

課題研究P6
XMM-Newtonによる
超新星残骸のX線解析

田中 優貴子
成田 拓仁

本日の内容

- 超新星爆発、超新星残骸(SNR)の説明
- X線解析、測定機器の説明
- G296.1-0.5の解析(田中)
- RCW103の解析(成田)

超新星爆発(SNe)とは

大質量の恒星が進化の最終段階に起こす爆発

メカニズムによる分類

重力崩壊型

炭素爆燃型

残骸の構造による分類

シェル型

プレリオン型

Mixed-
Morphology型

スペクトル(光度曲線)による分類

I型

Ia型

Ib型

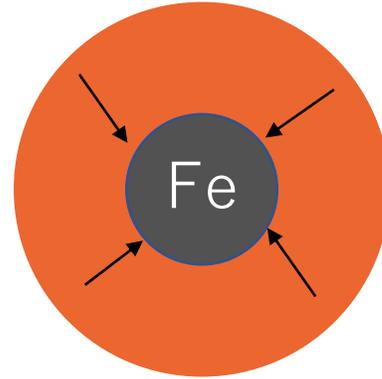
Ic型

II型

(さらにIIIn, b, P, Lなど)

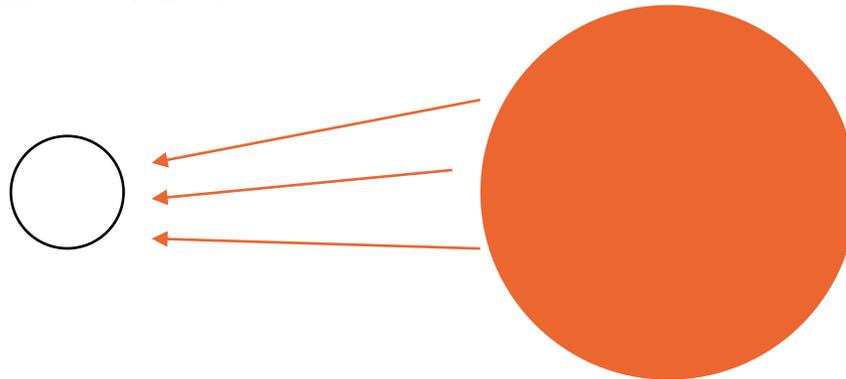
重力崩壊型

$M \geq 8M_{\odot}$ 内部で核融合反応が進んでFeコアが形成され、
重力により潰れる
中心にコンパクト星(中性子星かブラックホール)を残す



炭素爆燃型

連星系にある白色矮星 (主成分炭素、酸素)に相手の星からガスが降着
縮退した電子で支えられる最大質量(チャンドラセカル質量)に近づくと、炭素
の爆発的な核融合が起こり白色矮星は吹き飛ばす
コンパクト星は残さない



超新星残骸(SNR)を研究する意義

爆発の衝撃により加熱された恒星の破片(イジェクタ)や星間物質(ISM)は高温プラズマとして多波長(電波 \sim γ 線)で観測可能

爆発する前の星(親星)の進化
超新星爆発、宇宙線加速のメカニズム
重元素合成の過程(宇宙の化学進化)

を知る手がかりになる

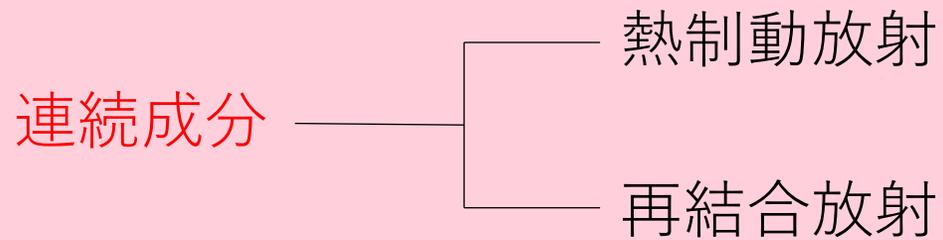


Wikipedia “W 49B”より
W 49BのX線画像

SNRからのX線放射

超新星爆発後のイジェクタ、ISMが形成する高温プラズマは電離非平衡プラズマ (NEI) と呼ばれる

長い時間をかけて電離平衡プラズマ (CIE) に移行



離散成分 ————— 輝線放射

衝突励起
内殻電離
二電子性再結合
etc.

解析の手順

1. XMM-Newtonが取得したデータをダウンロード
2. SAS (XMMが取得したデータの標準解析ツール) でバックグラウンド除去、スペクトル、光度曲線、画像作成、応答関数の構築など
3. XSPEC, SPEXでスペクトルのモデルフィッティング、関数の形は通常以下のように与えられる

(放射モデル) × (星間吸収モデル)

使用したソフト

- ・ SAS(XMM-ESAS)

ESA(European Space Agency)が管理

XMM-Newtonが取ったデータを取得、バックグラウンドを差し引いたスペクトル作成、画像作成など

- ・ HEAsoft

NASAが管理、X線解析の標準的なソフト。Xselect, Xspec, Ximage, Xronosを内包

- ・ ds9

FITSファイルを可視化。linear/logスケール、カラーマップ調整、region file作成など

- ・ SPEX

SRON(オランダ宇宙研究所) が提供するX線スペクトル解析ソフト

XMM-Newton, Chandra, すざく, ひとみなどの検出器の高分解能スペクトルの解析に特化

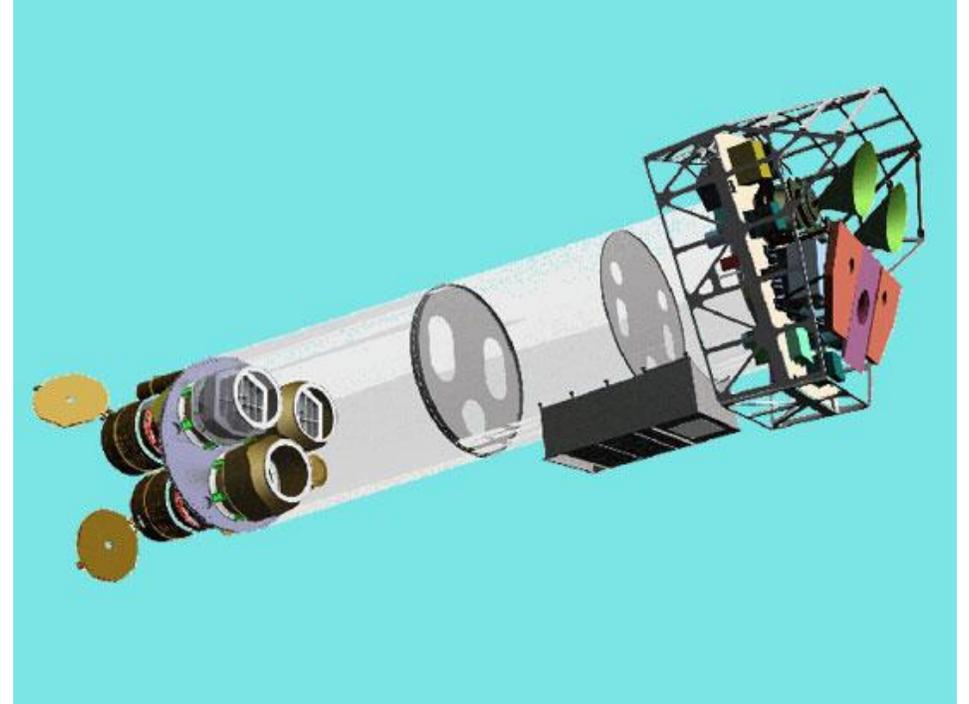
XMM – Newton

概要・特徴

- ・ 欧州宇宙機関（ESA）の X線観測器（1999年～）
- ・ 望遠鏡の有効面積が大きい
→ 暗い天体が得意
- ・ 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



https://www.isas.jaxa.jp/docs/PLAINnews/115_contents/115_1.html

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

EPIC · RGS

MOS (MOS1, MOS2)

