

EUV, X-ray環境下でのダスト光電効果

勝野 啓(神戸大学大学院理学研究科)

概要

原始惑星系円盤のダスト成長にはダストの荷電分布が大きな影響を及ぼす(Okuzumi 2009).しかし,円盤表面でのUV, X線の影響は現在まで調べられていない.そこで,原始惑星系円盤での荷電ダスト分布を知ることを目標とし,手始めにWeingartner & Draine .2006(WD06)の再現を行った.WD06ではダスト(graphite, silicate)にEUV~X-ray領域(13.6eV~10keV)の光子が一つ入射した際に放出される光電子の数(光電収率)の見積もりを行った.

イントロ

- ◆ 星間に漂うダストは荷電過程にさらされており,帯電ダストは円盤内でのダスト進化に大きな影響を及ぼす.(Okuzumi 2009)
- ◆ T Tauri型星において数keVのX線が観測されている.(e.g. Glassgold et al .1996)

$$L_{X-ray} \approx 10^{29} \sim 10^{31} \text{ ergs/s}, kT_{X-ray} \approx 1 \sim 5 \text{ keV}$$

星の進化段階におけるX線放射 http://vsop.mtk.nao.ac.jp/~umemoto/vsop2sf/pdf/vsop2_sf_propo.pdf

Properties	Infalling Protostar	Evolved Protostar	Classical T tauri star	Weak-lined T tauri star	Main Sequence star
Age(yrs)	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶ - 10 ⁷	10 ⁶ - 10 ⁷	>10 ⁷
Class	Class 0	Class I	Class II	Class III	(Class III)
Disk	Yes	Thick	Thick	Thin or Non-existent?	Planetary Systems?
X-ray	YES	YES	Strong	Strong	Weak

- ◆ EUV, X線によってダスト電荷がプラスになりうる.

◆ 本研究: EUV, X線によるダスト光電効果 (Weingartner&Draine .2006)

X線による光電効果

- ◆ 光電収率(1光子当たり飛び出す光電子の数)

$$Y(h\nu, Z, a) = y_2(h\nu, Z, a) \times \min[y_0(\Theta) y_1(h\nu, a), 1]$$

y_0 : バルクに対するyield

for バルクの固体 $\rightarrow Y(h\nu) = y_0(\Theta = h\nu - W)$

y_1 : 小さなダストほど電子をだしやすいことを考慮

y_2 : ダスト表面に出てから ∞ に逃げる電子の割合

$$\Theta = \begin{cases} h\nu - h\nu_{\text{cut}} + \frac{(Z+1)e^2}{a}, & Z \geq 0 \\ h\nu - h\nu_{\text{cut}}, & Z < 0 \end{cases}$$

