

超新星残骸からのガンマ線放射と 宇宙線の起源の同定

広島大学 大学院理学研究科

山崎 了

Knee energy ($10^{15.5} \text{eV}$) 以下の宇宙線は
銀河系内の超新星残骸が起源と考えられている。

加速できる最高エネルギー

($R = \text{source size}$) $>$ (gyro-radius) より

$$E_{\text{max}} \sim e B R \sim 10^{15} \text{ eV} \quad B_{\mu\text{G}} R_{\text{pc}}$$

どのくらい作る必要あるか？

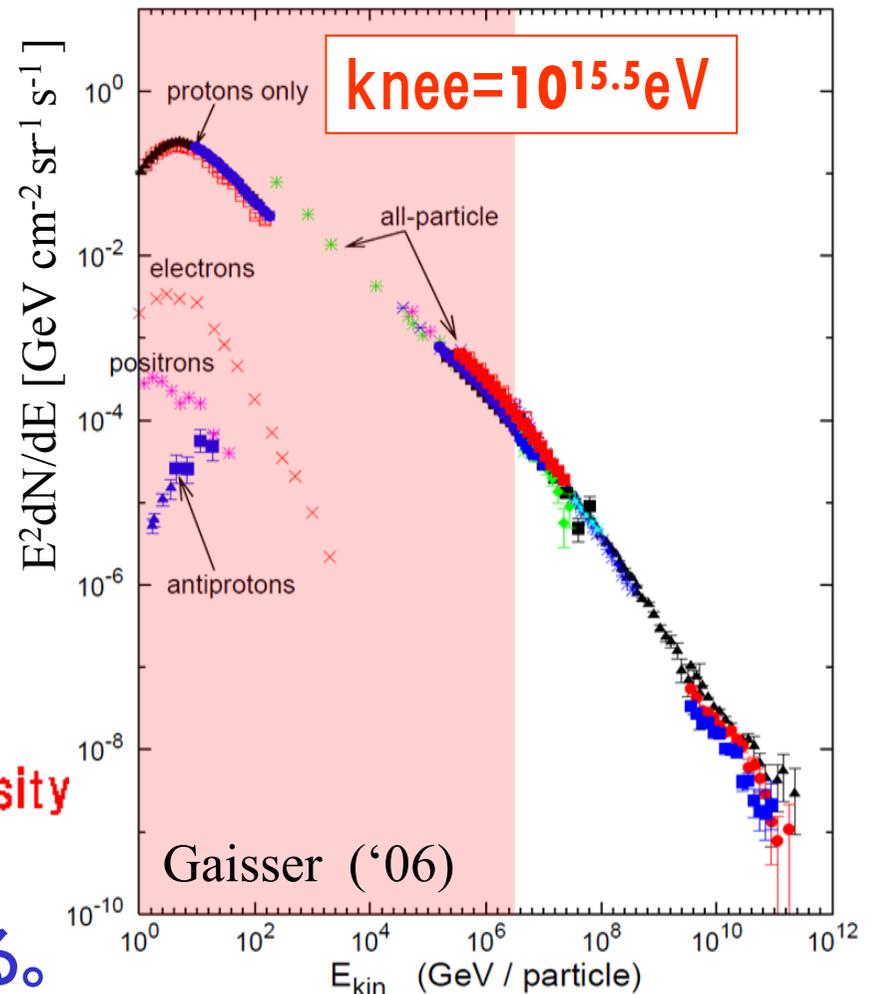
$$\frac{1 \text{ eV cc}^{-1} \times 10^{66} \text{ cc}}{10^7 \text{ yrs}} \sim 10^{40} \text{ erg s}^{-1}$$

銀河の体積
拡散 timescale
CR luminosity

これは超新星残骸(SNR)でまかなえる。

$$10^{51} \text{ erg} \times (\text{変換効率} \sim 1\%) \times (\text{SN rate} \sim 1/30 \text{ yrs})$$

$$\sim 10^{40} \text{ erg s}^{-1}$$



超新星残骸 (Supernova Remnant = SNR)



超新星爆発後に残る残骸。

約1000年で10pc程度に
まで広がる高温(\sim keV)
のガス球。

数1000km/sで膨張
する衝撃波(爆風波)
に囲まれ、
宇宙線加速が
起きている。

← SN 1006

青色: X線

黄色: 可視光

赤色: 電波

宇宙線の加速源をつきとめるには？

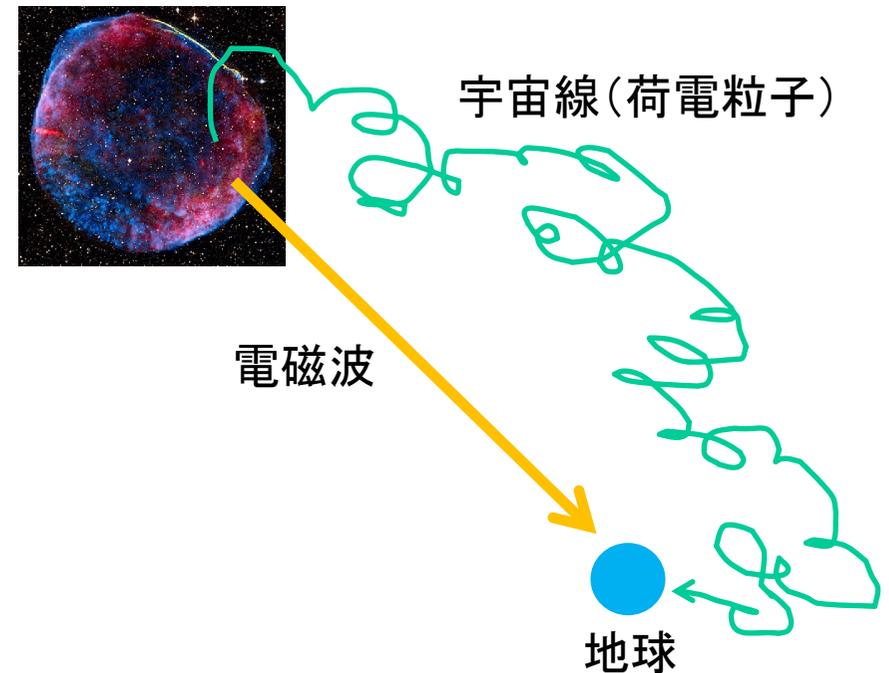
(荷電)粒子の直接観測では難しい。

星間磁場($B \sim \mu\text{G}$)での宇宙線のジャイロ(ラーマー)半径:

$$r_g = E/qB \sim 1\text{pc} \quad \text{for } E \sim 10^{15}\text{eV}$$

これは地球から天体までの距離($\sim \text{kpc}$)に比べてすごく小さい。

そこで、加速源で
宇宙線の発する電磁波を
観測する必要がある。
(将来はニュートリノも)



CR proton + (target) gas $\Rightarrow \pi^0 \Rightarrow \gamma + \gamma$

・エネルギー E をもつ proton 1個が放射する γ のエネルギー:

$$h\nu \sim 0.1 E \quad (\Rightarrow \nu \propto E)$$

・Proton スペクトル:

$$N(E) dE \propto E^{-p} dE$$

・放射スペクトル F_ν [$\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{Hz}^{-1}$]:

$$F_\nu d\nu \propto E \cdot E^{-p} dE \propto \nu^{1-p} d\nu$$

$$\Rightarrow \nu F_\nu \propto \nu^{2-p}$$

CR electron + (target) gas \Rightarrow brems. γ (制動放射)

・エネルギー E をもつ electron 1個のbrems- γ のエネルギー:

$$h\nu \propto E$$

より、放射スペクトルは上記と同じ結果 ($\nu F_\nu \propto \nu^{2-p}$) を得る。

CR electrons によるシンクロトロン・逆コンプトン放射

- ・エネルギー E をもつ electron 1個の放射する光子エネルギー:

$$h\nu \propto E^2$$

- ・Electron スペクトル:

$$N(E) dE \propto E^{-p} dE$$

- ・放射スペクトル F_ν [$\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{Hz}^{-1}$]:

$$F_\nu d\nu \propto E^2 \cdot E^{-p} dE \propto \nu^{(1-p)/2} d\nu$$

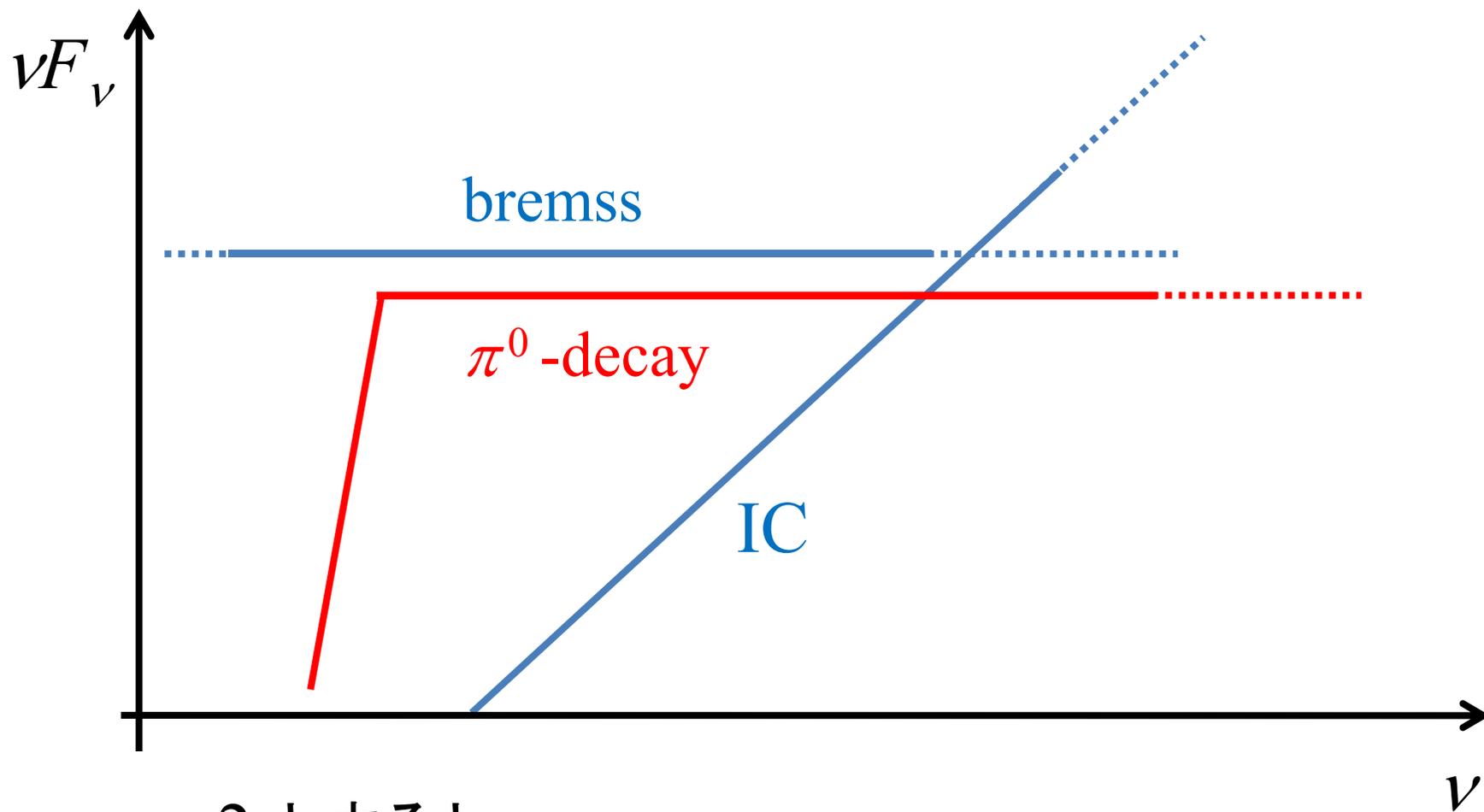
$$\Rightarrow \nu F_\nu \propto \nu^{(3-p)/2}$$

Cooling が効く場合、

- ・放射スペクトル F_ν [$\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{Hz}^{-1}$]:

