

超高エネルギー (~ TeV) ガンマ線天文学

- 現状(特に、宇宙線加速について)
- 次世代IACTで切り開くサイエンス

吉田 龍生(茨城大・理)

「宇宙はなぜ粒子を加速するのか」

(木舟正、科学Vol.69 No.11, 1999)

TeVガンマ線の意義

宇宙線の起源の解明: 銀河系内か、系外か

加速機構の解明: 衝撃波による粒子加速理論のテスト

非熱的輻射

高エネルギー電子

radio-X + 磁場: シンクロトロン輻射

X-TeV + 光子: 逆コンプトン(Thomson, Klein-Nishina)

GeV-TeV + 原子核: 制動輻射

高エネルギー陽子

GeV-TeV : + 物質: パイオン---->ガンマ線

赤外線背景放射強度への制限 (TeVガンマ線の吸収)

dark matterの制限 (dark matterの対消滅)

銀河系内宇宙線存在量

$$\Omega_{CR} = 10^{-8.3}$$

”The Cosmic Energy Inventory” (Fukugita & Peeble, 2004)

少なくとも星間空間では無視できない存在

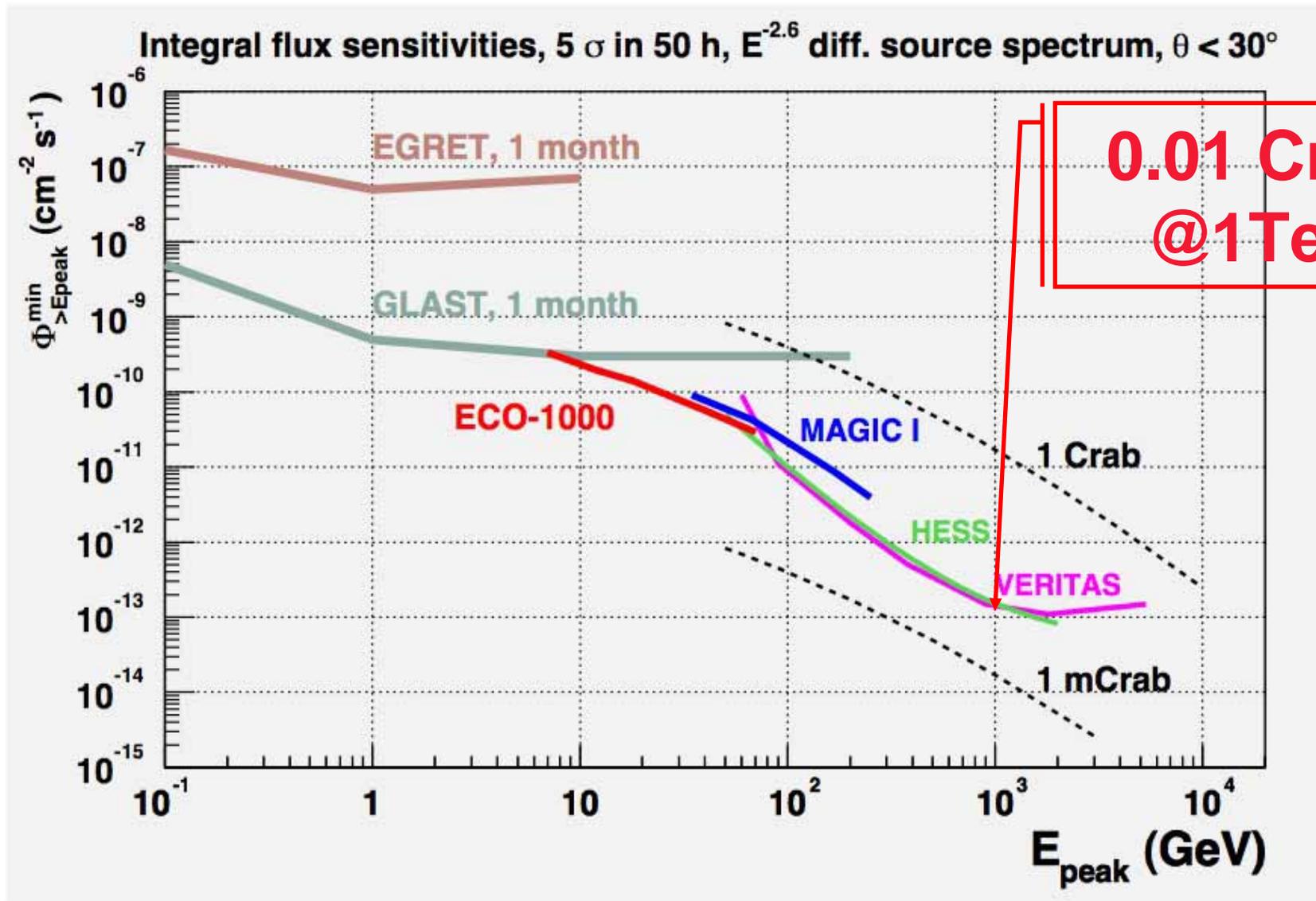
$$U_{CR} \sim U_B \sim U_{turb} \sim 1 \text{ eV } \text{cm}^{-3}$$