$h\nu_{\text{cut}}$: 光電効果を起こす光子エネルギーの閾値

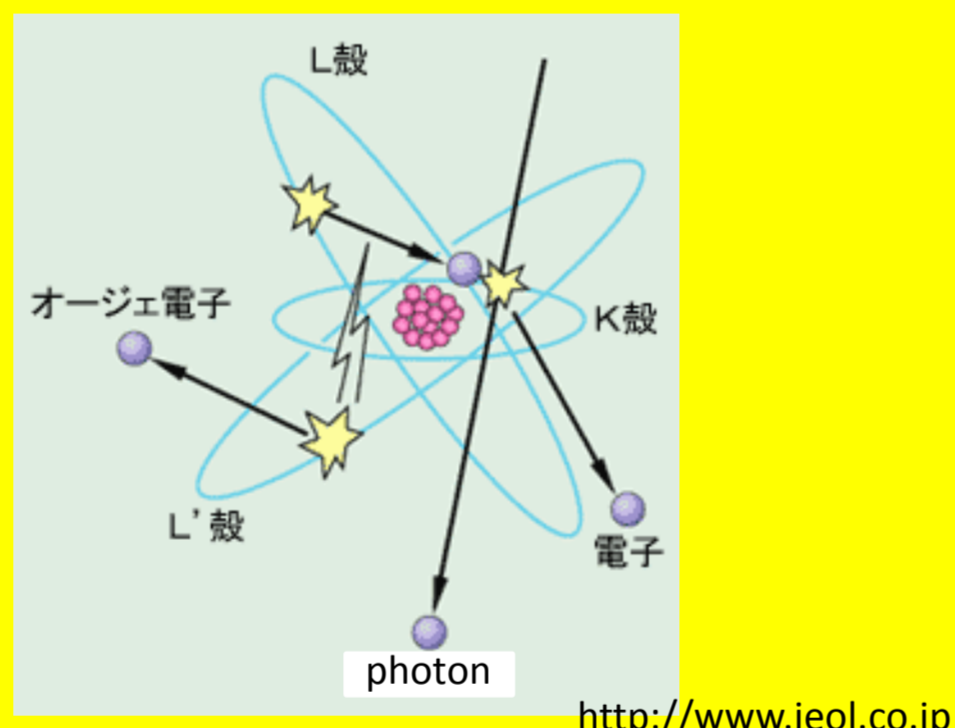
- ◆ 高エネルギー光子による光電効果の特徴

1. 内殻光電効果

低エネルギー光子は,物質のバンド構造から電子を弾き飛ばす(外部光電効果)のに対して,高エネルギー光子は物質を構成する元素の内殻電子を励起する(内殻光電効果)ことができる.($< 20\text{eV}$ に対しては外部光電効果, $\geq 50\text{eV}$ に対しては内殻光電効果, $20\text{eV} \leq h\nu < 50\text{eV}$ では外部と内殻の割合が徐々に変化.)

2. オージェ電子の生成

十分に高いエネルギーの光子がダストに入射した場合,各原子はオージェ過程を通してオージェ電子を生成する.



3. 2次電子の生成

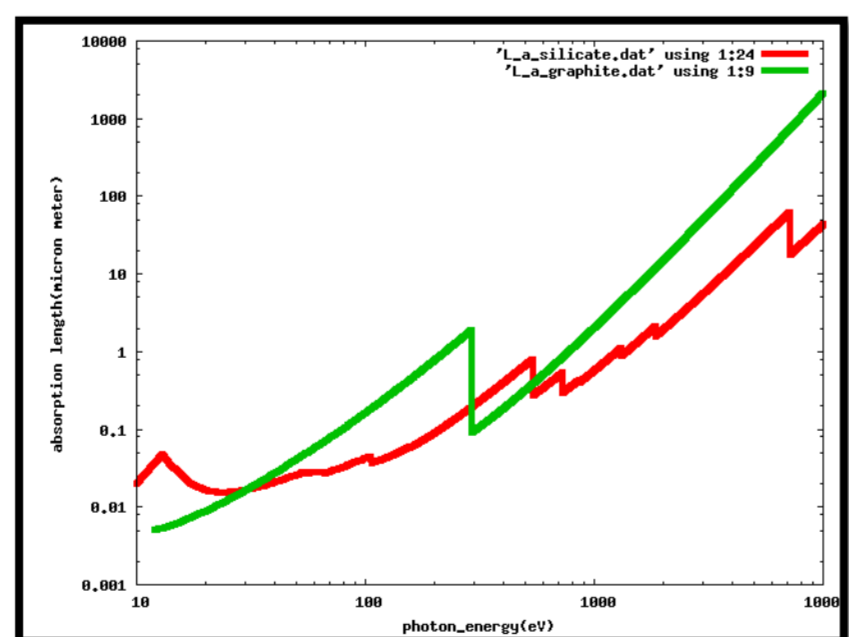
高エネルギー光子により生成された1次電子,オージェ電子により,ダスト内で2次電子(~数10eV)が生成される.

