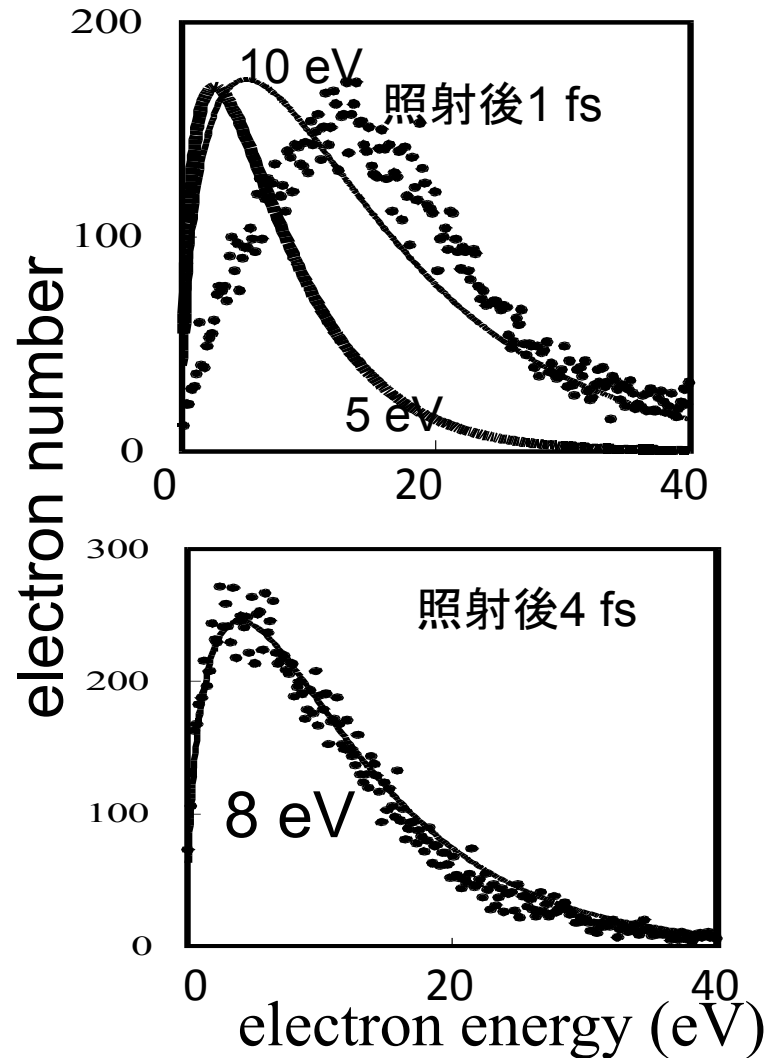
すなわち $\frac{1}{E_{is,min}} \propto \tau$

$$\propto \sqrt{\sigma_{ion}} \propto \frac{1}{\sqrt{\tau}} \quad (\text{電子のスクリーニング考慮})$$