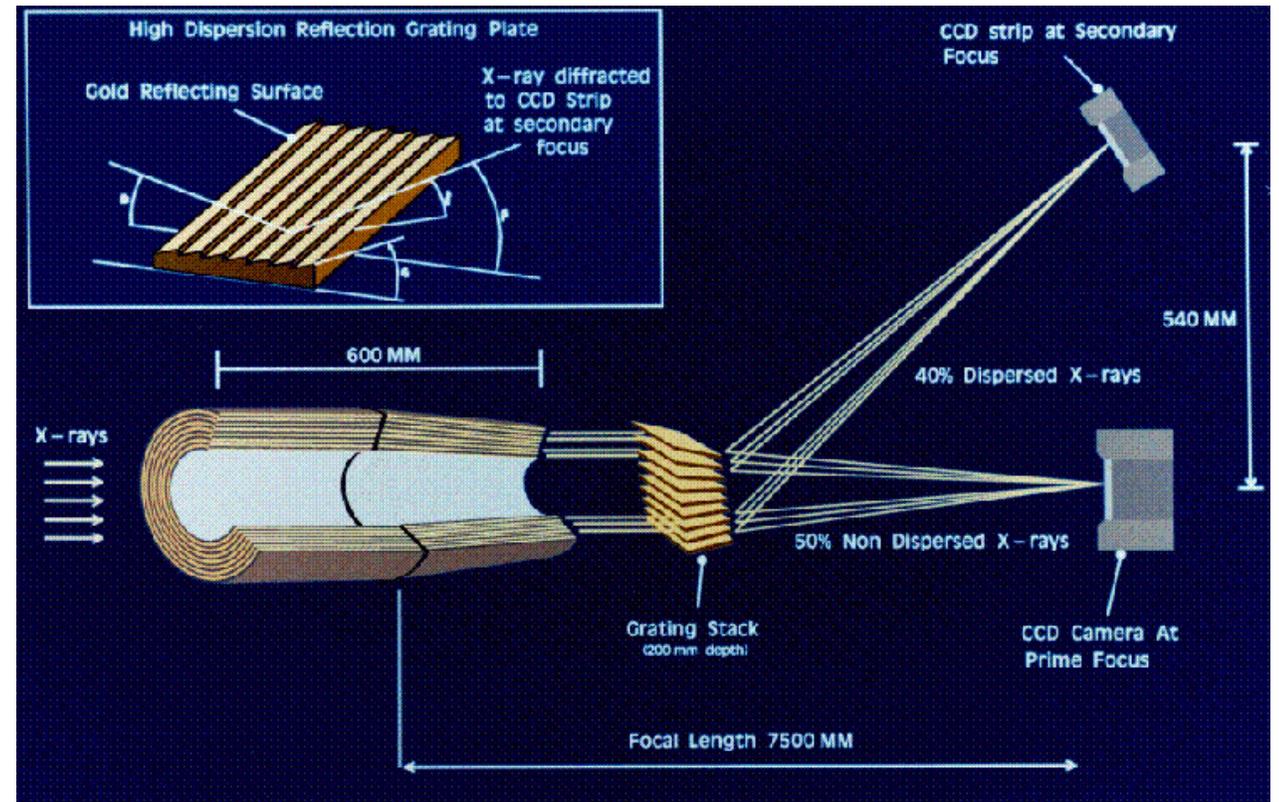
- 0.15 - 12 keV
- 低エネルギーで検出効率が低い

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
点源や遠くの天体に適する



X線経路

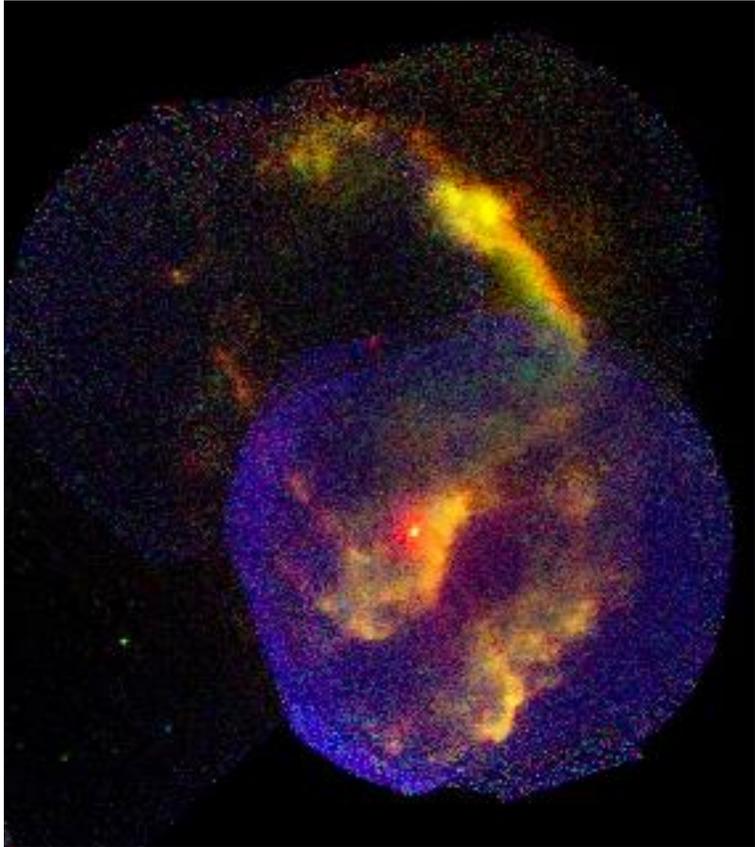
EPIC：反射鏡→CCD

RGS：反射鏡→回折格子→CCD

調べた天体

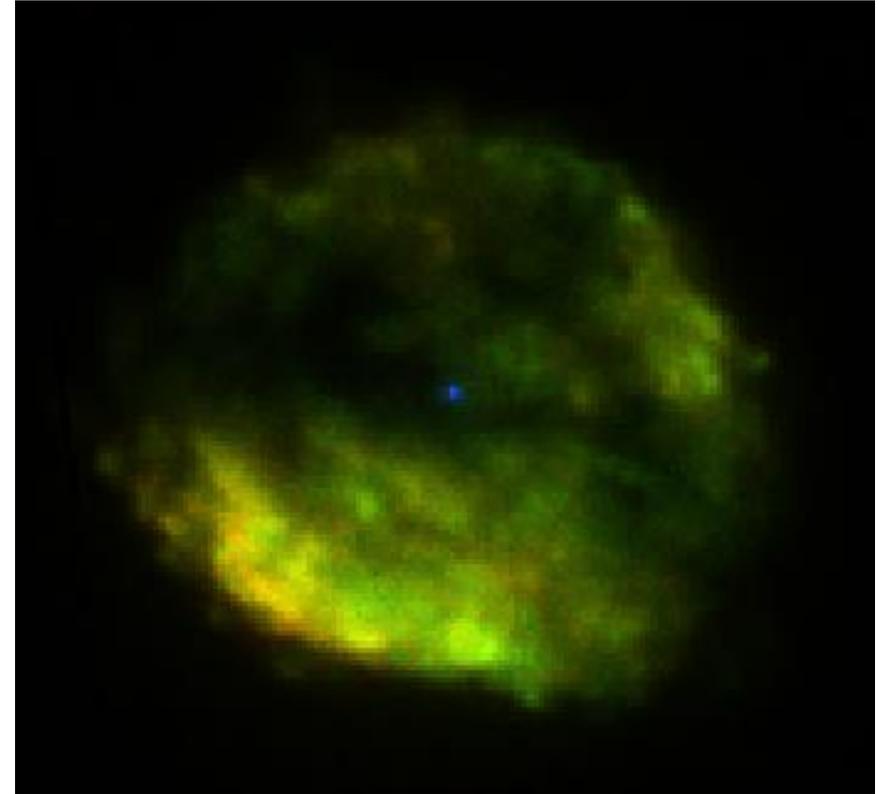
G296.1-0.5(北西シエル)

重力崩壊型 multiple-shell morphology
角直径 33' 距離 4 kpc 年齢 2×10^4 yr

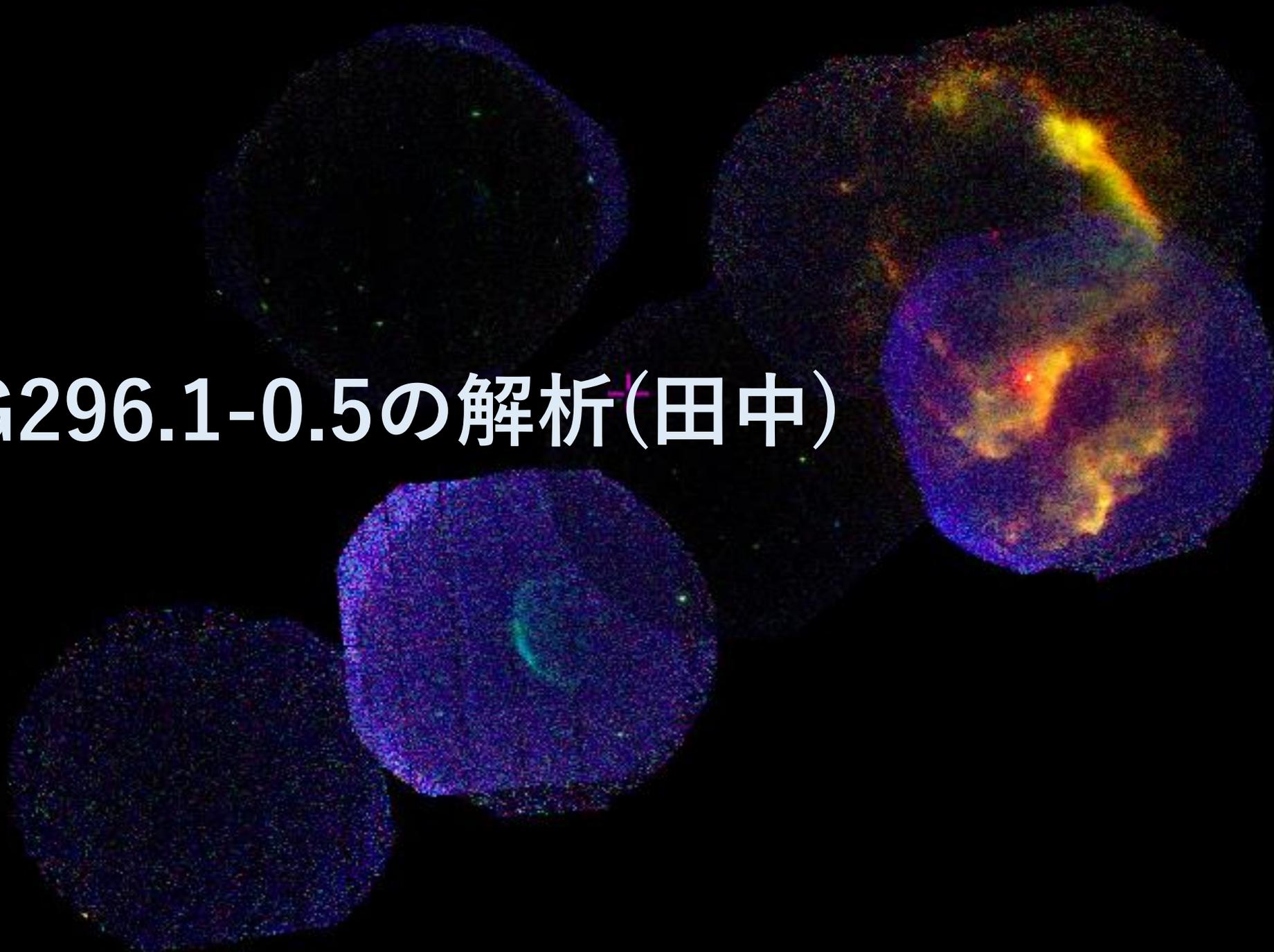


RCW103

重力崩壊型 中心に非常に長い変動周期 (6.67時間)
をもつマグネター
半径 10' 距離 3.3 kpc 年齢 $\sim 2.0 \times 10^3$ yr



