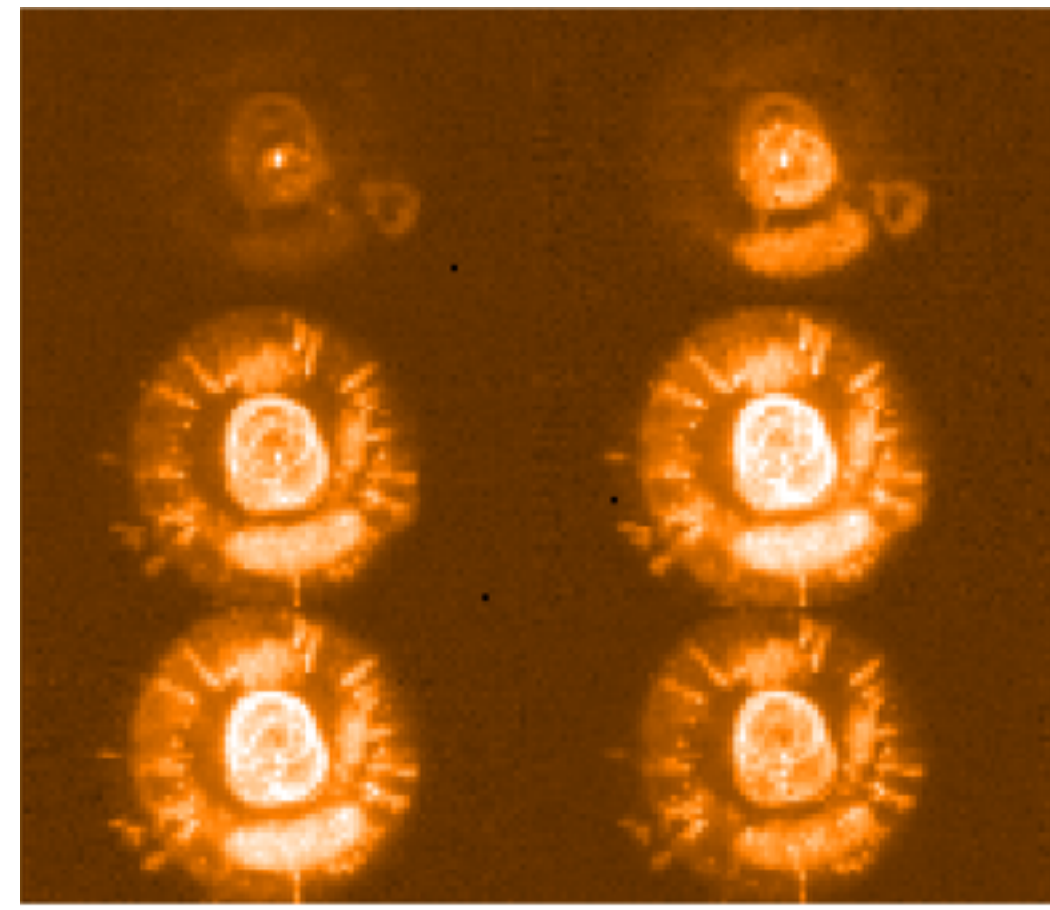
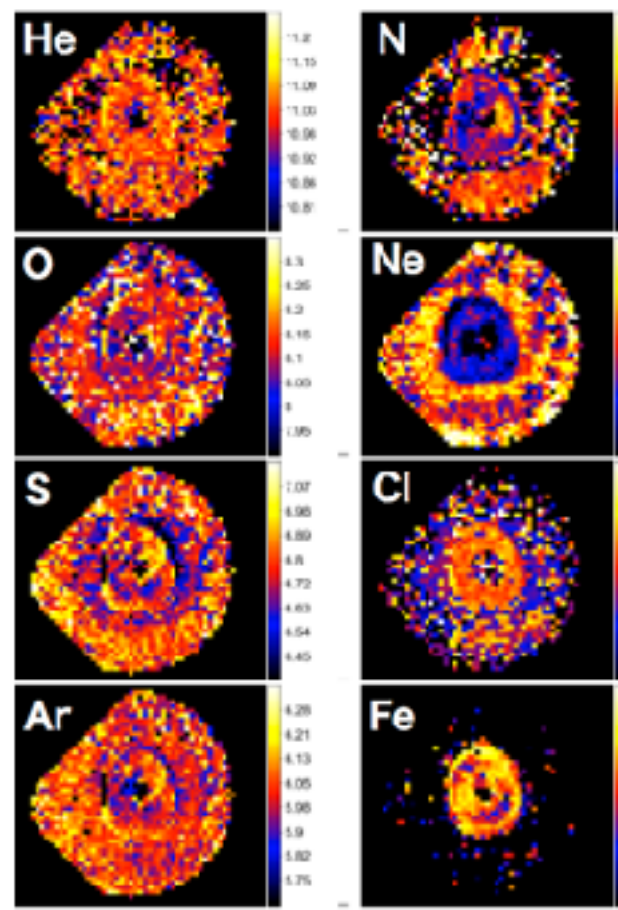
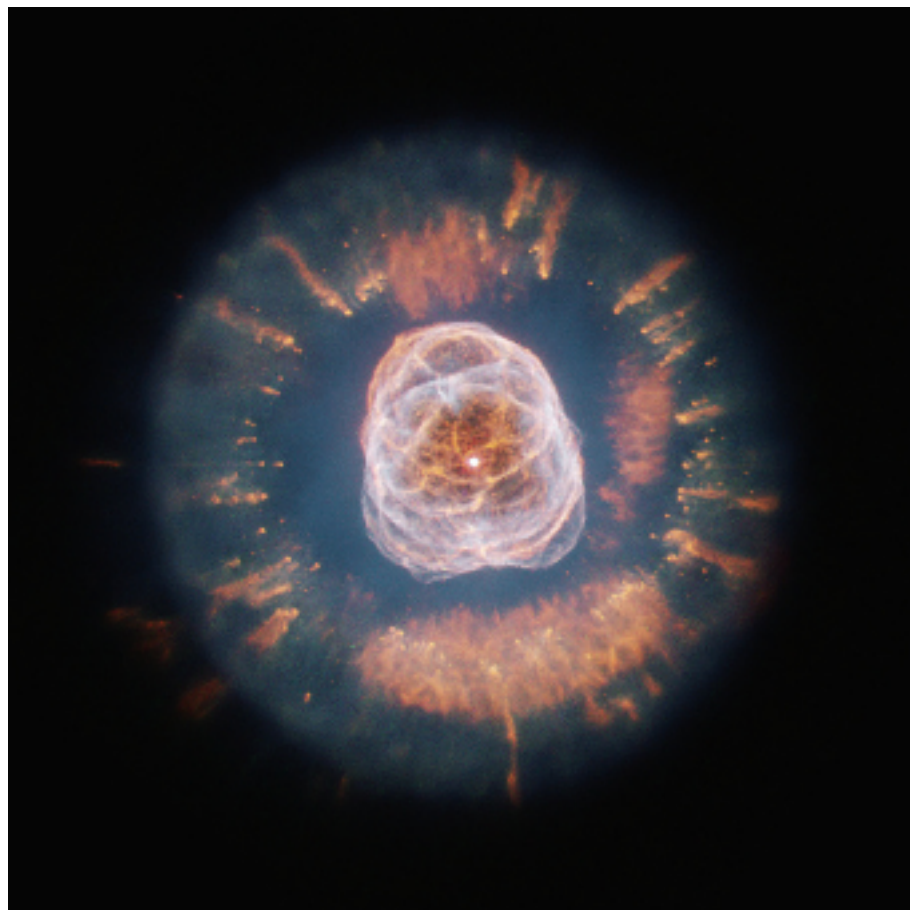
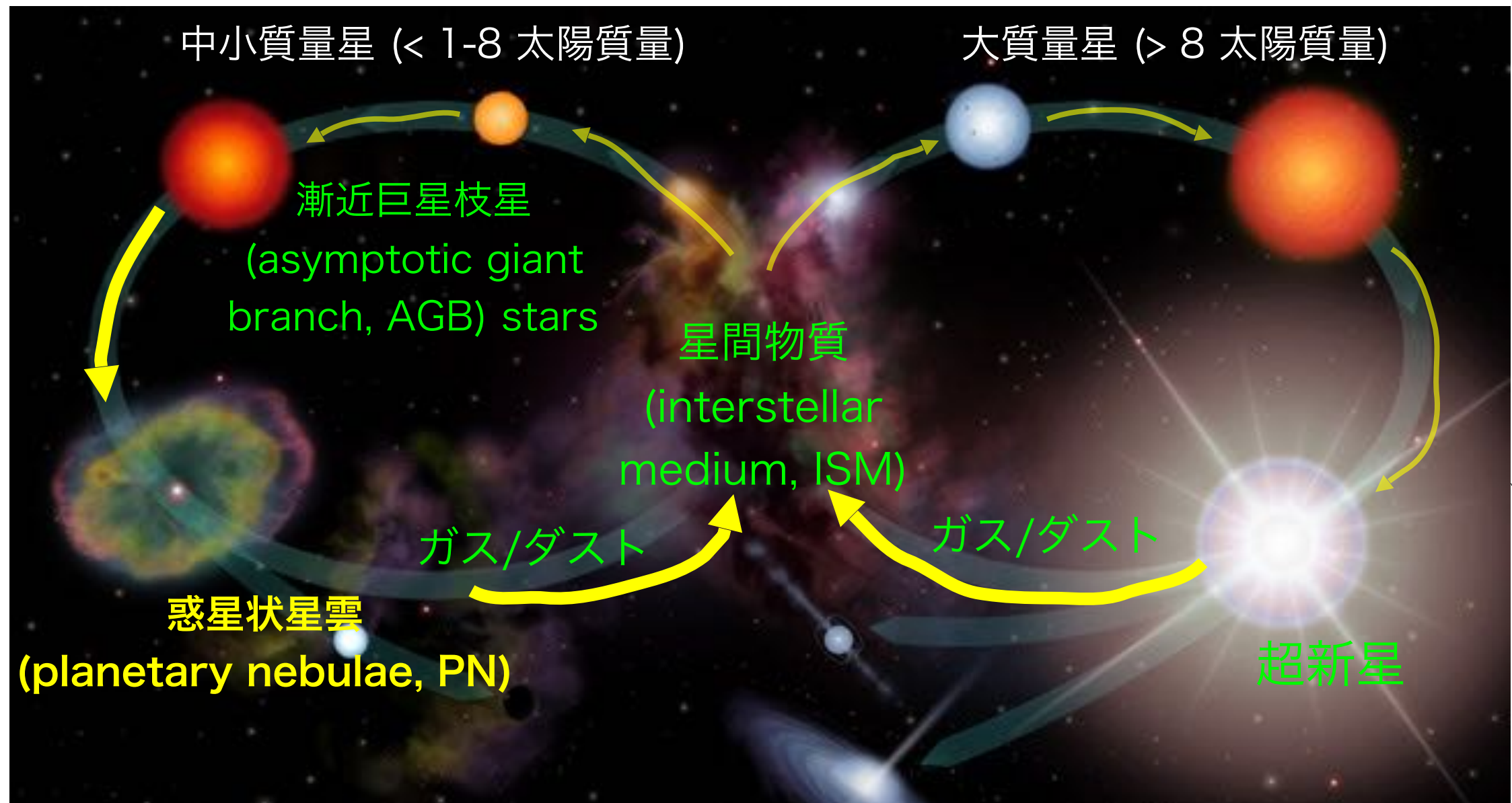