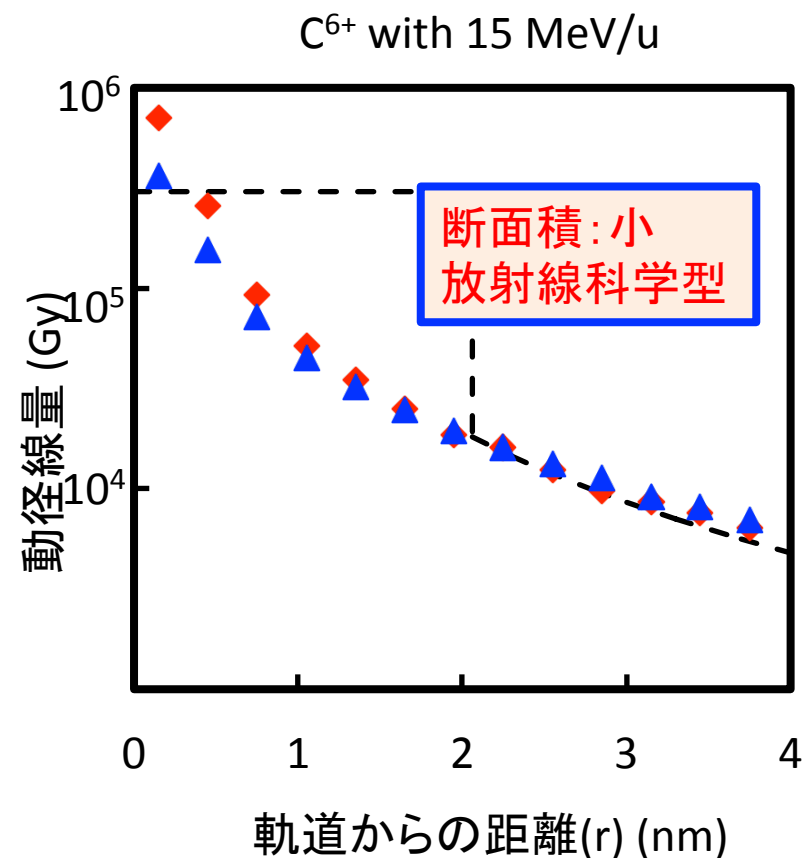
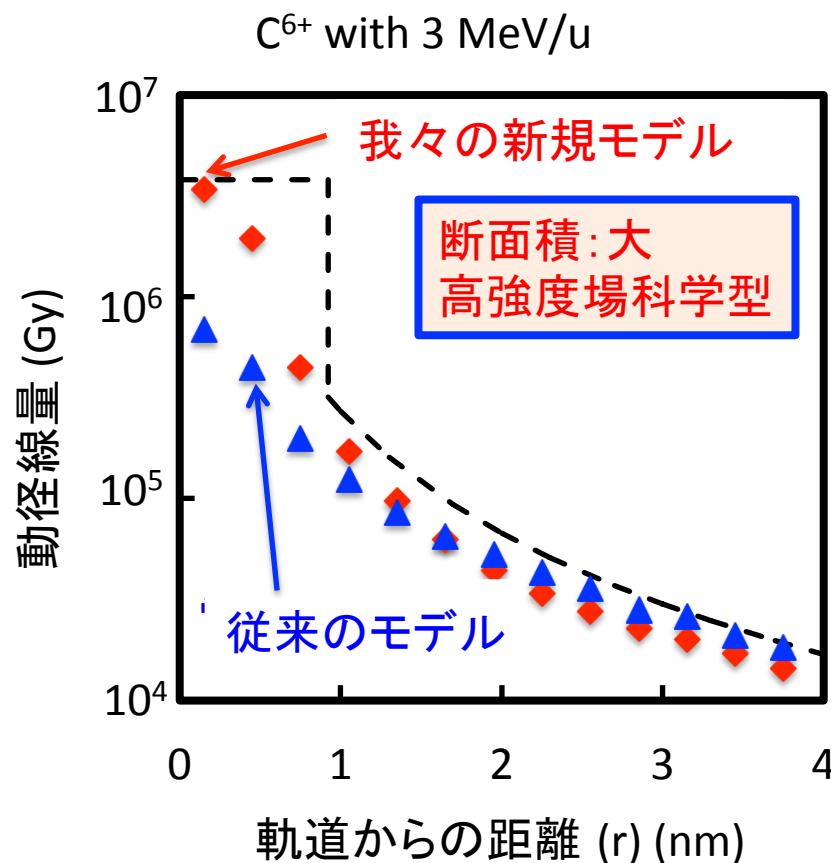
すなわち $\frac{1}{E_{is,min}} \propto \sqrt{\tau}$

$r < 1$ nmの二次電子の電子温度の時間変化

入射イオン: 3 MeV/uの炭素イオン 実線: マクスセル分布 数字: 電子温度



二次電子のエネルギー付与(動径線量)

