



Fermi
Gamma-ray Space Telescope

2013年3月12日
宇宙科学奨励賞 講演



科学衛星を用いたX線、
ガンマ線観測による
宇宙線加速の研究

内山 泰伸

SLAC 国立加速器研究所
Panofsky Fellow

(4月から立教大学に着任)

謝辞



高橋先生

田島さん

私

田中君



釜江先生



宇宙の巨大加速器: 超新星残骸

超新星が星間空間に作る**衝撃波**

→ 高温プラズマ (X線放射)

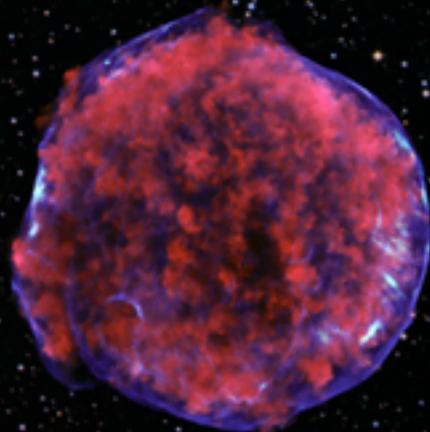
→ 粒子加速 (多波長放射)

$E_{\max} \simeq 10^{14}$ eV (100 TeV)

銀河宇宙線を説明するためには、

$E_{\max} \simeq 3 \times 10^{15}$ eV (3 PeV)

超新星残骸 (SNR)



6 arcmin

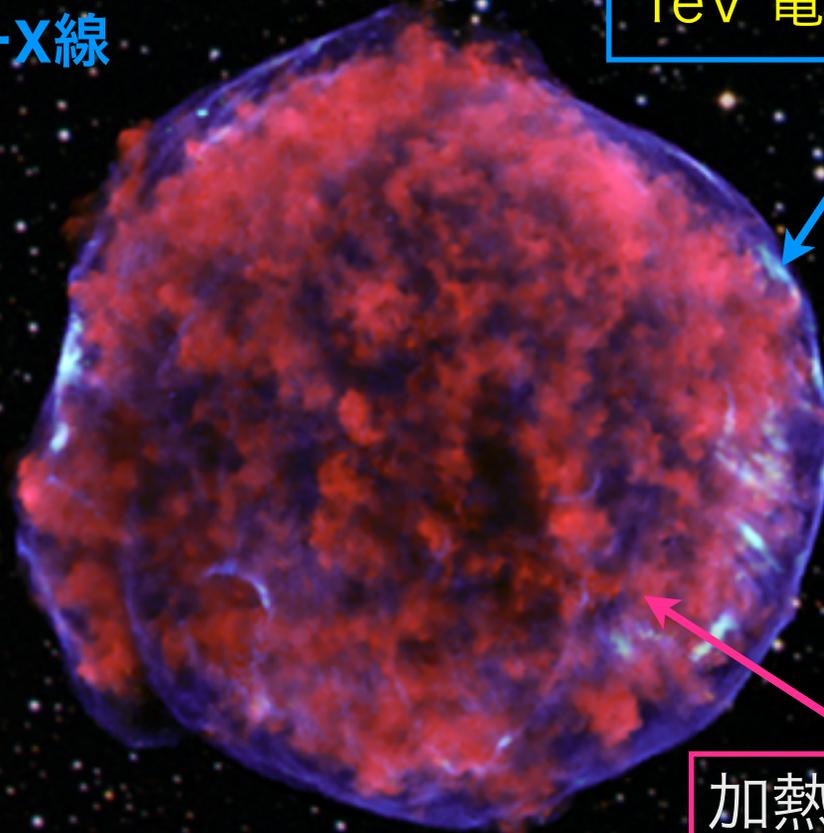


ティコの超新星残骸

Chandra X-ray image
of Tycho's SNR (SN 1572):

赤: 低エネルギーX線

青: 高エネルギーX線



(無衝突)衝撃波において、超高エネルギー粒子が加速されている
TeV 電子がシンクロトロンX線放射



Energy:

TeV = 10^{12} eV

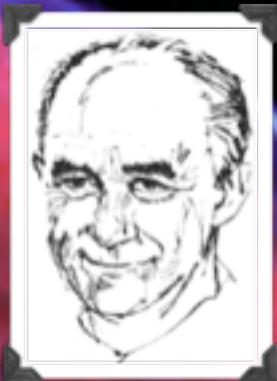
(c.f. LHC: 7 TeV)

加熱されたイジェクタ
(爆発放出物)

e.g. O, Si, S, Fe

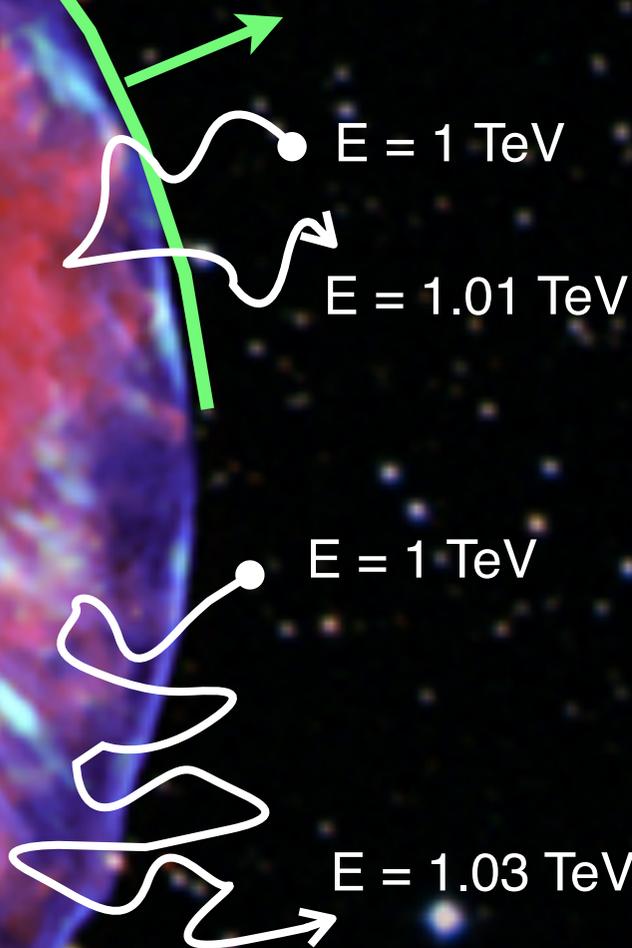
元素合成の様子がわかる

6 arcmin = 23 light-year



加速の基本メカニズム：フェルミ加速

衝撃波 (速度 V)



衝撃波の周り：

荷電粒子が磁気波動によって弾性散乱される。(ランダムウォーク)

粒子が衝撃波を1往復：
エネルギーゲイン

$$\Delta E/E \sim V/c$$

$$\sim 0.01 \quad (\text{young SNR})$$

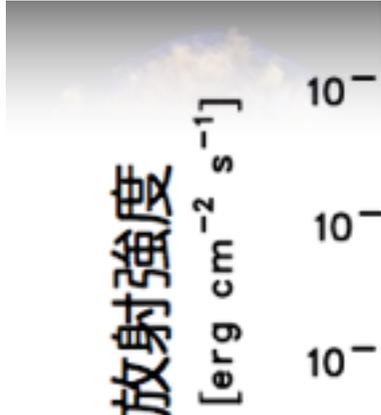
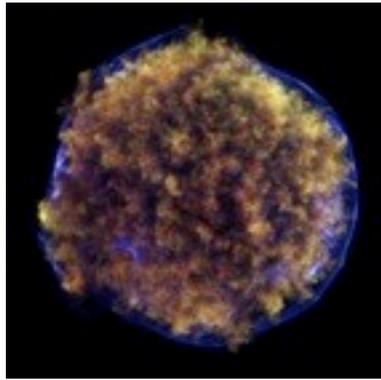
粒子が衝撃波を1000往復：
エネルギーは20000倍

$$E = \text{GeV} \rightarrow E = 20 \text{ TeV}$$

エネルギー分布は

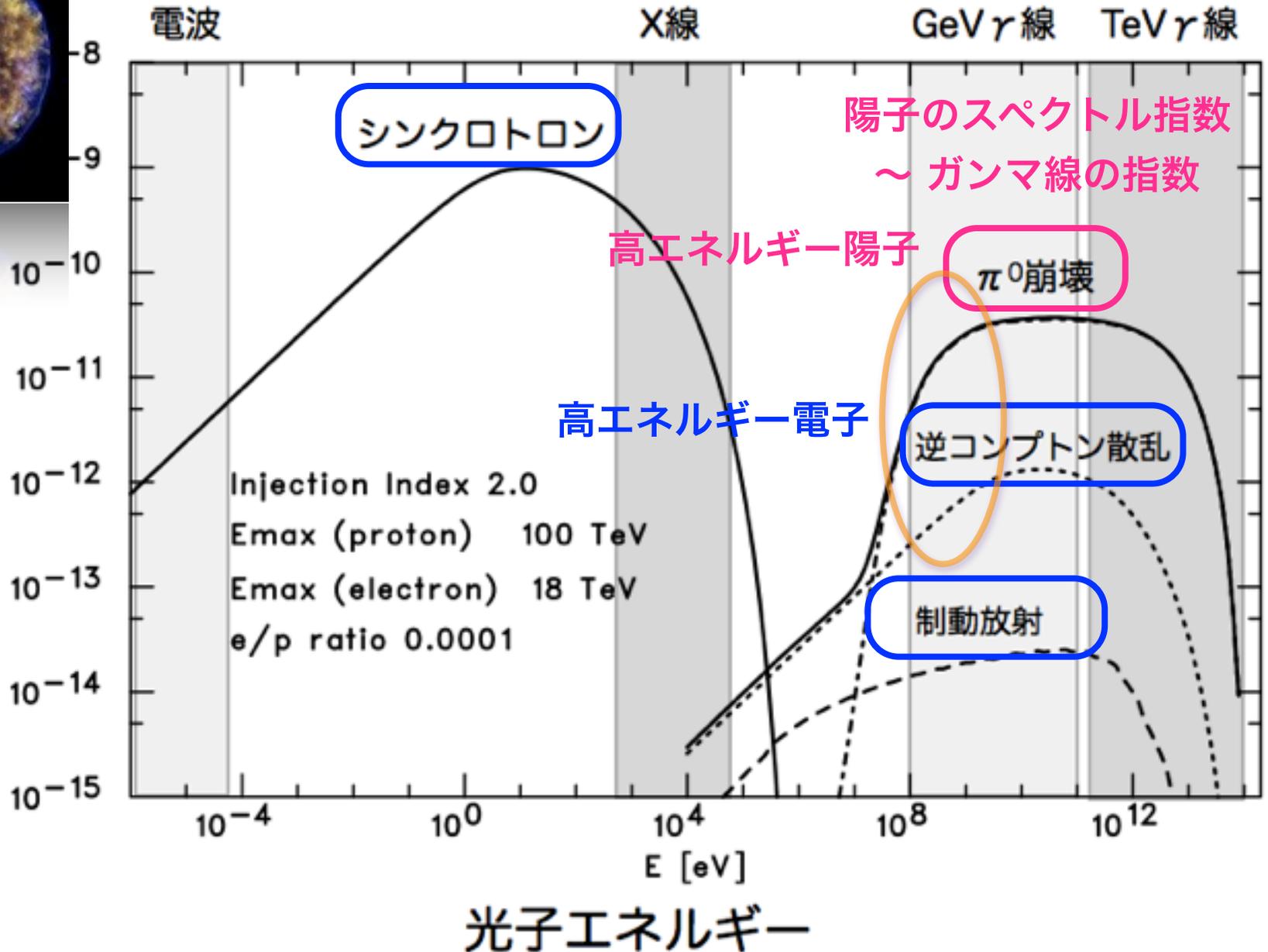
$$\text{指数2のべき関数 } N(E)dE \propto E^{-2} dE$$

