

# 宇宙線の起源と加速と伝搬

大平 豊 青山学院大学

---

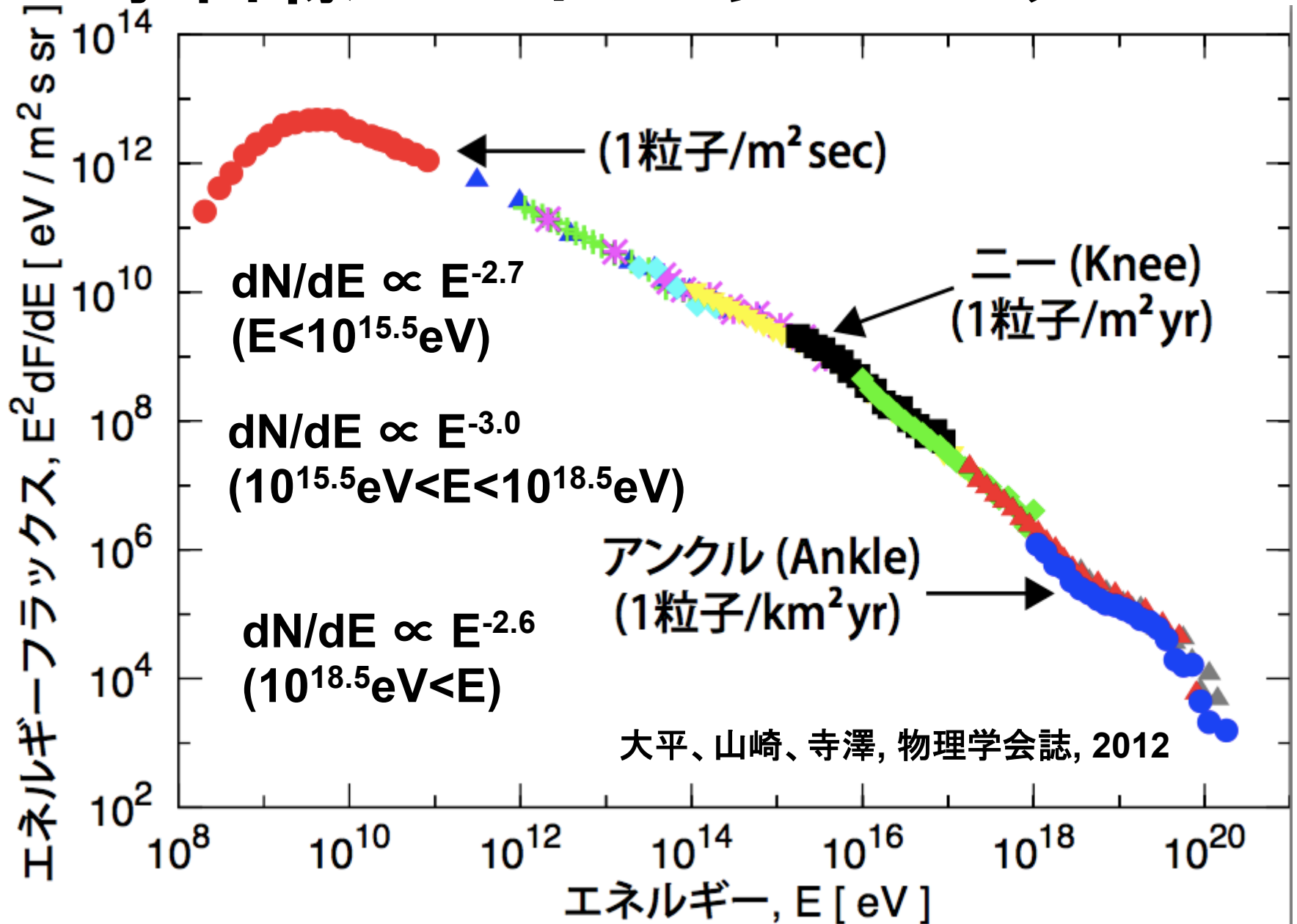
## 内容

銀河宇宙線の標準モデル

標準モデルと観測の矛盾

まとめ

# 宇宙線のエネルギースペクトル



# 宇宙線

宇宙線は非常に高エネルギー  
 $10^9 \text{ eV} - 10^{20} \text{ eV}$

未だ宇宙線の起源と加速機構は謎

宇宙線のエネルギー密度は、  