超新星爆発によってエネルギー供給できる

$$L_{CR} = \frac{V_{gal} U_{CR}}{t_{CRlife}} \sim 10^{42} \text{ erg/s}$$

$$\sim \left(\frac{E_{SN}}{10^{51} \text{ erg}} \right) \left(\frac{\eta}{0.01} \right) \left(\frac{f_{SN}}{1/30 \text{ yr}} \right)$$

flux sensitivities for GeV to TeV



(Baixeras et al., astro-ph/0403180)

TeV gamma-ray flux

(1 Crab @ 1 TeV = $2.5 \times 10^{-11} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)

SNRs

$$E_{tot} = 10^{51} \text{ ergs}$$

$$flux = \frac{E_{tot} \times \eta_p \times c \sigma_{pp} n_{ISM}}{4 \pi d^2} \quad \sigma_{pp} \approx 30 \text{ mb}$$
$$= 3 \times 10^{-26} \text{ cm}^2$$

$$= 5 \times 10^{-11} \left(\frac{\eta_p}{0.1}\right) n_{ISM} \left(\frac{d}{3 \text{ kpc}}\right)^{-2} \text{ TeV cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

Starburst galaxies

$$E_{tot} = 10^{51} \text{ ergs} \times 10^7 \text{ yr} / 10 \text{ yr} = 10^{57} \text{ ergs}$$

$$flux = 5 \times 10^{-11} \left(\frac{\eta_p}{0.1}\right) n_{ISM} \left(\frac{d}{3 \text{ Mpc}}\right)^{-2} \text{ TeV cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

