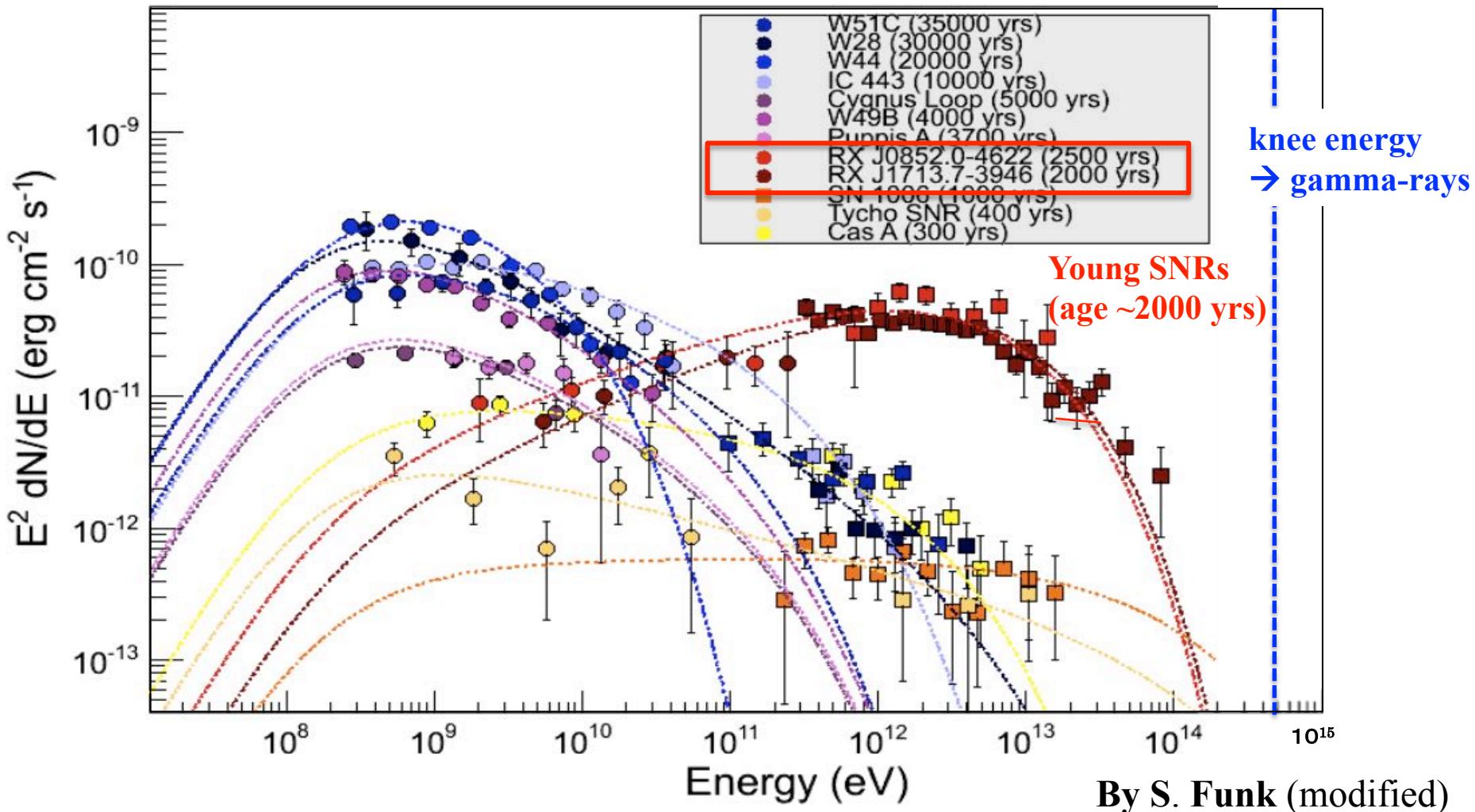


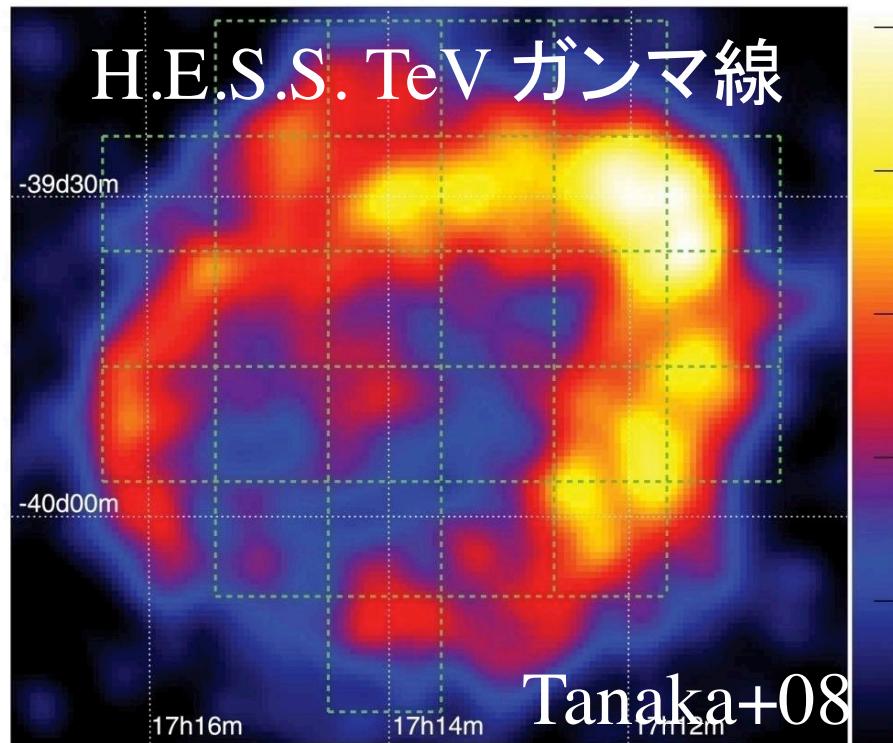
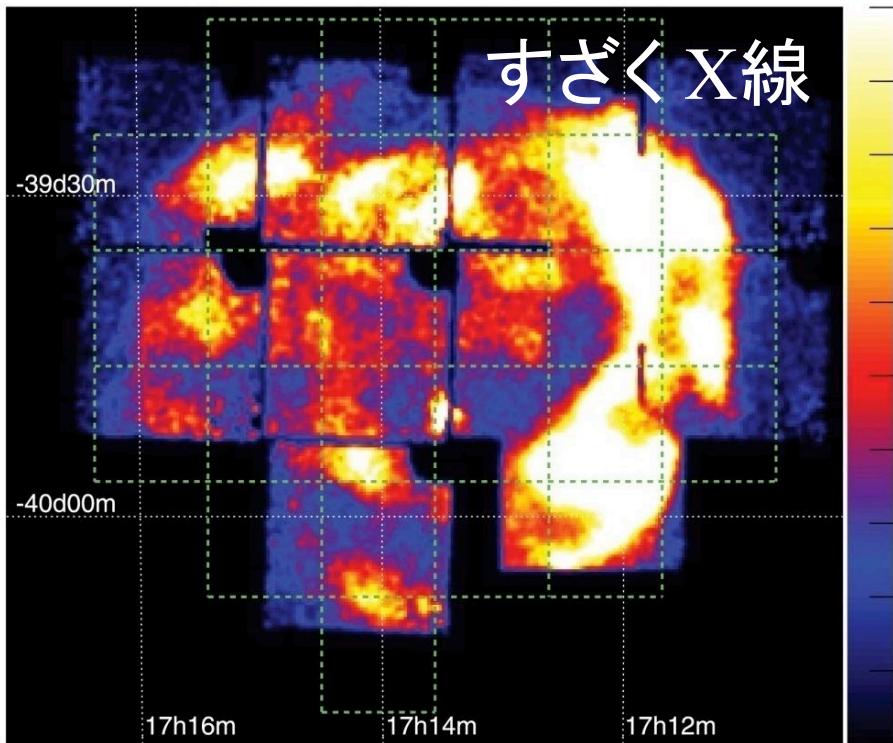
CTA で探る宇宙線の起源: RX J1713.7-3946 のガンマ線シミュレーション

佐野 栄俊 (名古屋大学)

福井康雄, 田島宏康, 奥村暁 (名古屋大学), 中森健之, 郡司修一 (山形大学), 片桐秀明, 柳田昭平, 吉田龍生 (茨城大学), 山崎了, 大平豊, 馬場彩, 澤田真理 (青山学院大学), 森浩二 (宮崎大学), 李兆衡 (JAXA/ISAS), 藤田裕 (大阪大学), 井上剛志 (NAOJ), 花畠義隆, 林田将明, 吉越貴紀 (ICRR), 窪秀利, 斎藤隆之, 田中孝明 (京都大学), 櫛田淳子 (東海大学), 井上進 (MPI), 井岡邦仁, 郡和範 (KEK), 村瀬孔大 (IAS), 長瀧重博 (理研), 内藤統也 (山梨学院大学), 寺田幸功 (埼玉大学), 内山泰伸 (立教大学)

