

# すざく衛星による超新星残骸 3C397 のスペクトル解析

菅原隆介

2012年3月30日

## 1 introduction

3C397 は銀河座標 (41.1 0.3) にある SNR(SuperNova Remnant) である。この天体までの距離は  $H_I$  吸収による研究からは  $6.4 \sim 12.8kpc$ (Caswell et al. 1975)、ミリメートル波の観測から  $10.1 \sim 10.5kpc$  と推定されている。爆発が起こってから約 5300 年経過したと推定されている (Safi-Harb et al. 2005)

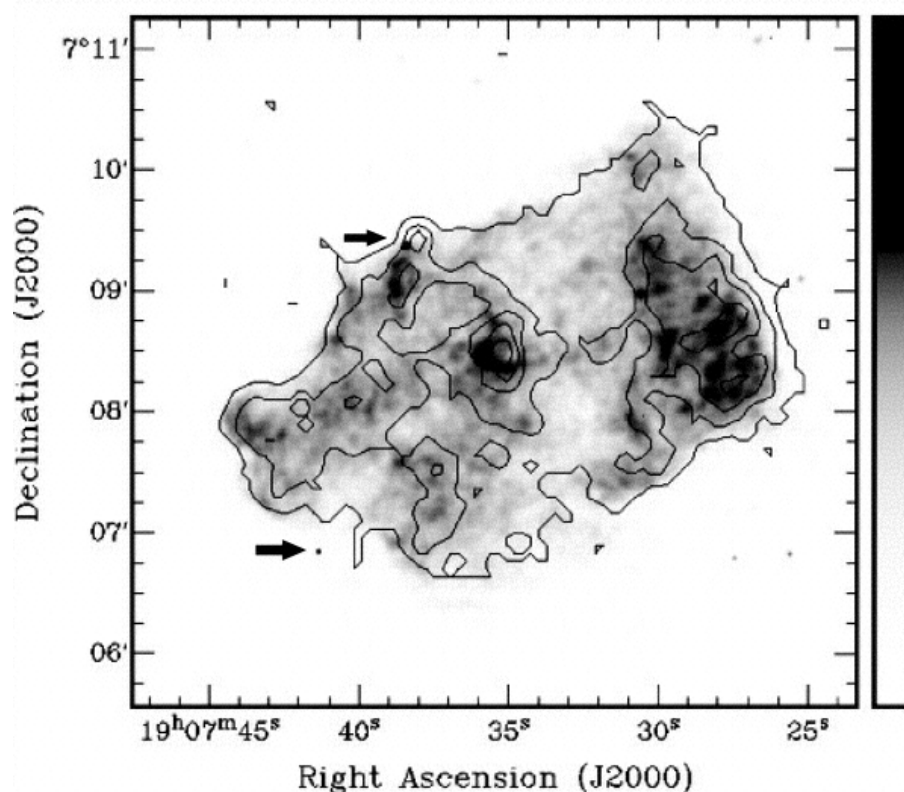


図1 Chandra 衛星によるイメージ

図1 は Chandra の 0.5-2.4keV バンドのイメージで、等高線は ROSAT HRI のものである。

この天体は若い SNR に典型的なシェル型構造を持たず、東西に引き延ばされた形をしている。東西ので X 線の放射の高まりがあり、特に西側が強い。そして中心を縦に走るように放射の弱い部分がある。中心やや東側に X 線のホットスポットがあるが、これは 3C397 に関連したコンパクト天体からの放射ではないと分かっている。

3C397 は Mixed Morphology SNR(MMSNR) に分類される。MMSNR は電波ではシェル状構造を持ち、X 線では中心集中の熱的放射をする SNR である。

Chandra 衛星のデータを用いた解析ではこの天体は一成分プラズマではフィットすることができず、少なくとも二温度成分が必要であることが分かっている。(Safi-Harb et al. 2005) 高温成分 (kT ~ 1.6keV) と低温成分 (kT ~ 0.2keV) で構成され、3keV 以上のバンドは高温成分主体で 3keV 以下は高温成分と低温成分の混合である。また強い Fe 輝線が確認されている。