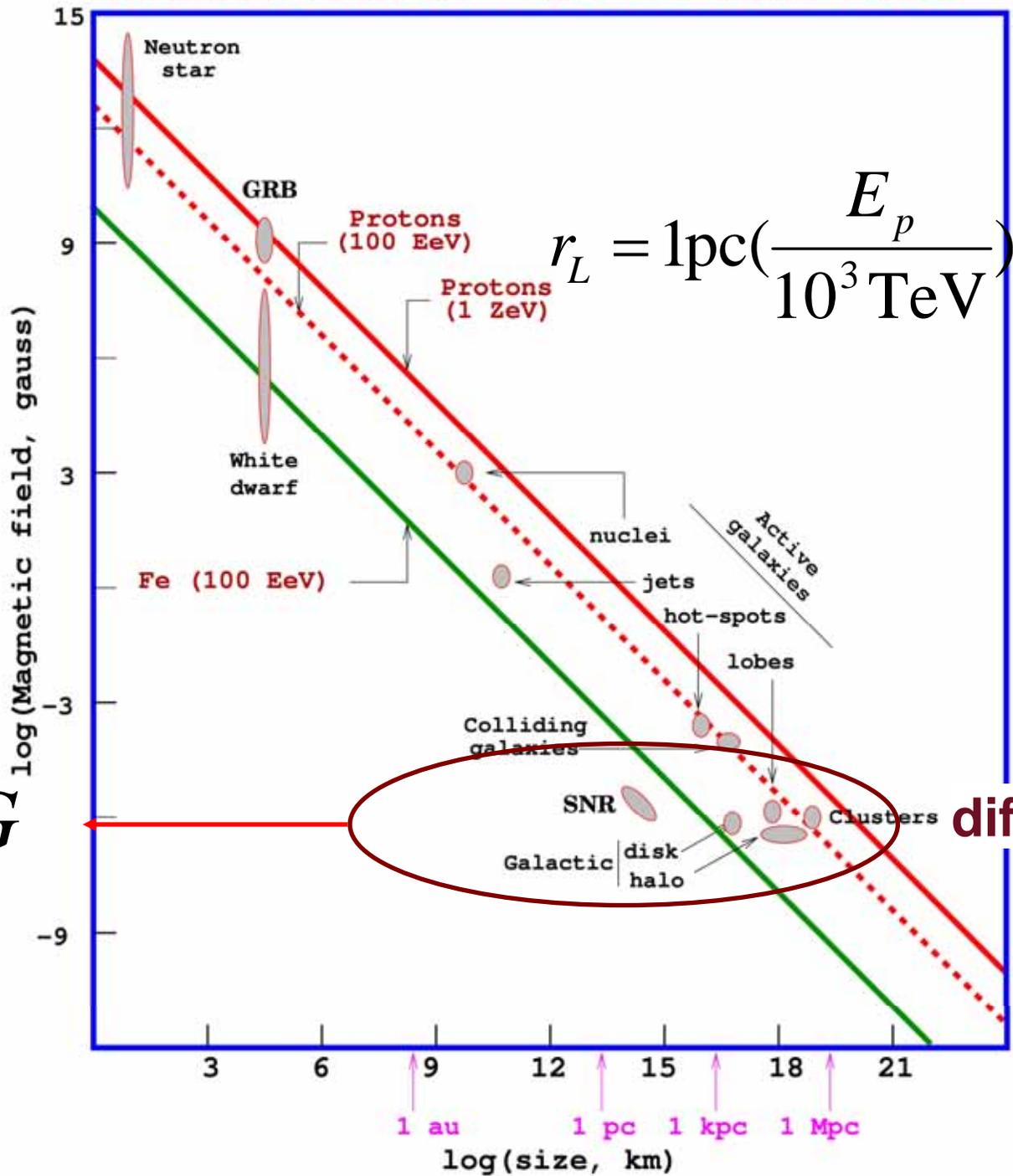
Cluster mergers

$$E_{tot} = 10^{14} M_{\odot} \times (10^3 \text{ km/s})^2 / 2 = 10^{63} \text{ ergs}$$

$$flux = 5 \times 10^{-13} \left(\frac{\eta_p}{0.01}\right) \left(\frac{n_{ICM}}{0.001}\right) \left(\frac{d}{300 \text{ Mpc}}\right)^{-2} \text{ TeV cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

Hillas-plot

(candidate sites for $E=100$ EeV and $E=1$ ZeV)



$$r_L = 1\text{pc} \left(\frac{E_p}{10^3 \text{TeV}} \right) \left(\frac{B}{1\mu\text{G}} \right)^{-1} < \text{Size}$$

$$B = \mu\text{G}$$

diffuse sources

Problems of particle acceleration in SNRs

E_{\max} : The maximum energy of accelerated particles

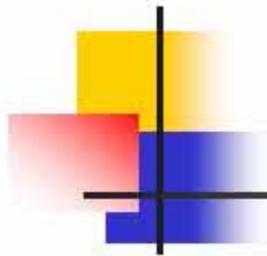
$E_{\text{CR}}/E_{\text{SN}}$: The efficiency of particle acceleration

B : The magnetic field,

D : The diffusion coefficient

$(\delta B/B)$ (The magnetic turbulence)