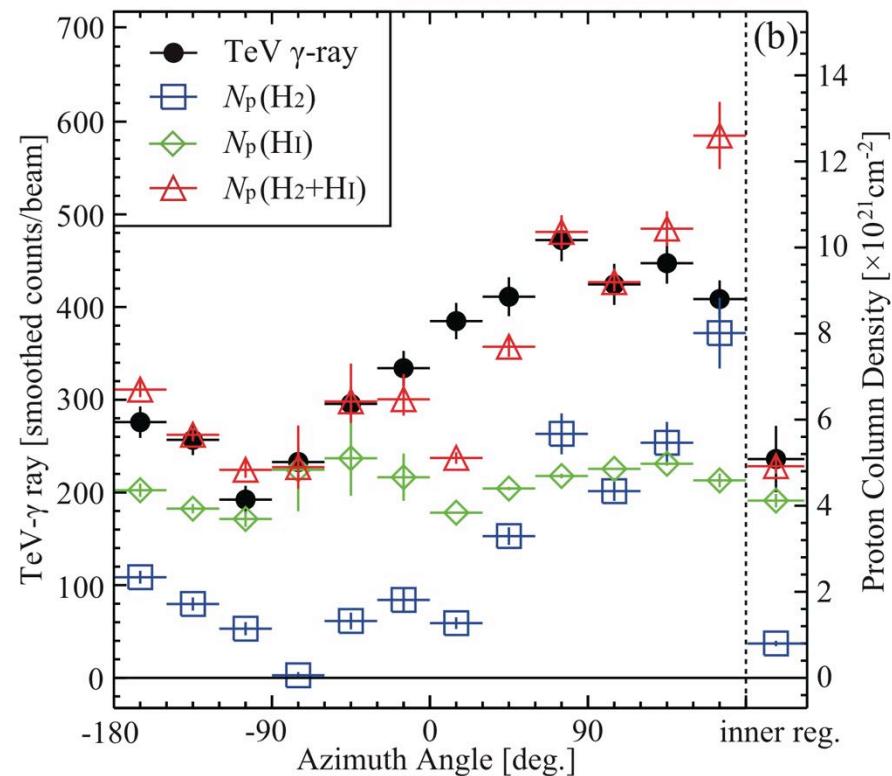
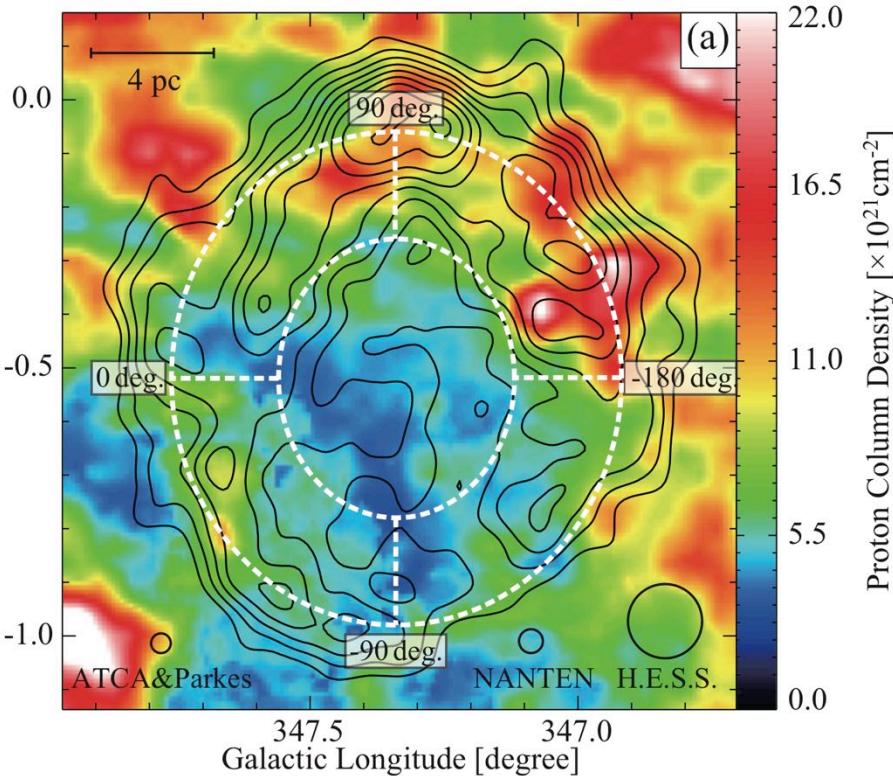
- 超新星残骸(SNRs)は、 $E < 10^{15.5}$ eV の宇宙線加速現場の有力候補
 → 若い(~2,000 yr) TeV ガンマ線 SNR が注目されている





- 非熱的X線で明るい + 热的X線未検出 (e.g., Koyama+96, Tanaka+08)
- TeV ガンマ線で明るい (e.g., Enomoto+02, Aharonian+07)
- 若く (~1600年)、近く (~1 kpc)、視直径が大きい(1度角)
- 星間ガスとの相互作用 (e.g., Fukui, HS+12, HS+10,13,15)
 - 磁場增幅 (~1 mG @ 0.05 pc; Uchiyama+07, 30-60 μG @ 1 pc; HS+13)

- 全星間陽子(水素分子+原子)とガンマ線の空間一致(Fukui+12)
→ 宇宙線陽子起源ガンマ線であることの必要条件



イメージ: 全星間陽子, コントア: ガンマ線

Fukui+12

さらなる詳しい検証を行うには,
より高分解能・高感度のガンマ線データの取得が欠かせない

- 目的: Young SNR 研究における CTA の capability を示す

Imaging

従来の大気チエレンコフ望遠鏡に比べ、角度分解能が2–3倍向上

Spectrum

広いエネルギー帯域と、高い検出感度（従来の10倍）

光子統計の増加により、 E_{\max} 測定や空間ごとのスペクトル解析

Long term operation

時間変動もトレース可能



- 方法: CTA を用いた際に、SNR RX J1713–3946 から期待される
ガンマ線放射の特性(分布やスペクトル時間変動等)を、
簡単なモデルを用いて数値計算

■ Open source である Gammalib と ctools を用いて計算



<http://cta.irap.omp.eu/gammalib/>

<http://cta.irap.omp.eu/ctools/>

■ image, spectrum, instrumental response (+bkg) 等のモデルを読ませ、モンテカルロ計算により event file を作成するひと (ctobssim)。 → image や spectrum の抽出、binning/cut や likelihood もしてくれる。

■ Internal CTA IFR (instrumental Response Function)

- Array $2A = 4 \text{ LSTs} + 24 \text{ MSTs} + 35 \text{ SSTs}$
- Site Aar (Southern Namibia → Chile)
- Zenith 20 deg.
- Time 50 hr
- Bkg. Galactic diffuse

