

# X 線天文衛星「すざく」による超新星残骸 G330.2+1.0 の非熱的 X 線の観測

東京大学 牧島・中澤研究室

村上 浩章

牧島 一夫、中澤 知洋、内山 秀樹

## 1. 宇宙線の加速源

宇宙には、 $10^8 \sim 10^{20}$  eV にも及ぶ高エネルギーの宇宙線が飛び交っている。図 1 に示したように、宇宙線のスペクトルはベキ型をしており、 $10^{15.5}$  eV 付近に knee と呼ばれる折れ曲がりをもつ。Knee 以下の宇宙線は銀河系内の天体が起源であると考えられており、中でも超新星残骸 (SNR) は宇宙線の加速源として最有力候補とみなされてきた。しかし、宇宙線の主成分は陽子などの荷電粒子であるため、星間磁場などによって進路が曲げられてしまい、到来方向から加速源を特定することができない。

そこで発展してきたのが、加速現場で二次的に発生する X 線やガンマ線を観測する手法である。実際に SN1006 という SNR の衝撃波面から、加速された電子によるシンクロトロン X 線が確認された (Koyama et al. 1995) ことで、SNR における粒子加速は観測的な証拠を得た。次の課題は、SNR における加速限界を知ること、ならびに SNR で加速された粒子が宇宙線全体のフラックスにどの程度寄与しているかを調べることである。

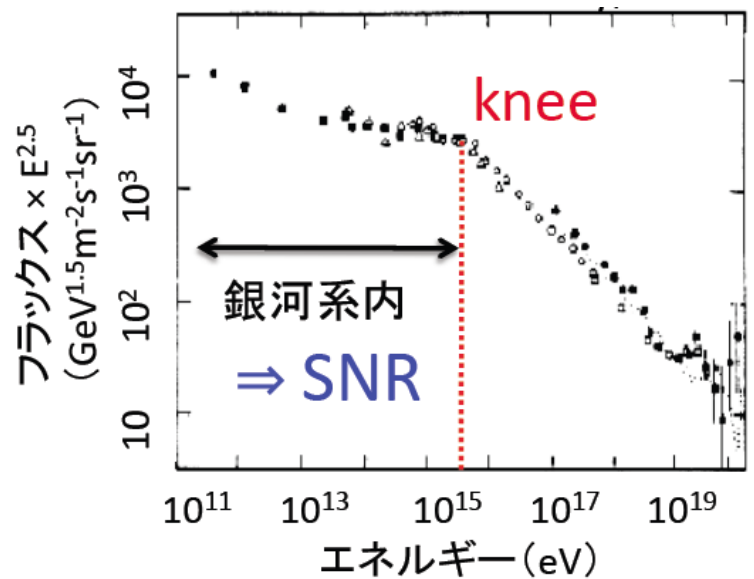


図 1 エネルギーの 2.5 乗をかけた宇宙線のスペクトル (Sokolsky, 1989)

## 2. SNR からの X 線放射

そもそも SNR とは、星が最期に超新星爆発を起こしたあとに残る、星雲状の天体である。爆発によって吹き出した物質「イジェクタ」は、周囲の星間物質を掃き集めながら広がっていく。はじめは星間物質の質量が小さく、イジェクタは自由膨張を続けるが、しばらくすると星間物質が無視できなくなり、減速を始める。このとき SNR には、星間物質を掃き集めながら膨張する順行衝撃波と、減速したイジェクタが内側からくるイジェクタと衝突して生じる逆行衝撃波が存在している。それぞれ、衝撃波のバルクな運動エネルギーを、星間物質やイジェクタの熱エネルギーへと変換しており、加熱されたこれらの物質から熱的 X 線 (特性 X 線や制動放射) が放出される。また同時に、衝撃波面において粒子の統計加速を行っており、加速された電子からの非熱的なシンクロトロン X 線も観測される。図 2 は、このような段階にある SNR (年齢は数百年から数千年) の模式図である。

多くの SNR では熱的 X 線が支配的であり、非熱的 X 線は見えにくいという難点がある。しかし RX J1713 や Vera Jr. など、非熱的 X 線が卓越しているものも見つかっており、粒子加速の研究に大きく貢献してきた。これらの非熱的な SNR はまだまだ数が少なく、より多くの類例の研究が望まれている。