e/p : The ratio of electrons to protons



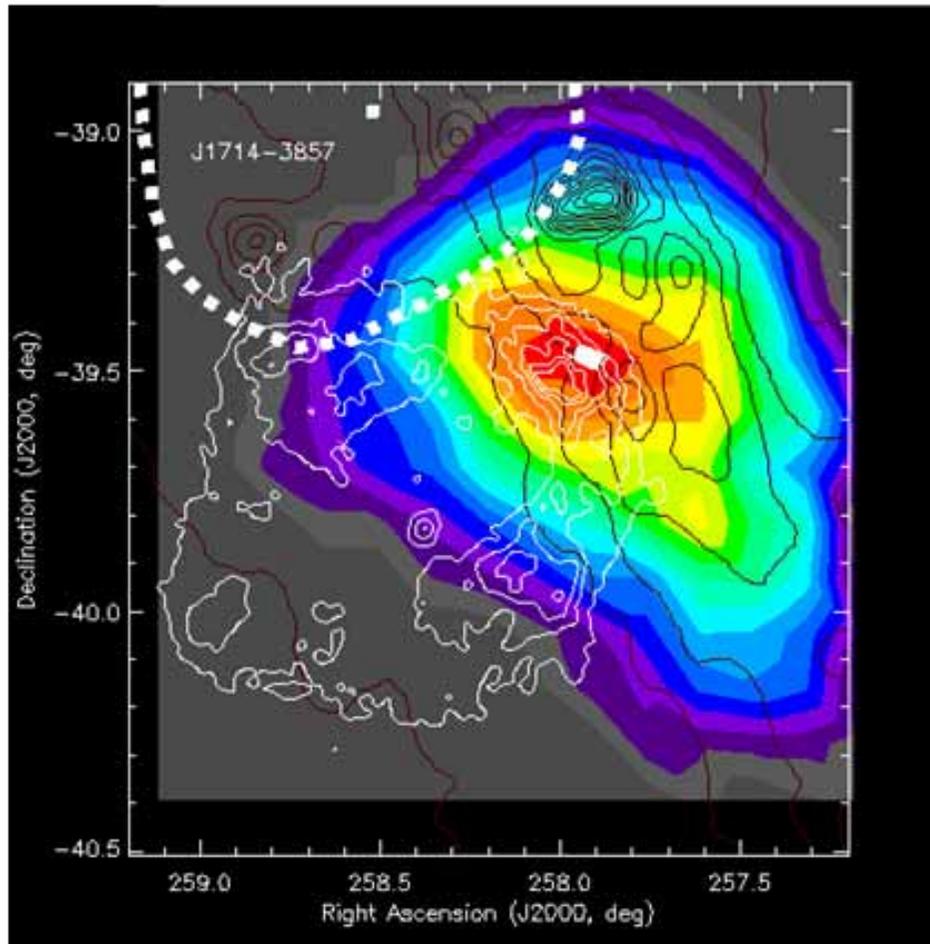
Classical southern SNRs

Mono Observation

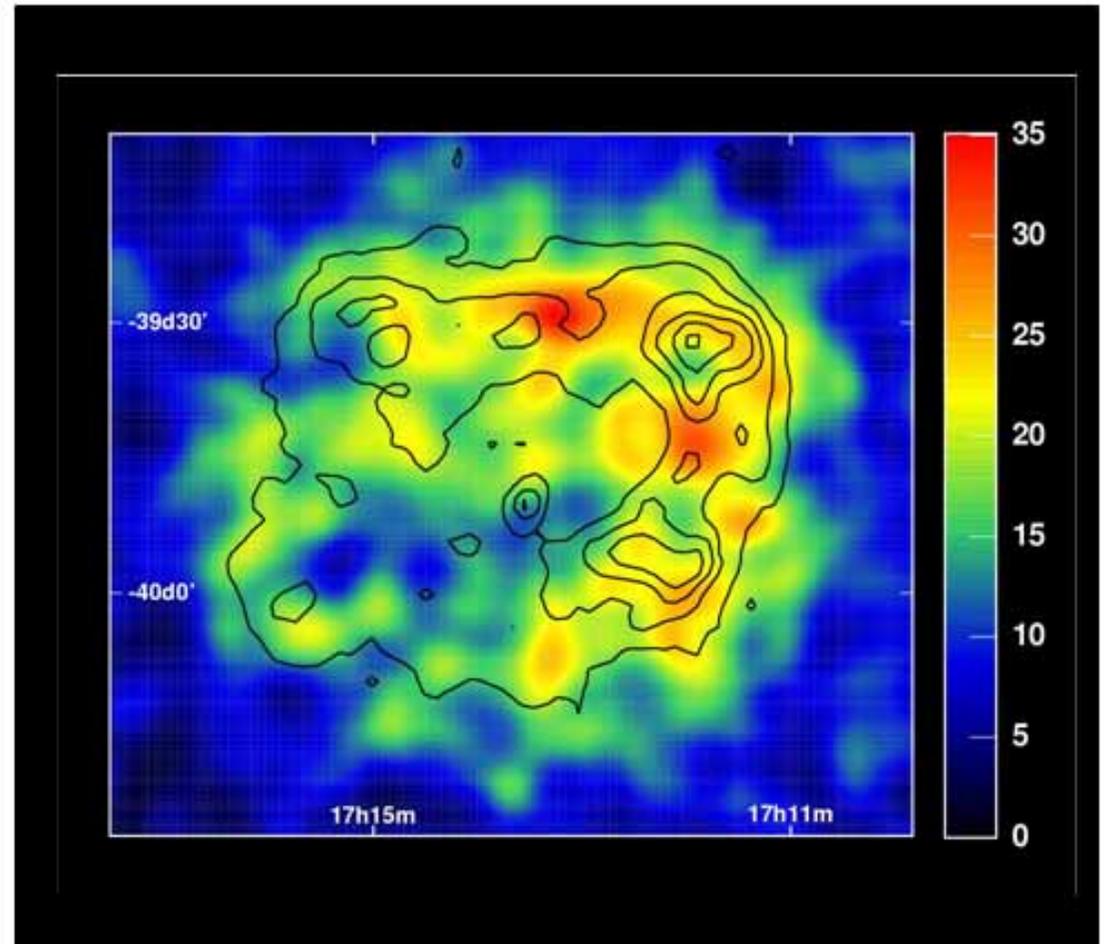
CANGAROO RXJ1713.7-3946

Stereo (2 telescopes)

H.E.S.S.

