

2018 年度 修士論文

非対称 SNR G350.1-0.3 におけるイジェクタ  
噴出速度の測定  
Measurement of ejecta velocity in an irregular  
galactic supernova remnant G350.1-0.3

理学研究科 物理学専攻

学籍番号 17LA012Z

湯澤 洋治

指導教員 内山泰伸

## 1 概要

概要

## 目次

<b>1</b>	<b>概要</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>超新星爆発</b>	<b>4</b>
2.1	恒星内部の核融合反応	4
2.2	超新星	4
2.3	非球対称な超新星爆発	4
<b>3</b>	<b>超新星残骸</b>	<b>4</b>
3.1	導入	4
3.2	光学的に薄いプラズマ	4
3.3	超新星残骸における物理現象	4
<b>4</b>	<b>超新星残骸 G350.1-0.3</b>	<b>5</b>
4.1	概要	5
<b>5</b>	<b>Chandra X 線観測衛星</b>	<b>5</b>
5.1	概要	5
5.2	ACIS	5
5.3	HRMA	5
5.4	エネルギー分解能	5
5.5	エネルギー分解能のキャリブレーション不定性	5
<b>6</b>	<b>Chandra による X 線解析</b>	<b>5</b>
6.1	イメージ解析	6
6.2	スペクトル解析	7
<b>7</b>	<b>議論</b>	<b>13</b>
7.1	イジェクタの視線方向の速度	13
7.2	プラズマの年齢依存性	13
7.3	エネルギー中心値における温度・電離パラメーター依存性	13
7.4	輝線のエネルギー中心値シフトのシナリオの検証	15
7.5	非球対称超新星爆発モデルとの比較	15
<b>8</b>	<b>今後の展望</b>	<b>15</b>
8.1	ひとみ代替機による観測シミュレーション	15
8.2	時間変動解析	15

## 2 超新星爆発

### 2.1 恒星内部の核融合反応

### 2.2 超新星

### 2.3 非球対称な超新星爆発

## 3 超新星残骸

### 3.1 導入

### 3.2 光学的に薄いプラズマ

### 3.3 超新星残骸における物理現象

## 4 超新星残骸 G350.1-0.3

### 4.1 概要

G350.1-0.3 は (RA,Dec)=(17h21m05s,-37°.27) に位置する年齢 1000–2000 歳の若い超新星残骸である。これまで赤外、電波及び X 線で観測されており、それぞれの波長でその特異な形状が異なることが確認されている。日本の X 線観測衛星すざくによる観測 (2) では、鉄より大きな質量の Ni が検出されており、非対称な爆発がスペクトル解析から示唆されている。また、本天体は Fig4.1 のように極端に非対称な形状をとっていることから、超新星爆発における非対称性を噴出物の分布を引き起こすメカニズムに迫るための重要な天体の 1 つだと考えられる。



Fig. 4.1: 超新星残骸 G350.1-0.3 のイメージ

X-ray (Gold) Infrared 24 micron (Cyan) Infrared 8 micron (Purple) Infrared 3.6 micron (Green)

## 5 Chandra X 線観測衛星

### 5.1 概要

### 5.2 ACIS

### 5.3 HRMA

### 5.4 エネルギー分解能

### 5.5 エネルギー分解能のキャリブレーション不定性

## 6 Chandra による X 線解析

今回、Chandra によって、table.6 に示すデータと NASA が提供する CIAO(version 4.9)、Xspec(version 12.9) を使用し、解析を行った。

観測日時	Observation ID	観測機器	観測時間
2009 年 5 月 21 日	10102	ACIS-S	82.97 ks

Tab. 6.1: 本研究に用いた観測データ

## 6.1 イメージ解析

ドップラーシフトの解析を行う領域を決定するために、Si,S の輝線に対して、平均でどれくらいのエネルギーの光子が到来しているのかを示す Mean Photon Energy Map(MPE map) を作成した。MPE map を作成する際は検出器の各ピクセルに以下のような計算を行い、光子の平均エネルギーを求めた。

