

種族 II, III の星形成と磁場

山形大学理学部

梅林豊治

アウトライン

1. はじめに --- 種族 I の星形成と磁場
2. 磁場の散逸機構機構 --- Ambipolar diffusion とJoule dissipation
3. 星間化学 --- 化学反応の諸過程, ガスの電離過程
4. ダストの形成と役割
5. 高エネルギー粒子の流束とガスの電離過程
 - a. CR
 - b. X
 - c. 放射性核種
6. ガスの熱電離
7. まとめ

1.はじめに --- 種族 I の星形成と磁場

• 磁場

- 銀河系内 --- $B \sim 10^{-6} \text{G}$ \Rightarrow 星 --- $B \sim 1-10^3 \text{G}$
- 銀河系外 --- $B \sim 10^{-16} \text{G} - 10^{-9} \text{G}$
- 銀河団 --- $B \sim 10^{-6} \text{G}$

\Rightarrow 偏光観測 --- ALMA, SKA

- 種族 I の星形成 --- 低温, 低電離のガス \Rightarrow 散逸過程
磁場は $B < B_{\text{cr}}$ であれば収縮してもそのままである
 回転と大きく異なる --- 角運動量輸送,
 \Rightarrow 種族 II, III では, 何が変化するか? --- ガスの電離状態
- 電離過程, 化学反応, 温度の違い

2. 磁場の散逸機構 --- Ambipolar diffusion と Joule dissipation

弱電離ガスの構成要素(中性、荷電粒子)の運動方程式

荷電粒子 (ν):
$$\rho_\nu \frac{d\mathbf{u}_\nu}{dt} = e q_\nu n_\nu (\mathbf{E}_0 + \frac{1}{c} \mathbf{u}_\nu \times \mathbf{B}) - \nabla P_\nu + \rho_\nu \mathbf{g} + \mathbf{f}_{\nu n},$$

中性粒子:

$$\rho_n \frac{d\mathbf{u}_n}{dt} = -\nabla P_n + \rho_n \mathbf{g} - \sum_\nu \mathbf{f}_{\nu n},$$

荷電粒子と中性粒子の間ではたらくまさつ力(frictional force)

$$\mathbf{f}_{\nu n} = \mu_{\nu n} n_\nu n_n \langle \sigma v \rangle_{\nu n} (\mathbf{u}_n - \mathbf{u}_\nu),$$

$\mu_{\nu n}$: 換算質量
 n_ν, n_n : 荷電粒子、中性粒子の数密度
 $\langle \sigma v \rangle_{\nu n}$: 衝突率係数

流体全体の運動方程式 -- 通常の電磁流体と同様

$$\rho \frac{d\mathbf{u}}{dt} = \frac{1}{c} \mathbf{j} \times \mathbf{B} - \nabla P + \rho \mathbf{g},$$

where

$$\mathbf{j} = \sum_{\nu} e q_{\nu} n_{\nu} \mathbf{u}_{\nu} \quad : \text{電流密度}$$

$$\rho = \rho_n + \sum_{\nu} \rho_{\nu}, \quad : \text{質量密度}$$

$$\mathbf{u} = \frac{1}{\rho} (\rho_n \mathbf{u}_n + \sum_{\nu} \rho_{\nu} \mathbf{u}_{\nu}). \quad : \text{流体全体の速度}$$

種々の荷電粒子の運動(速度)をローカルな座標系(磁場 \mathbf{B} はz軸方向、 $\mathbf{j} \times \mathbf{B}$ はx軸方向)を採用して解くことによって電場 \mathbf{E} のxy平面での成分を求める。

電場の表式 -- xy平面

$$\mathbf{E}_0 + \frac{1}{c} (\mathbf{u}_n + \mathbf{v}_B) \times \mathbf{B} = 0,$$

$$v_{Bx} = \frac{A_1}{A} \frac{1}{c} |\mathbf{j} \times \mathbf{B}|,$$

$$v_{By} = -\frac{A_2}{A} \frac{1}{c} |\mathbf{j} \times \mathbf{B}|,$$

where $\mathbf{j} = (c/4\pi)\nabla \times \mathbf{B}$ is the electric current density,

$$A_1 = \sum_{\nu} \frac{\rho_{\nu} \omega_{\nu}^2}{\tau_{\nu} \Omega_{\nu}^2}, \quad A_2 = \sum_{\nu} \frac{\rho_{\nu} \omega_{\nu}}{\tau_{\nu}^2 \Omega_{\nu}^2},$$

$$A = A_1^2 + A_2^2 = \sum_{\kappa, \nu} \frac{\rho_{\kappa} \omega_{\kappa}}{\tau_{\kappa}^2 \Omega_{\kappa}^2} \frac{\rho_{\nu} \omega_{\nu}}{\tau_{\nu}^2 \Omega_{\nu}^2} (\tau_{\kappa} \omega_{\kappa} \tau_{\nu} \omega_{\nu} + 1),$$

$$\Omega_{\nu}^2 = \frac{1}{\tau_{\nu}^2} + \omega_{\nu}^2,$$

$$\tau_{\nu} = \rho_{\nu} / \mu_{\nu n} n_{\nu} n_n \langle \sigma v \rangle_{\nu n}$$

: viscous damping time

$$\omega_{\nu} = q_{\nu} eB / m_{\nu} c$$

: cyclotron frequency

電場の表式 --- 慣性系

$$\mathbf{E}_0 = -\frac{1}{c} \mathbf{u}_n \times \mathbf{B} + \frac{1}{\sigma_c} \mathbf{j} + \beta \mathbf{j} \times \mathbf{B} - \xi (\mathbf{j} \times \mathbf{B}) \times \mathbf{B}.$$

where

$$\beta = \frac{B}{c^2} \frac{A_2}{A},$$

$$\xi = \frac{1}{c^2} \frac{A_1}{A} - \frac{1}{B^2 \sigma_c}$$

$$\sigma_c = \sum_{\nu} \sigma_c(\nu)$$

$$\sigma_c(\nu) = (eq_{\nu})^2 \tau_{\nu} n_{\nu} / m_{\nu}$$

: 電気伝導率

$$= \frac{1}{B^2 \sigma_c A} \sum_{\alpha, \nu} \frac{Q_{\alpha} \omega_{\alpha}}{\tau_{\alpha}^2 \Omega_{\alpha}^2} \frac{Q_{\nu} \omega_{\nu}}{\tau_{\nu}^2 \Omega_{\nu}^2} \{ \tau_{\alpha} \omega_{\alpha} (\tau_{\nu} \omega_{\nu})^3 - 1 \}.$$

- 第2項 --- Joule (ohmic) dissipation --- 散逸して、熱になる
 - 第3項 --- 散逸には寄与しない (Hall effect)
 - 第4項 --- ambipolar diffusion (plasma drift) --- 貫く磁束が減少
- ⇒ 荷電粒子の種類と密度 n_{ν} が重要 ($\omega_{\nu} \tau_{\nu}$ の値で決まる)

2. 星間化学 -- 化学反応の諸過程, ガスの電離状態

- 気相反応

- 電離 --- 宇宙線、X線、紫外線, 放射性核種 ⇒ 宇宙線流束, 存在量
- 化学反応 --- イオン, 中性, 再結合反応 ⇒ 重元素(CNO, 金属量)

- 表面反応 --- ダスト表面での反応

- 化学反応 --- H_2 分子, ... ⇒ ダストの存在形態, 表面反応
- 再結合反応 ⇒ 吸着と脱着
- 光電効果 ⇒ 光解離領域での荷電状態 --- 正電荷のダスト
ダストの役割 ⇒ 存在量, サイズ分布
- 表面が化学的に不活性 --- 単なる3体め
- 表面が化学的に活性 --- 特定の反応が起こりやすい