Panchromatic Analysis of Galactic Planetary Nebulae with Kyoto IFU

M. Otsuka (ASIAA), T. Ueta (U. of Denver),
Y.-H. Chu (ASIAA)



Stellar Evolution and Material Recycling between the stars and the host Galaxy

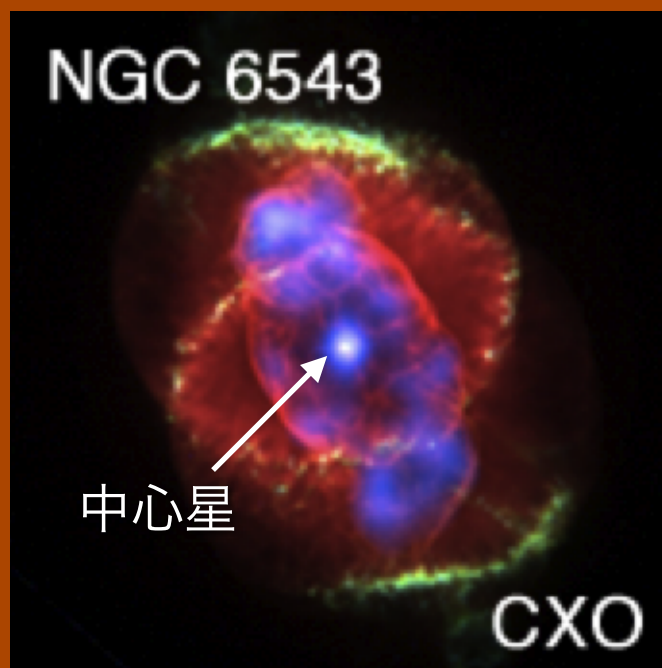
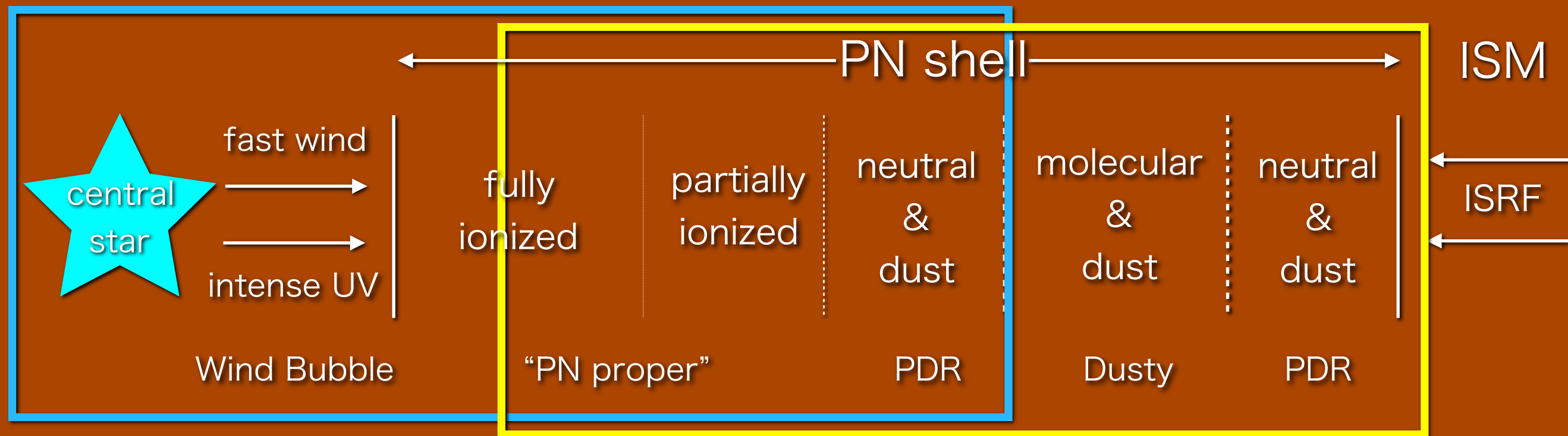


AGB 星/PN は銀河の化学進化において重要な天体

PN as Gas-Dust Dynamical Systems

X/UV/Optical Lines

Mid/Far-IR Lines, Cont



「PNの元素合成とISMの化学組成の比較を通し、
宇宙の中小質量星の役割」

をPNの「空間分解した」紫外-可視(KOOLS-IFU)
から遠赤外観測データで明らかにする。

PN研究から明らかにしたいこと

「PNの元素合成とISMの化学組成の比較を通してみる宇宙における中小質量星の役割」

具体的には、PNの「空間分解した」紫外-可視(KOOLS-IFU)から遠赤外観測データ(HerschelとSpitzer)を使って、

1. ガス密度/温度マップ/化学組成マップ
2. ガス質量、ダスト質量マップ

を導出し「中心星から放出された金属に富むガスがどのようにISMにまで拡散していくのか？」をみていく。

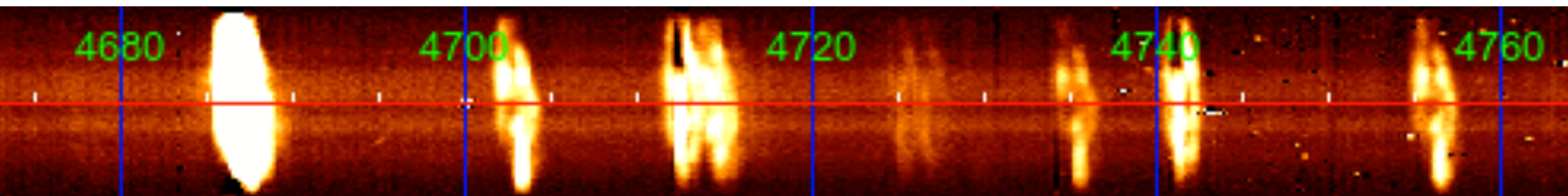
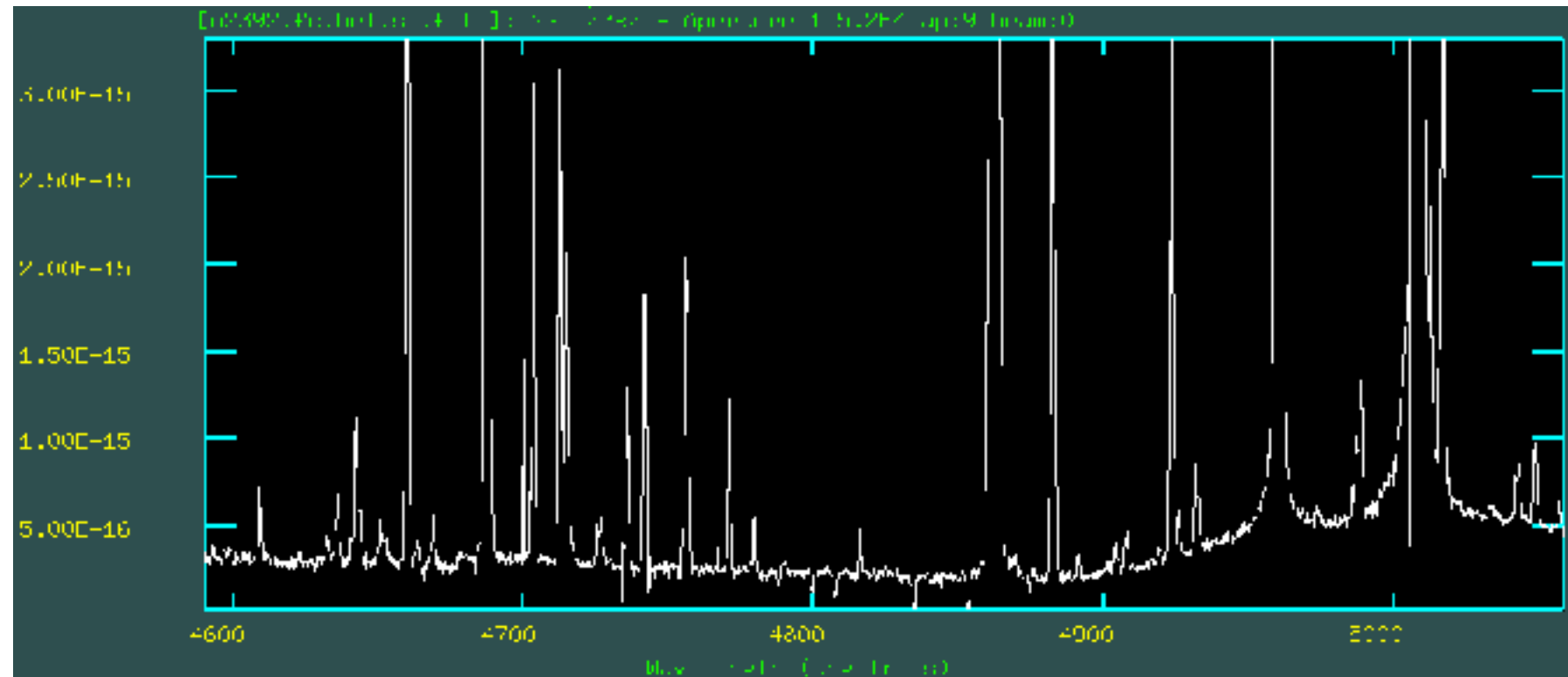
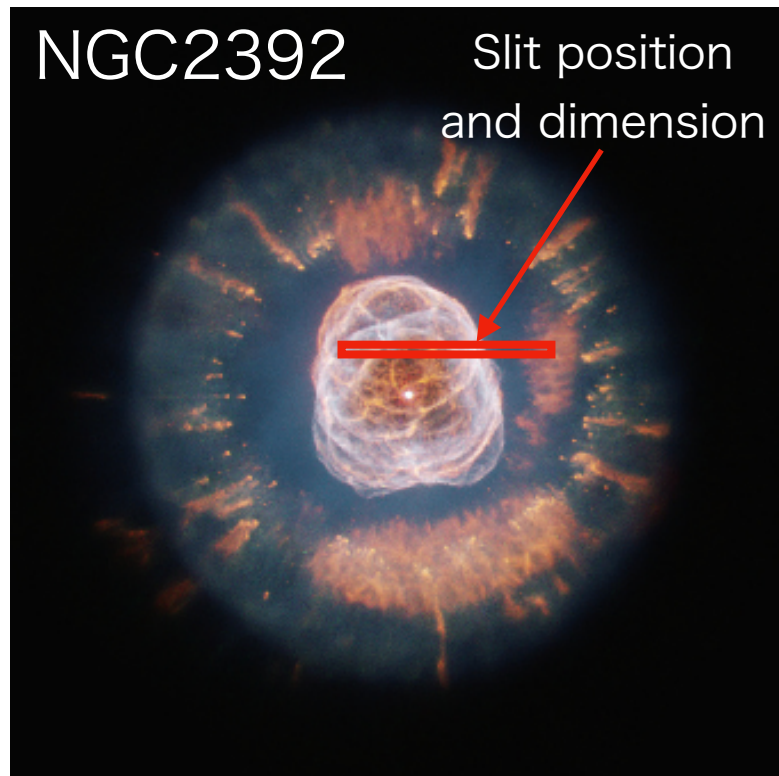
KOOLS-IFU: 中心星、中心星周囲の熱いガスからPDR

Spitzer: PDR、熱いダスト/分子

Herschel: PDR、冷たいダスト/分子

「同じ観測領域」を紫外-可視/中間赤外/遠赤外観測でみるのが各種物理量導出のカギ
ガイダー、ローテータ、「波長分解能に見合った」波長カリブレーション用ランプ（ラインがありすぎるとラインがマージして使えないことがある）、Extinction vs 波長テーブルの整備は必須。

Spatially-resolved spectrum of NGC2392

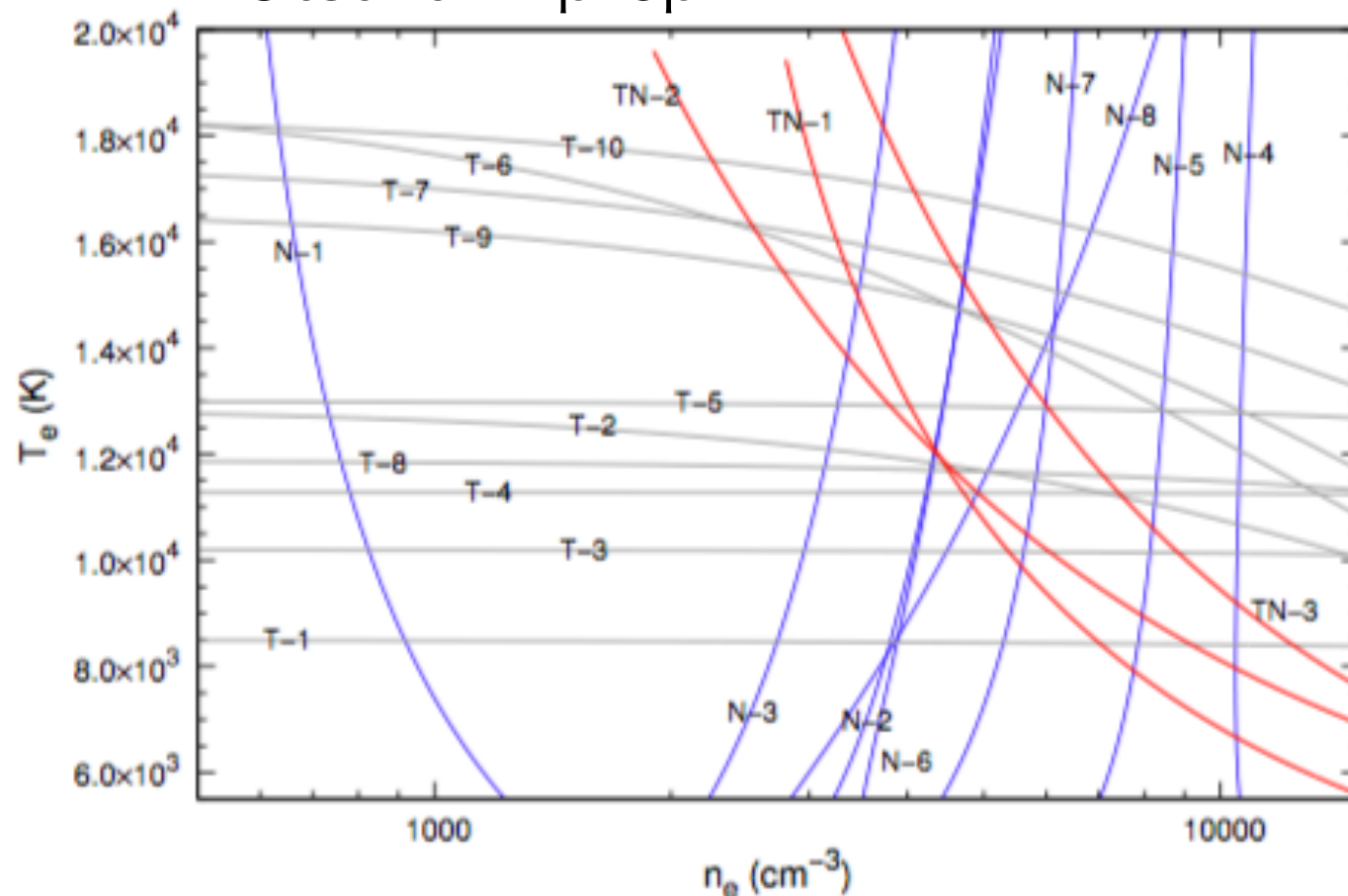


輝線強度に空間変化がある(温度、密度、ガス分布は不均一)。よって、空間情報をキープした輝線マップを使ってガス診断するのが必須。しかし、アーカイブデータの多くは上のような1-Dスペクトル。空間分解しているデータがどうしても必要。

Plasma diagnostics of PNe

CEL: collisional excited line
RL: recombination line

Otsuka in prep.



