

# XMM-Newtonによる SNRのX線スペクトル解析

那須 悠太  
御堂岡 拓哉

# 大まかな発表の流れ

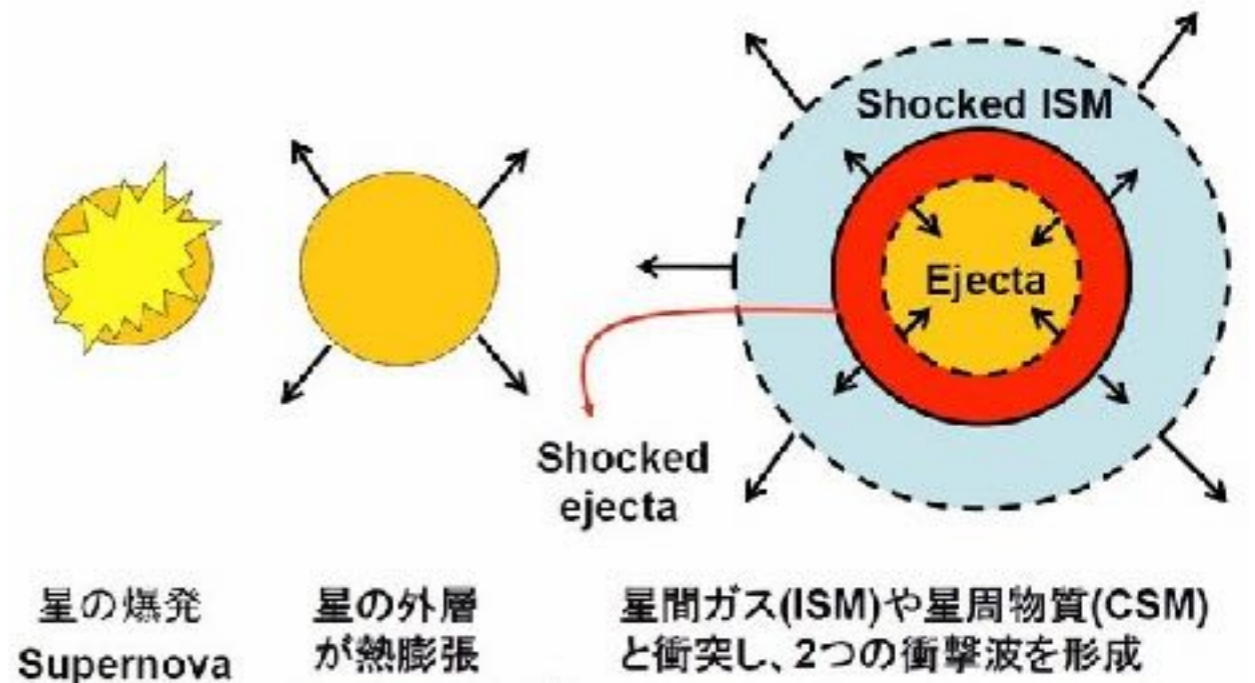
- 研究の背景
- 超新星残骸(SNR)について
- XMM-Newtonについて
- SNR 0534-69.9の解析(御堂岡)
- SNR N49の解析(那須)

# 研究の背景

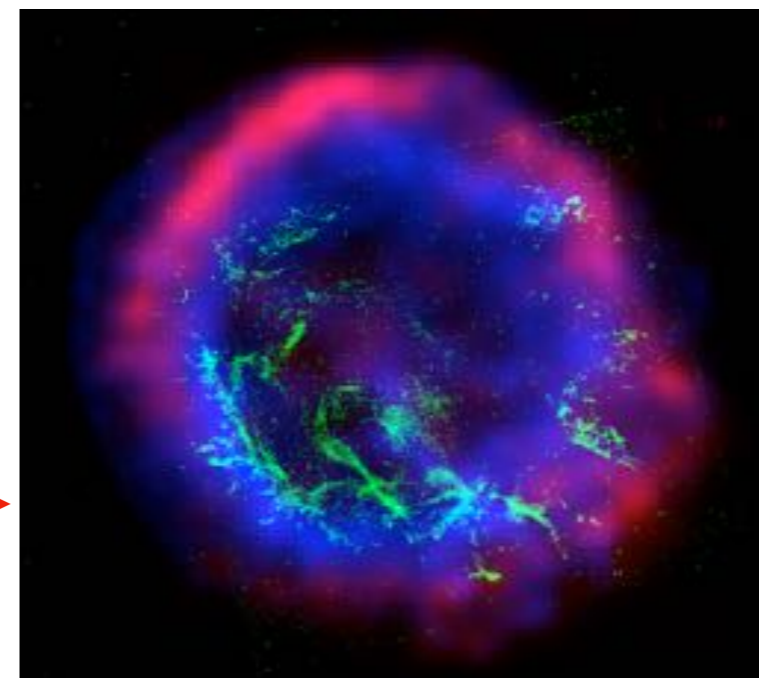
- 超新星の**重元素合成** ← 銀河の化学進化の観点から重要
- 超新星のメカニズムには**未知の部分が多い**  
→ 超新星残骸を調べる
- 解析対象 (N49、0534-69.9) は大マゼラン雲 (LMC) の天体  
→ 観測に適する
  - ・ 距離が既知 (50 kpc)
  - ・ 星間吸収が少ない
- **波長分解能の高いRGS** (XMM-Newton) を用いる  
→ より精密な検証が可能に

# 超新星残骸(SNR)

- SNR(Supernova Remnant)は大質量の恒星が超新星爆発をした後に残る天体
- 恒星からの噴出物(ejecta)と星間物質(Interstellar Medium : ISM)から構成されている (右図参照)
- ejectaとISMは爆発の衝撃により加熱され数千万度から数億度に達する高温プラズマとなる
- これらはその後、数万年の間、可視光、電波、X線等で輝く



[http://blogimg.goo.ne.jp/user\\_image/38/21/0765028c175a23df08bbc6b96aa2da0c.jpg](http://blogimg.goo.ne.jp/user_image/38/21/0765028c175a23df08bbc6b96aa2da0c.jpg)



red : radio  
green : optical  
blue : X-ray

# 超新星爆発の分類(1) ~Ia型SN~

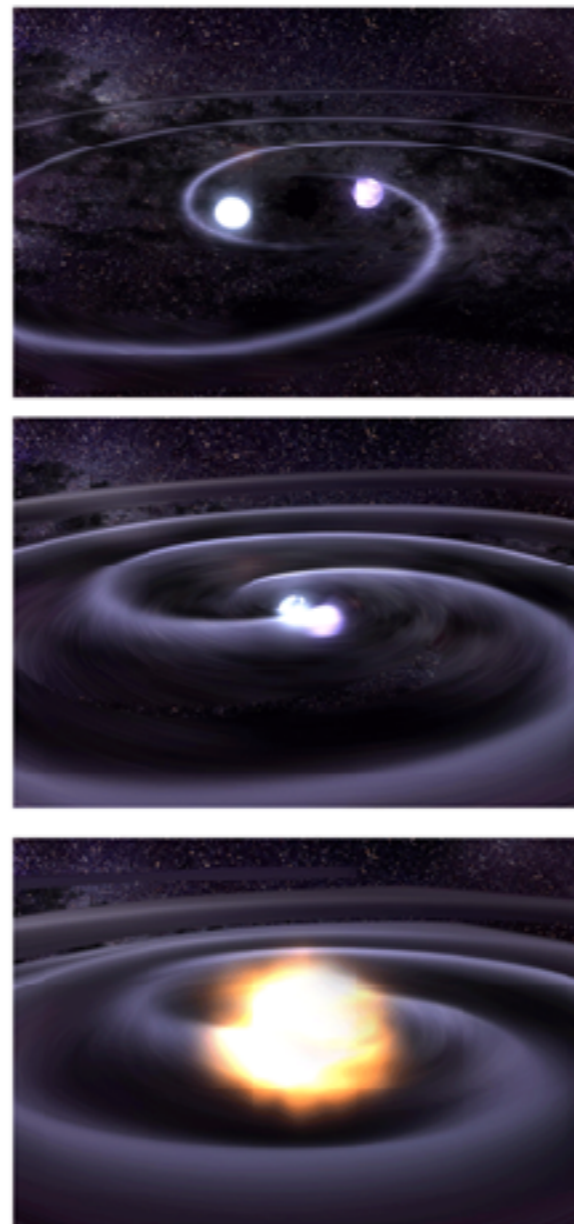
## 考えられているメカニズム

- ① 連星系を成す白色矮星同士が合体して起こる
- ② 連星系を成す白色矮星に相手の恒星からガスが降り積もりチャンドラセカール限界を越えた結果、熱核融合の暴走により起こる

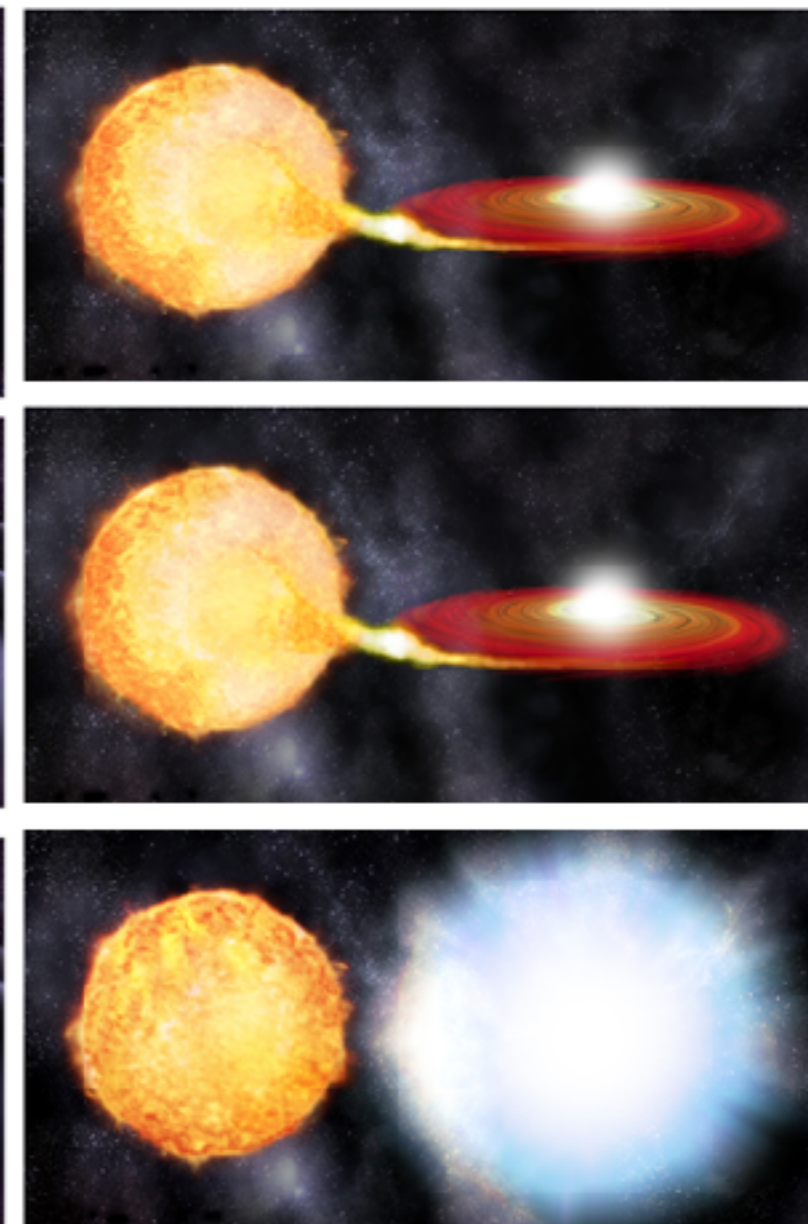
## 特徴

- 大体的場合、ピーク時の絶対等級はほぼ一定となる（天体までの距離がほぼ正確にわかるため標準光源として用いられる）
- 爆発後に鉄を多く含む

説①



説②



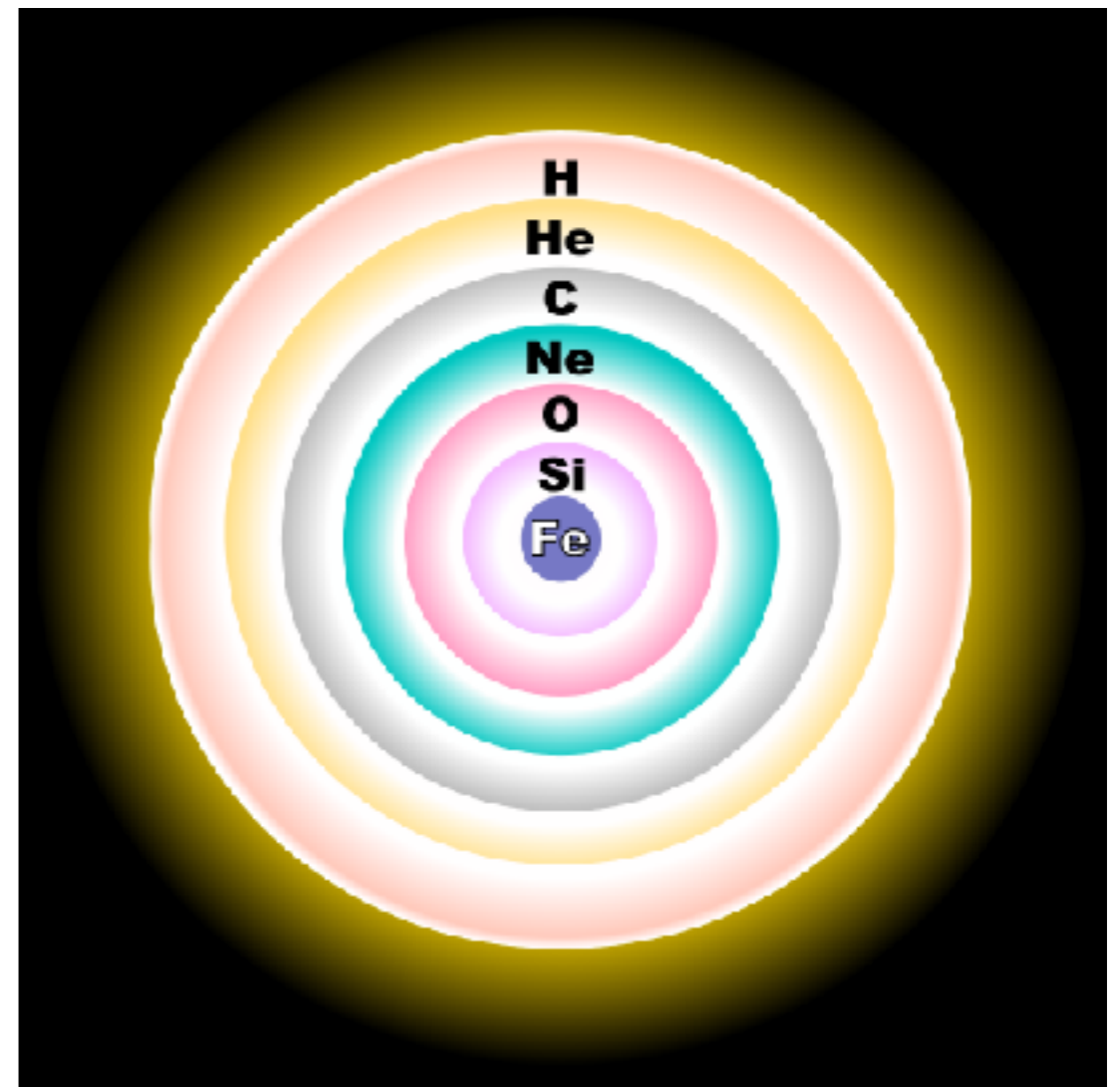
# 超新星爆発の分類(2) ~CC型SN~

## 考えられているメカニズム

1. 太陽の数倍から数十倍の質量を持つ恒星がHやHeから始まる核融合を繰り返すことによって、中心にFeを生成する
2. Feコアが光分解して重力崩壊(Core Collapse : CC)を起こし、その反動で衝撃波が発生し爆発が起こる
3. 中心に生成された $^{56}\text{Ni}$ は放射性崩壊するが、この時のエネルギーにより超新星として輝く