反応ネットワーク図

--- 種族 I の場合

- 電離
- 化学反応
- 再結合反応
 - 解離性
 - 放射性
- ダストへの吸着
- 表面反応
 - 化学反応
 - 再結合反応

m^+ : 分子イオン

M^+ : 金属イオン

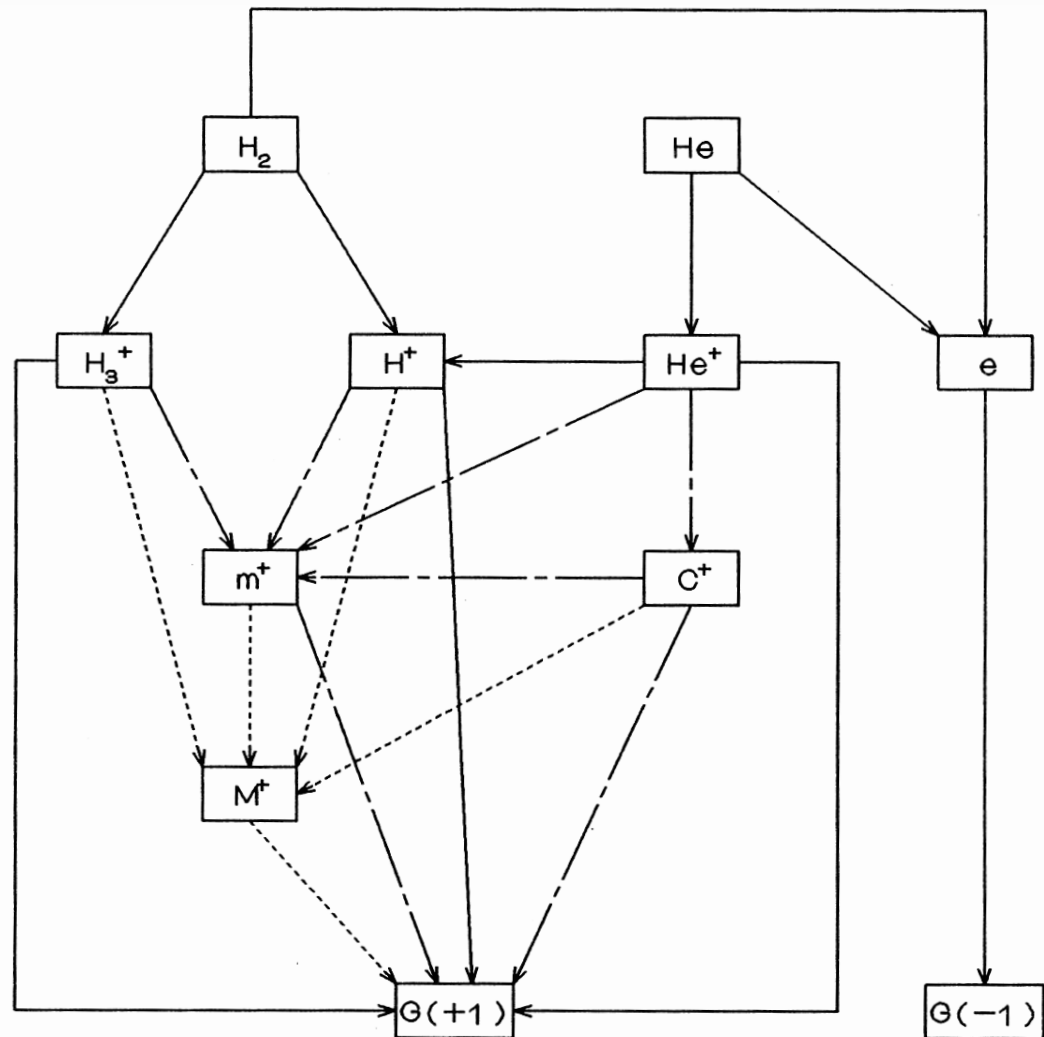


Figure 1. A schematic diagram for the scheme of the chemical reactions related to the densities of charged particles in dense interstellar clouds. Reactions concerning metals and those concerning heavy elements other than metals are shown by the dashed and dot-dashed lines, respectively. The recombination reactions are omitted to avoid the complexity of the figure.

星間化学 --- 〈反応ネットワークの概要〉

荷電粒子密度、星間分子の反応に関する方程式

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} + \nabla \cdot (n_i v_i) = C_i - D_i$$

仮定: $v_i = v$: 全体の速度

$$n \frac{d}{dt} \left(\frac{n_i}{n} \right) = C_i - D_i$$

$$\frac{1}{n} \frac{dx_i}{dt} = \sum_j \frac{\alpha_{ij}}{n} x_j + \sum_{j,k} \beta_{ijk} x_j x_k + \sum_{j,k,l} \gamma_{ijkl} n x_j x_k x_l$$

$x_i = n_i / n$: 相対個数密度

- ・ ガスの電離 --- 1体反応(第1項)
- ・ イオン・分子、再結合、表面反応 --- 2体反応(第2項)
- ・ 3体反応(第3項)
- ・ 左辺=0 --- 定常状態になる時間スケールは？

気相反応の諸過程

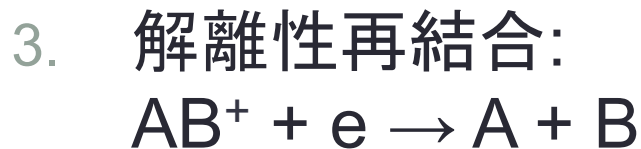


$$k_{IM} = 2\pi e \left(\frac{\alpha}{\mu} \right)^{1/2} \quad \alpha: \text{分極率}, \mu: \text{換算質量}$$



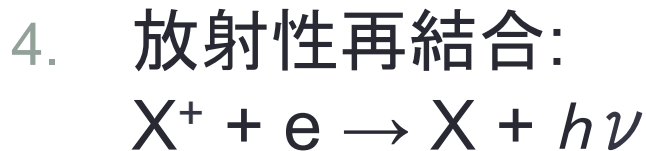
$$k_{NR} = 10^{-15} \text{ cm}^2 10^4 \left(\frac{T}{\mu} \right)^{1/2} \text{ cm s}^{-1} e^{-q/kT}$$

$q: \text{energy barrier}$



$$k_{DR} = (10^{-7} - 10^{-6}) \left(\frac{T}{100\text{K}} \right)^{-p} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$$

$p \approx 1/2$



$$k_{RR} = (10^{-13} - 10^{-12}) \left(\frac{T}{100\text{K}} \right)^{-p} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$$

cf. 3体反応:



$$k_3 = (10^{-25} - 10^{-35}) T^{-1} \text{ cm}^6 \text{ s}^{-1}$$

表面反応の諸過程

1. 粒子の化学吸着,
物理吸着

$S(T)\pi a^2 v n_g$ $S(T)$:吸着率, a : ダストの半径

$$S(T) \approx 1 \quad (D \approx 1\text{eV}), \quad \ll 1 \quad (D \approx 10^{-2} \sim 10^{-1}\text{eV})$$

2. 吸着粒子の蒸発

$$t_{\text{evap}} = \frac{1}{\nu_0} \exp\left(\frac{D}{kT_g}\right) \quad \nu_0 \approx 10^{12} \sim 10^{13} \text{s}^{-1}$$

3. 吸着粒子の移動

$$t_{\text{hop}} = \frac{1}{\nu_0} \exp\left(\frac{E_b}{kT_g}\right) : \text{thermal} \quad E_b \approx (0.25 \sim 0.3)D$$

4. 反応が起こるか

$$t_q = \frac{1}{\nu_0} \exp\left(\frac{2\lambda}{\hbar} \sqrt{2mE_b}\right) : \text{quantum (tunnelling)}$$

$\kappa_{ij} \approx 1$ (反応可能), $\ll 1$ (activation energyあり)

5. 生成粒子の脱着

$$t_{\text{desorp}} \approx \frac{1}{\nu_0} \exp\left(\frac{D}{kT_g}\right)$$

⇒分子動力学, 水素分子
の形成 ($T_g \ll 20\text{K}$)

3. ダストの形成と役割

〈元素組成〉 $\log(N/N_H) - \log(N/N_H)_{\text{sol}}$ --- diffuse clouds

- H
- He
- 低温(<200K)凝縮物 --- -1.5 ~ -0.5, δ_1
 - C
 - N
 - O

⇒ 気相反応による分子形成, PAH, ダストマントル

- 高温(>500K)凝縮物 --- -3 ~ -1.5, δ_2
 - Si
 - S
 - 金属(Na, Mg, Al, Fe,...)