- 「PNとは T_e (電子温度) = 10^4 K、 n_e (電子密度) = 10^4 cm $^{-3}$ で一定のプラズマボール」ではない。
- 「エネルギーポテンシャルが異なる診断ラインの検出」、「2D輝線マップ」がionized gas regionsとPDRsを完全トレースするために必須。

ID	CEL n_e -diagnostic line	Value	Result (cm $^{-3}$)
N-1	[N I] 5197 Å/5200 Å	1.346 ± 0.053	920 ± 110
N-2	[S II] 6717 Å/6731 Å	0.584 ± 0.015	4360 ± 490
N-3	[O II] 3726 Å/3729 Å	1.773 ± 0.067	3340 ± 400
N-4	[S III] 18.7 μm/33.5 μm	2.886 ± 0.245	10620 ± 1820
N-5	[Cl III] 5517 Å/5537 Å	0.683 ± 0.020	8170 ± 690
N-6	[Cl IV] 11.8 μm/20.3 μm	1.361 ± 0.178	46800 ± 1700
N-7	[Ar IV] 4711 Å/4740 Å	0.879 ± 0.016	5920 ± 330
N-8	[Ne V] 14.3 μm/24.3 μm	1.749 ± 0.147	6780 ± 1290
ID	CEL n_e -diagnostic line	Value	Result (K)
T-1	[O I] (6300/63 Å)/5577 Å	96.719 ± 7.203	8500 ± 200
T-2	[N II] (6548/83 Å)/5755 Å	57.138 ± 1.147	12050 ± 120
T-3	[S III] 9069 Å/6313 Å	9.023 ± 0.282	10130 ± 140
T-4	[Ar III] (7751/7135 Å)/5191 Å	125.043 ± 9.734	11290 ± 360
T-5	[O III] (4959/5007 Å)/4363 Å	92.925 ± 1.499	13140 ± 80
T-6	[Cl IV] (11.8 μm/20.3 μm)/7531 Å	4.031 ± 0.292	14790 ± 870
T-7	[Ar IV] (4711/40 Å)/(7170/7262 Å)	25.503 ± 0.893	15170 ± 420
T-8	[Ne III] (15.8 μm)/(3869/3967 Å)	0.745 ± 0.045	11650 ± 230
T-9	[Ar V] 13.10 μm/6435 Å	5.731 ± 0.189	17450 ± 390
T-10	[Ne IV] 2425 Å/(4714/15/24/26 Å)	77.386 ± 4.338	16260 ± 5000
ID	CEL T_e/n_e -diagnostic line	Value	Result (cm $^{-3}$)
TN-1	[S II] (4069/76 Å)/(6717/31 Å)	3.180 ± 0.206	12180 ± 1060
TN-2	[O II] (3726/29 Å)/(7320/30 Å)	10.682 ± 0.198	13420 ± 220
TN-3	[S III] (18.7/33.5 μm)/9069 Å	1.798 ± 0.097	11290 ± 360
	RL T_e -diagnostic line	Value	Result (K)
	He I 7281 Å/6678 Å	0.204 ± 0.006	9290 ± 280
	He I 6678 Å/5876 Å	0.267 ± 0.005	9700 ± 500
	$[I_\lambda(8194 \text{ Å}) - I_\lambda(8169 \text{ Å})]/I(\text{P11})$	0.022 ± 0.003	9140 ± 2540

Otsuka in prep.

アバundanceアナリシスでのTe決定の重要性

Line emissivity (ϵ)は

[N II] 6583 Å: $8.48\text{E-}21 \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^3$ in 12000 K $\rightarrow$ $6.36\text{E-}21 \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^3$ in 10000 K (~25% ↓)

[N II] 5755 Å: $1.80\text{E-}22 \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^3$ in 12000 K $\rightarrow$ $8.96\text{E-}23 \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^3$ in 10000 K (~50% ↓)

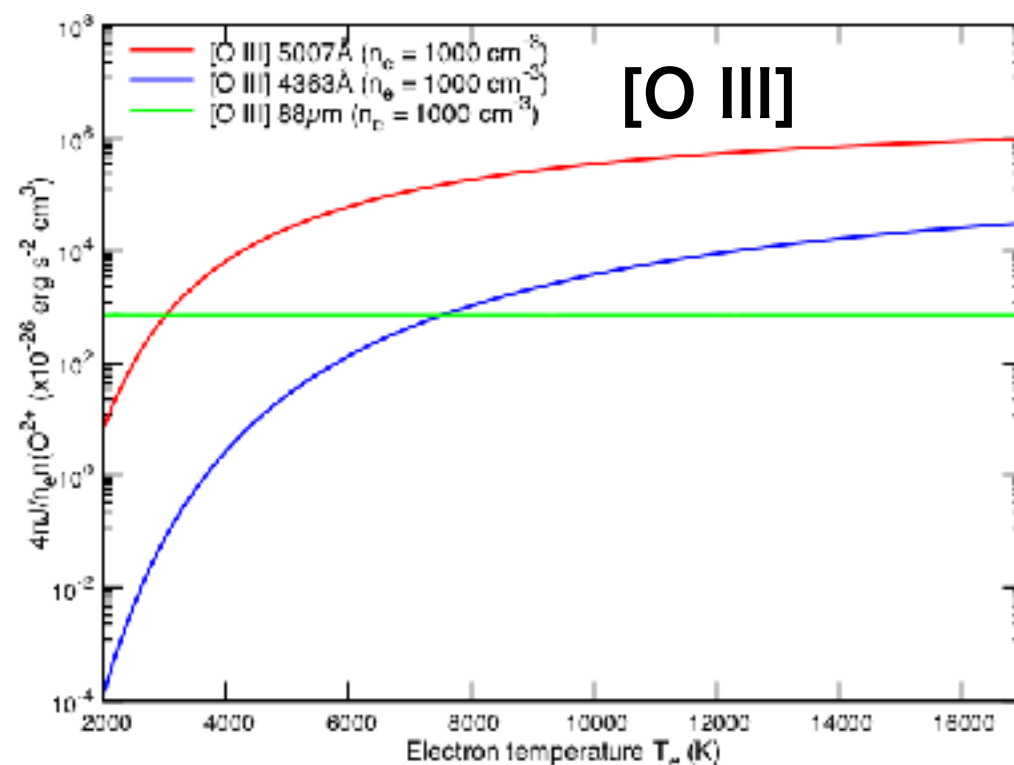
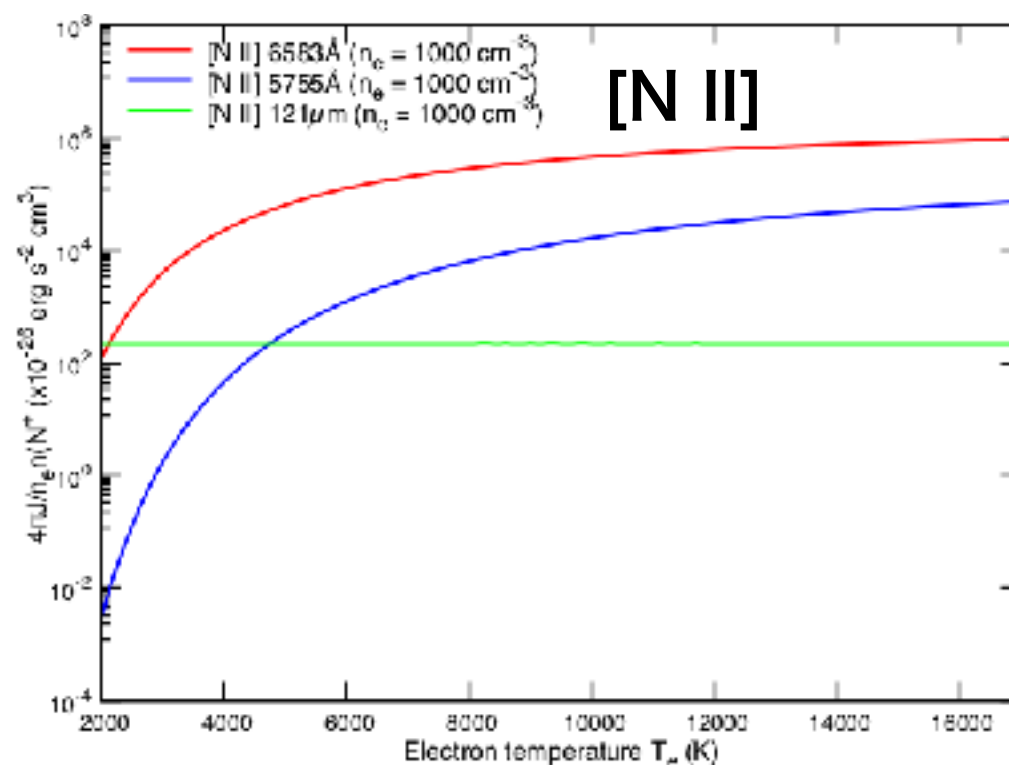
H β : $1.07\text{E-}25 \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^3$ in 12000 K $\rightarrow$ $1.26\text{E-}25 \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^3$ in 10000 K (~15% ↑)

