Grain Formation Workshop/銀河のダスト研究会
(2009年9月9日　大阪産業大学梅田サテライト教室)

非晶質シリケイトの結晶化実験による星周塵化学組成の制限

土`山 明･村田敬介･今井悠太･茅原弘毅･小池千代枝
大阪大学理学研究科宇宙地球科学専攻

MENU

・村田D論の紹介

Murata et al. (2007) *ApJ* 668, 285
Murata et al. (2009) *ApJ* 696, 1612
Murata et al. (2009) *ApJ* 697, 836
(Murata et al. (2009) *ApJ* 698, 1903)

・星周塵化学組成の議論

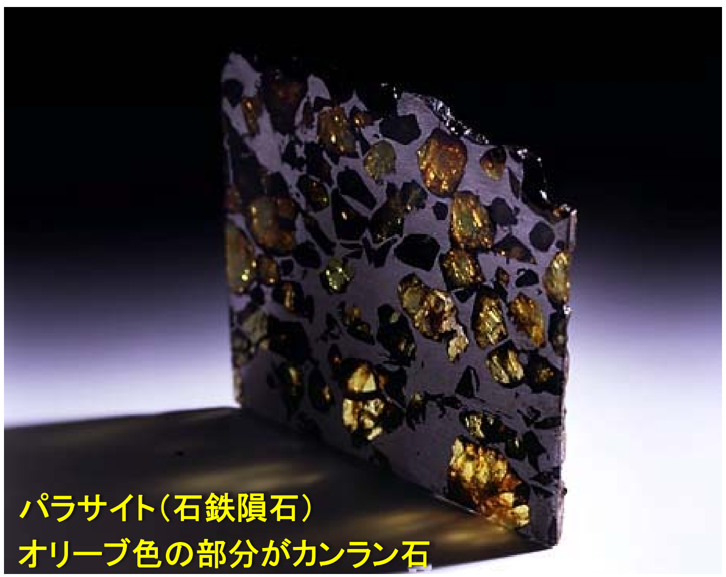
Circumstellar and interstellar dust

- <u>Evolved stars</u> (*e.g.*, Waters et al., 1996)
  Amorphous silicates (AS) (~95 %)
  Crystalline silicates (~5 %)
    olivine (OL): $(Mg,Fe)_2SiO_4$ Mg#(=Mg/(Mg+Fe)) > 0.9
    pyroxene (PX): $(Mg,Fe)SiO_3$
  Amorphous silicates condensed from gas → Crystallization
  (Seki & Hasegawa, 1981; Gail, 1999; Rietmeijer et al., 1999)

- <u>Interstellar medium</u> (Kemper et al., 2004)
  Amorphous silicates (AS)

- <u>Young stars</u> (e.g., Waelkins et al., 1996)
  Amorphous silicates (AS) (80-90%)
  Crystalline silicates (10-20%)
    olivine (OL): $(Mg,Fe)_2SiO_4$ Mg# > 0.9(?)
    pyroxene (PX): $(Mg,Fe)SiO_3$
  Crystallization of interstellar amorphous silicates
  (Bockelee-Morvan et al., 2002; Hallenbeck et al., 1998)

宇宙における鉱物（crystalline silicates）の主役たち



カンラン石（olivine）
$(Mg,Fe)_2SiO_4$

Caに乏しい輝石（Ca-poor pyroxene）
$(Mg,Fe)\ SiO_3$

Crystallization experiments of amorphous silicates (AS)

Table 1 Chemical compositions of starting materials and CI and GEM compositions.

Composition	A	B'	C	C'	Fo-n	En-n	En80	En80-g	CI	GEMS	GEMS$^{\%}$
	gel$^{\#}$	gel$^{\#}$	gel$^{\#}$	gel$^{\#}$	TP$^{\$}$	TP$^{\$}$	gel$^{\#}$	glass$^{\&}$			w/o metal
Mg	1.07	1.07	1.07	1.07	2	1	0.8	0.8	1.07	0.663	0.663
Si	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Fe	0.9	0.39					0.2	0.2	0.9	0.461	0.06
Al	0.085		0.085						0.085	0.084	0.084
Ca	0.061		0.061						0.061	0.025	0.025
Na	0.057		0.057						0.057	n.d	n.d.
Ni	0.049		0.049						0.049	0.033	
S									0.52	0.165	0.165
O	4.24	3.46	3.34	3.07	4	3	3	3	4.24	3.31	2.87
Mg#=Mg/(Mg+Fe)	0.54	0.73	1	1	1	1	0.8	0.8	0.54	0.59	0.92
NBO*	-0.47	1.08	1.33	1.86	0	2	2	2	-0.47	1.38	2.25
Major phase**	ol	ol	ol (fo)	px (en)	ol (fo)	px (en)	px	ol			
Reference	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[7]	[8]	[9]	

* Number of bridging oxygen

** ol: olivine, px: pyroxene, fo: forsterite, en; enstatite

#: Synthesized by sol-gel method

$: Glass nanoparticles (~100 nm) produce by condensation from R-F induction thermal plasmas

&: Glass quenched from melt

%: ($Fe_{0.9}$,$Ni_{0.1}$) metal is removed.

[1] Murata K. et al. (2007) ApJ, 668, 285.

[2] Murata K. et al. (2009) ApJ. 696, 1612.

[3] Noguchi R. et al. (2009) Japan Geoscience Union Meeting 2009, abstract.

[4] Murata K. et al. (2009) ApJ, 697, 836.

[5] Imai Y. et al. (2009) Japan Geoscience Union Meeting 2009, abstract.

[6] Imai Y. (2009) private communication.

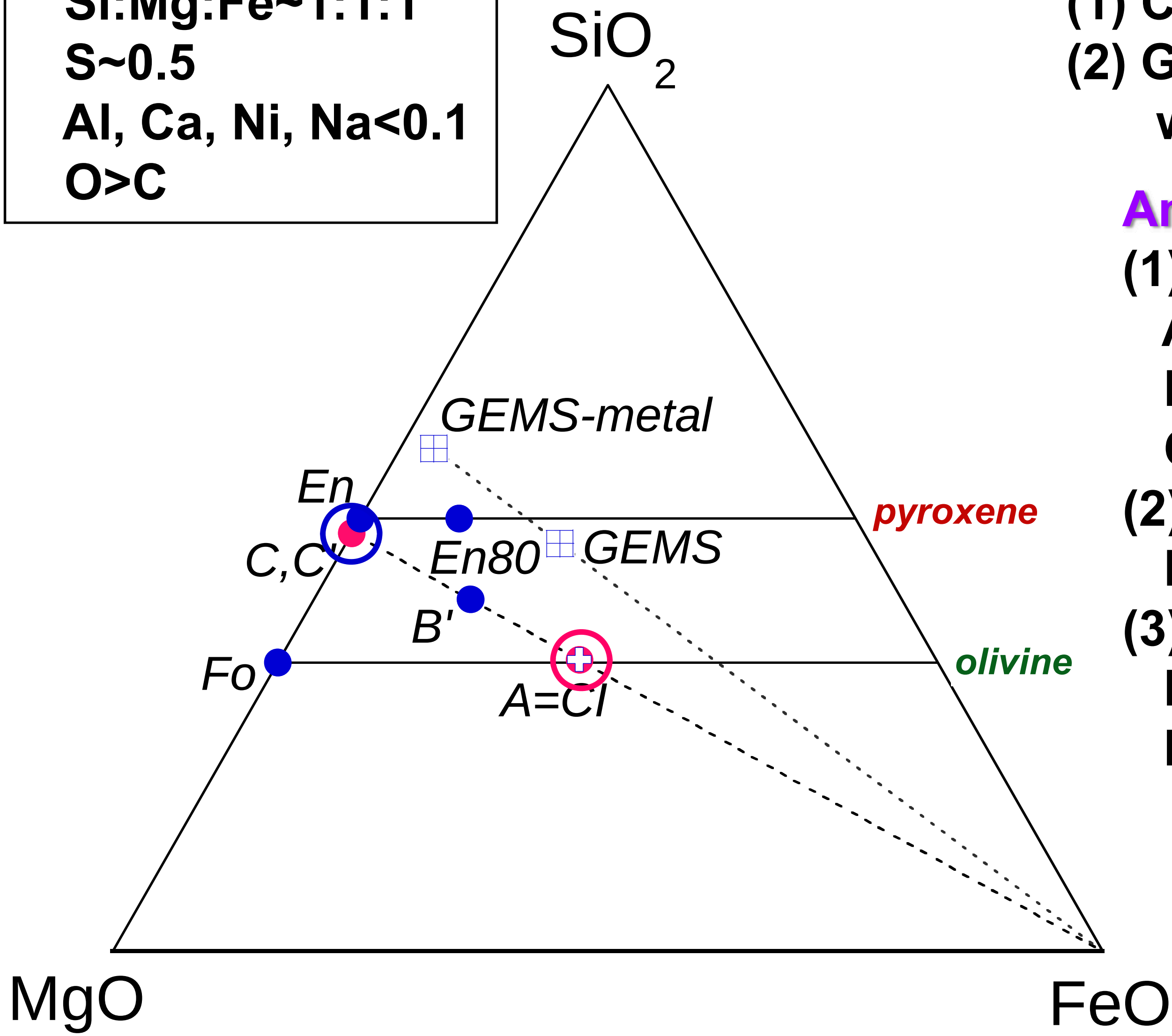
[7] Seidler S. (2009) private comunication.