加速された粒子が作る多波長スペクトル



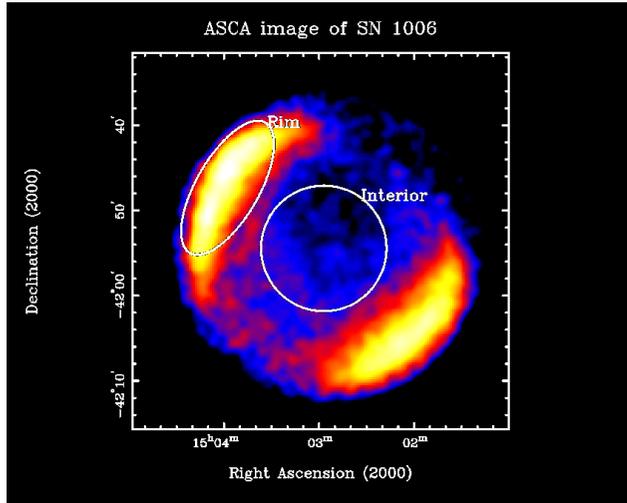
放射強度

νf_ν [erg cm⁻² s⁻¹]



X線ガンマ線観測：近年の急速な発展

あすか衛星

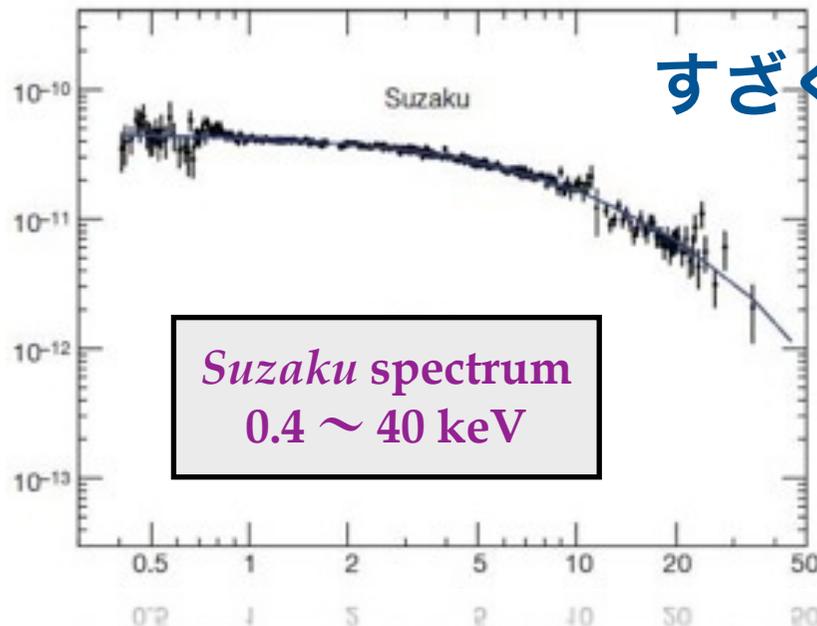
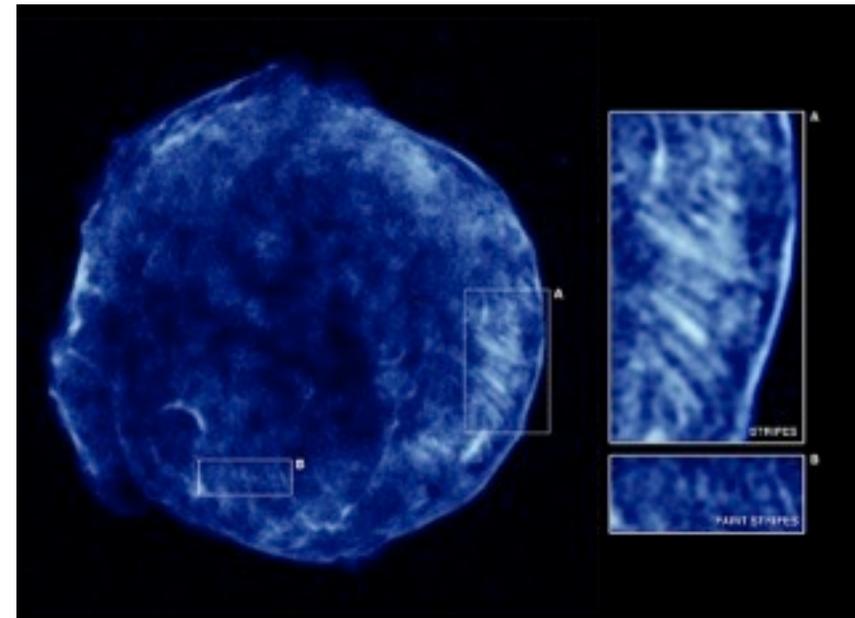


シンクロトロンX線の発見
(Koyama+1995)

チャンドラ衛星

シンクロトロンX線フィラメントの発見
→ 「加速場所 = 衝撃波」

シンクロトロンX線時間変動の発見
→ 乱流磁場の増幅の証拠 (Uchiyama+2007)



すざく衛星

シンクロトロンX線スペクトルカットオフ
→ 磁場の乱れ $\delta B \sim B$ (ボーム極限)

Tanaka, Uchiyama+ (2008)

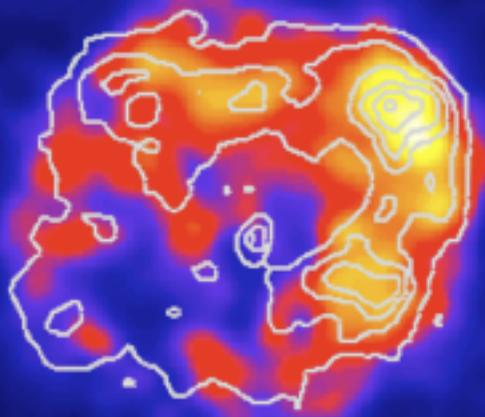
X線ガンマ線観測：近年の急速な発展

大気チェレンコフ望遠鏡 (TeVガンマ線観測)



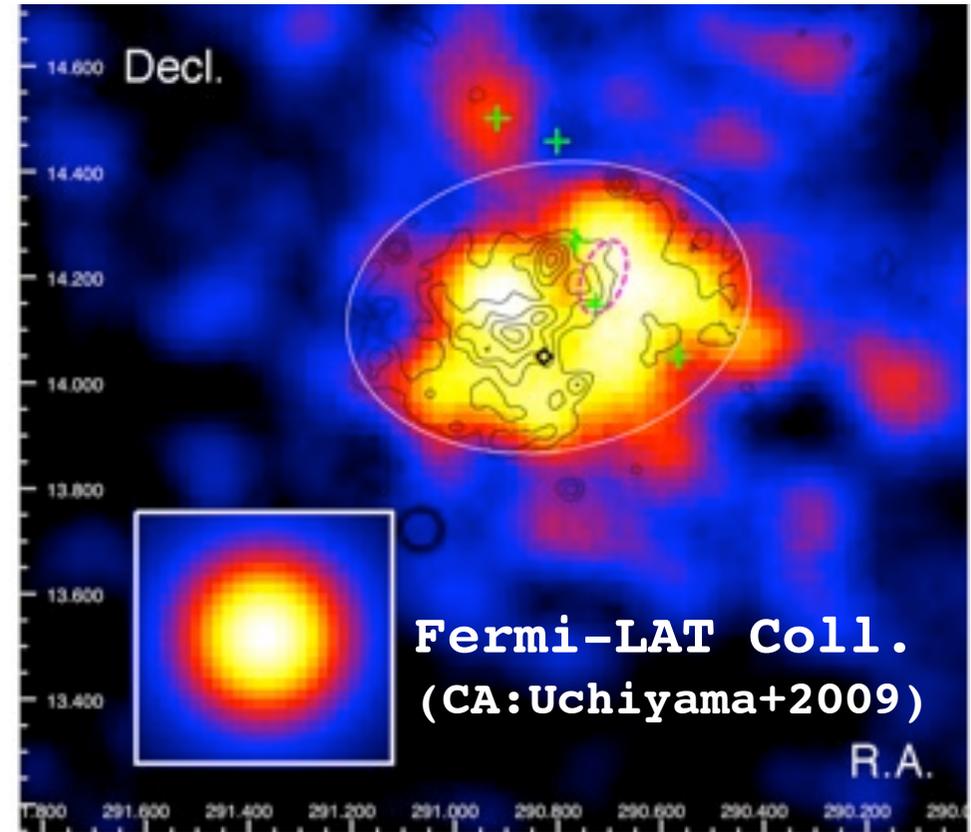
シンクロトロンX線と
相関するTeVガンマ線
→ ~ 100 TeV の粒子
の確実な証拠

等高線: あすか衛星
(Uchiyama+2002)



Aharonian+(2004, 2007)

フェルミ衛星 (GeV ガンマ線)



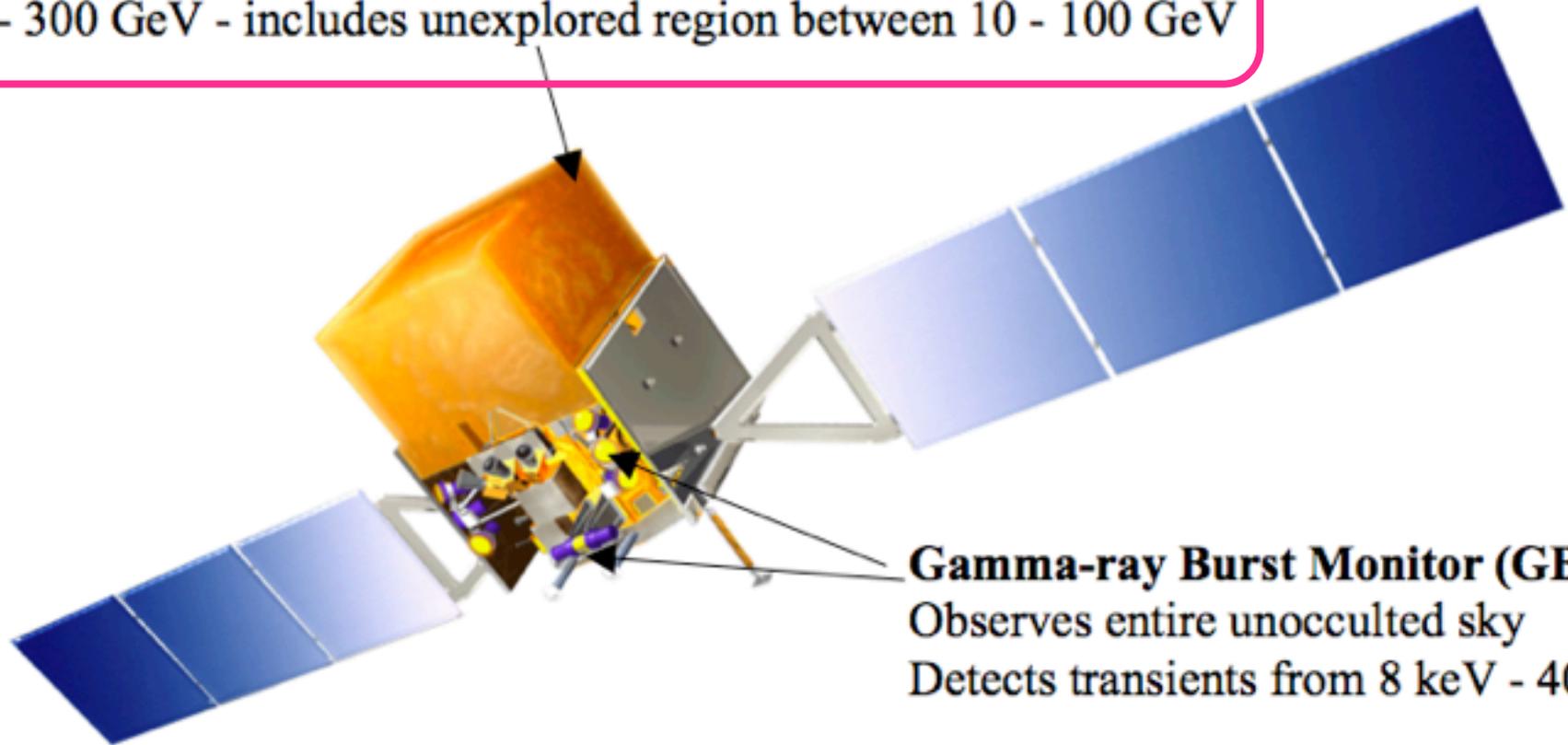
超新星残骸からのGeVガンマ線の発見
→ 加速メカニズムについて様々な情報

π^0 崩壊ガンマ線の同定
→ 陽子加速の証拠



Large Area Telescope (LAT)

