「すざく」衛星による超新 星残骸W5ICの観測(2)

○花畑義隆、深沢泰司(広島大学)、馬場彩、
 澤田真理(青山学院大学)、片桐秀明(茨城大学)
 2012年9月20日(木)天文学会@大分大学

SNRにおける宇宙線加速の時間発展

フェルミ衛星などが中年齢(>数千年)SNRか

ら、陽子起源で説明されるγ線を検出

しかし、

- ▶Y線観測は空間分解能が不足
- ▶陽子の冷却時間~6x10⁷(1 cm⁻³/n_H) yr >> SNRの年齢

SNR W5ICのGeVガンマ線 イメージ (Abdo+I0)



セドフ期以降のSNRにおいて宇宙線加速がどのように時間発展する かを調べるのが難しい。

他波長からのアプローチが重要

中年齢SNRでの宇宙線加速を探る方法

★X線によるプラズマ状態の診断

超熱的粒子によりイオンが電離され、過電離プラズマが形成される可能性が ある(Kato+92) e.g.,太陽フレア(Tanaka+86)



★電子のシンクロトロンX線放射

X線を放射する電子の冷却時間 << SNRの年齢

 $t_{\rm syn}(E) = 1250 \ {\rm yr}(E/100 \ {\rm TeV})^{-1} (B_{\rm d}/10 \ \mu{\rm G})^{-2}$

→ 加速直後の粒子の情報が引き出しやすい

優れたエネルギー分解能と硬X線帯域で高感度の検出器での観測が必要。

SNRW5IC



▶星形成領域W51Bに付随する分子雲と衝突(Koo+97)

▶FermiやMAGICなどが宇宙線起源で説明されるγ線を検出

硬X線放射も検出されているが、詳細解析がなされていない

● 優れたエネルギー分解能と大有効面積を誇るSuzaku/XISで観測





超熱的電子による電離の影響

スペクトル解析から過電離プラズマの存在は確認できなかった 超熱的電子による電離の経過時間 < 電離の特性時間 か?

 超熱的電子がイオンを
 $n'_e t'$

 完全電離する場合
 $-n'_e t'$

 n'_e t':電離タイムスケール、< $\sigma v >^{-1}$:電離の特性時間

電離断面積 σ が最大となるI0keV電子がイオンの電離に主に寄与すると $< \sigma v >^{-1}$ ~5xI0^{I0} cm⁻³ s (σ はH-like Mgでの値を使用)

一方、スペクトル解析より $n_{\rm e}t \sim 2 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}\text{s}$ SNI006では非熱的電子と熱的電子の個数比 $\frac{n_{\rm e}'}{n_{\rm e}}$ は最大IO⁻³程度(Bamba+O3) したがって①より $n_{\rm e}'t' \sim 2 \times 10^8 \text{ cm}^{-3}\text{s}$ < 電離の特性時間

過電離プラズマが未だ形成されていないことと矛盾しない

硬X線の起源:星形成領域W51B



<u>熱的放射</u>:

熱的エネルギー~2x10⁵⁰ erg のプラズマが必要

必要なエネルギー供給量~6x10³⁶ erg/s :: 周辺のHII領域の年齢~IM yr(Kim+07)

一方、典型的なOB型星のエネルギー供給量~10³⁵ erg/s

Reg 3の周辺のOB型星は60個未満(Kim+07)なので、可能性は低い **非熱的放射**:

制動放射、逆コンプトン散乱:予想される べき指数は観測値よりもハード シンクロトロン放射:電子の総量~Ⅰ0⁴⁷ ergが冷却時間~Ⅰ0³ yrよりも短い時間に供給 されなければならない。→OB型星が約Ⅰ00個必要

非熱的放射では説明できない

硬X線の起源:W5IC

熱的放射

Reg 3の硬X線放射は熱的放射を仮定すると温度約5keV SNRの典型的な熱的プラズマの温度は数keV以下 → 可能性はかなり低い

<u>非熱的放射</u>

- 制動放射、逆コンプトン散乱:予想されるベキ指数は観測と矛盾
- シンクロトロン放射
- ●セドフ期の初期で加速が終了する場合:<mark>説明できない</mark>

▶TeV電子は冷えてしまい存在できない

▶p-p衝突で生成される二次電子はX線帯域で非常に暗い(G8.7-0.1;Ajello+12など)

•加速が継続していれば、数十TeV程度の電子が存在する可能性あり(Sturner+97,

Nakamura+12)