## 特徴

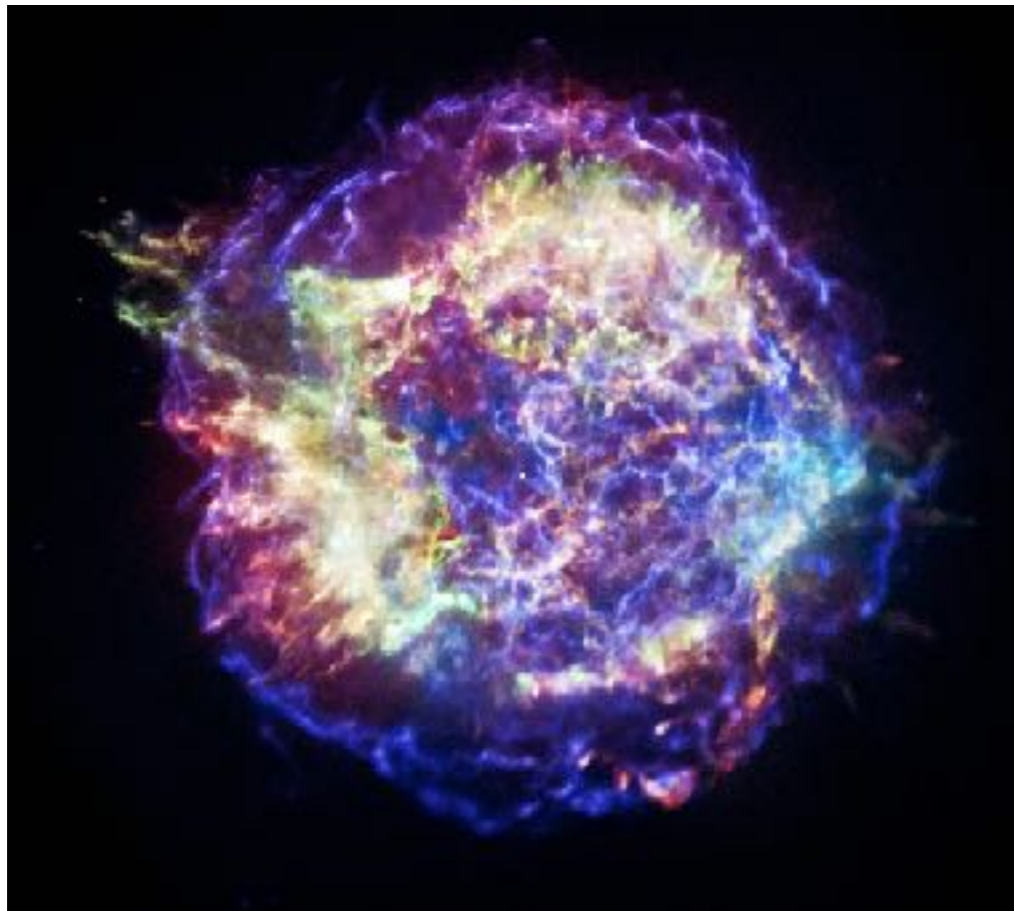
- 主に銀河の渦状腕やHII領域で見られるが、楕円銀河では見られない
- 中心に中性子星やブラックホールを残す



上図：大質量で核崩壊直前の進化の終わった恒星のタマネギのような層構造

# SNRの分類

## Shell-like SNR



**Cassiopeia A**

NASA/CXC/SAO

- 超新星残骸全体の7割を占める
- 衝撃波で圧縮された物質がシェル構造を形成する
- 電波、X線共にシェル状で明るい

## Mixed-Morphology SNR



**W49B**

<http://chandra.harvard.edu/photo/2013/w49b/>

red : radio  
green : optical  
blue : X-ray

- 電波でシェル状に明るい、X線で中心集中した構造を持つ
- 中心集中したX線は熱的な放射である

# XMM-Newton

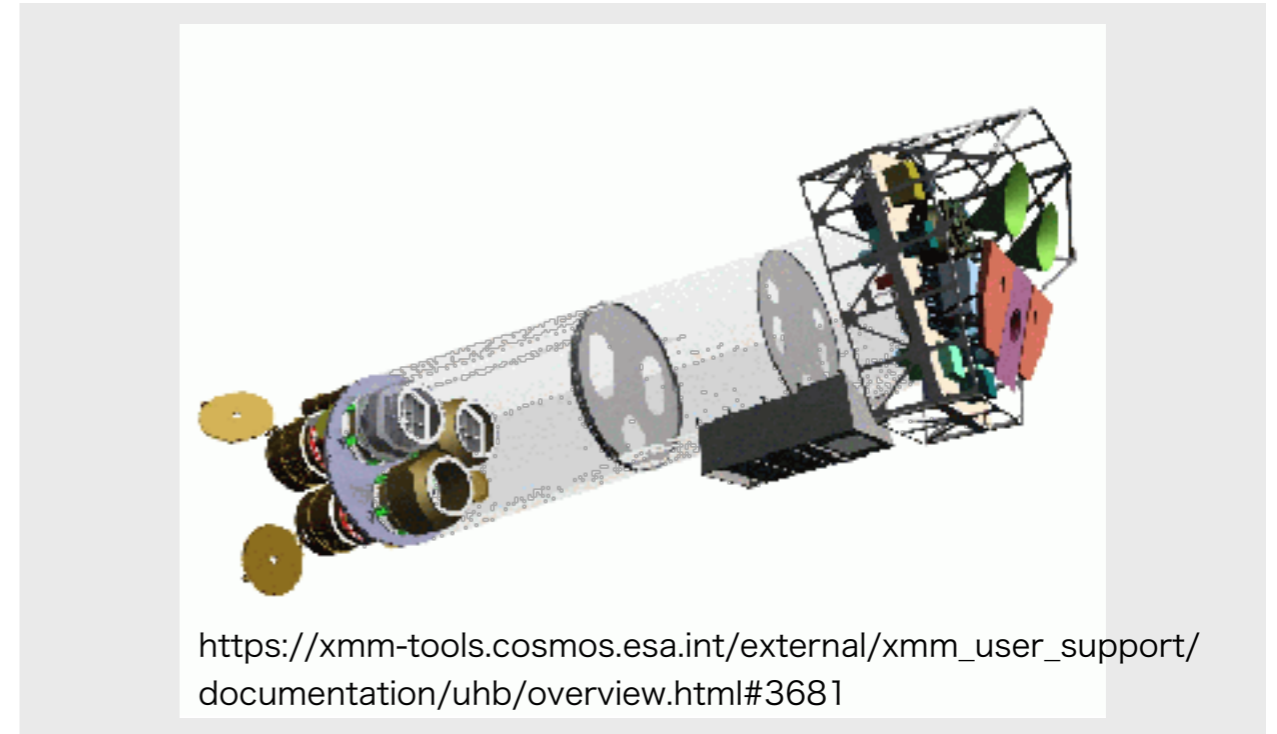
## 概要・特徴

- ・ 欧州宇宙機関 (ESA) の X線観測衛星 (1999年～現在)
- ・ 現在のX線観測衛星の中で **望遠鏡の有効面積が最大**  
→ 暗い天体の観測が得意  
※バックグラウンドが多いために 広がった天体は苦手
- ・ **軟X線領域における 高いエネルギー分解能**

## 観測機器

- ・ EPIC (MOS, PN) : X線
- ・ RGS : X線
- ・ OM : 可視光・紫外線

今回の解析で使用



X線観測衛星	XMM-Newton	Chandra	Suzaku
有効面積 [cm] (1keV)	1500×3台	800×1台	450×5台
エネルギー分解能 [eV] (1 keV)	3 (RGS)	60 (ACIS)	6 (XRS)
エネルギー分解能 [eV] (7 keV)	150 (EPIC)	150 (ACIS)	6 (XRS)



# EPIC · RGS

## MOS (MOS1, MOS2)

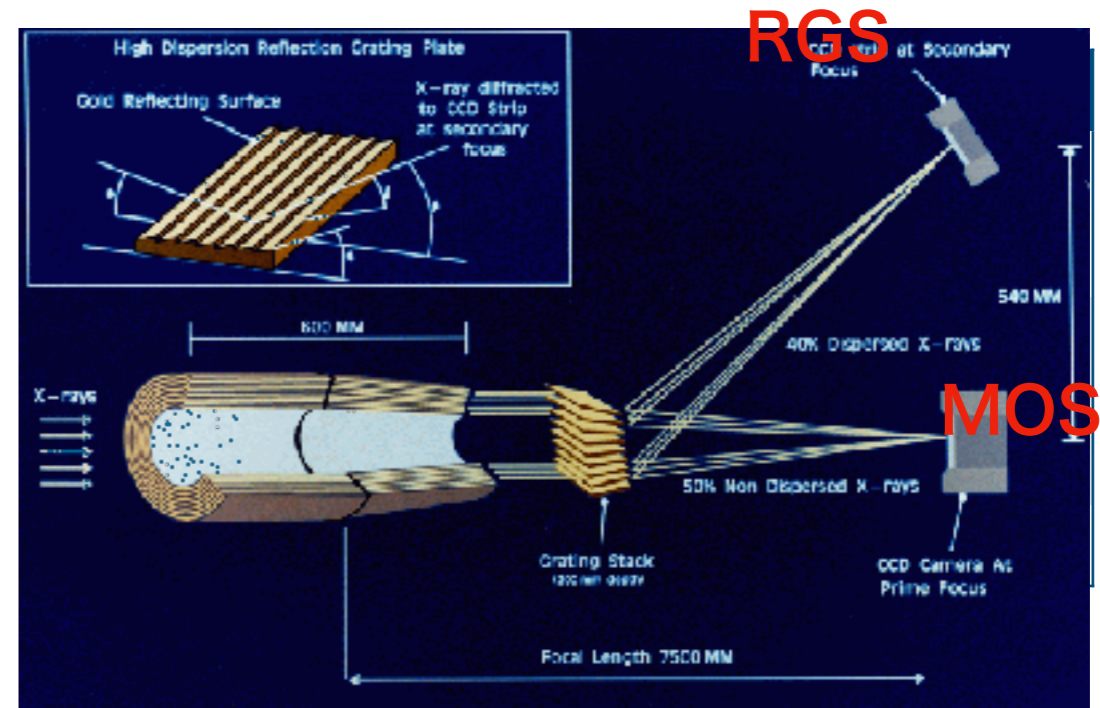
- 0.15 - 12 keV
- 低エネルギーで検出効率が低い

## PN

- 0.15 - 12 keV
- 低エネルギーで検出効率が高い
- エネルギー分解能が低い
- 高い時間分解能

## RGS (RGS1, RGS2)

- 0.35 - 2.5 keV
- 回折格子によるX線分光
- **高いエネルギー分解能**
- 点源に適する



[https://xmm-tools.cosmos.esa.int/external/xmm\\_user\\_support/documentation/uhb/xraytel.html](https://xmm-tools.cosmos.esa.int/external/xmm_user_support/documentation/uhb/xraytel.html)

## X線経路

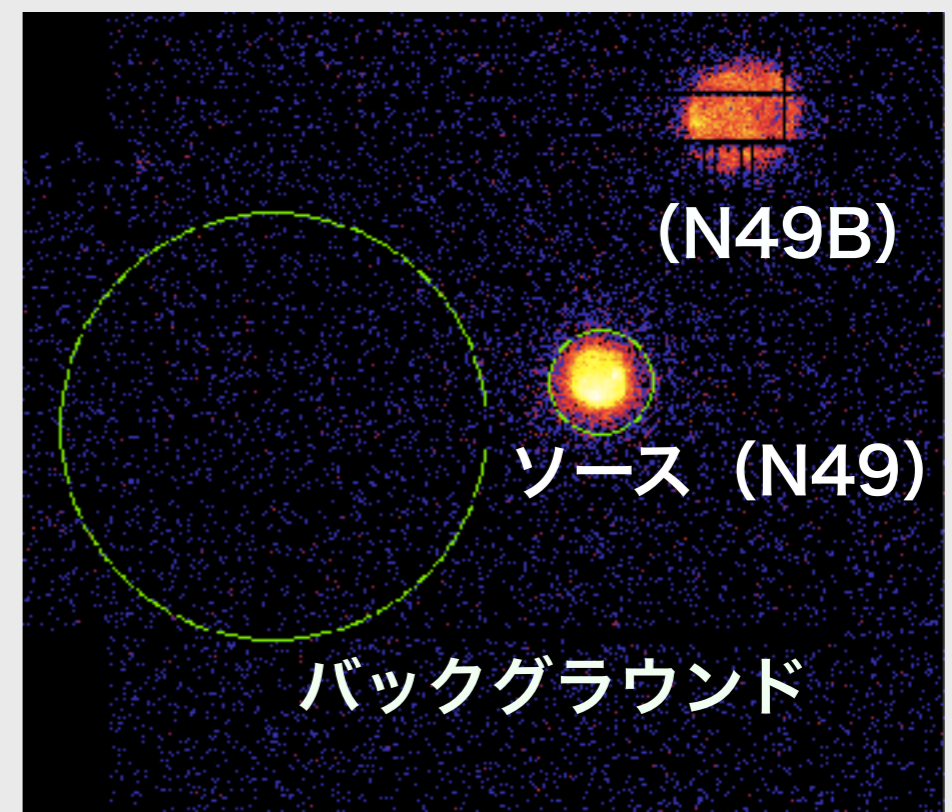
EPIC：反射鏡→CCD

RGS：反射鏡→回折格子→CCD

# 解析の流れ

- ①RGS1・2の1次光のデータ、  
RGS1・2の2次光のデータを  
それぞれ統合
- ②EPIC (MOS1, MOS2, PN)
  - ・ソース・バックグラウンド領域を抽出
  - ・ソースからバックグラウンドを引いたスペクトルを作る
- ③スペクトルを適切なモデルでフィッティング：  
単純なモデル→より複雑なモデル

N49 (MOS1) のイメージ



# パラメータ

フィッティングに用いたパラメータ

●  $N_H$  : Hの柱密度 [ $\text{cm}^{-2}$ ]

●  $kT_e$  : 電子温度 [keV]

●  $n_e T$  : ionization parameter [ $\text{s} \cdot \text{cm}^{-3}$ ]

(電子密度×爆発後の経過時間)