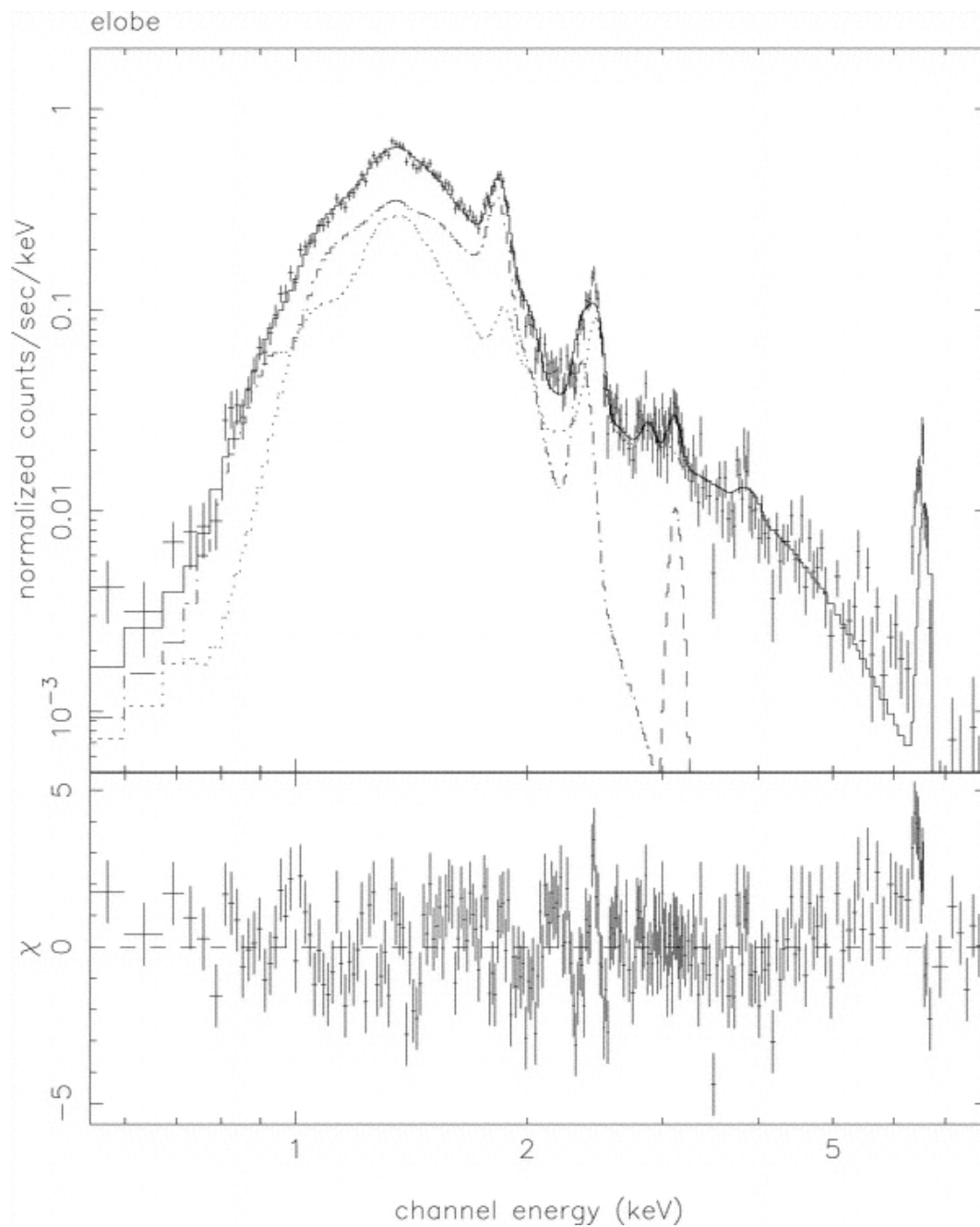


図2 Chandra 衛星による 0.5-8keV バンドスペクトル

## 2 observation

3C397 はすざく衛星により 2010 年 10 月 24 日から同年 10 月 26 日まで 69ks 観測が行われた。すざく衛星に搭載された検出器のうち X 線 CCD カメラ XIS のデータを使用する。XIS は XIS0~3 まであり、そのうち 023 は表面照射型 (FI)、1 は裏面照射型 (RI) CCD である。今回の解析では FI のデータを使うが、XIS2 は現在

作動していないため XIS と 3 のものを使う。表 1 に XIS の仕様を示す。

視野	17'.8 × 17'.8
エネルギー帯域	0.2-12keV
有効画素数	1024 × 1024
一画素サイズ	24 × 24 μ m
エネルギー分解能	~ 130eV@6keV
有効面積	340cm <sup>2</sup> (FI)@1.5keV
時間分解能	8s

表 1 すざく XIS

解析には Heasoft 6.11 を使用した。

### 3 spectrum data

すざく衛星による観測データは CALDB のデータを用いて NXB を引いた。NXB は Non X-ray Background の略で宇宙由来でない検出器由来のバックグラウンドのことである。

その後図 3 に示した中心領域をソース領域、周囲の領域をバックグラウンド領域にとった。右上の外円の部分は較正用の線源が入っているために除いてある。

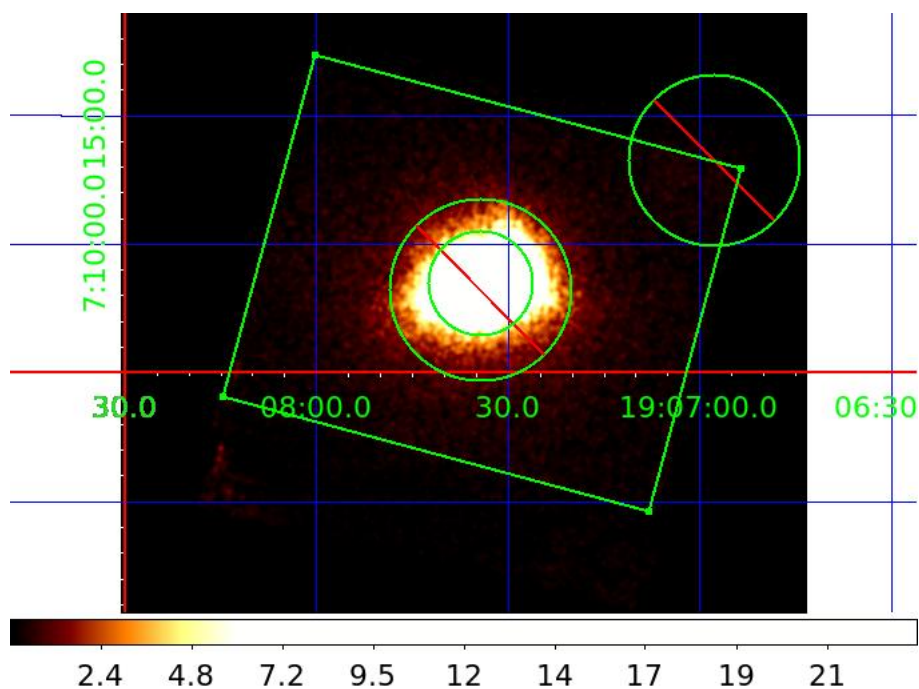
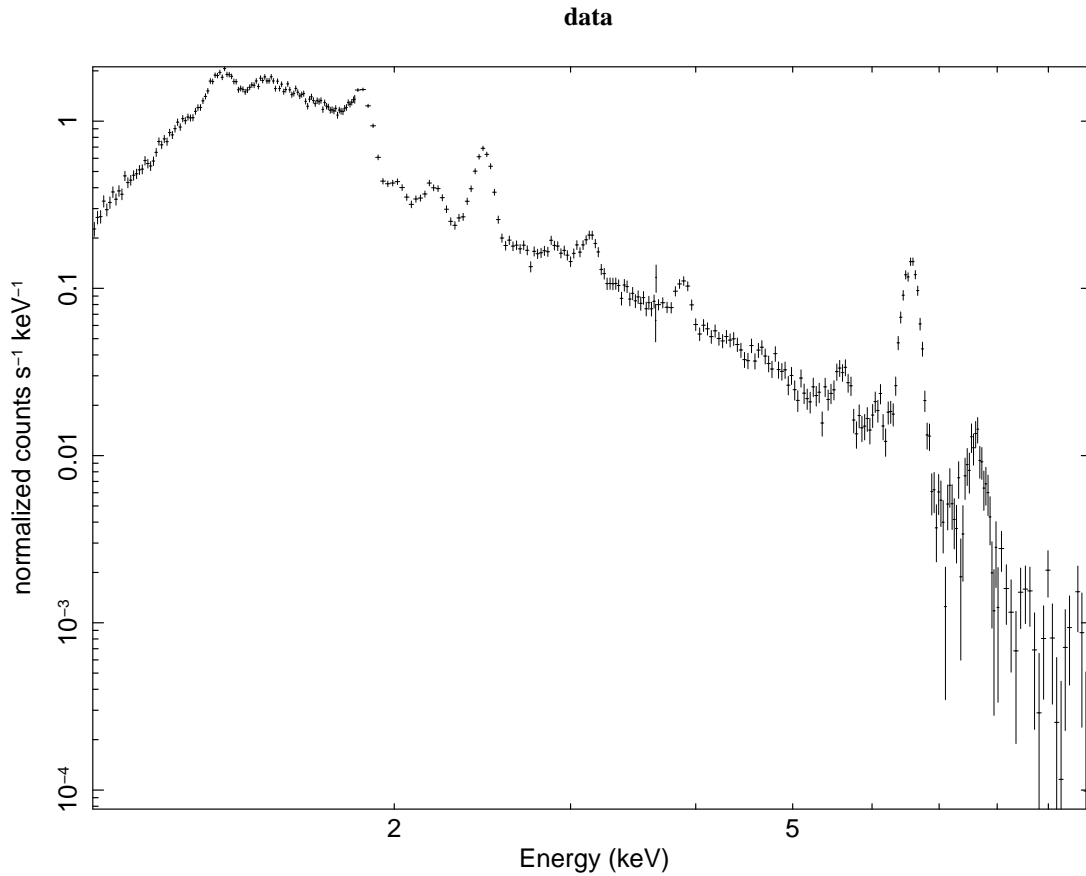