- ◆ 光子減衰長(近似) $l_a^{-1}(h\nu) \approx \sum_{i,s} n_i \sigma_{i,s}(h\nu)$

- ◆ 電子平均自由行程

$$l_e(E_e; \text{graphite}) = \begin{cases} 10 \text{ \AA} & , E_e \leq 164 \text{ eV} \\ 4.78 \times 10^{-3} \text{ \AA} (E_e / \text{eV})^{1.5}, E_e > 164 \text{ eV} \end{cases}$$

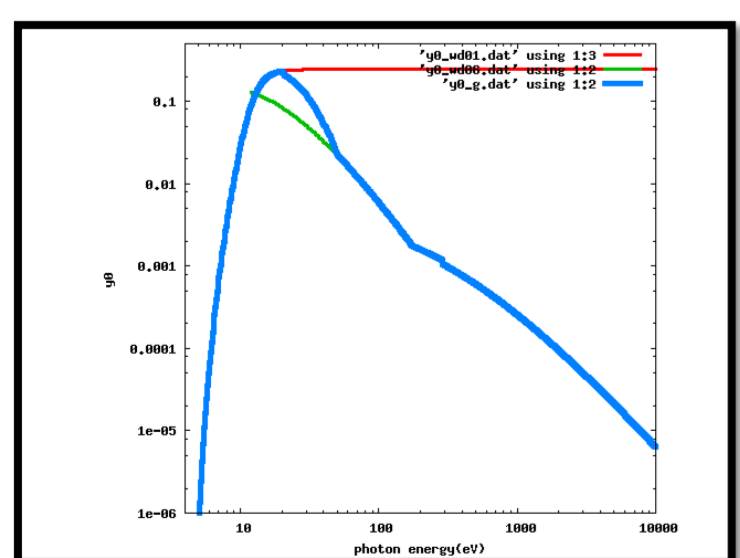
$$l_e(E_e; \text{silicate}) = \begin{cases} 10 \text{ \AA} & , E_e \leq 211 \text{ eV} \\ 3.27 \times 10^{-3} \text{ \AA} (E_e / \text{eV})^{1.5}, E_e > 211 \text{ eV} \end{cases}$$



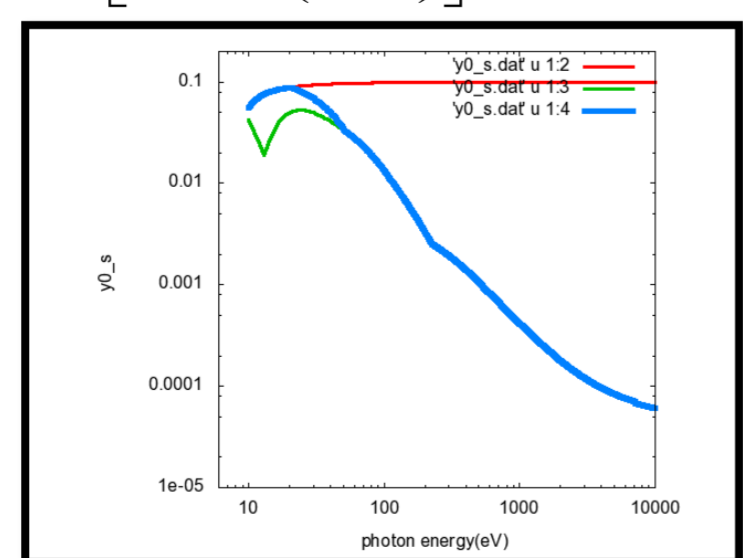
光子減衰長

- ◆ バルクの光電収率

$$y_0(i, s; \Theta_{i,s}) = n_i \sigma_{i,s} \int_0^{\pi/2} d\theta \sin \theta \cos \theta \times \int_0^{\infty} dx \frac{dx}{l_e} \exp\left[-x \left(\frac{1}{l_a} + \frac{\cos \theta}{l_e}\right)\right] = n_i \sigma_{i,s} l_e \left[1 - \frac{l_e}{l_a} \ln\left(1 + \frac{l_a}{l_e}\right)\right]$$



Bulk yield of graphite



Bulk yield of silicate

- ◆ オージェ電子のバルクの収率

$$y_{0,A}(i, s, j; \Theta_{i,s}) = P_{A,i,s,j} n_i \sigma_{i,s} l_e \left[1 - \frac{l_e}{l_a} \ln\left(1 + \frac{l_a}{l_e}\right)\right]$$

$P_{A,i,s,j}$: オージェ遷移jを通して原子から出てくる電子の数 (Dwek & Smith 1996)