⇒ SN残骸中でのダストコア形成

cf. MNRサイズ分布

$$dn_g/da = Cn_H a^{-3.5} \quad a_{\min} = 5\text{nm} < a < a_{\max} = 250\text{nm}$$

〈星間物質の存在形態〉

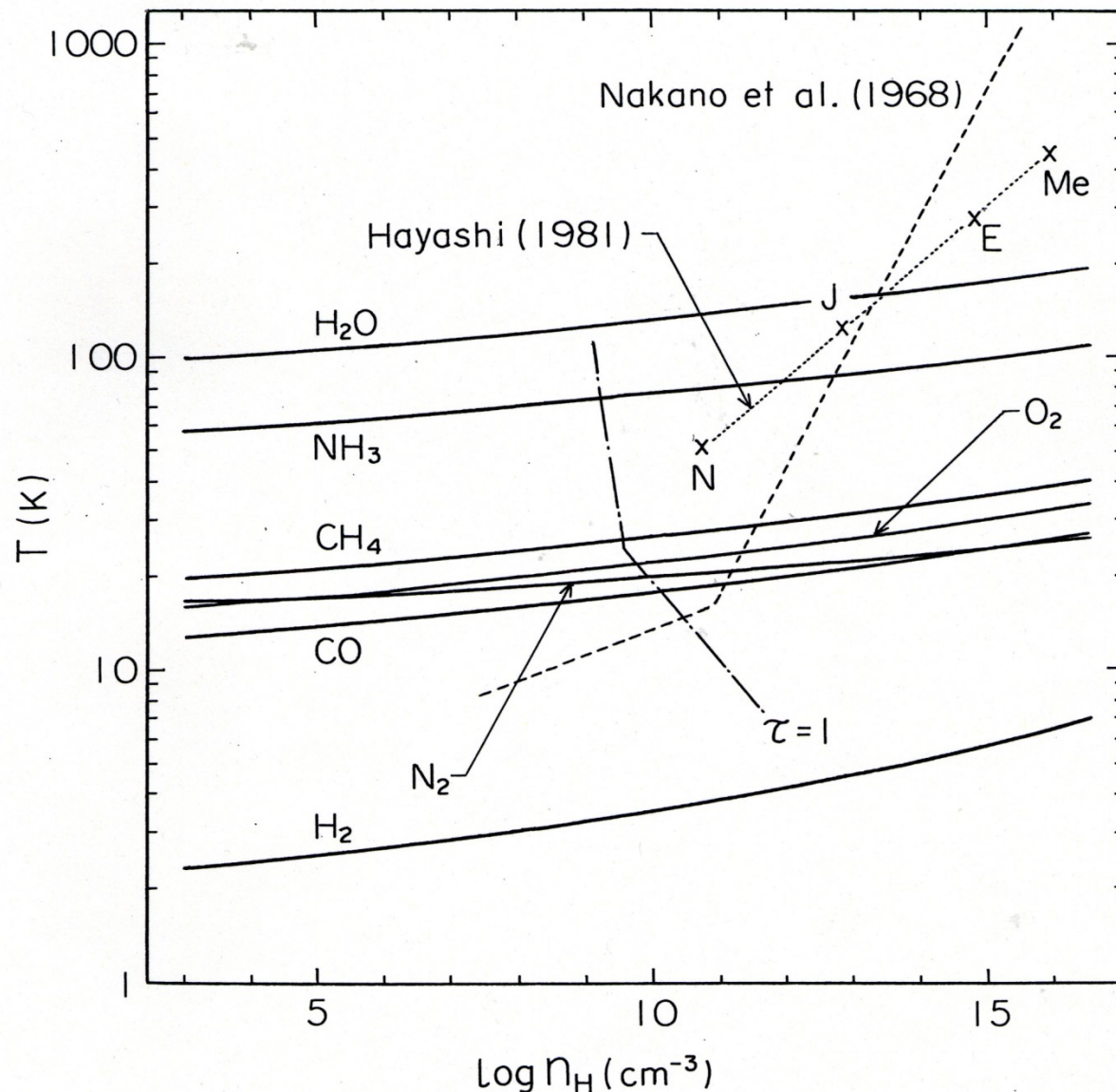
• ガス

- H, He
- C, N, O
- Si, S
- 金属(Mg, Fe, ...)

• ダスト (グレイン)

- 鉱物 --- 金属、シリケート、硫黄など(MgO, FeO, SiO₂, FeSなど)
- 氷 (H₂O, NH₃, CH₄)