G296.1-0.5の解析(田中)

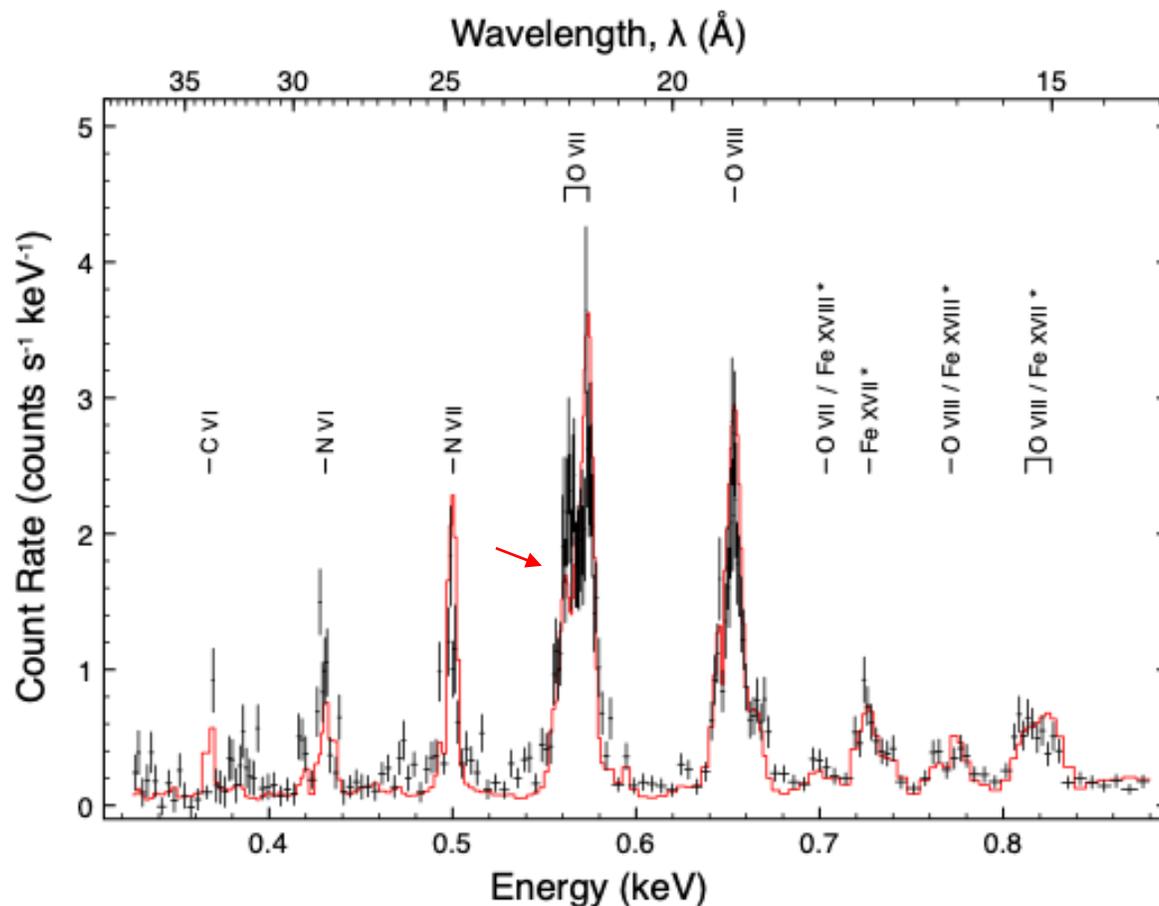


先行研究・気になること

SNRは衝撃波により局所的に物理状態が急速に変化
→電離非平衡プラズマ中で多くの反応が起こっているのではないか？
従来の連続成分+輝線のモデルでは説明しきれないX線スペクトルの存在

SNR G296.1-0.5のXMM-Newtonによる
先行研究(Castro et al. 2011)よりO VII
線のフィッティング結果(右図)から、考
慮しきれない何らかの反応が起
こっていると予測