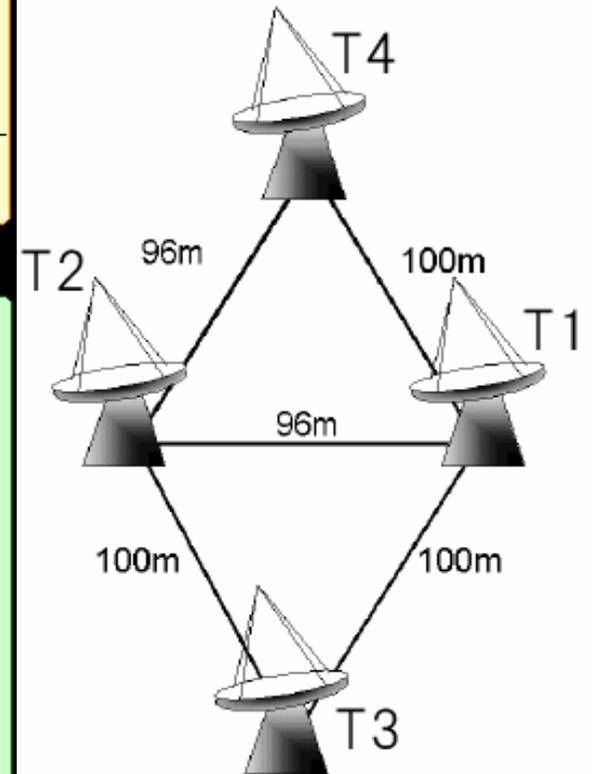
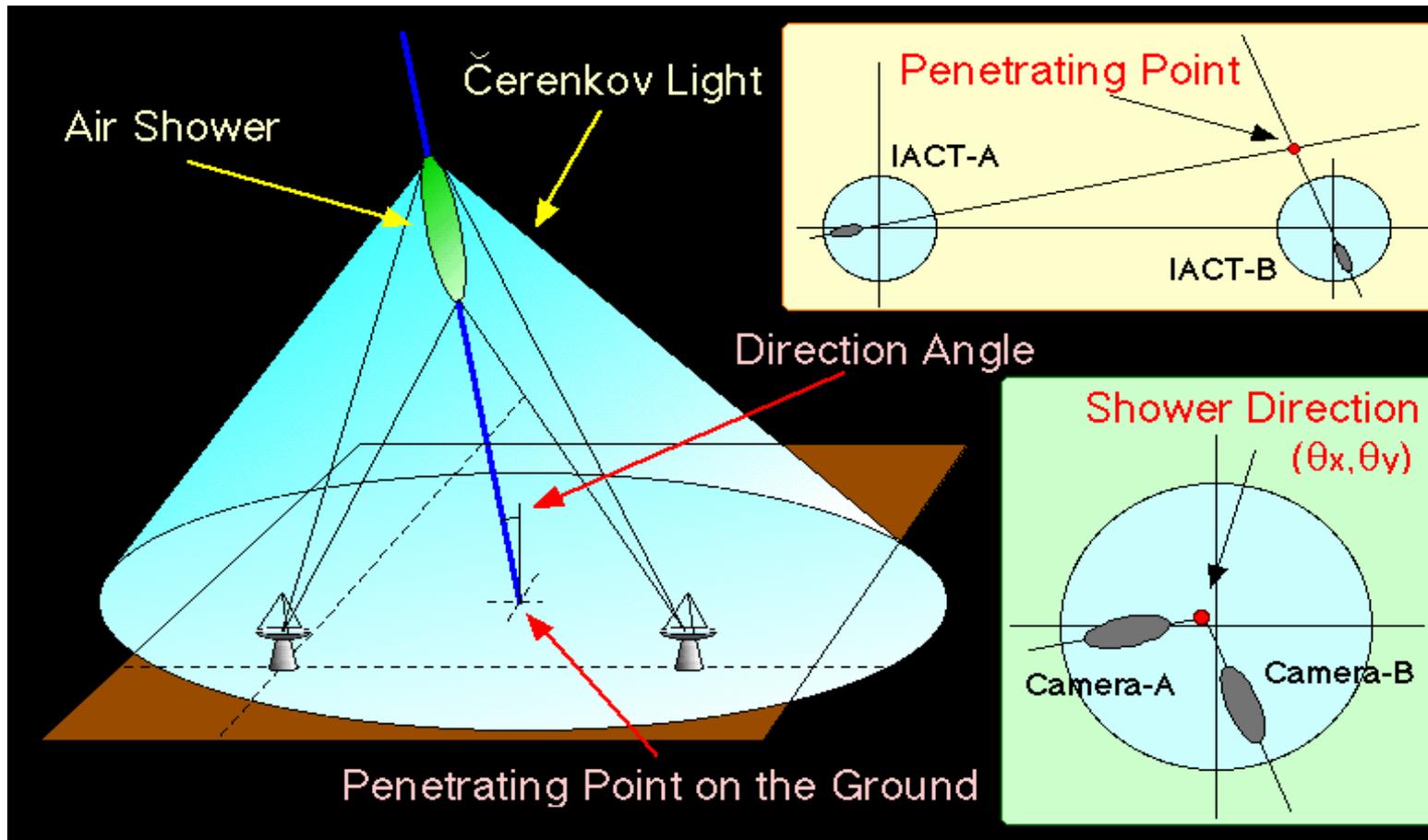