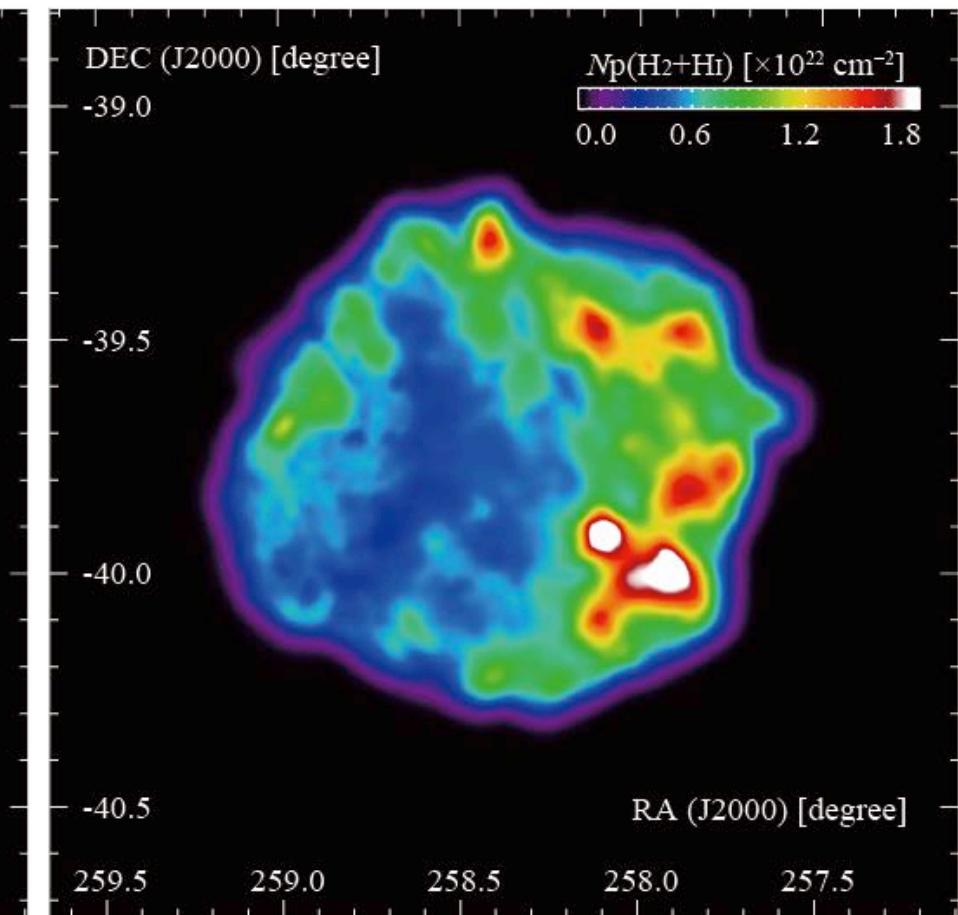
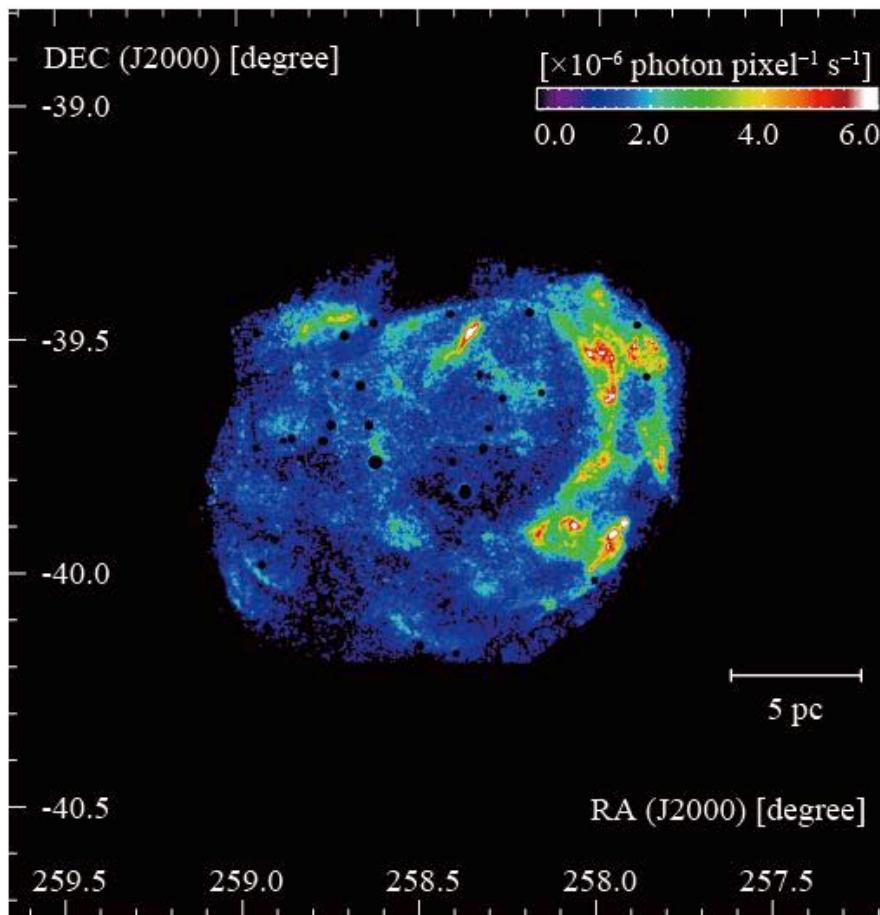
■ ガンマ線の空間分布を仮定

電子起源

\propto シンクロトロンX線分布(点源除外)

陽子起源

\propto 全星間陽子密度分布(SNR内側のみ)



Left: *XMM-newton* (0.5–8.0 keV) courtesy by Katsuda+Mori, Right: Total ISM proton density (Fukui+12)

■ ガンマ線のスペクトル分布を仮定

電子起源

$$N_1(E) = A_1 \times \left(\frac{E}{\text{TeV}} \right)^{\Gamma_e} \exp(-E/E_{\max}^e)$$

Same as H.E.S.S. (Aharonian+07)

$$\begin{aligned} \Gamma_e &= -2.0 \\ E_{\max}^e &= 17.9 \text{ TeV} \end{aligned}$$

陽子起源

$$N_2(E) = A_2 \times \left(\frac{E}{\text{TeV}} \right)^{\Gamma_p} \exp(-E/E_{\max}^p)$$