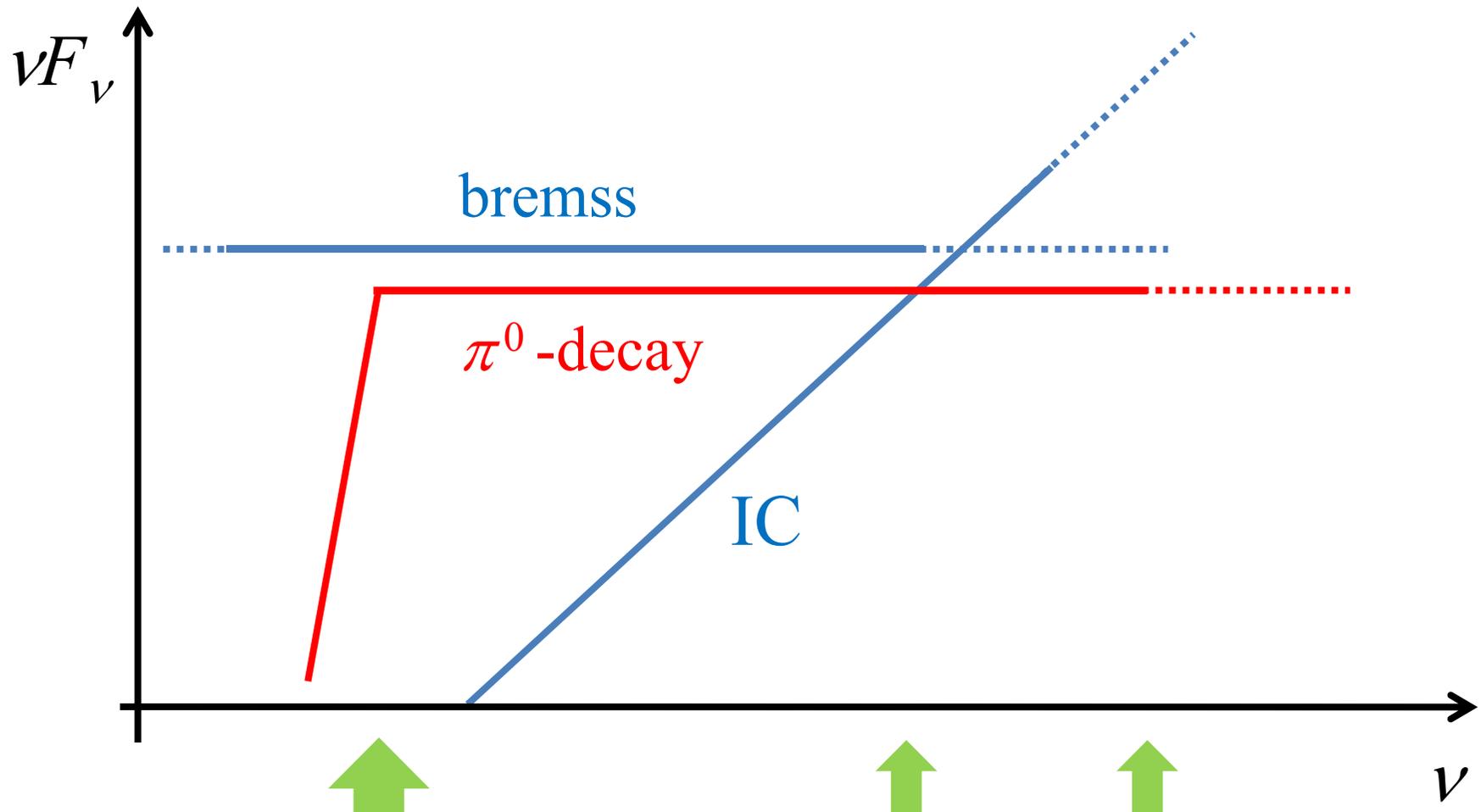
$$F_\nu d\nu \propto E \cdot E^{-p} dE \propto \nu^{-p/2} d\nu$$

$$\Rightarrow \nu F_\nu \propto \nu^{1-p/2}$$



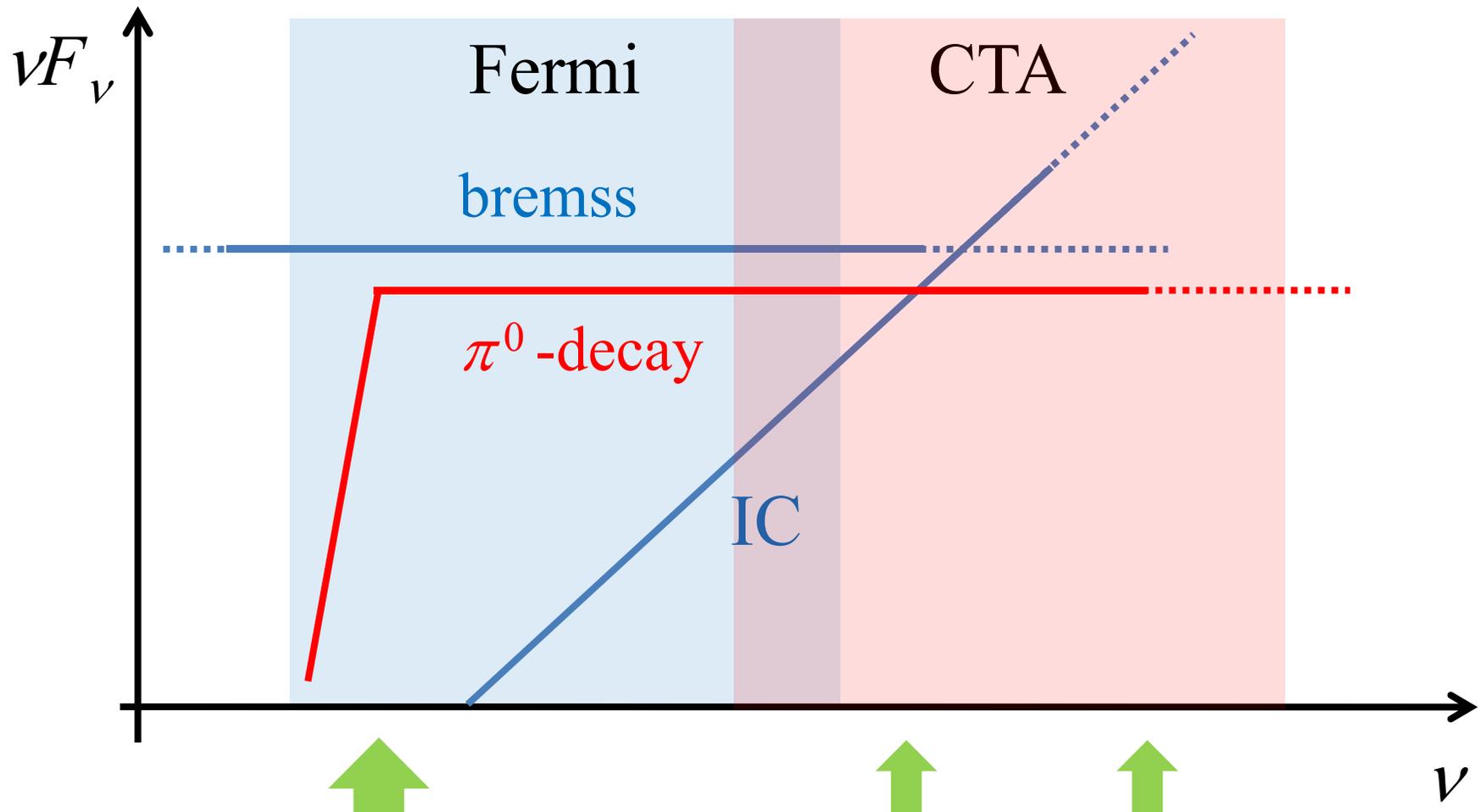
$p \sim 2$ とすると、

陽子起源	π^0 -decay :	$\nu F_\nu \propto \nu^{2-p} \propto \nu^0$
電子起源	bremms. :	$\nu F_\nu \propto \nu^{2-p} \propto \nu^0$
	IC :	$\nu F_\nu \propto \nu^{(3-p)/2} \propto \nu^{0.5}$



$m_{\pi^0} \sim 134 \text{ MeV}$
(cut-off)

$E_{\text{max,e}} < E_{\text{max,p}}$
(cooling effect)




 $m_{\pi^0} \sim 134 \text{ MeV}$
 (cut-off)



 $E_{\text{max,e}} < E_{\text{max,p}}$
 (cooling effect)

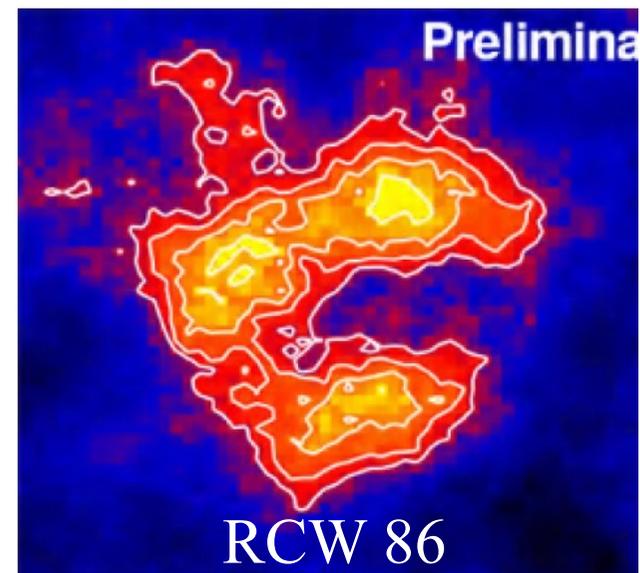
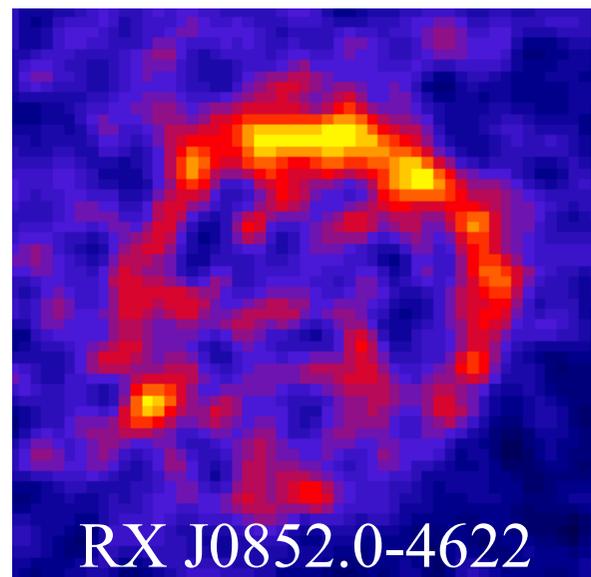
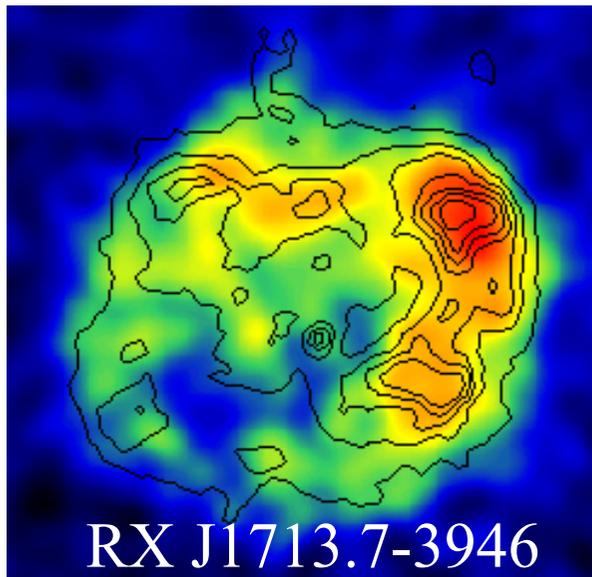
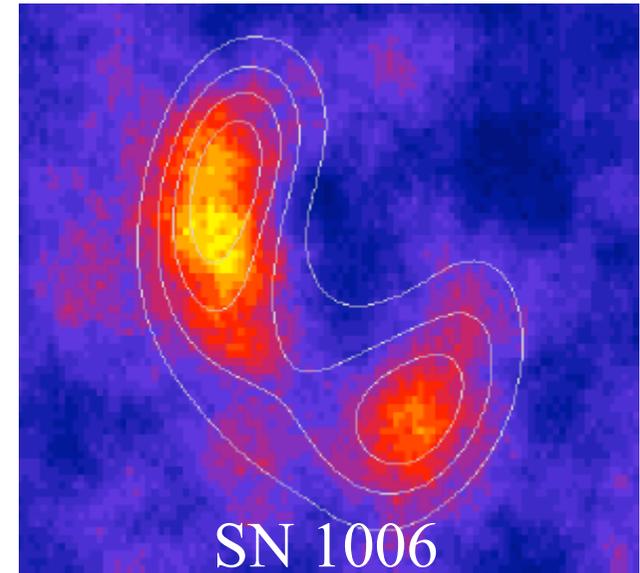
TeV gamma-rays from young SNRs

TeV($=10^{12}\text{eV}$) γ -rays detected by H.E.S.S.