Observes 20% of the sky at any instant, views entire sky every 3 hrs
20 MeV - 300 GeV - includes unexplored region between 10 - 100 GeV



Gamma-ray Burst Monitor (GBM)

Observes entire unocculted sky
Detects transients from 8 keV - 40 MeV

Large Area Telescope (LAT) onboard Fermi



Si Tracker
(18 planes)

converter: tungsten
tracker: single-side Si strip

Gamma-ray (20 MeV - 300 GeV)

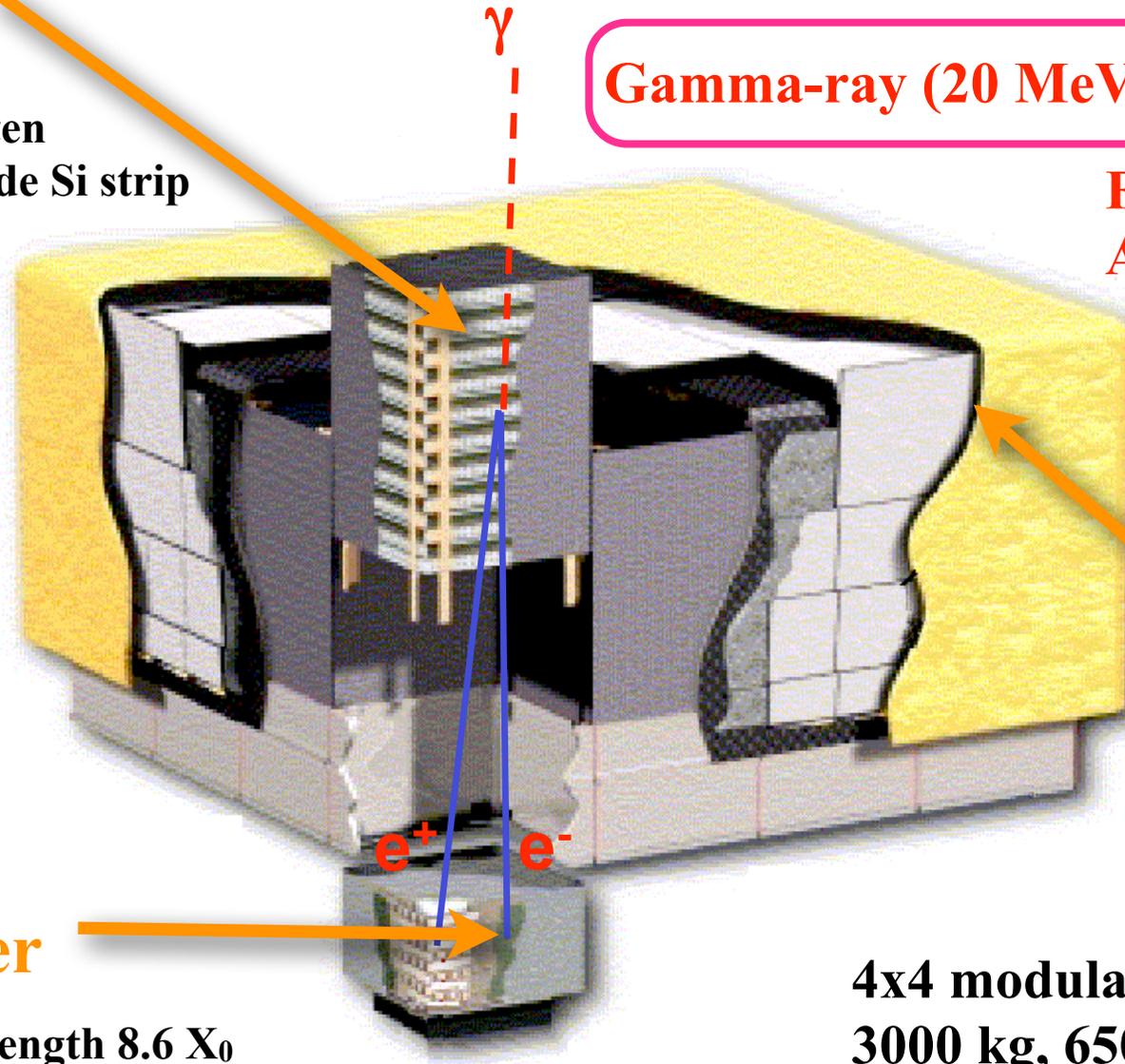
Field of view: 2.4 str
Angular resolution:
~ 1 deg at 1 GeV
~0.1 deg > 10 GeV

Anti
Coincidence
Detector

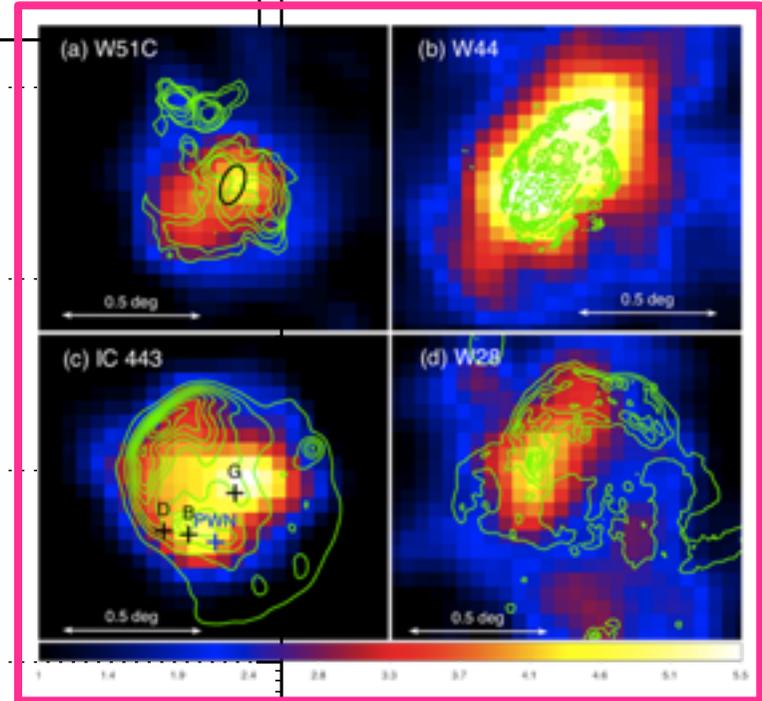
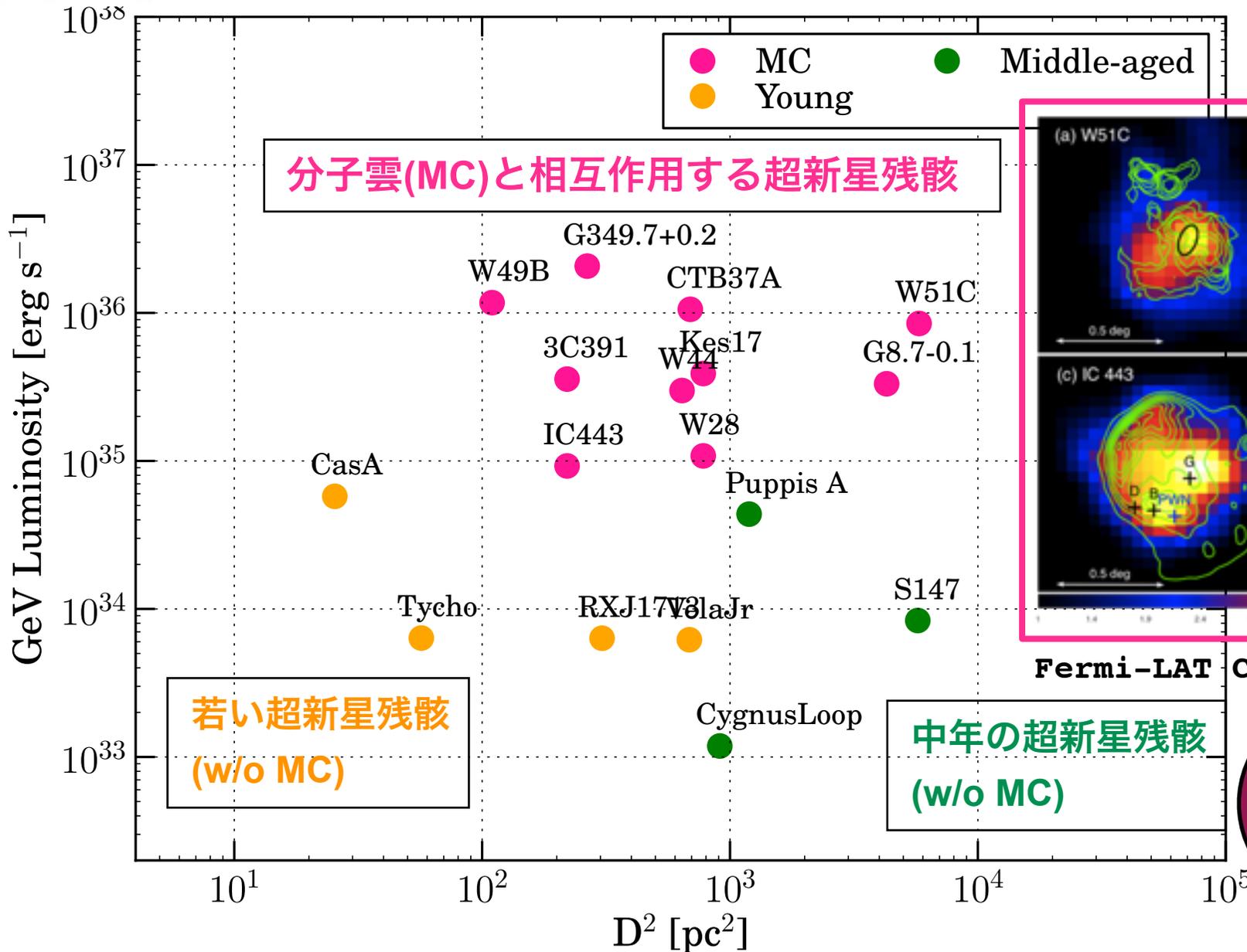
CsI
Calorimeter