図 3 すざく全バンドイメージとソースバックグラウンド領域

図 3 はすざく XIS0 の全バンド (0.2-12keV) のイメージである。ソース領域からバックグラウンド領域のスペクトルを引いて実質の天体からのスペクトルを抽出した。そのスペクトルを図 3 に示す。低エネルギー側はノイズが大きく高エネルギー側はカウント数が少なく統計が悪いため、解析は 0.8-10keV までのバンドを使用する

図 3 を見ると 5-8keV に 4 本の輝線が見える。これは低エネルギー側から *Cr, Mn, Fe, Ni* の  $K\alpha$  輝線である。*Chandra* 衛星では *Fe* の輝線しか見えておらず、すざくの観測によって *Cr, Mn, Ni* の輝線を発見することができた。



p6 11-Feb-2012 15:04

図 4 0.8-10keV バンドスペクトル

## 4 analysis

### 4.1 hardband

まずは高温成分 ( $\geq 4.0\text{keV}$ ) をフィッティングする。高温は電離非平衡であると *Chandra* の観測から分かっている。しかし *XSPEC* ver.2.0 の NEI モデルには *Cr* と *Mn*、さらに *Li-like* 以下の電離状態の *FeK $\beta$*  が入っていないので、それぞれ *gaussian* を加える必要がある。特に *FeK $\beta$*  は *NiK $\alpha$*  と重なっている可能性があるために中心エネルギーと強度を正確に入れなければいけない。以下に示した図は  $kT = 3.0\text{keV}$  での *FeK $\alpha$*  と *K $\beta$*  の強度比を表したものである。

図 4.1 を見ると  $\tau = 1.0e+12(\text{s}/\text{cm}^3)$  から *FeK $\alpha$*  と *FeK $\beta$*  の強度比が小さくなり、 $\tau < 1.0e+12(\text{s}/\text{cm}^3)$  ではほとんど 0 になっている。これは  $\tau = 1.0e+12(\text{s}/\text{cm}^3)$  から *Li-like* 以下の電離状態が入るためである。 $\tau$  が大きいときは強度比は 0.06 とほぼ一定となっているため、*FeK $\beta$*  の強度は

$$I(\beta) = 0.06I(\alpha) \tag{1}$$

とする。次に中心エネルギーについて考える。*Fe* の *He-like* 輝線の中心は *K $\alpha$*  が 6.7keV、*K $\beta$*  が 7.8keV

NEI model kT=3keV (Fe-K line)

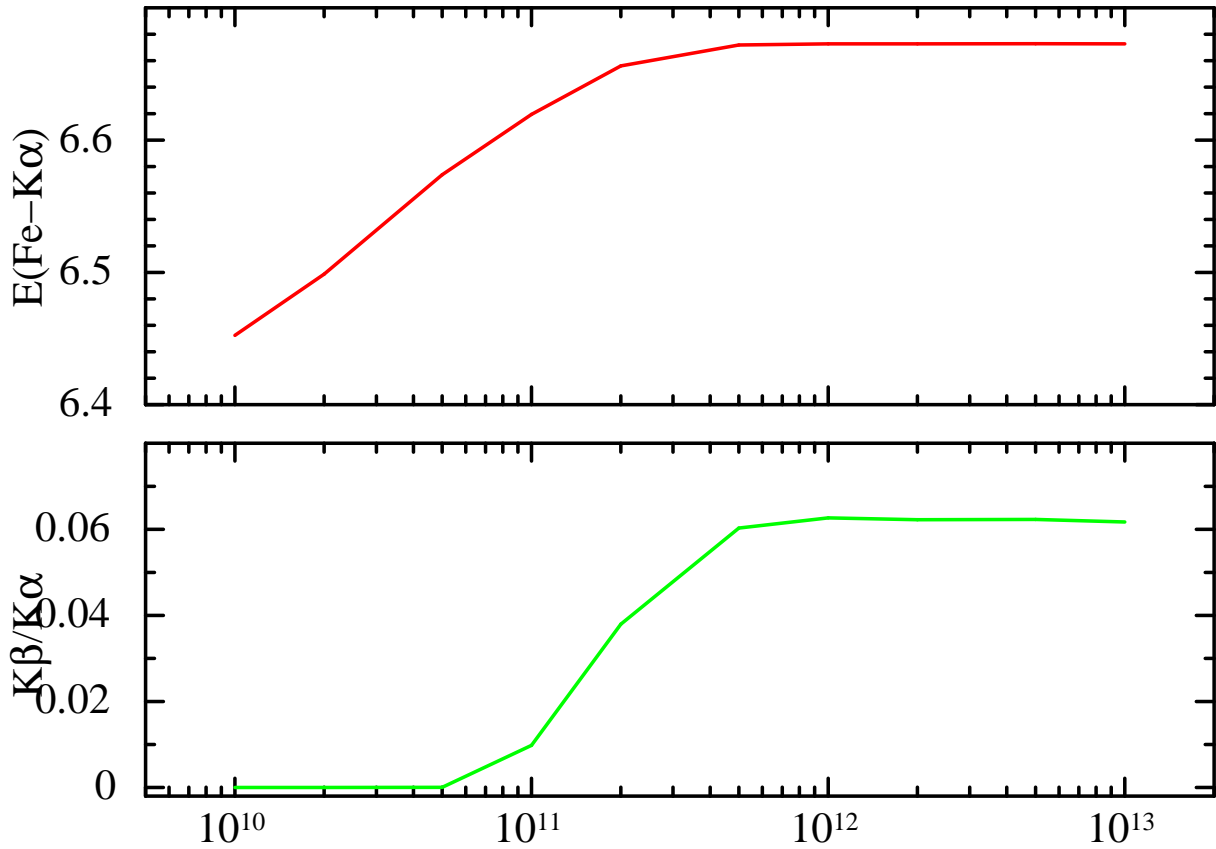
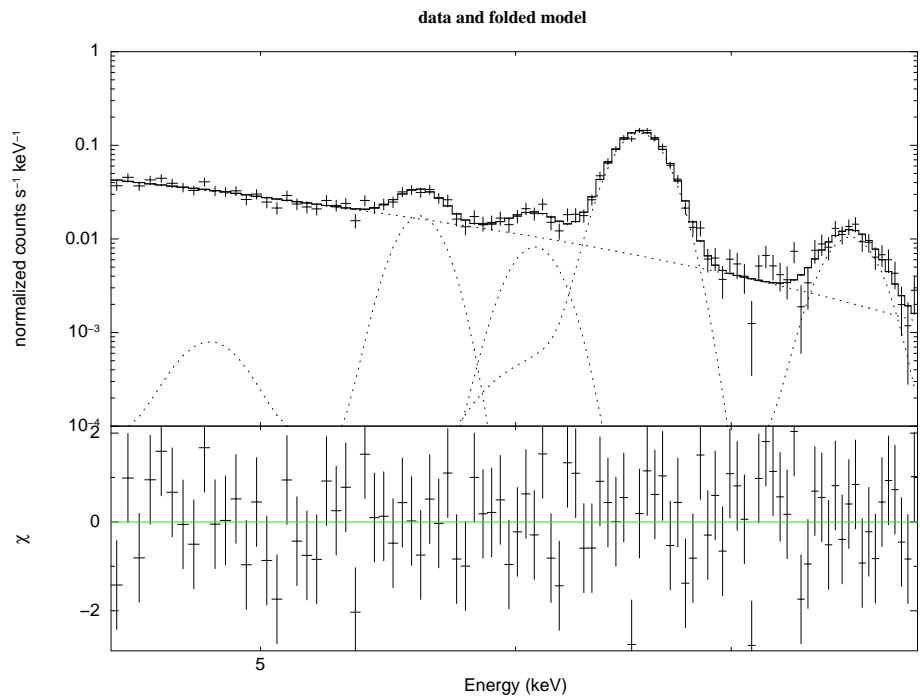