TeV's from shock waves of young SNRs

--- Direct evidence for 10-100TeV
electrons and/or protons !!

BUT, we don't know whether the TeV
emission is hadronic or letonic.



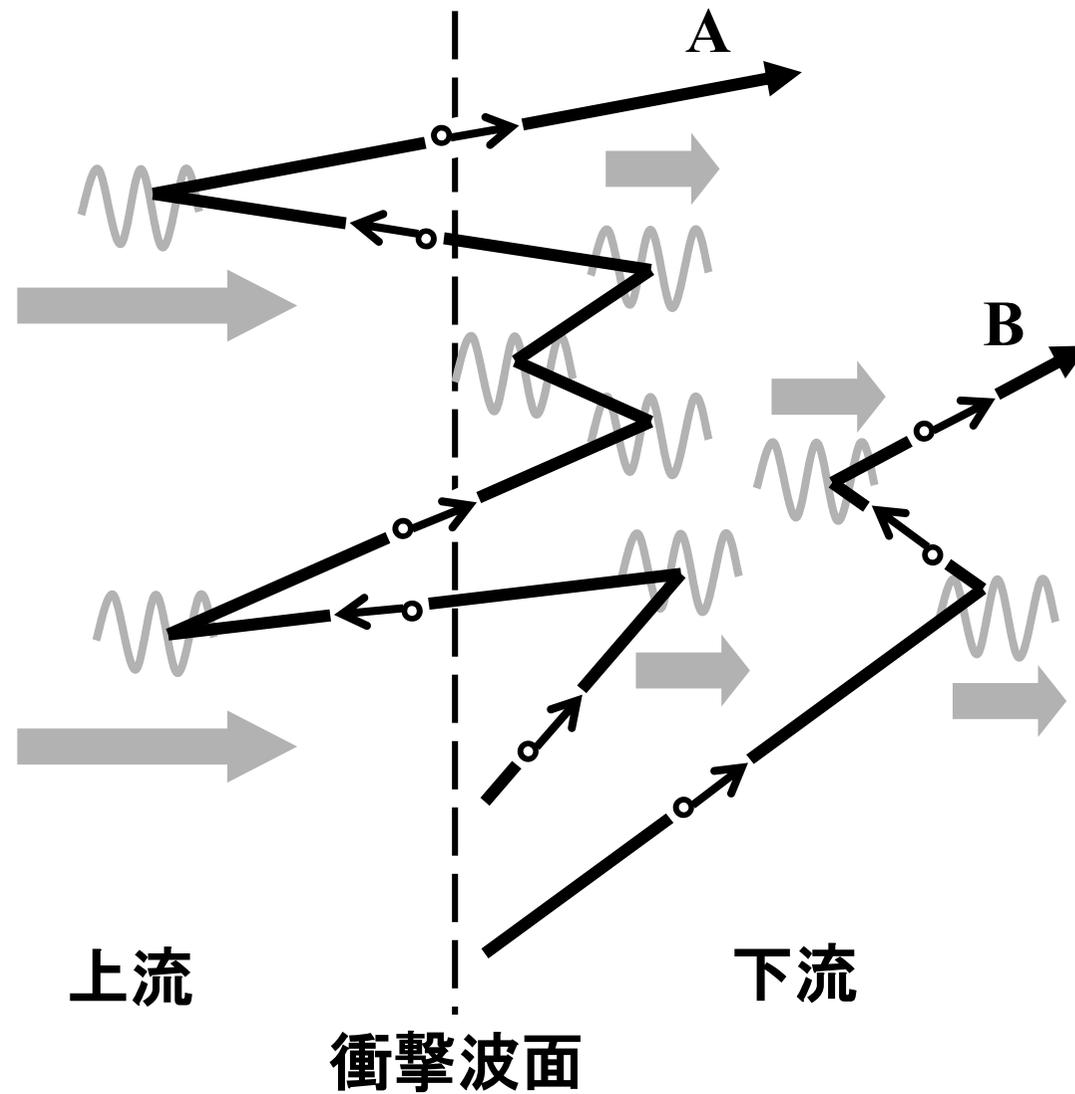
SNRs as sources of Galactic CRs

- Evidence for hadron acceleration?
 - Gamma-rays are leptonic or hadronic?
 - Classical but still important problem
- SNRs are really *PeVatrons* ?
 - When, where, and how to reach $10^{15.5}\text{eV}$?
- Electron acceleration efficient or inefficient?
 - Nonlinear model predicts $e/p \sim 10^{-5} \ll 1/200$ @Earth...
 - Contribution from pulsars/PWN negligible?
- When, where, and how to disperse CRs into ISM?
 - Lessons from W51C/W44/W28,... and predictions for CTA.
- Acceleration at reverse shock ?
- Nature of TeV unIDs ?
 - middle-aged (old) SNRs, or PWNe ?

SNRs as host of strong shocks

- Strong shocks accelerate particles.
 - Plasma physics point of view.
 - Source spectrum is E^{-2} or not?
 - Nonlinear model of particle acceleration.
 - Magnetic field amplification.
 - Injection rate of high-energy particles, e/p ratio,...
 - Application to other objects w/ shocks.
 - Toward interdisciplinary science...
- Particle acceleration at reverse shock.
 - Dependence of different upstream state (low-B?)
 - *Non-Fermi* process may occur?

衝撃波粒子加速理論 (フェルミ加速)



Spectral index of accelerated particles

Bell('77), Blandford & Ostriker ('77) :

In the test-particle case (accelerated particles does not affect the background plasma), the energy distribution of particles is given by

$$N(E) dE \propto E^{-p} dE \quad , \quad p = \frac{r + 2}{r - 1}$$

where “ r ” is the shock compression ratio.

$$(1) M_s \rightarrow \infty, \quad \gamma_g = 5/3, \quad \Rightarrow \quad r = 4, \quad p = 2.0$$

$$(2) M_s = 10, \quad \gamma_g = 5/3, \quad \Rightarrow \quad r = 3.88, \quad p = 2.04$$

$$(3) M_s = 4, \quad \gamma_g = 5/3, \quad \Rightarrow \quad r = 3.37, \quad p = 2.27$$

$$(4) M_s \rightarrow \infty, \quad \gamma_g = 4/3, \quad \Rightarrow \quad r = 7, \quad p = 1.5$$

衝撃波周辺で本当に $p=2$ なのか？

強い衝撃波の極限($M_s > *10$)で、宇宙線をテスト粒子として扱えば $p=2$ となるが、以下のような効果を考慮すると p は2からずれる。

1. Nonlinear model :

- a) 宇宙線の「圧力」を考慮すると、衝撃波の圧縮比があがり、 $p < 2$ となる？
- b) 増幅された磁場により上流・下流の散乱体の相対速度が4倍以下となって、 $p > 2$ となる？

2. 中性粒子の影響 (Ohira+09) :

圧縮比を下げる効果により、 $p > 2$ となる。

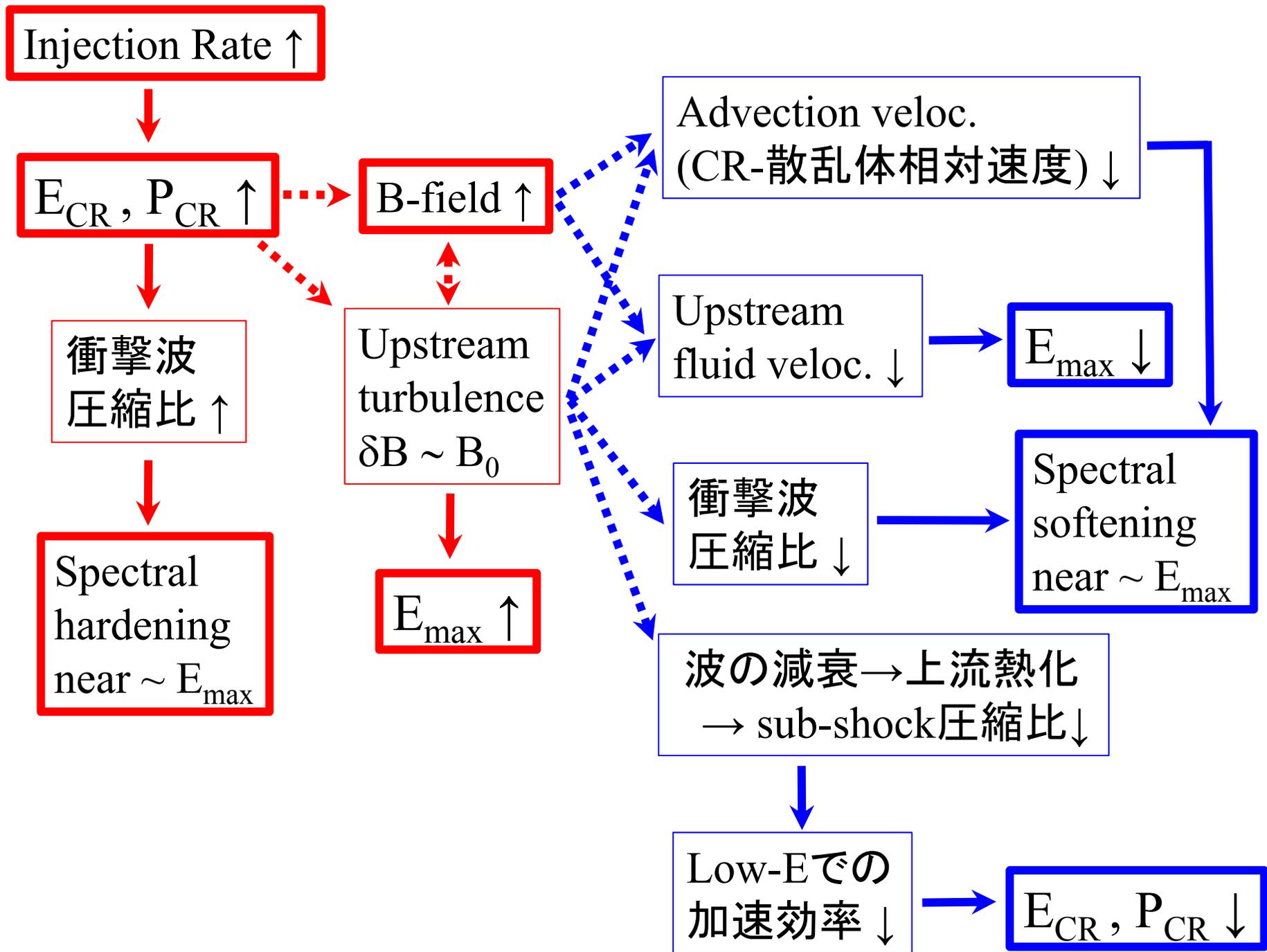
3. Non-diffusive transport (Hada & Otuka, 09):

Sub-diffusive (advection dominated) $\Rightarrow p > 2$.