total radiation length 8.6 X_0

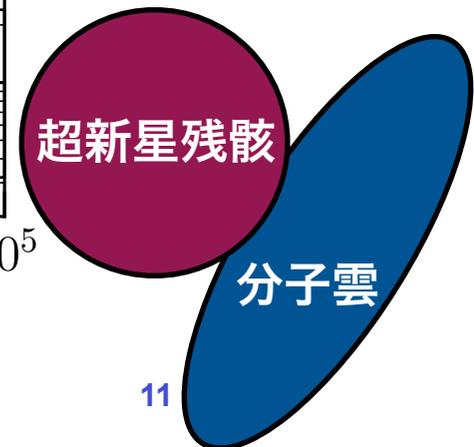
4x4 modular array
3000 kg, 650 W



フェルミ衛星が検出した超新星残骸



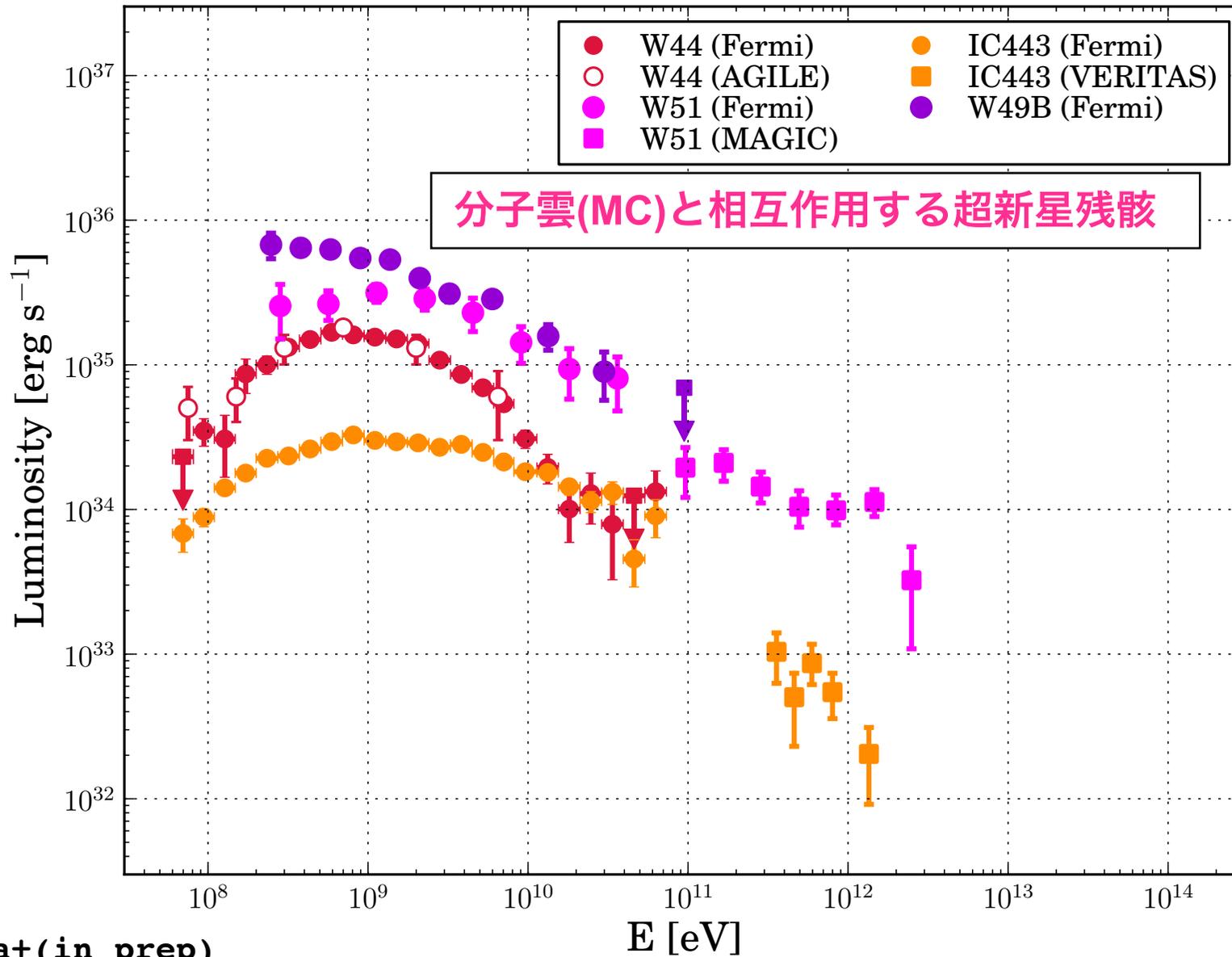
Fermi-LAT Coll (Uchiyama+) 2011



超新星残骸のガンマ線スペクトル



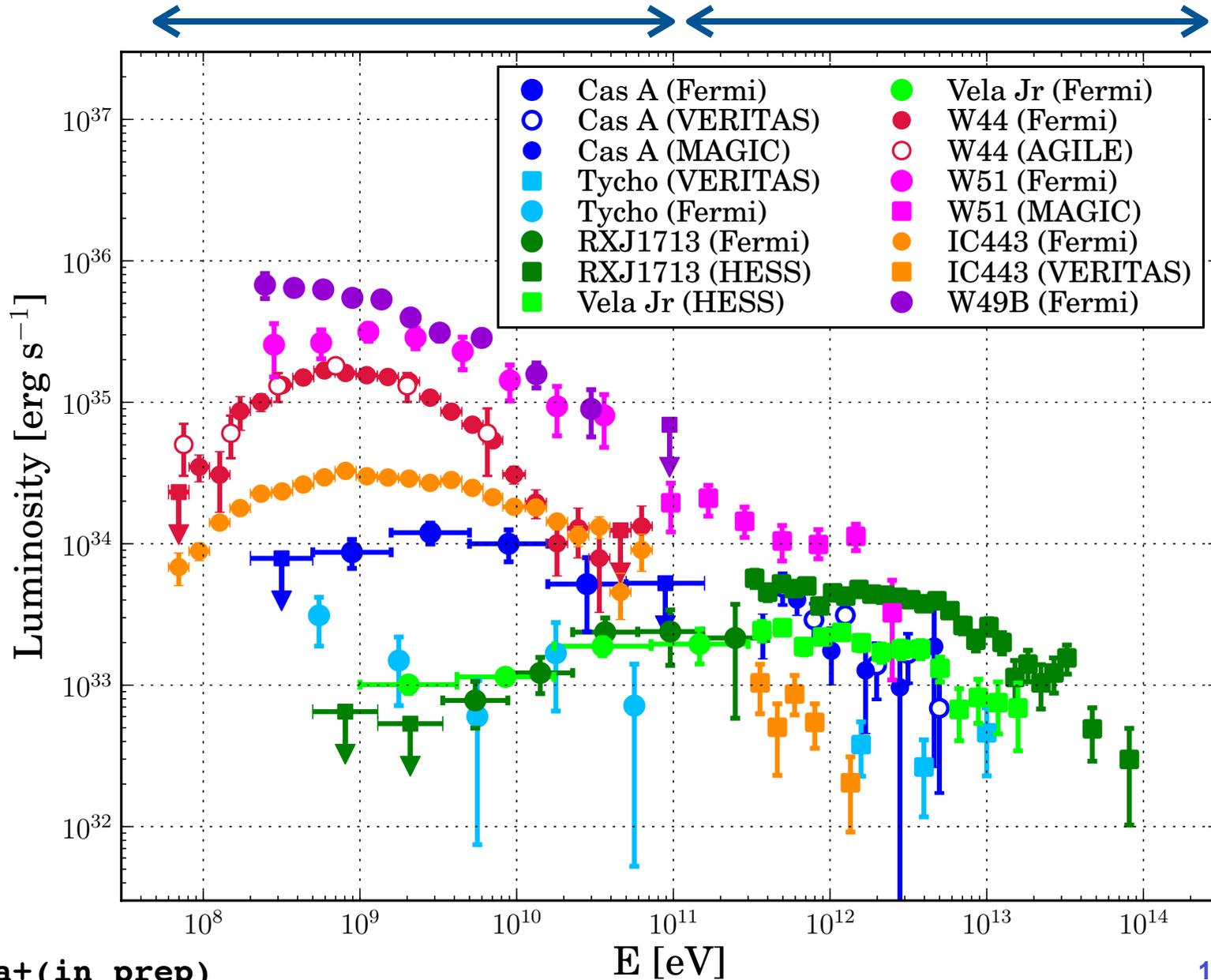
フェルミ衛星 (GeV ガンマ線) チェレンコフ (TeV ガンマ線)



超新星残骸のガンマ線スペクトル



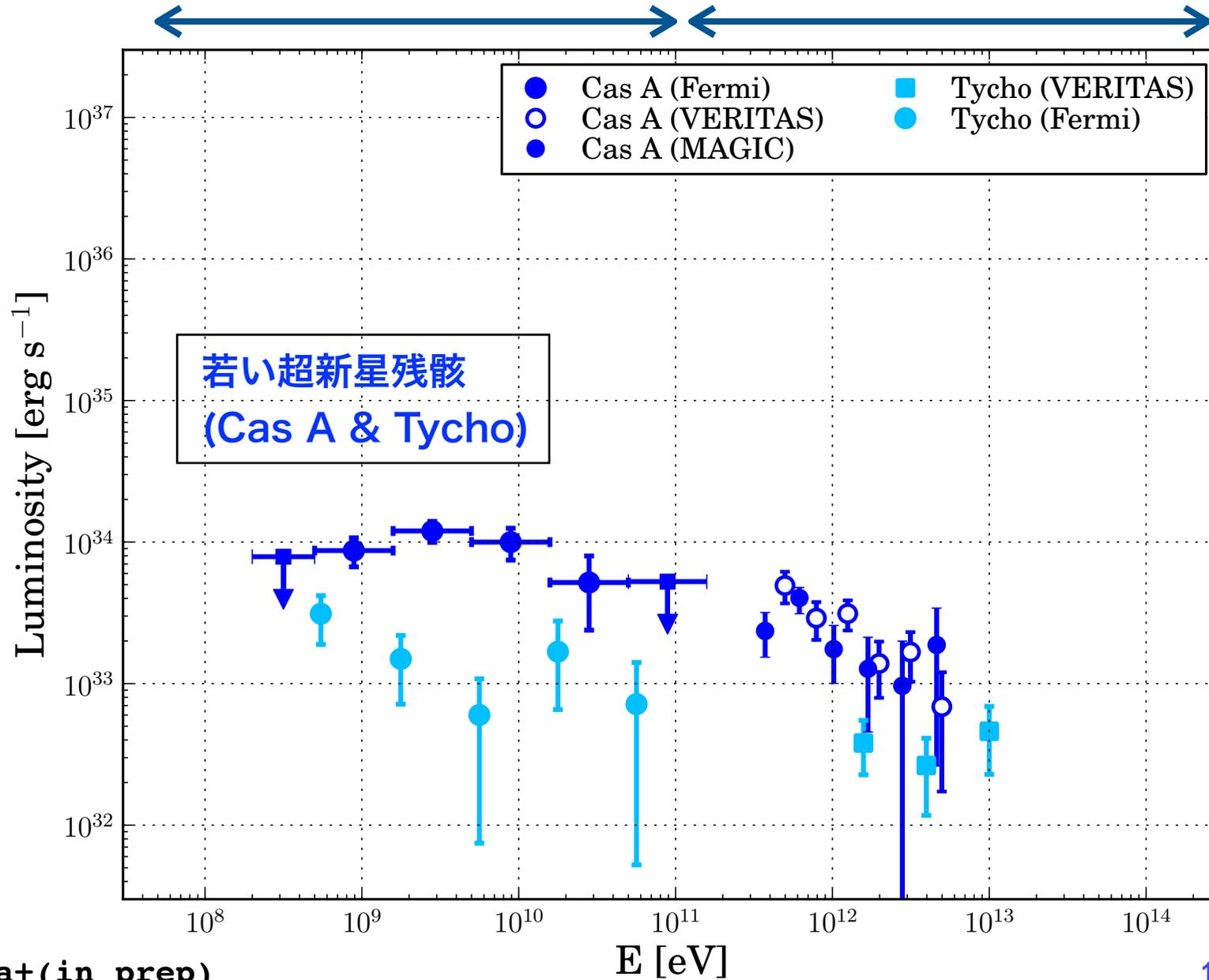
フェルミ衛星 (GeV ガンマ線) チェレンコフ (TeV ガンマ線)



超新星残骸のガンマ線スペクトル



フェルミ衛星 (GeV ガンマ線) チェレンコフ (TeV ガンマ線)