→電離状態を表す

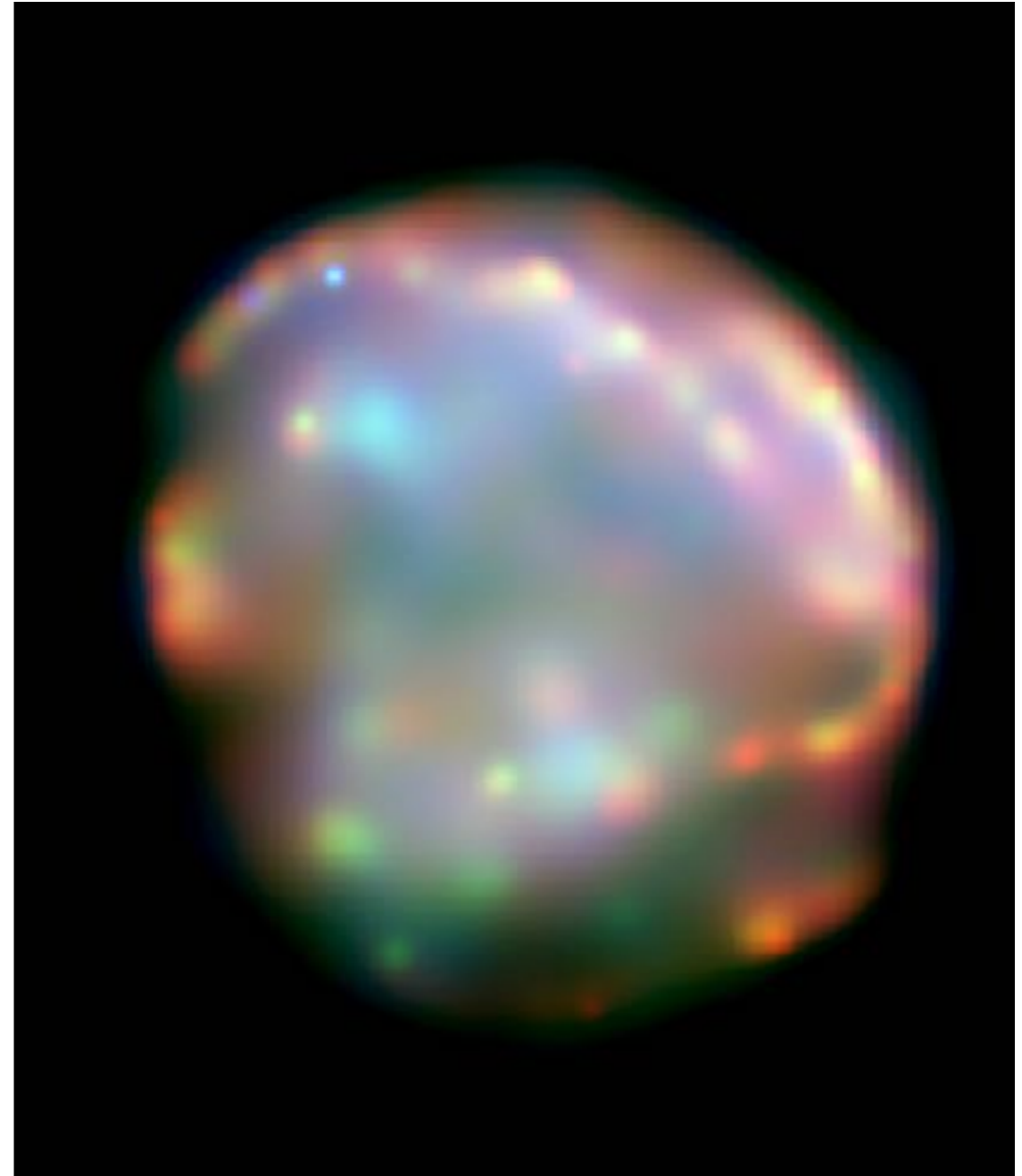
● 元素Zの組成比 (abundance) =  $\frac{\overbrace{(n(Z)/n(H))}^{\text{個数比}}}_{(n(Z)/n(H))_{\odot}} SNR$

# 0534-69.9の解析 (御堂岡)

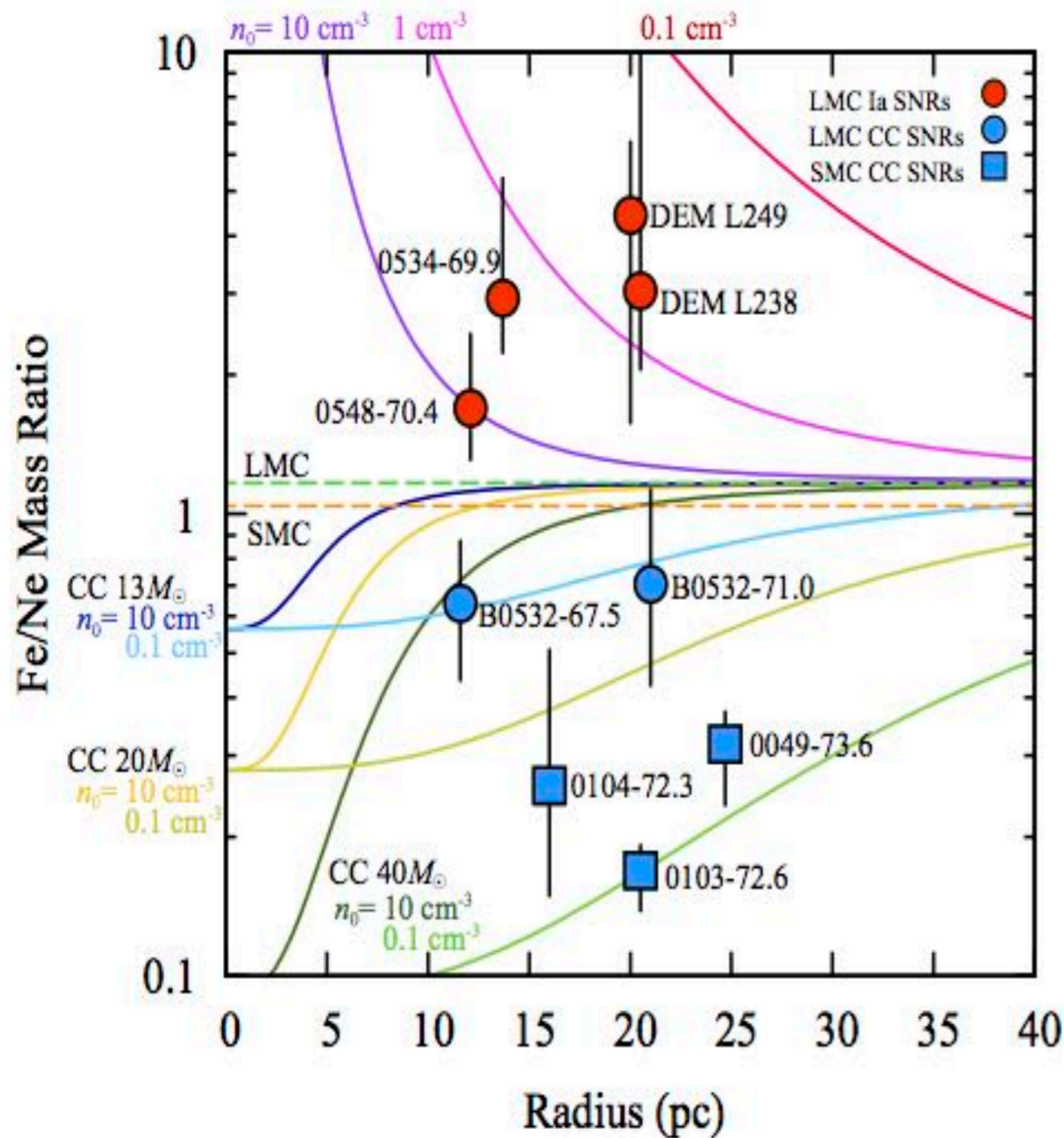
# 0534-69.9の概要

- 距離：50kpc(LMC)
- 年齢： $\sim 1.0 \times 10^4$  yr
- SN：Ia型（推定）
- シェル型
- 半径：2.0-2.4分角

(Hendrick et al. 2003,  
Takeuchi et al. 2016)



# 先行研究①



(Takeuchi et al. 2016)によると、中年齢以上(>5000yr)のSNRの生成源である超新星爆発のタイプ判別は以下の”Fe/Ne mass ratio”を用いて行うことができる

Fe/Ne mass ratioは(Anders E. et al. 1989)での太陽組成比を用いると

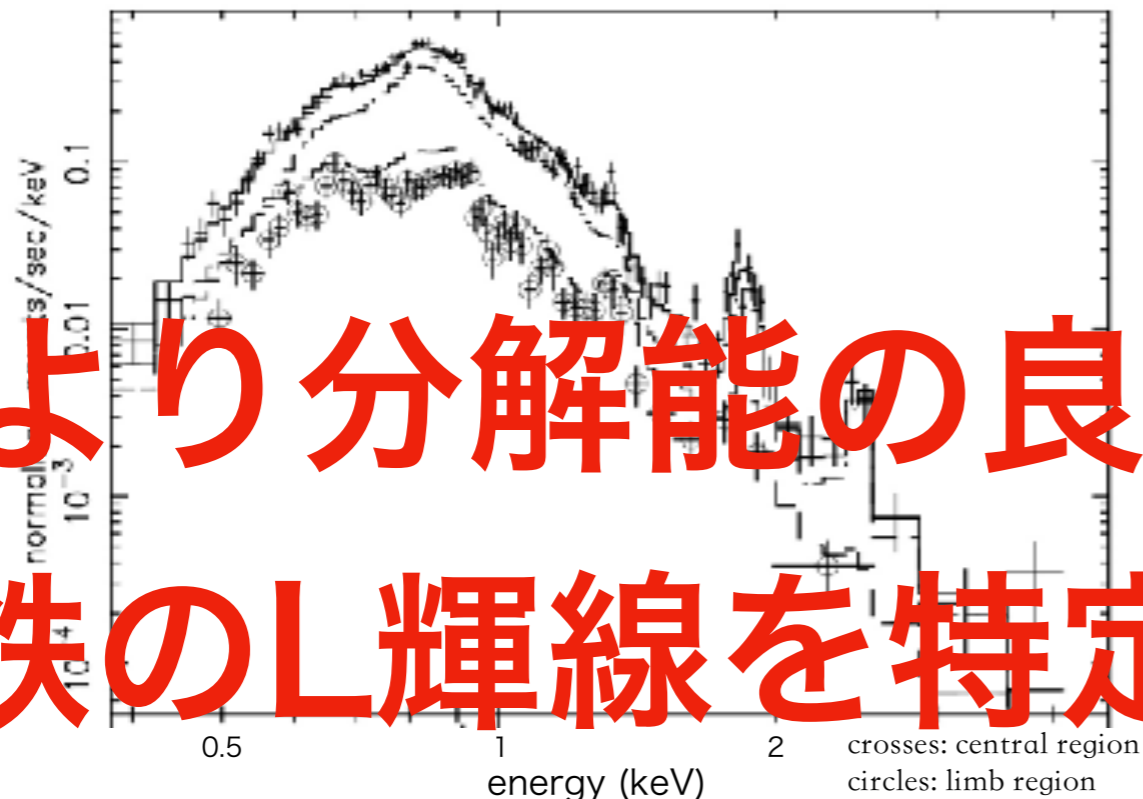
$$7.36 \times (n_{\text{Ne}}/n_{\text{Fe}})_{\text{ejecta}}$$

→NeとFeのabundanceがわかれば左図に当てはめ、Ia型かCC型か判断することができる

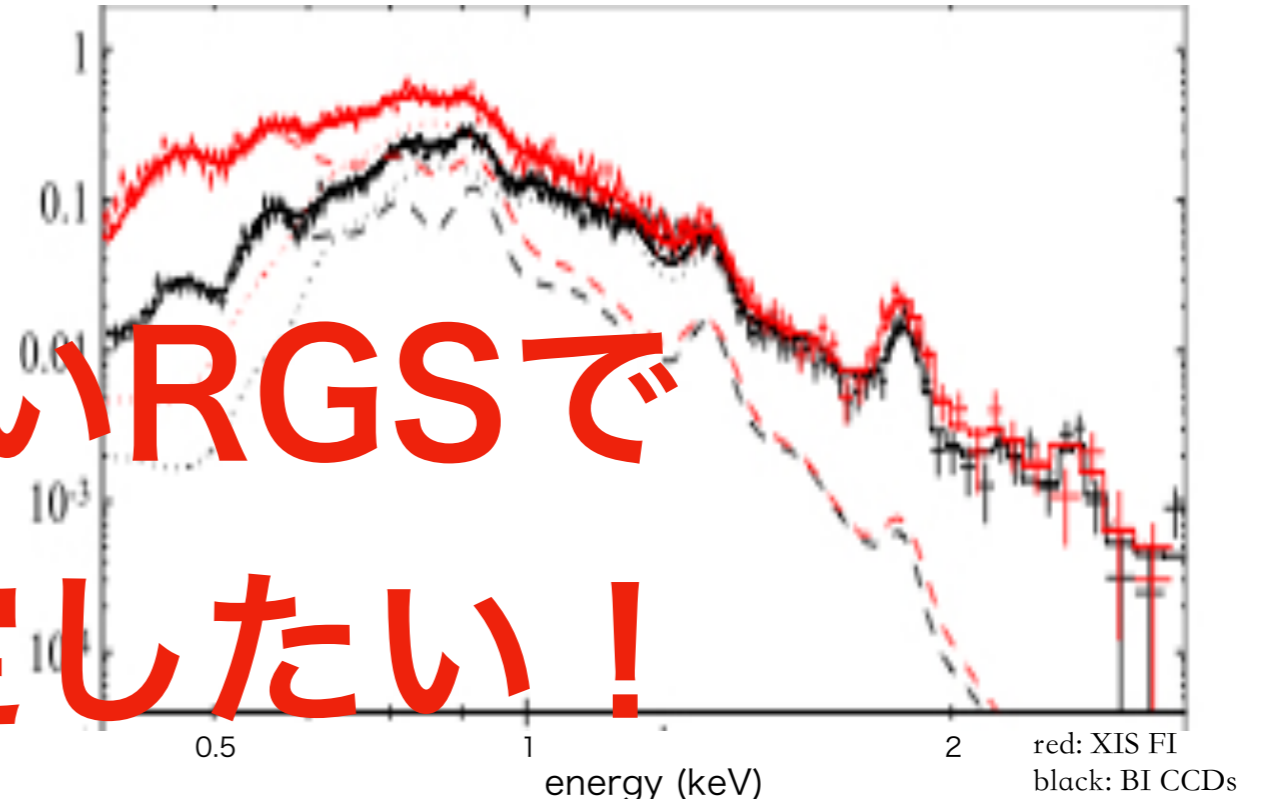
# 先行研究②

- 先行研究 (Hendrick et al. 2003 , Takeuchi et al. 2016) によりわかっていること
  - 0534-69.9の年齢、半径
  - 日本のX線天文衛星Suzakuを用いて特定した温度とabundance
  - 残骸の発生源となったSNの種類をX線スペクトルから判別する手法

Chandraでのスペクトル(Hendrick et al. 2003)