他の研究(Sarah&Trowbridge, 2014)で
は共鳴散乱、電荷交換反応の可能性を
示唆したが、明確な結論は出してい
ない



O VII線の物理 ①

O VIIは、電子を2つ持つHe-likeイオン
閉殻構造のため、幅広い条件下で存在しやすい

復習：L-S結合

多電子原子について

O は原子番号が小さいので各電子の軌道角運動量間の結合とスピン角運動量間の結合が強く、スピン-軌道相互作用は無視できる

→全電子の合成軌道角運動量 L の違う状態、合成スピン角運動量 S の異なる状態はそれぞれ違う異なるエネルギーを持つ

L と S は弱く結合して全角運動量 J を作る

$$J = |L - S|, |L - S| + 1, \dots, L + S$$

0 VII線の物理 ②

L-S結合に従う二準位間の電気双極子遷移に対する選択則

$$\Delta S = 0$$

$$\Delta L = 0, \pm 1 \text{ (但し } L_1 = L_2 = 0 \text{ は禁止)}$$

$$\Delta J = 0, \pm 1 \text{ (但し } J_1 = J_2 = 0 \text{ は禁止)}$$

この選択則に従う遷移を許容遷移(w)、従わない遷移を禁制遷移(z)(異重項間遷移x, y)という

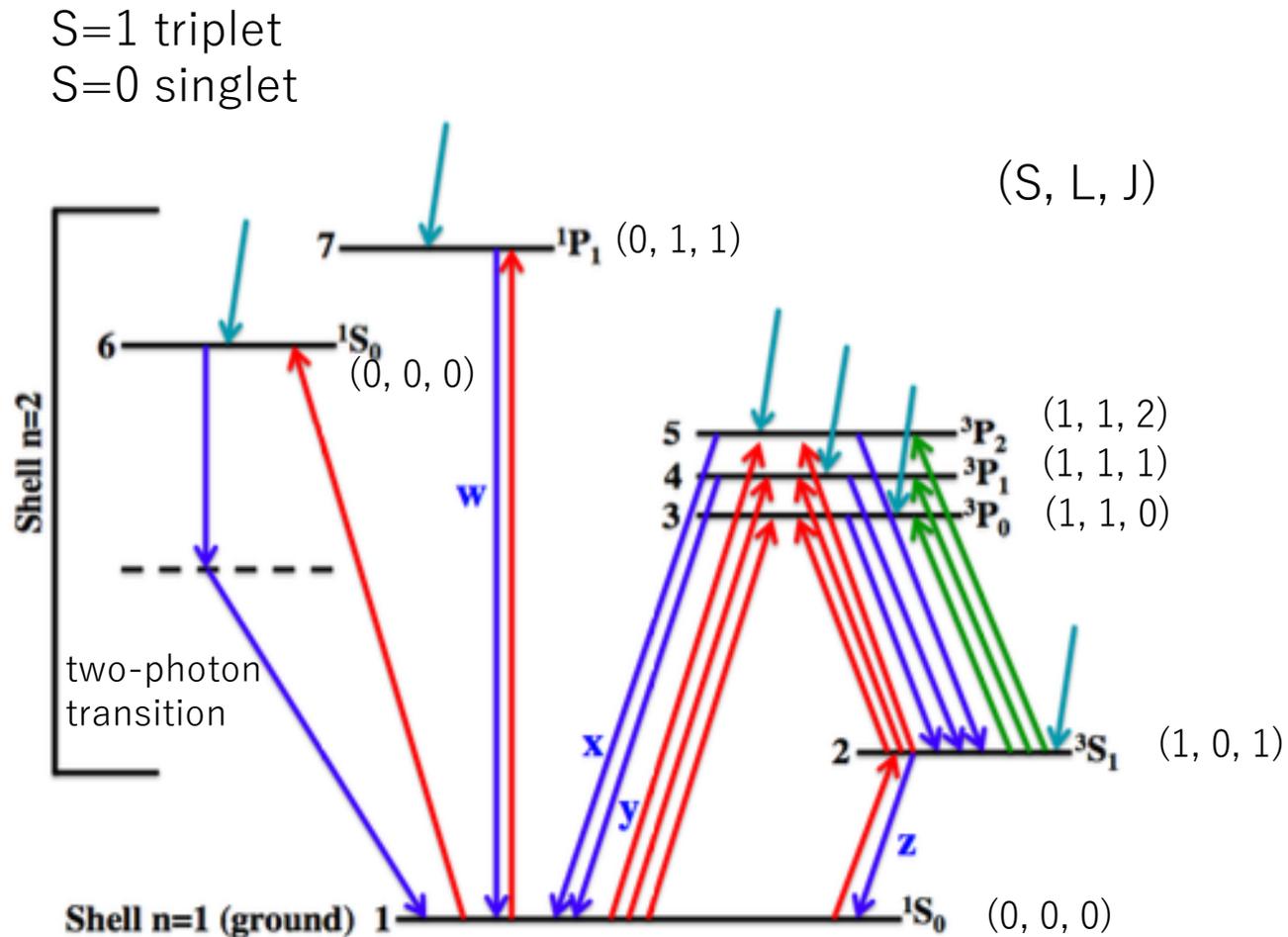
(右)He-likeイオンのエネルギー準位

青: 輻射輸送による光子放出

水色: 再結合、カスケード

赤: 衝突励起

緑: 光励起



0 VII線の物理 ③

許容遷移、禁制遷移、異重項間遷移による輝線はそれぞれ共鳴線(R)、禁制線(F)、異重項間遷移線($l=x+y$)と呼ばれる

これらの強度比はプラズマの状態を調べる指標にされる

$$\text{G-ratio } G \equiv \frac{F+I}{R}$$

先行研究からはモデルより禁制線が強いことがわかっており(G-ratioが高い)、G-ratioが高くなる反応機構は

- H-likeイオンからHe-likeイオンへの再結合
- Li-likeイオンの内殻電離
- 光励起
- 電荷交換反応
- 共鳴散乱

が挙げられる。

電荷交換反応とは

高階電離したイオンが中性(比較的低温)のガスに衝突し、電子を捕獲



捕獲された電子が捕獲したイオンの基底状態に落ちるときに放出される光子を検出

起こりやすいのは、高温のイオンの流れが中性のガス(宇宙物理学では大体水素)に衝突する場所

具体的には

太陽風がISMに当たっている領域

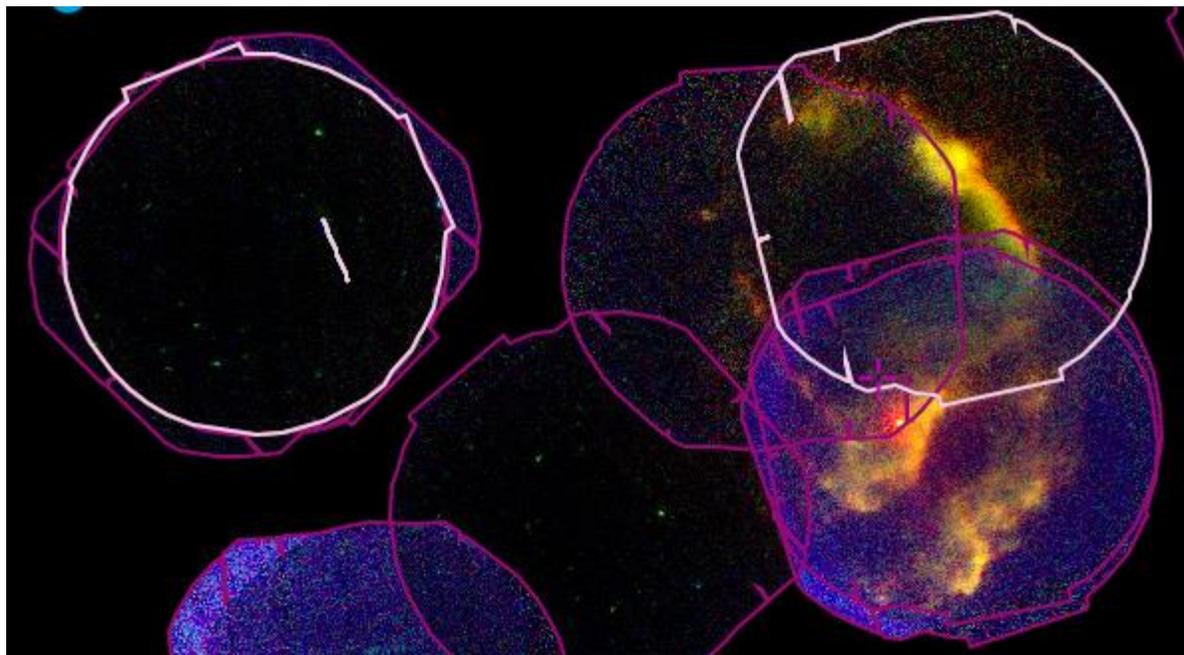
銀河中にガスが混合している領域

SNRで、イジェクタがまだ衝撃波加熱されていない星間ガスに衝突している領域
など

使用したデータ

RGSデータ処理時の背景として使用
(obs ID: 0503780101)

観測対象 北西シェル
(obs ID: 0503220101)

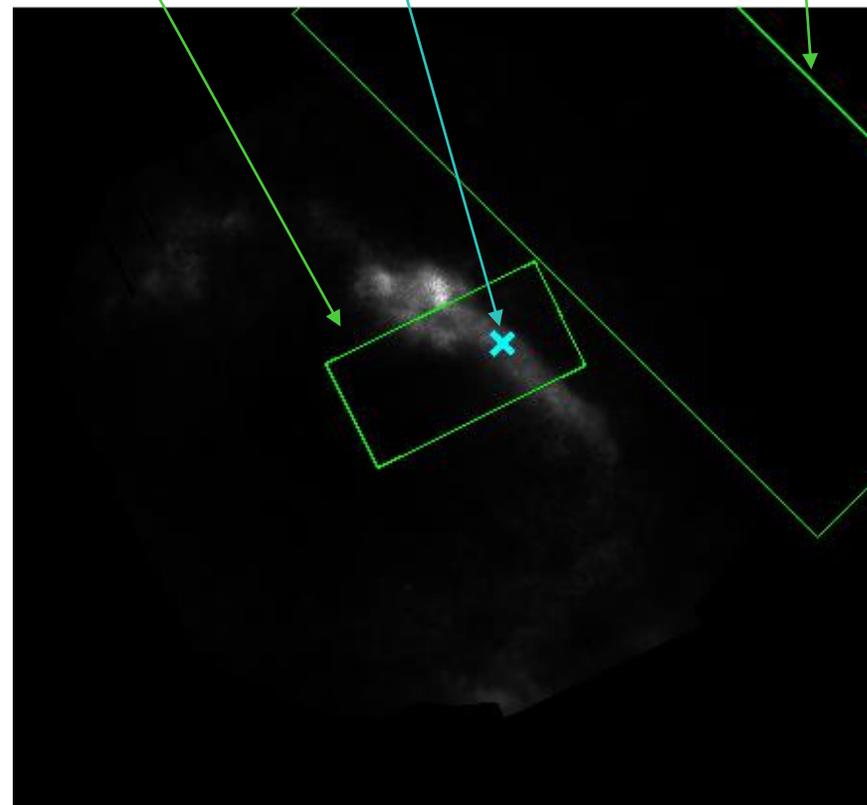


ESASkyより

RGS観測領域
(MOSについても
この領域を定義)

MOSの背景として
抽出した領域

天体の中心位置



MOSのデータ処理後
ds9で出力

SPEXでのモデルフィッティング

RGSのデータ：RGS1 + 2 の一次光のみ0.40-1.5 keV

$$\begin{aligned} & \text{nej} \times \text{absm} \times \text{lpro} \\ & (\text{nej} + \text{cx}) \times \text{absm} \times \text{lpro} \end{aligned}$$

MOSのデータ：RGSの観測領域に合わせて抽出、1のみ0.40-2.0keV

$$\begin{aligned} & \text{nej} \times \text{absm} \\ & (\text{nej} + \text{cx}) \times \text{absm} \end{aligned}$$

nej

従来から使われた非平衡プラズマの放射モデル、衝突励起や二電子性再結合を考慮

cx

電荷交換反応の放射モデル

absm

中性ガスによる星間吸収モデル

lpro

分散分光によるスペクトルの歪みを天体の輝度分布を読み込んで修正

フィッティングの詳細

温度(kT)、イオン化タイムスケール($n_e t$)、水素柱密度、電荷交換反応の衝突速度を変数に設定

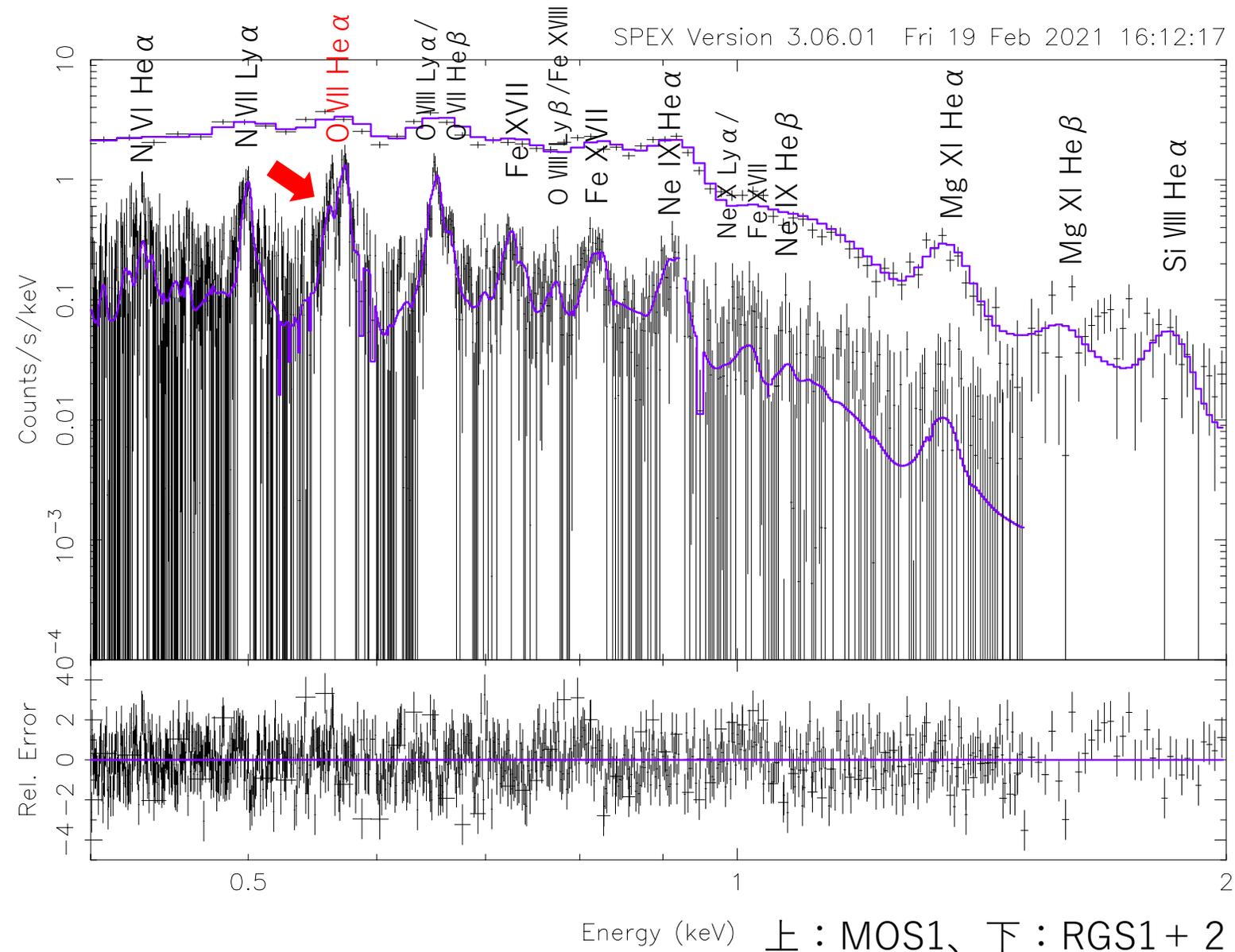
先行研究、XSPECのフィッティングより0.4-2.0 keVで輝線が見えたN, O, Ne, Mg, Si, Feの存在量を変数に設定