- ◆ 2次電子の収率

$$Y_{\text{sec}}(h\nu, Z, a) = \sum_k Y_{\text{sec},k}(h\nu, Z, a)$$

$$= \sum_k Y_k(h\nu, Z, a) \frac{y_{2,k}^{\text{sec}}(h\nu, Z, a) E_{e,k} l_e^{-1}(E_{e,k})}{y_{2,k}(h\nu, Z, a) \varepsilon a^{-1} + (10 \text{ \AA})^{-1}}$$

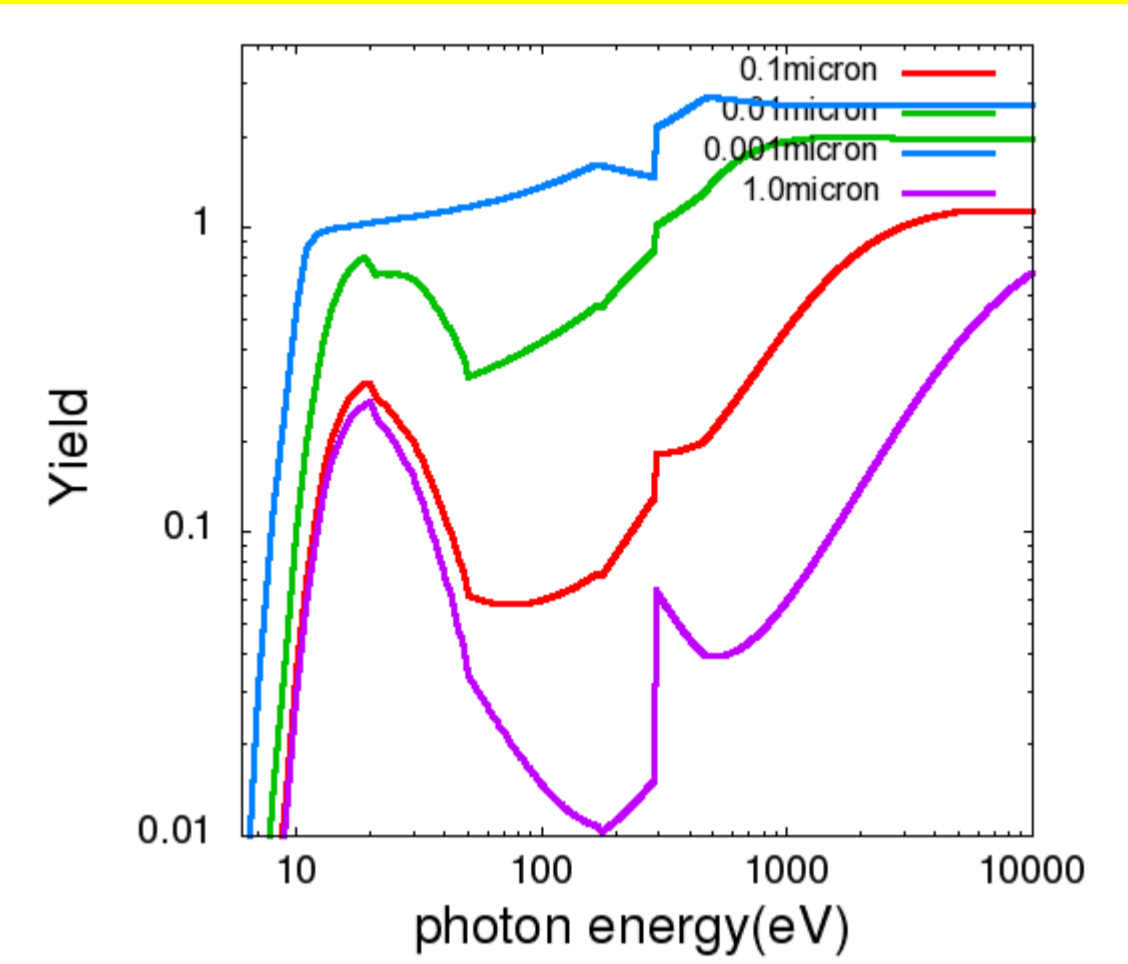
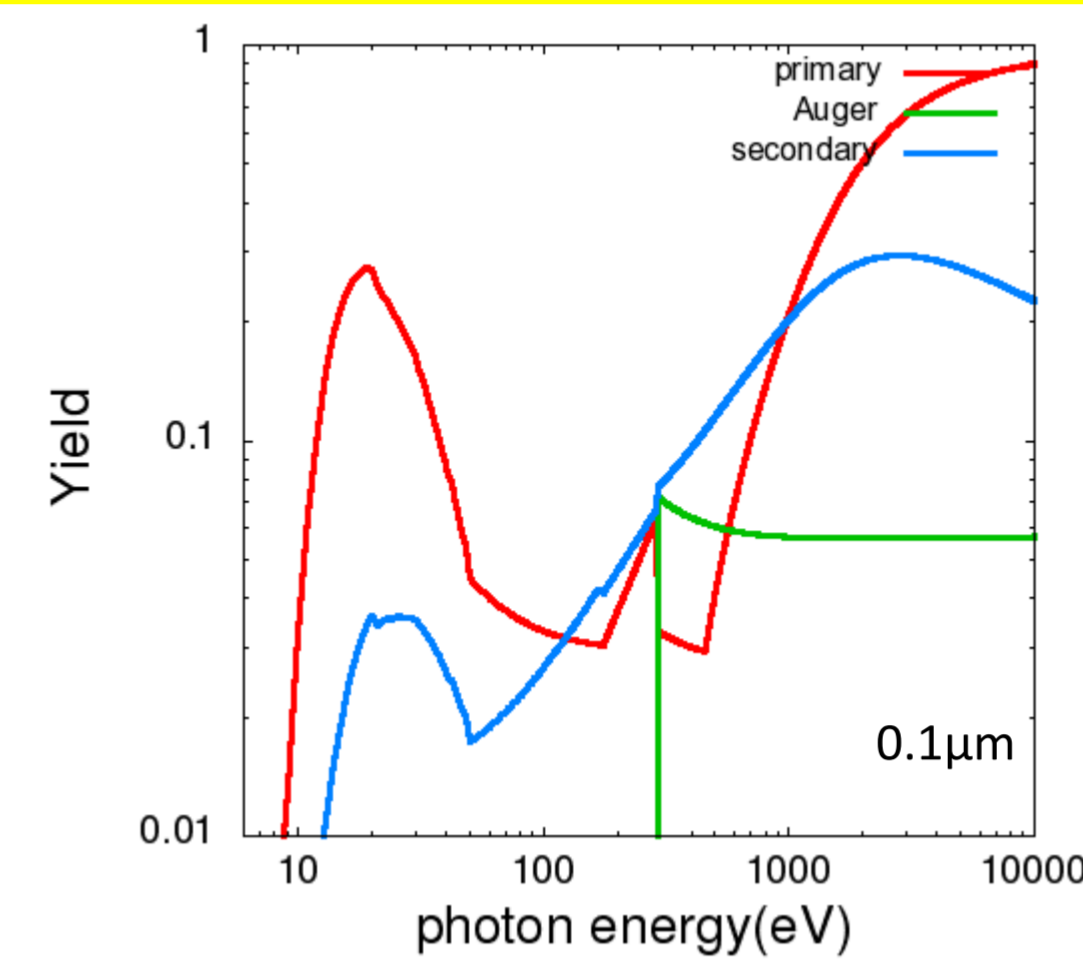
$E_{e,k} = \begin{cases} h\nu - W & ; \text{バンド内からの1次電子} \\ h\nu - I_{e,k} & ; \text{内殻からの1次電子} \\ E_{A,i,s,j} & ; \text{オージェ電子} \end{cases}$