[8] Anders and Grevesse (1989)

[9] Bradely (1988, 1994ab) and Bradely and Ireland (1996)

Crystallization experiments of amorphous silicates (AS)

Solar abundance
Si:Mg:Fe~1:1:1
S~0.5
Al, Ca, Ni, Na<0.1
O>C



Primitive amorphous silicates
(1) CI (=solar abundance)
(2) GEMS (Glass embedded with metal and sulfides)

Amorphous silicate SM
(1) CI and derivatives
- **A: CI**
- **B: CI-FeS (FeO=∑Fe-FeS)**
- **C: CI-∑Fe(Fe+FeS; FeO=0)**

(2) Olivine composition
- **Fo: Mg_2SiO_4**

(3) Pyroxne composition
- **En: $MgSiO_3$**
- **En80: $(Mg_{0.8}Fe_{0.2})SiO_3$**

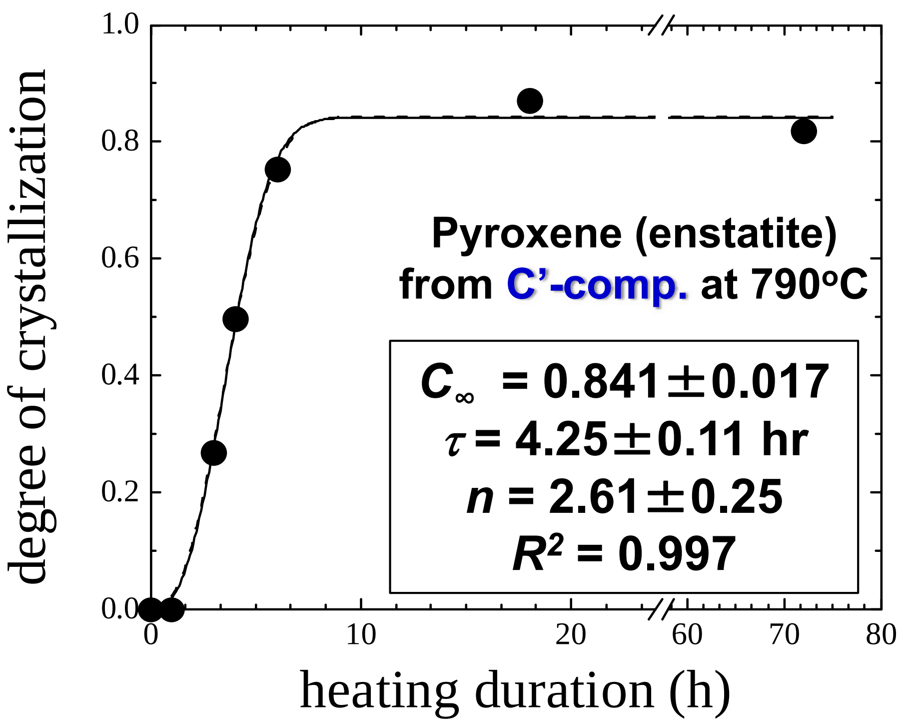
SiO_2-MgO-FeO-X system
(X: Al_2O_3-CaO-NiO-Na_2O)
A, C

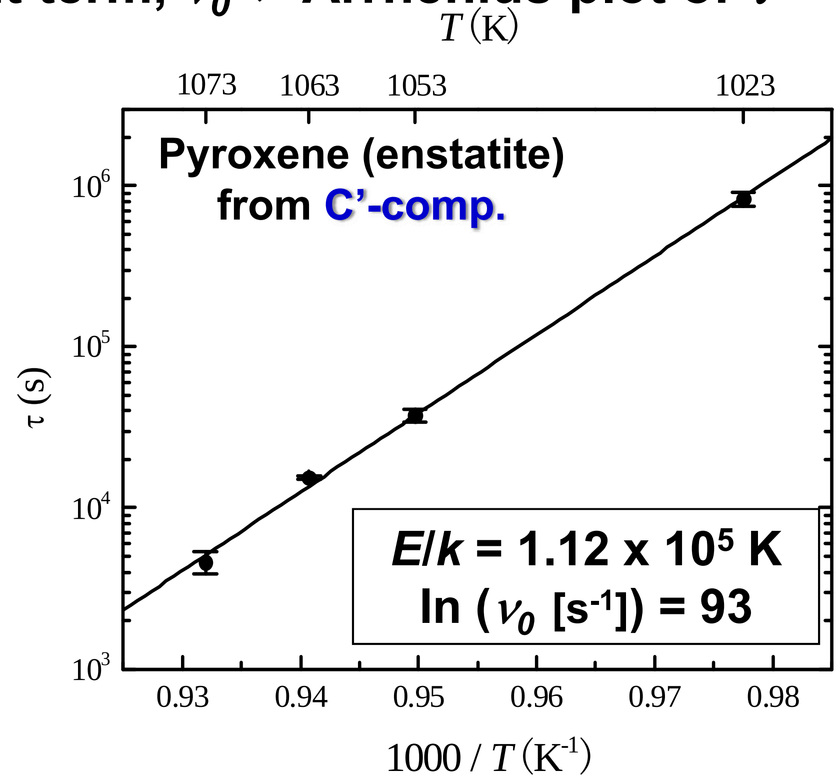
SiO_2-MgO-FeO system
B', C'

Crystallization time scale and activation energy

OL crystallization (A-comp.: Murata et al., 2007, *ApJ* 668, 285)
PX crystallization (C'-comp.: Murata et al, 2009b, *ApJ* 697, 836)

- Degree of crystallization, *C*, ⇐ IR spectrum
- Crystallization time scale, τ, ⇐ Fitting of time evolution, *C(t)*, by JMA eq.
- Activation energy, *E*, and pre-exponent term, ν_0 ⇐ Arrhenius plot of τ





Experiments	NBO	E/k (K)	ln ν_0 (s^{-1})	mode of crystallization
OL from A	-0.47	~6x10^4	~52	growth from pre-exist. xst.
PX from C'	1.86	1.12(3)x10^5	93(2)	nucleation and growth

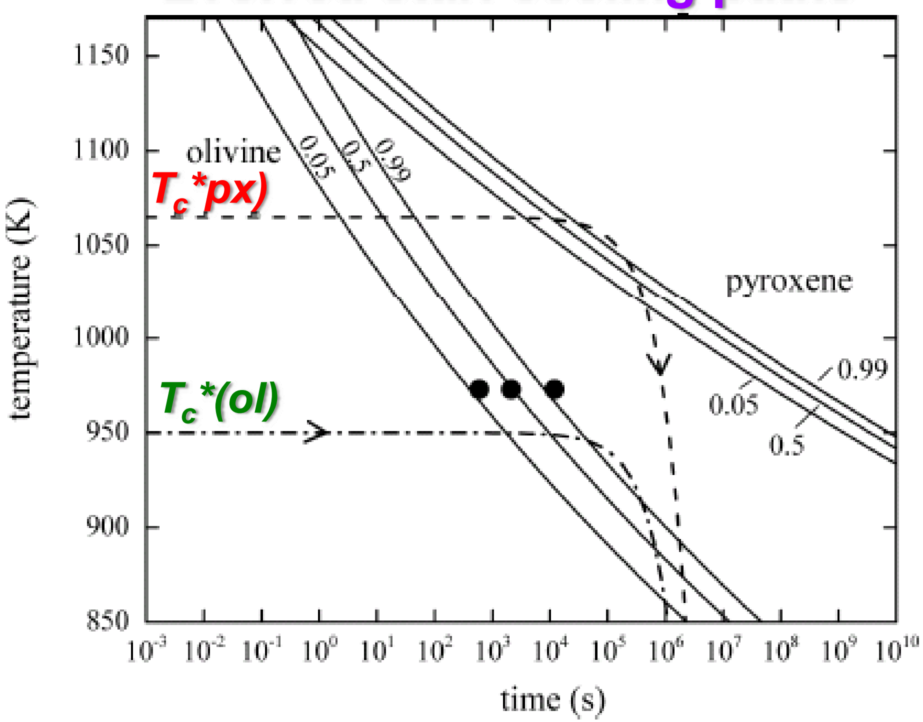
Crystallization around evolved and young stars