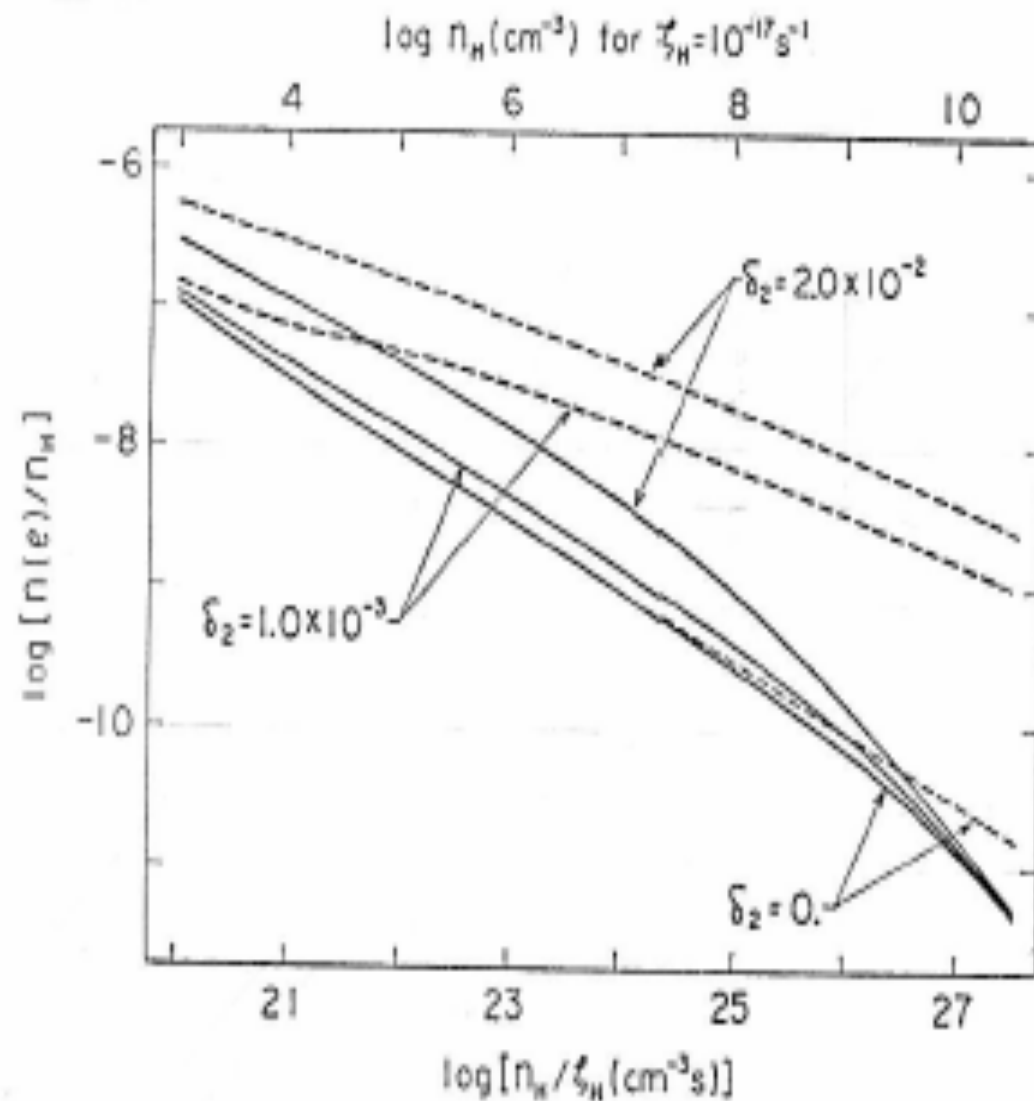
⇒ FeSとFeで凝縮温度
大きく変化



分子雲コアの 荷電粒子密度

ダスト表面での再結合
反応

- 実線 --- 有り
- 点線 --- なし

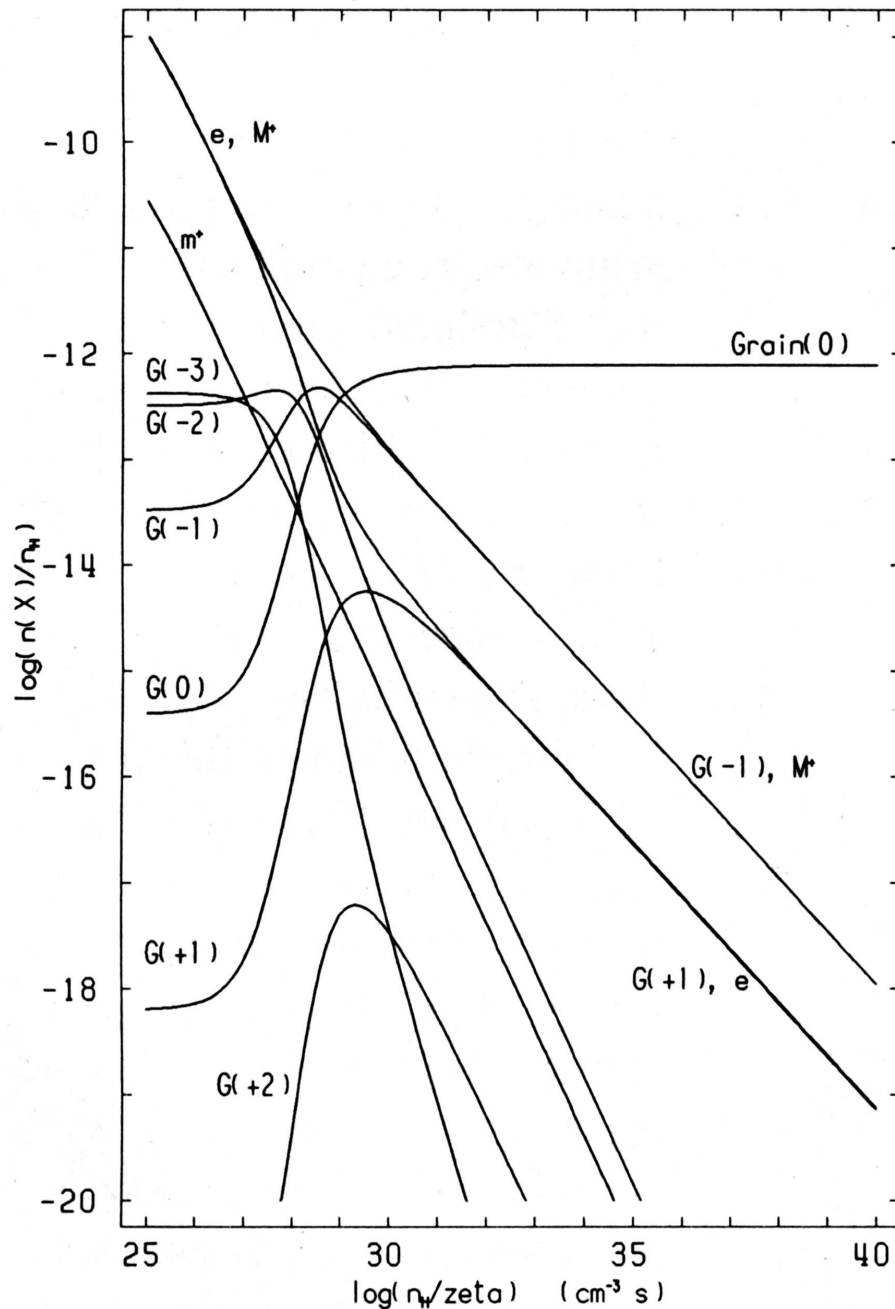
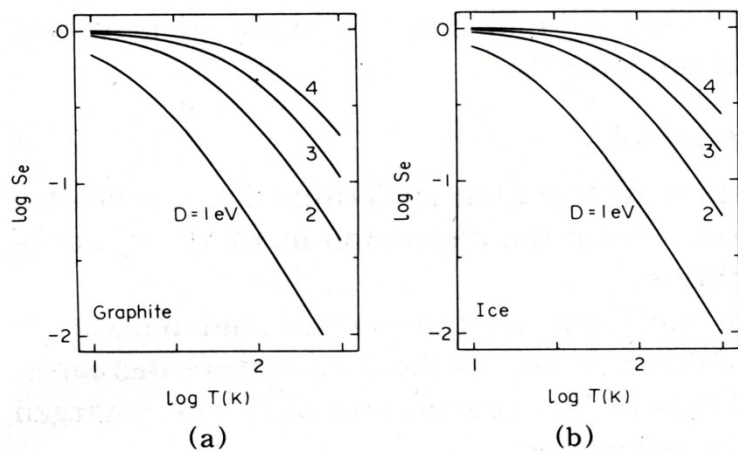


脱離の影響 --- その例

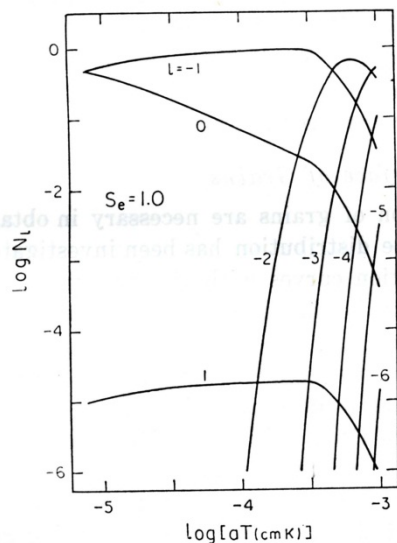
$$\frac{K_e}{n_H} = 2 \times 10^{-16} \left(\frac{K_e}{2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}} \right) \left(\frac{n_H}{1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}} \right)^{-1}$$

Cf. 電子の吸着率も低下する

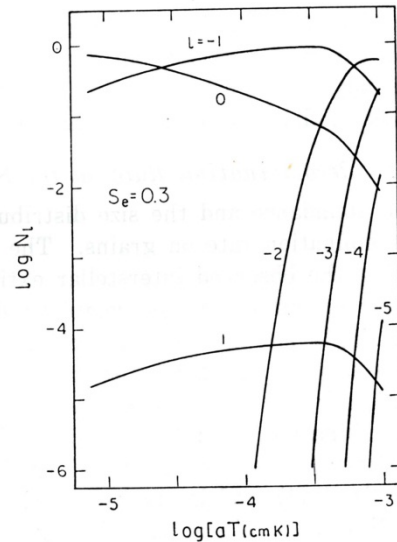
$$S_e \leq 0.1 \quad (T_e = 300\text{K})$$