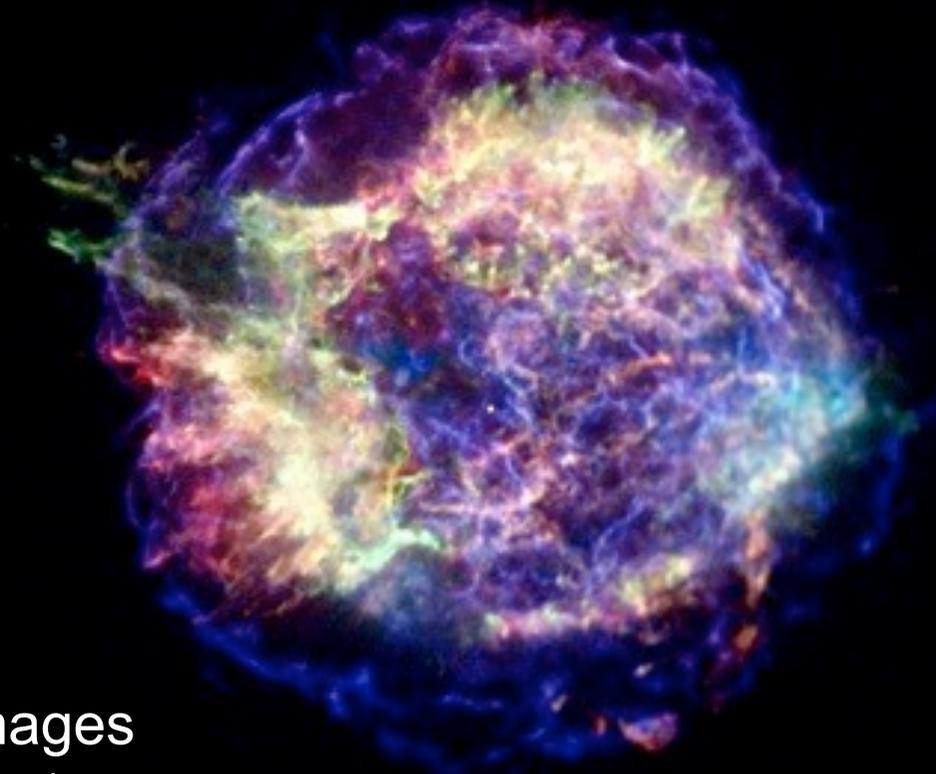
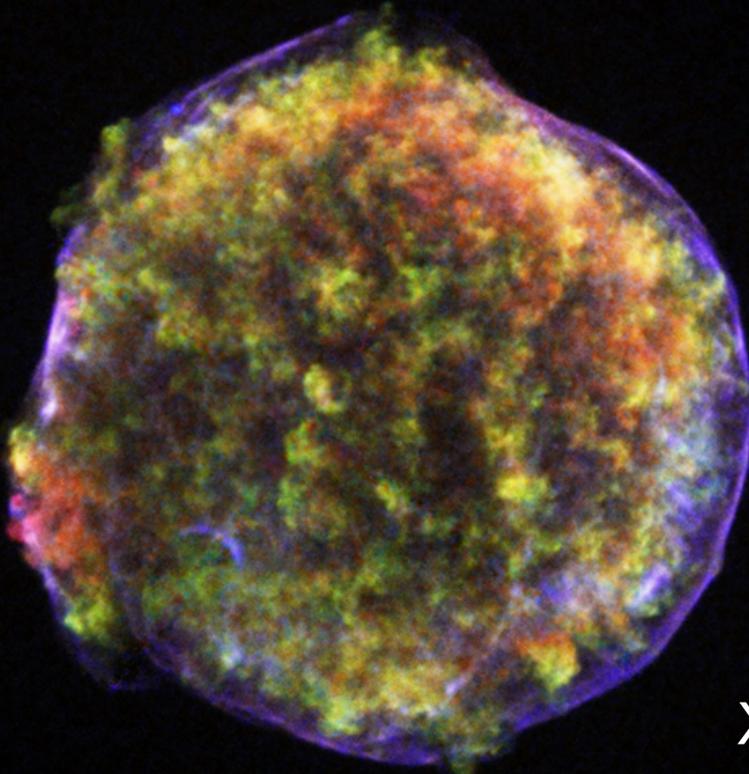


★ Tycho's SNR

- SN 1572
- SN type: Ia
- distance: ~ 3 kpc
- radius: ~ 3.7 pc

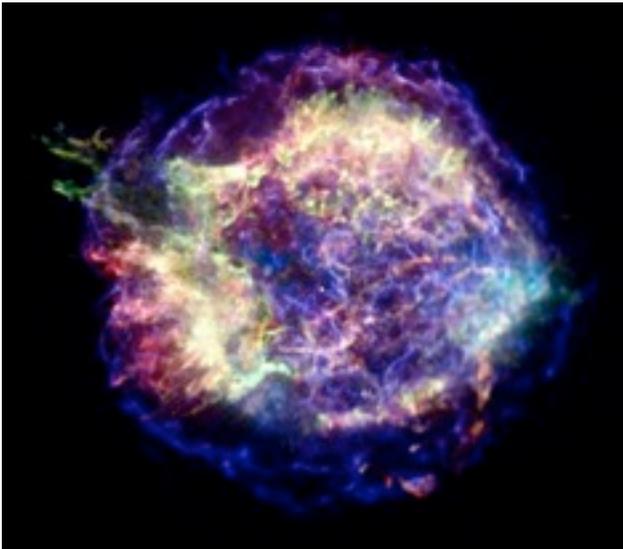
★ Cassiopeia A

- SN ~ 1680
- SN type: IIb
- distance: ~ 3.4 kpc
- radius: ~ 2.5 pc



X-ray Images
(Chandra)

Cas A: 宇宙線量の測定が可能に



シンクロトロンX線フィラメントの幅 (Vink & Lamming 03; Bamba+05; Parizot+06)、シンクロトロンX線時間変動 (Uchiyama & Aharonian 08; Patnaude & Fesen 09)
 → $B = 0.3-0.5 \text{ mG}$

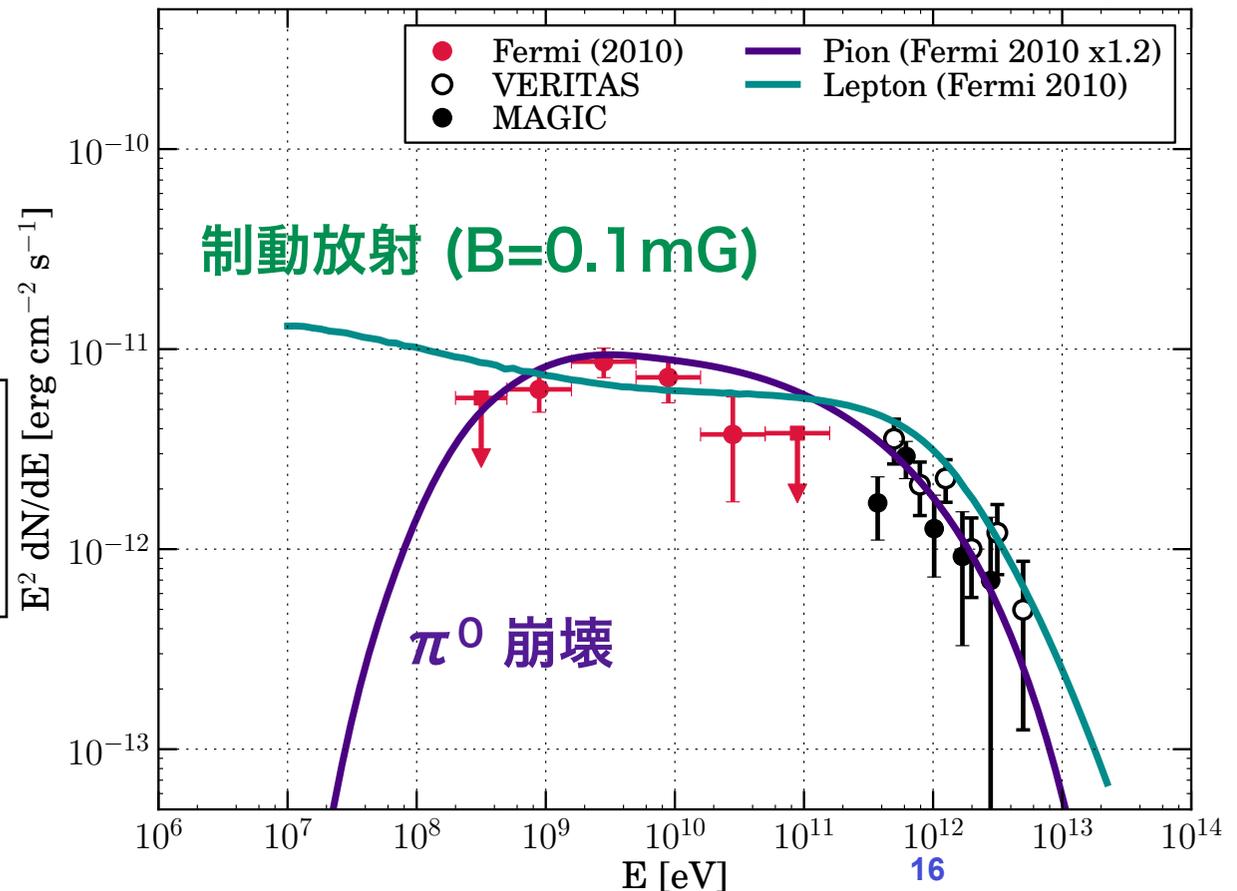
X線観測によって得られた磁場
 → ガンマ線は π^0 崩壊

宇宙線の総量: $\sim 0.4 \times 10^{50} \text{ erg}$

$E_{CR} \sim 2\% \text{ of } E_{SN} = 2 \times 10^{51} \text{ erg}$

宇宙線のSNR起源説に問題?
 最大エネルギー $E_{max} \sim 10 \text{ TeV}$
 → 宇宙線の脱走、加速の非一様性

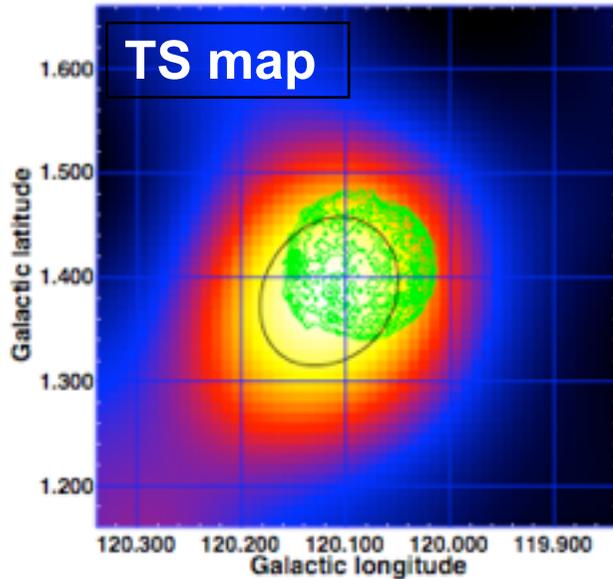
Fermi-LAT Coll. (Uchiyama, Funk) 2010



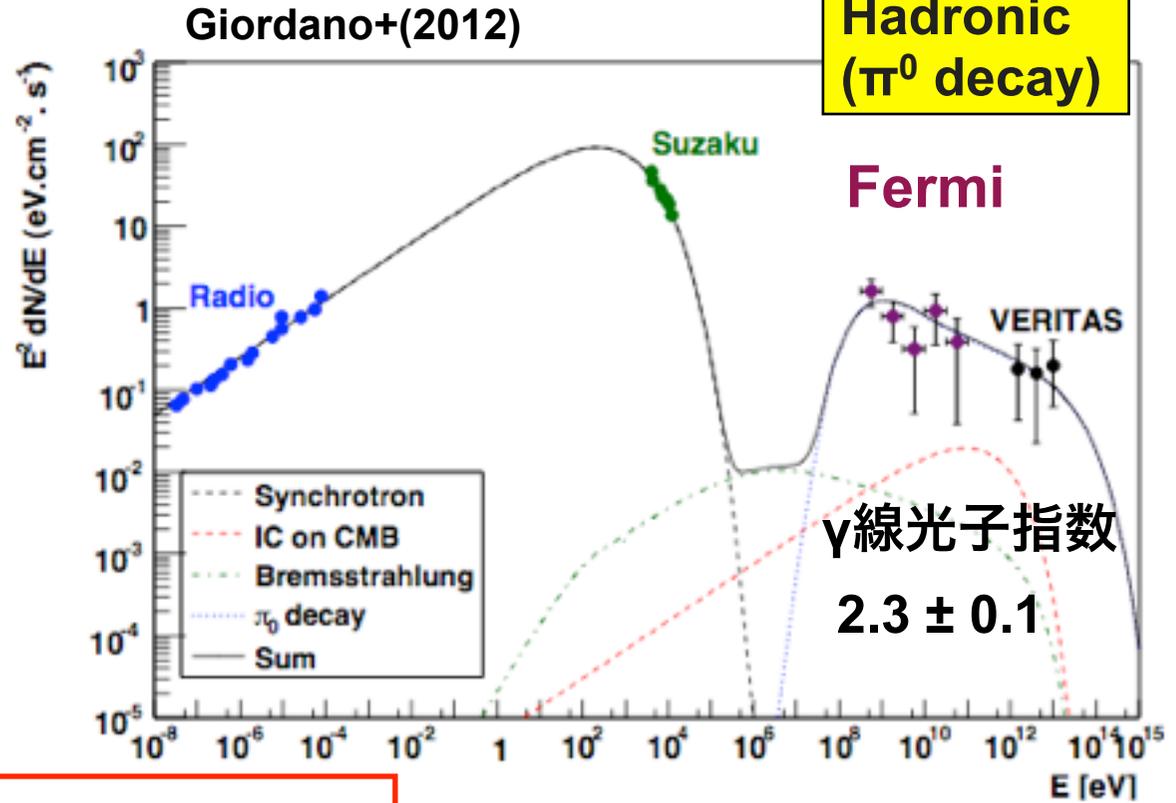
Tychoでも宇宙線量を測定



Fermi-LAT: Tycho の位置に
点源を検出 ($\sim 5\sigma$)