Enomoto et al. Nature
416, 823, 2002
Kifune ICRC 2003



Aharonian et al. Nature
432, 75, 2004

Stereo observation



- Better angular resolution

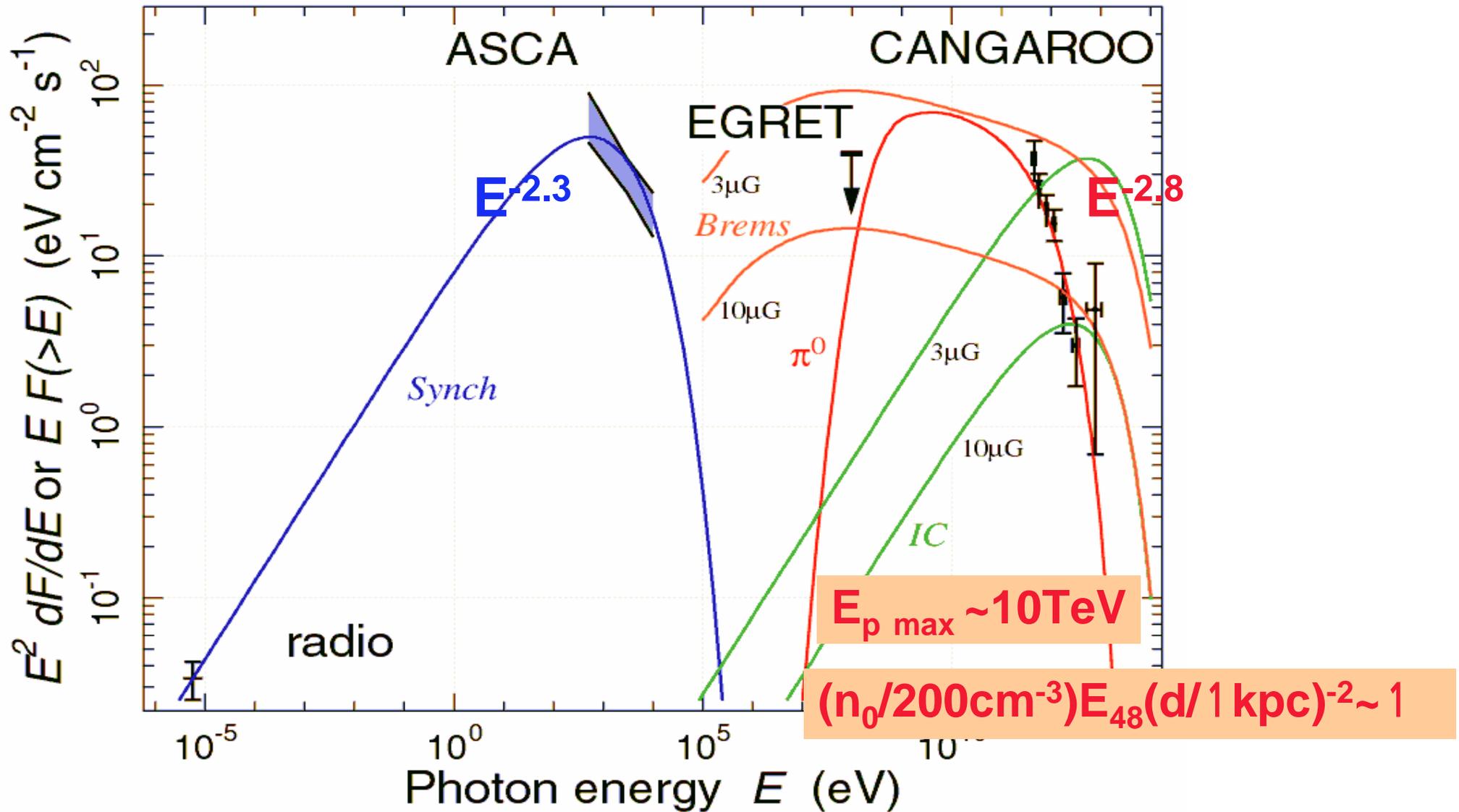
$\Delta\theta=0.25^\circ$ (One month observation) \rightarrow **0.15°** (event by event)

- Better energy resolution

$\Delta E/E=30\%$ \rightarrow **15%**

And improvement of S/N ratio.