TTT (Time-Temperature-Transformation) diagram for ol & px crystallization

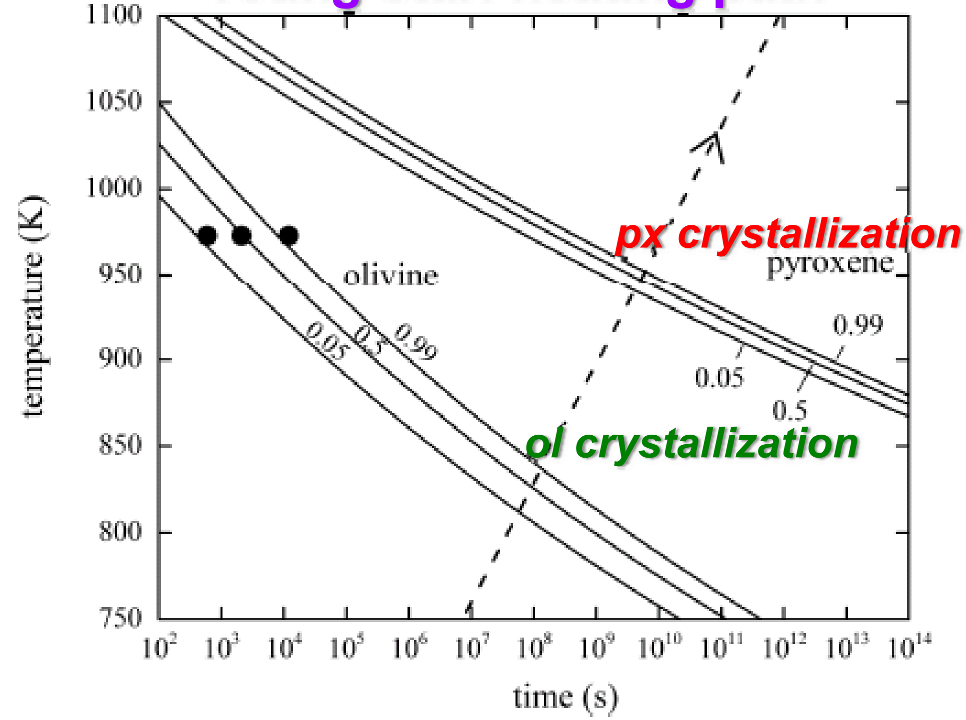
- Degree of crystallization, *C*, ⇐ IR spectrum
- Crystallization time scale, τ, ⇐ Fitting of time evolution, *C(t)*, by JMA eq.
- Activation energy, *E*, and pre-exponent term, ν_0 ⇐ Arrhenius plot of τ

Experiments	NBO	E/k (K)	ln ν_0 (s^{-1})	mode of crystallization
OL from A	-0.47	~6x10^4	~52	growth from pre-exist. xst.
PX from C'	1.86	1.12(3)x10^5	93(2)	nucleation and growth

Evolved star: cooling paths



Young star: heating path

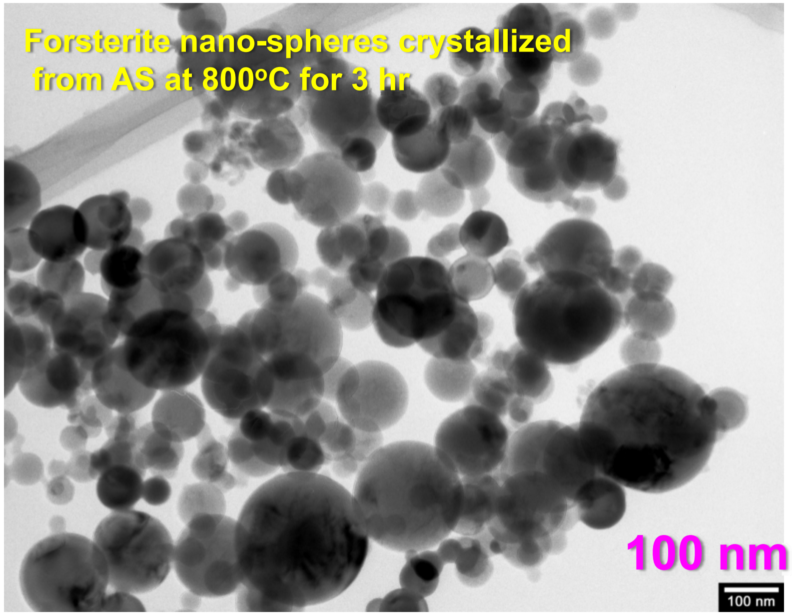


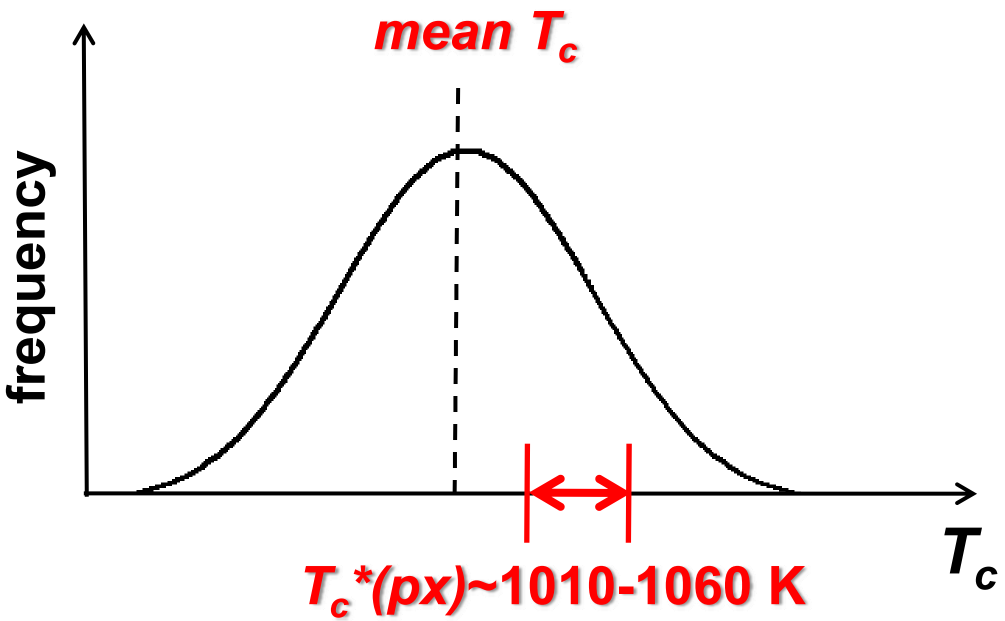
Crystalline dust around evolved stars

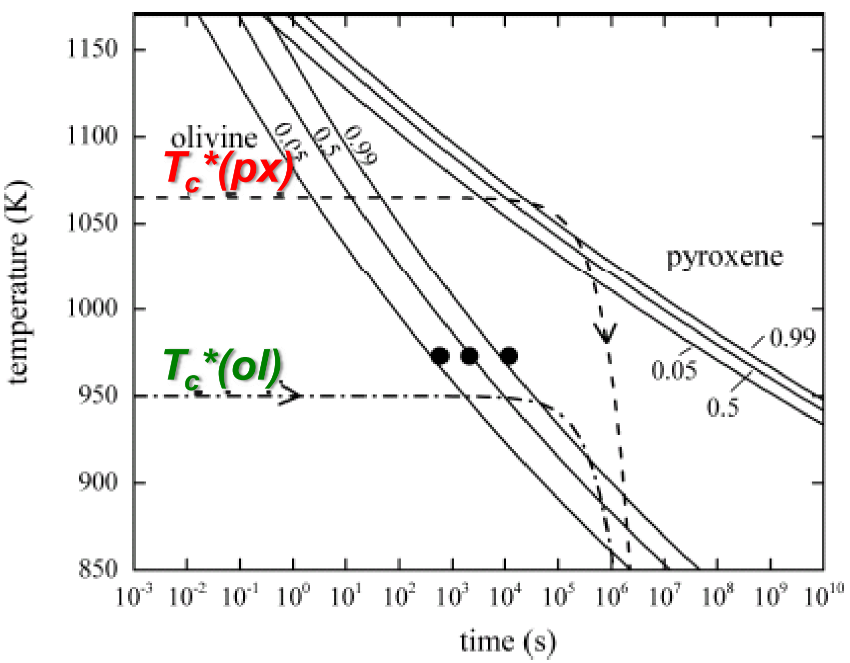
- Condensation of **AS as spheres**
  followed by
- **Partial crystallization** of the spheres

  can explain following observations:

- Population of crystalline dust (~5 %)
- Unidentified 33 μm feature in the IR spectra for olivine



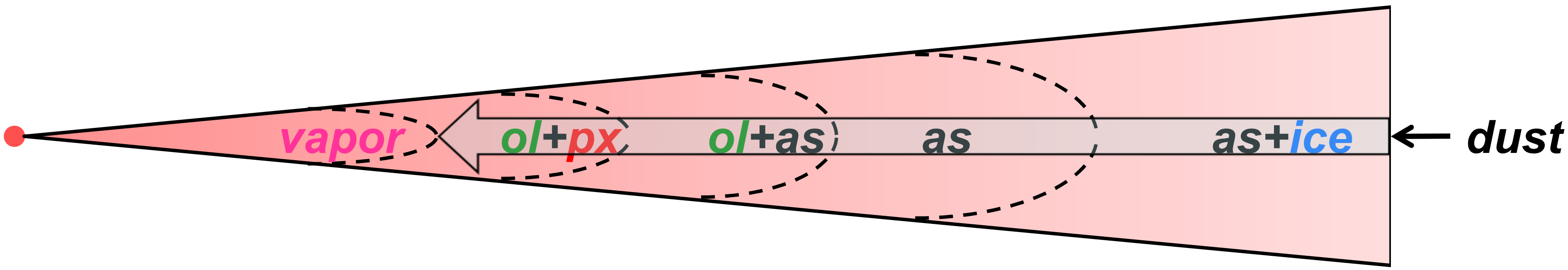


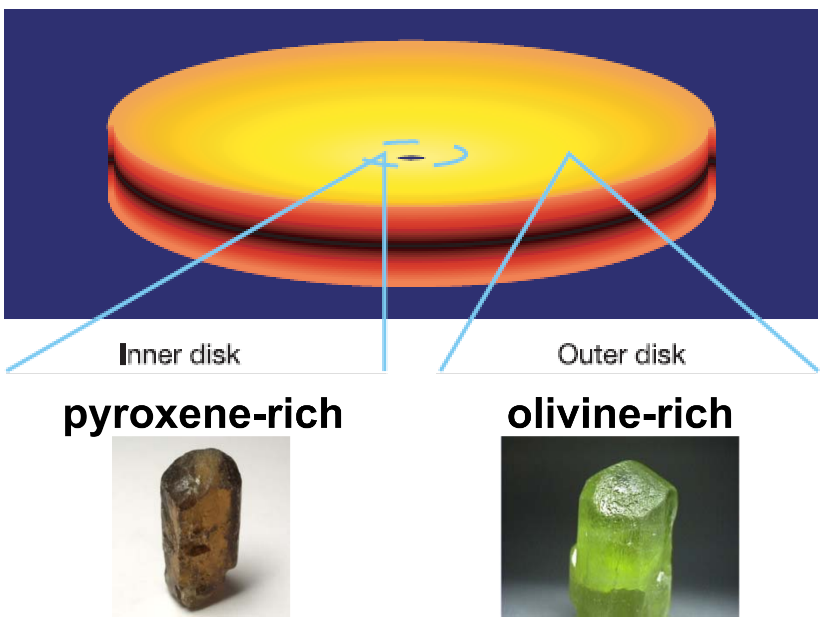


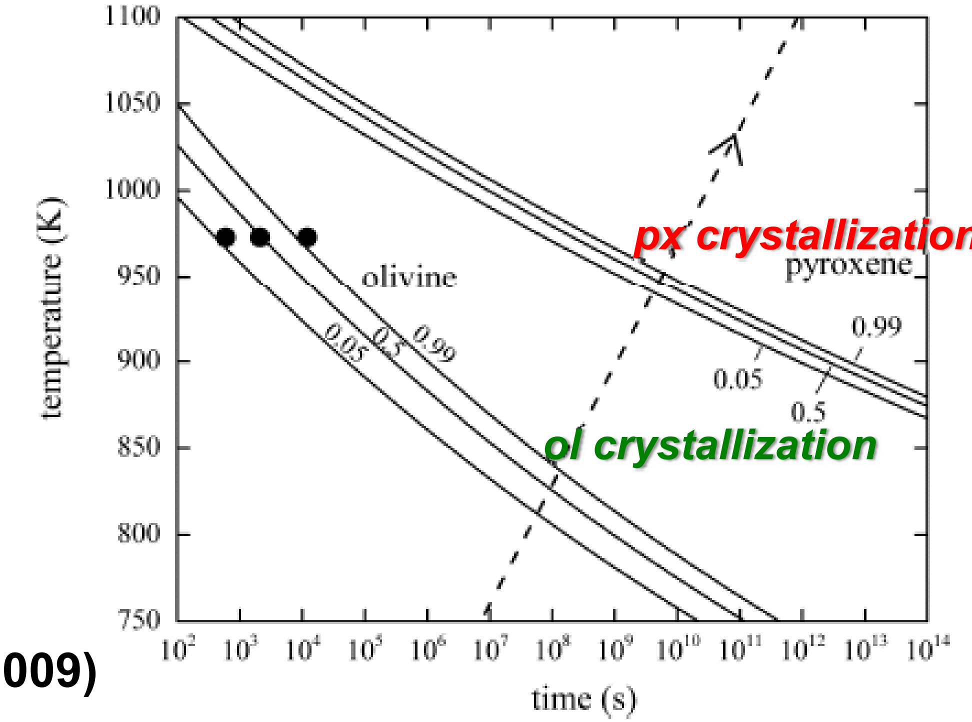
Crystalline dust around and young stars

- **Narrow temperature interval for crystallization for AS dust falling towards the central star**
  OL:~30^{o}C, PX:~10^{o}C

⇒ **Zonal distribution of AS, OL and PX along the heliocentric distance**







Watson et al. (2009), Sergent et al. (2009)

非晶質宇宙塵の化学組成への制約

（1）Mg-richな星周塵結晶質ケイ酸塩の化学組成

Evolved stars: Mg#>0.9

Young stars: mostly Mg#>0.9

⇒ ASとOL間のFe-Mg元素分配実験

（Murata et al, 2009a, *ApJ* 696, 1612)

（2）星周塵におけるOLとPXの共存

Evolved stars: ？

Young stars: Mixture of SiO_2-poor and rich ASs

⇒ 結晶化実験：出発物質（AS）の化学組成依存性

OL/PX crystallization *vs.* NBO

NBO: Number of bridging oxygen（架橋酸素数）

ASとOL間のFe-Mg元素分配

OL crystallization (B'-comp.: Murata et al., 2009a, *ApJ* 696, 1612)