★W5ICが希薄な環境にあれば…

▶衝撃波が減速されにくく、効率的な加速が持続

Reg I&2のプラズマは、ISMが主成分でMgリッチ

→W5IC誕生以前に大質量星のSNが起きた事を示唆(Tsujimoto+95)



▶ 倒 拿 次 / 小 枫 坯 C 1 6 C 、 、 、 次 平 1 小 み 加 坯 / 가 村 秒

Reg I&2のプラズマは、ISMが主成分でMgリッチ

→W5IC誕生以前に大質量星のSNが起きた事を示唆(Tsujimoto+95)

まとめ

- セドフ期以降のSNRでの宇宙線加速の時間発展を探るために、 W5ICをすざくで観測した。
- 熱的プラズマはT_e~0.7keVの電離非平衡モデルで表され、Mgのア バンダンスが太陽組成より大きい。
- RRCの兆候は得られなかった。
 - 超熱的電子による電離の経過時間が短いために、過電離プラズ マを形成するまでに至っていないことと無矛盾。
- 硬X線放射は広がった系内天体と考えられ、温度~5keVの熱的プラズマからの放射 or べき~2.2の非熱的放射で表される。
 - ▶ W5IBに存在するOB型星による星風起源の可能性は低い。
 - ▶ W5ICで加速が継続していれば、TeV電子からのシンクロトロン放射で説明可能。

Backup Slides



*SPEXのプラズマコードで不足しているFe L(n>5)を補うために追加 *バックグラウンドは他の領域からスケーリングして推定

✓両方の領域とも0.7keVの電離非平衡モデルで最も良く再現できる
 ✓Mgのアバンダンスが太陽組成より有意に高い
 ✓顕著な放射再結合連続線(RRC)は見つからなかった

Table 2. The best-fit results^{*} of Reg 1 and Reg 2.

Table 4. The fit results of Reg 3^* .

Parameter	Reg 1	Reg 2	
CIE			
$N_{\rm H}~(10^{22}~{\rm cm}^{-2})$	$1.56~(1.61)~^{+0.06}_{-0.05}$	$2.01~(2.07)~^{+0.09}_{-0.08}$	
$VEM \ (10^{57} \ {\rm cm}^{-3})^{\dagger}$	$7.68\ (7.74)\ ^{+1.31}_{-0.96}$	$7.17\ (7.47)\ ^{+1.41}_{-1.01}$	
$T_{\rm e}~({\rm keV})$	$0.49~(0.48)~^{+0.02}_{-0.02}$	$0.56~(0.55)~^{+0.02}_{-0.03}$	
$Z_{\rm Mg}$ (solar)	$1.91~(2.02) \stackrel{+0.18}{_{-0.17}}$	$1.53\ (1.61)\ ^{+0.20}_{-0.20}$	
$Z_{\rm Si}$ (solar)	$1.08 (1.14) {}^{+0.13}_{-0.12}$	$0.50~(0.51)~^{+0.09}_{-0.09}$	
$Z_{\rm S}$ (solar)	$1.46\ (1.49)\ {}^{+0.32}_{-0.29}$	$0.40~(0.40)~^{+0.19}_{-0.18}$	
$\chi^2/d.o.f$	448/348	200/160	
NEI			
$N_{\rm H}~(10^{22}~{\rm cm}^{-2})$	$1.49~(1.51)~^{+0.05}_{-0.05}$	$1.97\ (2.02)\ ^{+0.08}_{-0.07}$	
$VEM \ (10^{57} \ {\rm cm}^{-3})^{\dagger}$	$4.14\ (3.94)\ {}^{+0.70}_{-0.62}$	$5.06~(5.12) \ ^{+1.01}_{-0.79}$	
$T_{\rm e}~({\rm keV})$	$0.70~(0.69)~^{+0.06}_{-0.05}$	$0.69~(0.68)~^{+0.05}_{-0.05}$	
$n_{\rm e}t~(10^{11}~{\rm cm}^{-3}~{\rm s})$	$1.77~(1.89) \ {}^{+0.57}_{-0.42}$	$2.97~(3.14)~^{+1.15}_{-0.83}$	
$Z_{\rm Mg}$ (solar)	$1.73\ (1.91)\ ^{+0.16}_{-0.14}$	$1.40\ (1.50)\ {}^{+0.16}_{-0.15}$	
$Z_{\rm Si}$ (solar)	$0.89~(0.97)~^{+0.11}_{-0.10}$	$0.48~(0.50)~^{+0.08}_{-0.08}$	
$Z_{\rm S}$ (solar)	$0.83~(0.88)~^{+0.21}_{-0.19}$	$0.30~(0.30)~^{+0.15}_{-0.14}$	
χ^2 /d.o.f	383/347	168/159	

* The values in the parentheses are obtained by increasing the GRXE spectrum by a factor of 1.25, for systematics.