$$E_{mean} = \frac{\sum_i E_i I_i}{\sum_i I_i} \quad (6.1)$$

Si,S の輝線に対して作成した MPE map を以下の Fig.6.1 に示す。

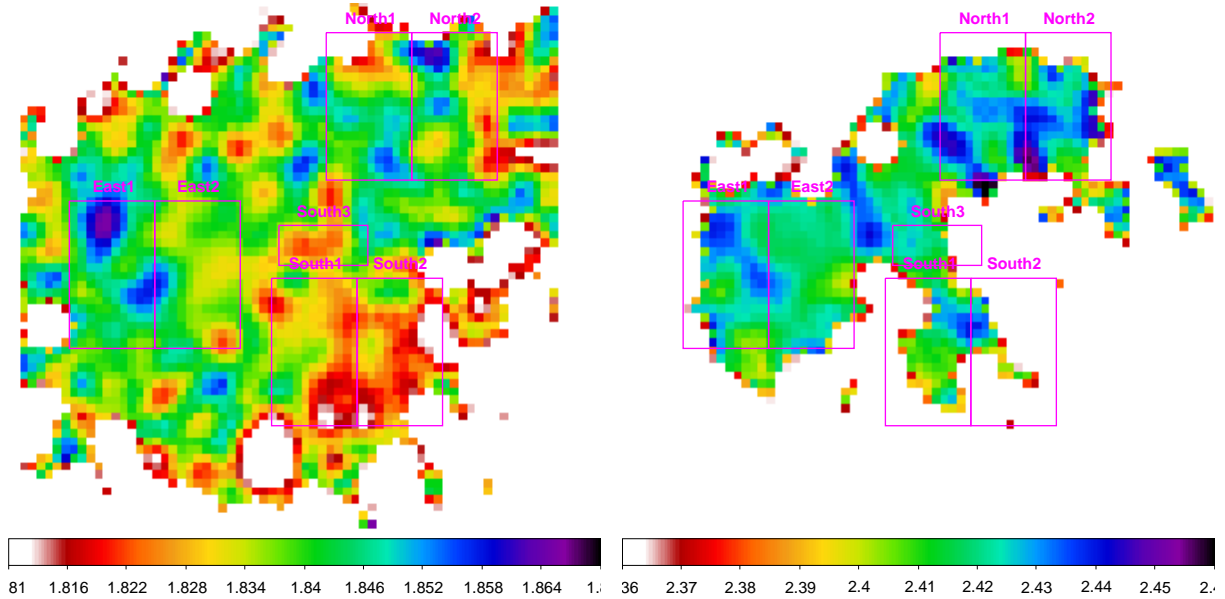


Fig. 6.1: 左図 : Si の Mean photon energy map(1.6-2.1 keV を 35bands ~ 15keV/band に分けて作成した)、右図 : S の Mean photon energy map(2.2-2.7 keV を 34bands ~ 15keV/band に分けて作成した)、どちらも 1pixel ~ 4arcsec、かつ、 $\sigma \sim 12\text{arcsec}$  でスムージングをかけてある。

さらに、輝線の幅の広がりイメージとして表すために Si と S の Mean photon energy standard deviation map をそれぞれ 1.6-2.1 keV を 35bands 15keV/band に分けて作成したものが以下の Fig.6.2 である。Fig.6.2(=  $S$ ) は式 6.2 をもとに作成した。

$$S = \sqrt{\frac{\sum_i n_i (E_i - \bar{E})^2}{\sum_i n_i}} = \sqrt{\frac{\sum_i n_i E_i^2}{\sum_i n_i} - (\bar{E})^2} \quad (6.2)$$

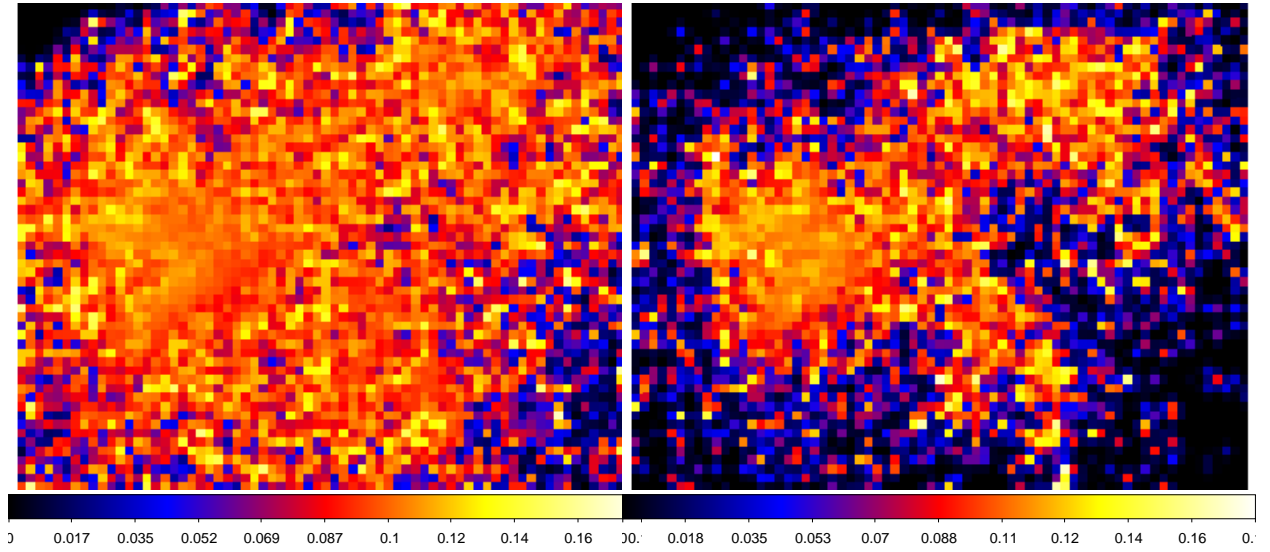


Fig. 6.2: 左図: Si の Mean photon energy standard deviation map(1.6-2.1 keV を 35bands  $\sim$  15keV/band に分けて作成した)、右図: S の Mean photon energy standard deviation map(2.2-2.7 keV を 34bands  $\sim$  15keV/band に分けて作成した)、どちらも 1pixel  $\sim$  4arcsec、かつ、 $\sigma \sim$  8arcsec でスムージングをかけてある。

Fig.6.1 から、この SNR では、南側が青方偏移、北側が赤方偏移の傾向があることがわかる。よって、Fig.6.1 に示すように東、南、北側をそれぞれ、East1,East2,South1,South2,North1,North2,North3 に領域を分割した。本研究では、これらの領域のスペクトル解析を行うことでイジェクタの視線方向の移動速度の計測を行う。