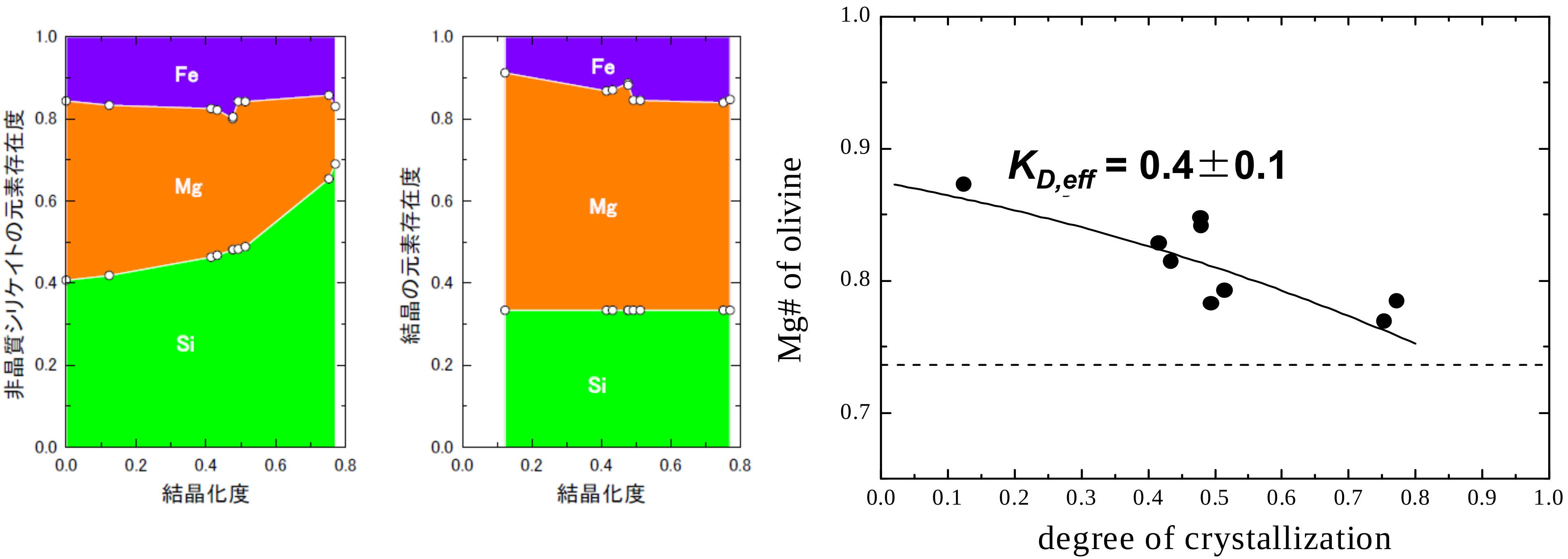
Degree of crystallization, *C*, ⇐ IR spectrum

Mg# of olivine as a function of *C*, ⇐ XRD

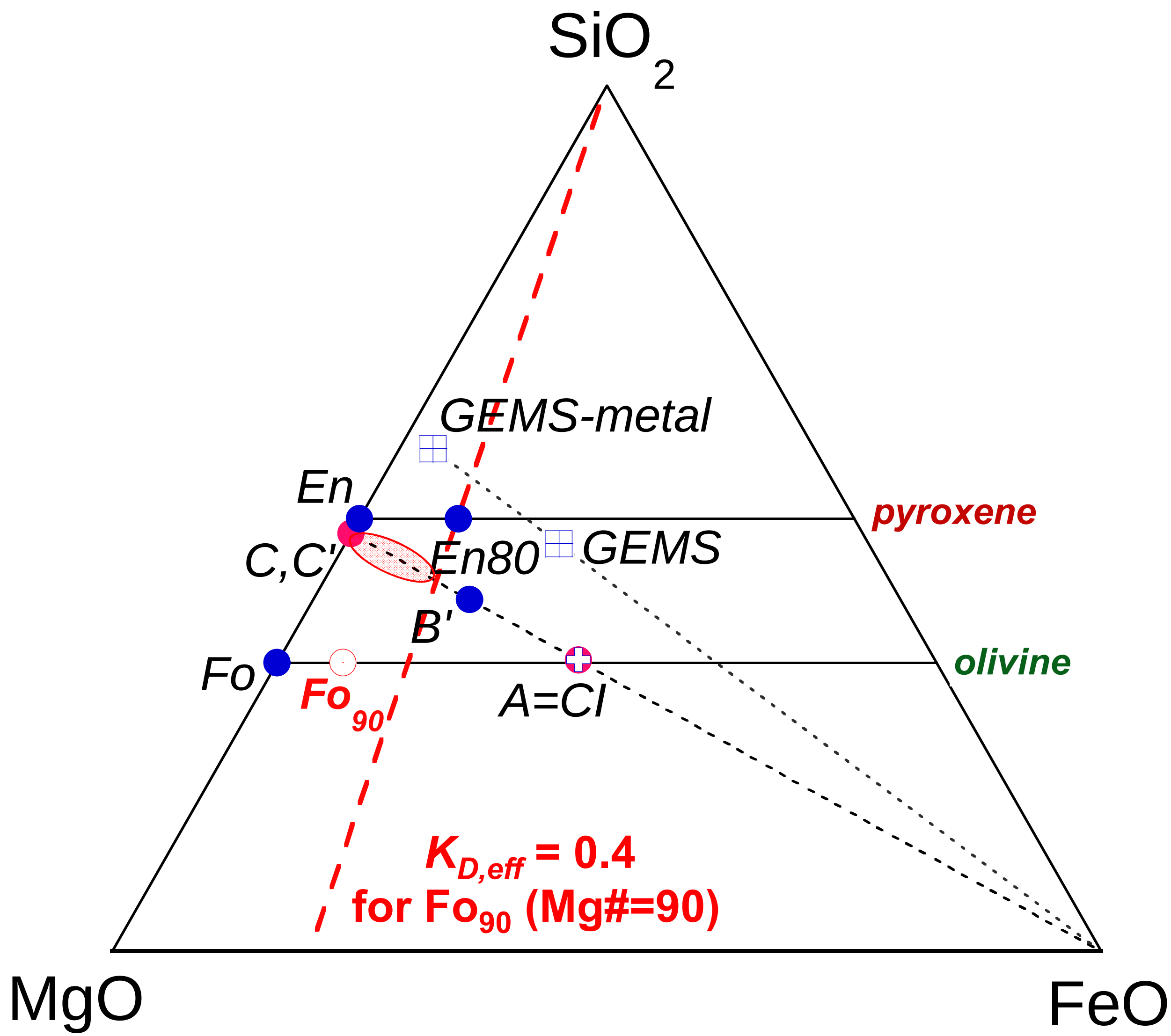
Chemical composition of residual AS (Mg#) as a function of *C*

⇒ Effective distribution coefficient of Mg-Fe between OL and AS, $K_{D,eff}$

$$K_{D,eff} = \frac{(Mg/Fe)_{AS}}{(Mg/Fe)_{OL}} = 0.4 \pm 0.1$$



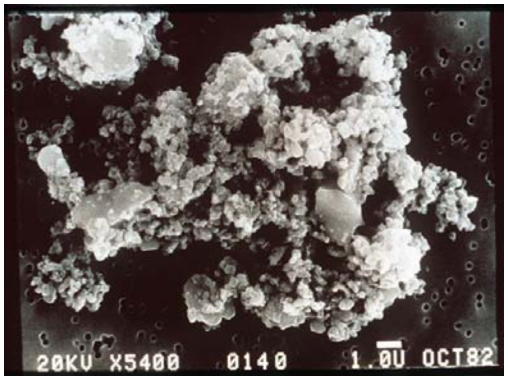
Mg-richな星周塵結晶質ケイ酸塩の化学組成



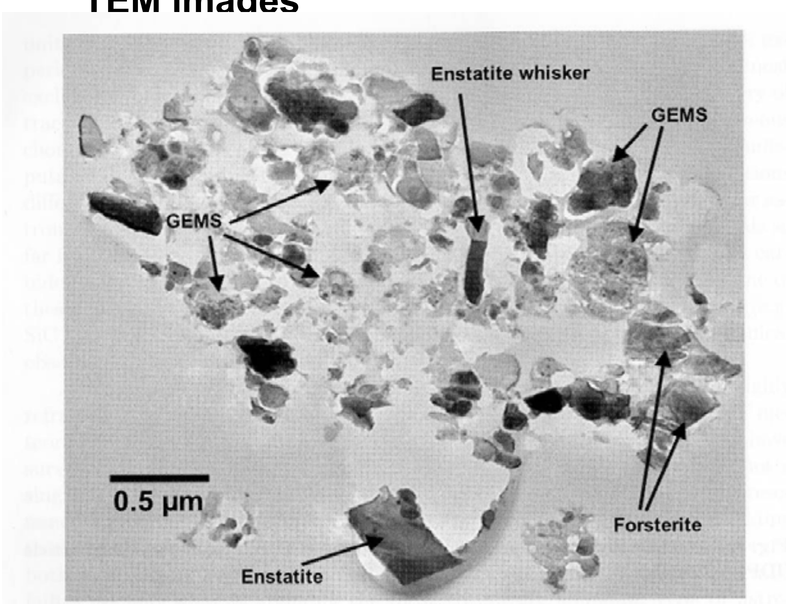
GEMS

GEMS (glass with embedded metal and sulfides) (Bradley, 1995)
彗星起源の宇宙塵（無水惑星間塵）を特徴づける始原的な非晶質ケイ酸塩