宇宙線の総量: $\sim 1 \times 10^{50}$ erg



宇宙線に移行した爆発運動エネルギー:

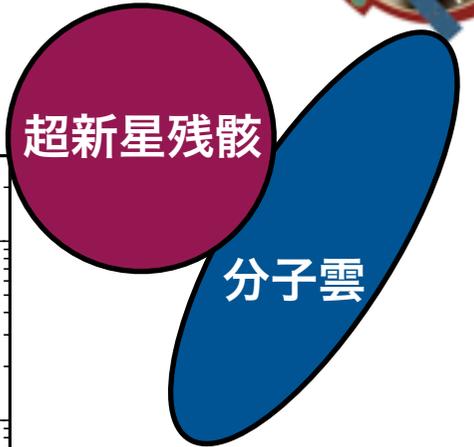
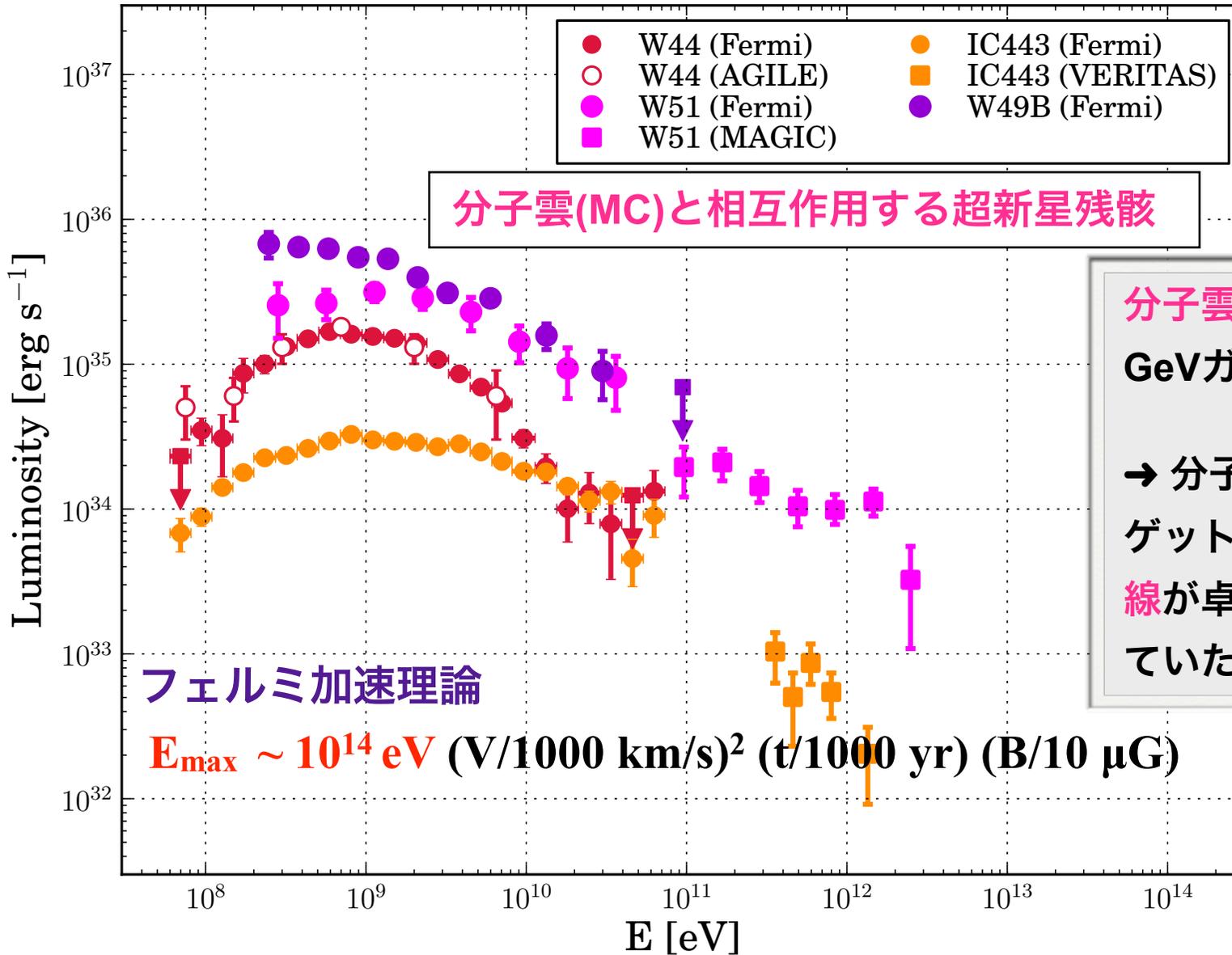
$$W_{CR} = 7\% \text{ of } E_{SN} \\ \sim 10^{50} \text{ erg}$$

Case	D_{kpc}	n_H [cm ⁻³]	E_{SN} [10 ⁵¹ erg]	$E_{p,tot}$ [10 ⁵¹ erg]	K_{ep}
Far	3.50	0.24	2.0	0.150	4.5×10^{-4}
Nearby	2.78	0.30	1.0	0.061	7.0×10^{-4}

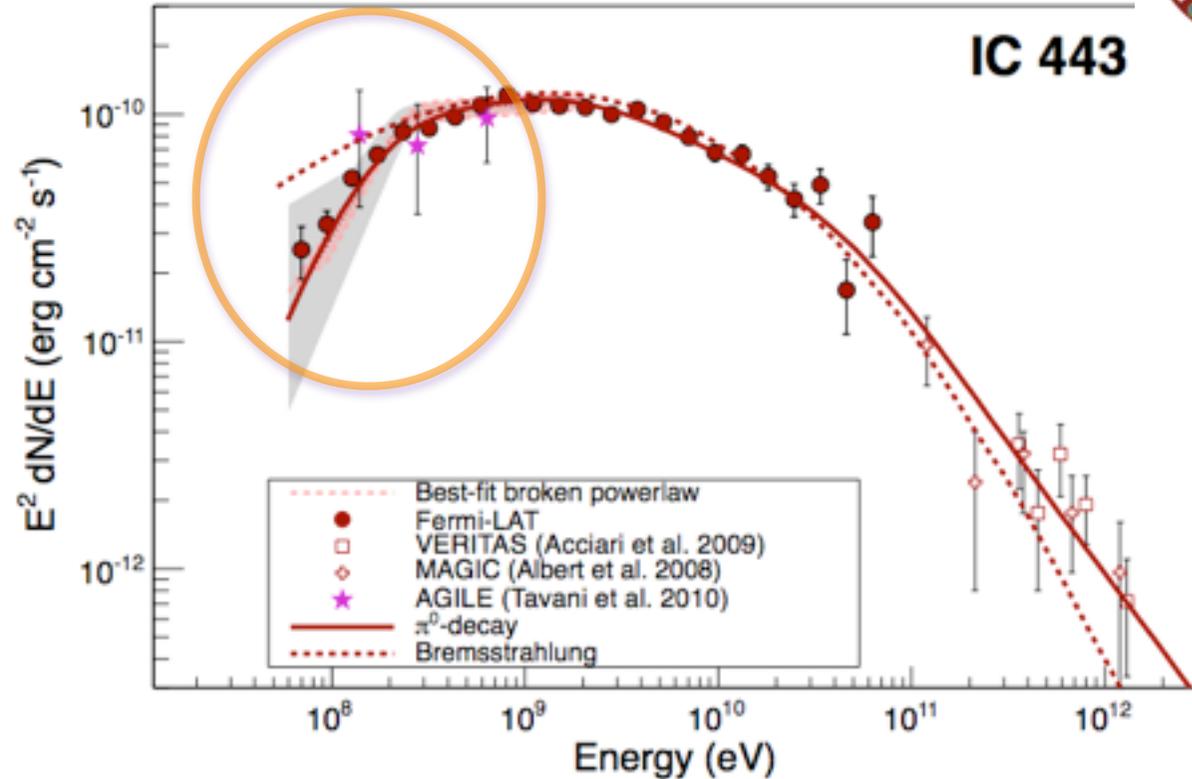
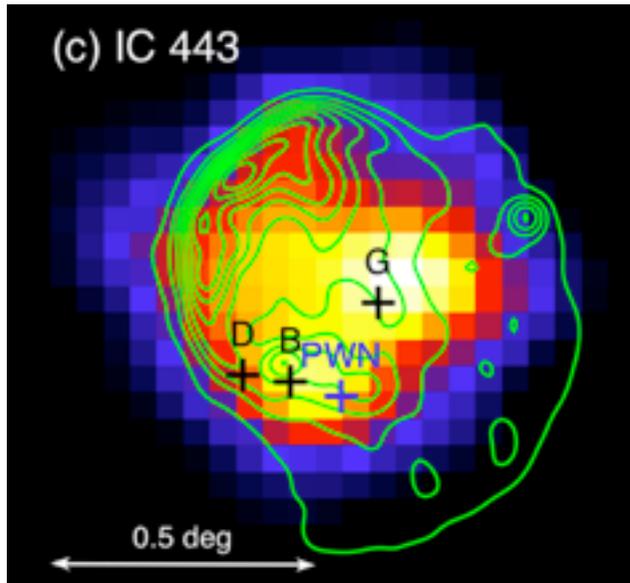
分子雲と相互作用する超新星残骸



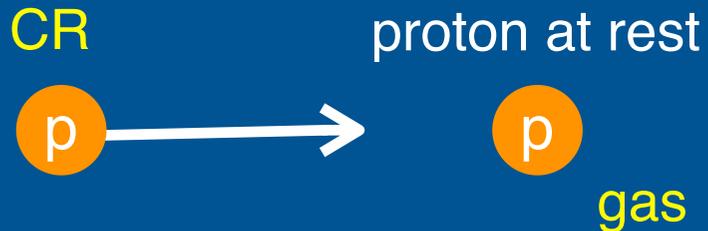
Uchiyama+(in prep)



分子雲と相互作用するSNR:
GeVガンマ線光度が大きい。
→ 分子雲(高密度ガス)がターゲットとなって π^0 崩壊ガンマ線が卓越することが期待されていた (Aharonian+94)。