Super-diffusive (その反対) $\Rightarrow p < 2$

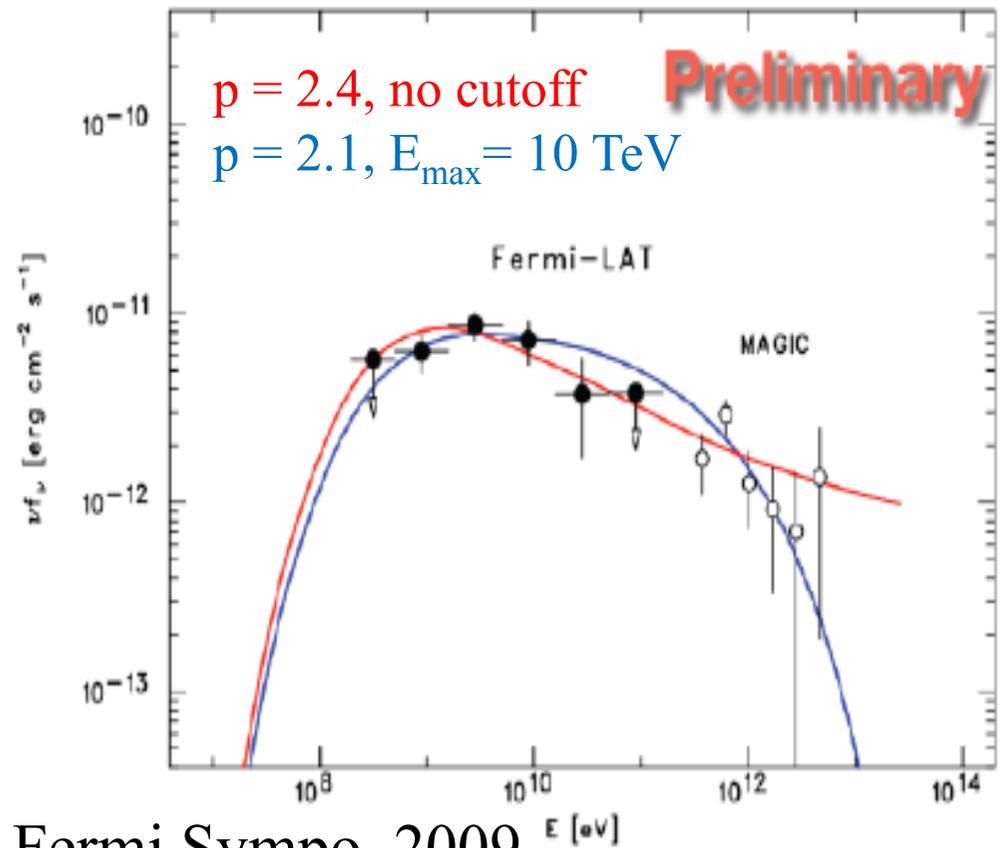
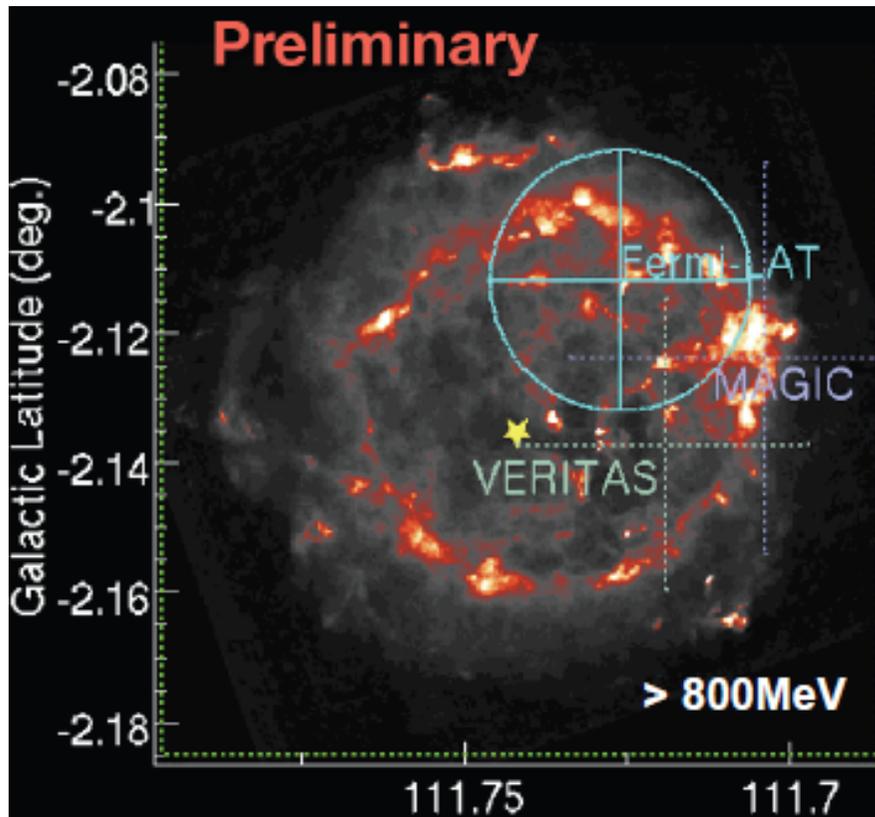
4. 加速域を抜け出した宇宙線スペクトル

一般に $p=2$ からずれる(Ohira, Murase, RY 09)。



Gamma-rays from young SNR, Cas A

SNRの淵の部分からガンマ線を検出(12.2σ)。スペクトルはProton起源のような形をしているが、Young SNR (age~340yrs) にもかかわらず、 $p=2.0$ で $E_{\max}=10^{15.5}\text{eV}$ (knee) まで伸びている兆候は見られない。



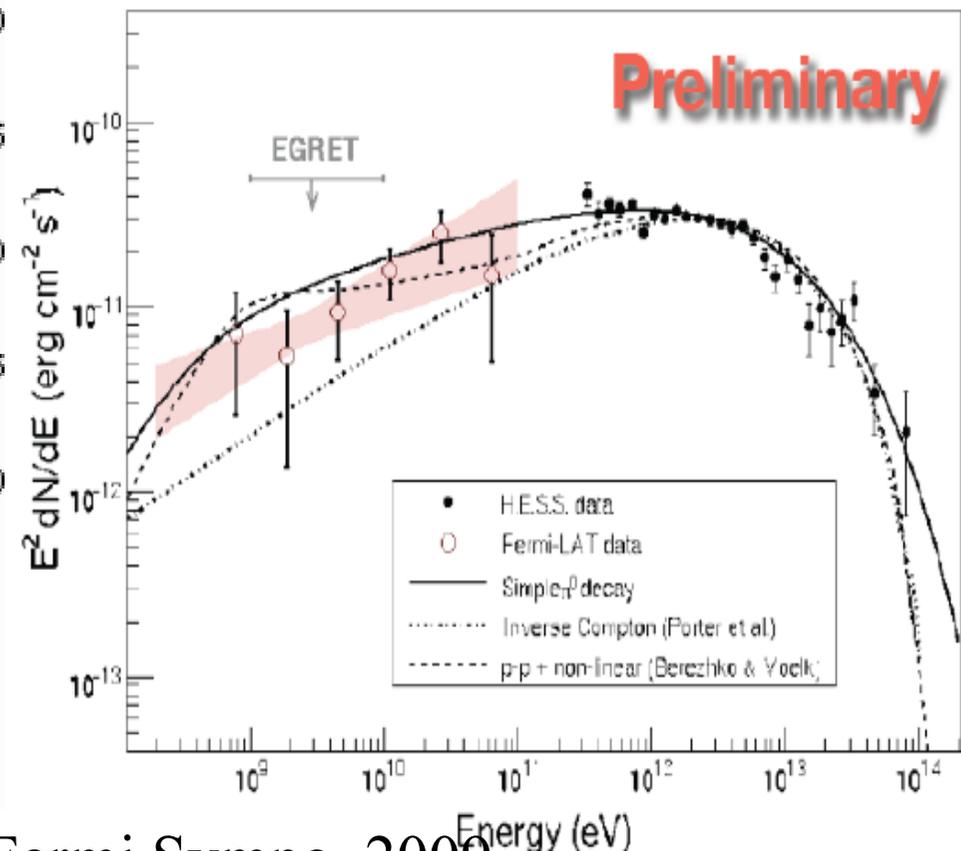
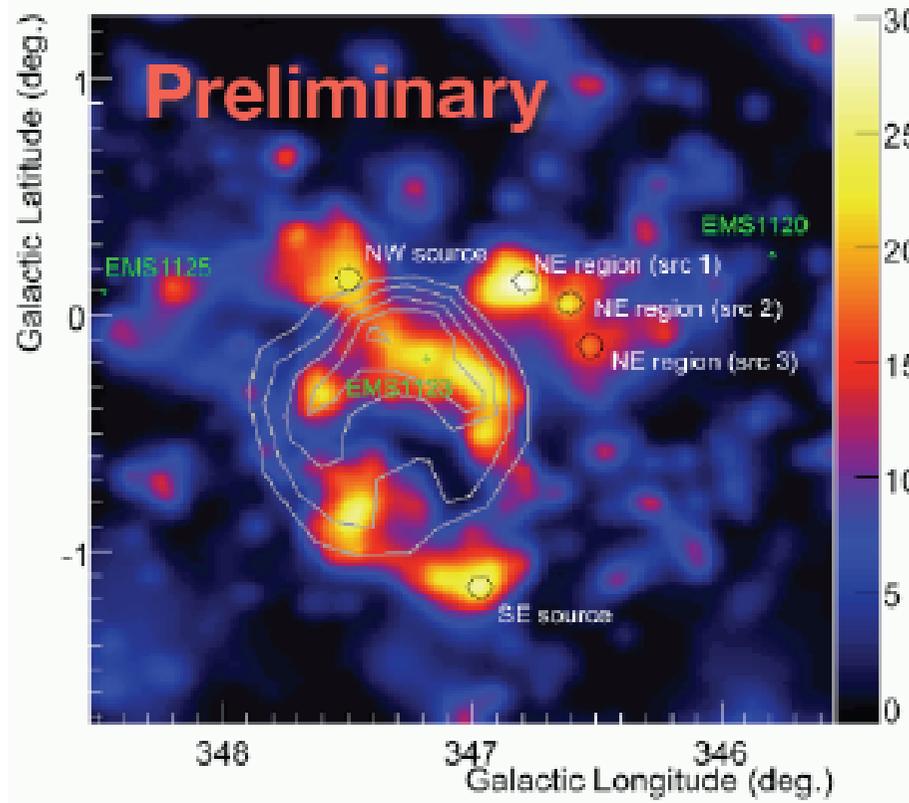
S. Funk @ Fermi Sympo. 2009

Gamma-rays from young SNR, RXJ1713

RX J1713.7-3946 : age~1000yrs のSNR.