$\varepsilon = \begin{cases} 117 \text{ eV} & ; \text{炭素ダスト} \\ 155 \text{ eV} & ; \text{シリケートダスト} \end{cases}$

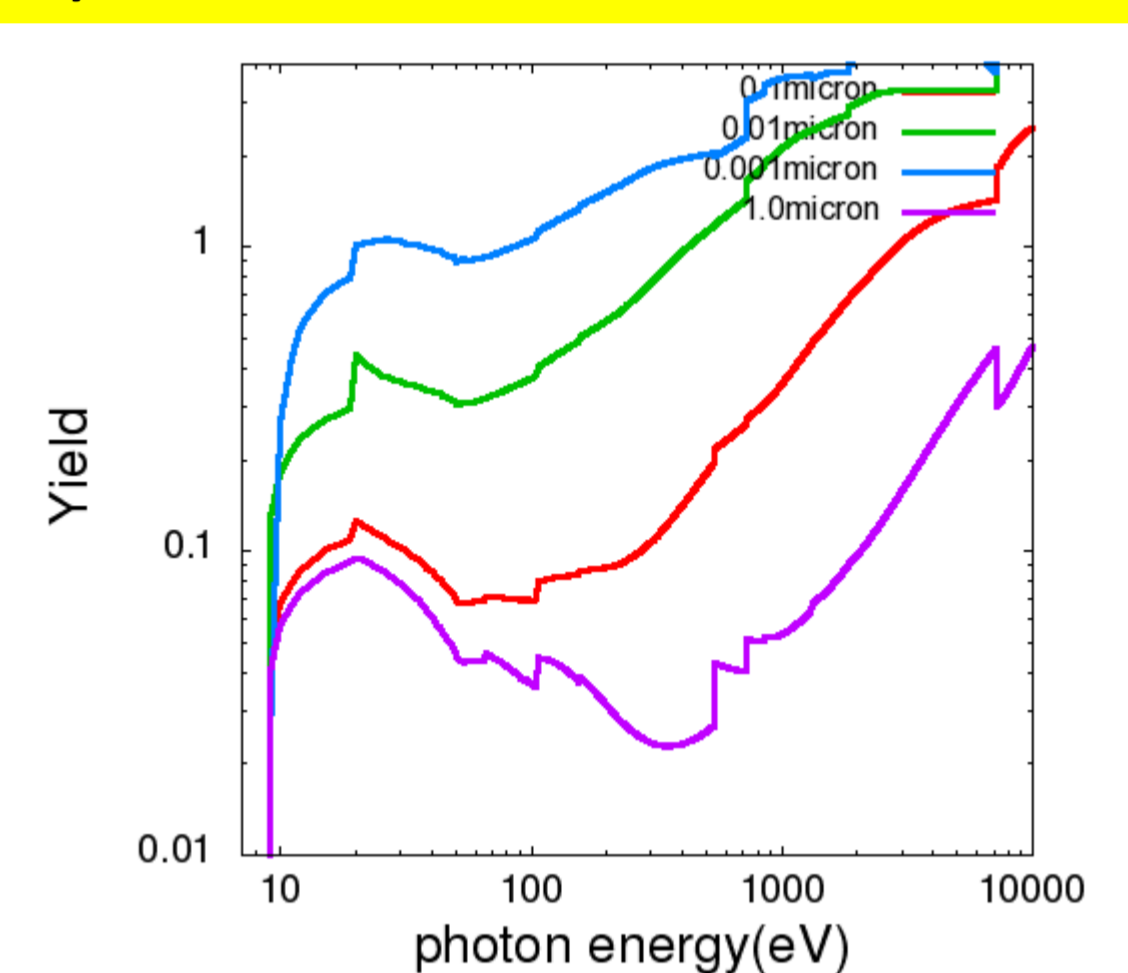
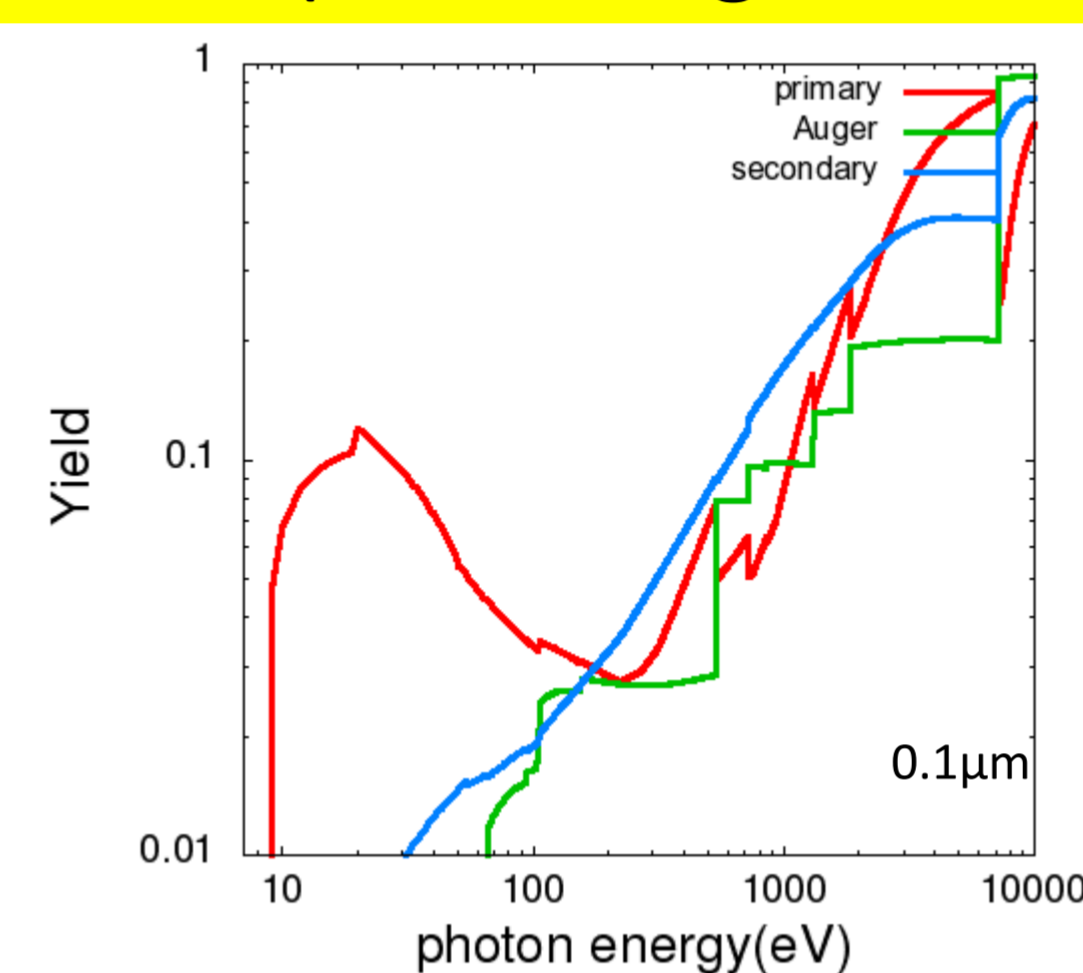
結果と考察