図5  $FeK\alpha/FeK\beta$  強度比

である。今見えている輝線は主に  $He$ -like や  $Li$ -like が中心であると考え、輝線中心の比は

$$\frac{E(\beta)}{E(\alpha)} \approx \frac{7.8}{6.7} \quad (2)$$

となる。まずは  $FeK\beta$  の輝線中心と強度を求めるために、スペクトルを制動放射部分と輝線部分に分けてフィッティングする。モデルは  $wabs*(bremss+gauss+gauss+gauss+gauss)$ 。4本の  $gauss$  は  $Cr$ 、 $Mn$ 、 $Fe$ 、 $Ni$  の輝線である。 $wabs$  は星間物質による吸収であり、これは *Chandra* による値  $3.0 (/cm^2)$  に固定した。フィットした結果を次の図と表にまとめた。



p6 28-Jan-2012 14:24

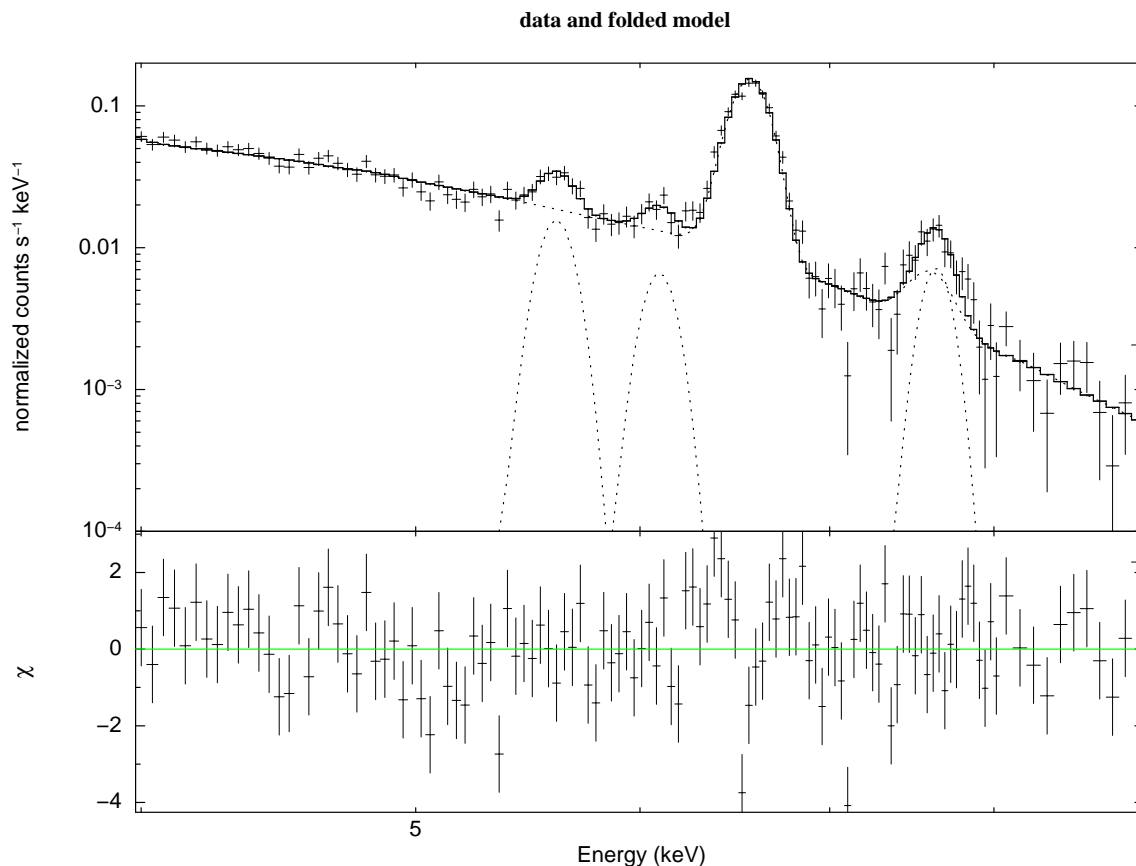
図 6 高温 gaussian フィット

表 2 gaussian パラメータ

comp	par	value
bremss	kT	1.60714
gauss(Cr)	E	5.60781
	norm	1.27E-05
gauss(Mn)	E	6.8814
	norm	7.30E-06
gauss(Fe)	E	6.56292
	norm	1.41E-04
gauss(Ni)	E	7.63327
	norm	1.82E-05