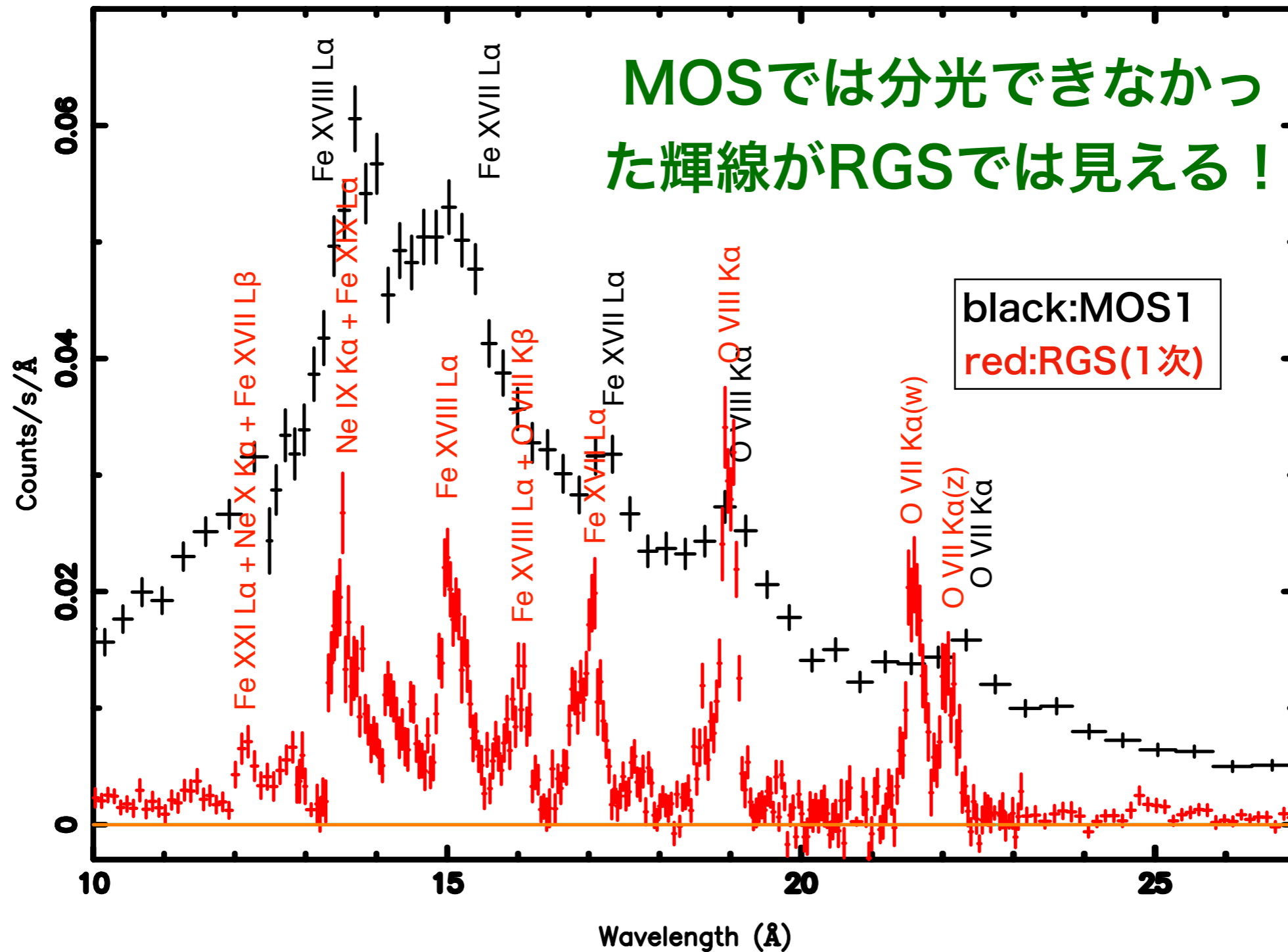


Suzakuでのスペクトル(Takeuchi et al. 2016)



より分解能の良いRGSで鉄のL輝線を特定したい！

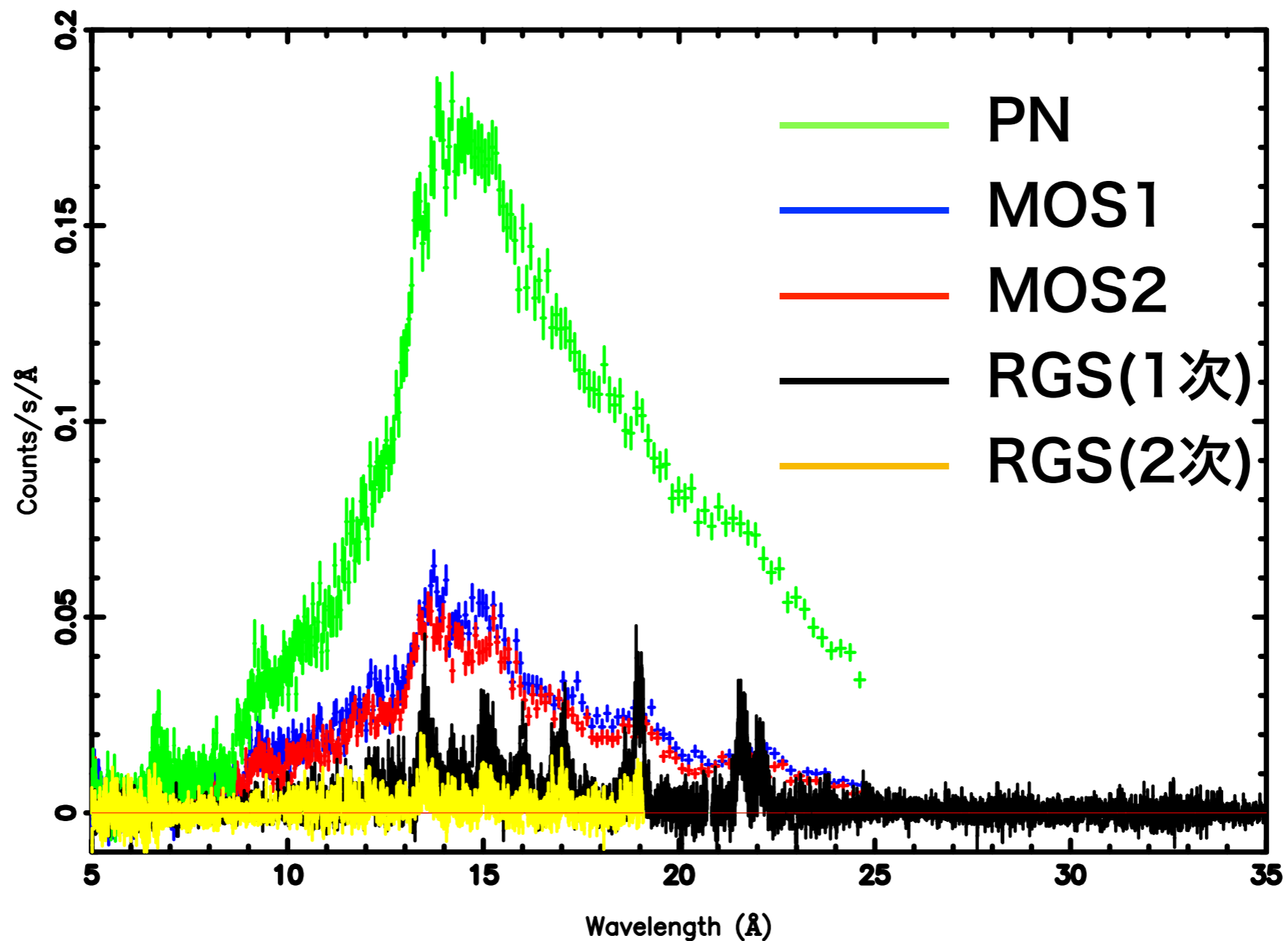
# RGSの波長分解能





# spectra

今回の解析には5種類の観測器を使った



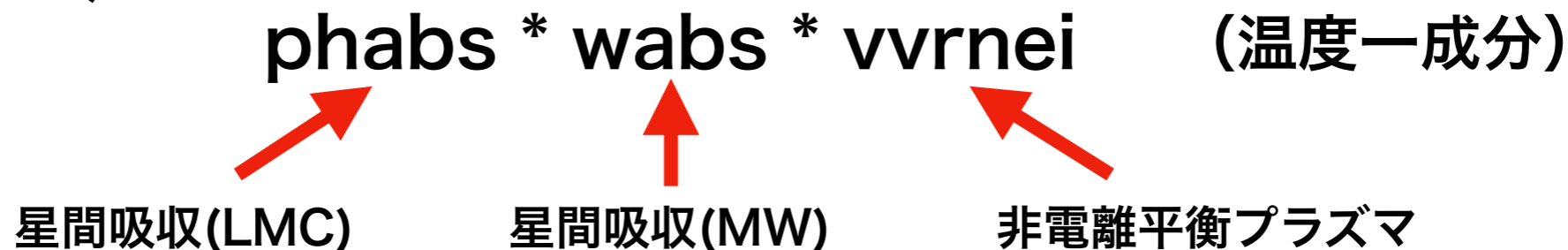
# スペクトル解析手順

1. NASAのスペクトル解析ソフトXSPECを用いてfitting  
(解析が比較的簡単で計算が早いいため)
2. XSPECで定めたパラメータを参考にオランダ宇宙研究所  
(SRON) のスペクトル解析ソフトSPEXを用いてfitting

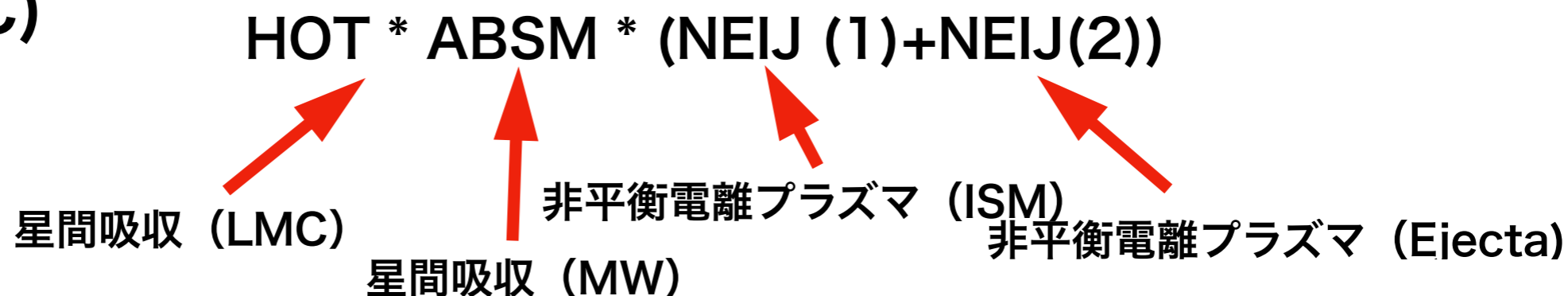
➡SPEXはRGSのデータ解析を想定して  
作られたソフトのため、RGS特有の  
コマンドを活用してfittingができる

# 用いたモデル

## ①XSPEC(EPIC)



## SPEX(EPIC)



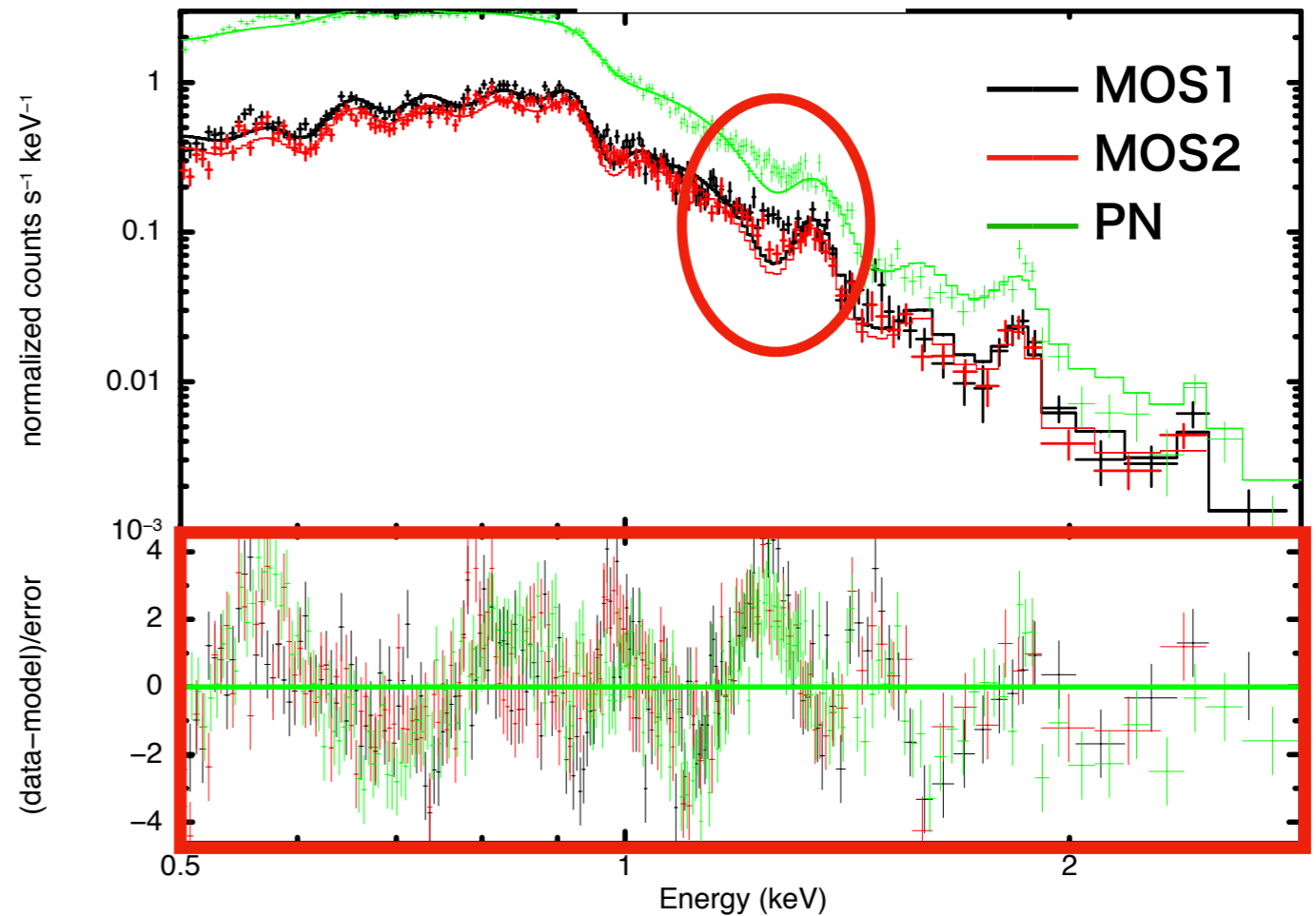
## ②SPEX(RGS)



# 温度一成分でのfitting結果

	結果
kt(high)[keV]	$0.82 \pm 2.8E-2$
N(=O)	$0.29 \pm 2.0E-2$
Ne	$0.89 \pm 5.6E-2$
Mg	$0.57 \pm 4.6E-2$
Si	$0.54 \pm 5.8E-2$
S	$2.3 \pm 0.38$
Fe(=Ni)	$0.66 \pm 4.6E-2$
$\tau$ [s/cm <sup>3</sup> ]	$1.7E+10 \pm 9.3E+08$
$\chi^2/\text{dof}$	1479/542(=2.73)