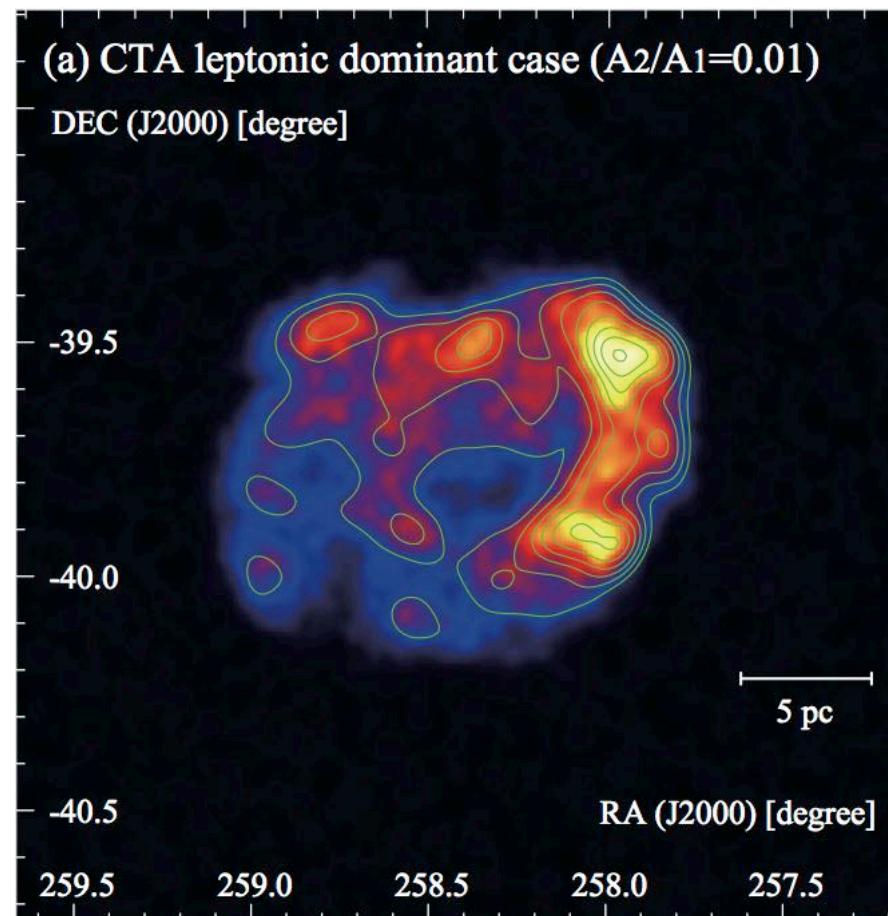
$$\begin{aligned} \Gamma_e &= -2.0 \\ E_{\max}^e &= 300 \text{ TeV} \end{aligned}$$

- H.E.S.S.の1–10 TeV 積分フラックスと等しくなるよう normalize
- A_2/A_1 を変えることで、電子・陽子起源ガンマ線の混合比を変える

Results: Spatial morphology

- 電子・陽子起源がそれぞれドミナントなケース (50 hr, 1–100 TeV)
有意な空間分布の違い → ガンマ線起源判別の有効手段

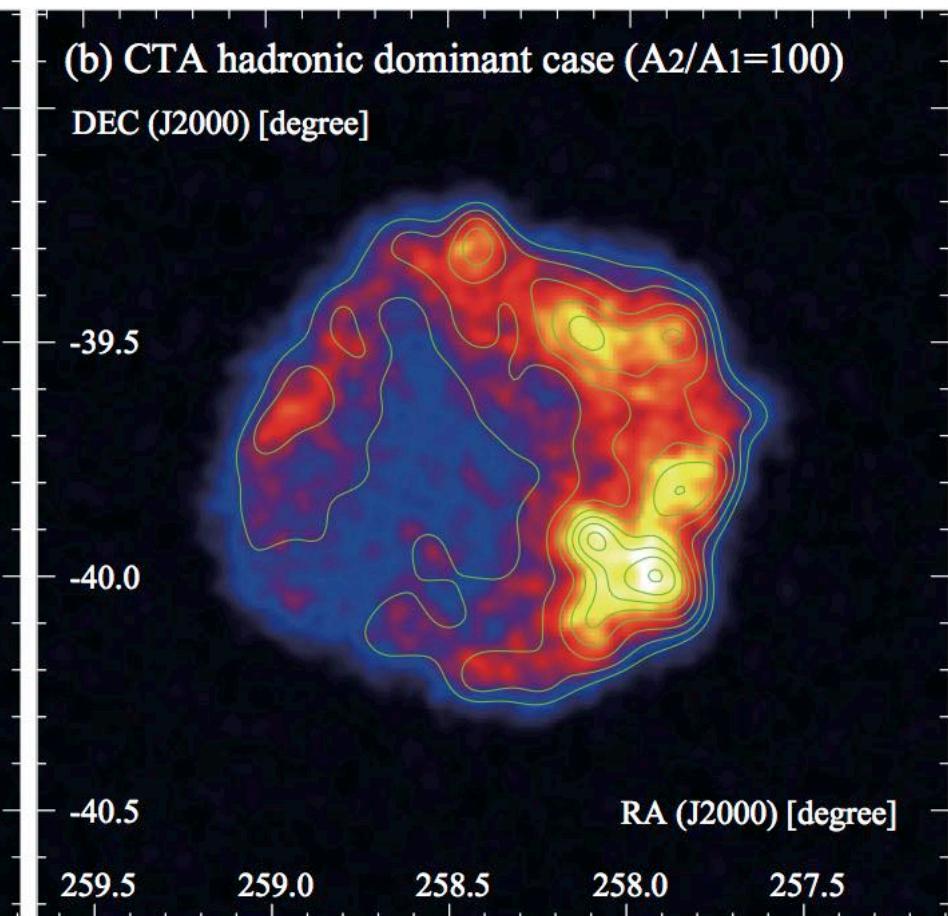
電子起源 ($A_2/A_1 = 0.01$)



Left contours: *XMM-newton* (0.5–8.0 keV)