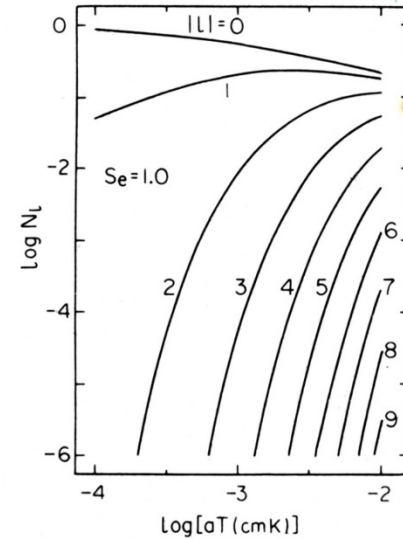
〈ダスト粒子の相対的な荷電状態分布〉



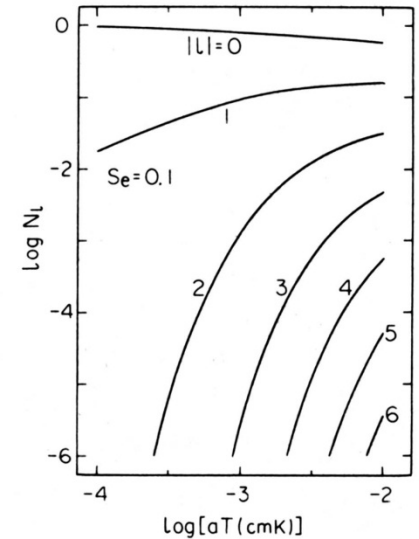
(a)



(b)



(a)



(b)

イオンと電子が主要な荷電粒子の場合:
 $n(e) = n(M^+)$

ダストが主要荷電粒子の場合:
 $n(e)/n(M^+) = (m_e/S_e m_M)^{1/2}$

〈衝突の反応係数〉

$$\langle \sigma v \rangle = \pi a^2 \left(\frac{8kT}{\pi m} \right)^{1/2} \left(1 - \frac{qe}{akT} \right) \quad qe \leq 0$$

$$\langle \sigma v \rangle = \pi a^2 \left(\frac{8kT}{\pi m} \right)^{1/2} \exp\left(-\frac{qe}{akT}\right) \quad qe \geq 0$$

$$aT = 10^{-3} \left(\frac{a}{0.1 \mu m} \right) \left(\frac{T}{100K} \right)$$

5. 高エネルギー粒子の流束とガスの電離過程

- 宇宙線のエネルギースペクトル
 $dn_g/dE \propto E^{-s}$
 - 超新星残骸による供給
 - 衝撃波統計加速(DSA) --- Fermi加速

⇒ ζ_H の推定

(ISMでの値 10^{-17}s^{-1})

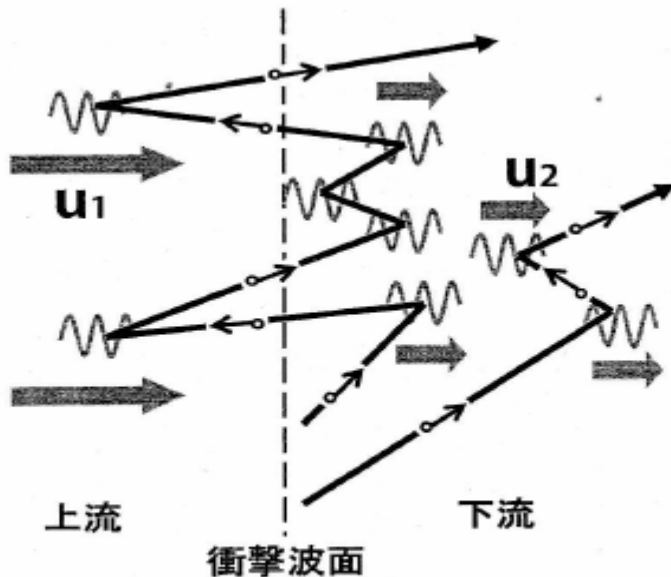


図2 衝撃波統計加速 (DSA) の説明図。²⁾

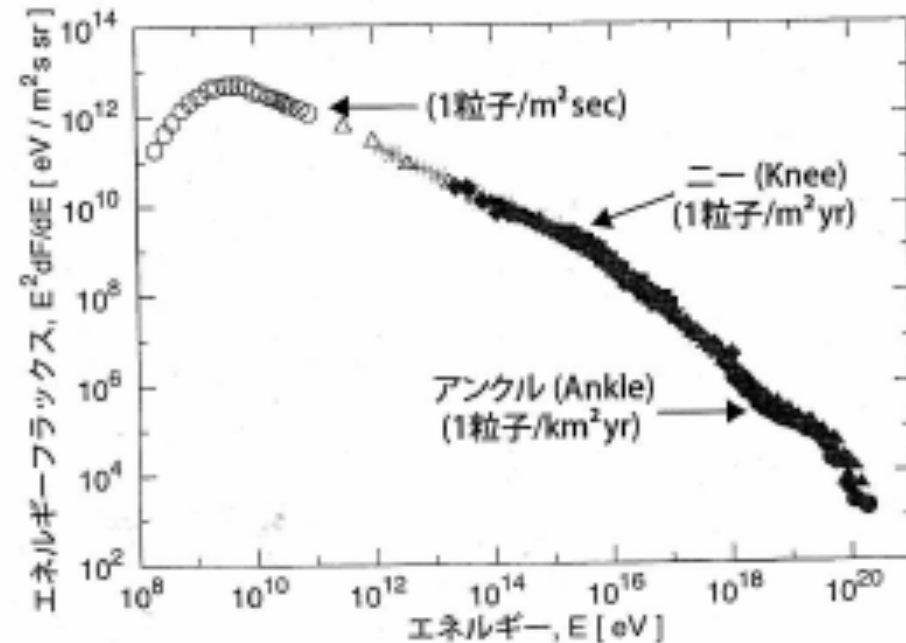
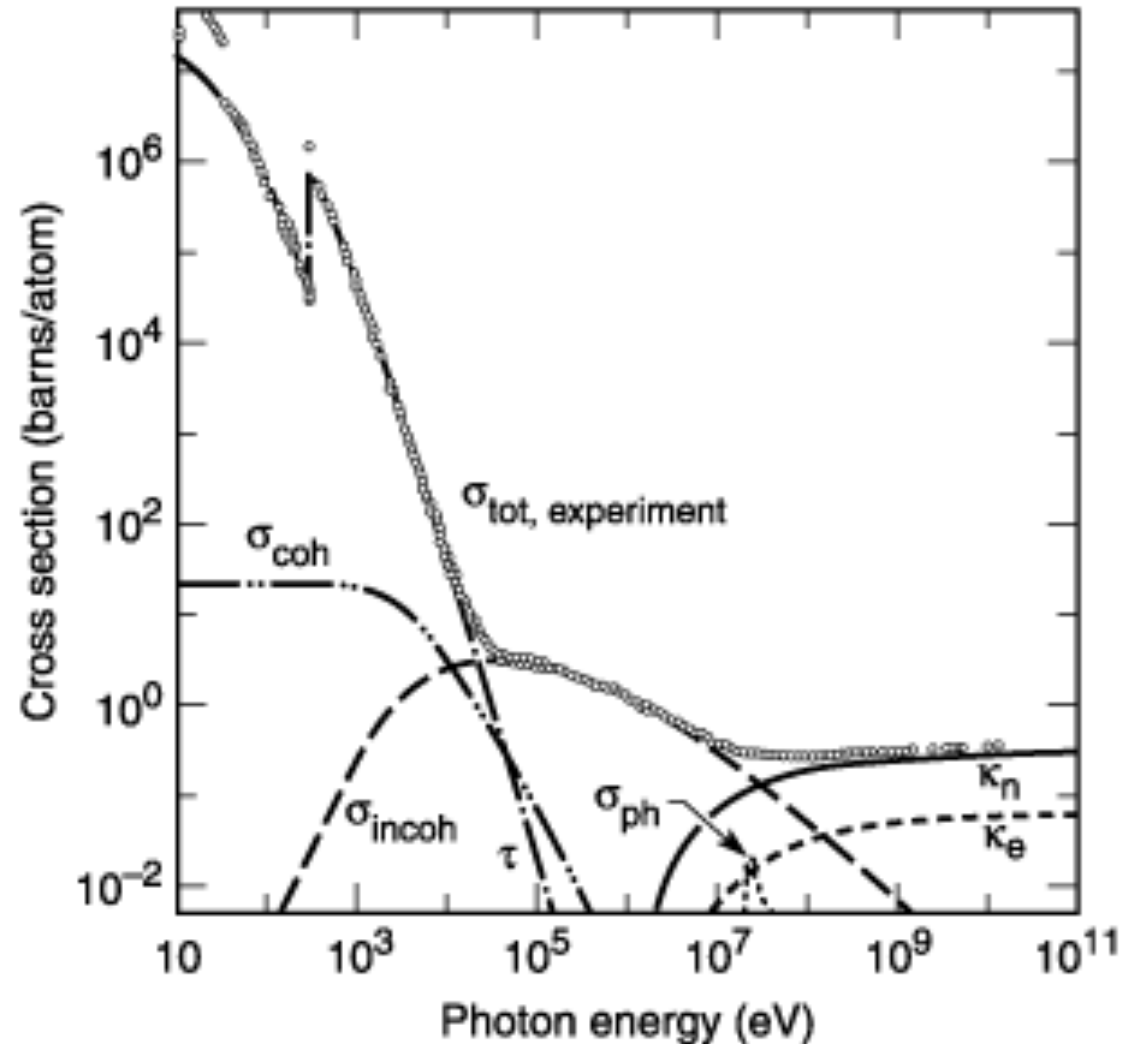