## XSPECでのEPICのfitting結果

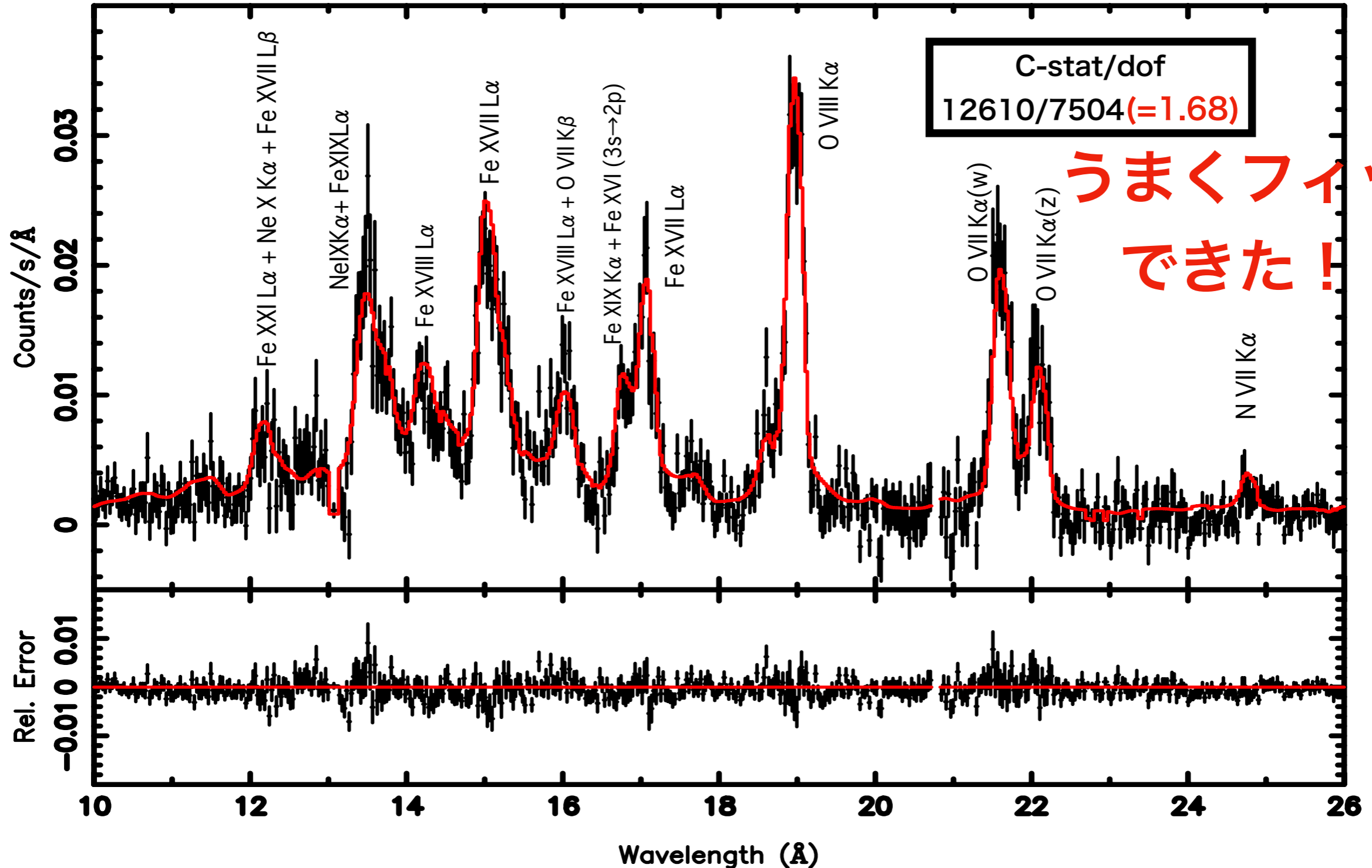


➡一成分ではうまくフィットしない  
(特に1.2keV付近)

➡二成分にする&分解能の良いRGSを用いる

# 二成分でのfitting結果

## SPEXでのRGSのfitting結果

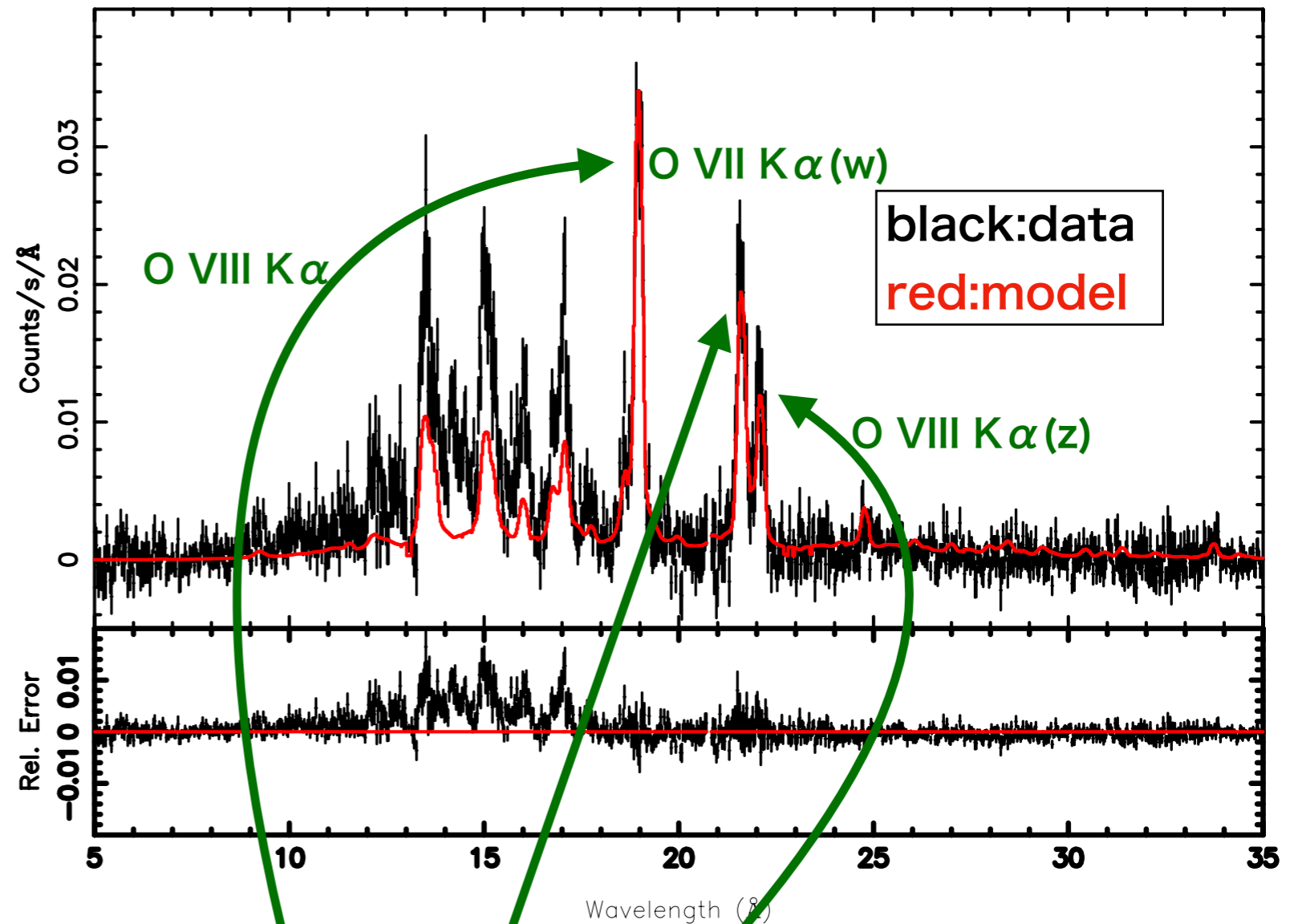


# fitting結果(ISM成分)

	結果
kt(low) [keV]	0.204
H	1.0(fixed)
He	0.89(fixed)
C	0.3(fixed)
N	0.12(fixed)
O	0.13(fixed)
Ne	0.2(fixed)
Mg	0.2(fixed)
Si	0.28(fixed)
S	0.31(fixed)
Ar	0.54(fixed)
Ca	0.34(fixed)
Fe	0.15(fixed)
Ni	0.62(fixed)
上記以外	0.3(fixed)
$\tau$ [s/cm <sup>3</sup> ]	1.0E+11 (fixed)

(Russell Dopita et al. 1992 ,  
Schenck et al. 2016)を参考に  
ISM成分のabundanceはLMCの  
abundanceに固定した

高温のejecta成分を除いた時の様子

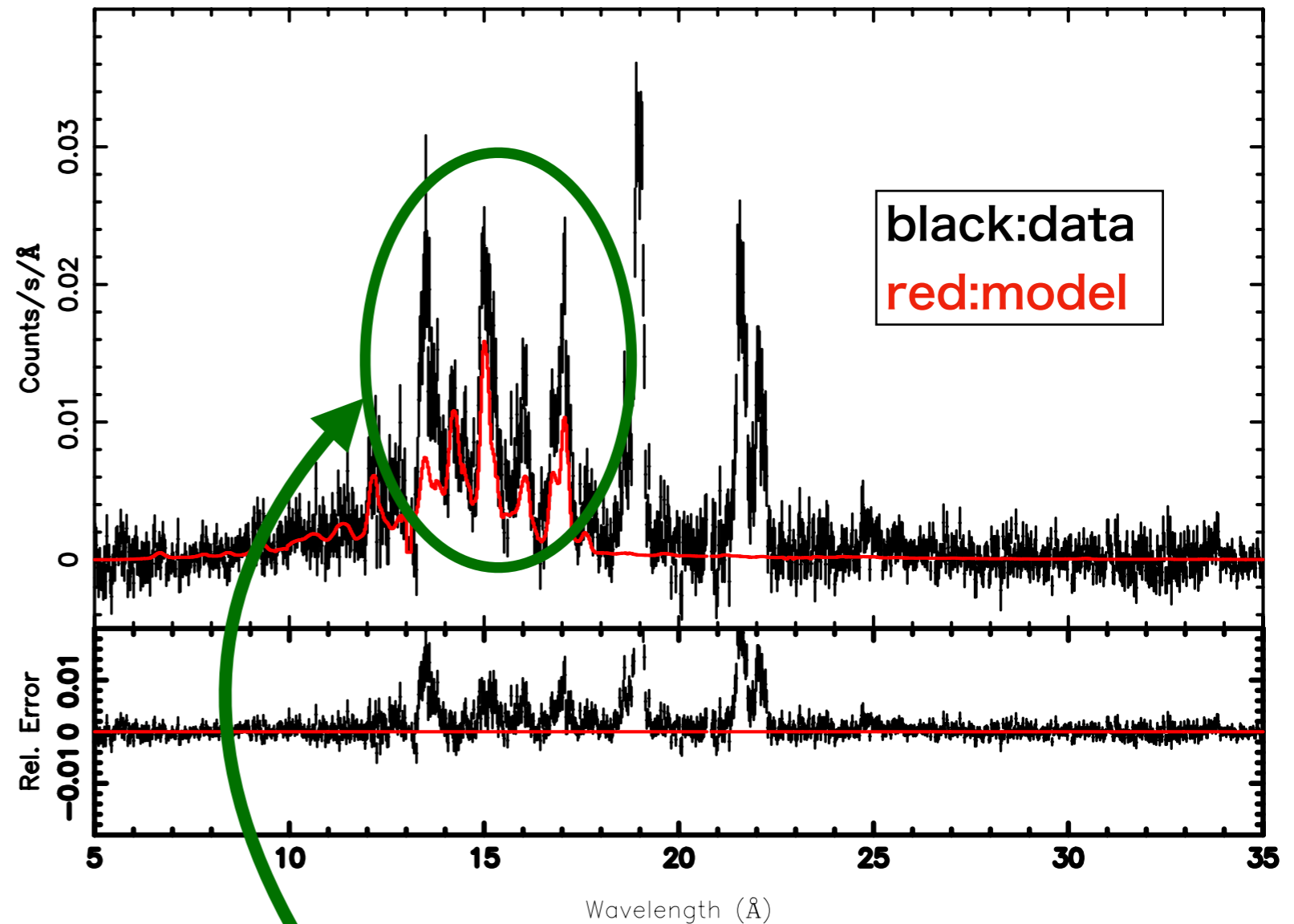


→ 18.9 Å, 21.8 Å, 22.1 Åの酸素の輝線は  
ISM成分が担っていることが分かる

# fitting結果(ejecta成分)

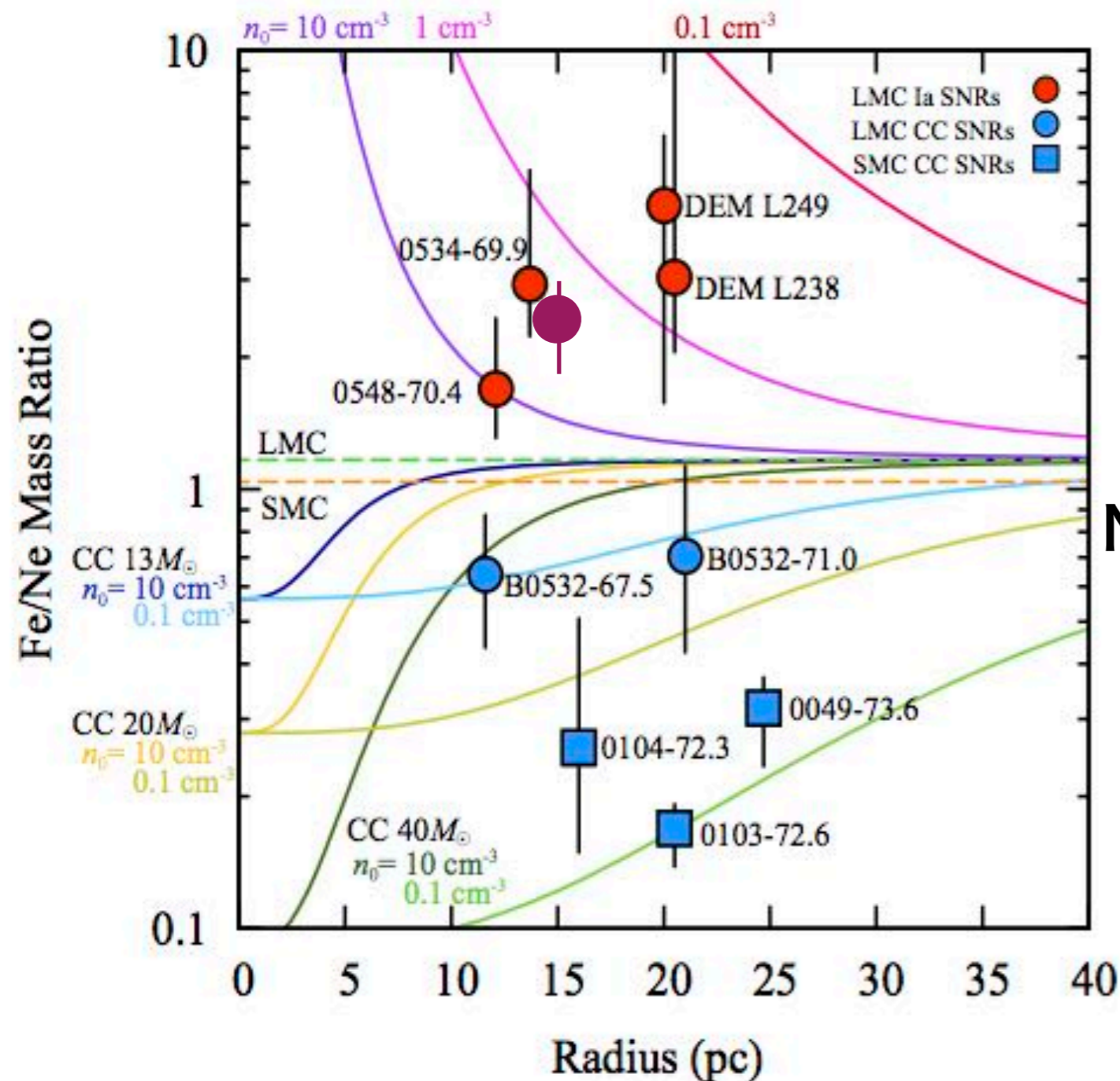
	結果
nh[cm**2]	1.28E+21
kt(high)[keV]	0.62±3.4E-03
C	1.4E-03
N	1.0E-03
O	2.0E-03
Ne	0.244 <sup>+0.048</sup> <sub>-0.035</sub>
Mg	0.296
Si	0.396
S	1.288
Fe(=Ni)	0.791±0.045
τ [s/cm <sup>3</sup> ]	4.56E+11