## 6.2 スペクトル解析

SNR のそれぞれの領域のスペクトルを Fig.6.3 に示す。Fig.6.3 から Si,S が偏移していることがわかる。

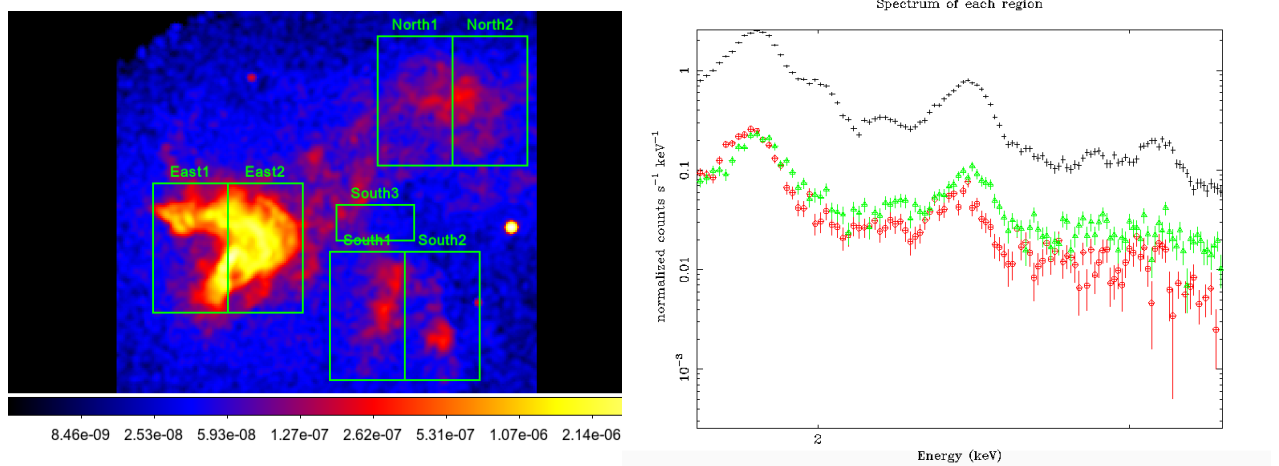


Fig. 6.3: 左図: Chandra による G350.1-0.3 のフラックスイメージ(0.5 – 8.0 keV)、右図: Chandra による SNR の各領域のスペクトル(1.7 – 3.4 keV) 黒線 (マーカー:+) :東側のスペクトル、赤線 (○) : 南側のスペクトル、緑線 (△) : 北側のスペクトル

これらのスペクトルをイジェクタのアバンダンスを確かめるために tbabs $\times$ vnei、ドップラーシフトの検

証のために  $\text{tbabs} \times (\text{bremss} + \text{gaussian})$  と  $\text{tbabs} \times (\text{bremss} + \text{zgaussian})$  を用いて、解析を行った。それぞれの領域のスペクトルを Fig.、解析結果を table. に示す。

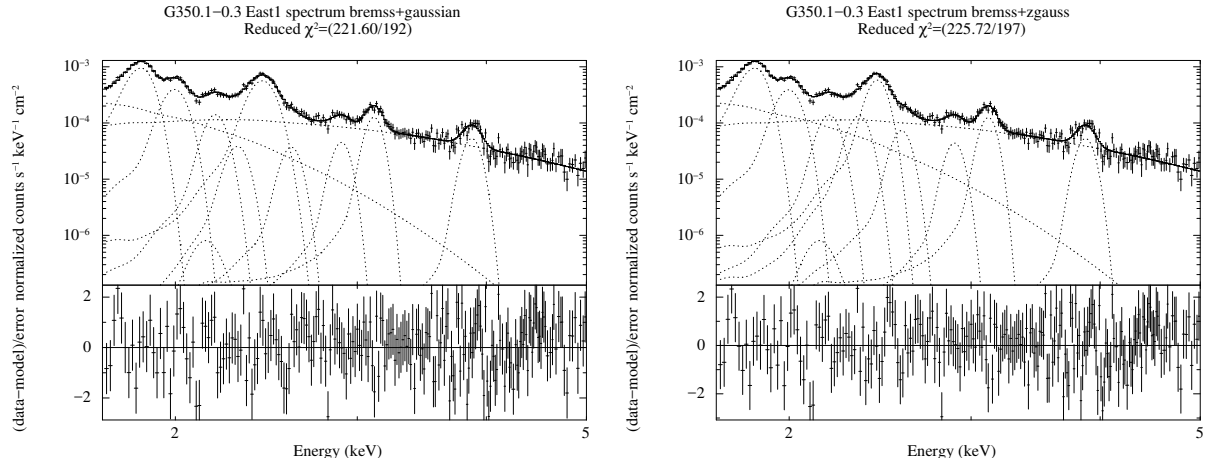


Fig. 6.4: 左図 : East1 領域を  $\text{tbabs} \times (\text{bremss} + \text{gaussian})$  を用いてフィッティングを行なったスペクトルとモデルとの  $\chi$  の値、右図 : East1 領域を  $\text{tbabs} \times (\text{bremss} + \text{zgaussian})$  を用いてフィッティングを行なったスペクトルとモデルとの  $\chi$  の値