図1 宇宙線のエネルギースペクトル。^{1,2)} (フルカラー口絵参照)

X線による反応過程

1. 光電効果
2. 散乱
 - a. coherent (Rayleigh)
 - b. Incoherent (Compton)
3. 対生成
 - a. Nuclear field
 - b. Electron field
4. 光核相互作用 (Giant Dipole Resonance)

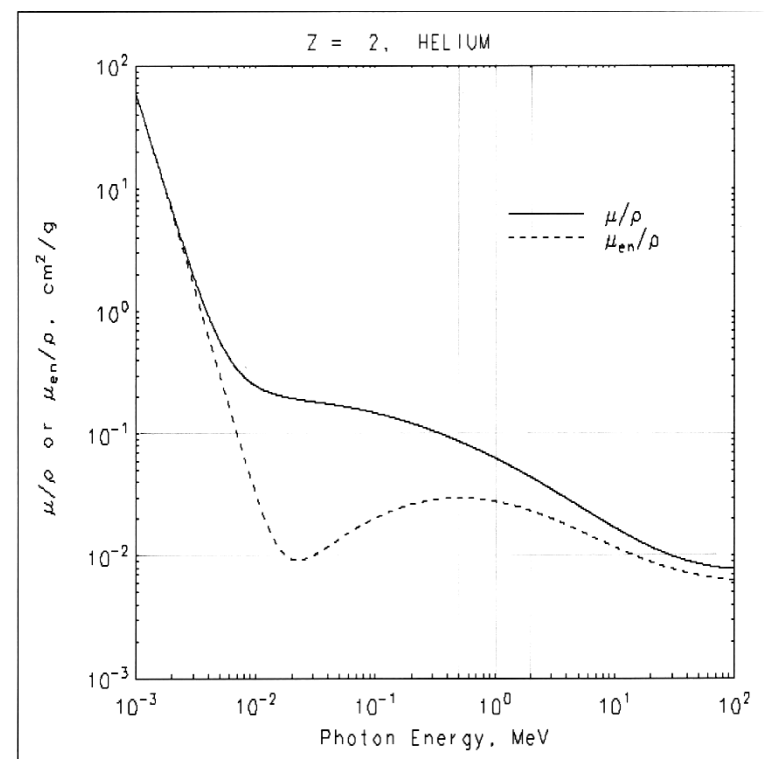
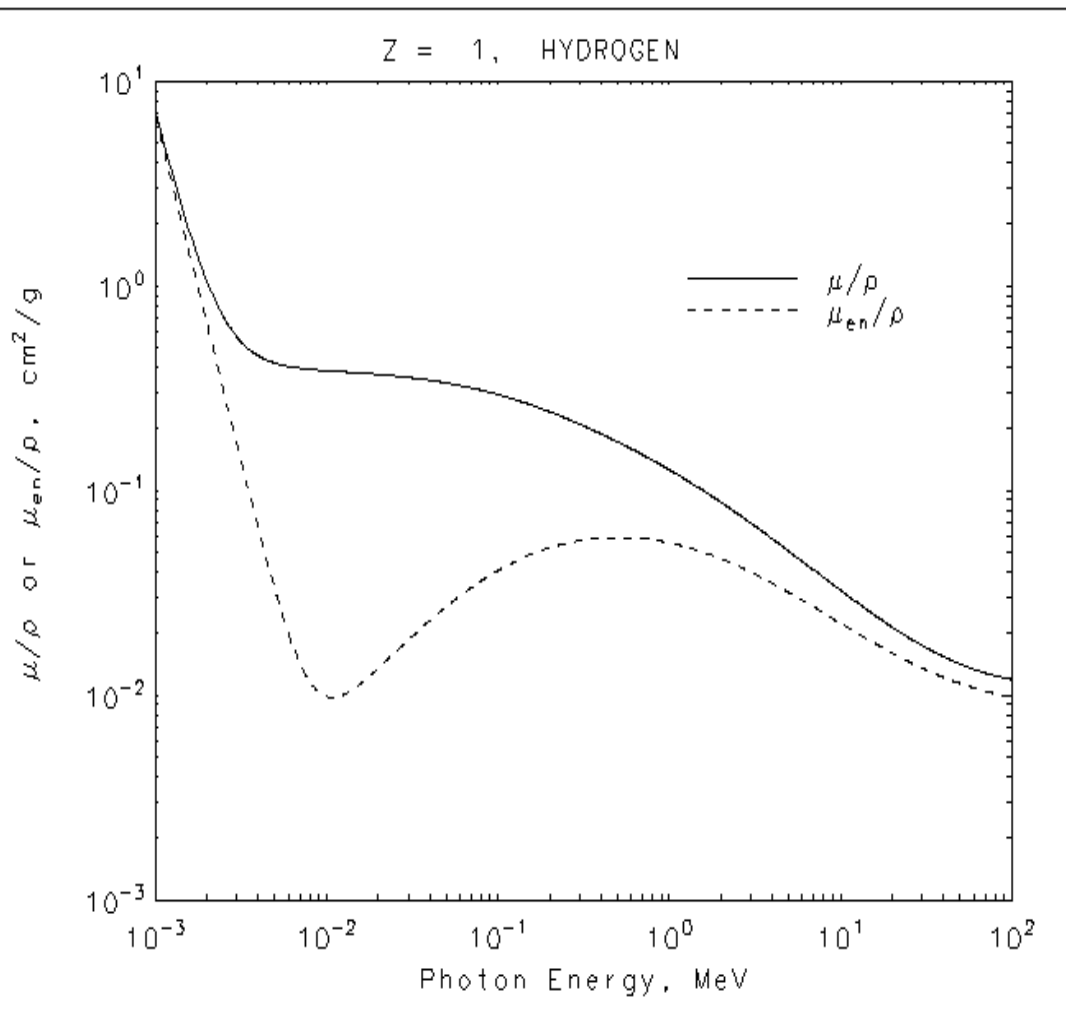