親星の元素合成を考慮し、CのOを存在量、FeとNiの存在量を等しくなるように設定、他の元素は太陽組成(1.0)に固定

電荷交換反応は一つのイオンが複数回引き起こすと仮定した(optically thick)

データの量自体が少ないため、ポアソン分布に適用できる最尤法を使用(W statistic)

CX なしでフィッティング

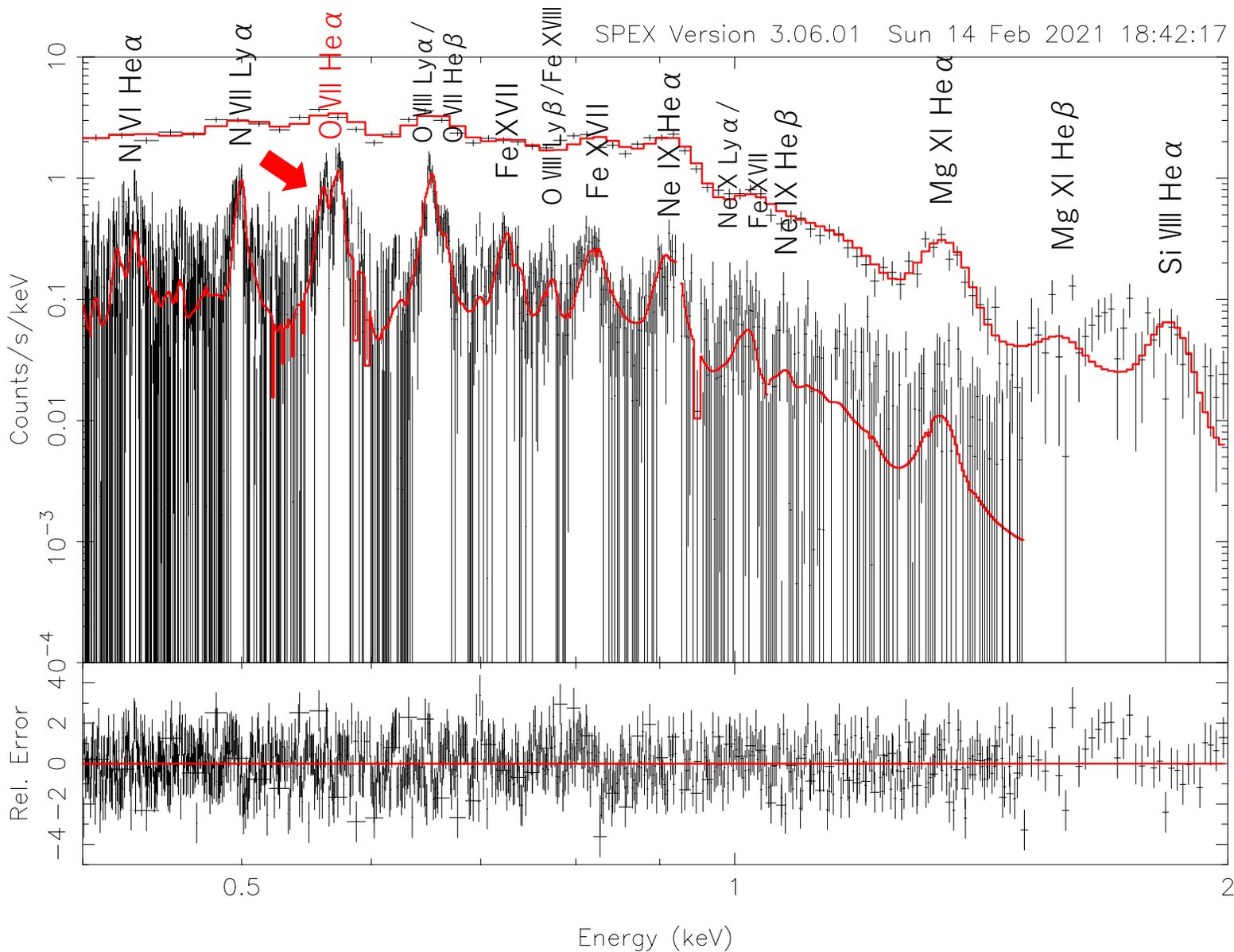


赤矢印 禁制線が弱い
→ 先行研究と同じ

パラメータ	best-fit
温度 [keV]	0.47
イオン化 タイムスケール [$\times 10^{10}$ s/cm ³]	3.1
水素柱密度 [$\times 10^{20}$ /cm ²]	2.7
N	0.68
O	0.26
Ne	0.41
Mg	0.37
Si	0.49
Fe	0.30

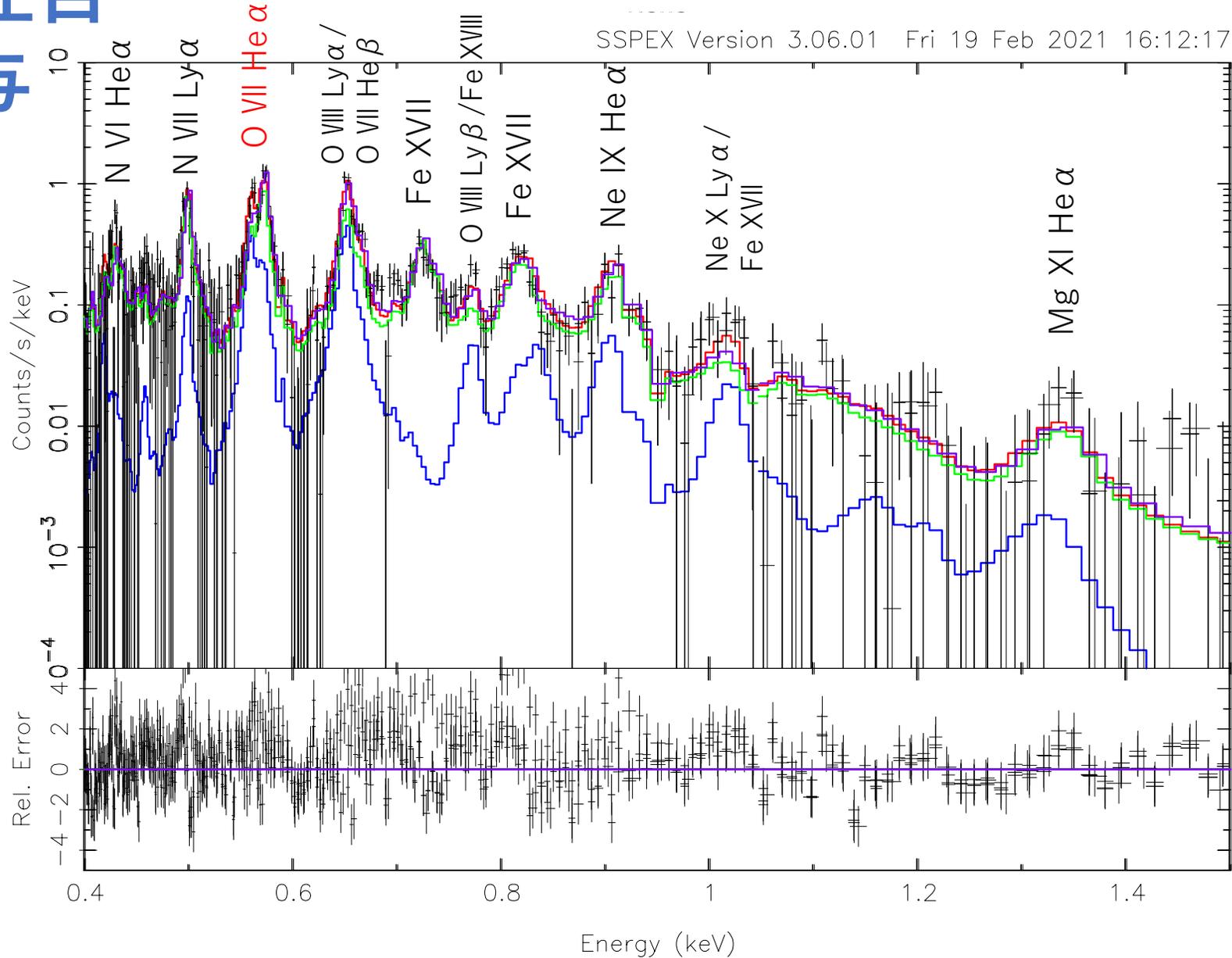
CX込みでフィッティング

禁制線が強く出て、データに近づいた



パラメータ	best-fit
温度[keV]	0.43(+0.04/-0.03)
イオン化 タイムスケール [$\times 10^{10}$ s/cm 3]	3.0(+0.5/-0.4)
水素柱密度 [$\times 10^{20}$ /cm 2]	4.0(+3.0/-2.0)
N	0.58(+0.14/-0.10)
O	0.17(+0.03/-0.03)
Ne	0.32(+0.06/-0.05)
Mg	0.36(+0.08/-0.05)
Si	0.58(+0.19/-0.12)
Fe	0.28(+0.05/-0.04)
衝突速度[km/s]	403(+208/-86)