### 3. G330.2+1.0

そこで我々が注目したのが、G330.2+1.0 である。これは電波の観測により発見された SNR で (Clark, Caswell & Green 1975)、距離  $>4.9$  kpc という見積もりが得られている (McClure-Griffiths et al. 2001)。X 線ではきれいなシェル型をしており (図 3)、視直径は約  $10'$  である。「あすか」衛星の観測により、 $0.7-10$  keV の帯域で、非熱的成分が支配的となっていることが明らかにされた (Torii et al. 2006)。本研究で解析に用いたのは、「あすか」の後継機、「すざく」衛星の公開データである。2009 年 9 月から 2010 年 2 月にかけて 3 回の観測が行われ、計 220 ksec という高統計のデータが得られており、「すざく」の高エネルギー分解能、低バックグラウンドという特性を生かすことができる。

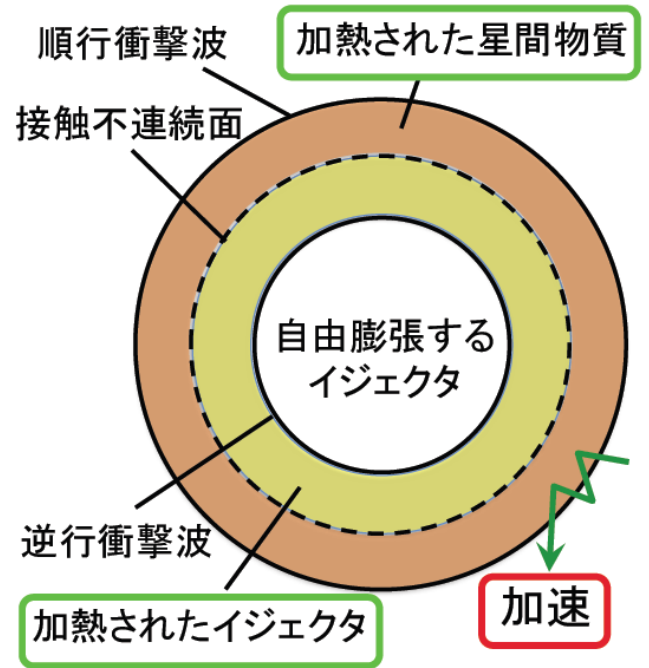


図 2 SNR の断面 (模式図)

### 4. 熱的成分・非熱的成分の分布

まず我々は、熱的成分と非熱的成分がどのように分布しているのかを調べるために、熱的成分の強い soft な帯域 ( $1-2$  keV) と、非熱的成分の強い hard な帯域 ( $2-10$  keV) でイメージを描き、比較した (図 4)。この結果、東部 (E) に soft な放射、つまり熱的成分が見られた。これは、*XMM-Newton* や *Chandra* による先行研究の結果とも一致する (Park et al. 2009)。さらに南東部 (SW) には、広い帯域にわたって強く輝くりム放射が見つかった。すなわち、この領域では連続成分が卓越していることを意味し、強い非熱的成分の存在が示唆される。