水素数密度 $n(\text{H}^+)$ に対するN $^+$ 数密度 $n(\text{N}^+)$ 比は

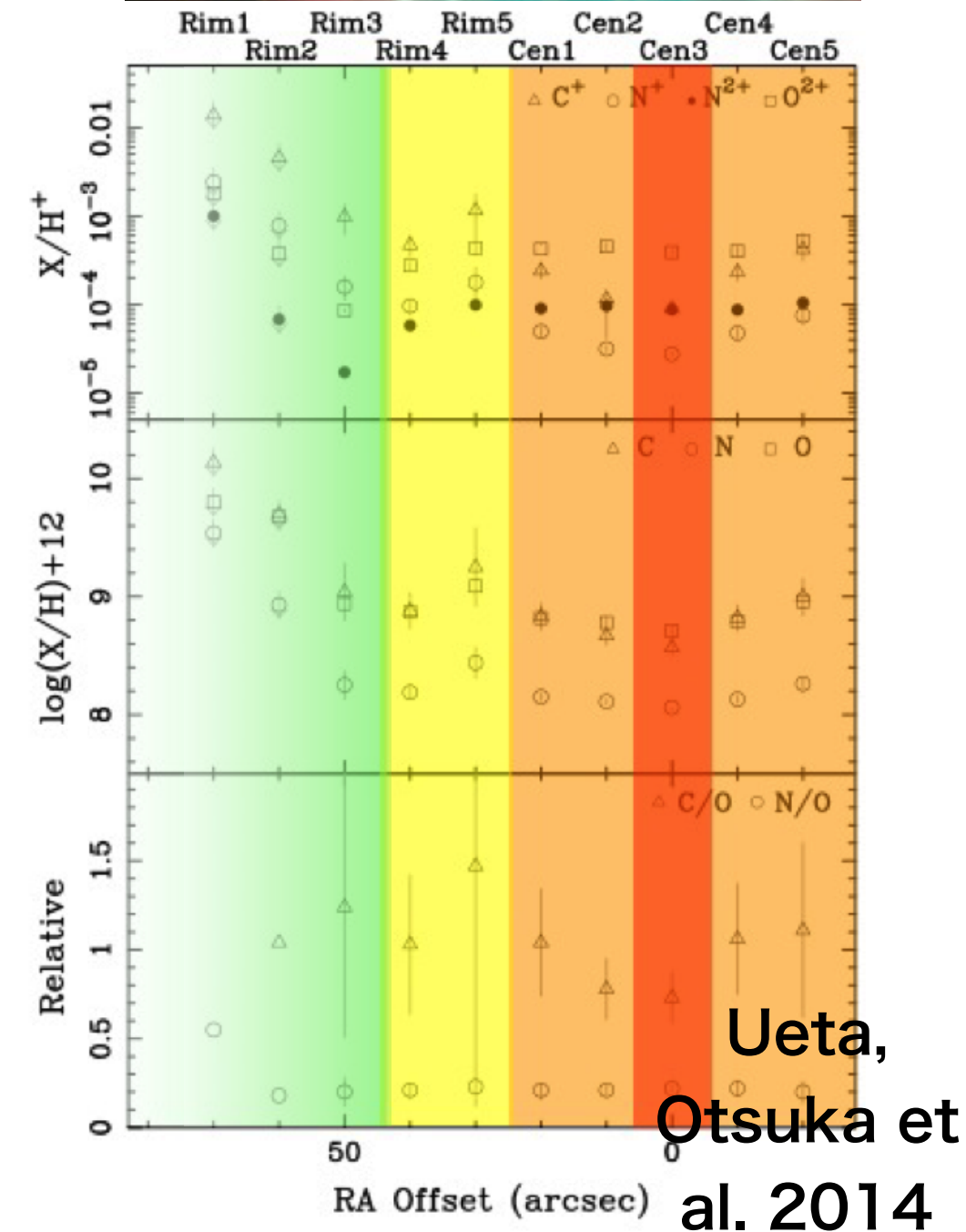
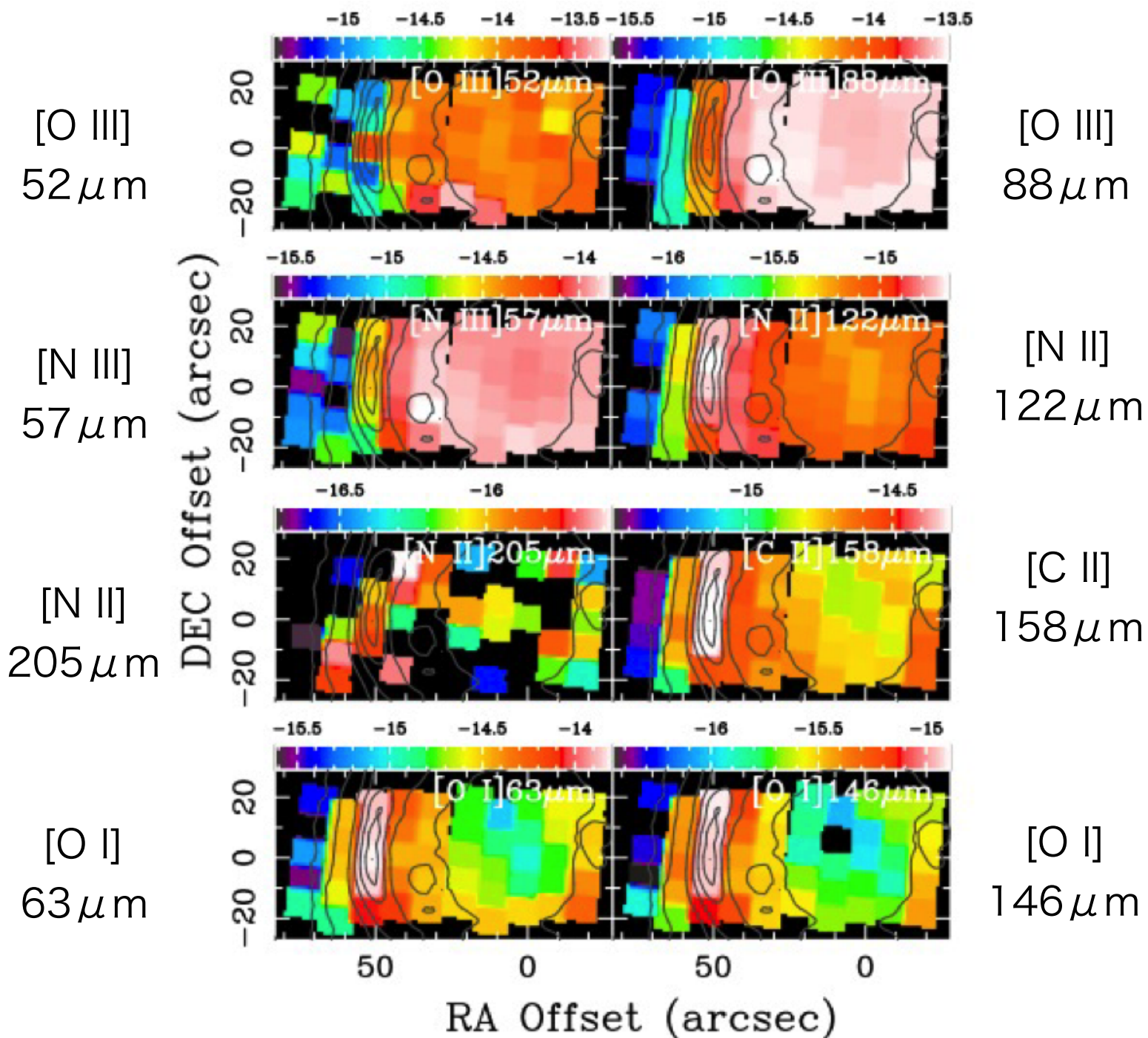
$$n(\text{N}^+)/n(\text{H}^+) = I(\lambda)/I(\text{H}\beta) * (\epsilon(\lambda)/\epsilon(\text{H}\beta))^{-1}, I(\lambda): \text{ラインフラックス}$$

ただし、H β は必須なラインではなく、H I 12.3 μm (in mid-IR)やH α でもよい。

N $^+$ /H $^+$ アバundanceは2000 Kの違いでトータルで>30% in [N II] 6583 Å、>50% in [N II] 5755 Åの差。
コレクションファクタの不定性も考慮すると、エレメンタルNアバundanceの不定性はさらに大きくなる。



2D Plasma diagnostics: the case of NGC6781

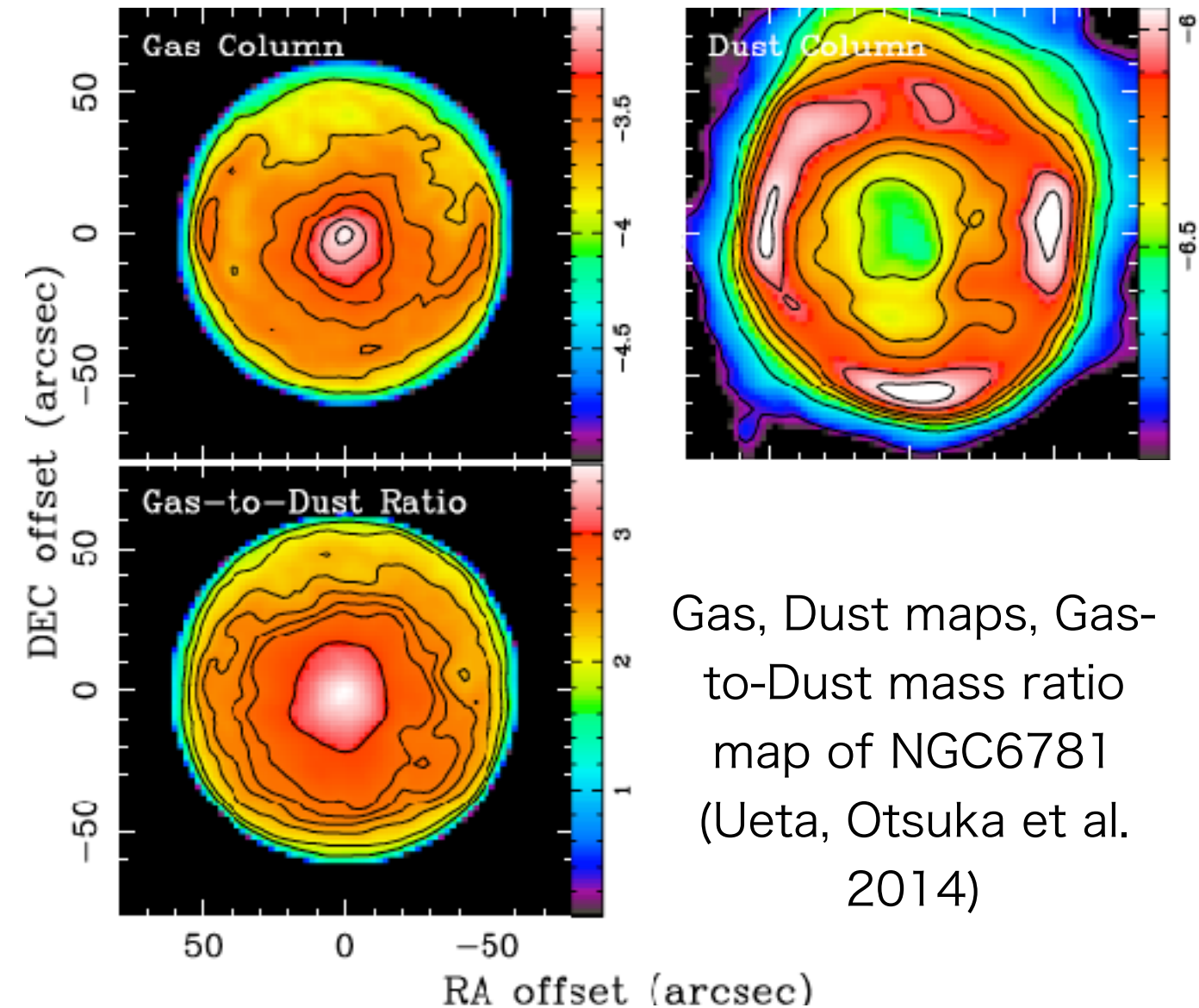


輝線強度に空間変化がある(温度、密度、ガス分布は不均一)。よって、空間情報をキープした輝線マップを使ってガス診断するのが必須。

Gas, Dust, Gas-to-Dust Mass Ratio



- ガス-ダスト質量比は銀河の物質進化を理解する上でもキーとなるパラメータ。「ガス-ダスト質量比は100で一定」というのは太陽近傍十数天体の平均であることに注意。
- 「ガスとダストがどのように混在し、そのマス比はどれくらいなのか」を、空間情報保持したPNデータを使って調べたい。



Gas, Dust maps, Gas-to-Dust mass ratio map of NGC6781 (Ueta, Otsuka et al. 2014)

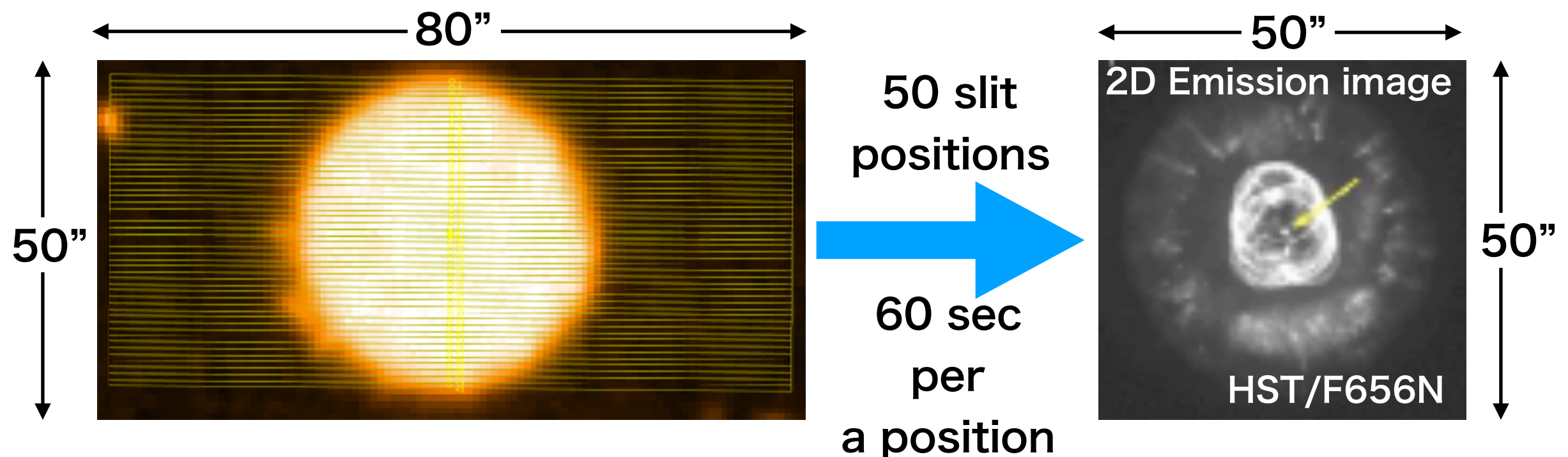
KOOLS-IFUでガスマスを調査する

KOOLS-IFUでしたいこと

2-Dエレメンタルアバundance/ガスマスマップの調査

PN NGC2392のGMOS データとHerschel/Spitzerデータをつかって結果をシミュレート。**PN内のエレメンタルアバundanceの均一/非均一性をみる。**