RGSに注目 cxの寄与

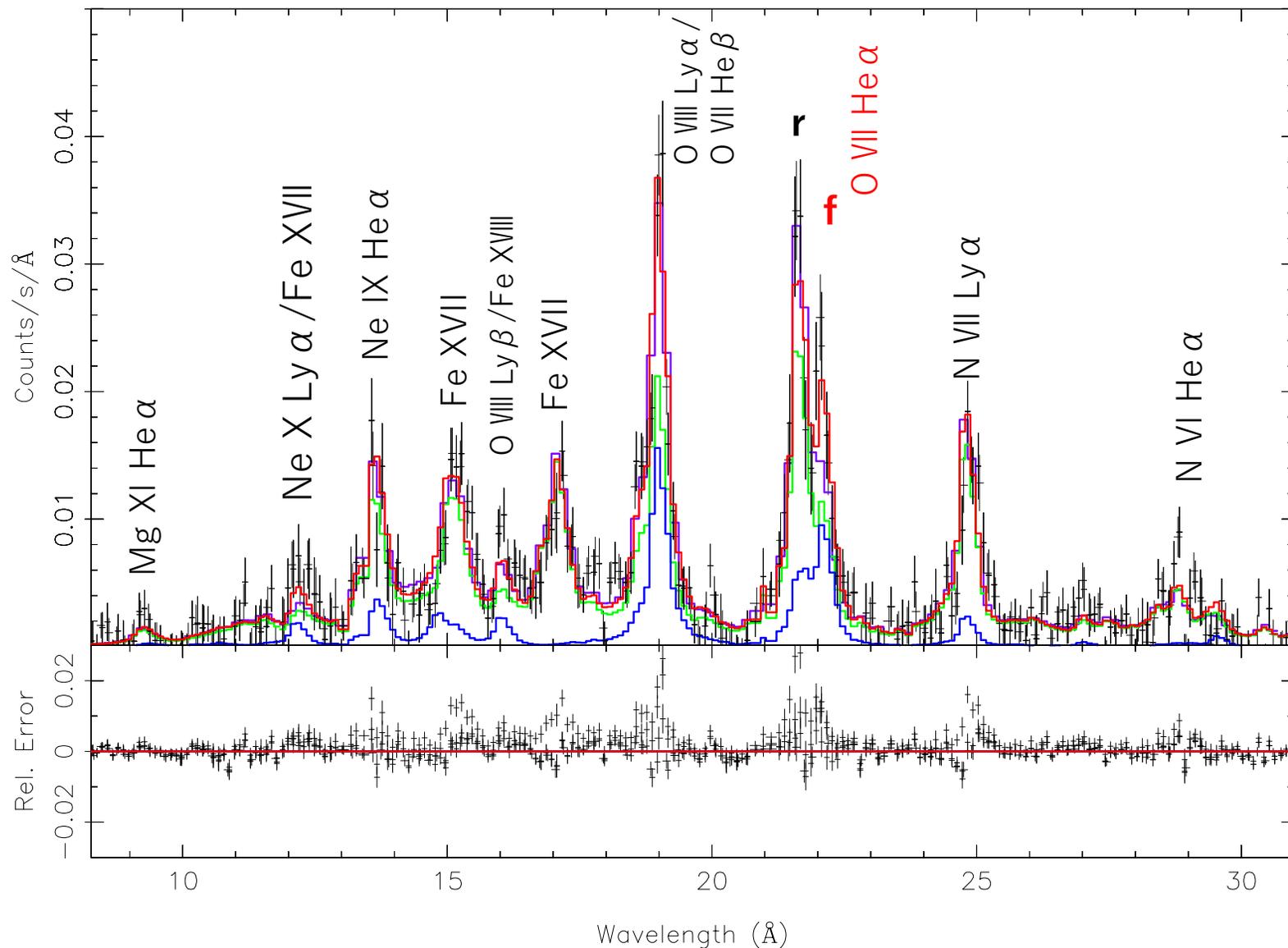


赤: neij + cx
緑: neij成分
青: cx成分
紫: neijのみのfit

cxが強めて
いるのは、
O VII禁制線
O VIII
O VIII Ly β
Ne IX He α
Ne X Ly α

G-ratio

SPEX Version 3.06.01 Sun 14 Feb 2021 18:42:17



赤: neij + cx
緑: neij成分
青: cx成分
紫: neijのみのfit

$$G \equiv \frac{F + I}{R}$$

neij+cxの強度比	0.845
neij成分の強度比	0.477
cx成分の強度比	2.76
neijのみの強度比	0.443

cx成分が禁制線を強めていることがわかった

パラメータ比較

パラメータ	nejのみ	nej+cx	先行研究 (Castro et al.)
温度[keV]	0.47	0.43(+0.04/-0.03)	0.63(+0.04/-0.04)
イオン化 タイムスケール [$\times 10^{10}$ s/cm ³]	3.1	3.0(+0.5/-0.4)	2.6(+2.9/-2.3)
水素柱密度 [$\times 10^{20}$ /cm ²]	2.7	4.0(+3.0/-2.0)	2.0(+1.0/-1.0)
N	0.68	0.58(+0.14/-0.10)	1.85(+0.10/-0.10)
O	0.26	0.17(+0.03/-0.03)	0.61(+0.02/-0.02)
Ne	0.41	0.32(+0.06/-0.05)	1.21(+0.06/-0.05)
Mg	0.37	0.36(+0.08/-0.05)	1.07(+0.09/-0.08)
Si	0.49	0.58(+0.19/-0.12)	×
Fe	0.30	0.28(+0.05/-0.04)	×
衝突速度[km/s]	×	403(+208/-86)	×

nejのみでfitした時の方がO, Neの存在量が多く、cxが強化していたのはO, Neの輝線
→cxを内包してない分存在量を増やして輝線の強度を補ったためか

温度が高く水素柱密度が少なく出た(吸収が少ない)のも輝線を強めようとした可能性

0.4-2.0 keVで顕著な輝線が少ない元素は存在量に不定性が大きい

cxの衝突速度は $\sim 10^2$ km/sか

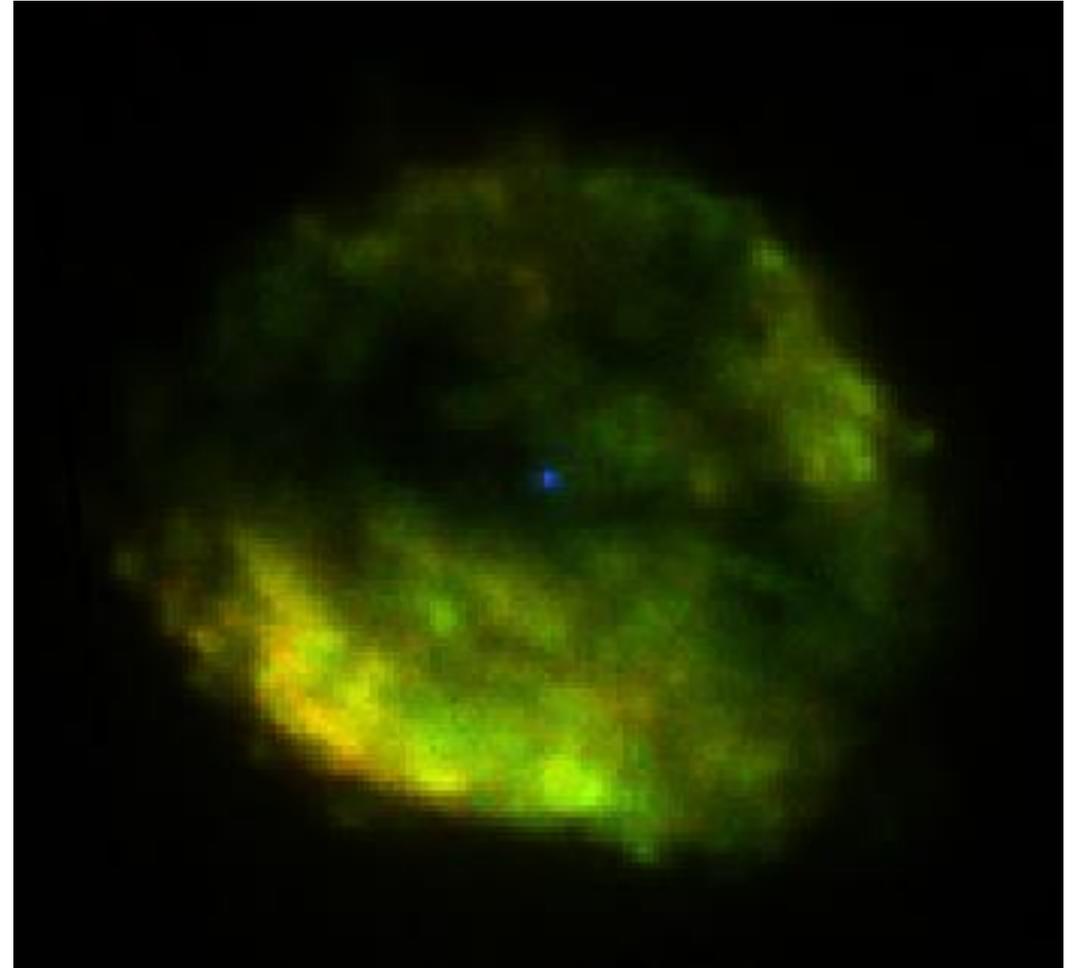
先行研究の元素存在量は左の結果のおよそ2~4倍、温度も高め
→先行研究との解析ソフト、モデルの違いから？
存在量が太陽組成より低いことは他のSNRでも報告されている(Cygnus loop, Puppis A, etc.)