Energy-absorption coefficient

Energy-absorption coefficient: $\mu_{\text{en}}/\rho = 0.01 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$

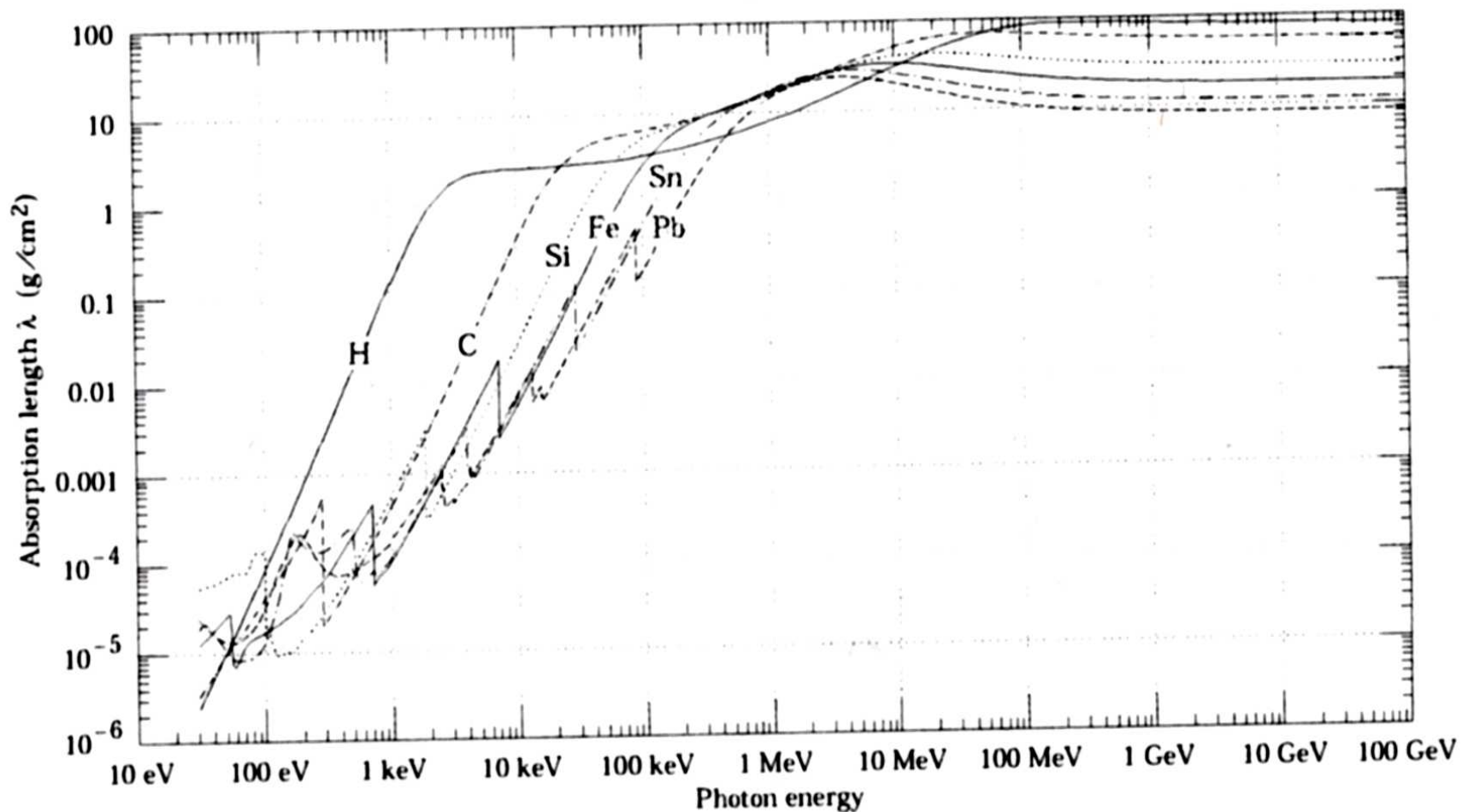
Mass-attenuation coefficient: $\mu/\rho = 0.4 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$

--- 水素ガス, $E=10\text{keV}$ の場合



Photon mass attenuation length (mean free path)

- $I = I_0 \exp(-\sigma/\lambda)$
- $\lambda = \mu/\rho$ (Mass-attenuation coefficientの逆数)



〈UV, X-rayの放射強度〉

FUV ($6\text{eV} < h\nu < 13\text{eV}$)

$$L_{\text{FUV}} \approx 10^{31} \text{ erg s}^{-1}$$

$$F_{\text{FUV}} \approx 2 \times 10^{14} \left(\frac{r}{1\text{AU}}\right)^{-2} \left(\frac{\bar{E}_{\text{FUV}}}{10\text{eV}}\right)^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

cf. Interstellar F $\approx 2 \times 10^7 \text{ cm}^{-2}$

X-ray ($0.1 \text{ keV} < h\nu < 10 \text{ keV}$)

$$L_{\text{X}} \approx 10^{30} \text{ erg s}^{-1}$$

$$F_{\text{X}} \approx 3 \times 10^{11} \left(\frac{r}{1\text{AU}}\right)^{-2} \left(\frac{\bar{E}_{\text{X}}}{0.8\text{keV}}\right)^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

〈X線による ガスの電離率〉

(Igea &
Glassgold 1999)