低温のISM成分を除いた時の様子



→ejecta成分には鉄のL輝線が多く見られる

# 元となるSNのタイプ判別



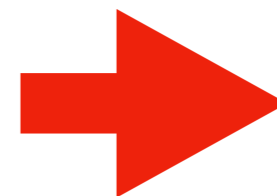
$$7.36 \times (n_{\text{Ne}}/n_{\text{Fe}})_{\text{ejecta}}$$

$$(n_{\text{Ne}})_{\text{eje}} = 0.244^{+0.048}_{-0.035}$$

$$(n_{\text{Fe}})_{\text{eje}} = 0.791 \pm 0.045$$



$$\text{Ne/Fe mass ratio} = 2.235^{+0.64}_{-0.40}$$



Ia型といえる



# 本研究でわかったこと

- 低温のISM成分に酸素と窒素のK輝線が存在し、高温のejecta成分には鉄のL輝線が多く存在することがわかった
- 先行研究の通りこのSNRはIa型超新星により作られた確率が高いことがわかった

# He-likeイオンのtriplet

(Porquet et al. 2001)

energy

w : 共鳴線

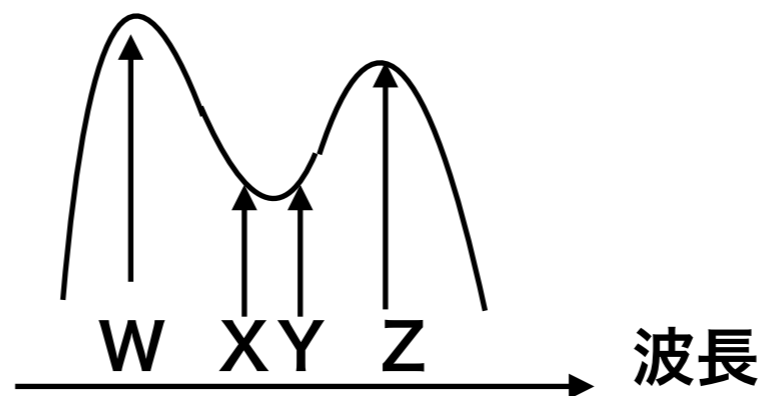
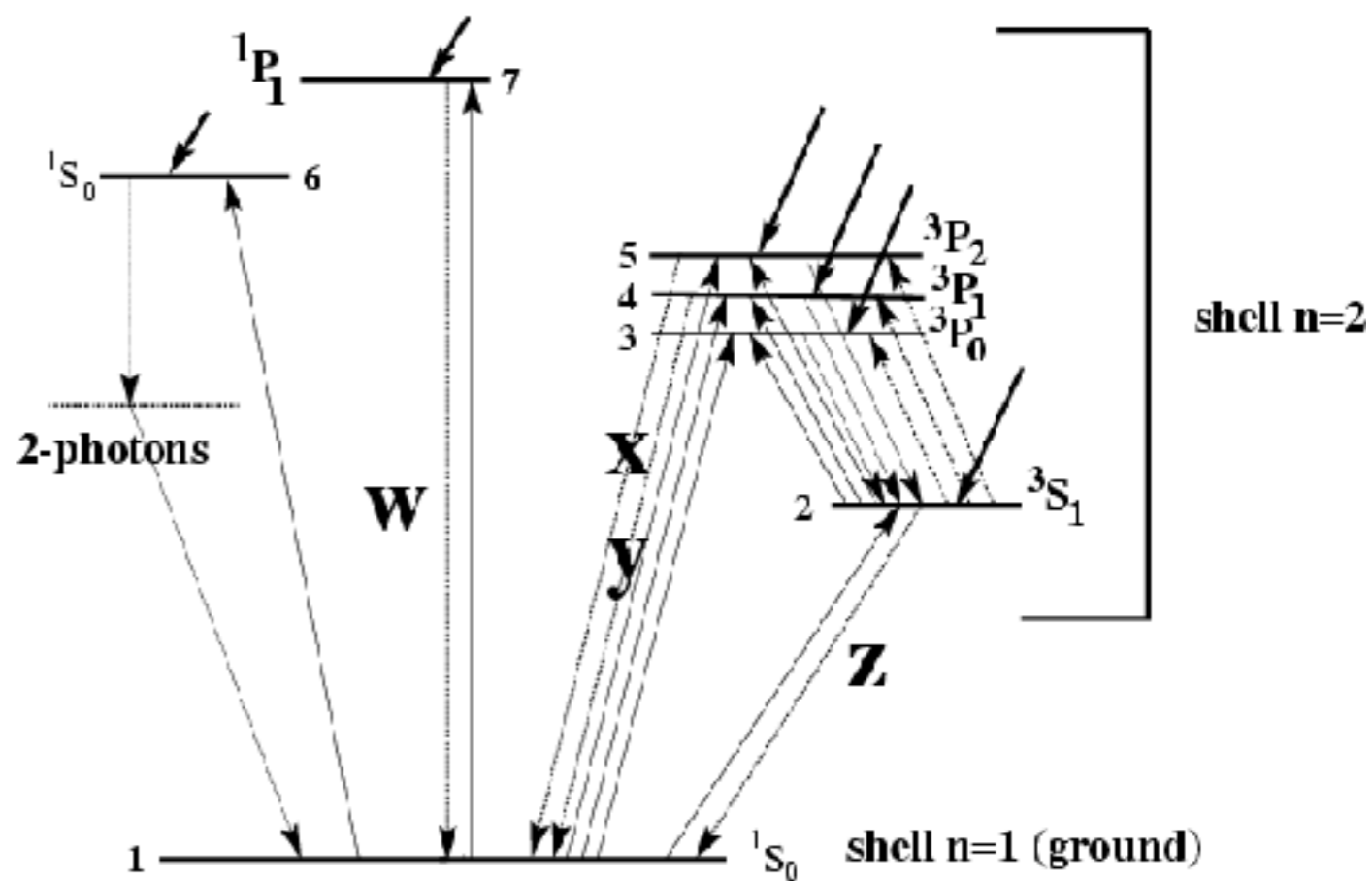
(resonance line)

x, y : 異種項間遷移線

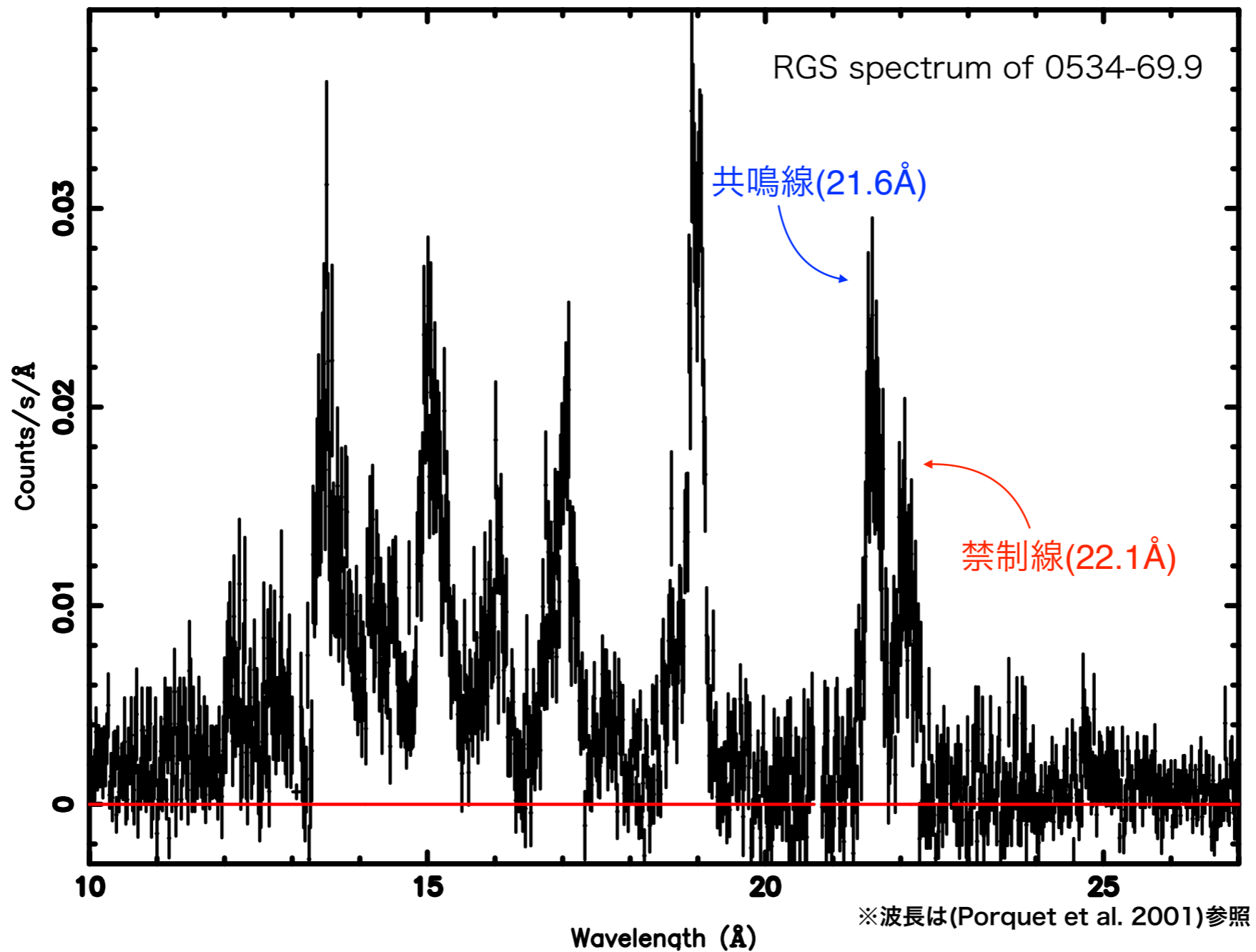
(inter combination line)

z : 禁制線

(forbidden line)



# SNRの典型的なRGSスペクトル



標準的な進化モデルを辿ったSNRでは共鳴線が支配的である

# N49の解析

## (那須)

# N49の概要

## 年齢

4.0 - 5.0×10<sup>3</sup> yr

## 距離

50 kpc (大マゼラン雲 (LMC) に位置)

## 起源

コア崩壊 (CC) 型超新星

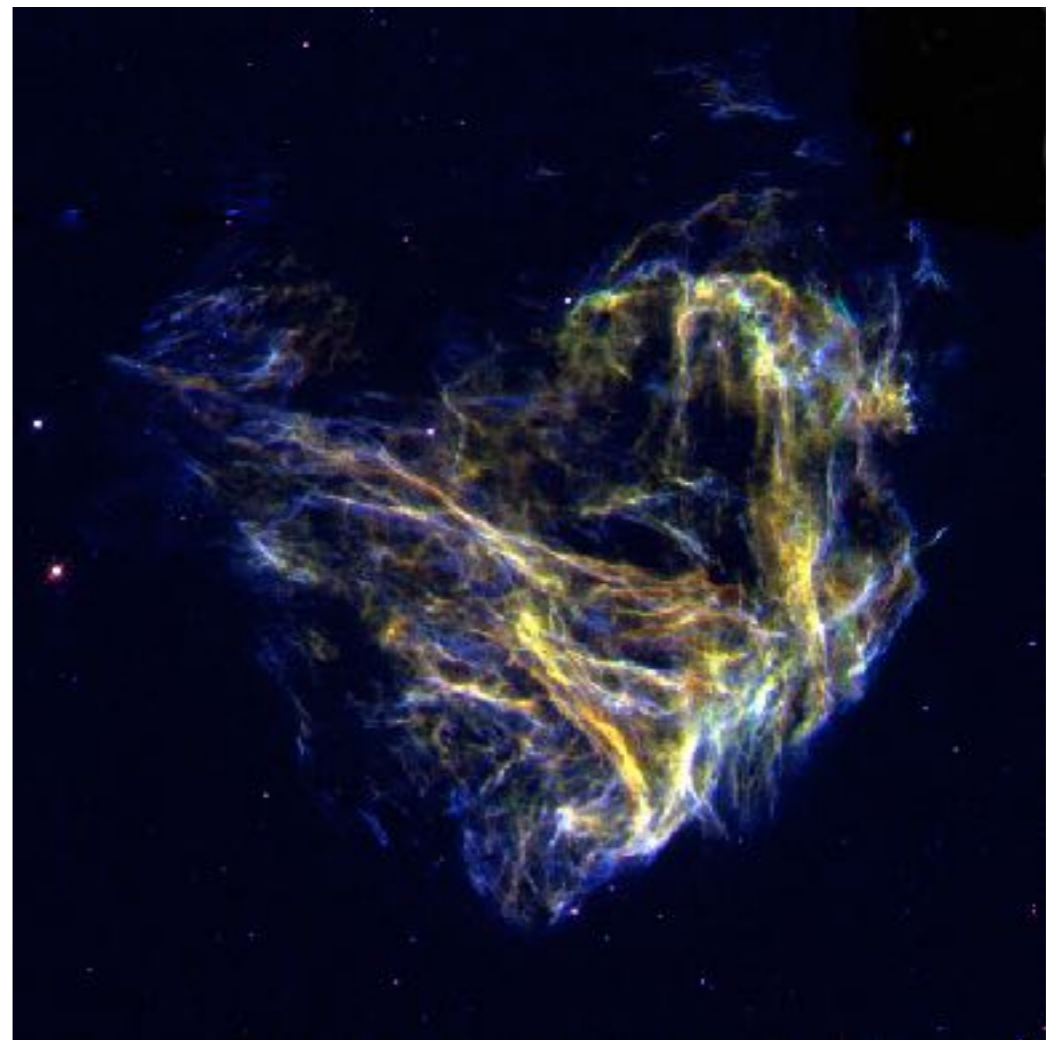
## 分類

mixed-morphology (MM) 型

## 特徴

過電離プラズマが見られる

(Uchida et al., 2015)



(James Long & the ESA/ESO/NASA Photoshop FITS Liberator)

# 目的

**先行研究 (Uchida et al., 2015) で分かっていること**

- 各種パラメータ：温度、電離状態、組成比
- recombining plasma (RP)の存在 (過電離)