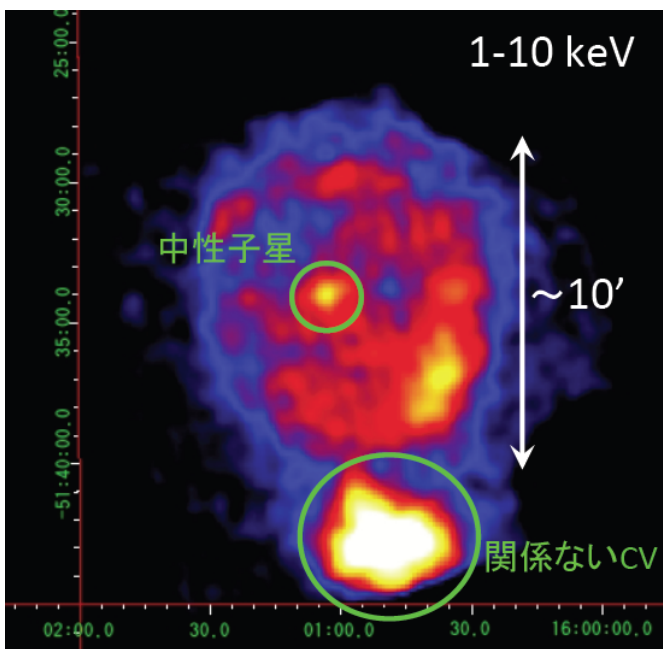


図 3 「すざく」による G330.2+1.0 の X 線イメージ

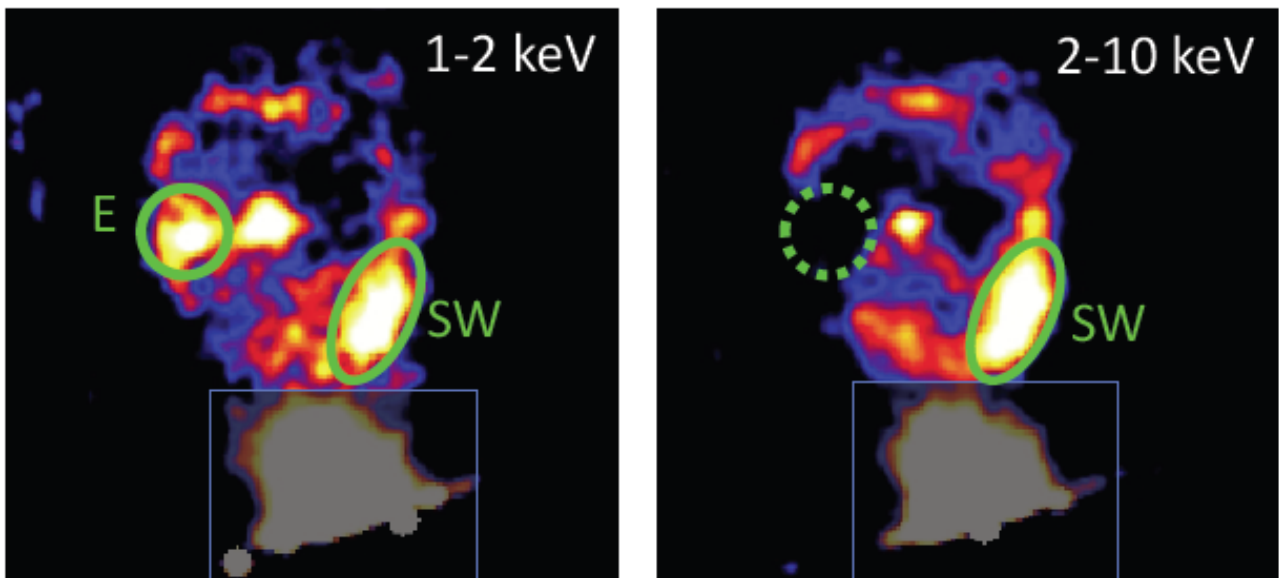


図 4 「すざく」による(左) 1-2 keV、(右) 2-10 keV 帯域の G330.2+1.0 のイメージ  
視野内に混入した白色矮星は暗くしてある。

## 5. スペクトルの比較

それぞれの領域からスペクトルを抽出して比較すると、E 領域のスペクトルには Mg や Si などの輝線構造がはっきりと見られるのに対し、SW 領域は非常にのっぺりとしている。両者を、(ベキ関数+光学的に薄いプラズマ) × 星間吸収 のモデルでフィッティングしたのが図 5 である。ここで、光子指数やプラズマ温度、柱密度といったパラメータは共通にしてある。この結果、SW 領域のスペクトルはベキ成分のみでよく表されることがわかり、いっぽう E 領域には  $T \sim 500$  万度のプラズマが存在することがわかった。また星間吸収の値 ( $n_H \sim 2.2 \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$ ) は、距離  $> 4.9 \text{ kpc}$  という推定と矛盾しない。