★結果

全収率(non-charged graphite grain)



全収率(non-charged silicate grain)



★考察

- ◆ 高エネルギー(10keV)に近づくにつれて1次電子の収率が1に近づくのはダスト中での光子減衰長,電子平均自由行程ともにダストサイズと比較して十分に大きくなるためである.
- ◆ ダストサイズの増加とともに収率が減少するのは,生成された電子がダスト内でエネルギーを失いダストの外に出ることができないためである.
- ◆ WD06をよく再現している.silicateの10keV付近でのみややずれている.
- ◆ 原始惑星系円盤で観測されているX線は1~5keVである.典型値を3keVとすると,光電収率は0.1 μm のgraphiteで1程度,silicateで1.2程度となる.
- ◆ 原始惑星系円盤においてEUV, X線によるダストの電離を考える必要がある.

まとめとこれから

★まとめ

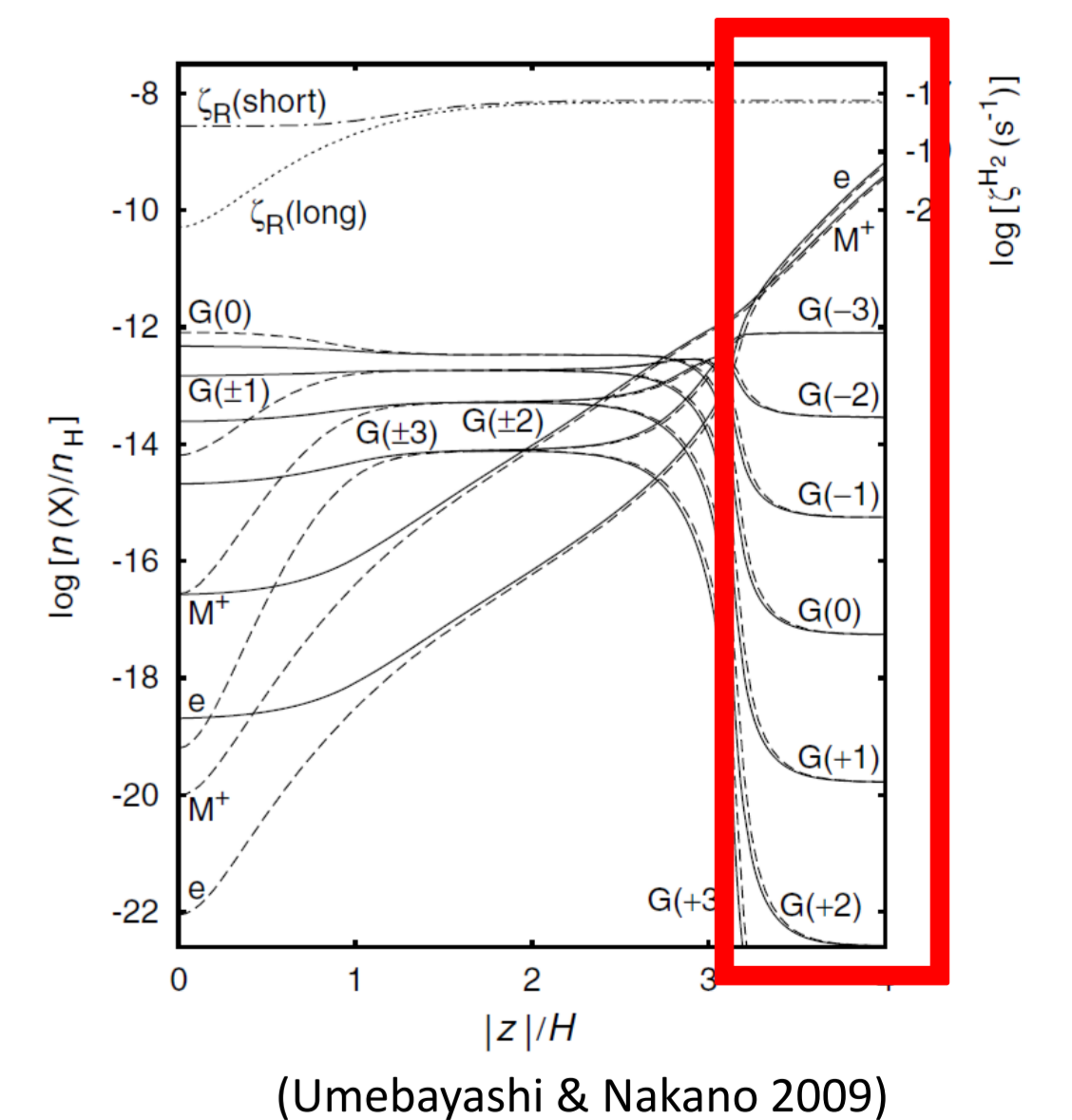
- ◆ EUV, X-rayによるダストの光電効果を調べた.
- X線領域において典型的なサイズ(0.1 μm)のダストに対して,収率は1程度である.

★ future work

原始惑星系円盤でのX線によるダストの電離を考慮し,荷電分布を求める.

- ◆ 予想

円盤表面(Z/H; 大)においてダストが正に帯電?
→表面付近でダストの合体成長が促進される?



(Umebayashi & Nakano 2009)

- ◆ 今後

- ①.原始惑星系円盤におけるX線強度分布を調べる.
- ②.今回求めた収率と①で求めたX線強度を利用し,円盤の各地点において,X線による電離率を計算する.
- ③.②で求めた電離率を適用し,電荷の詳細つり合いを行い原始惑星系円盤でのダストの荷電分布を求める.