## **本研究の目的**

RGSの高精度なスペクトルを用いて、N49の過電離プラズマを追加検証

# フィッティングの流れ

## 解析ソフト

XSPEC：計算が速い



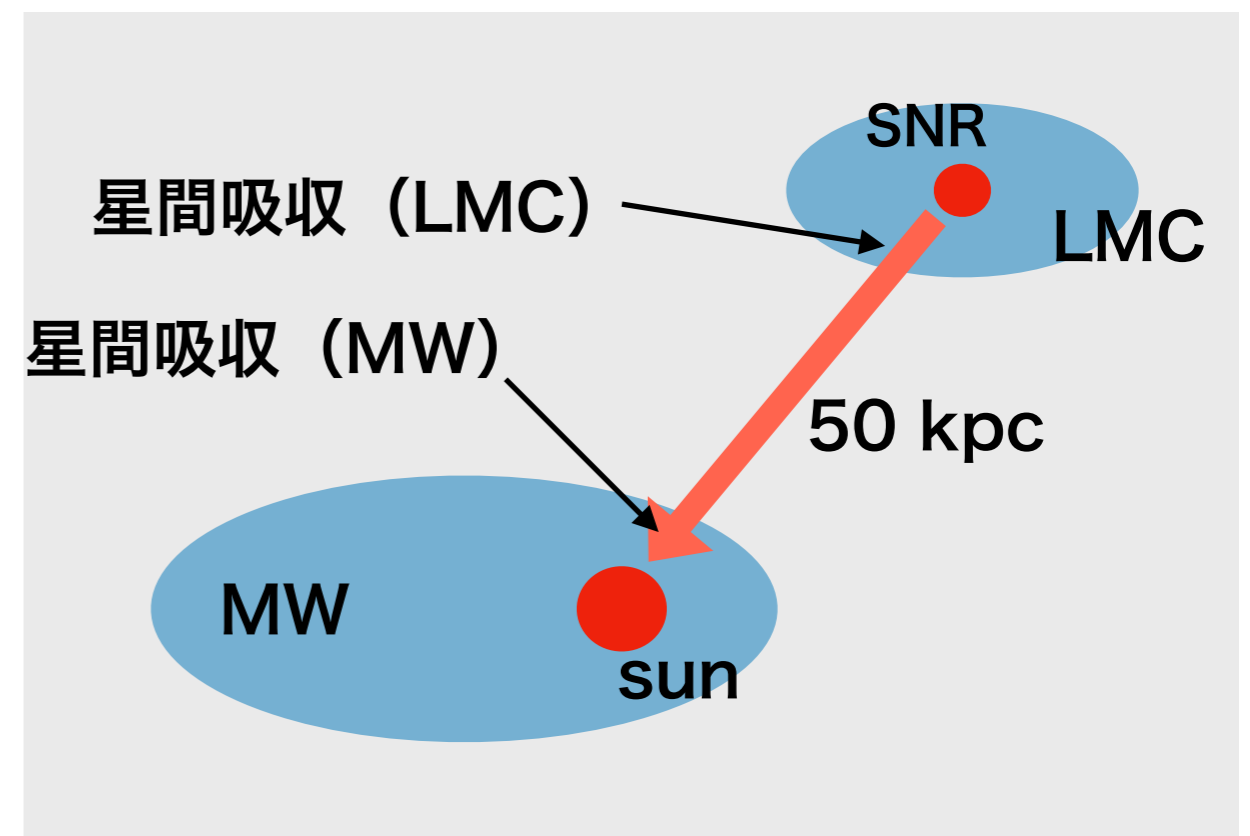
モデル・パラメータ  
ある程度確定

SPEX：XMM-Newtonを念頭に開発  
→RGSの解析に適する

## モデル

まず、

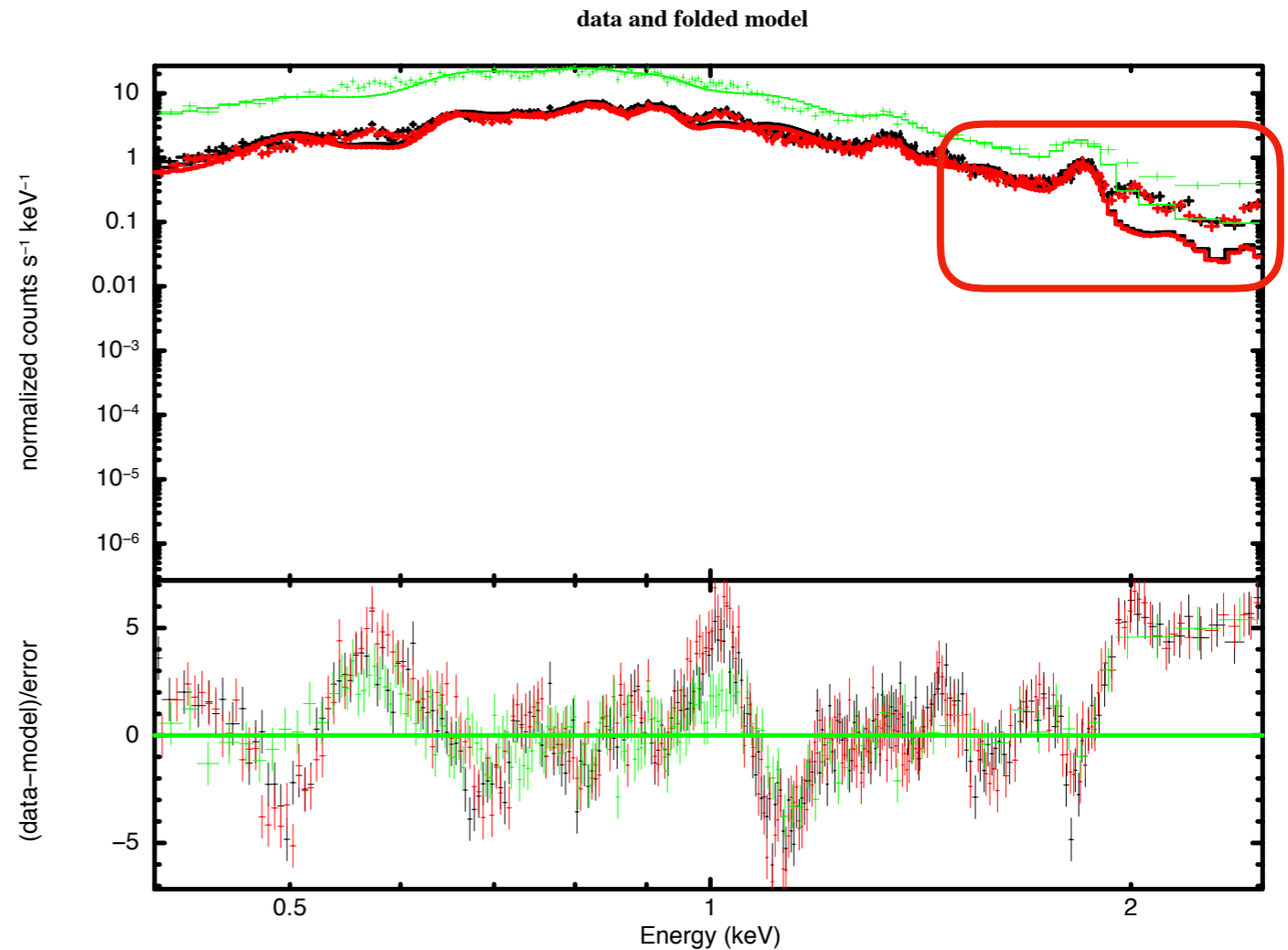
- ・ LMCの星間吸収
- ・ 銀河系の星間吸収  
(既知： $0.6 \times 10^{21}$  [cm<sup>-2</sup>])
- ・ SNRの電離非平衡プラズマ（1成分）  
のモデルでフィッティング



# 結果 (XSPEC) ①

## 電離非平衡プラズマ 1 成分

パラメータ	結果
$N_H$ [ $\times 10^{21}$ cm $^{-2}$ ]	3.50
$kT_e$ [keV]	0.23
$n_e T$ [ $\times 10^{11}$ cm $^{-3}$ ]	0.96
O	1.55
Ne	0.43
Mg	0.21
Si	2.61
S	34.2
Ar	$3.56 \times 10^{-3}$
Ca	$1.51 \times 10^{-13}$
Fe (=Ni)	0.59
$\chi^2/\text{dof}$	4008/670



Nasu 21-Feb-2018 18:55

うまく fitできていない

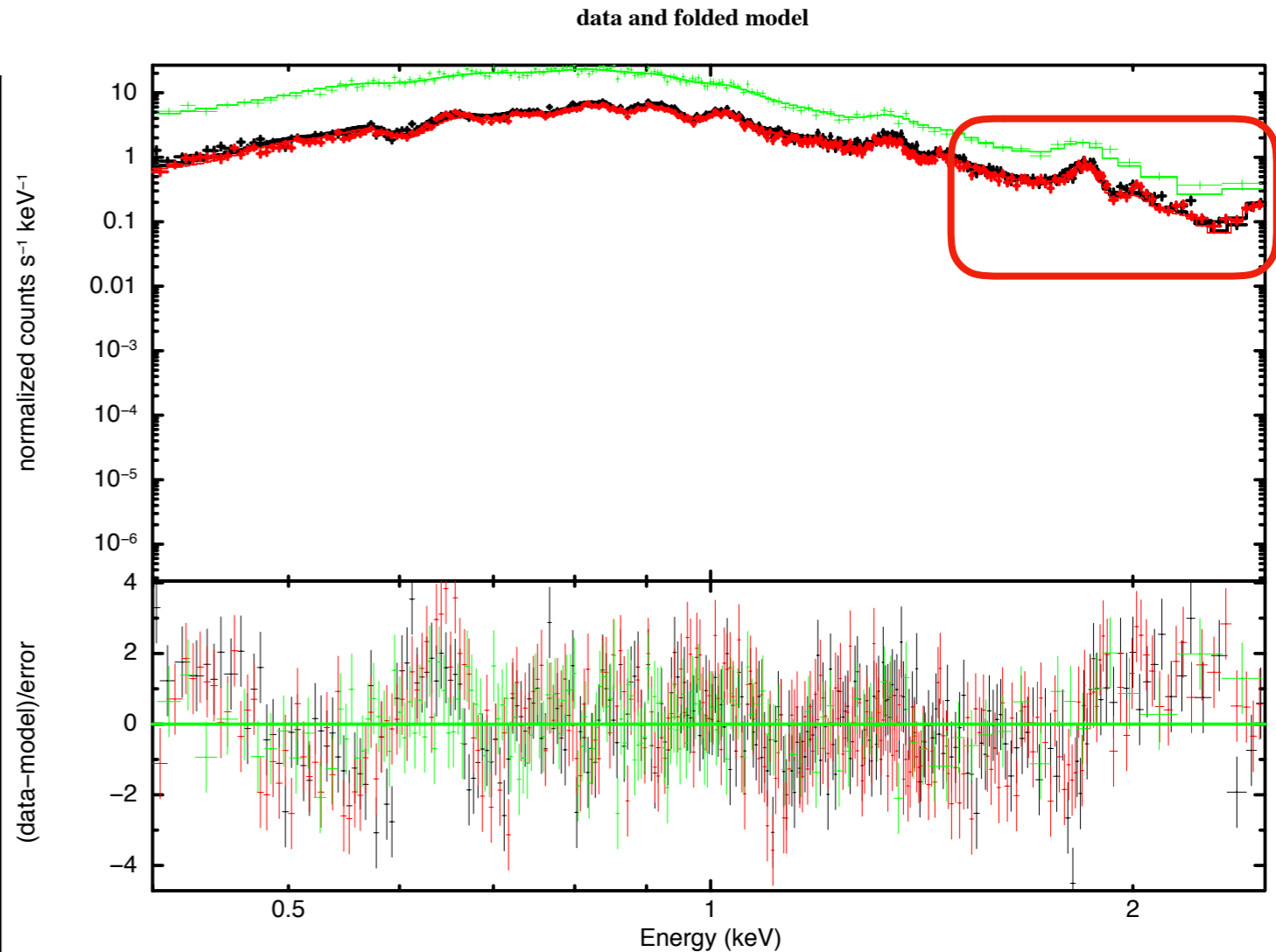
➔ 電離非平衡プラズマを 2 成分にしてみる  
(Shell構造なので、ISMとEjecta?)



# 結果 (XSPEC) ②

## 電離非平衡プラズマ2成分

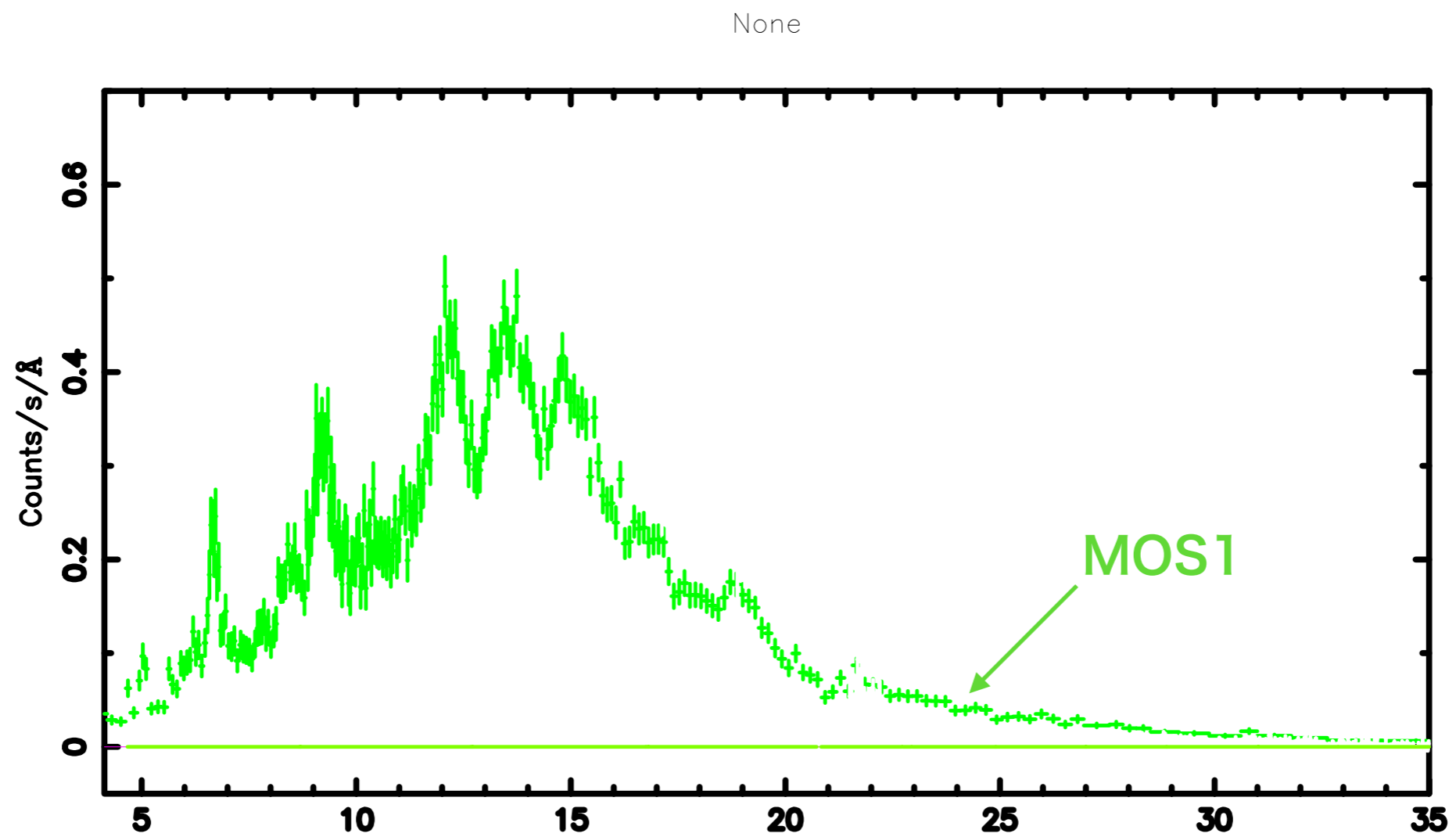
	パラメータ	結果
LMC	$N_H$ [ $\times 10^{21}$ cm $^{-2}$ ]	2.71
ISM	$kT_e$ [keV]	0.11
	$n_e T$ [ $\times 10^{11}$ cm $^{-3}$ ]	404
Ejecta	$kT_e$ [keV]	0.30
	$n_e T$ [ $\times 10^{11}$ cm $^{-3}$ ]	7.07
	O	6.08
	Ne	5.04
	Mg	3.87
	Si	4.00
	S	5.13
	Ar	$1.75 \times 10^{-7}$
	Ca	$4.52 \times 10^{-14}$
	Fe (=Ni)	3.84
	$\chi^2/\text{dof}$	1021/667