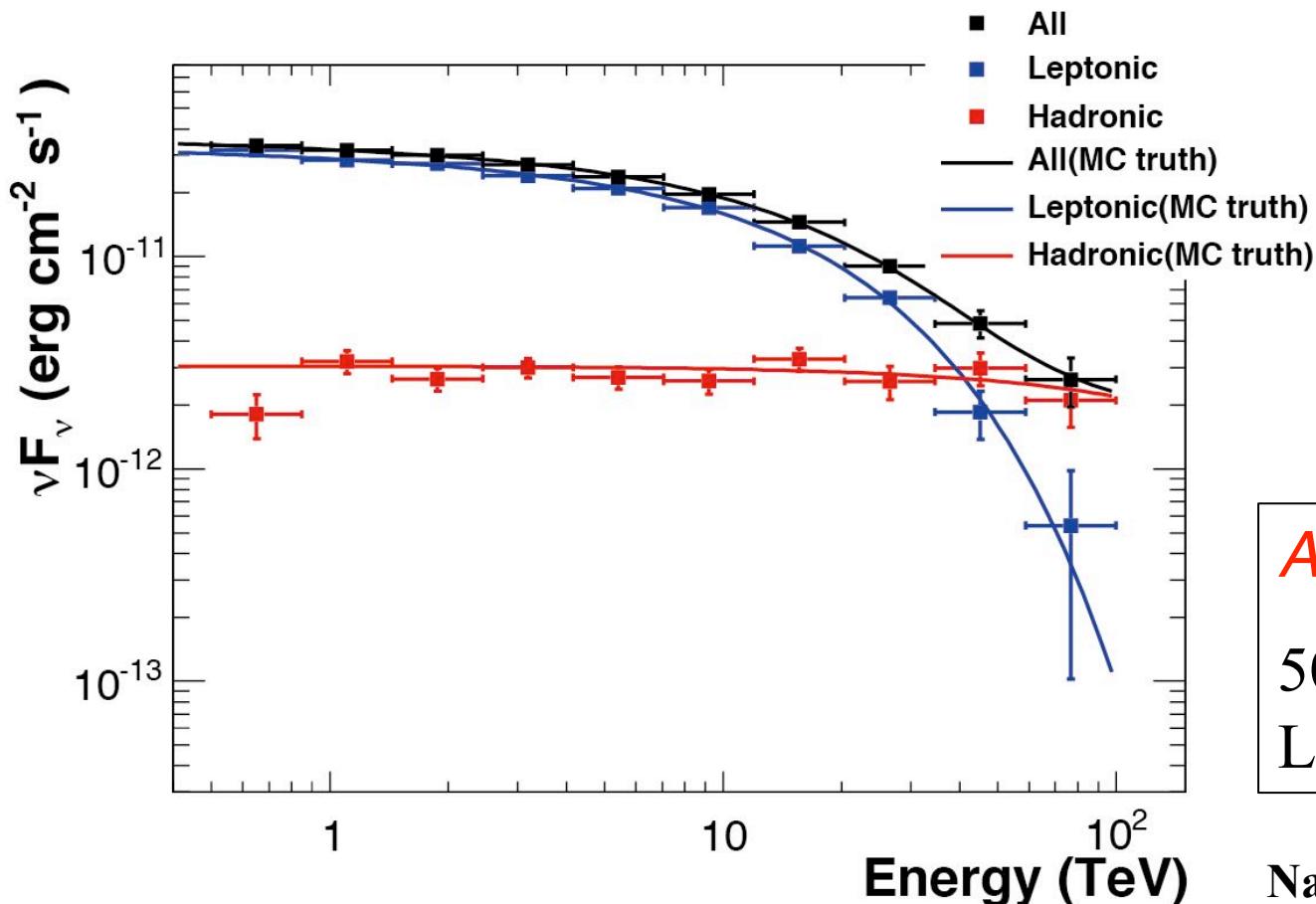
Right contours: Total ISM proton column density (Fukui,HS+12)

陽子起源 ($A_2/A_1 = 100$)



Nakamori, Katagiri, HS+15

- 電子起源がドミナントな場合、隠れた陽子成分を見つけられるか？
 - 6σ の有意度で陽子成分を検出可能 @ $A2/A1 = 0.02$
 - 陽子成分と電子成分を分離可能 @ $A2/A1 = 0.1$