SEM images

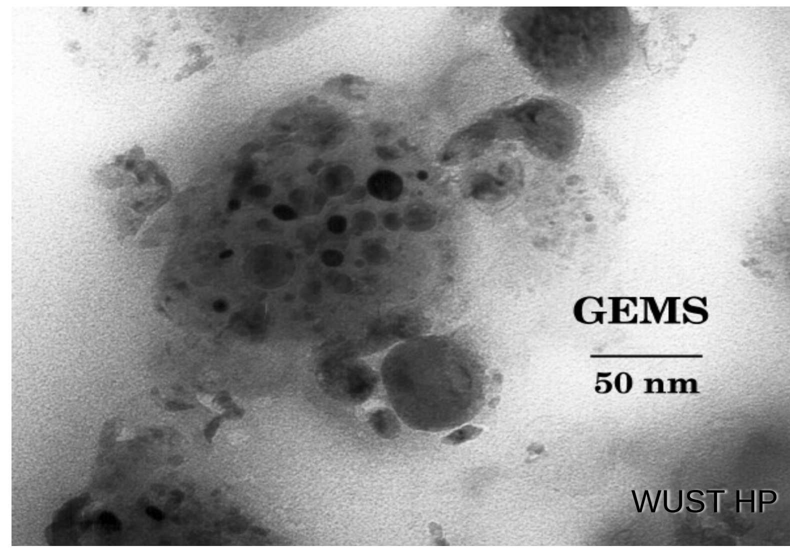


TEM images

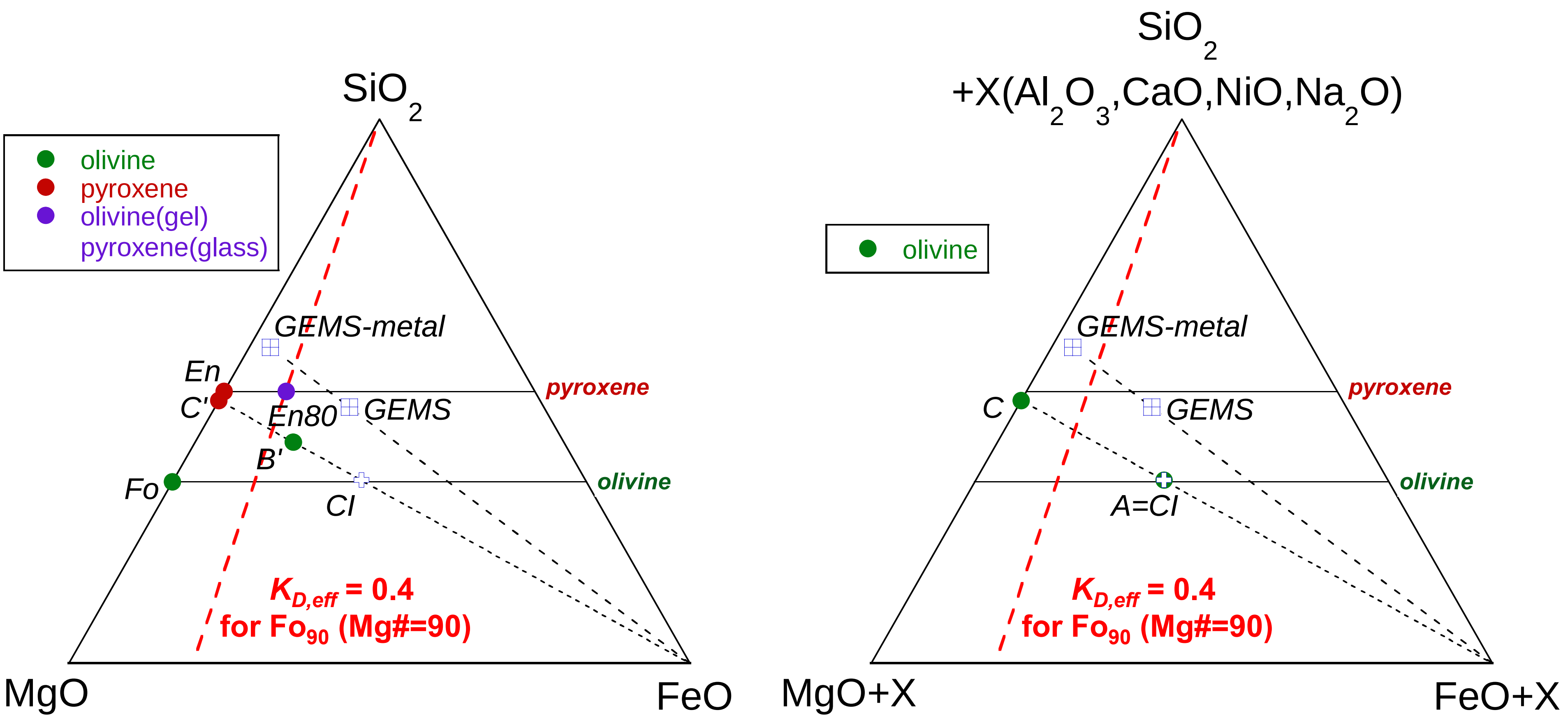


Bradley (2003)

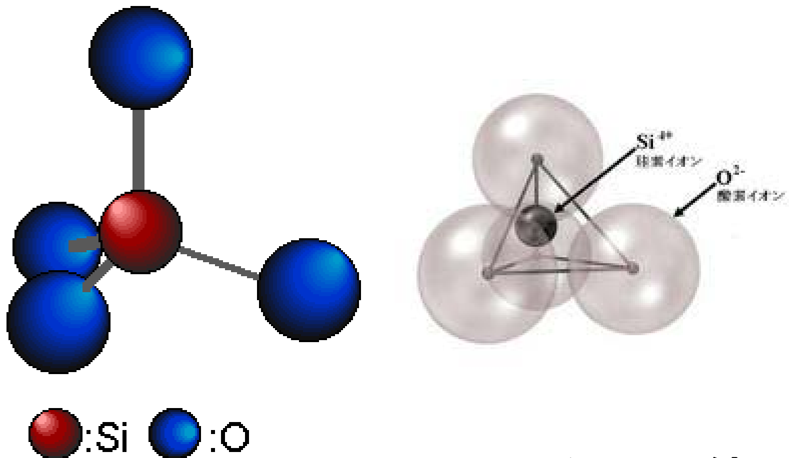
TEM images



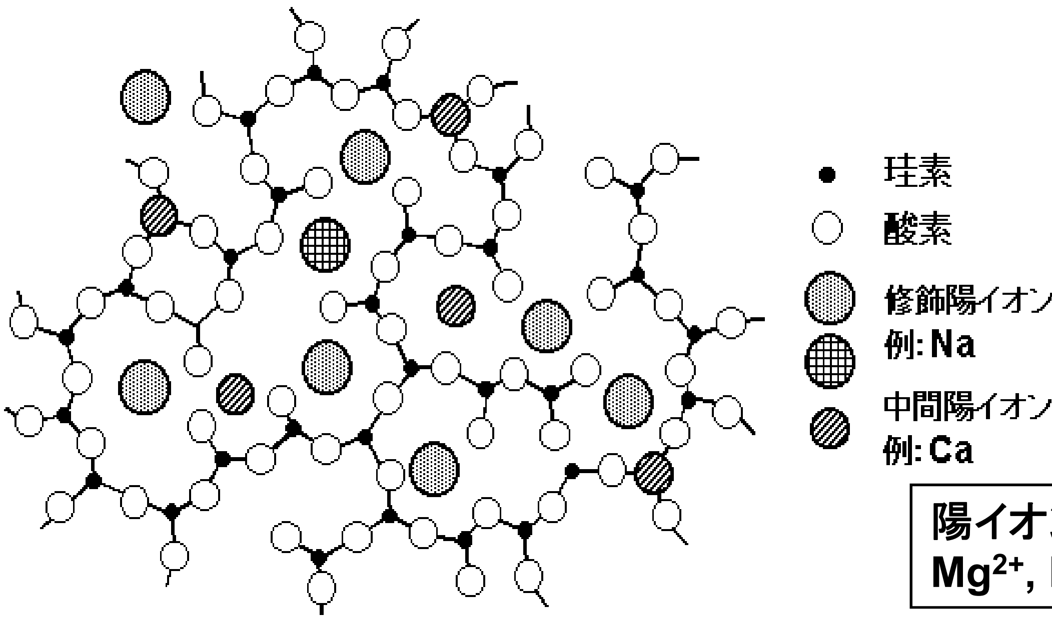
出発物質(AS)の化学組成依存性：OL/PX?