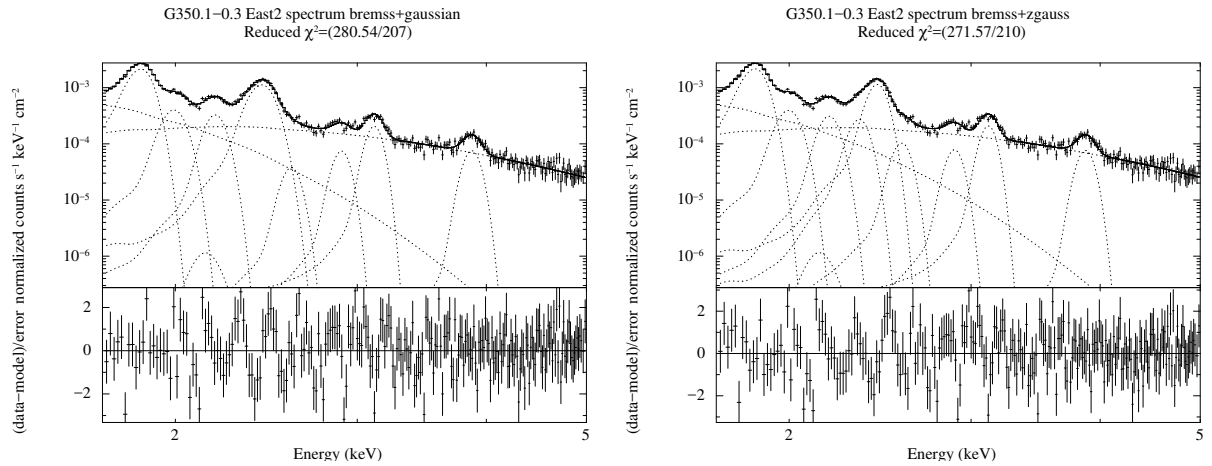


Fig. 6.5: 左図 : East2 領域を  $\text{tbabs} \times (\text{bremss} + \text{gaussian})$  を用いてフィッティングを行なったスペクトルとモデルとの  $\chi$  の値、右図 : East2 領域を  $\text{tbabs} \times (\text{bremss} + \text{zgaussian})$  を用いてフィッティングを行なったスペクトルとモデルとの  $\chi$  の値



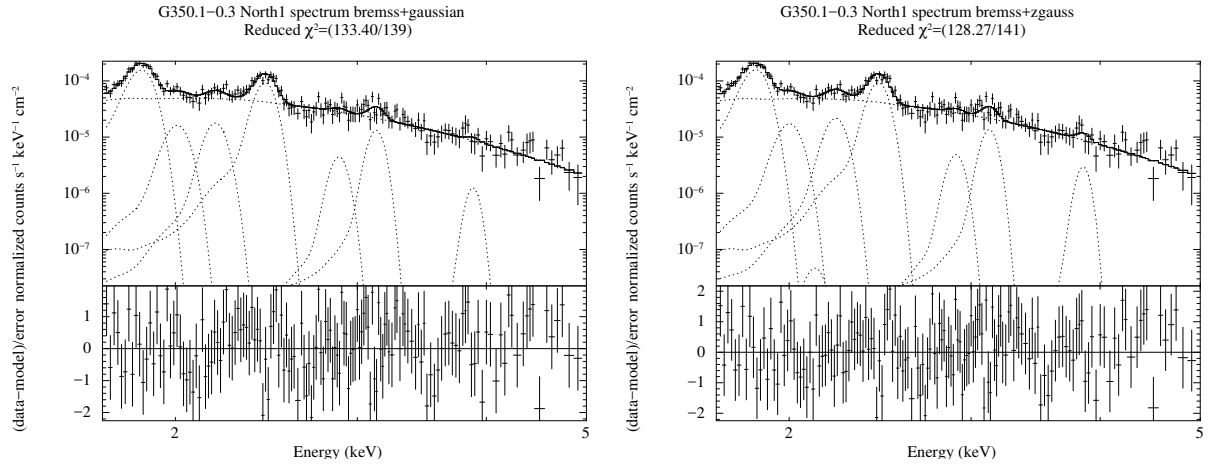


Fig. 6.6: 左図 : North1 領域を  $\text{tbabs} \times (\text{brems} + \text{gaussian})$  を用いてフィッティングを行なったスペクトルとモデルとの  $\chi$  の値、右図 : North1 領域を  $\text{tbabs} \times (\text{brems} + \text{zgaussian})$  を用いてフィッティングを行なったスペクトルとモデルとの  $\chi$  の値

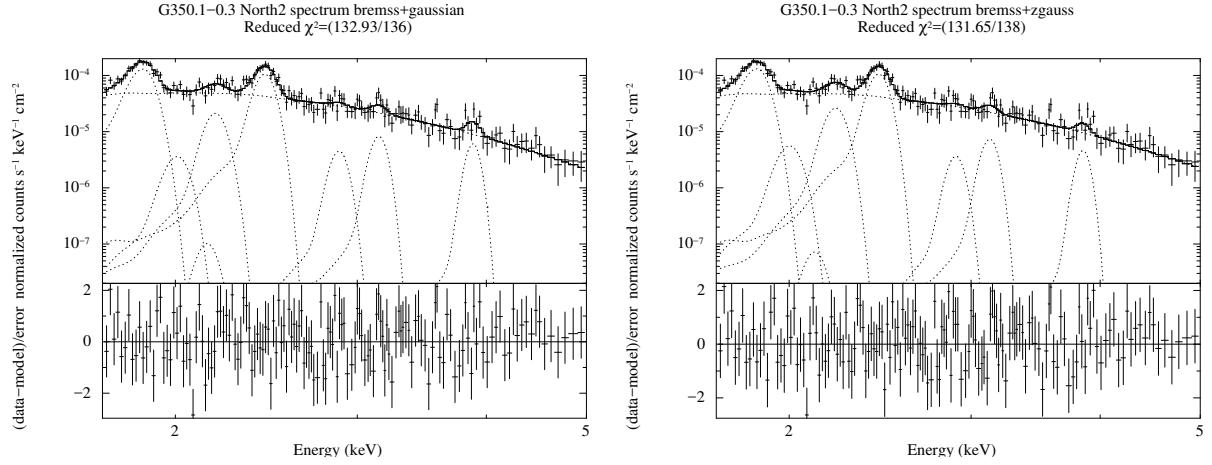


Fig. 6.7: 左図 : North2 領域を  $\text{tbabs} \times (\text{brems} + \text{gaussian})$  を用いてフィッティングを行なったスペクトルとモデルとの  $\chi$  の値、右図 : North2 領域を  $\text{tbabs} \times (\text{brems} + \text{zgaussian})$  を用いてフィッティングを行なったスペクトルとモデルとの  $\chi$  の値