[†] Volume emission measure, $VEM = \int n_{\rm e} n_{\rm H} dV$, where $n_{\rm e}$ and $n_{\rm H}$ are the electron and Hydrogen densities, respectively, and V is the emitting volume, assuming the distance of 6 kpc.

Parameter	Model of equation (2) Model of equation (3)	
NEI [†]		
$N_{\rm H}~(10^{22}~{\rm cm}^{-2})$	$2.42~(2.41)~^{+0.10}_{-0.10}$	$2.40\ (2.38)\ ^{+0.12}_{-0.12}$
$VEM \ (10^{57} \ {\rm cm}^{-3})^{\ddagger}$	5.02 (5.05) $^{+0.45}_{-0.43}$	$4.66~(4.86)~^{+0.54}_{-0.52}$
Thermal (CIE4)		
$N_{\rm H}~(10^{22}~{\rm cm}^{-2})$	$0.86~(0.98)~^{+0.17}_{-0.13}$	
$VEM \ (10^{58} \ {\rm cm}^{-3})^{\ddagger}$	$6.79~(6.50)~^{+0.86}_{-0.75}$	
$T_{\rm e}~({\rm keV})$	$5.08 (4.93) {}^{+1.12}_{-0.83}$	
$Z_{\rm Fe}$ (solar)	$0.24~(0.23)~^{+0.16}_{-0.16}$	
Luminosity§	$6.53~(6.14)~^{+0.83}_{-0.72}$	
Nonthermal (Powerlaw2)		
$N_{\rm H}~(10^{22}~{\rm cm}^{-2})$		$1.15\ (1.30)\ {}^{+0.25}_{-0.19}$
Photon index		$2.23~(2.29)~^{+0.19}_{-0.18}$
Luminosity§		$7.02~(6.63)~^{+2.41}_{-1.76}$
χ^2 /d.o.f	443/375	445/376

* The values in the parentheses are obtained by increasing the GRXE spectrum by a factor of 1.25, for systematics.

 † The parameters except for VEM are fixed at the values of the NEI model for Reg 1.

[‡] Volume emission measure, $VEM = \int n_{\rm e} n_{\rm H} dV$, where $n_{\rm e}$ and $n_{\rm H}$ are the electron and Hydrogen densities, respectively, and V is the emitting volume, assuming the distance of 6 kpc.

 § Unabsorbed luminosity in the 2.0–10.0 keV band in units of $10^{33}~{\rm erg~s^{-1}},$ for the distance of 6 kpc.



 $Absm1 \times Powerlaw1 + Absm2 \times CIE1 + Absm3 \times (CIE2 + CIE3)$

+ Gaus1 + Gaus2).



Table 3. The best-fit result of the BGD region.

Parameter	Foreground	Medium	High
	(CIE1)	(CIE2)	(CIE3)
$N_{\rm H} \ (10^{22} \ {\rm cm}^{-2})$	$0.49 \ ^{+0.25}_{-0.12}$	0.58 (fixed)	
$T_{\rm e}~({\rm keV})$	$0.11 \ ^{+0.06}_{-0.03}$	$0.49 \ ^{+0.09}_{-0.13}$	$3.82 \ ^{+1.49}_{-0.86}$
$Z_{\rm Fe}$ (solar)	1.00 (fixed)	0.61	$+0.23 \\ -0.19$
$f_{0.5-10}*$	1.60(52.9)	2.25(11.7)	7.25(10.6)
$f_{6.4}{}^{\dagger}$		$6.16 \begin{array}{c} +22.7 \\ -6.16 \end{array}$	
χ^2 /d.o.f		186/167	
* Observed flux	in the 0.5	–10 keV b	and in unit

* Observed flux in the 0.5–10 keV band in units of 10^{-13} erg s⁻¹ cm⁻². Values in parentheses are the absorption-corrected values.

 † Observed photon flux of 6.4 keV line in units of 10^{-7} photons $\rm s^{-1}\ cm^{-2}.$

Sturner+97