こうして Fe の  $K\alpha$  の強度と輝線中心が求まった。これをもとに NEI モデルに  $FeK\beta$  を加えたモデルでフィッティングした。得られたプラズマ温度  $kT$  とイオン化タイムスケール  $\tau$ 、Fe と Ni のアバンダンスを次に示す。





p6 12-Feb-2012 13:17

図7 高温 NEI フィット

表3 高温 NEI フィットパラメータ

kT(keV)	1.84(1.70-1.95)
(s/cm <sup>3</sup> )	1.20(1.08-1.33)e+11
Fe	15(13-17)
Ni	56(33-85)

*Fe* と *Ni* の高いアバンダンスが確認された。同じく *Cr* や *Mn* も高いアバンダンスを持つ可能性がある。このことは次のセクションで調べることにする。また、*Fe* 輝線周辺に残差が見られる。残差の形からこの *Fe* 輝線は幅をもっていることがわかる。その原因としては

- モデルの不備
- ドップラー効果
- 高温の二成分プラズマ

が考えられる。モデルの不備は例えば *Cr* の  $K\beta$  輝線が入っていないことなどである。しかし、*Fe* の  $K\alpha$  と  $K\beta$  輝線の強度比は 0.06 であるから、原子番号の近い *Cr* や *Mn* も同程度だったとするとその影響はかなり

小さい。従って  $Cr$  や  $Mn$  の  $K\beta$  輝線だけではその残差を説明できない。次にドップラー効果について。この天体は東西に引き伸ばされた形をしている。横方向だけでなく視線方向にも引き伸ばされているとするならば、東西で輝線中心がずれるはずである。それを調べるために天体を図 4.1 のように分けてスペクトルを抽出した。

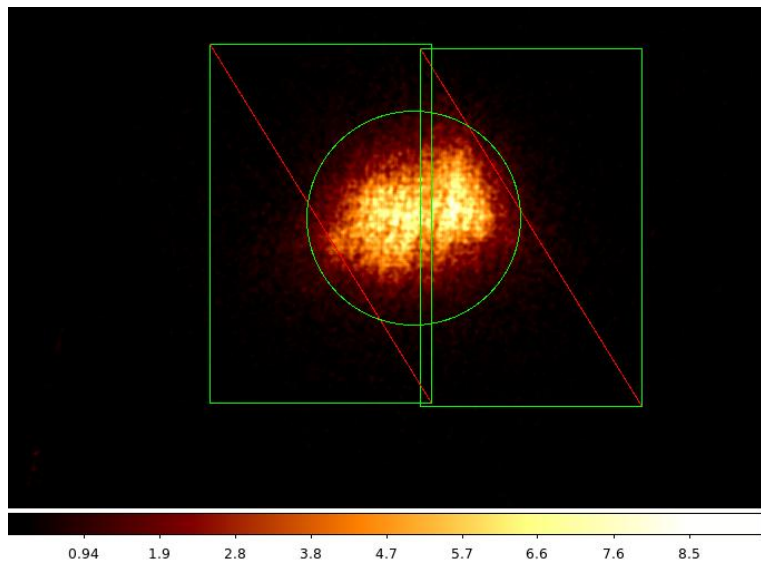
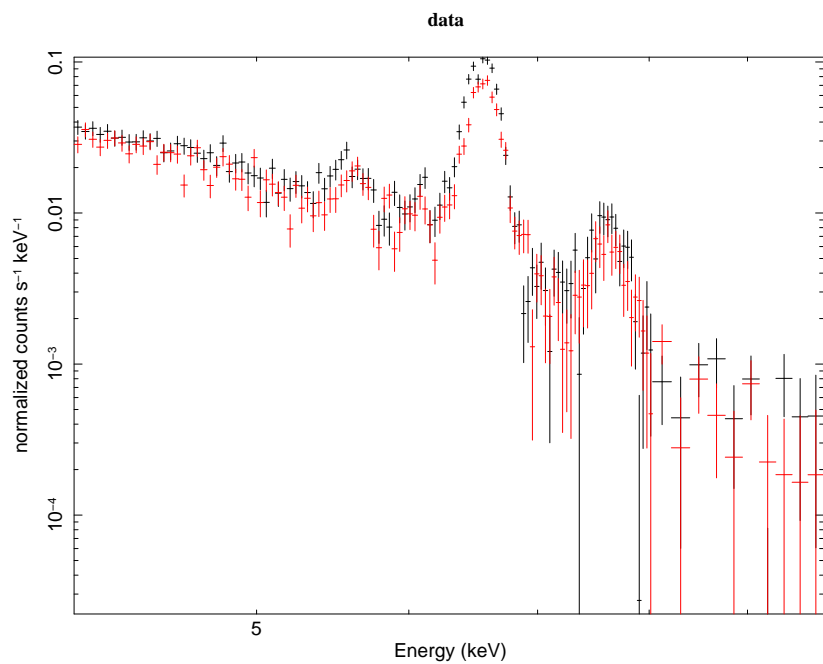


図 8 東西領域

次の図 4.1 は東西の領域に分けたスペクトルである。黒が東側、赤が西側。



p6 13-Mar-2012 15:31

図 9 東西スペクトル

図 4.1 を見ると東西の  $Fe$  輝線中心にズレはないようである。gaussian でフィッティングしたところ、輝線中心は東西それぞれ 6.56(0)keV と 6.55(0)keV で、有意な差は無かった。

次に高温成分を 2 成分としてフィッティングを行った。どちらも ejecta 起源であると仮定しそれぞれの成分のアバダンスは同じと設定した。まずは二成分の温度は同じに設定し、 $\tau$  が異なるとした。するとうまくフィットすることができた。その結果が次の図 4.1 である。