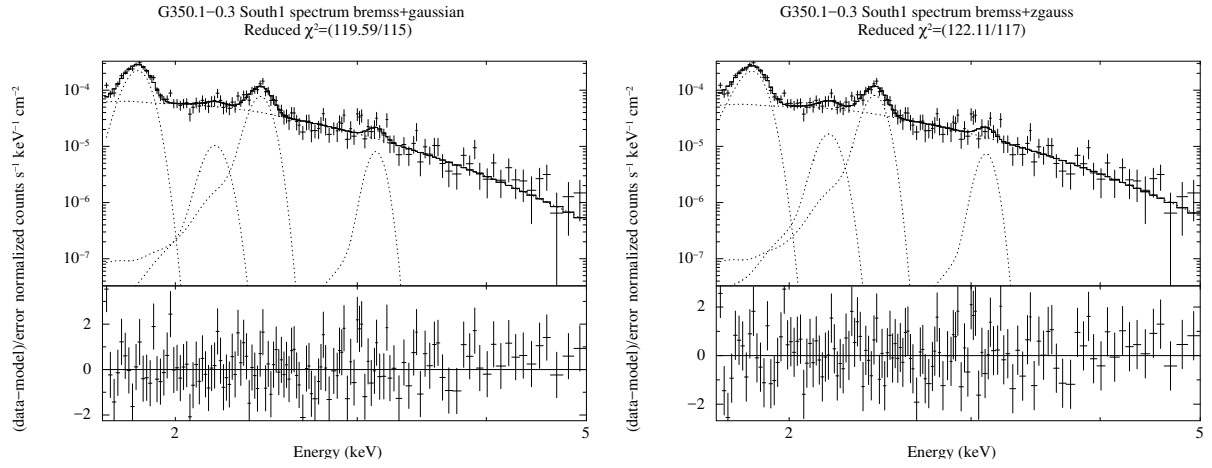


Fig. 6.8: 左図 : South1 領域を  $\text{tbabs} \times (\text{brems} + \text{gaussian})$  を用いてフィッティングを行なったスペクトルとモデルとの  $\chi$  の値、右図 : South1 領域を  $\text{tbabs} \times (\text{brems} + \text{zgaussian})$  を用いてフィッティングを行なったスペクトルとモデルとの  $\chi$  の値

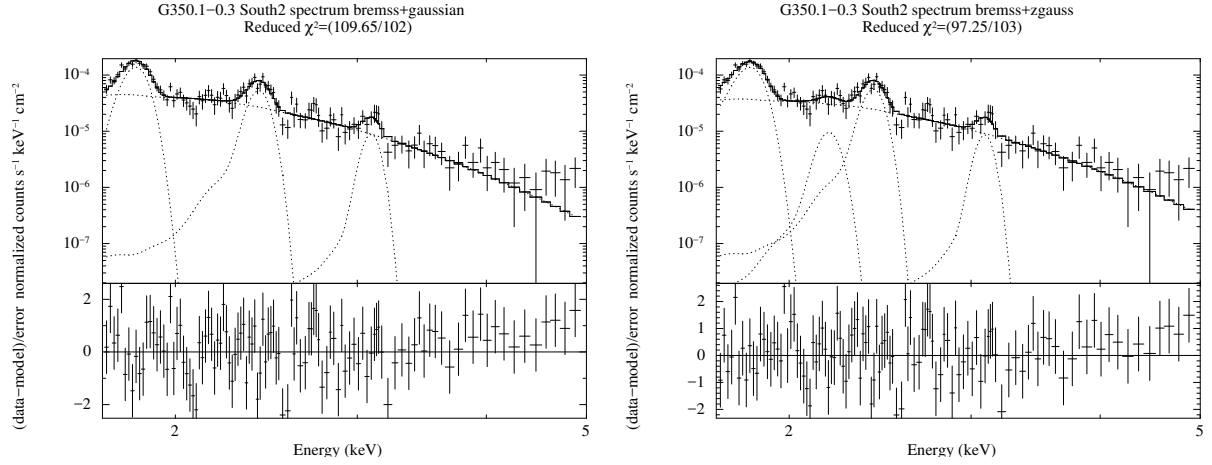


Fig. 6.9: 左図 : South2 領域を  $\text{tbabs} \times (\text{brems} + \text{gaussian})$  を用いてフィッティングを行なったスペクトルとモデルとの  $\chi$  の値、右図 : South2 領域を  $\text{tbabs} \times (\text{brems} + \text{zgaussian})$  を用いてフィッティングを行なったスペクトルとモデルとの  $\chi$  の値