- データ取得日: 2018 Jan 4 and 10
- 使用グレーティング: B1200 for 3700-5300 Å and R400 for 4600-9200 Å、KOOLS-VPHのRと大体同じ。GMOSとKOOLSで採用しているチップも同じ。



NGC 2392

- $D \sim 1 \text{ kpc}$
- 電離ガス半径 $\sim 25''$ ($\sim 0.12 \text{ pc}$)
- $T_{\text{eff}} \sim 40000 \text{ K}$ の明るい中心星($m_V = 10.53$, from HST/F555W)
- 中心星からの $>1000 \text{ km/s}$ の恒星風とAGBフェイズ末期にイジェクトされたガスとのインタラクションによってできたX-ray shockedガス ($\sim 10^6 \text{ K}$, $n_e = 30 \text{ cc}$)
- X-ray shocked ガスを取りまく $T_e \sim 13000$ ([N II]) - 18000 ([O III]) KのPNガスシェル
- 多数のクランプ状ガス。Cometary knots.
- シリケートダストがPNシェル内に混在。



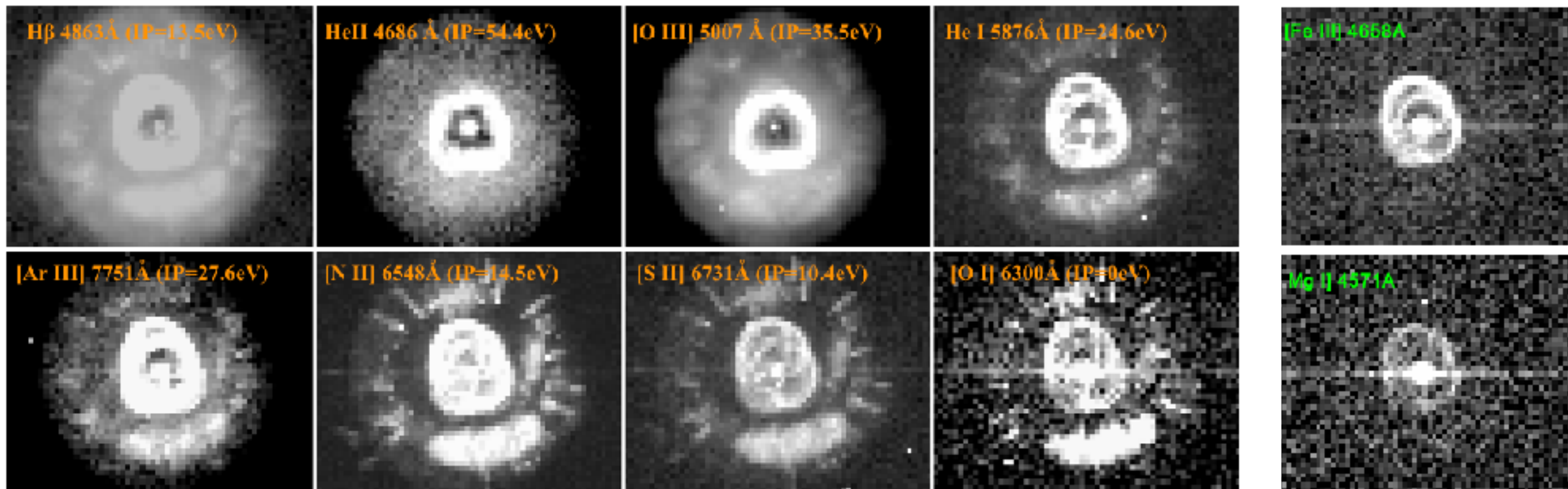
NGC 2392

- $D \sim 1 \text{ kpc}$
- 電離ガス半径 $\sim 25''$ ($\sim 0.12 \text{ pc}$)
- $T_{\text{eff}} \sim 40000 \text{ K}$ の明るい中心星($m_V = 10.53$, from HST/F555W)
- 中心星からの $>1000 \text{ km/s}$ の恒星風とAGBフェイズ末期にイジェクトされたガスとのインタラクションによってできたX-ray shockedガス ($\sim 10^6 \text{ K}$, $n_e = 30 \text{ cc}$)
- X-ray shocked ガスを取りまく $T_e \sim 13000$ ([N II]) - 18000 ([O III]) KのPNガスシェル
- 多数のクランプ状ガス。Cometary knots。
- シリケートダストがPNシェル内に混在。



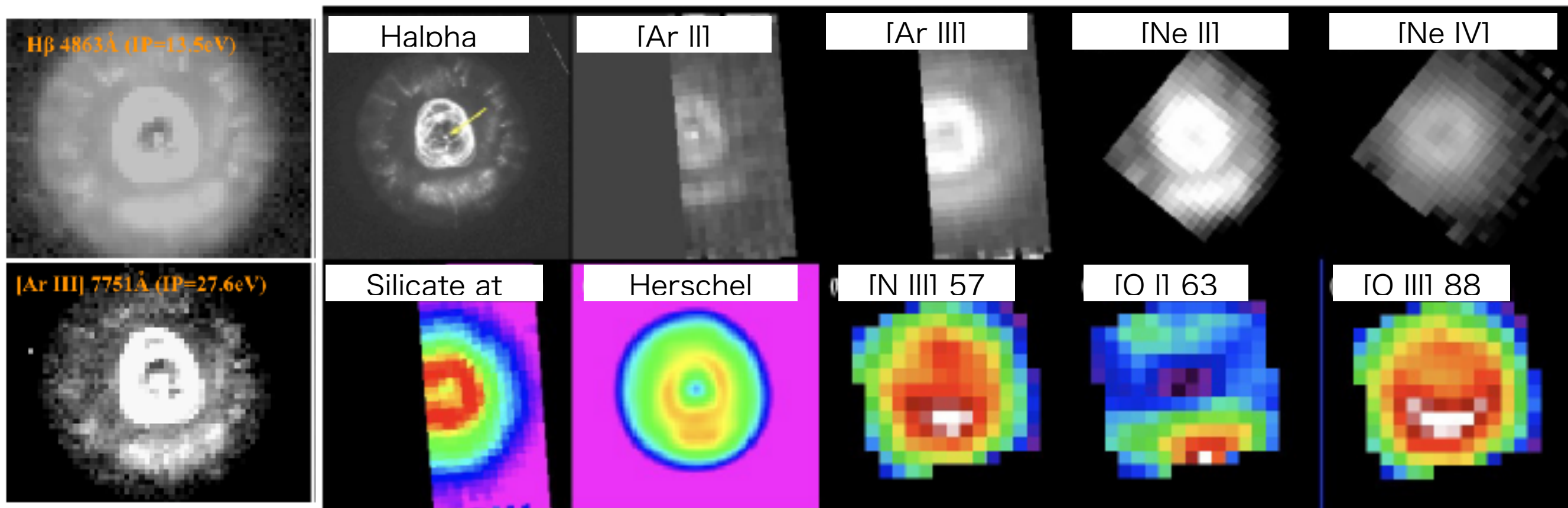
Emission Line maps

- マップ総数60本以上 (as of 2018 Feb 6)
 - He I, II, [N II], [O II, III], [Ne III], [S II, III], [Cl II, III, IV], [Ar III, IV], [Fe III], Mg I]
 - IR: [O III, IV], [Ne II, III, V], [Ar II, III], [S III, IV]
- H Iライン強度比を使い減光マップ作成でフラックスを補正後、**ne([Fe III])**、ne([O II])、**ne([Cl III])**、**ne([Ar IV])**、**ne([O III])**、Te([S II])、**Te([N II])**、**Te([S III])**、**Te([O III])**、**Te(HeI)**のマップをえる。

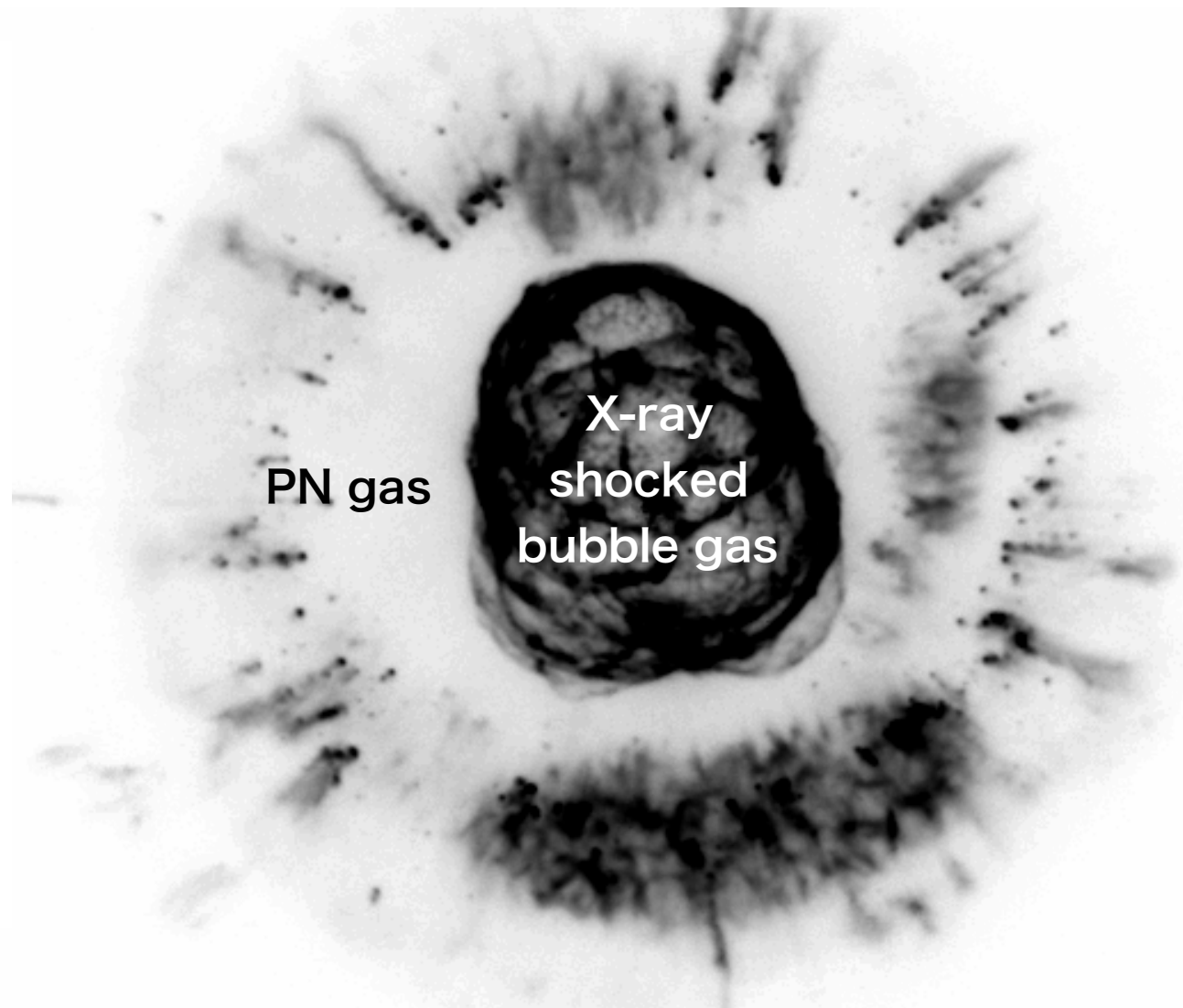
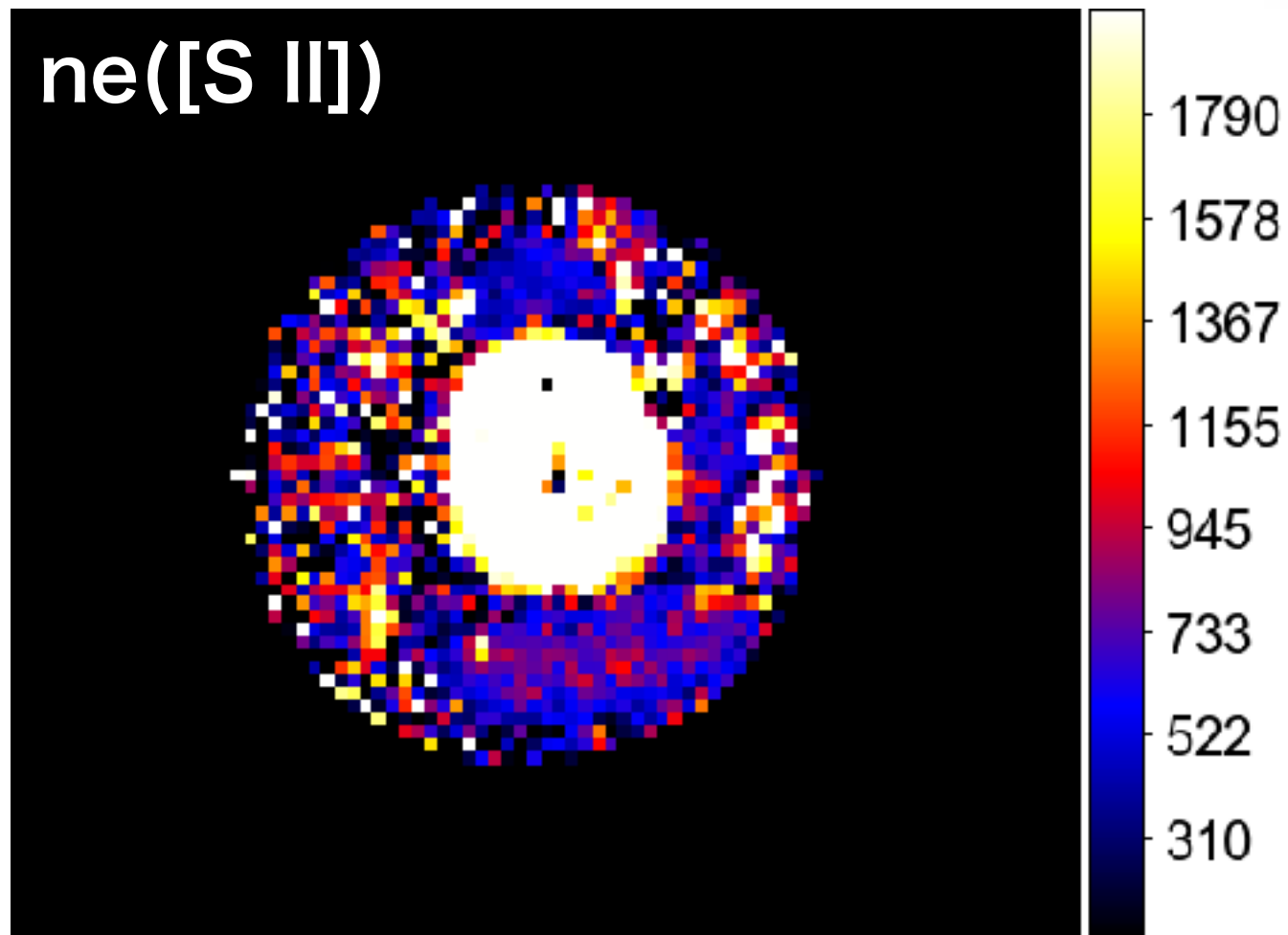