結論

- neijのみの放射モデルでのG-ratioが0.443(データより禁制線が著しく弱かった)
- cxを導入するとG-ratioが0.845になり、データをより再現できた
→電荷交換反応が起こっていることを支持
- 元素組成が先行研究より少ない→複数のSNR研究で指摘されている“low-abundance problem”を解く手がかりか
- 温度も先行研究より低く出た

RCW103の概要

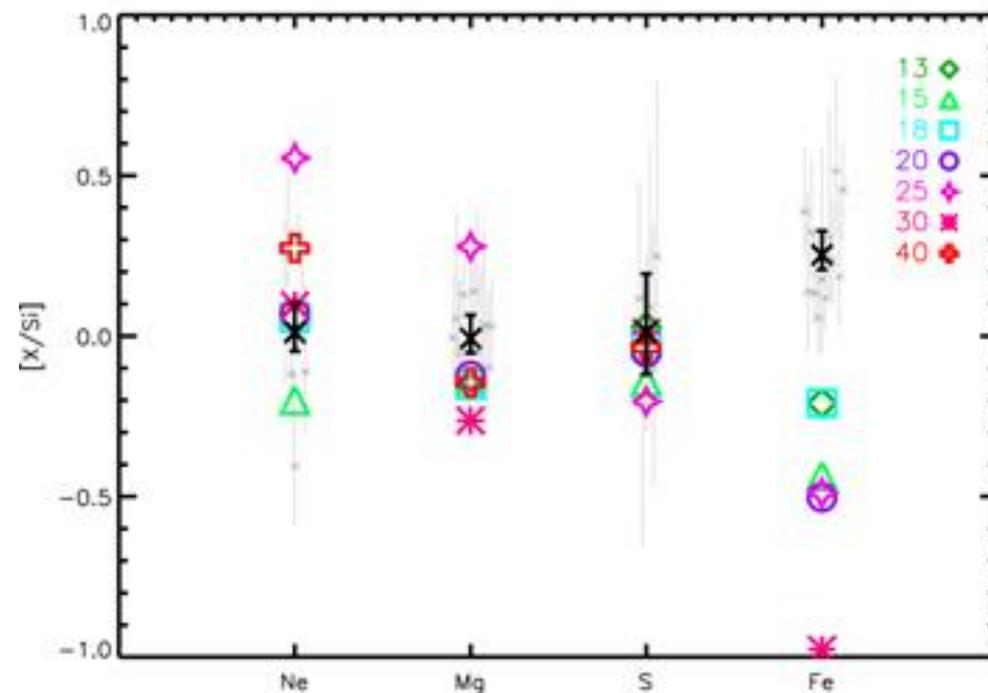
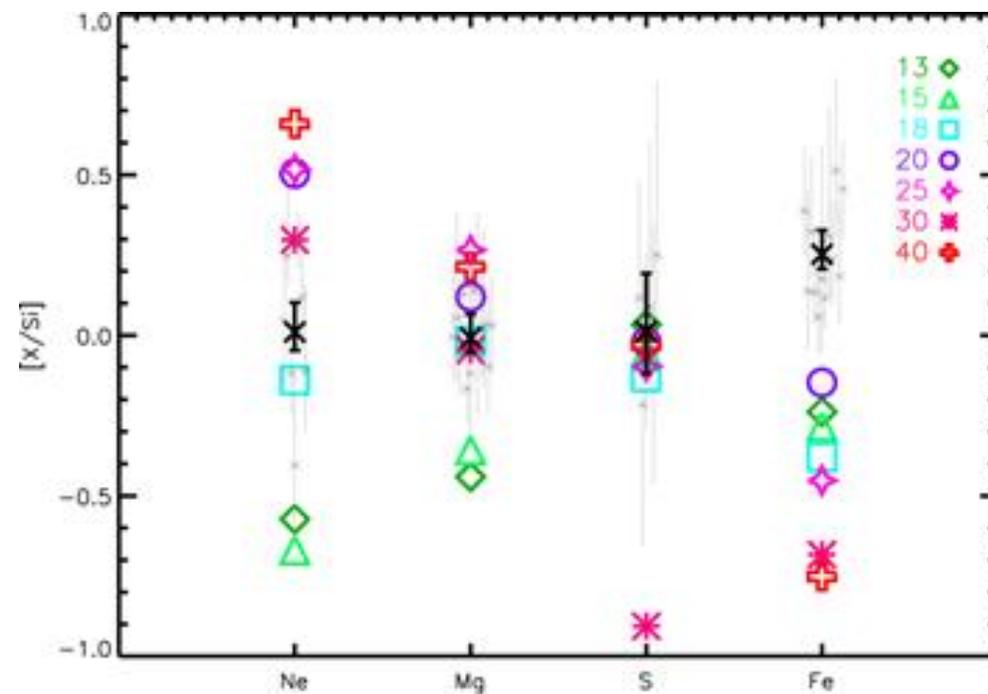
- ・ 距離：3.3kpc
- ・ 年齢： $\sim 2.0 \times 10^3$ yr
- ・ SN：重力崩壊型
- ・ 半径：10分角
- ・ 中心に非常に長い変動周期（6.67時間）をもつマグネターが存在する