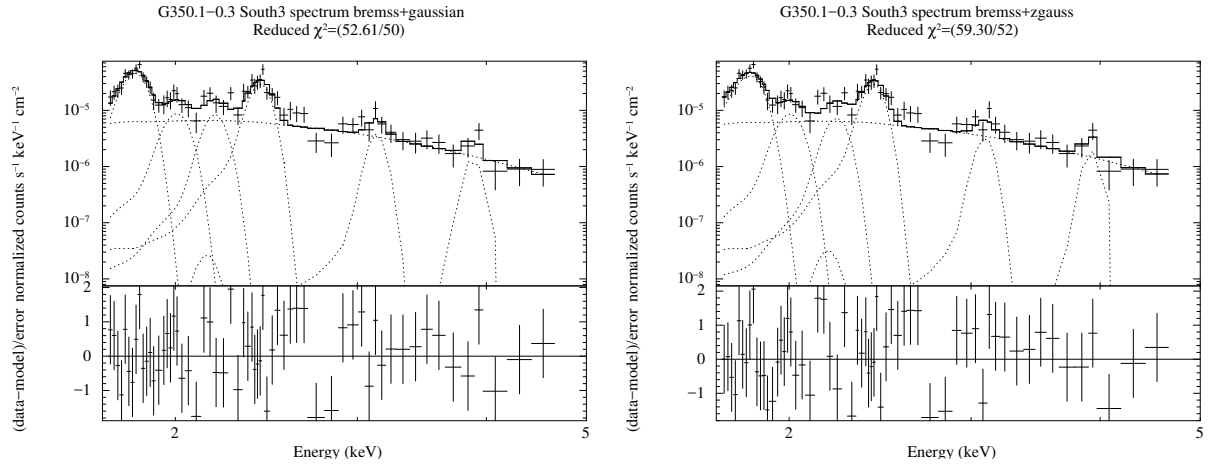


Fig. 6.10: 左図 : South3 領域を  $tbabs \times (brems + gaussian)$  を用いてフィッティングを行なったスペクトルとモデルとの  $\chi$  の値、右図 : South3 領域を  $tbabs \times (brems + zgaussian)$  を用いてフィッティングを行なったスペクトルとモデルとの  $\chi$  の値

ドップラーシフトの他に、プラズマの状態に関する情報を得るために  $tbabs * (vnei)$  または  $tbabs * (apec + vnei)$  を用いた解析も行なった。

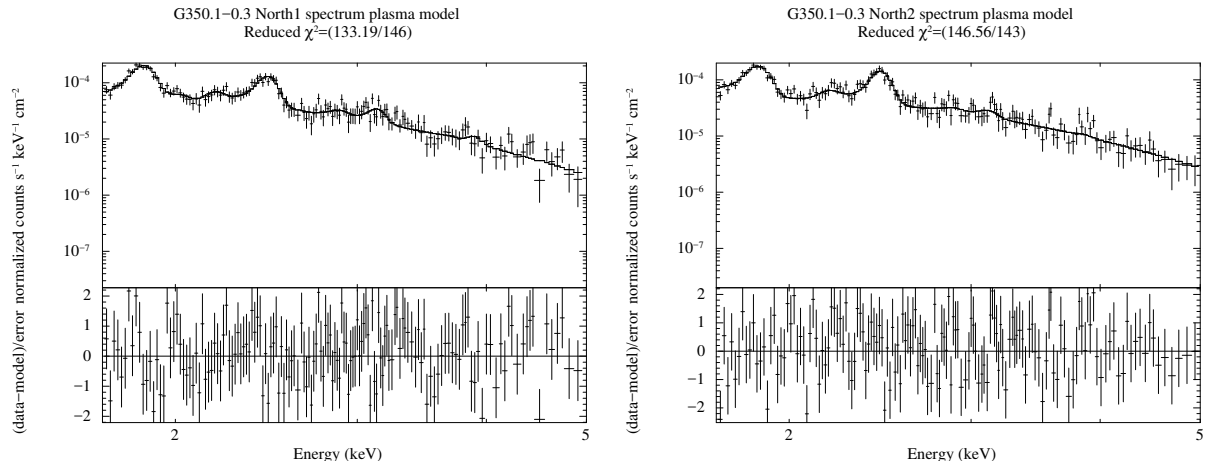


Fig. 6.11: 左図 : North1 領域を  $tbabs \times vnei$  を用いてフィッティングを行なったスペクトルとモデルとの  $\chi$  の値、右図 : North2 領域を  $tbabs \times vnei$  を用いてフィッティングを行なったスペクトルとモデルとの  $\chi$  の値

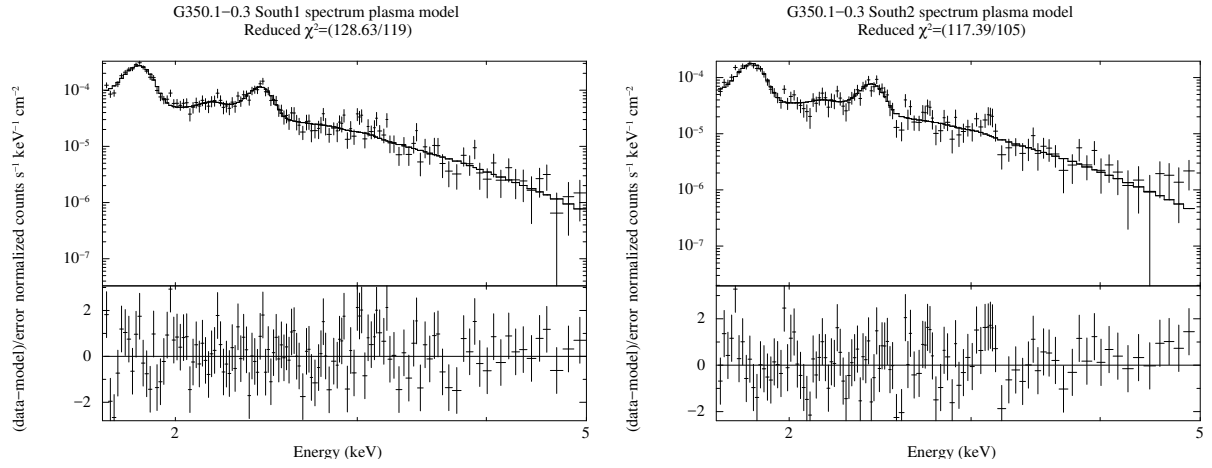


Fig. 6.12: 左図 : South1 領域を  $\text{tbabs} \times \text{vnei}$  を用いてフィッティングを行なったスペクトルとモデルとの  $\chi$  の値、右図 : South2 領域を  $\text{tbabs} \times \text{vnei}$  を用いてフィッティングを行なったスペクトルとモデルとの  $\chi$  の値