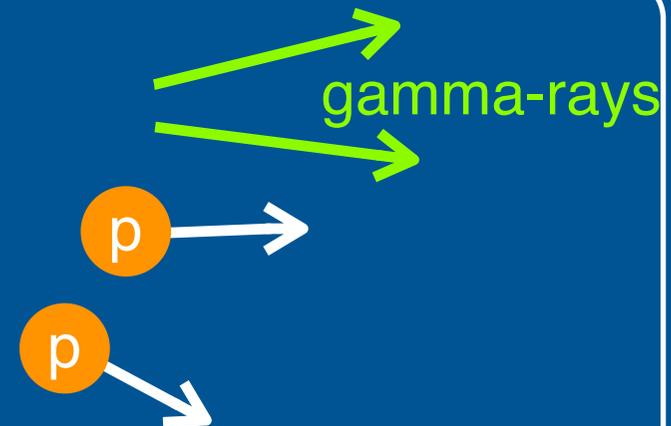


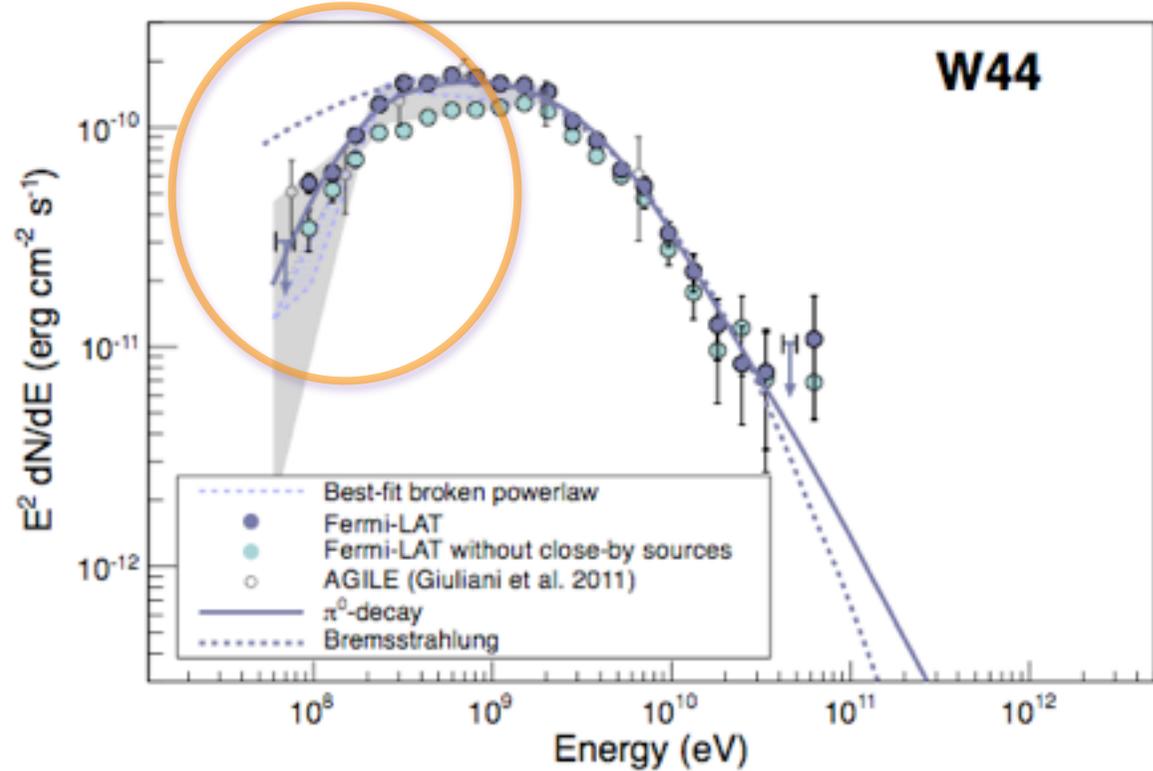
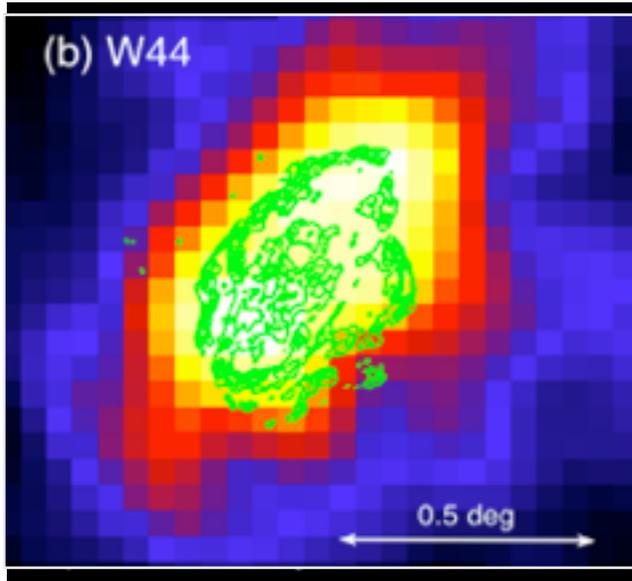
Before collision



High energy proton
($E > 1$ GeV)

After collision





Before collision

CR

proton at rest



gas

High energy proton
($E > 1$ GeV)

After collision



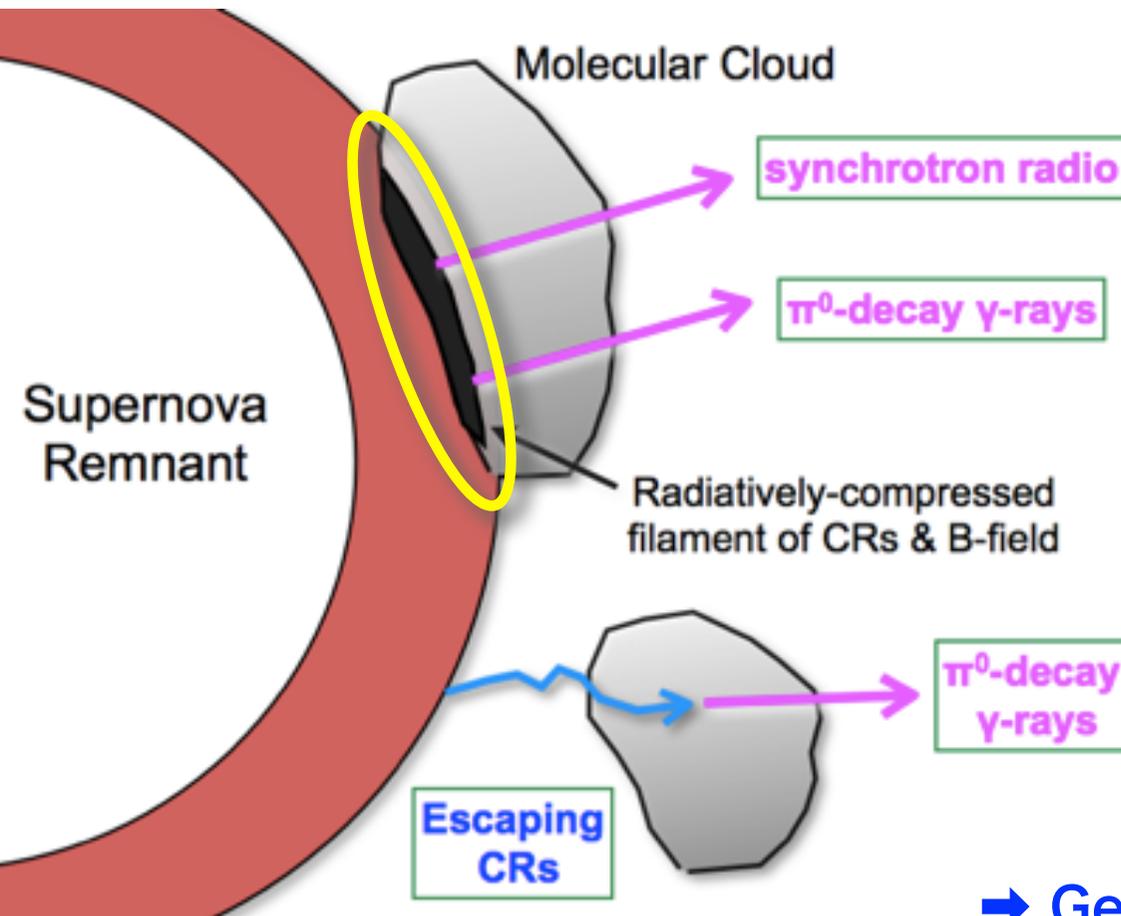
gamma-rays



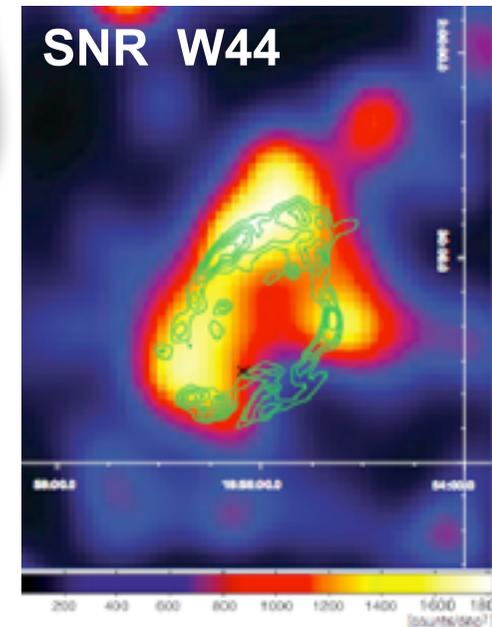
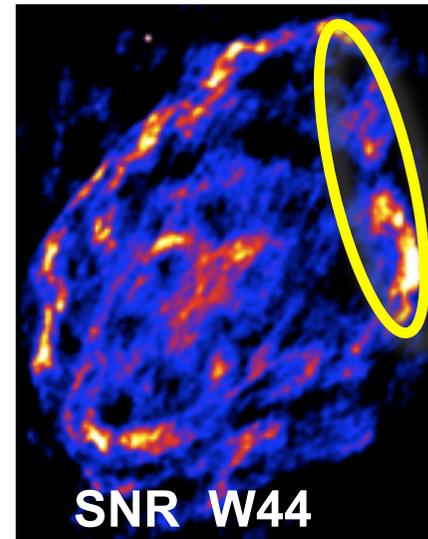
分子雲と相互作用するSNRのガンマ線放射モデル



Uchiyama+(2010) は、分子雲内に駆動される radiative shock で「ガス/磁場/宇宙線」が圧縮され、高光度のGeVガンマ線放射源となるモデルを提唱 (Crushed Cloud Model)。



↓ シンクロトロン電波
shocked H₂ ガス と空間相関



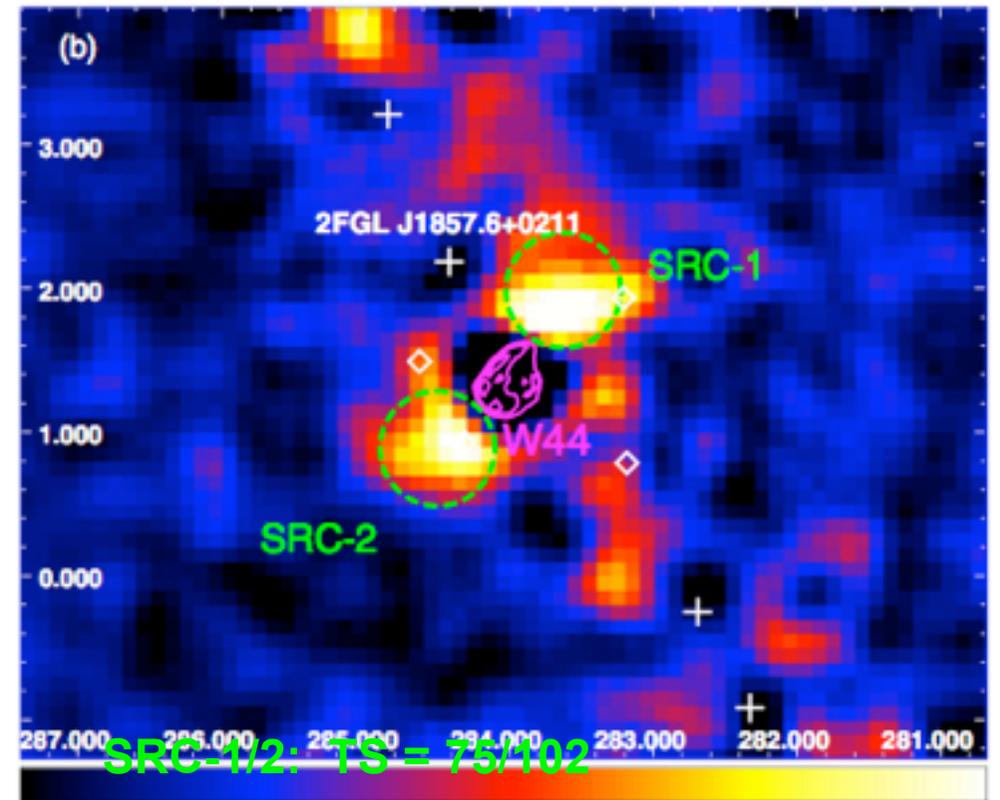
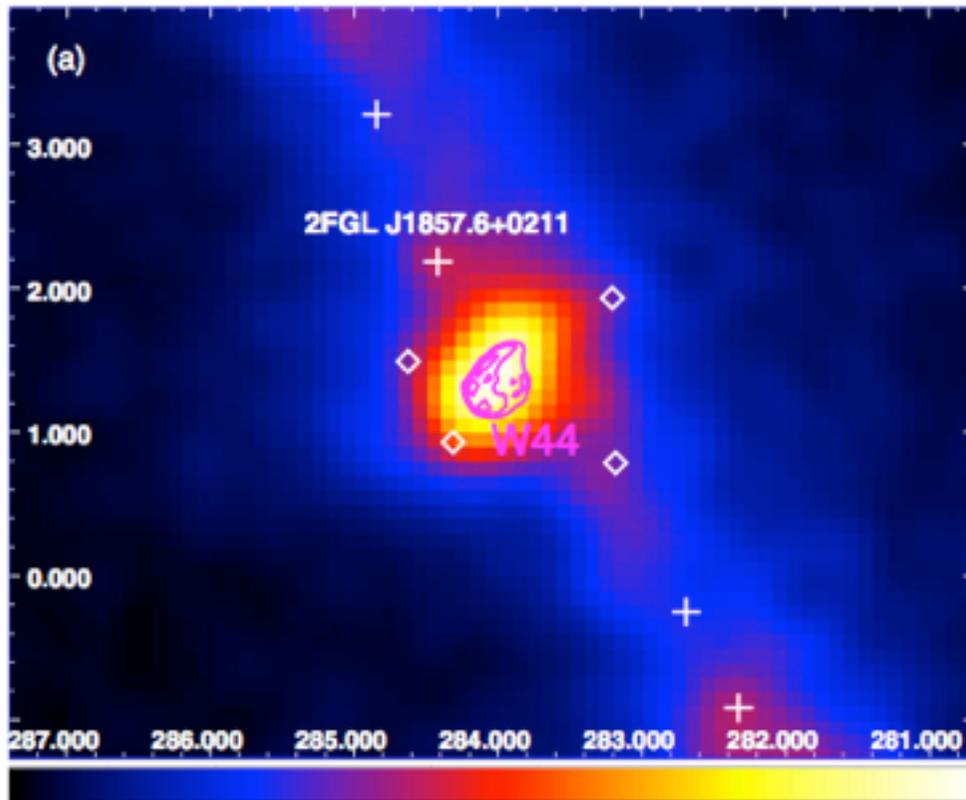
→ GeVガンマ線 (Fermi)