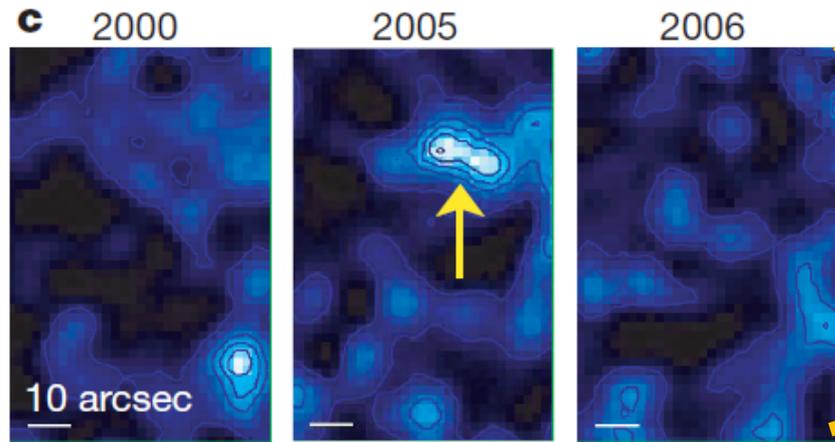
* スペクトルから、“1-zone” Inverse Compton model (電子起源)は苦しくなってきたが、Proton起源であるとは結論されていない。

* $p=2.0$ で $E_{\max}=10^{15.5}\text{eV}$ (knee) まで伸びている兆候は見られない。

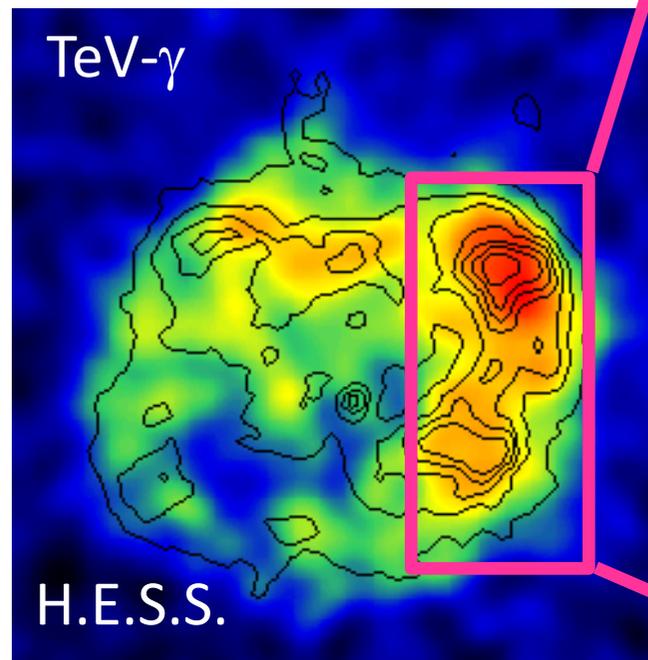
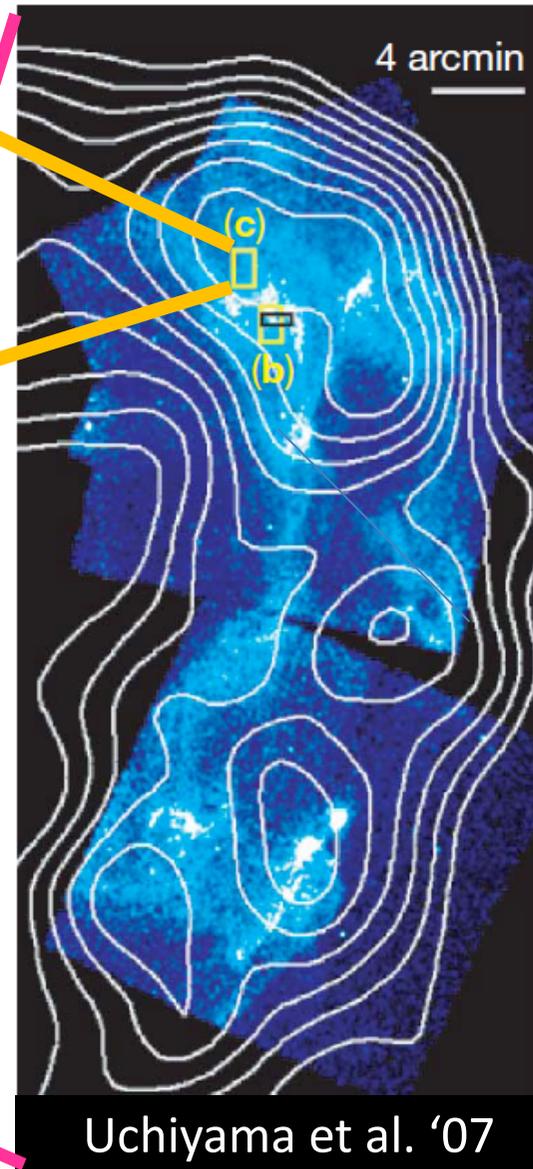


S. Funk @ Fermi Sympo. 2009

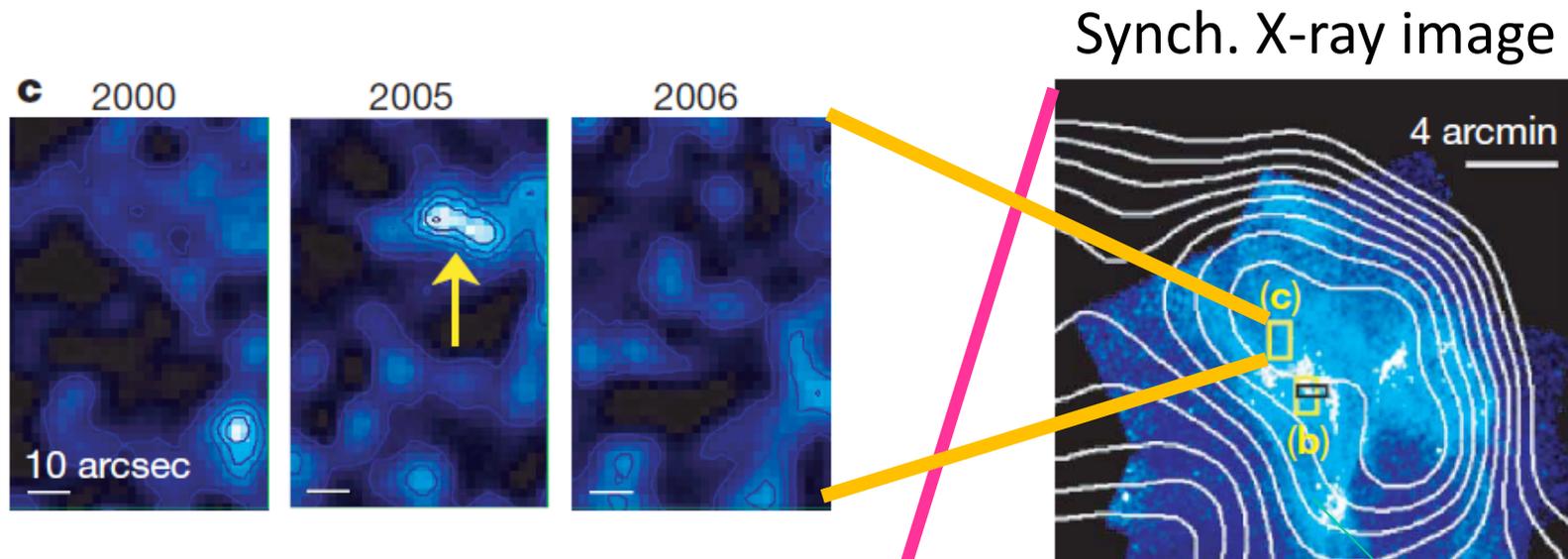
$B \sim \text{mG}$ at RX J1713.7- 3946 ?



Synch. X-ray image



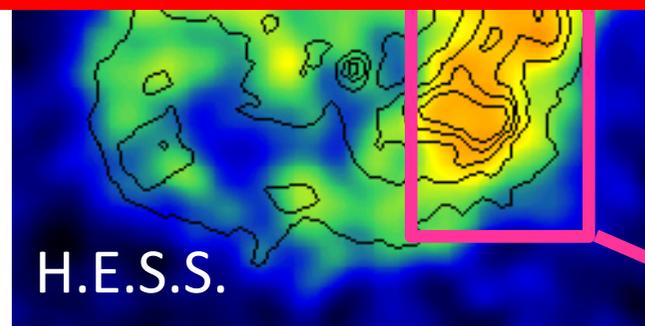
B ~ mG at RX J1713.7- 3946 ?



Time-variable synchrotron X-rays observed!!

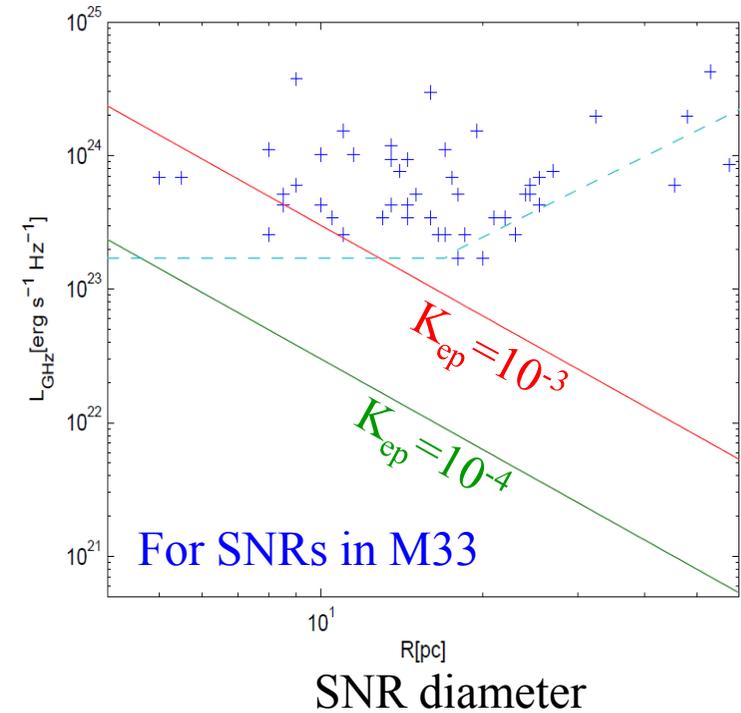
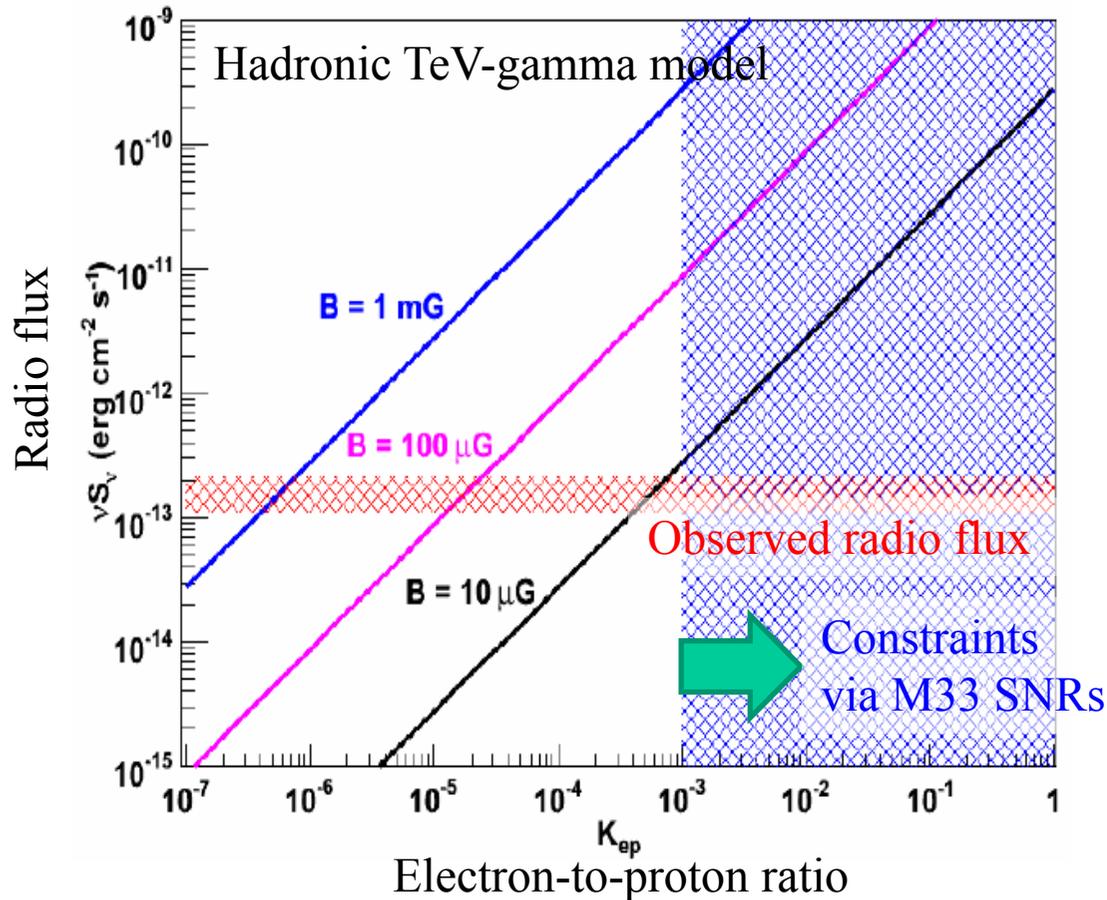
If synch. cooling time ~ 1 yr, B \sim mG is indicated.