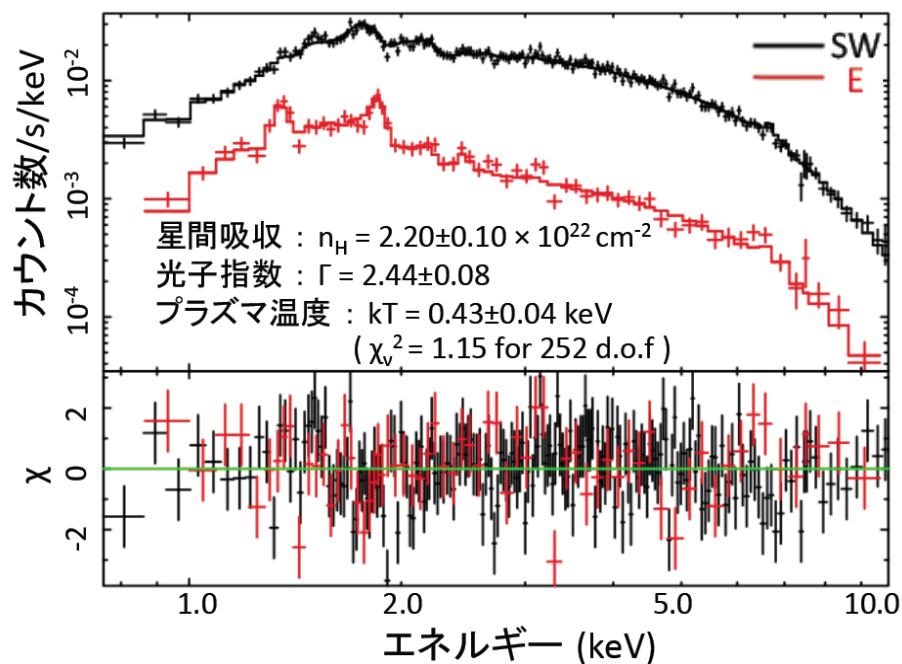


図 5 G330.2+1.0 の SW 領域(黒)、E 領域(赤)から抽出したスペクトル  
実線はベストフィット・モデル、下部パネルはそこから残差を示す

以上のことから、SW 領域では非熱的なシンクロトロン X 線が卓越していると考えられる。なお、バックグラウンドは高統計の銀河面背景放射スペクトルから作成したモデルにより推定しており、得られたパラメータは、視野内から天体のない部分をバックグラウンドとして引いた場合と、誤差の範囲で一致している。

### 6. 多波長スペクトルによる電子の最大エネルギーの推定

シンクロトロン放射は電波から X 線まで続く連続成分である。また SNR で加速された電子は、低エネルギーの光子を叩き上げる逆コンプトン散乱により、TeV 帯域にも及ぶ放射を出すことが分かっている (図 6)。TeV ガンマ線については上限値が得られており (Sushch et al. 2011)、そこから磁場の強さの下限值が求められる。

図 6 からも分かるように、電波帯域と X 線帯域ではスペクトル指数が大きく異なっており、スペクトルの途中で折れ曲がりを持つ。シンクロトロン放射は加速電子のスペクトルを反映しているため、この折れ曲がりには電子の加速限界によるものと考えられ、折れ曲がり周波数  $\nu_{\text{rolloff}}$  と電子の最大エネルギー  $E_{\text{max}}$  の関係は次式で表される (Reynolds & Keohane 1999)。

$$E_{\text{max}} \sim 14 \left( \frac{B}{10 \mu\text{G}} \right)^{-1/2} \left( \frac{\nu_{\text{rolloff}}}{10^{16} \text{ Hz}} \right)^{1/2} \text{ TeV}$$

電波の観測 (Clark et al. 1975; Caswell et al. 1983) と今回の「すざく」の結果を合わせると、 $\nu_{\text{rolloff}} \sim 2 \times 10^{17} \text{ Hz}$  ( $h\nu_{\text{rolloff}} \sim 0.8 \text{ keV}$ ) という値が得られる。さらに、先述した TeV ガンマ線の観測から、磁場の下限値は  $B > 14 \mu\text{G}$  と求められているので、 $B \sim 20 \mu\text{G}$  と仮定する。これにより、G330.2+1.0 における電子の最大エネルギーは