- 原始惑星系ガス円盤
- 地球軌道
- z軸方向

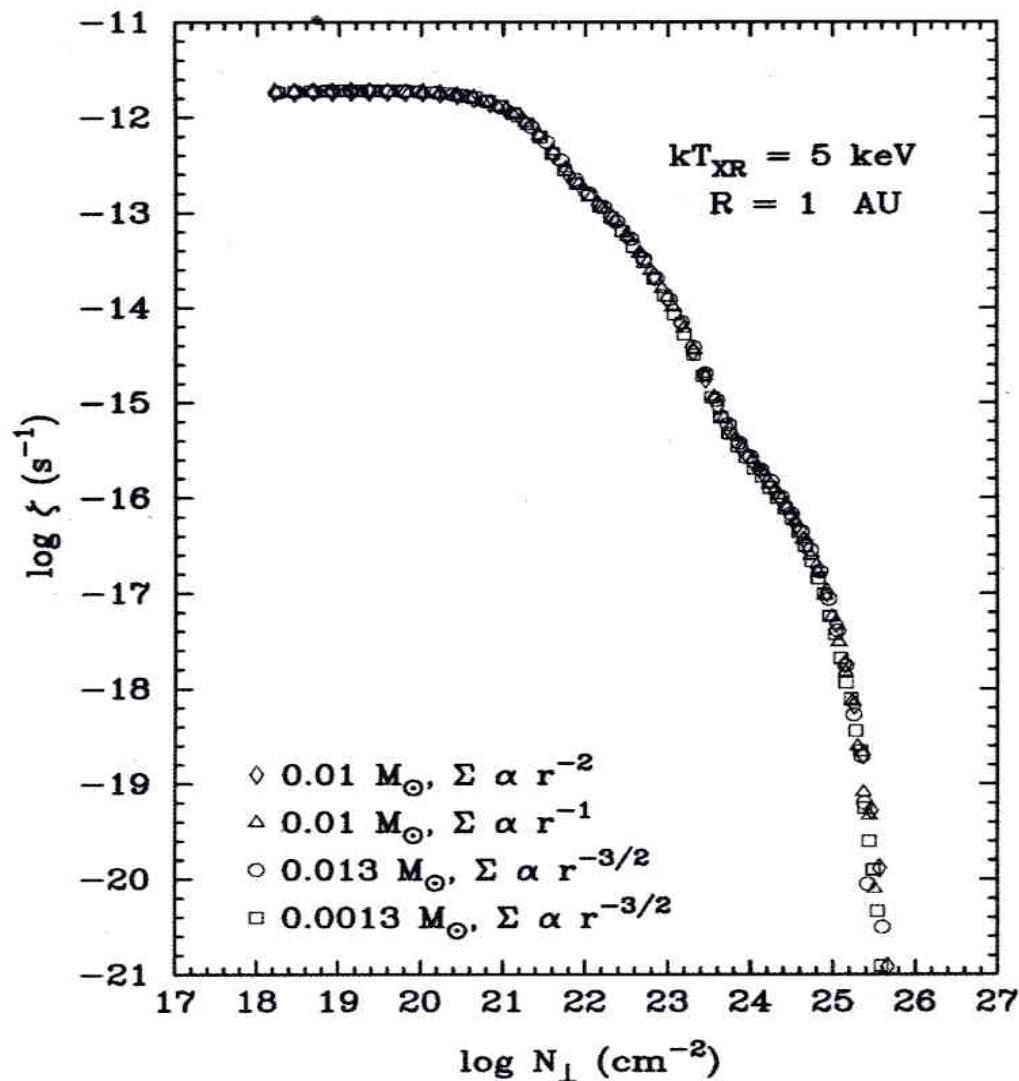


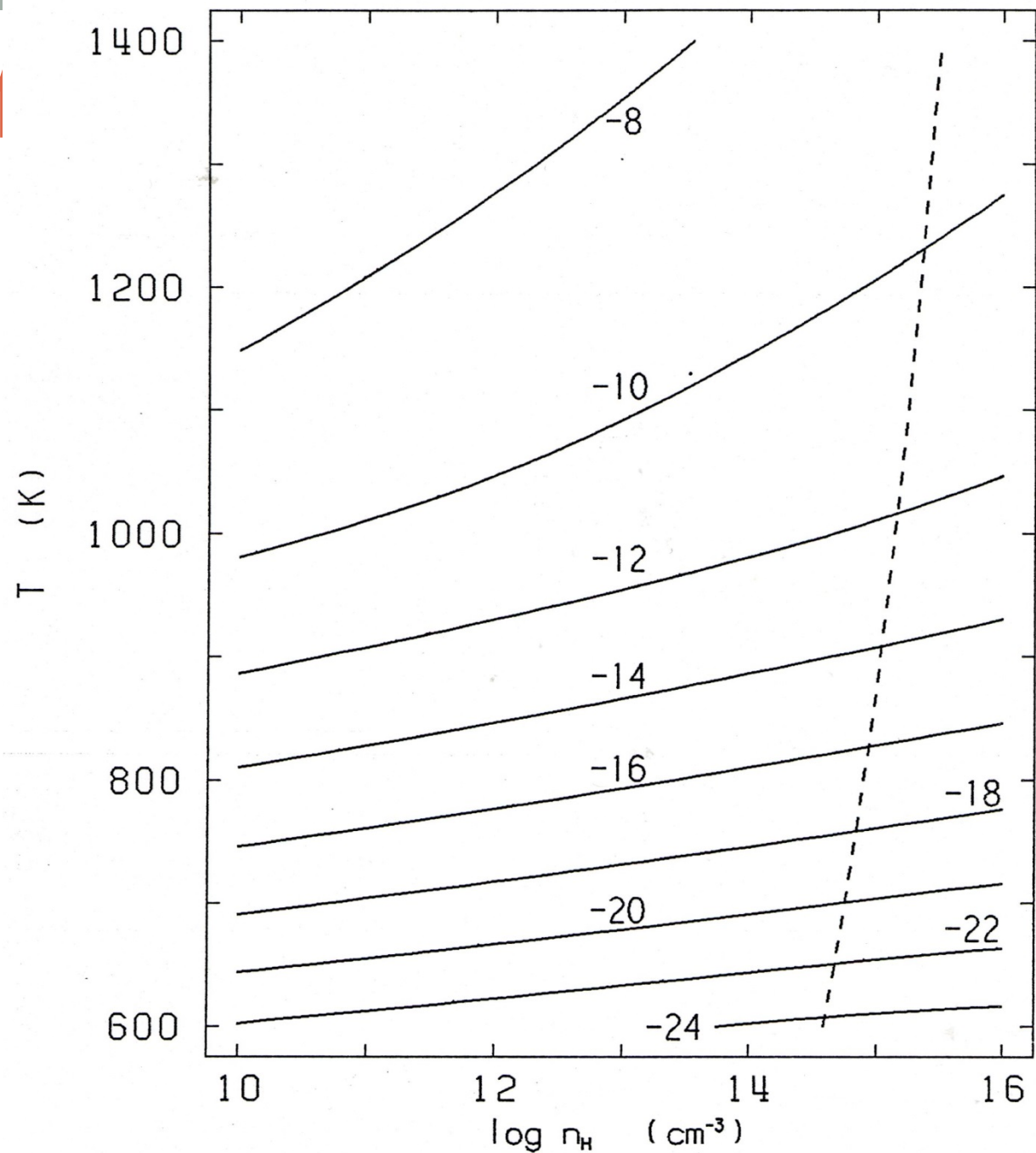
FIG. 5.—Ionization rate as a function of vertical column density into a disk for a thermal spectra with $kT_X = 5 \text{ keV}$ and various surface-density distributions: $\Sigma \propto r^{-1.5}$ and $M_D = 0.013 M_{\odot}$ (open circles), $\Sigma \propto r^{-1.5}$ and $M_D = 0.0013 M_{\odot}$ (open squares), $\Sigma \propto r^{-1.0}$ and $M_D = 0.01 M_{\odot}$ (open triangles), and $\Sigma \propto r^{-2.0}$ and $M_D = 0.01 M_{\odot}$ (open diamonds). The other parameters are $L_X = 10^{29} \text{ ergs s}^{-1}$, $E_0 = 1 \text{ keV}$, and $r = 1 \text{ AU}$.

〈放射性核種によるガスの電離とダストの進化〉

- 放射性核種
 - 長寿命 --- ^{40}K , ^{232}Th , ^{235}U , ^{238}U
 - 短寿命 --- ^{26}Al , ^{36}Cl , ^{60}Fe
- 崩壊で放出される粒子のrange ($E=1-4$ MeV)
 - α 粒子 --- $0.005 - 0.02 \text{ g cm}^{-2}$
 - 電子 --- $0.2 - 1 \text{ g cm}^{-2}$
 - 光子 --- $8 - 15 \text{ g cm}^{-2}$
- ダストの沈殿・合体の効果 \Rightarrow 磁場、化学進化への影響
 - 沈殿は電離率の上昇(集まりすぎると低下)
 - 合体は電離率の低下

6. ガスの熱電離

- アルカリ金属による



7. まとめ

- 第1世代ゼロメタル星 --- 電離過程がない
- 第2世代ゼロメタル星 --- 高エネルギー粒子によるガス電離

$$\frac{n_e}{n_H} = 3 \times 10^{-3} \left(\frac{\zeta / n_H}{1 \times 10^{-17} \text{ s}^{-1}} \right)^{0.5} \left(\frac{\langle \sigma v \rangle}{1 \times 10^{-12} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}} \right)^{-0.5}$$

- 低金属度ガス --- 第2世代ゼロメタル星 よりも低いガスの電離状態の可能性はある

⇒ 状況による多様性 --- 重元素(S, Al, C, O, アルカリ金属)

- ダストの存在形態
- ガスとダストの温度
- 電離プロセスの効率(CR, X, 放射性元素)