(for X-ray emitting electrons, $t_{\text{synch}} \sim 1.5(B/\text{mG})^{-1.5} \text{yr}$)



Problem: observed dim radio synch.

- If TeV- γ is hadronic (pion decay), $\Rightarrow E_{\text{proton}} \sim 10^{49-50}$ erg.
 - If $B \sim 1 \text{ mG}$, $\Rightarrow E_{\text{electron}} \sim 10^{44}$ erg (via synch. radio/X).
- \Rightarrow Extremely small e/p ratio, $K_{\text{ep}} \sim 10^{-5}$, is required!
 (equivalently, observed radio is too dim for reasonable e/p ratio.)



Ref: Katz & Waxman (08), Butt+(08)

Problem: low-energy cutoff of TeV- γ

Gradual steepening in TeV spectrum observed.

=> If TeV is hadronic,
 $E_{\max,p} \sim 30-100\text{TeV}$.

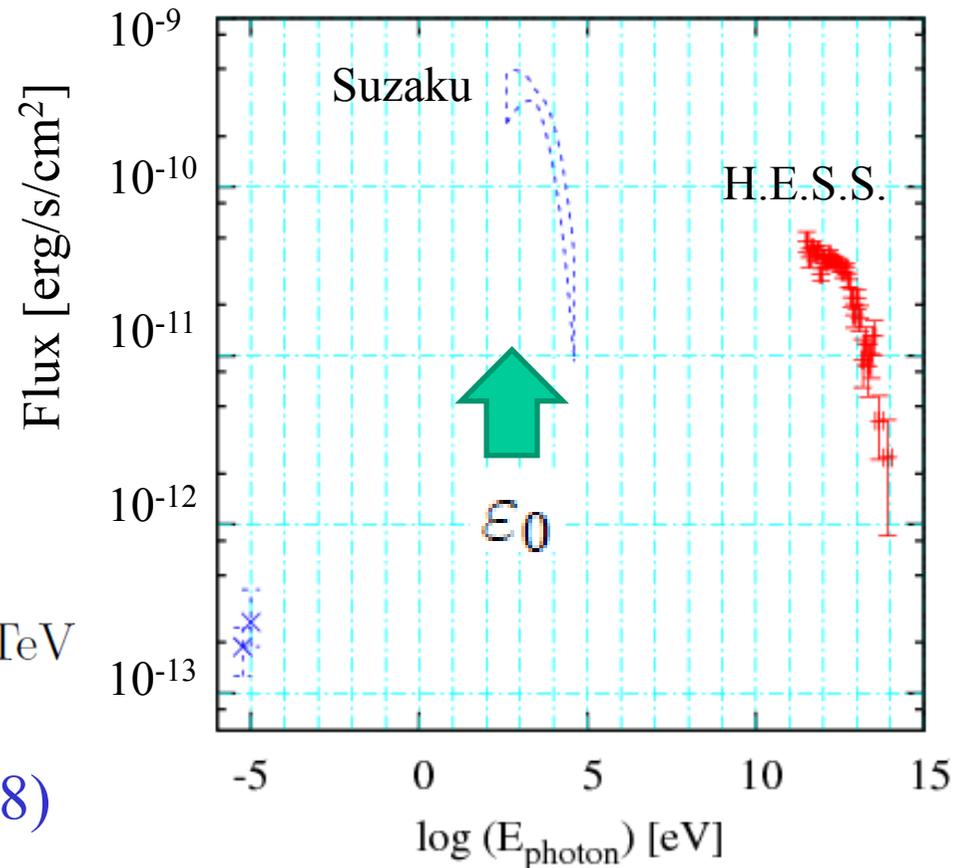
Maximum energy of proton in the Age-limited acceleration ($t_{\text{acc}}=t_{\text{age}}$):

$$E_{\max,p} = 8 \times 10^3 \frac{B_{\text{mG}} t_3}{\eta_g} \left(\frac{v_s}{4000 \text{ km s}^{-1}} \right)^2 \text{TeV}$$

X-ray spectrum analysis (Tanaka+08)

$$\varepsilon_0 \approx \frac{0.98}{\eta_g} \left(\frac{v_s}{4000 \text{ km s}^{-1}} \right)^2 \text{keV} = 0.67 \text{keV}$$

$$\Rightarrow E_{\max,p} = 5 \times 10^3 B_{\text{mG}} t_3 \text{TeV}$$



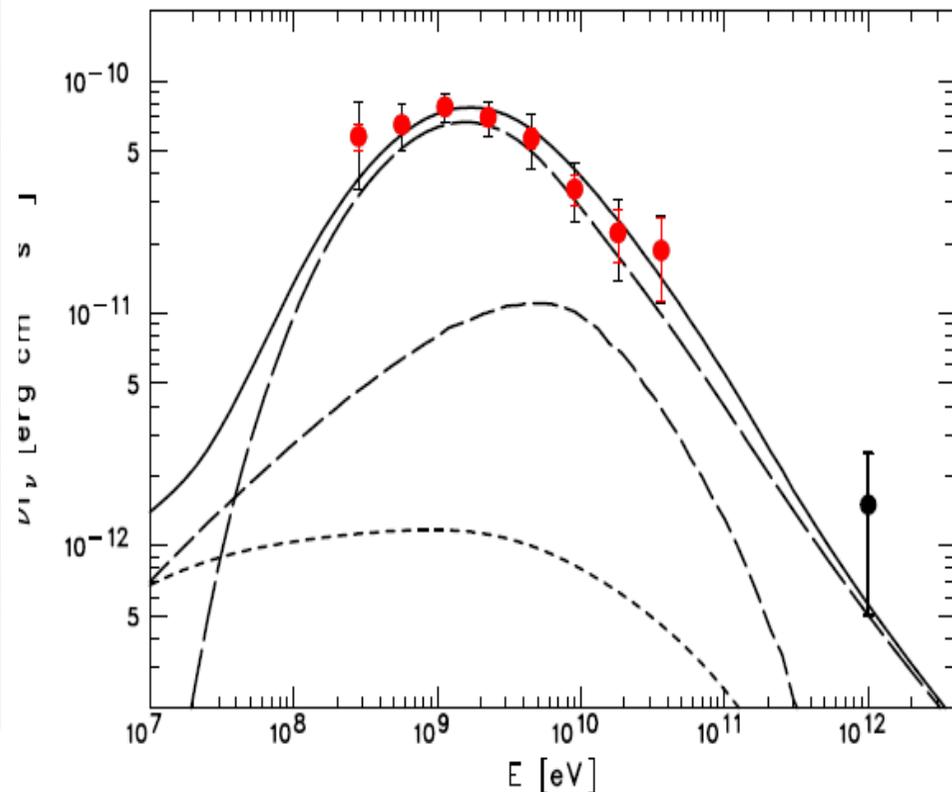
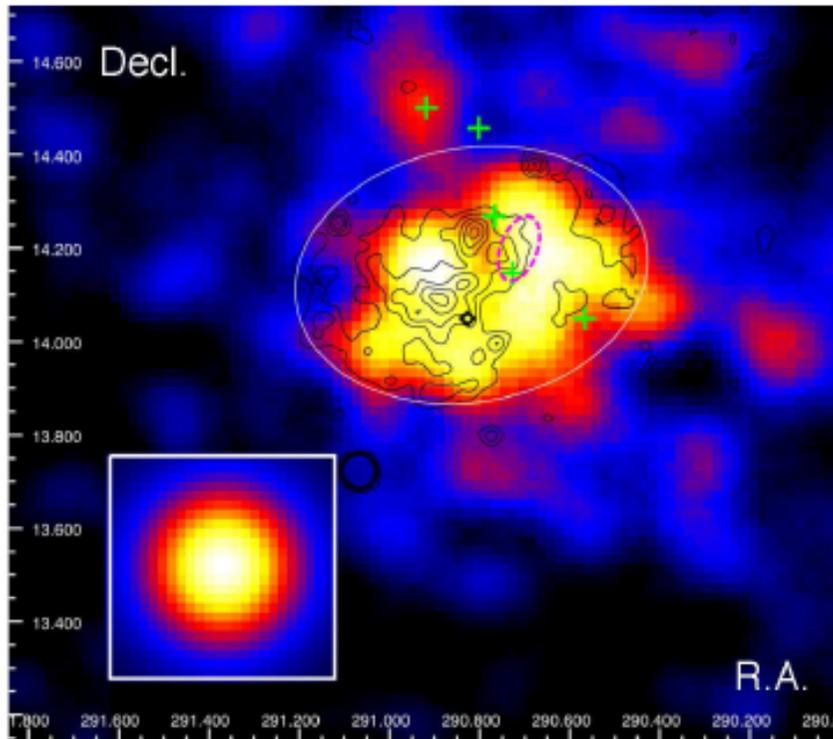
“Hadronic TeV w/ age-limited, B=0.1-1mG” はTeV・X線観測と矛盾。

Escape- limited acceleration?

- Age-limited model ($t_{\text{acc}}=t_{\text{age}}$) で決まる E_{max} 以下の被加速粒子に対しても、加速領域外へエスケープしてしまう効果が大きくなると、 E_{max} は小さくなってしまいます。詳しくは以下参照：
Ohira, Murase, RY (2010), submitted to A&A (arXiv:0910.3449)
- このEscape-limited model のシナリオでは、RX J1713.7-3946のガンマ線スペクトルが100TeV以上まで伸びていないことは説明可。
- そのかわり、「Young SNR がGalactic CRsの源」であるためには、「昔(age~100yrs) knee まで加速していた」とすることになる (Gabici, Aharonian 08)。
- これをどうやって観測的に検証するのか？
- Cas A(age=340yrs) はkneeまで届いている兆候なし。
Youngest SNR (G1.9-0.3)はCTAをもって観測するのは難しい
ようなので(Ksenofontov+08)、新たな若いSNRを探し出す必要ある？
=> TeV un ID sourceの中にはないか？もしくはCTAで発見されるか？