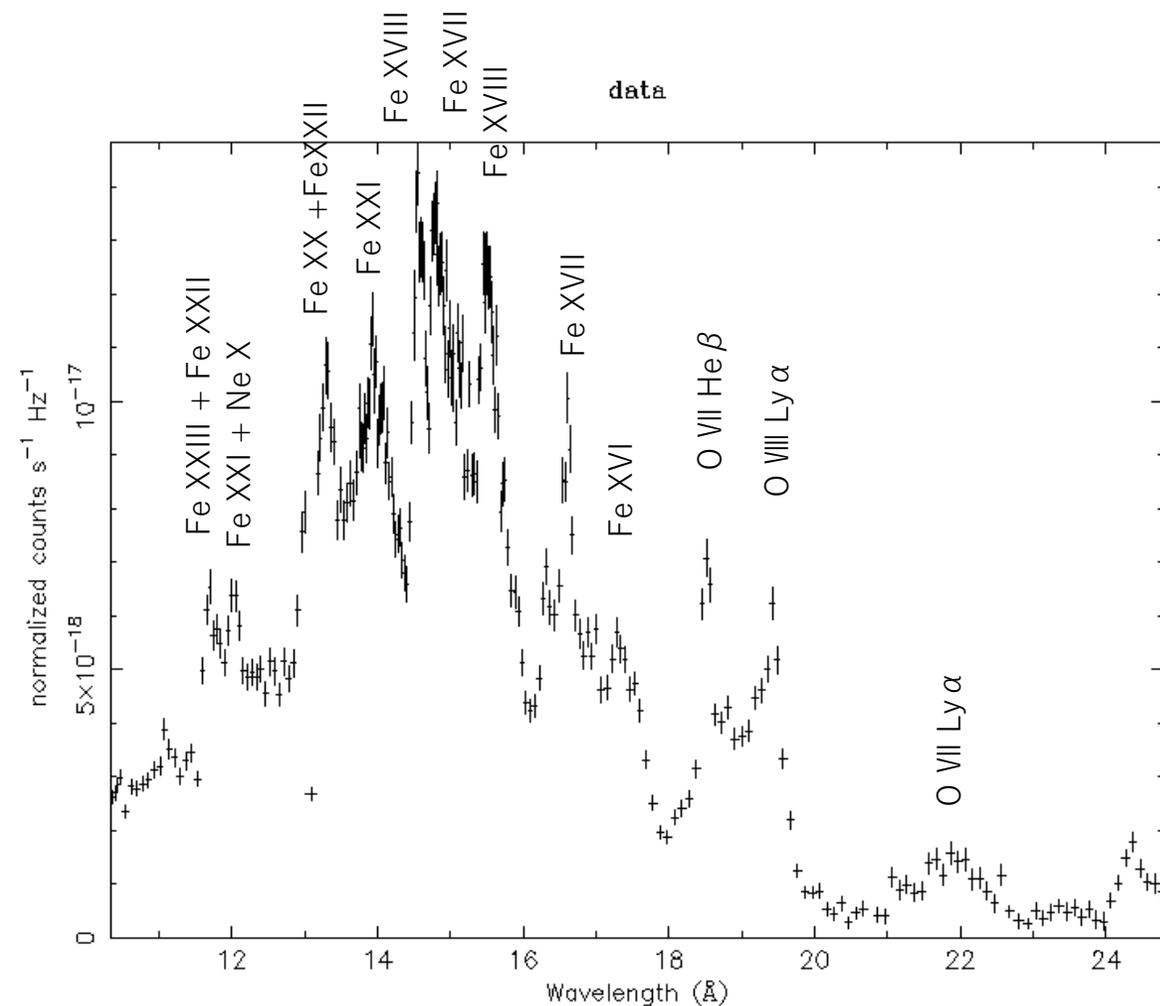
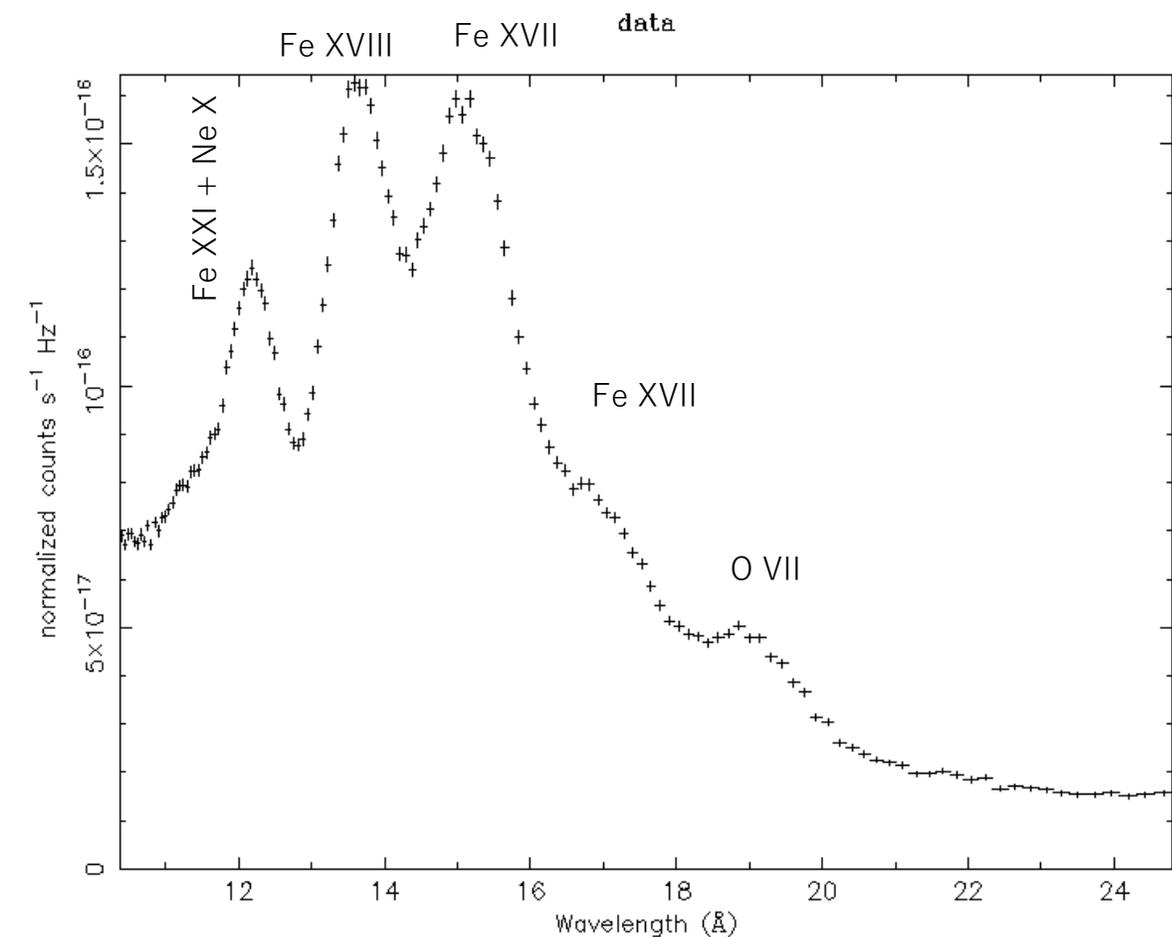
先行研究

- Ne、Mg、Sの存在比は18–20M \odot のモデルに適合する
- Feの存在比はこのモデルに適合しない
- 先行研究の段階ではFeの存在比の多さがこの天体特有なものかどうか分かっていない。

(右図)
et al Nomotoによる各元素の存在比とRCW103の元素存在比の比較
(et al A.frank)



EPICからRGSへ

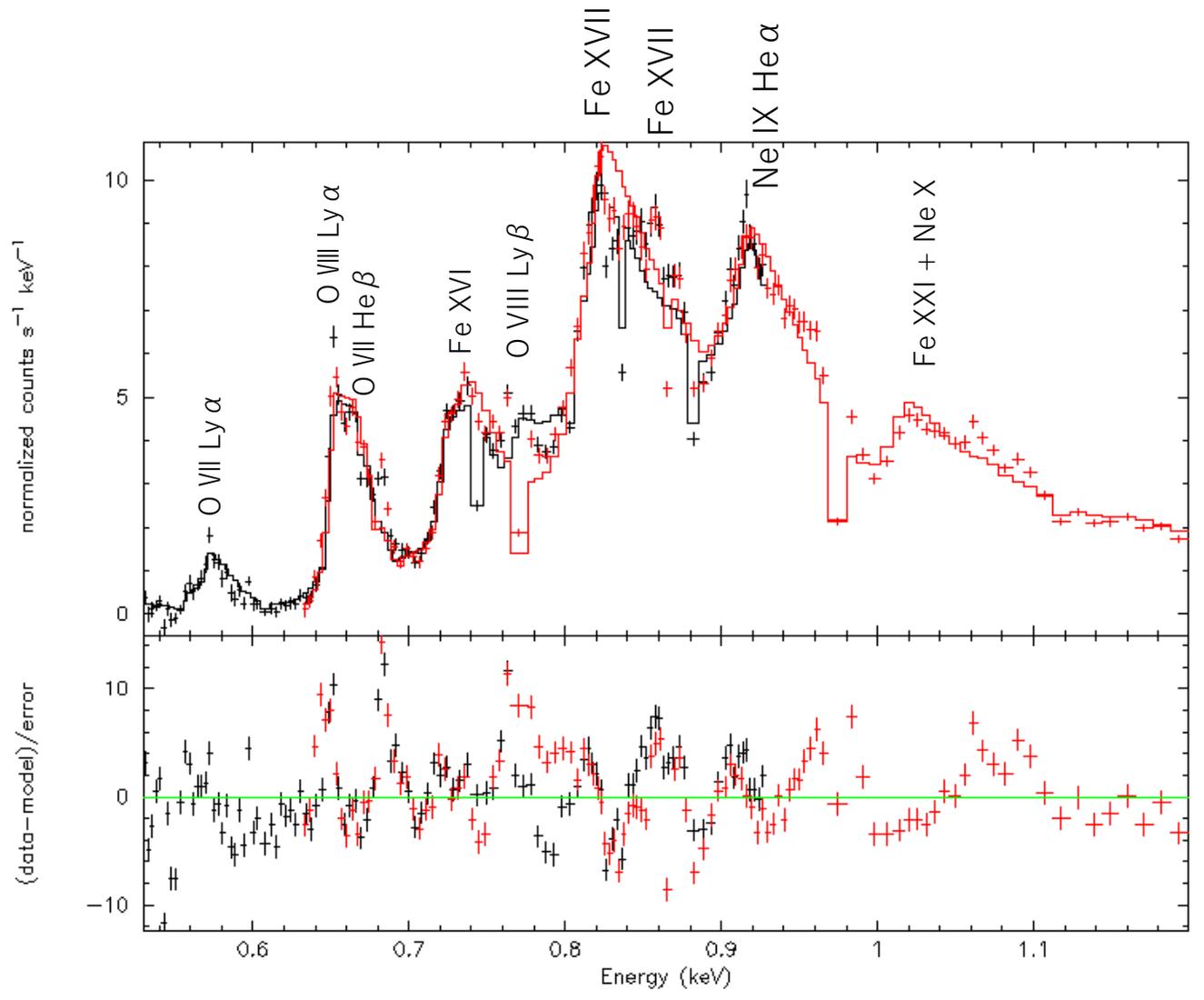


- CCDカメラに比べて、RGSのほうがより詳しく輝線を調べられる。
- RGSで輝線を解析することでFeの存在比を決めたい。

フィッティング結果

モデル $\text{tbabs}^*(\text{vnei}+\text{vnei})$
吸収モデル 非平衡プラズマモデル

- 2温度成分でモデルフィット
- 鉄の輝線においてうまくフィットできなかった。
- 温度、O,Ne,Feの
アバンドランスを変数に設定。



考察

- O, Ne, Feについて存在比を比較。
- O, Neは先行研究の他の元素と同様に $18M_{\odot}$ の超新星を示す結果となった。
- Feに関して先行研究と同様に、他の元素に比べて存在比が大きいことが分かった。

パラメータ	低温	高温
温度[keV]	0.18(± 0.002)	0.79(± 0.05)
イオン化 タイムスケール [$\times 10^{10}$ s/cm ²]	3.8×10^3 (± 1.00)	7.9(± 2.0)
水素柱密度 [$\times 10^{20}$ /cm ²]	0.95	0.95
O	0.24(± 0.04)	0.98(± 0.46)
Ne	0.25(± 0.07)	1.63(± 1.18)
Fe	1.4(± 0.26)	2.40(± 1.61)

	O	Ne	Fe
log(X/Si)	-0.07	0.14	0.31
先行研究		~ 0.02	~ 0.3
モデル	~ 0.05	~ 0.1	
質量	$18M_{\odot}$	$18M_{\odot}$	

今後の課題

- フィットティングを改善して
元素存在比を正確に求める。
- 鉄の存在量が多いことを説明する
モデルを考える。