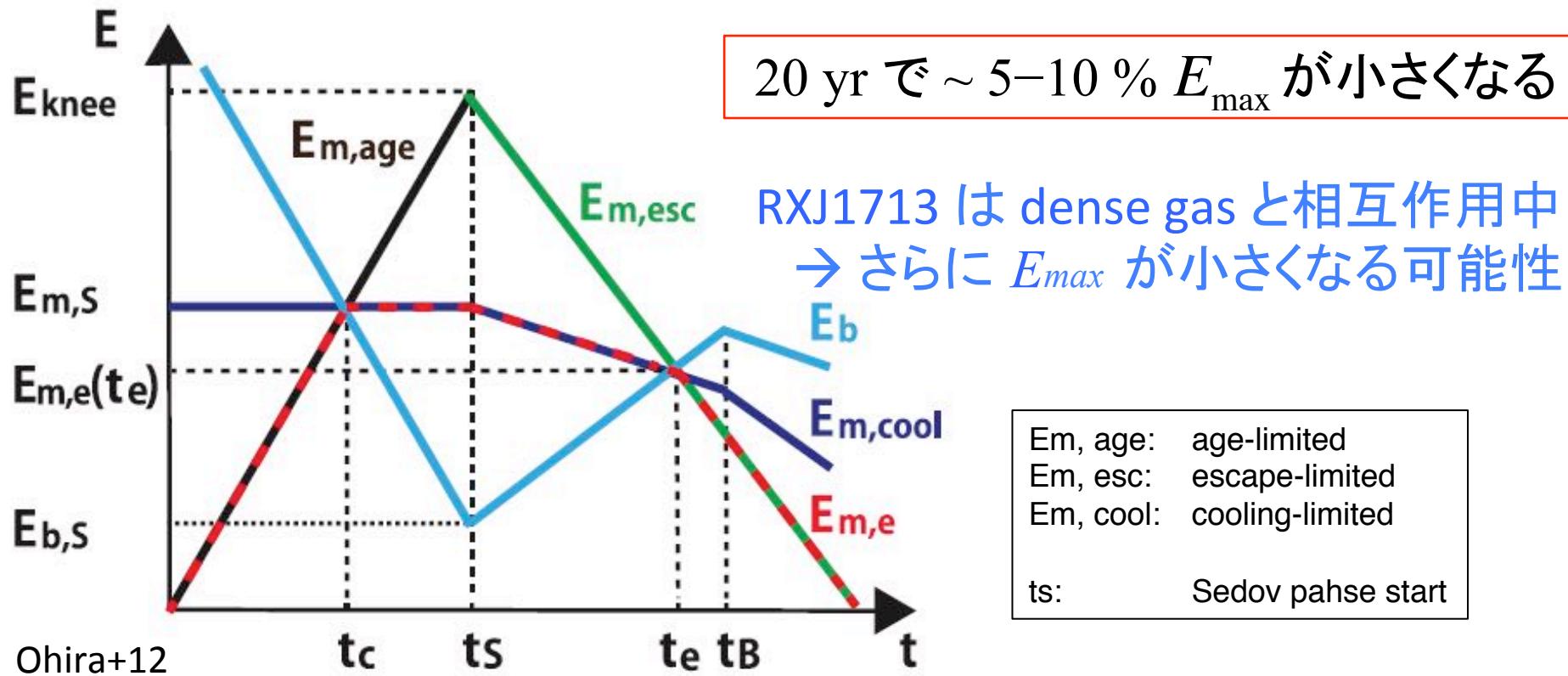
$A2/A1 = 0.1$
50 hr., $E > 500$ GeV
Likelihood fit

Time evolution of Maximum energy E_{\max}

- Maximum energy E_{\max} : acceleration, escape, cooling が決めている
→ CTA でこの時間変化を捉えることは可能か？

SNR age $\sim 10^3$ yr, Escape limited ($E_{\max} \propto t^{-\alpha}$), $\alpha \sim 2.6$ (Ohira+12)

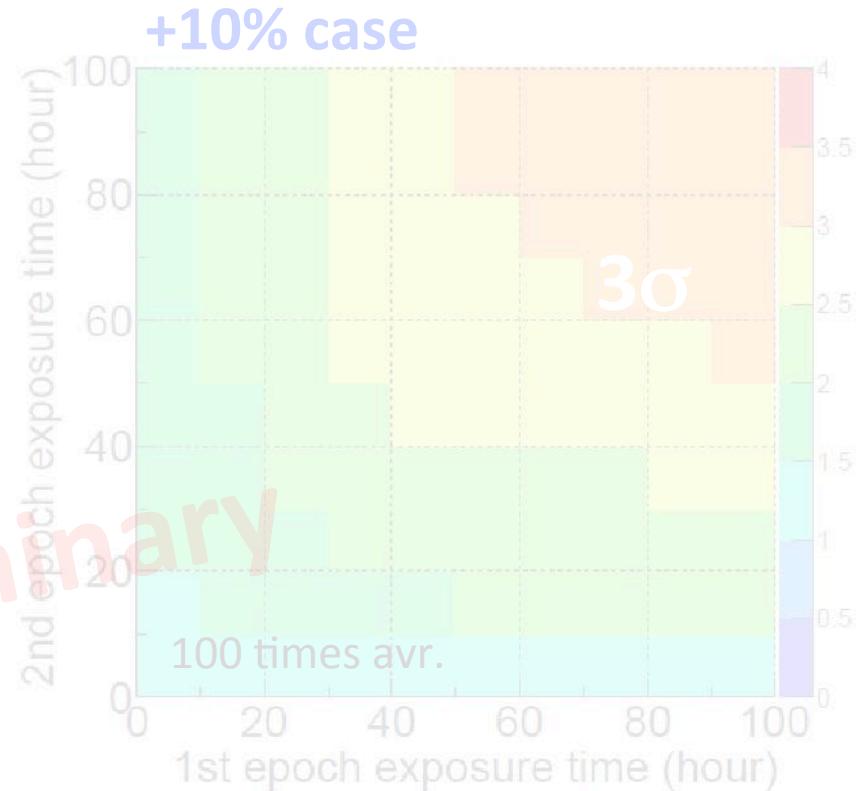
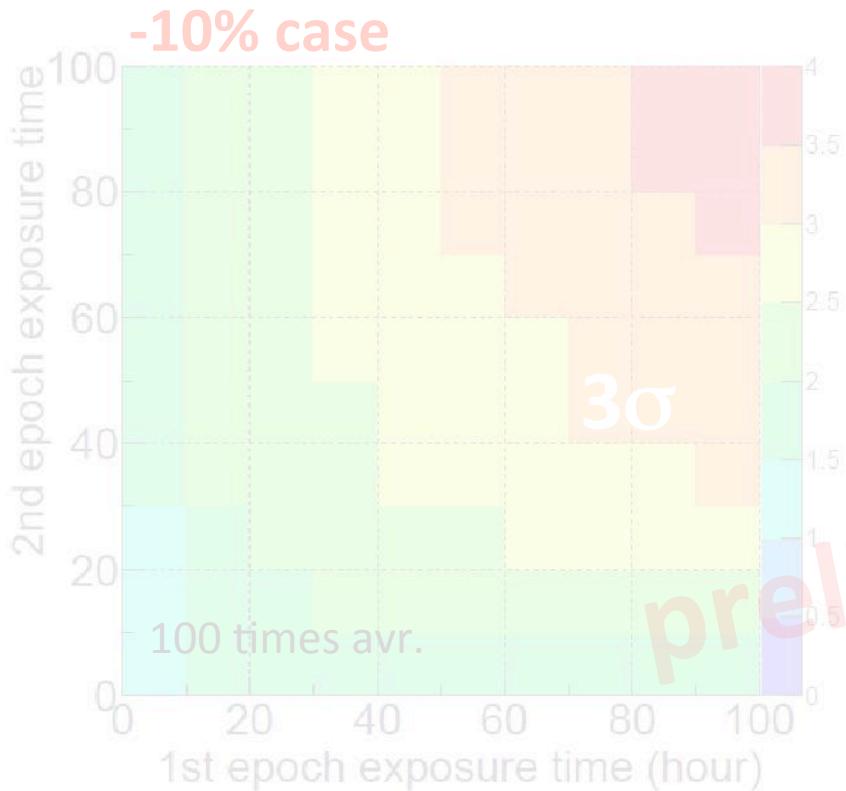
$$\rightarrow \dot{E}_{\max}^p / E_{\max}^p \sim -2.6 \times 10^{-3} \text{ yr}^{-1}$$