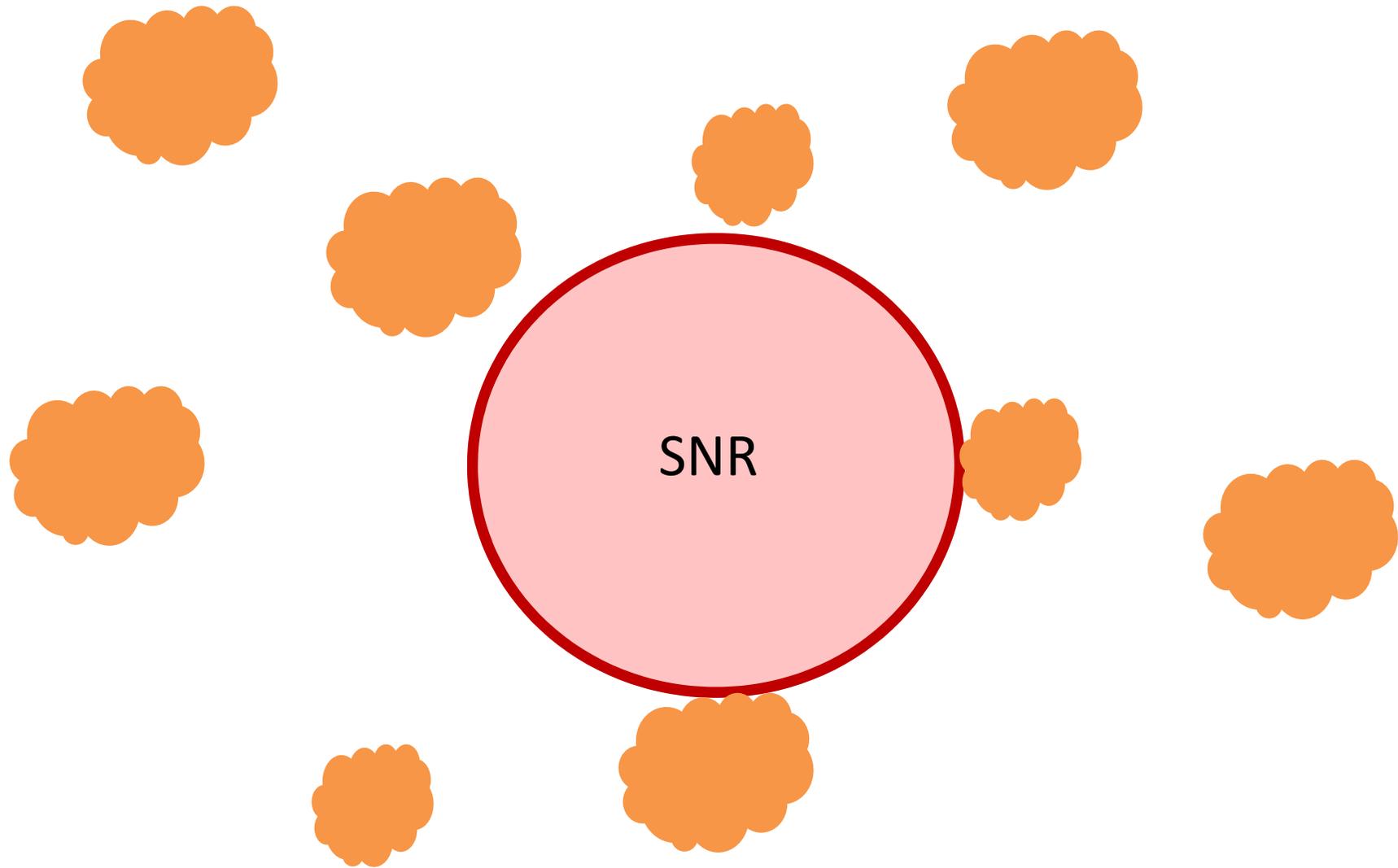
Gamma-rays from old SNRs

“分子雲と相互作用する” Middle age, old SNRsからGeV帯域
ガンマ線を検出 (IC443, W51C, W44, W28)。
スペクトルに折れ曲がりが存在 (W51, W44)？
分子雲は単に宇宙線ターゲットだけではなく、宇宙線解放の場？



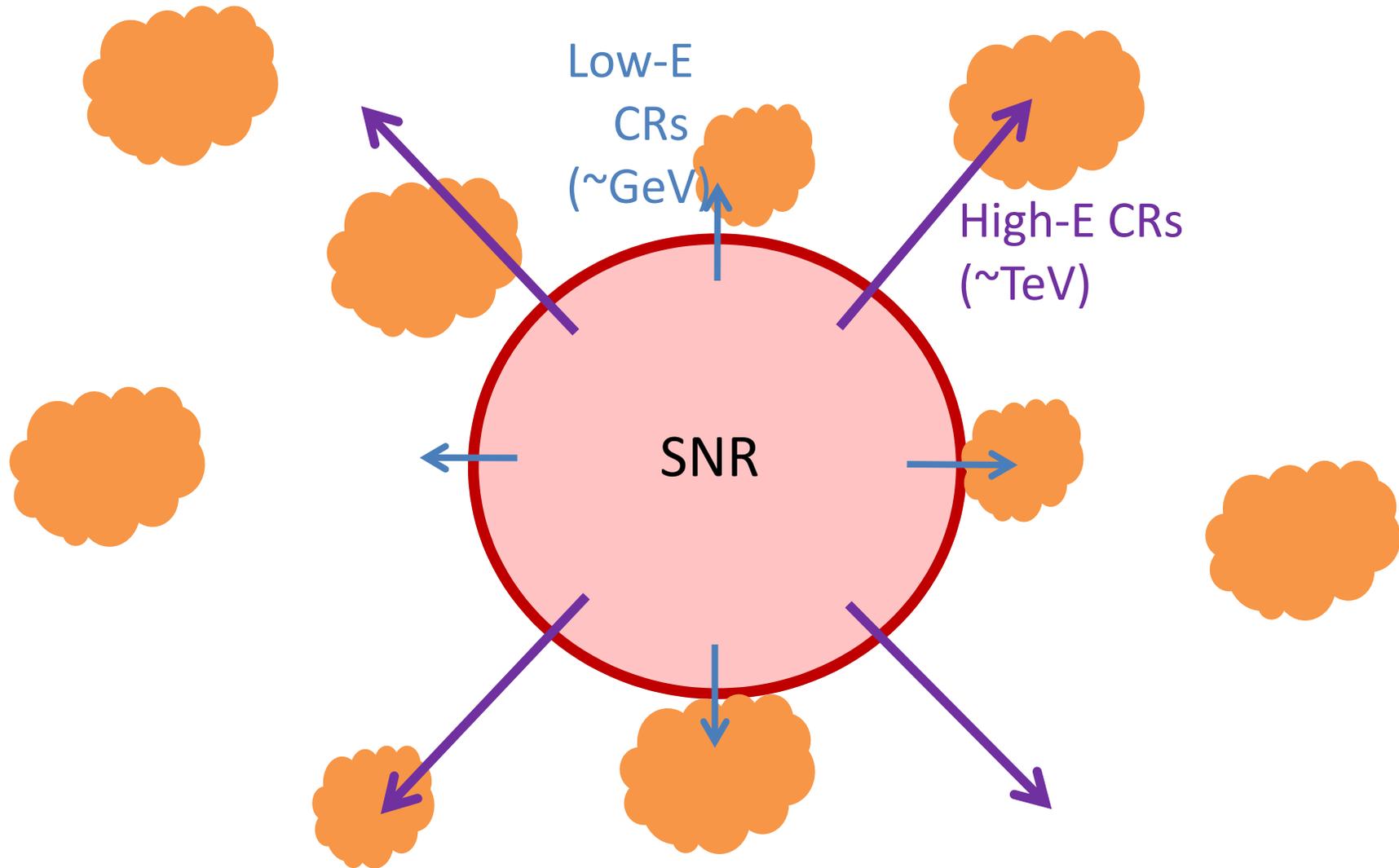
W51C; Fermi LAT collaboration (2009), ApJL

GeV- TeV Morphology



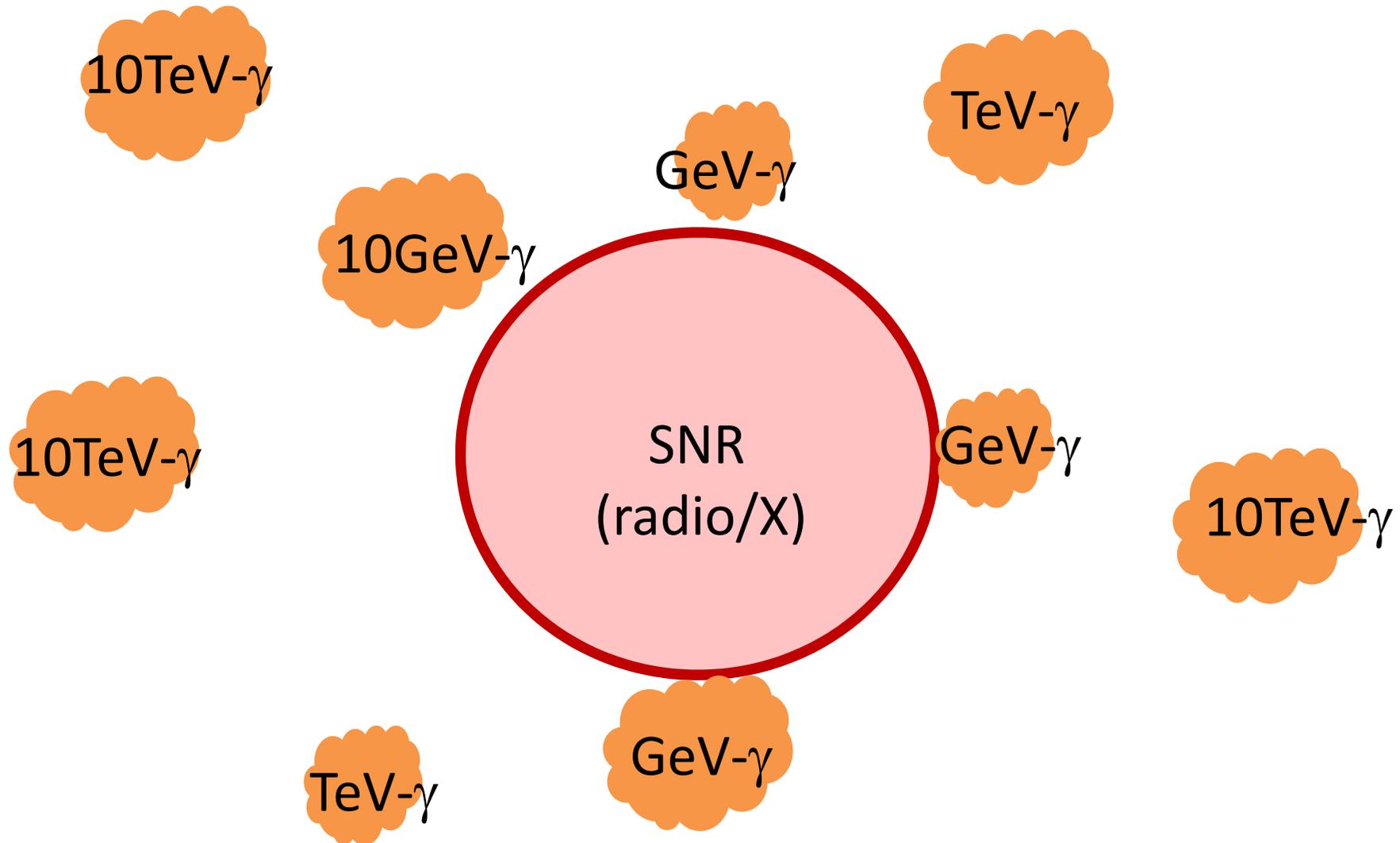
GeV- TeV Morphology

Gabici, Aharonian, Atoyan...
Energy-dependent
propagation of CRs.