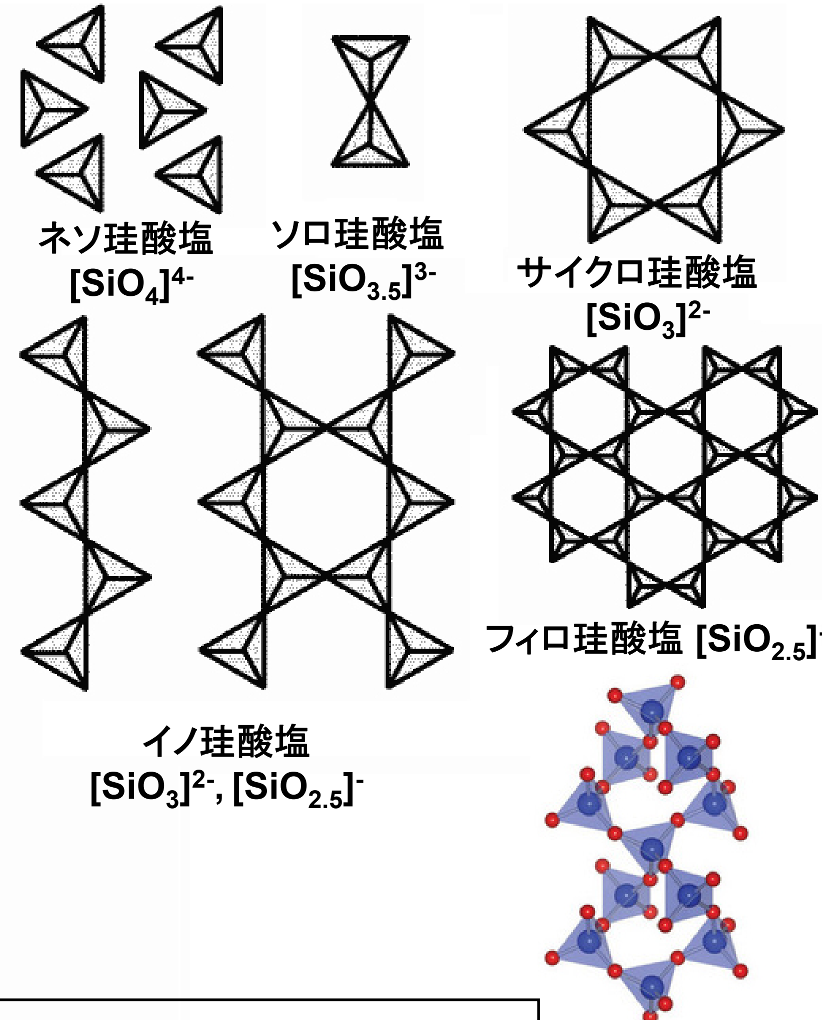
非晶質/結晶質シリケイトの構造



$[SiO_4]^{4-}$ 配位4面体



非晶質シリケイトの模式的な構造



陽イオン：
Mg^{2+}, Fe^{2+}, Ca^{2+}, Ni^{2+}, Al^{3+}, Na^{+}…

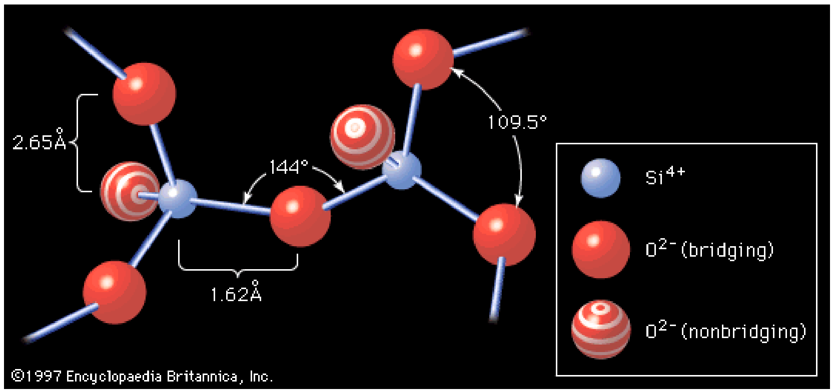
テクト珪酸塩
$[SiO_2]$

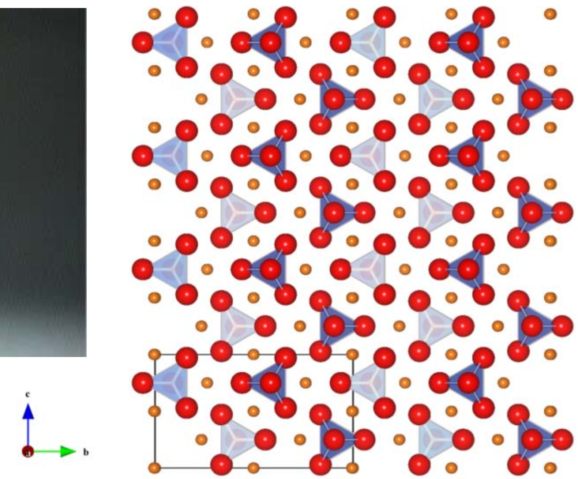
珪酸塩鉱物（結晶）の分類

NBO(Number of Bridging Oxygen) 架橋酸素数

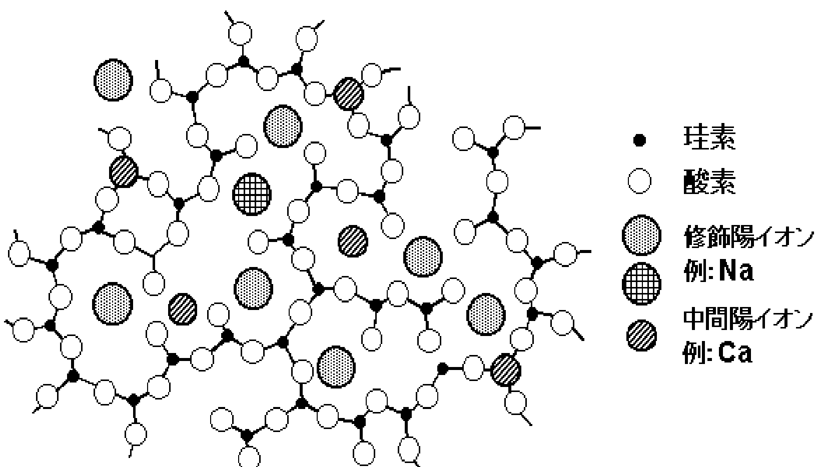
架橋酸素(bridging oxygen)：２つのSiO_4四面体を共有する酸素(Si-O-Si結合)
非架橋酸素(non-bridging oxygen)：SiO_4四面体を共有しない酸素