Multiband spectrum of RX J1713.7-3946



proton accelerated

将来計画：次世代IACT

現状：ステレオ観測により、

Flux Sensitivity ~ 0.01 Crab and Angular Resolution $\sim 3'$ を達成

SNRでの粒子加速を証明

場所によるスペクトルの違いも観測可能な時代へ突入

次世代 Flux Sensitivity ~ 1 mCrab

どんなサイエンスが可能か？：例

SNRの宇宙線の起源説の検証：銀河系内のSNRsをsurvey

本当にSNRは宇宙線加速源か？：銀河面をsurvey

但し、どのエネルギー領域を見るかを議論する必要がある。

1) **50 GeV \sim 0.5 TeV**: EGRET, GLASTの上のエネルギー領域をカバーする。

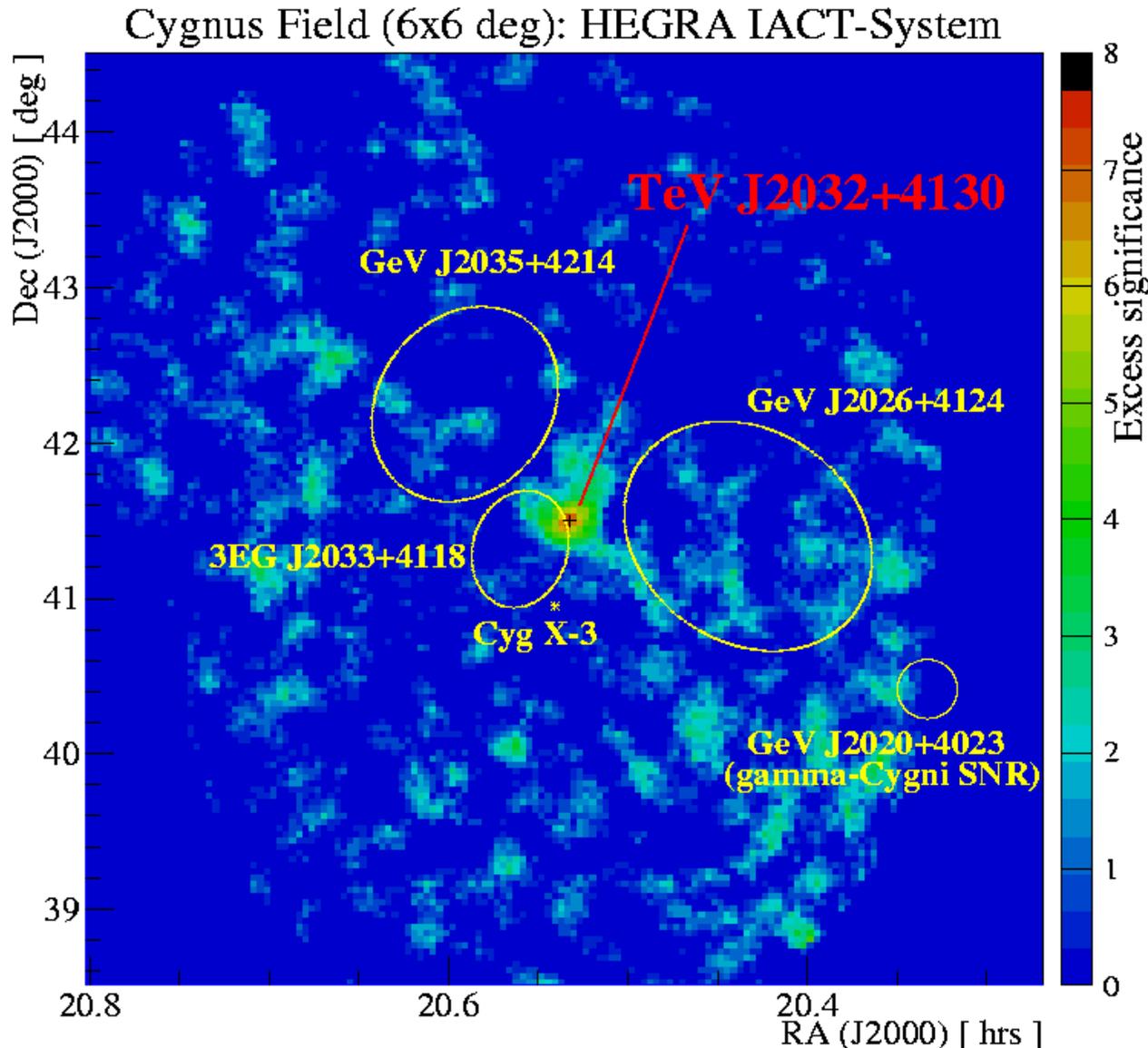
pulsar, AGN, EGRET(or GLAST) unID sources, DM