Emission Line maps

- マップ総数60本以上 (as of 2018 Feb 6)
 - He I, II, [N II], [O II, III], [Ne III], [S II, III], [Cl II, III, IV], [Ar III, IV], [Fe III], Mg I]
 - IR: [O III, IV], [Ne II, III, V], [Ar II, III], [S III, IV]
- H Iライン強度比を使い減光マップ作成でフラックスを補正後、**ne([Fe III])**、ne([O II])、**ne([Cl III])**、**ne([Ar IV])**、**ne([O III])**、Te([S II])、**Te([N II])**、**Te([S III])**、**Te([O III])**、**Te(HeI)**のマップをえる。

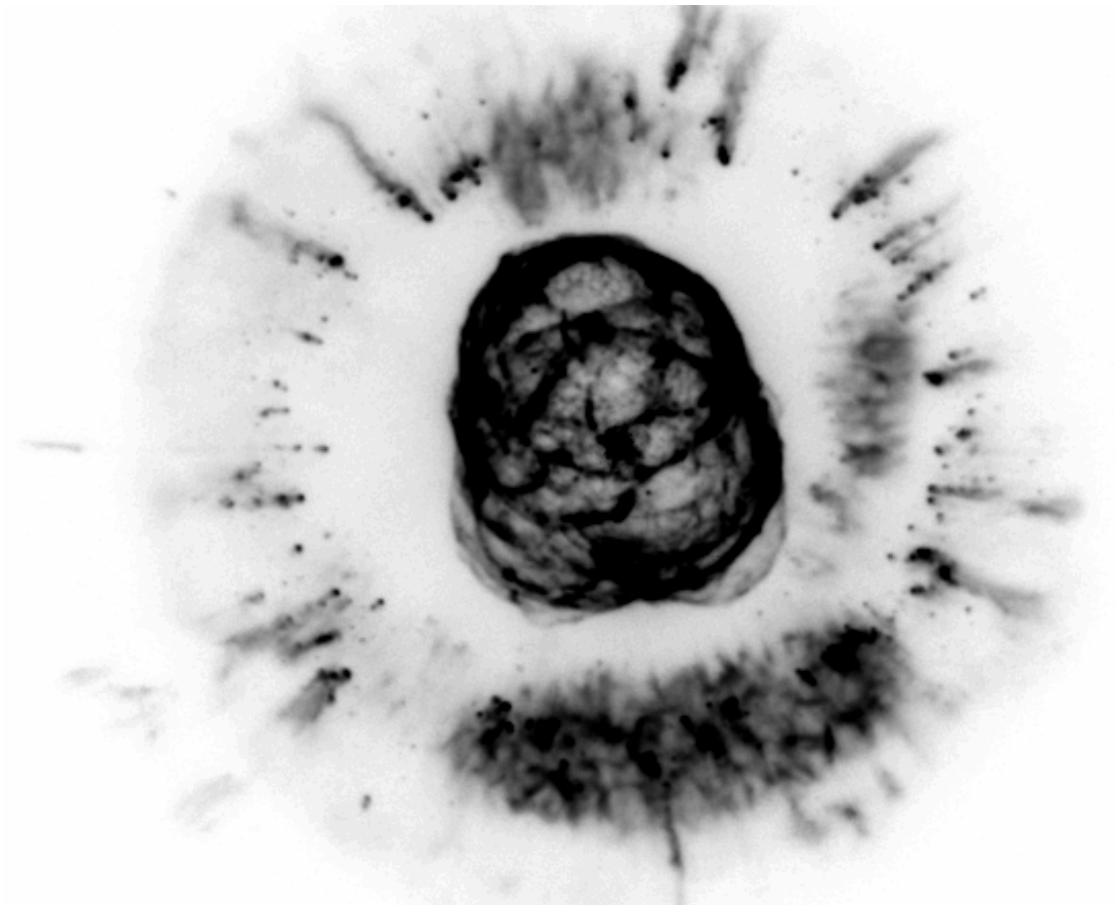
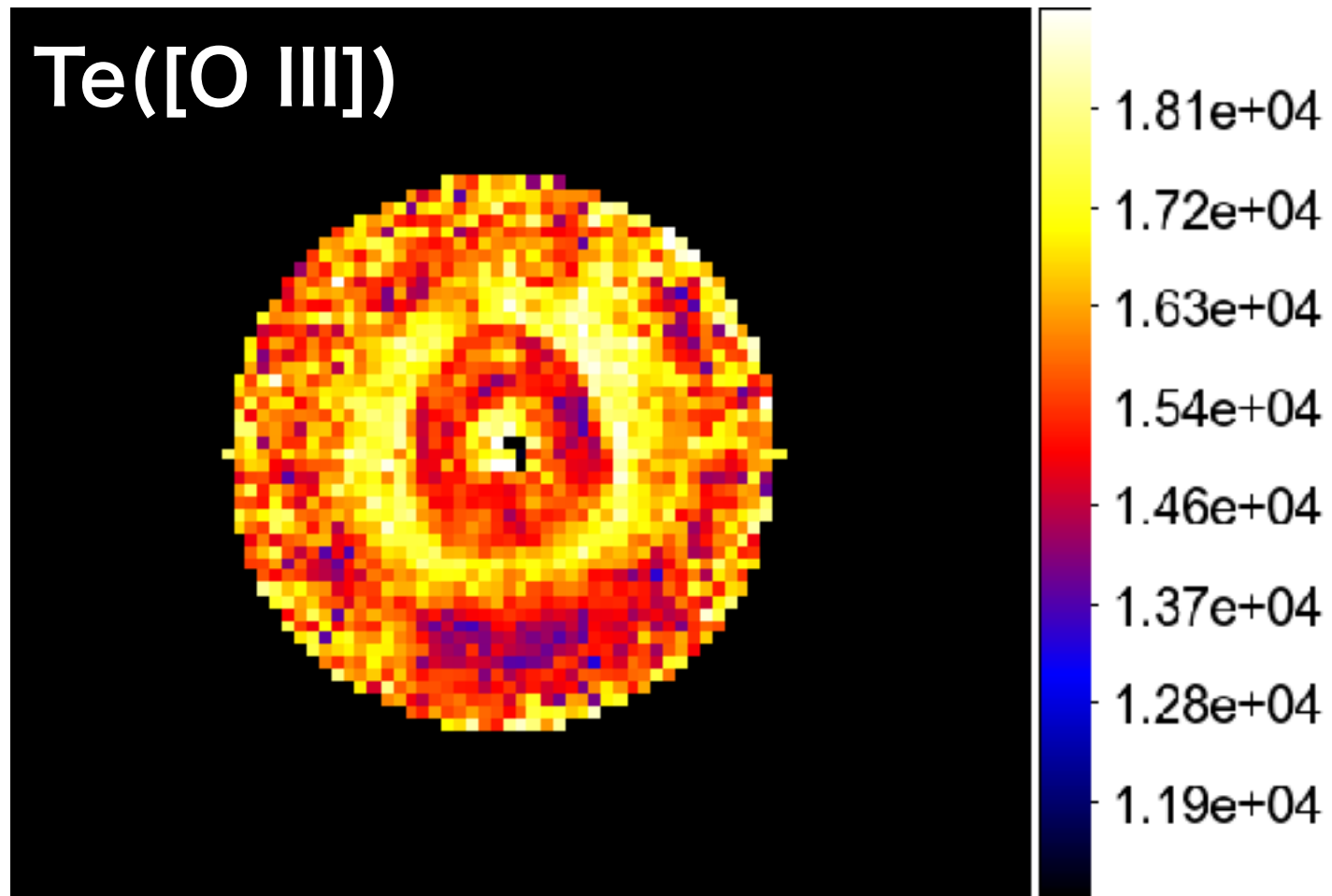


ne([S II])