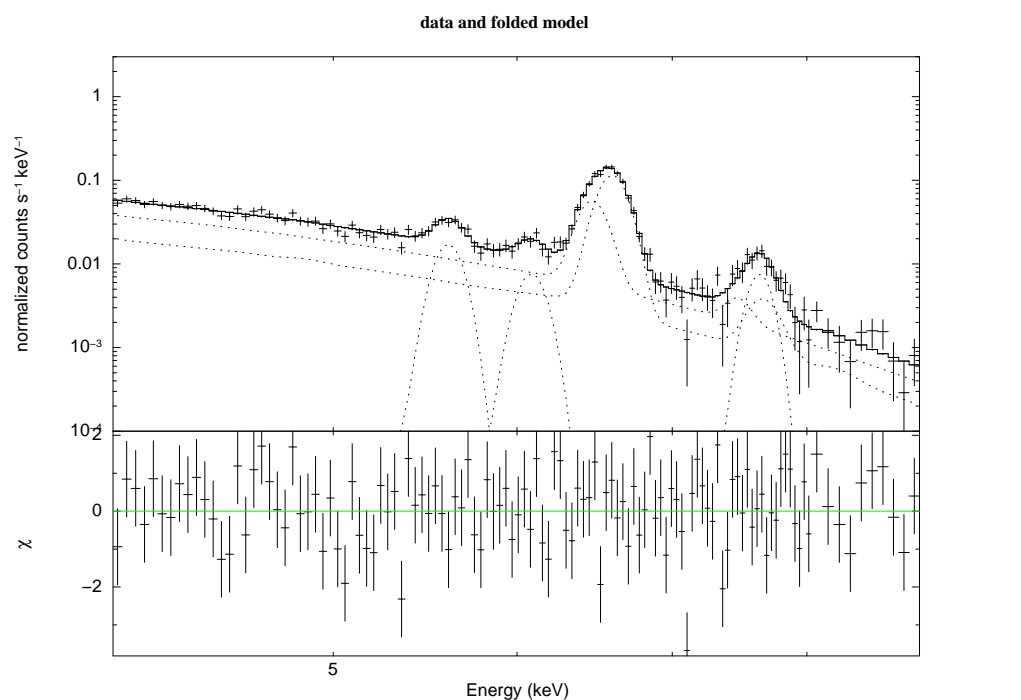


図 10 高温 2 成分フィット

$Fe$  輝線の広がりにはイオン化タイムスケール  $\tau$  の違うプラズマの存在によるものである可能性がある。 $\tau = t n_e$  であり ( $t$  は爆発からの時間、 $n_e$  は密度)、 $t$  は二成分とも同じであると考え、 $\tau$  の違いは密度の違いによるものと考えられる。

一方二成分の温度を別にして  $\tau$  を同じにしても輝線中心が動かないために適切にフィットすることができない。

## 4.2 CrMn abundance

XSPEC のモデルを用いて *Ar*、*Ca*、*Fe*、*Ni* の一原子当たりの  $K\alpha$  放射強度を横軸原子番号でプロットした。

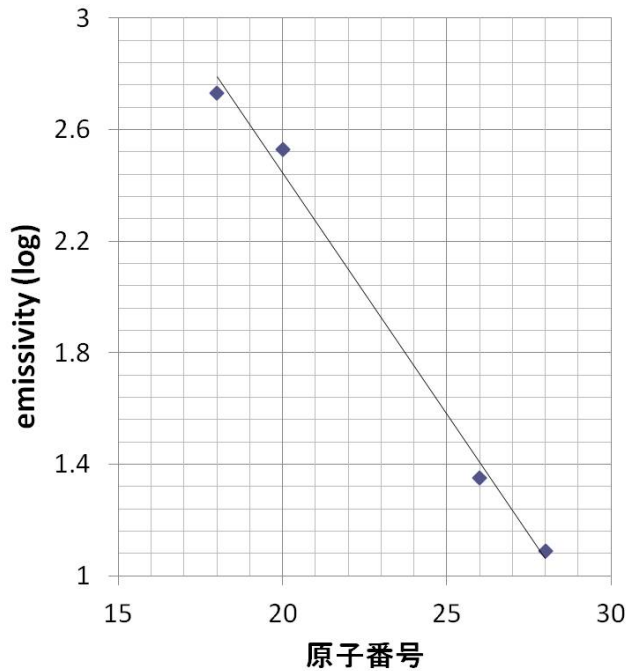


図 11 一原子当たり放射強度

図 4.2 を見るとおり、一原子当たり放射強度を対数でプロットすると直線に乗ることがわかる。*Cr* と *Mn* もこの直線に乗るとすると仮定する。輝線強度は

$$I = \text{定数} * \text{一原子当たり放射強度} * \text{存在量} * \text{アバundance} \quad (3)$$

である。 $I$  は先ほどの gaussian フィッティングで得られ、存在量は既知であるから *Fe* との相対アバundance を求めることができる。存在量は XSPEC の Abund コマンドから調べた。こうして得られたアバundance を次の表 4.2 に示す。

metal	abundance
Cr	24(17-28)
Mn	36(24-54)
Fe	15(13-17)
Ni	55(33-85)

表 4 abundance

Feのみならず Cr、Mn、Ni も非常に高いアバダンスをもつことがわかった。これらの元素は原子番号が近く、合成される場所も恒星内部の近い所であるからだと思われる。Si や S、Ar、Ca などのアバダンスは Fe 等に比べてどのようなかを次で検証する

### 4.3 allbandfit

Cr 以下の元素のアバダンスを調べるために、まずは 0.8-9.0keV のフィッティングを行った。上に書いたように高温成分は二成分、そこに低温成分を NEI モデルとして加えた。wabs は自由パラメータにし、高温成分もそれぞれ別の温度をとれるように変更した。元素のアバダンスは Mg、Si、S、Ar、Ca をフリーにする。高温二成分のアバダンスは同じ、低温成分のアバダンスは高温と別にする。その結果を図 4.3 と表にまとめた。