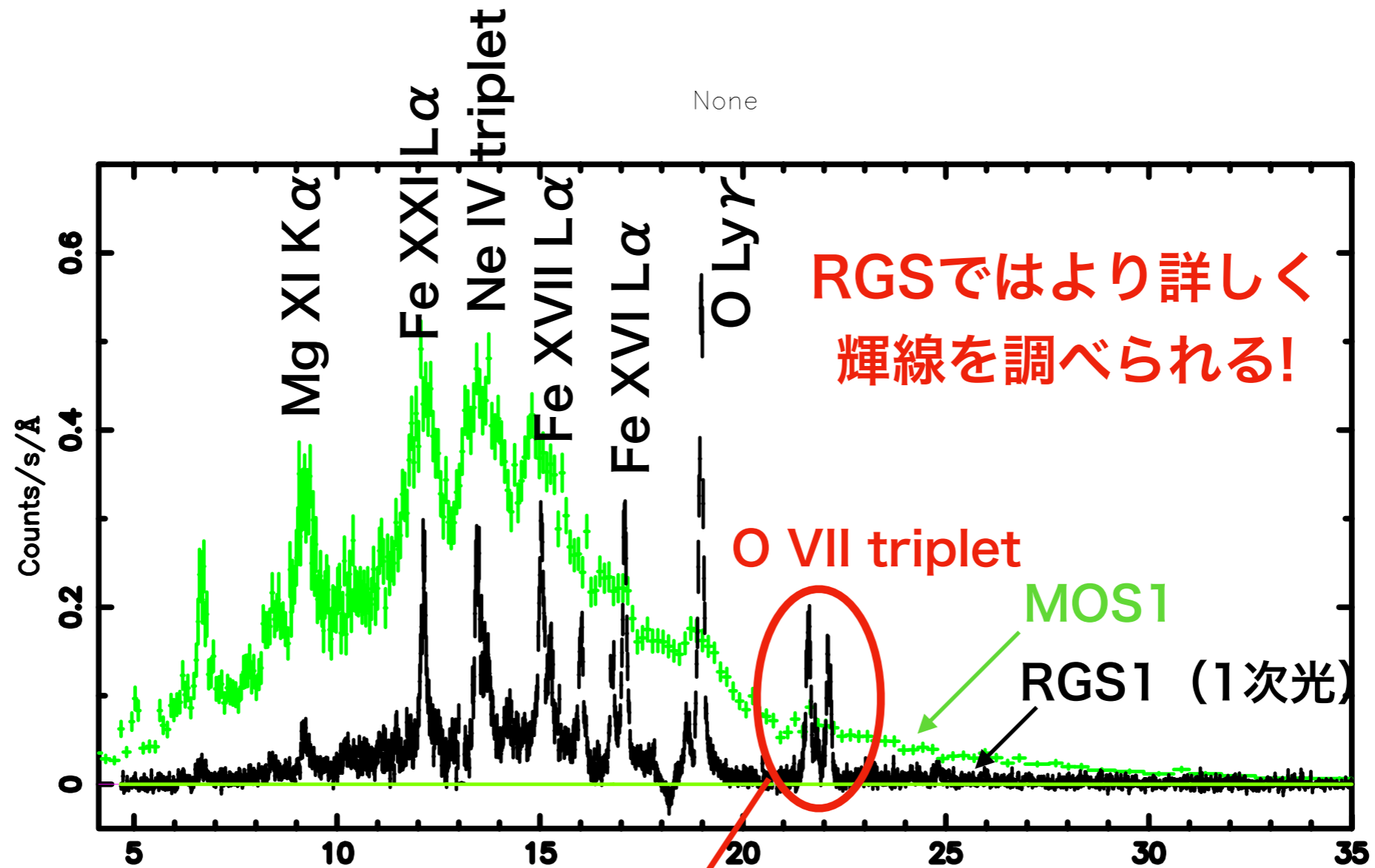
fittingが改善→RGSを加え、SPEXで解析  
SPEXではさらにlproというモデルを追加

RGSの分光の補正

# RGS vs EPIC



# RGS vs EPIC



RGSではより詳しく  
輝線を調べられる!

O VII triplet

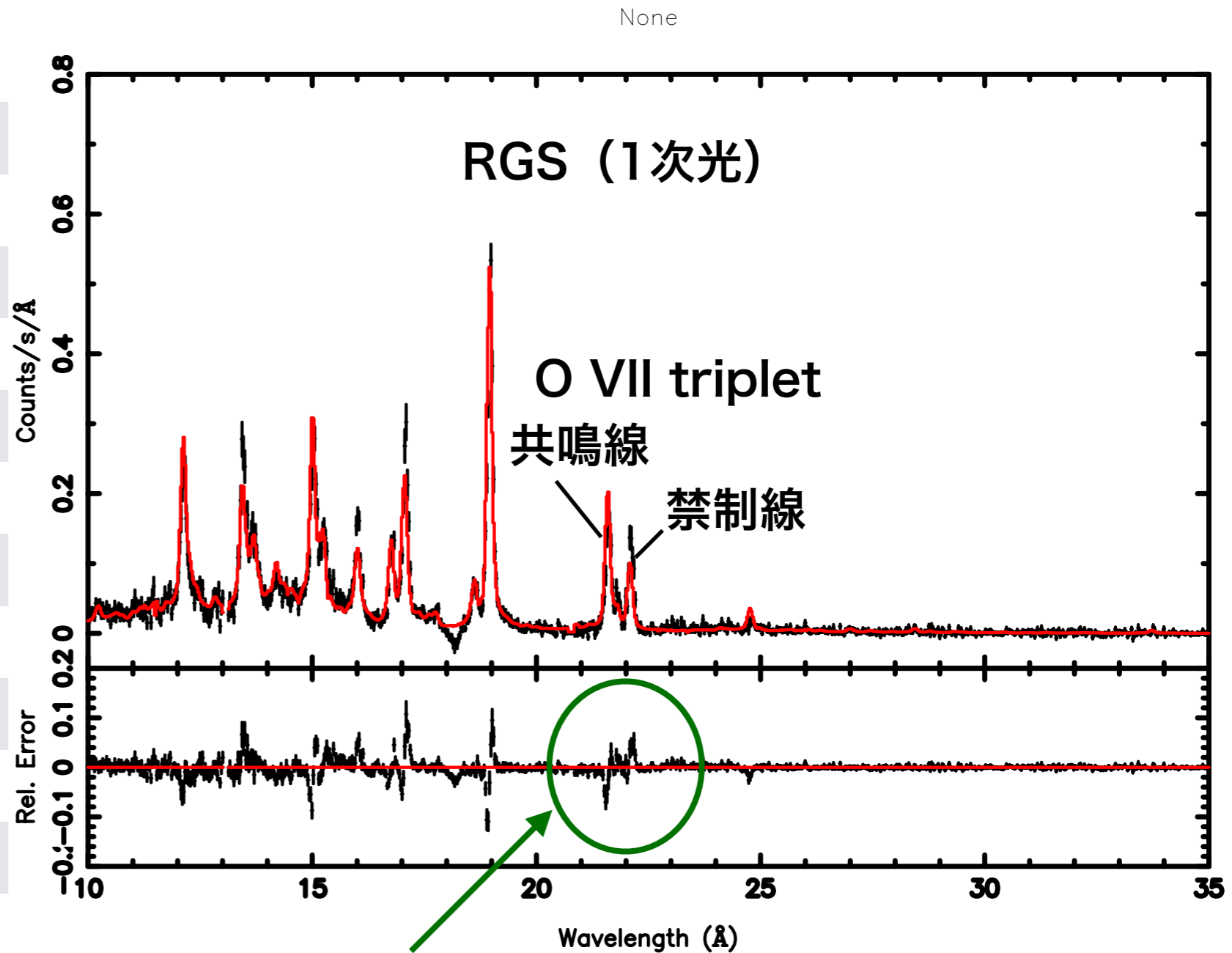
MOS1

RGS1 (1次光)

- RGSでのみ分離できる
- Fe輝線群の影響を受けにくい

# 結果 (SPEX) ①

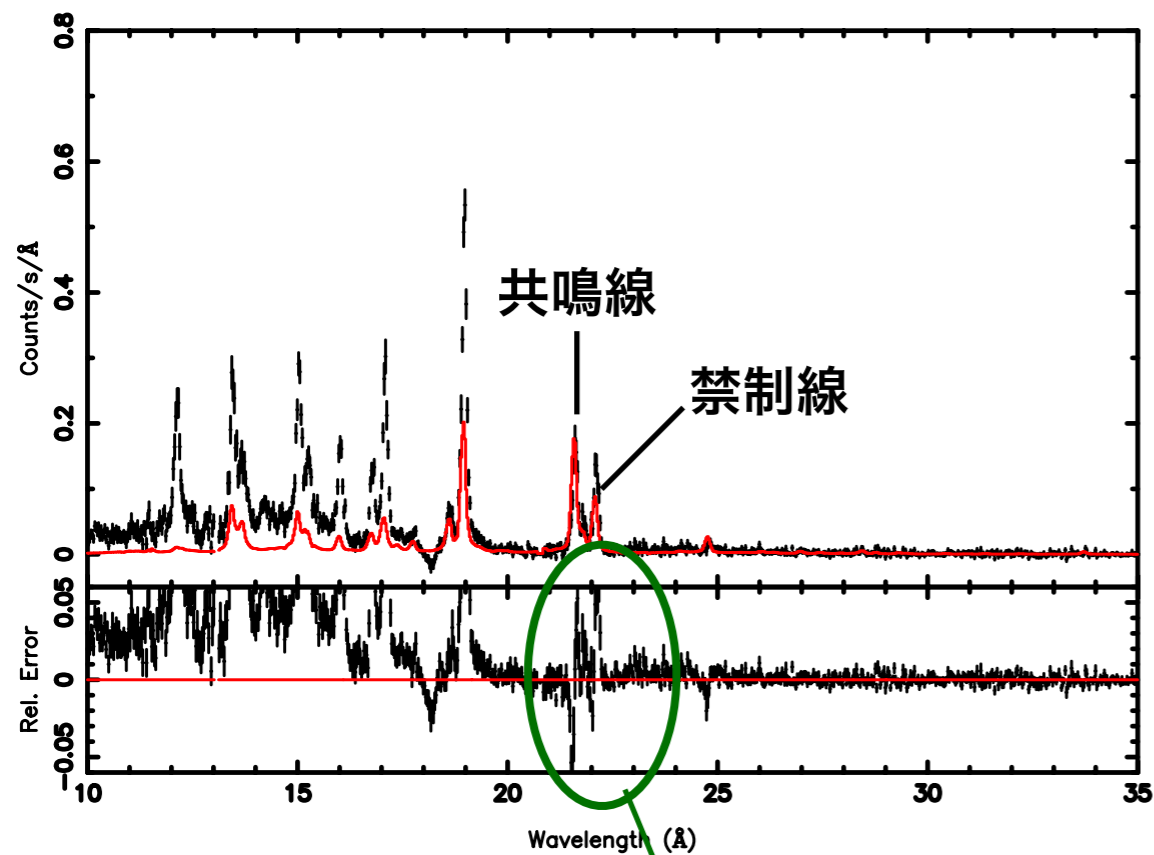
パラメータ		結果
	$N_H$ [ $\times 10^{21}$ cm $^{-2}$ ]	2.63
ISM	$kT_e$ [keV]	0.12
	$n_e T$ [ $\times 10^{11}$ cm $^{-3}$ ]	3.27
Ejecta	$kT_e$ [keV]	0.49
	$n_e T$ [ $\times 10^{11}$ cm $^{-3}$ ]	8.12
	O	0.74
	Ne	0.92
	Mg	0.80
	Si	1.25
	S	6.83
	Ar	$2.35 \times 10^{-3}$
	Ca	0
	Fe (=Ni)	0.301
	C-stat/dof	3231/510



共鳴線が弱く、禁制線が強い

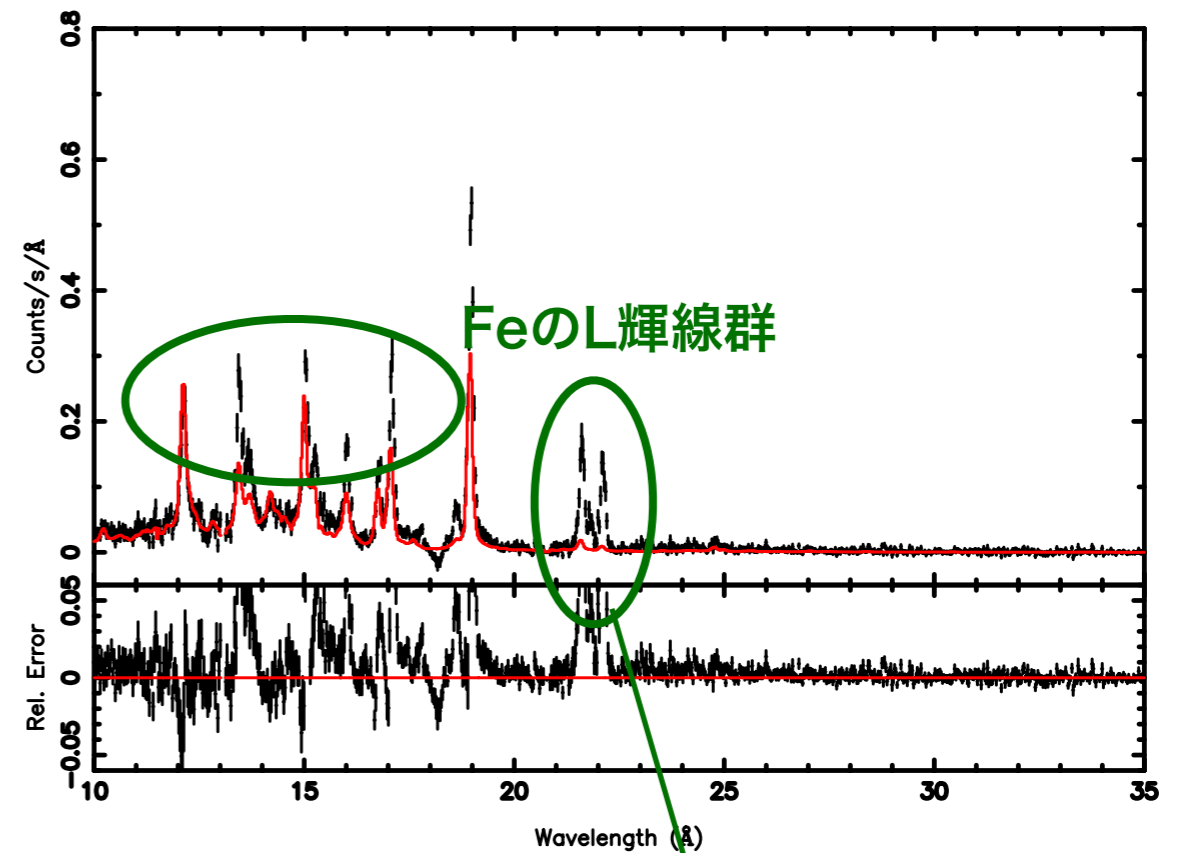
# 結果 (SPEX) ②

RGS (1次光) ISM成分のみ



過電離の兆候?

RGS (1次光) Ejecta成分のみ



O VII tripletが見られない

➡ O VII triplet はISM成分の寄与によるもの

# 考察

- RGSを用いて、EPICでは分離できなかった O VII triplet を分光できた
  - ➔ **低温部分に過電離プラズマが存在する可能性**がある  
(共鳴線が弱まり、禁制線が強調されていた)
- 反省点
  - ・ 高エネルギー部分でフィッティングが良くなかった
    - ➔ フィッティング手法の問題？
  - ・ フィッティングがうまくいかなかったため、エラーの計算ができなかった
- 課題
  - ・ フィッティングを改善し、過電離プラズマの存在のより信頼性の高い証拠を得る

# まとめ

- RGSの高い波長分解能を生かした解析ができた
- シェル型構造であることを仮定したモデルは適当
- より波長分解能の良いひとみ代替機に期待したい