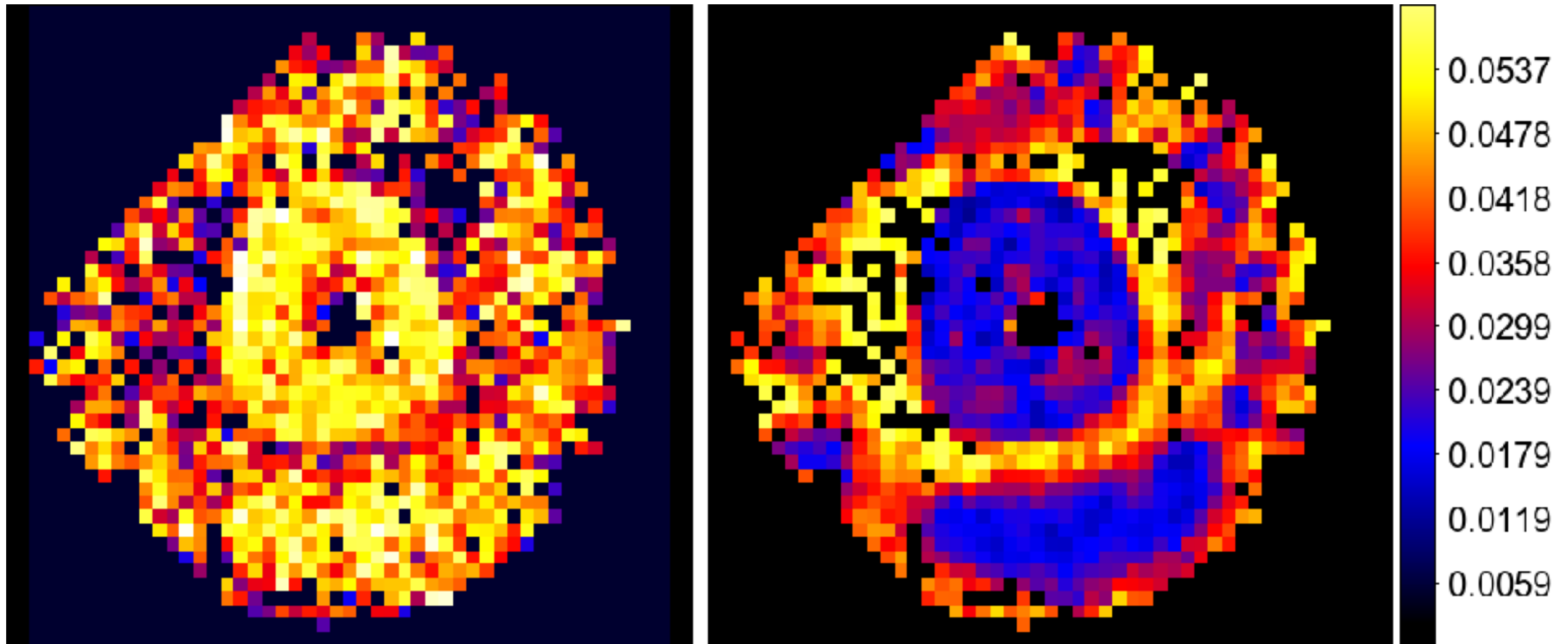
- X-ray shockedガス ($\sim 10^6$ K、 $n_e=30$ cc)とPNガスとのinteraction regions で $n_e > 2000-3000$ cc、中心星ウインドでガスがパイルアップされたため。
- Cometary knotsは周辺ガスに比べ密度に比べて高い。

Te([O III])



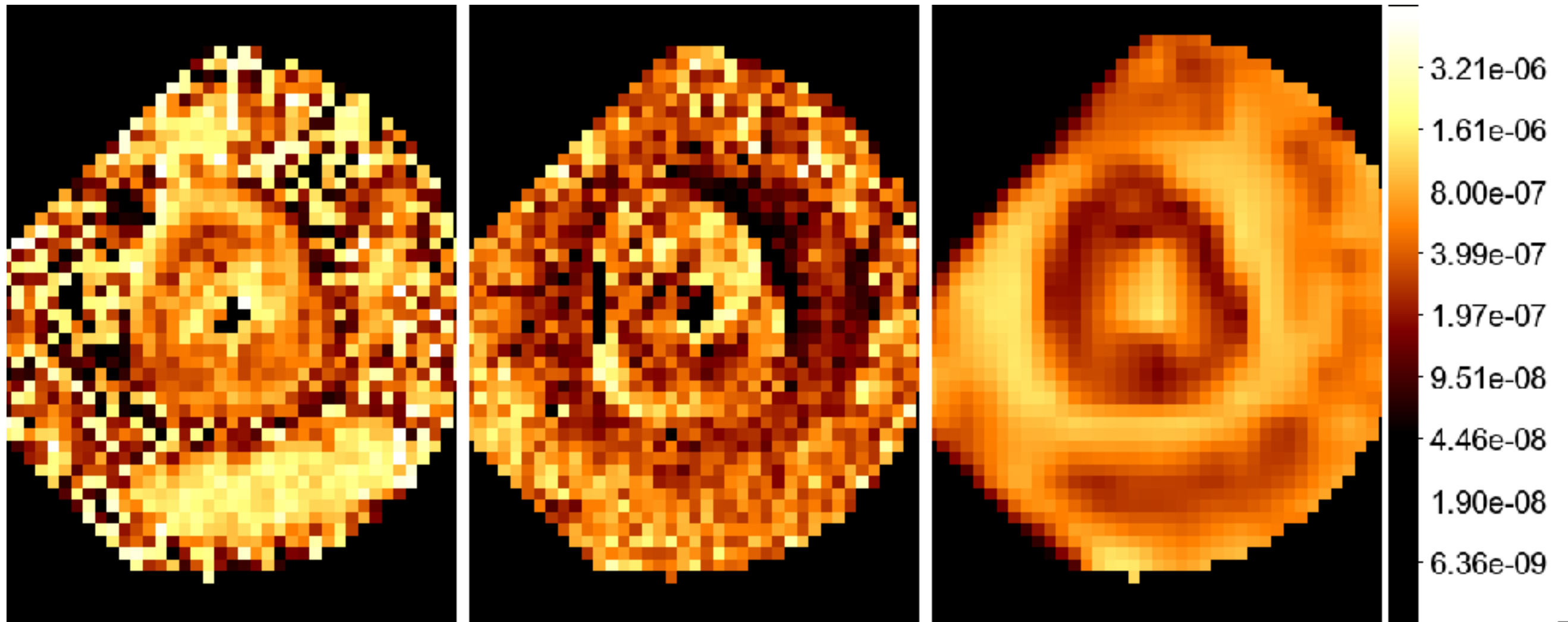
- X-ray shockedガス ($\sim 10^6$ K、 $n_e=30$ cc)とPNガスのinteraction regionsで $n_e=2000-5000$ cc & $T_e \sim 10000-15000$ K。ガスプレッシャー一定としたときに見積もられる T_e と大体あう。
- Cometary knotsは周囲のガスに比べ温度が低い。

He⁺, He²⁺



- He⁺: He I 4026, 4388, 4471, 4922, 5015, 5048, 5876, 6678, 7065, 7281 Å の平均。
- He²⁺: He II 4686 Å
- He ionic abundancesを計算するために、He I(7281 Å)/I(6678 Å)比マップ、Te(HeI)マップ、そしてline emissivityマップを得る。

S^+ , S^{2+} , S^{3+}



- S^+ : [S II] 4068, 4078, 6717, 6731 Å の平均。
- S^{2+} : [S III] 6312, 9069 Å の平均。
- S^{3+} : Spitzer [S IV] 10.51 μm
- S^+ , S^{2+} , S^{3+} マップを計算するために、 $\text{Te}([\text{S II}], [\text{S III}], [\text{O III}])$ マップと $\text{ne}([\text{S II}], [\text{O III}])$ マップを適用。各ピクセルで > 5 energy levels間でpopulationを計算し、line emissivityマップを得る。

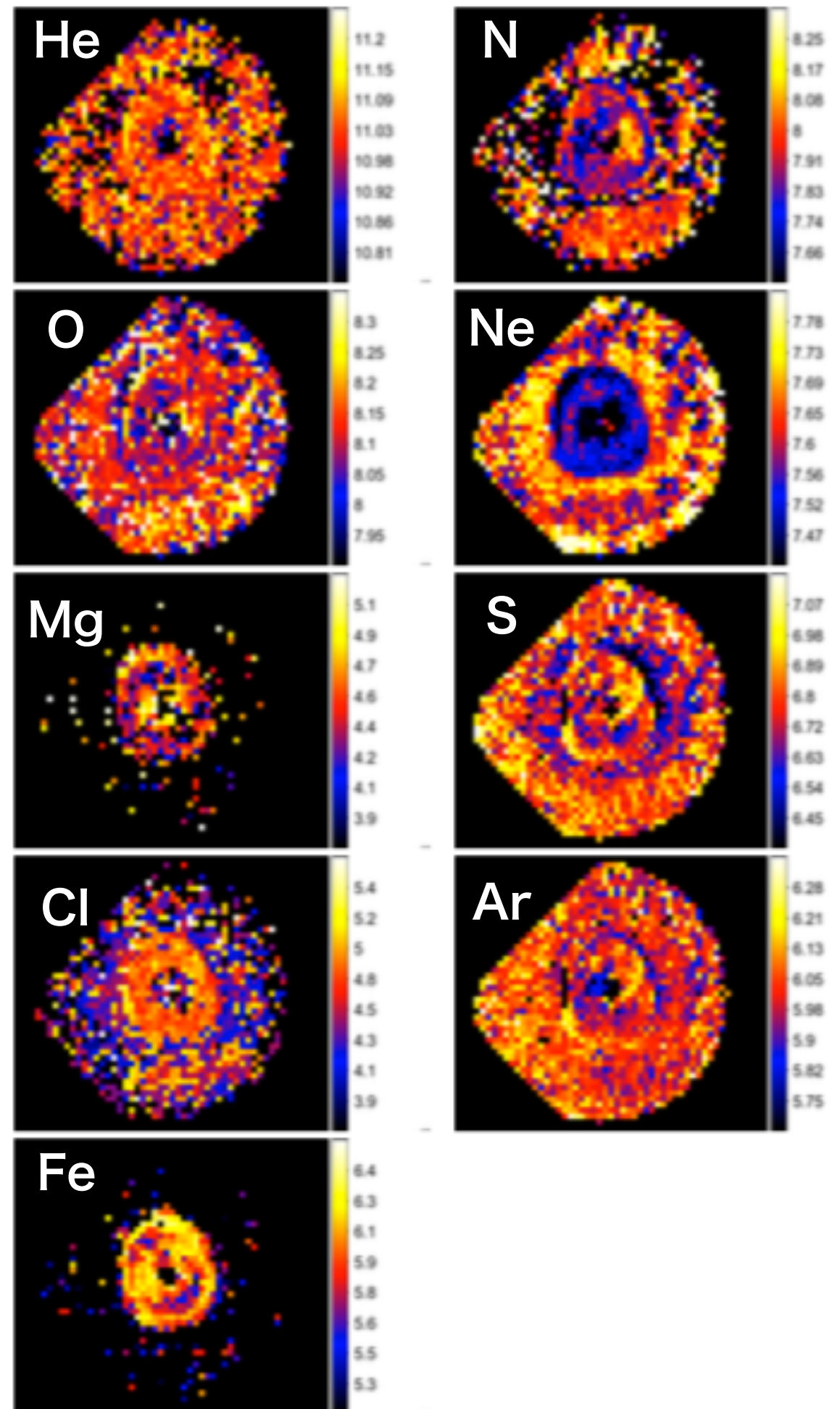
2-D ε (X) maps

$$n(X)/n(H) = \sum n(X^{i+})/n(H^+)$$

$$\varepsilon(X) = \log_{10} n(X)/n(H) + 12$$

X	$\langle \varepsilon(X) \rangle$	1- σ	Min-Max
He	11.02	0.08	10.64-11.23
N	7.95	0.18	7.40-8.52
O	8.13	0.10	7.79-8.46
Ne	7.63	0.10	7.35-7.88
Mg	4.49	0.38	3.27-5.30
S	6.78	0.15	6.19-7.21
Cl	4.59	0.37	3.65-5.68
Ar	6.03	0.11	5.51-6.40
Fe	5.87	0.36	4.76-6.46

元素組成の空間分布は一様ではない



[S II] Velocity channel maps

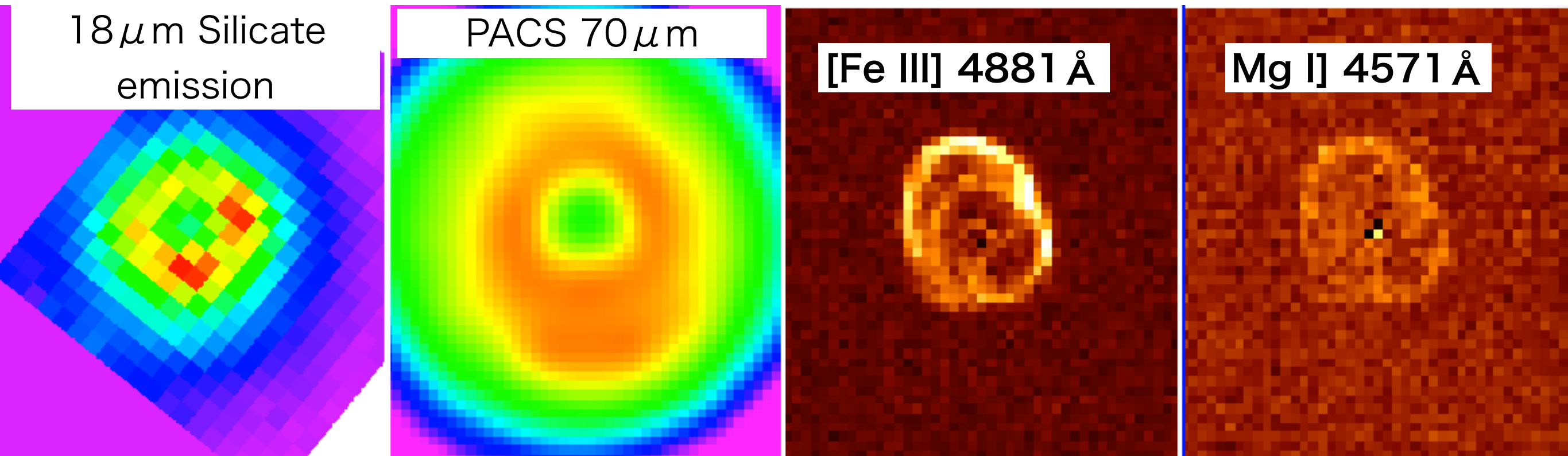
青側(-250km/s)