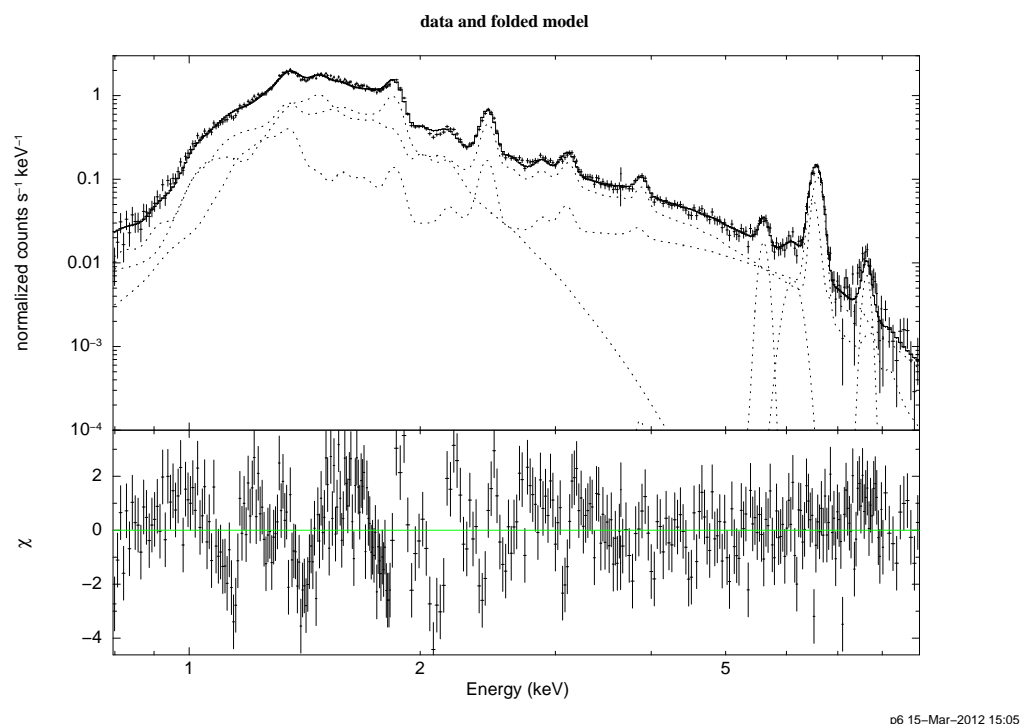


図 12 0.8-9.0keV フィット

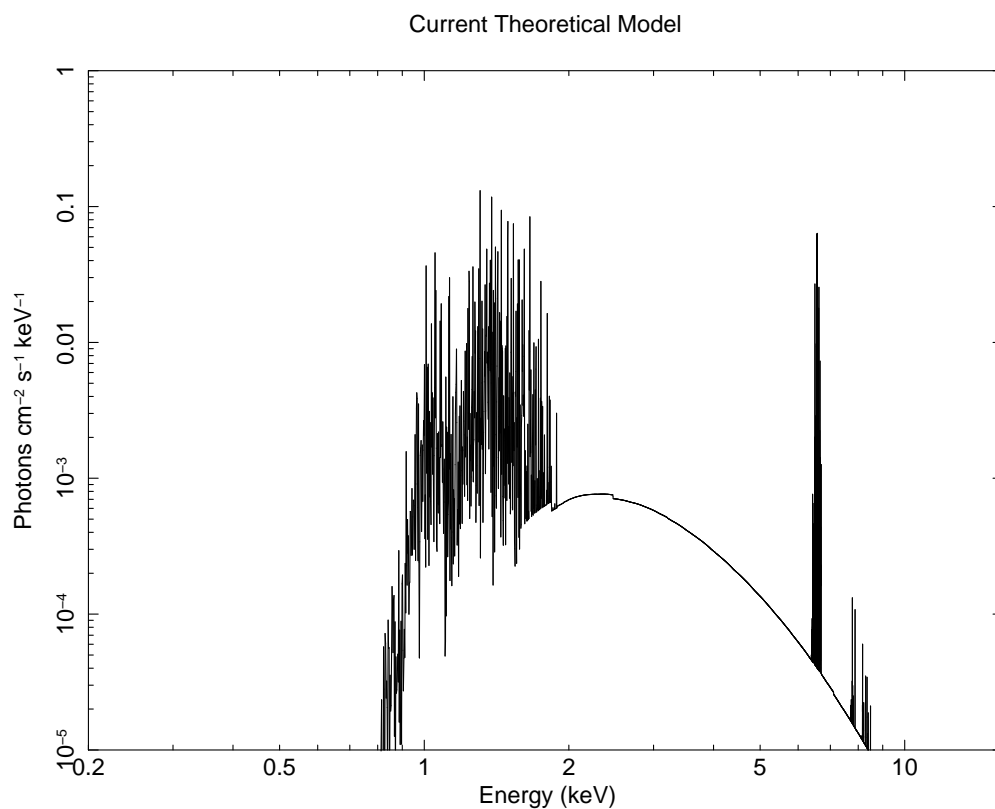
このように 1.0-2.0keV 周辺に残差が見られる。この原因として一つは低温 2 成分が考えられるが、その前に Cr や Mn の L 輝線の影響を考える必要がある。次に示すのは wabs=3.0、kT=1.6keV、 $\tau = 10^{12}$  における Fe 輝線のモデルである。

4.3 をみると  $kT \leq 2.0\text{keV}$  の範囲には Fe の L 輝線やさらに下の M、N 輝線と思われるものが連続して見えている。強度を見ると、L 輝線のうち最も強いラインは K 輝線と同じくらいである。Fe と原子番号の近い Cr や Mn も同じような強度比をしていると考えることができる。通常の SNR では Cr と Mn の放射は少ないのでほぼ無視できるが、この天体 3C397 は Cr と Mn のアバダンスが異常に高いため L 輝線を無視できない可能性がある。そこで、図 4.3 のパラメータをそのままにして Cr と Mn の gaussian を引いて、残差が Cr と Mn の L 輝線で説明できるか検証してみた。