2) **0.5 TeV \sim 10 TeV**: 現状のエネルギー領域に留まる。

宇宙線起源と考えられるソースのスペクトルを決定: Emax
TeV unID sources

UnID TeV sources

Aharonian et al. 2002, 2004



Flux (> 1 TeV)
~5% of Crab

Hard spectrum
Index
 $1.9 \pm 0.1 \pm 0.3$

Extended
 $6.2' \pm 1.2' \pm 0.9'$

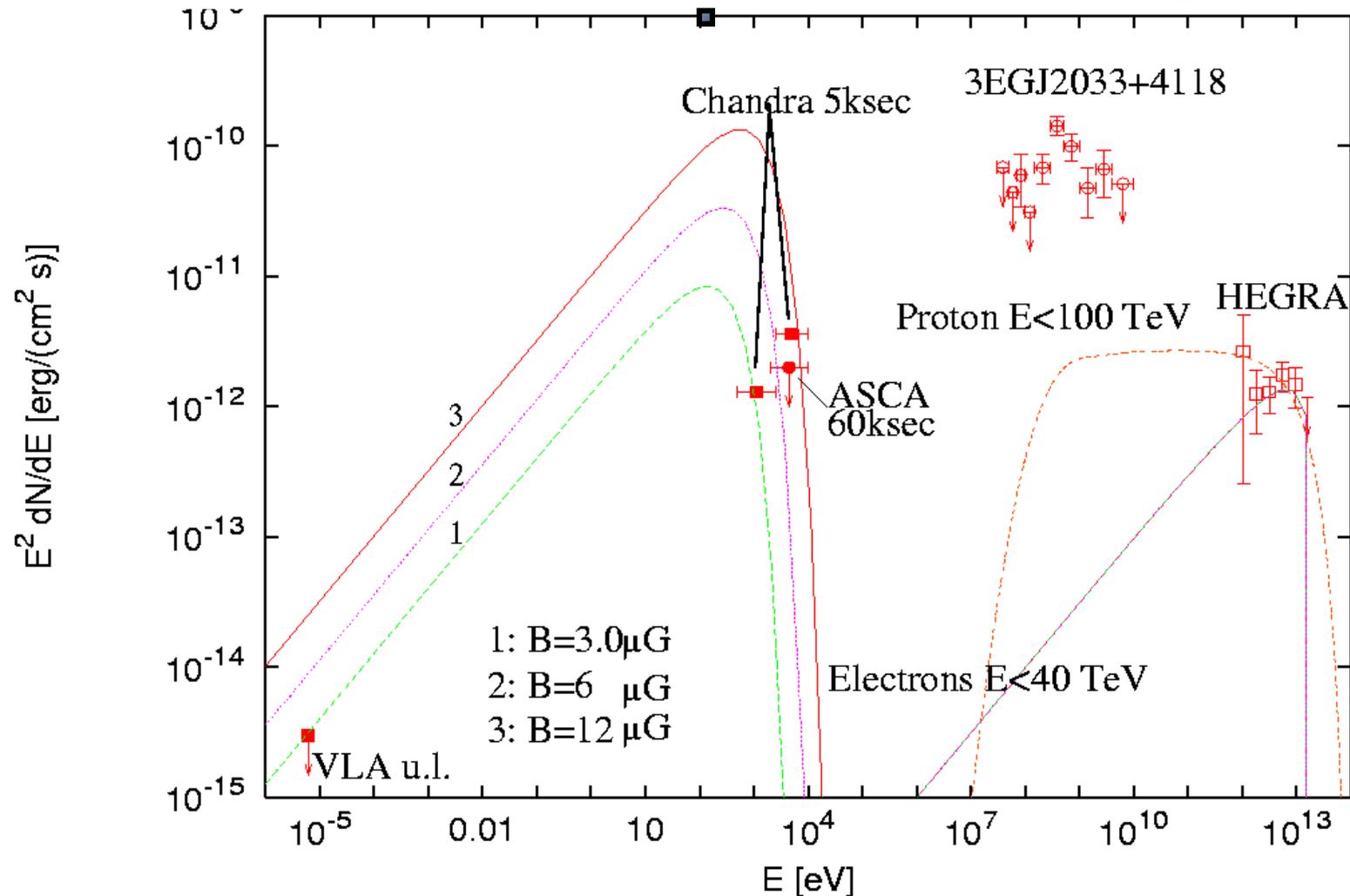
No obvious radio,
X-ray counterpart
Butt et al. 2003
Mukherjee et al. 2003

Near Cygnus OB2

from Hofmann's presentation

(Almost) inconsistent with electron source

Aharonian et al. 2004,
also Butt et al. 2003



from Hofmann's presentation

将来計画：次世代IACT

(現在、有志によって月1回のペースで検討を開始：open)

次世代 Flux Sensitivity~1mCrab

どんなサイエンスが可能かを議論する研究会を2月下旬に企画中

@宇宙線研

「次世代解像型チェレンコフ望遠鏡で切り開くサイエンス」(仮題)

皆様の御参加・議論をお待ちしております。

1) **50GeV~0.5TeV**: EGRET, GLASTの上のエネルギー領域を
カバーする。

pulsar, AGN, EGRET(or GLAST) unID sources, DM

2) **0.5TeV ~ 10TeV**: 現状のエネルギー領域に留まる。

宇宙線起源と考えられるソースのスペクトルを決定: Emax
TeV unID sources