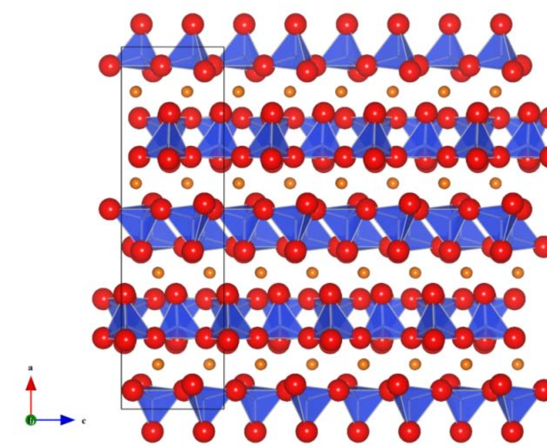
架橋酸素数(NBO)：Si原子１個あたりの架橋酸素の平均数





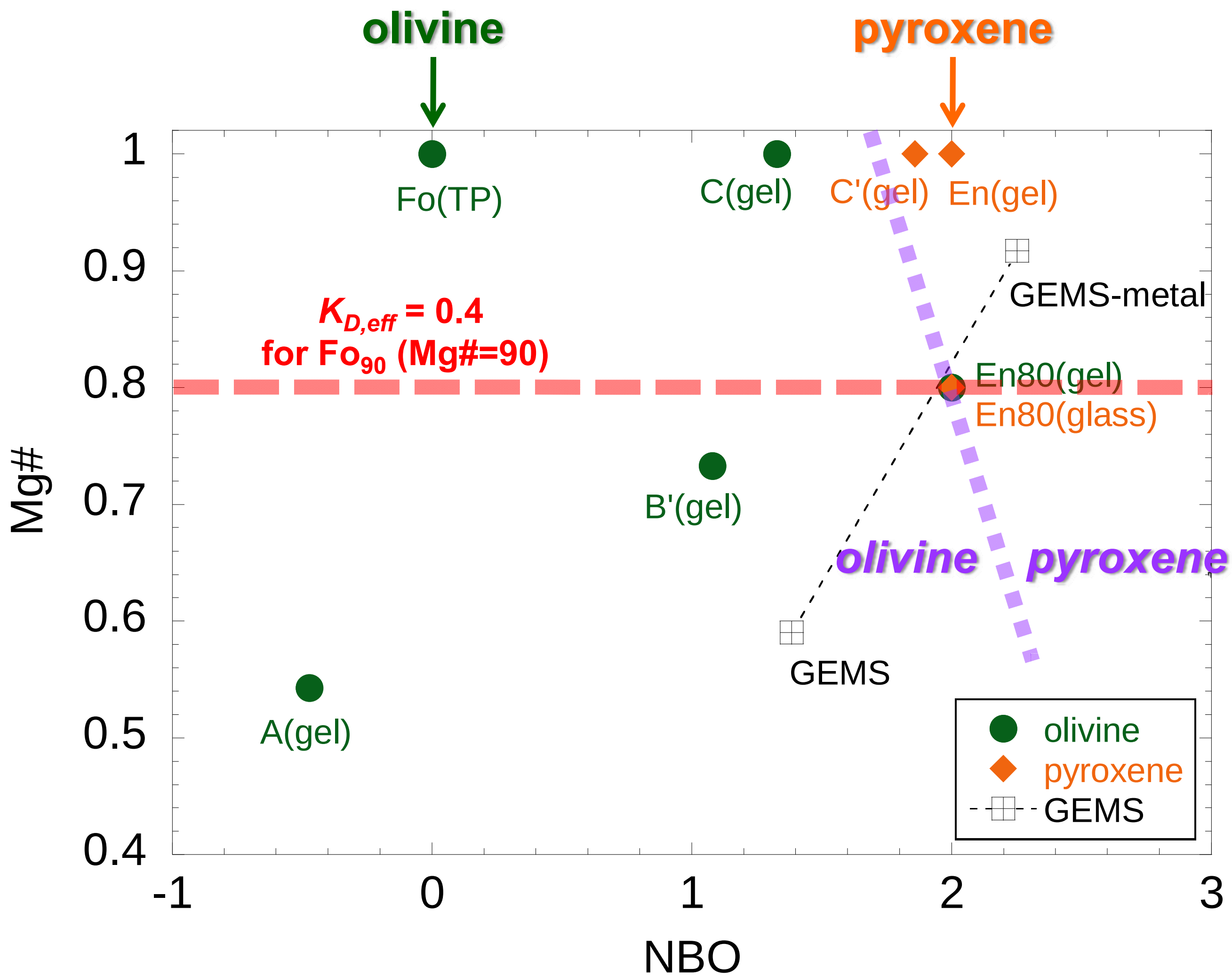
NBO=0
(ネソケイ酸塩)





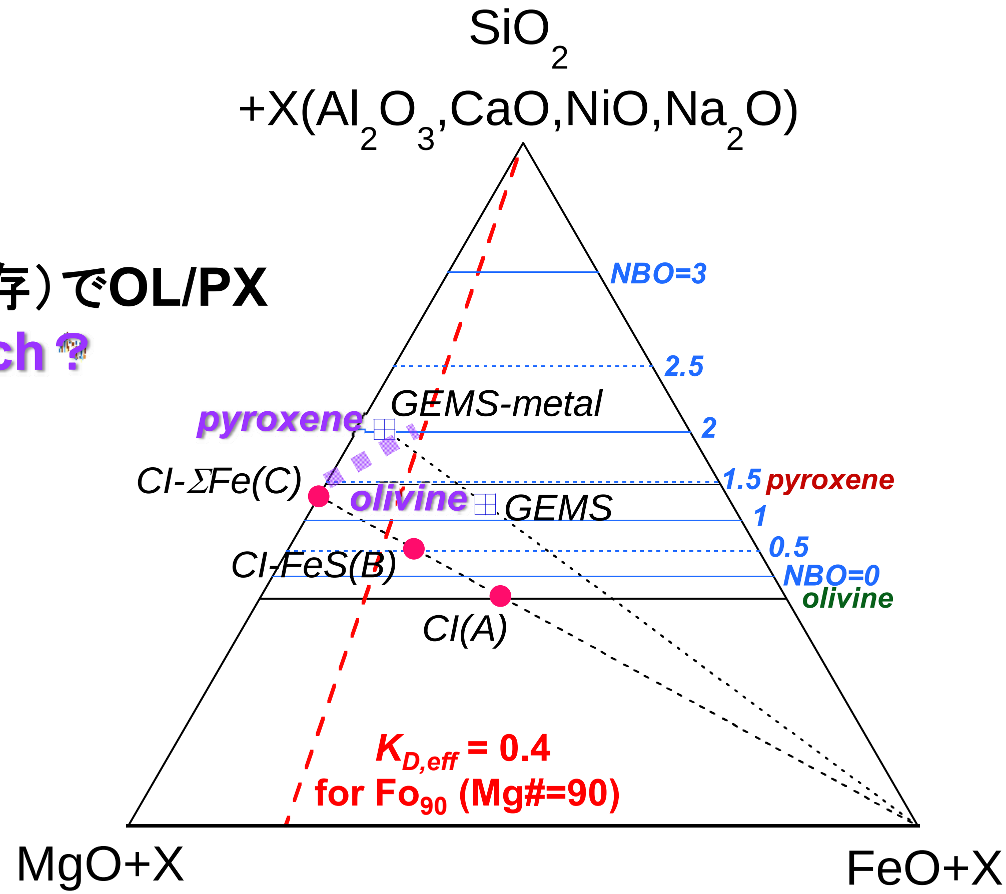
NBO=2
(イノ珪酸塩, chain silicate)

Olivine/pyroxene crystallization vs. NBO



晩期星星周塵でのOL/PXの共存

・非晶質シリケイトの化学組成：
　ほぼ一定の場合
　　NBO~1.5-2
　　AS の構造（凝縮温度などに依存）でOL/PX
　　CI組成（-Fe）よりもややSiO$_2$-rich？
　　（GEMS的）？



・非晶質シリケイトの化学組成：
　不均一の場合
　　NBO<1.5 ~ >2 まで変化
　　組成変化の原因：
　　　摂動 or 時間変化？

・いずれにせよ
　Fe の少なくとも一部はFeS, metalとして存在（low FeO）
　　Mg-rich OL/PX だけでなく
　　PX の結晶作用も説明できない

まとめ

- 星周塵（晩期星/若い星）に観測される結晶質シリケイト（OL/PX）は非晶質シリケイトの加熱による結晶作用によって生成されたという作業仮説の基で、非晶質シリケイトの結晶化実験から星周塵の化学組成を議論した。
- Murata (2009, D-thesis) のレヴューをおこなった。作業仮説により、
  - 晩期星星周塵における結晶質シリケイトの割合が説明できる。（Murata et al., 2009b）。
  - 若い星で観測されたOL/PX分布（Watson et al., 2009; Sergent et al., 2009）が説明できる。
- ASのMg#は、OL-AS間のFe-Mg分配実験（Murata et al., 2009a）より、制限を受ける（Mg#>0.8）。
- OL/PXのどちらが主要な結晶相であるかを、ASのNBO（架橋酸素数）によりおおよそ説明できる。
- 以上より、星周塵の平均的な化学組成はCIよりSiO_2-richである可能性があること、Feの多くの部分はFeSやmetalとして存在している（low-FeO組成）ことが示唆される。