このように同程度の差になるために、2.0keV 以下の残差は Cr と Mn の L 輝線によるものである可能性が

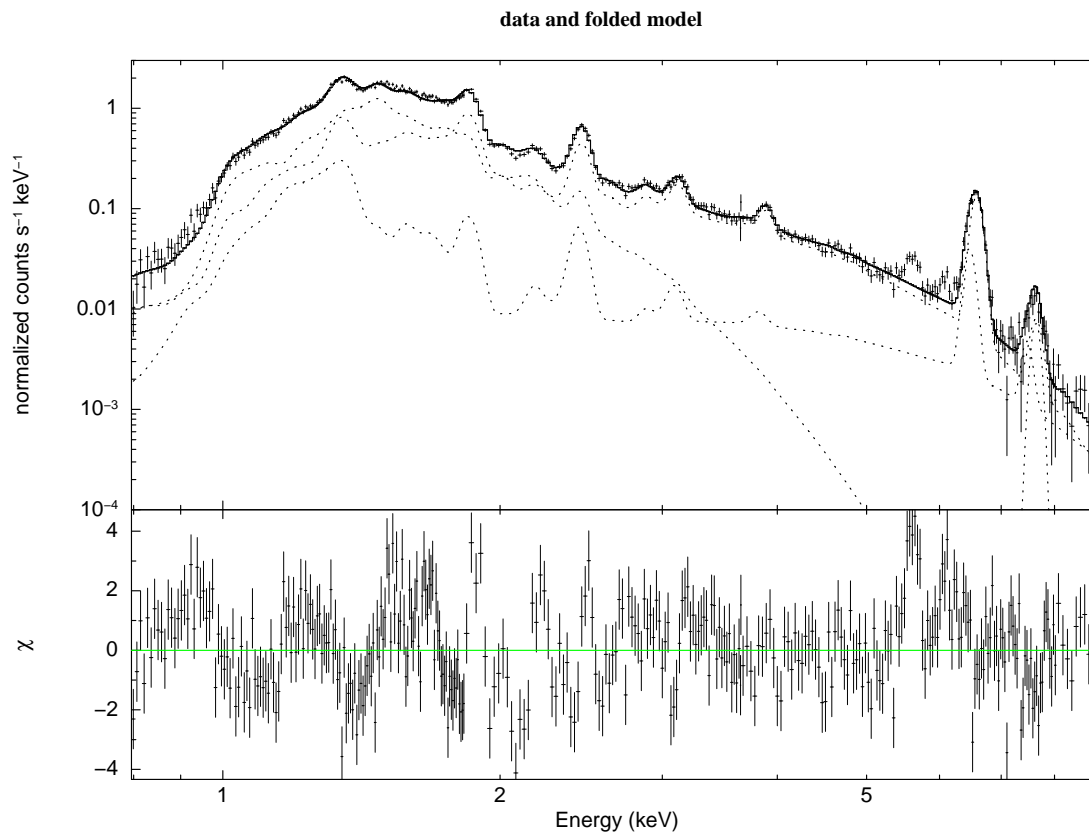
表5 0.8-9keV フィットパラメータ

	低温	高温 1	高温 2
kT(keV)	0.24	1.15	3
(s/cm <sup>3</sup> )		4.25E+11	2.00E+10
Mg	1	3.72	3.72
Si	1	0.69	0.69
S	1	2.5	2.5
Ar	1	2.48	2.48
Ca	1	3.07	3.07
Fe	1	14.2	14.2
Ni	1	14.4	14.4



p6 15-Mar-2012 15:15

図13 Fe 輝線モデル



p6 27-Mar-2012 12:51

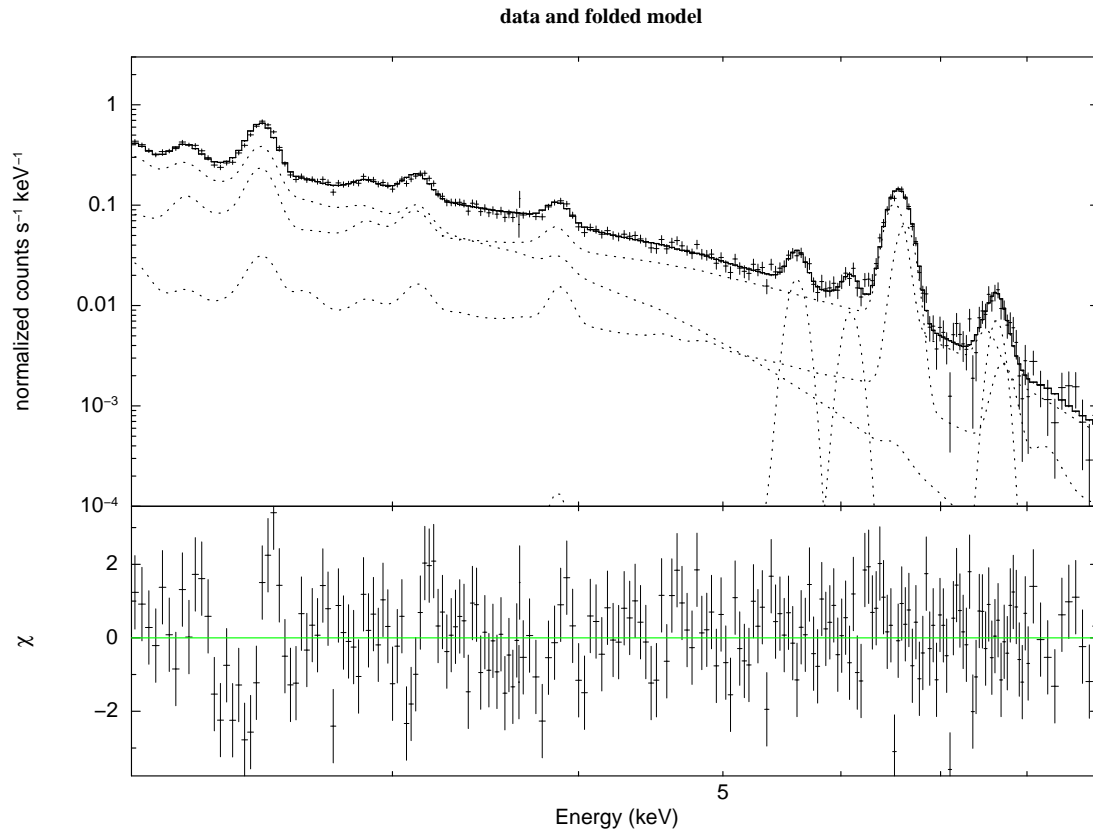
図 14 残差比較

高い。しかしながら 2.0keV 以下の輝線は  $K\alpha$  輝線とは違い、連続して見えているために gaussian を加えてフィットすることは非常に困難である。

図 4.3 を見ると 2keV 以下から L 輝線の影響が強いことがわかる。そこで次に 2-9keV までの範囲でフィッティングを行う。ここで低温成分として *apec* モデルを追加した。*apec* は電離平衡プラズマのモデルである。Chandra の解析結果から低温成分は星間物質 (Interstellar Medium; ISM) 由来であると分かっているのでアバundanceは 1solar とした。

高温成分のアバundanceは全て 1solar 以上となり ejecta 由来であることを支持している。原子番号が大きい元素ほどアバundanceが大きい傾向があることが分かったが Ca 以下は FeNi のように二桁のアバundanceを持ってはいないようである。高温成分のみでフィッティングしたときに比べて温度が高くなっているが、これはおそらく低温成分を加えたからであると思われる。





p6 27-Mar-2012 13:57

图 15 2-9keV

表 6 2-9keV

	soft	hard1	hard2
kT	0.59	2.16(1.97-2.34)	2.16(1.97-2.35)
Si	1	1.37(0.65-2.13)	1.37(0.65-2.14)
Si	1	1.95(1.54-2.53)	1.95(1.54-2.54)
Ar	1	2.33(1.76-3.12)	2.33(1.76-3.13)
Ca	1	6.24(4.65-8.47)	6.24(4.65-8.48)
Fe	1	25.6(19.0-35.1)	25.6(19.0-35.2)
Ni	1	73.1(41.9-120)	73.1(41.9-121)
( $e+10s/cm^3$ )		3.37(2.62-4.14)	16.8(11.5-33.7)

## 5 Discussion

すざくデータによって Chandra 衛星では見つからなかった Cr、Mn、Ni の輝線を発見することができた。いずれも数十 solar という高いアバundanceを持っていることがわかった。また、ejecta 由来の高温成分の輝線が広がっていて、それがイオン化タイムスケール  $\tau$  の違う二成分プラズマによるものだということも分かった。 $\tau$  の異なりは密度の違いによって生まれる。その密度差の起源ははっきりしないが、この天体は非対称な爆発をしているのでこれによって密度差が生まれたのかもしれない。

低温成分については詳しく解析できなかったが、高温成分のように極端に高いアバundanceを持っているようではないので ISM 起源については否定できない。これ以上詳細な解析を進めるためには Cr や Mn、そして Fe や Ni の低電離輝線など XSPEC のモデルを充実させる必要がある。