$V_{\text{sys}}=0$

赤側(+250km/s)

Velocity mapを使うことで、1) アバNdance非均一性とキネマティクスとの関係、2) 非等方性を含むマスロスレートの調査を行う。

Spitzer $18\mu\text{m}$ Silicate, PACS $70\mu\text{m}$, [Fe III], Mg I]



X-ray ショックによってシリケートグレインが破壊、Fe、Mg原子がリリースされているという解釈。
 $18\mu\text{m}$ のピークは粉碎されたサイズ小のシリケートか？ [Si II] $34\mu\text{m}$ も[FeIII]とMg I]と同じような空間分布。Mg、Fe、Siのマス比からシリケートグレイン組成比を推測、ダストマス見積りりの不定性を減らす。

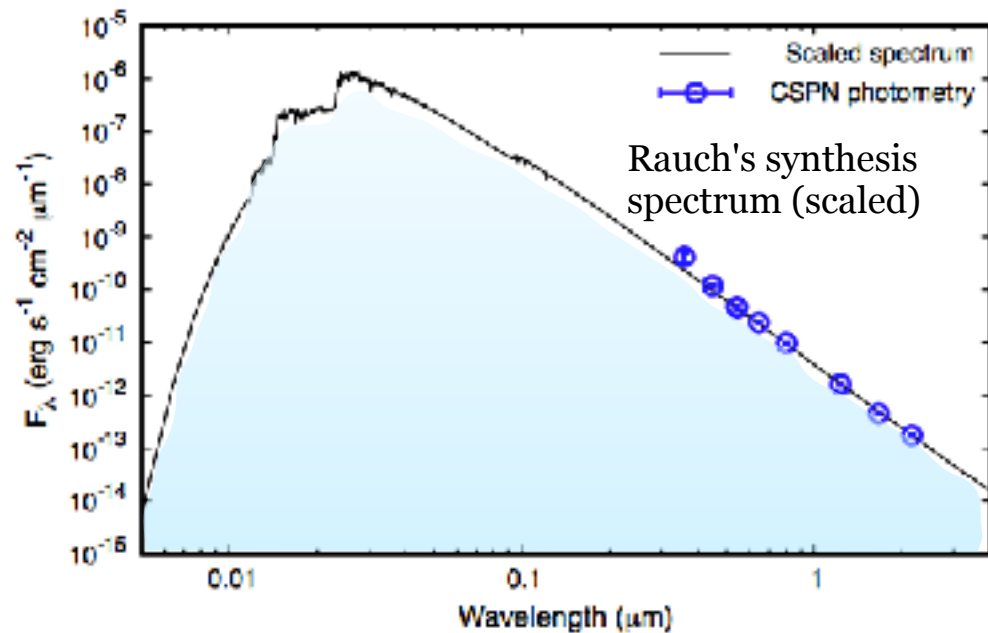
C-rich PNの場合は、ダストエミッションマップ（例えば、SiC $11\mu\text{m}$ 、 $16\text{-}24\mu\text{m}$ broad feature, $21\mu\text{m}$ emission, FeO, MgSなど）とC/Mg/Si/S/Feアバundanceマップとの比較から、カーボン系ダストグレイン組成比を推測する（たとえば、Otsuka 2015, MNRAS, 452, 4070）。

必要観測時間

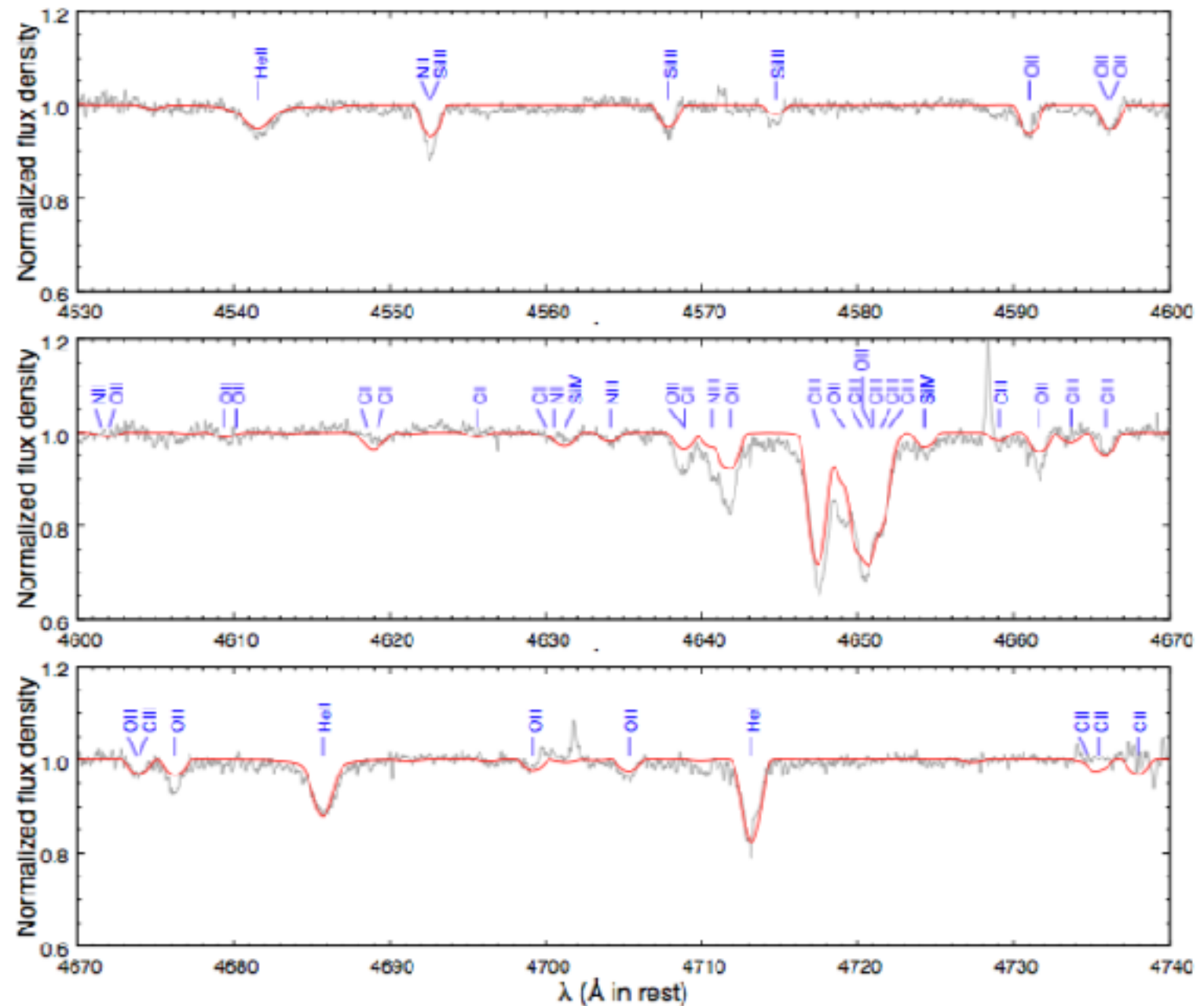
- 第一に $R > 30''$ のPNをサンプルする。heliocentric distance ~ 1.7 kpc以内にあるもので airmass < 2 なPN。Ionized gas regionsと PDRsをカバー。
- 次に、5 GHz Flux densityからextinction free $H\beta$ surface brightnessを計算、 $F(H\beta) > 2E-14$ erg/s/cm²/arcsec²であるPN33天体を選んだ。
- KOOLS-IFU grism No.2とVPH495を選択。
 $H\beta$ surface brightnessの $\sim 1/100$ のライン(例えば、[Fe III] 4881 Å)も SNR > 3 で検出し、ネビュラ全体をカバーするには、No.2 とVPH495で
(2700 sec x 6 pointings x 2+ overhead) x 2 set ~ 18 hours per a PN。

Backup

Stellar absorption analysis

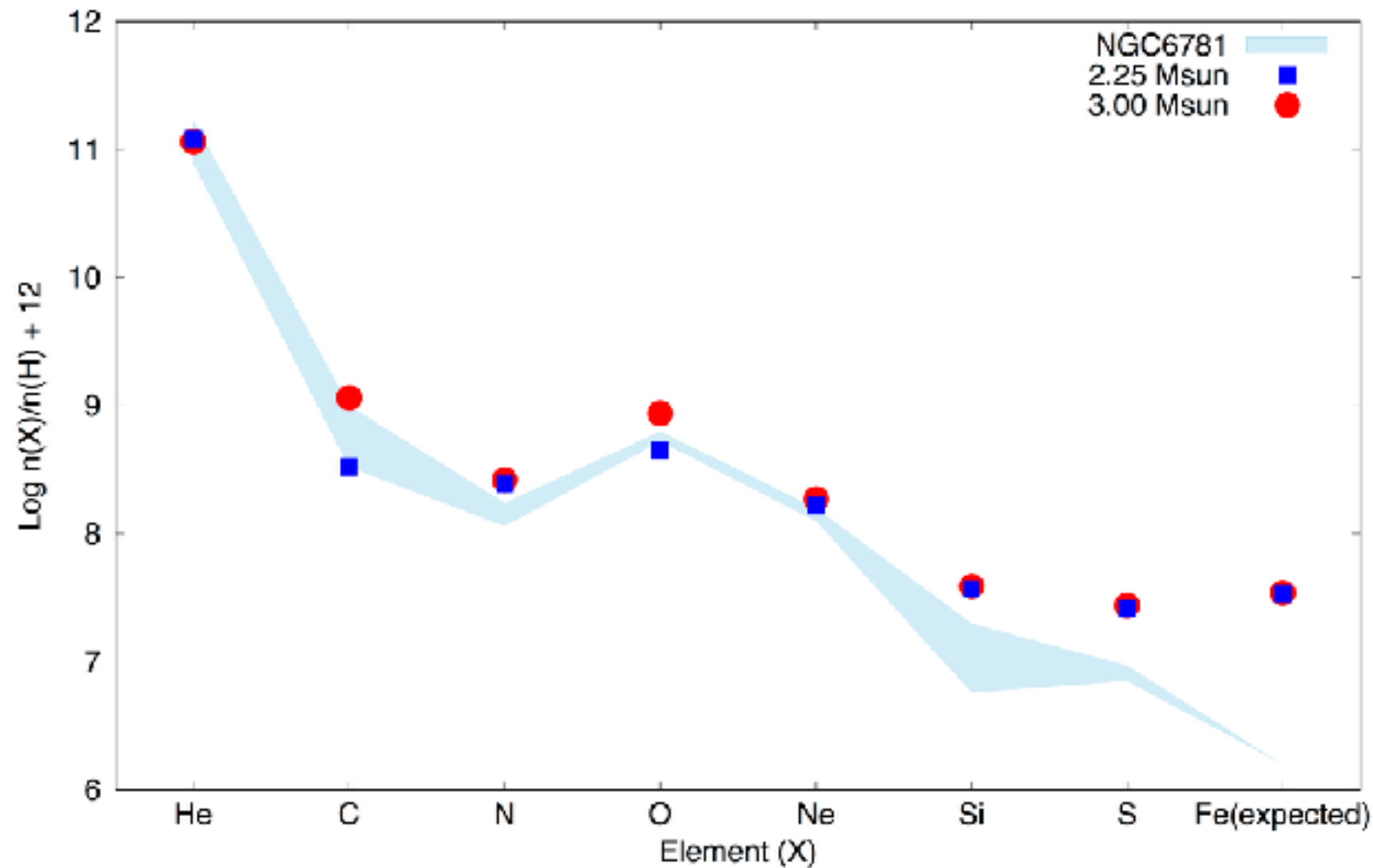


- PNはoptically thinなので、nebulaと中心星の物理状態を同時に診断できる。
- 中心星の吸収線解析をすることで、光球化学組成、有効温度(T_{eff})、重力加速度がえられる。
- 中心星を再現する合成スペクトルを波長全域で積分することで輝度(L)をえる。
- T_{eff} と L をHR-diagramにプロットすることで、初期質量をみつめることができる。



HDS study of PN SaSt2-3
Otsuka 2017, submitted to MNRAS

Elemental abundances



PNの化学組成は、「親星が形成された時のISM化学組成」と「中心星の核融合によって合成された化学組成」を反映