$$E_{\text{max}} \sim 50 \text{ TeV}$$

と推定される。つまり、この SNR において  $10^{13.5} \text{ eV}$  程度まで電子を加速していること

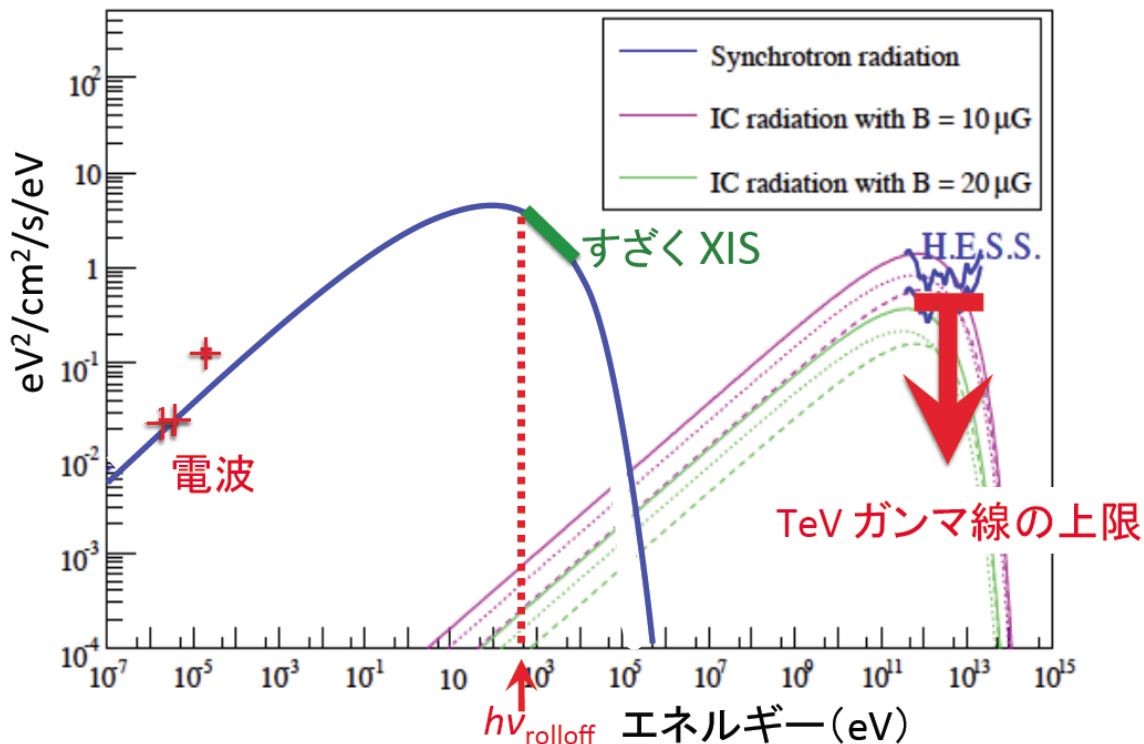


図 6 G330.2+1.0 の多波長スペクトル

が確認された。これは、SN1006 や RX J1713 などの SNR において求められた値ともオーダーで等しい。

## 7. 今後の展望

今回の解析では、0.3–12 keV 帯域を受け持つ「すざく」の XIS (X-ray Imaging Spectrometer; X線 CCD カメラ) のみを用いた。G330.2+1.0 は広がった暗い天体であり、非熱的成分の卓越してくる  $> 10$  keV 帯域をカバーする HXD (Hard X-ray Detector; 硬 X線検出器) で有意な信号を検出することができていないためである。

そこで現在、我々の研究室は、「すざく」に続く日本の X線天文衛星である ASTRO-H 計画に参加し、HXI/SGD 検出器の開発を主導している。HXI (Hard X-ray Imager; 硬 X線撮像分光器) は HXD を上回る高感度を実現し、これまで熱的成分しか検出されていない多数の SNR から、非熱的成分を抽出することができる。また 5–80 keV 帯域で、従来不可能だった撮像観測が行えるため、粒子の加速機構についての理解が格段に進むと期待される。G330.2+1.0 についても、非熱的成分の空間分布から、衝撃波のエネルギーがどのような比率で熱エネルギーと粒子の加速エネルギーに分配されているかが定量的に議論できるようになるだろう。

## 8. 参考文献

Clark, D. H., Caswell, J. L., & Green, A. J., *Phys. Astrophys. Suppl.*, 1975, **37**: 1–38

Caswell, J. L., et al., *MNRAS*, 1983, 1983, **204**: 915–920

Koyama, K., et al., *Nature*, 1995, **378**: 255–258

McClure-Griffiths, N. M., et al., *ApJ*, 2001, **551**: 394–412

Park, S., et al., *ApJ*, 2009, **695**: 431–441

Reynolds, S. P., & Keohane, J. W., *ApJ*, 1999, **525**: 368–374

Sokolosky, P., *Frontiers in Physics*, Vol. 76

Sushch, I., et al., *ISRC2011*, 2011

Torii, K., et al., *PASJ*, 2006, **58**: L11–L14