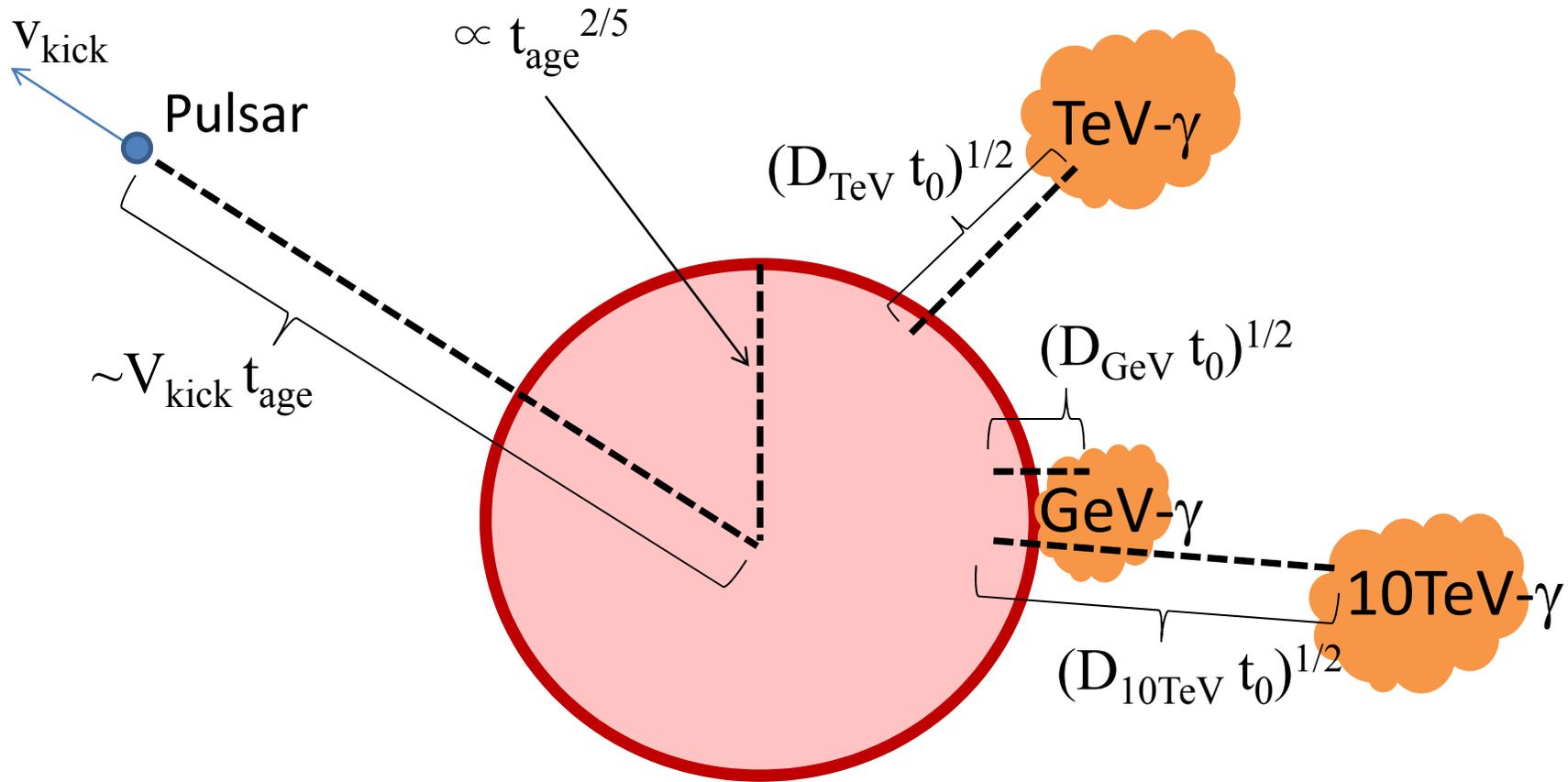
GeV- TeV Morphology

Gabici, Aharonian, Atoyan...
Energy-dependent
propagation of CRs.



GeV- TeV Morphology

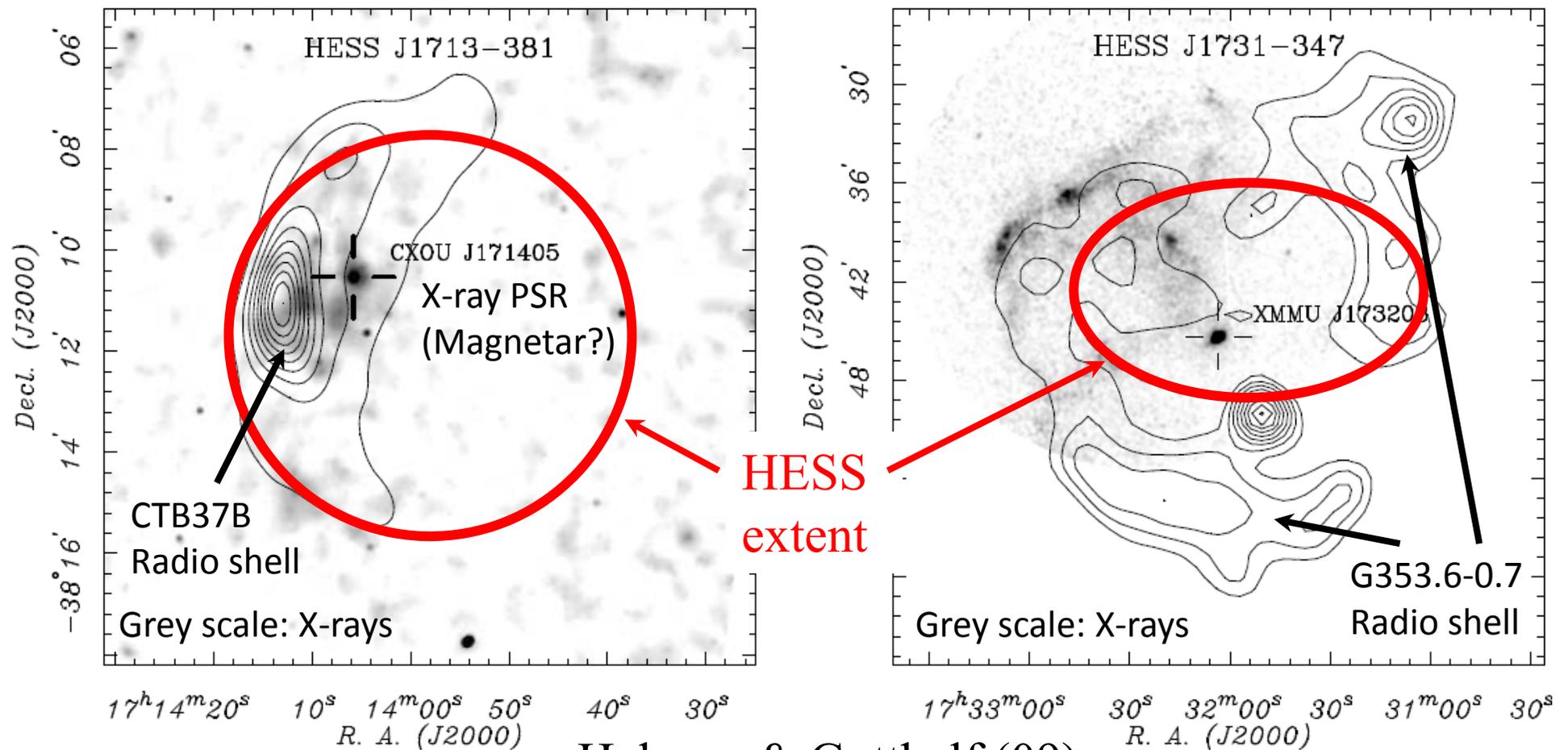
$$D_E \propto E^\alpha \quad (\alpha: \text{unknown})$$



SNRの年齢が時刻 $t = t_{\text{age}} - t_0$ にCRのISMへの解放がおこったことがわかると同時に、CRの伝播の様子が詳細に明らかになる？

TeV unIDs are old SNRs or PWNe?

TeV unIDソースの空間分布はこれまで議論されていない。
これはCTA時代の課題。以下の2天体は典型例。

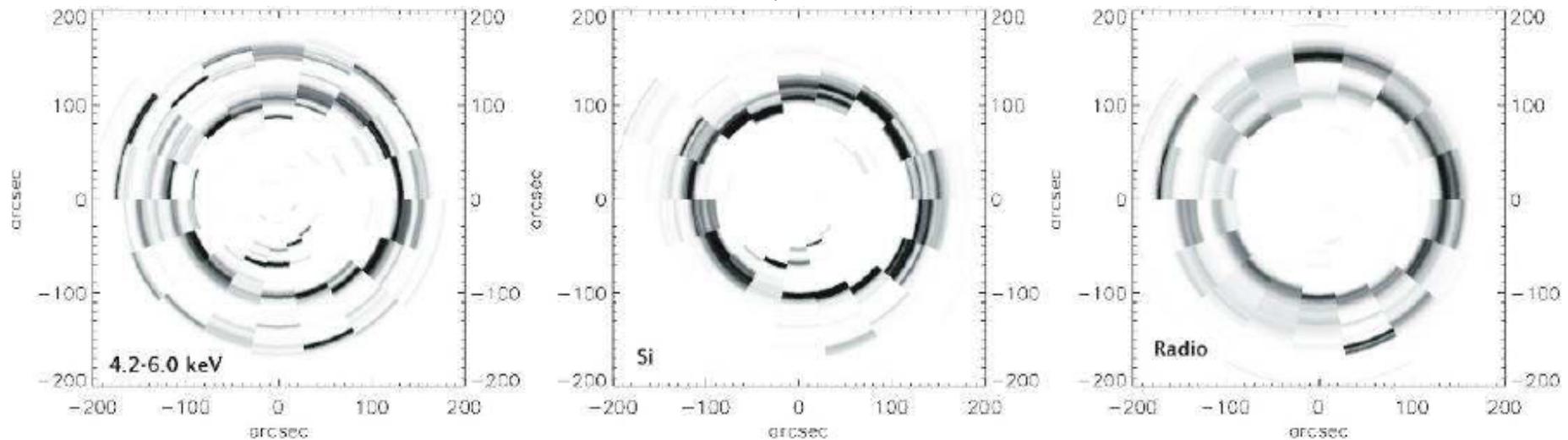
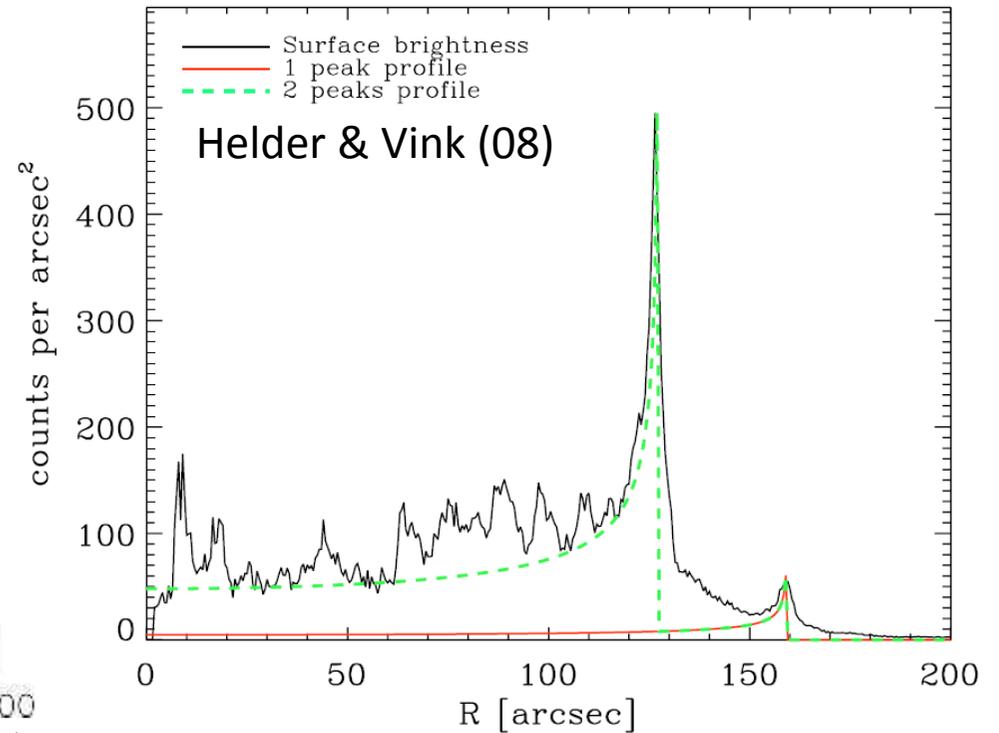
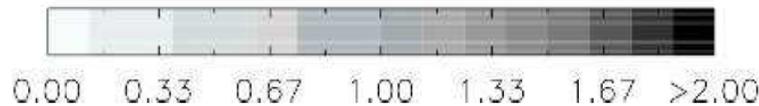


Halpern & Gotthelf (09)

Electron acc. at Cas A's reverse shock

Uchiyama+, Helder & Vink, ...
Evidences for acceleration
at reverse shock.

Helder & Vink (08)



Ellison et al. (2005)

Reverse shock のすぐ内側(上流)の磁場 B_0 は、Ejecta の磁場であり、compact starの磁場がSNRの膨張に伴って引き延ばされたもの。
 (右図: $B_{WD}=10^{11}G$, $3 \times 10^{10}G$)
 従って、一般に、

$$B_0 \ll B_{ISM} \sim \text{a few } \mu\text{G}.$$

このような場合、reverse shockでの加速は、synch. X-rayを出すほどではない?

B_0 : shock上流の磁場

r_{tot} : shock圧縮比

p_{max} : for protons

ν_c : charac. synch. freq.