- 1st epoch exp. t_1 と、2nd epoch exp. t_2 での、 $E_0(t_1)$ の $E_{\pm}(t_2)$ 違い

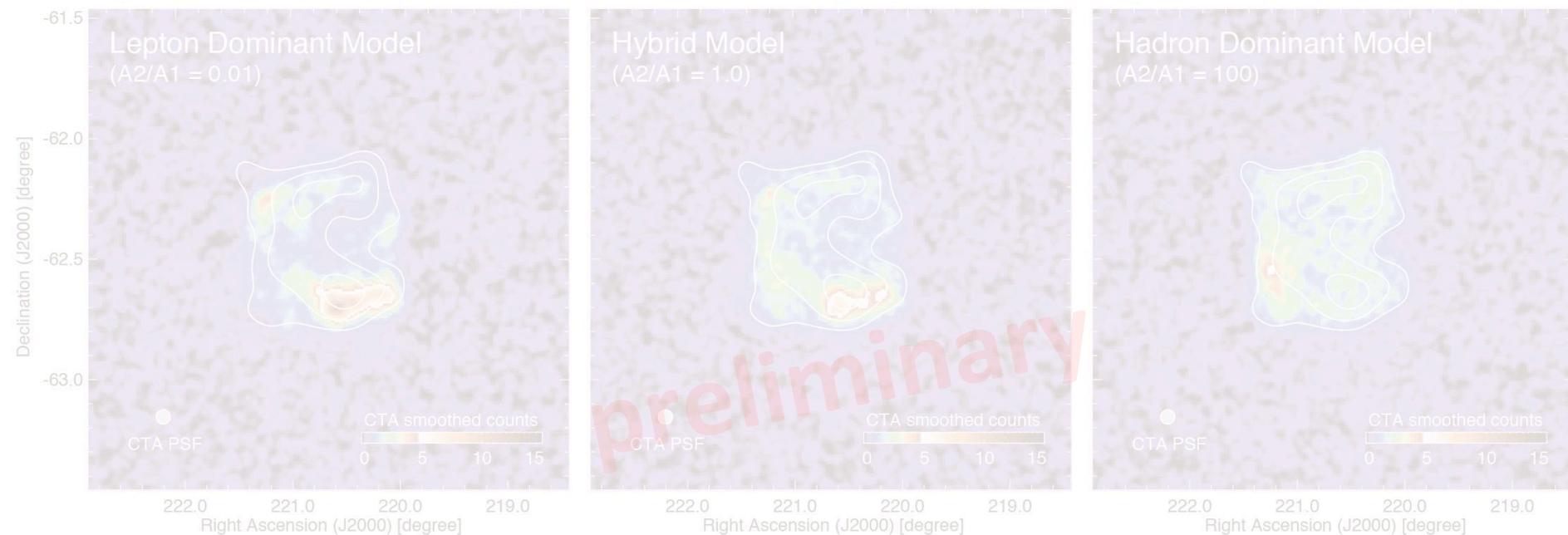
$$s(t_1, t_2) = \frac{|E_{\pm}(t_2) - E_0(t_1)|}{\sqrt{\sigma_{\pm}^2(t_2) + \sigma_0^2(t_1)}} \quad \sigma_0(t_1), \sigma_{\pm}(t_2) \rightarrow E_0(t_1), E_{\pm}(t_2) の error$$

少なくとも 60 hr. があれば、3 σ 以上の有意度で検出が可能になる



preliminary

- Systematic error の評価
→ background の不確定性 (特に Galactic Diffuse)
- Shock-cloud interaction を考慮した計算
→ 磁場増幅により CR diffusion length が energy dependent になる
- 他の TeV ガンマ線 SNR での評価
→ RCW 86 (下図), Vela Jr., HESS J1731–347 (On going)



- 超新星残骸は、knee energy までの宇宙線加速現場とされている。
多波長研究による有力な証拠が揃いつつある(e.g., Fukui+12)
→ さらなる検証には、高分解能・高感度のガンマ線データが必須
- CTA を用いることで、空間分布から陽子・電子起源の判別が可能。
電子起源の場合でも、隠れた陽子成分を見つけることが可能。
- 10-20年空いた2回の観測時に、各60 hr 以上の観測ができれば、
Maximum energy E_{\max} の変化を測定することができる。
- Systematic error の評価や、より現実的な環境を考慮した計算、
さらに他天体への適用などを行っている。

ICRC proceeding (Nakamori, Katagiri, HS+15) → arXiv:1508.06052