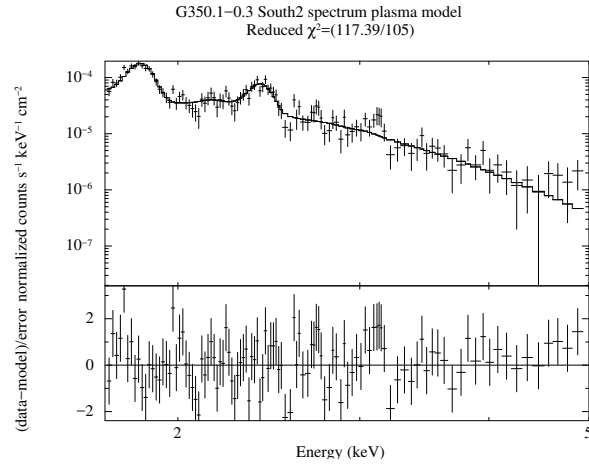


Fig. 6.13: South3 領域を  $\text{tbabs} \times \text{vnei}$  を用いてフィッティングを行なったスペクトルとモデルとの  $\chi$  の値

## 7 議論

### 7.1 イジェクタの視線方向の速度

スペクトル解析から求められたエネルギー中心値と以下の式 7.1 を用いて、イジェクタの視線方向の速度を求めたところ、Fig.7.1 のようになった。

$$\frac{v}{c} = \frac{|E - E_0|}{E_0} \quad (7.1)$$

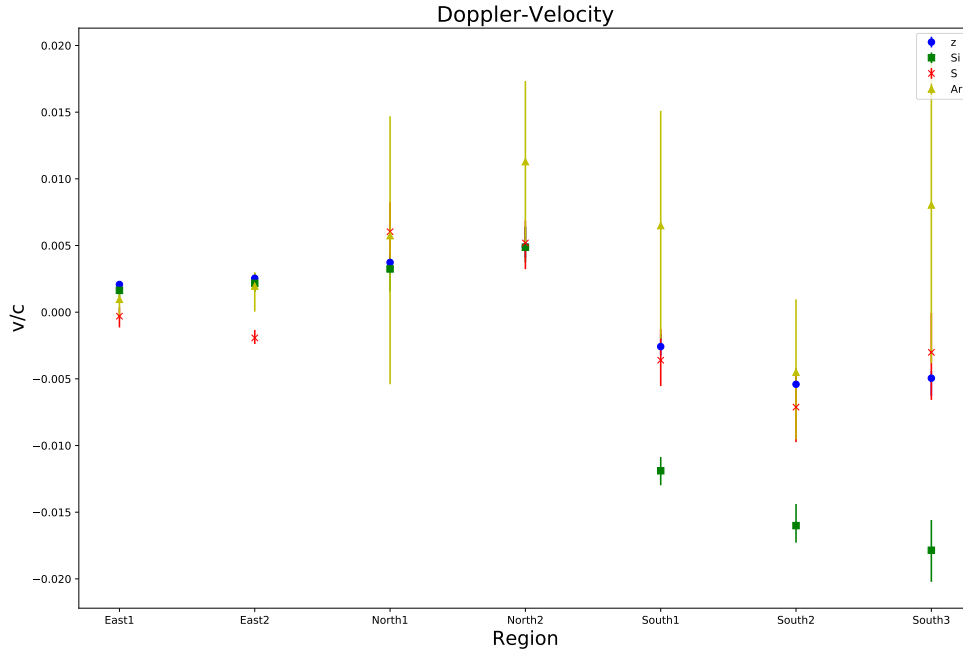


Fig. 7.1: ドップラー効果から求めた東側の放射領域に対する各元素の速度

Fig.7.1 から、この SNR の北側が観測者に対して近づく方向に、南側は遠ざかる方向に運動していることが示唆される。この結果から、2pc の大きさをもつ巨大なプラズマ塊が北側と南側でそれぞれ視線方向に対して、km/s、km/s ではないかと考えられる。

### 7.2 プラズマの年齢依存性

### 7.3 エネルギー中心値における温度・電離パラメーター依存性

輝線のエネルギー中心がプラズマの元々の電子温度および電離パラメーターに依存している可能性があるため、Xspec の fakeit コマンドを用いて作成した温度と電離パラメーターがそれぞれ ( $n_e t = 1e + 9s/cm^3$  kT = 0.6keV)、( $n_e t = 1e + 10s/cm^3$  kT = 0.6keV)、( $n_e t = 1e + 9s/cm^3$  kT = 0.6keV) でプラズマの Si – He $\alpha$  のエネルギー中心と観測値を比較してみる。その結果を Fig.7.2 に示す。合わせて、赤方偏移  $z$  と  $n_e t$ 、 $kT$  の関係、 $n_e t$  と  $kT$  の関係を Fig.?? に示す。