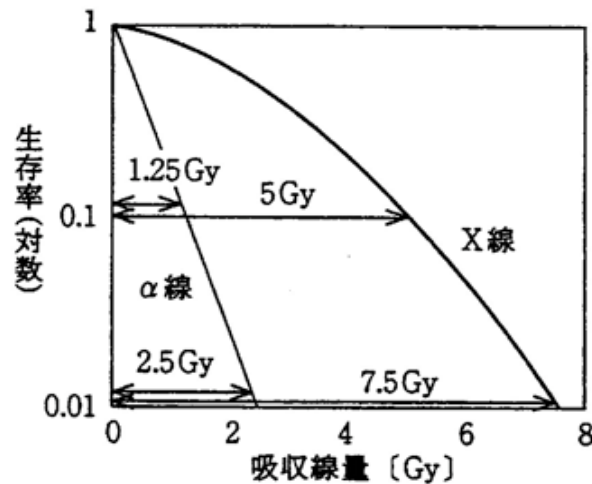


電子温度(エネルギー)の減少

→ 標的の温度(エネルギー)上昇(エネルギー付与)

放射線生物学、重粒子線がん治療、イオン加工の分野に有用

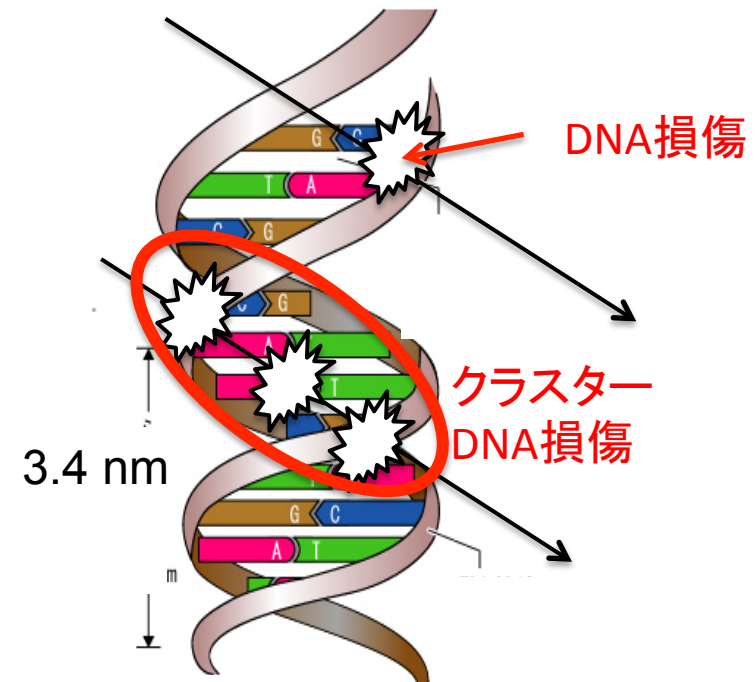
重粒子線の課題



RBE: 放射線の生物効果の強さを表す指標

生存率0.1に対するα線のRBEは

$$\text{RBE} = 5\text{Gy} / 1.25\text{Gy} = 4$$



課題: 重粒子線の生物効果比 (RBE) が大きいことを説明できない。

最有力の仮説: クラスターDNA損傷が生成し、それがRBEを大きくする

(DNA損傷の空間分布が重要: 動径線量が役に立つ)

まとめ

◎高強度場科学のシミュレーションモデルを
重イオンビーム科学に適用した。

(成果)

- 重イオン照射での誘導電場とその電場の二次電子の運動への影響を計算し、この計算結果を再現する簡便式の導出に成功
- 二次電子の運動に関して実験値の再現に成功
- 動径線量で二次電子の運動に電場の影響を取り入れた新しいモデルを提案

ご静聴、ありがとうございました