Uchiyama et al. (2012)

count map 2-100 GeV

residual map (W44 subtracted)



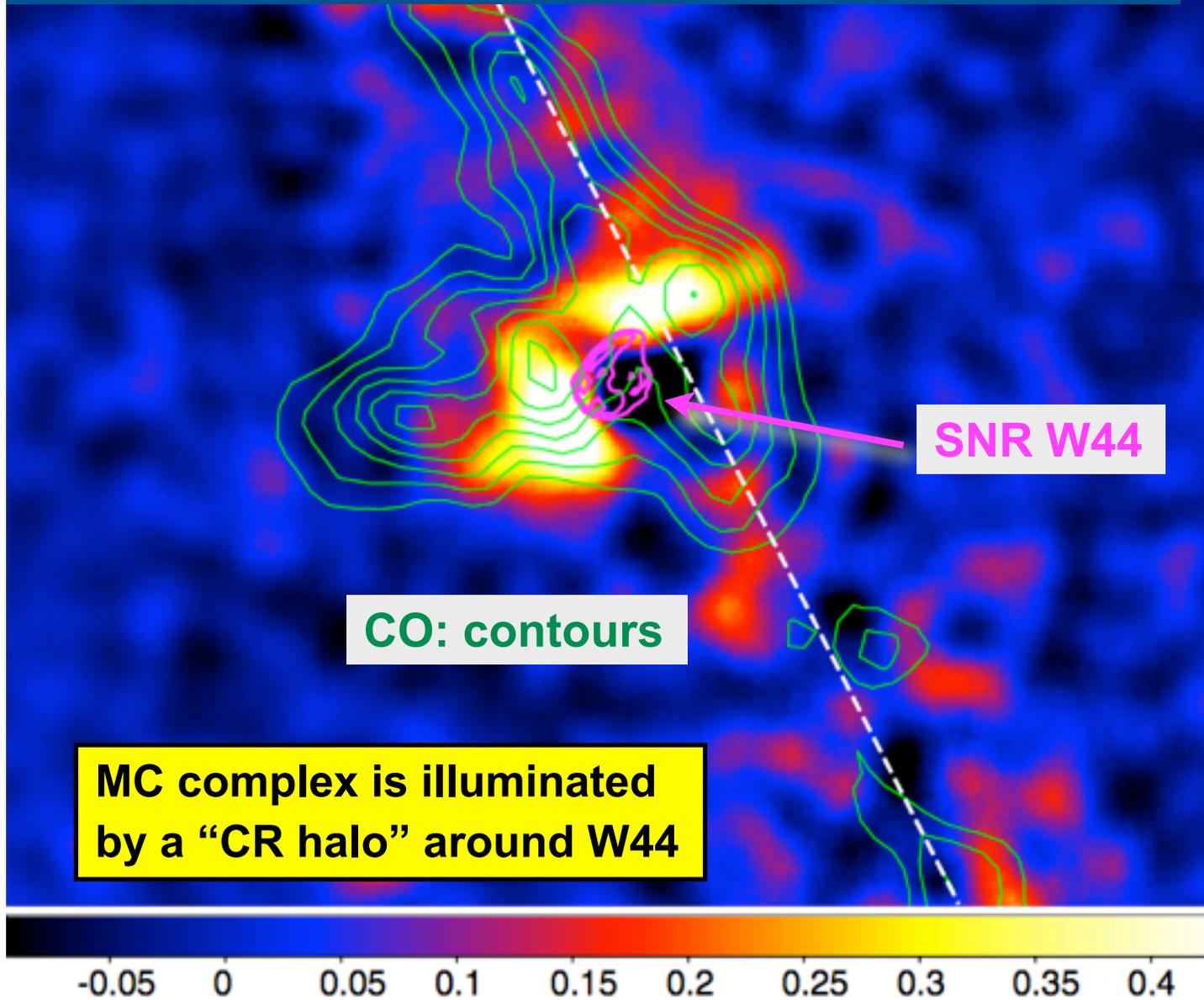
SRC-1/2: TS = 75/102

Crushed Cloud Model で説明できる成分を差し引いたあとに、より大スケールのガンマ線放射が見つかった。

Large-scale GeV γ -rays vs CO map

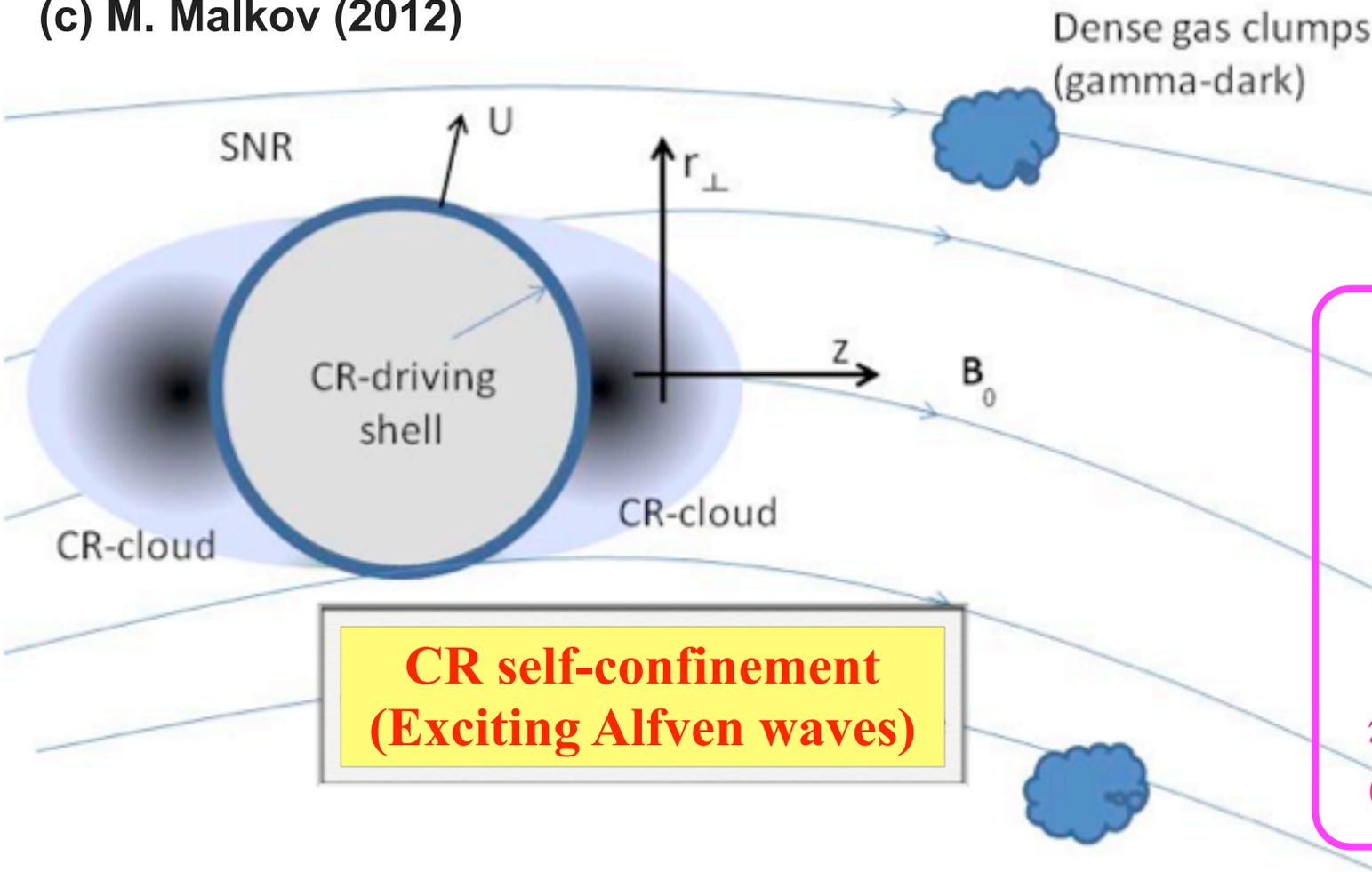
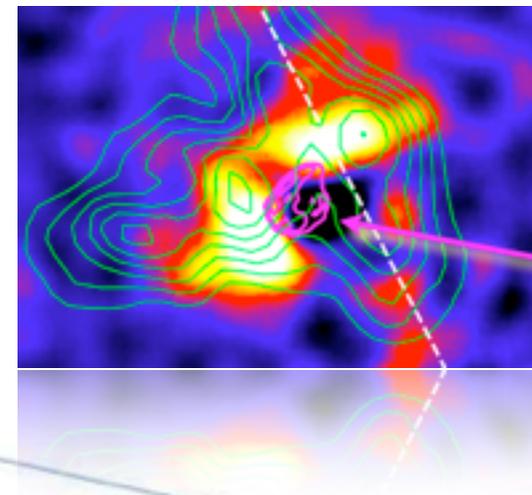


W44 is known to be surrounded by a complex of MCs.
Size ~ 100 pc, Mass $\sim 10^6 M_{\text{sun}}$ (Dame+1986)



Gamma-ray Evidence for Leaking CRs

(c) M. Malkov (2012)



**CR self-confinement
(Exciting Alfvén waves)**

**CR-illuminated
Dense gas clump**

**π^0 -decay γ -ray
(and bremsstrahlung)**

**After leaving SNR W44, CRs diffuse along the
external B -field direction \rightarrow bipolar morphology**



SNR起源説を考える上で重要な項目：

エネルギー総量：

「SNR はCR陽子 $\sim 10^{50}$ erg ($\sim 10\%$ of E_{SN})を生成するか？」

- ✓ Tycho, Cas Aなどで、およそこのCR生成量を確認。
- ✓ W44, IC443 で陽子起源の π^0 崩壊ガンマ線放射を同定。

最高エネルギー：

「SNR はCR陽子を $\sim 10^{15}$ eV にまで加速できるのか？」

- ✓ W44, IC443 で陽子起源の π^0 崩壊ガンマ線放射を同定。
- ✓ 若いSNRのX線観測により、乱流磁場の増幅とボーム拡散を確認

$$E_{\text{max}} \sim 10^{15} \text{ eV} (v/1000 \text{ km/s})^2 (t/1000 \text{ yr}) (B/100 \text{ } \mu\text{G})$$

新しい問題：宇宙線のSNRからの脱走(escape)