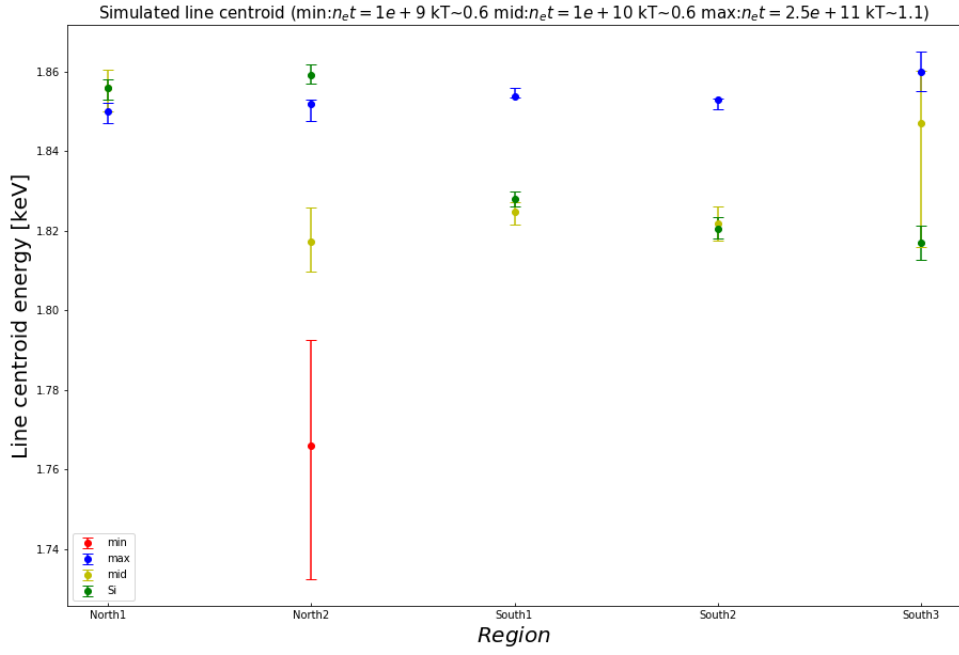


Fig. 7.2: 観測値とシミュレーションスペクトルのエネルギー中心値の比較。シミュレーションスペクトルはそれぞれ  $n_e t = 1e+9s/cm^3 \text{ kT} = 0.6\text{keV}$ 、 $n_e t = 1e+10s/cm^3 \text{ kT} = 0.6\text{keV}$ 、 $n_e t = 1e+9s/cm^3 \text{ kT} = 0.6\text{keV}$

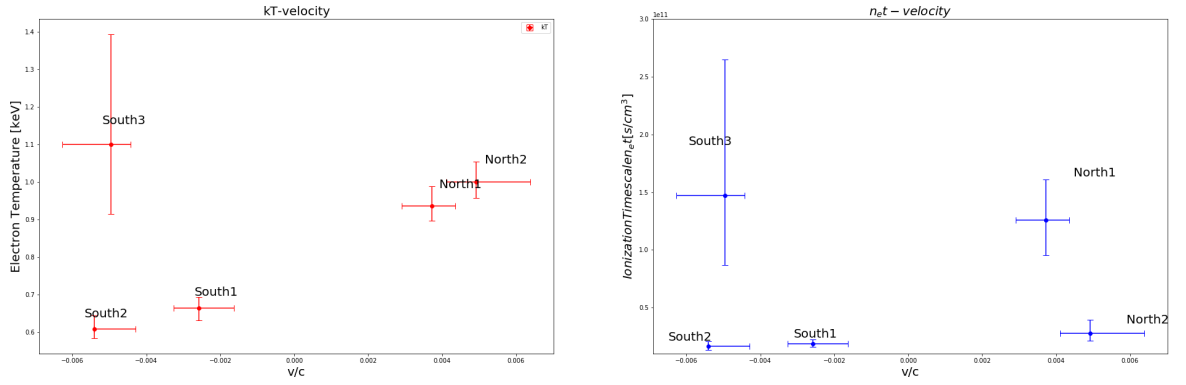
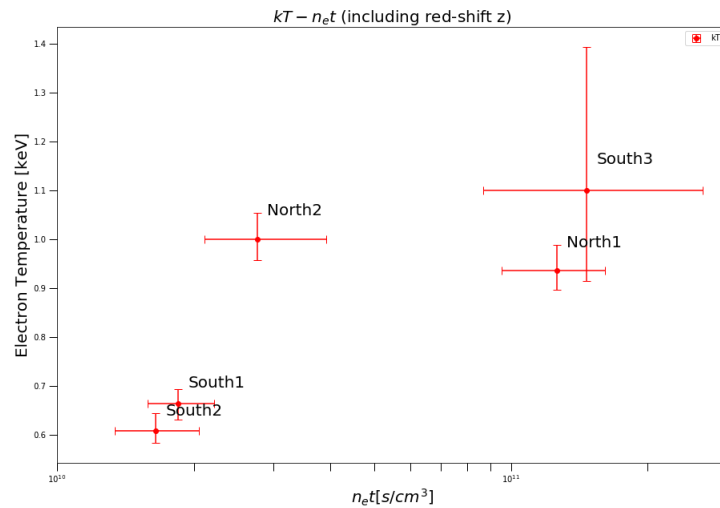


Fig. 7.3:



これらの結果から、North2 領域では、プラズマモデルから予想されるよりもエネルギー中心値が大きく、South2、South3 領域では小さい値を取っていることがわかる。さらに、North1 では max と mid でエネルギー中心値がほとんど同じ値を取っていることから、North1 では、ある程度の電離度以上でエネルギー中心値に変化がないことも考えられる。よって、North1 もドップラーシフトを捕らえられているのではないかと考えることができる。South3 は、実際にプラズマが取っている電子温度・電離パラメーターは今回のシミュレーションにしようした値よりも大きいので、このプラズマから観測されるエネルギー中心値は Fig.7.2 よりも大きくなることが予想される。このことから、これらの領域ではイジェクタが視線方向に運動していることが強く示唆される。

#### 7.4 輝線のエネルギー中心値シフトのシナリオの検証

#### 7.5 非球対称超新星爆発モデルとの比較

### 8 今後の展望

#### 8.1 ひとみ代替機による観測シミュレーション

#### 8.2 時間変動解析

### 参考文献

- ・ Toshiaki Sato 博士論文 2018
- ・ Hayato, A. et al. 2010, Apj, 725, 894
- ・ Yasumi, M. et al. 2014, Pasj, 66, 68
- ・ Gaensler, B. M. et al. 2008, ApjL, 680, L37