 $1 \text{ eV/cm}^3$ 。銀河の構成要素の1つ

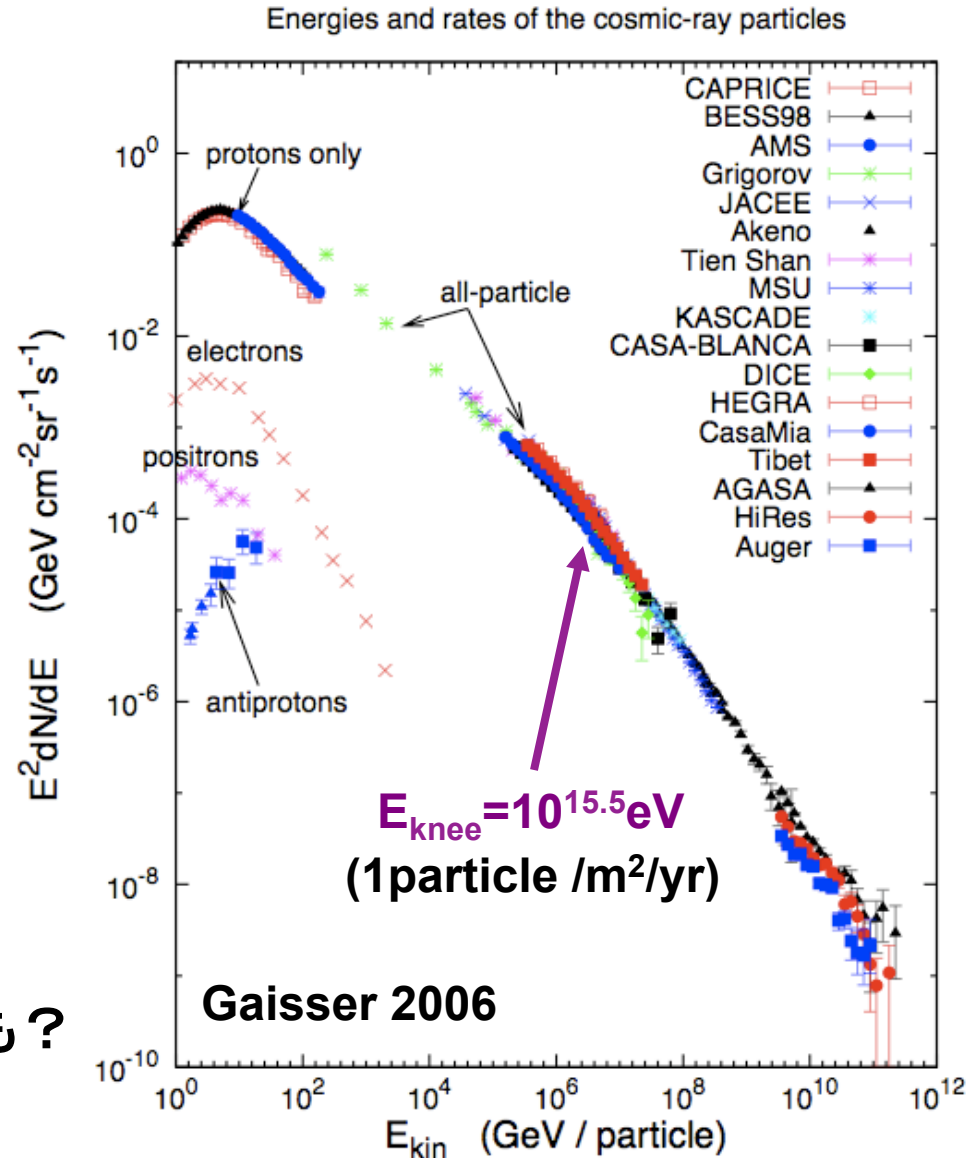
$\sim 10^{-9} / \text{cm}^3 @ \sim \text{GeV}$

$\sim 10^{-19} / \text{cm}^3 @ \sim \text{PeV}$

宇宙線はガスの電離度を決めたり、  
 $^{10}\text{B}$ などの軽元素の起源である。

雷や雲生成のきっかけとして重要かも？

地球の気候変動にも重要？



# 宇宙線

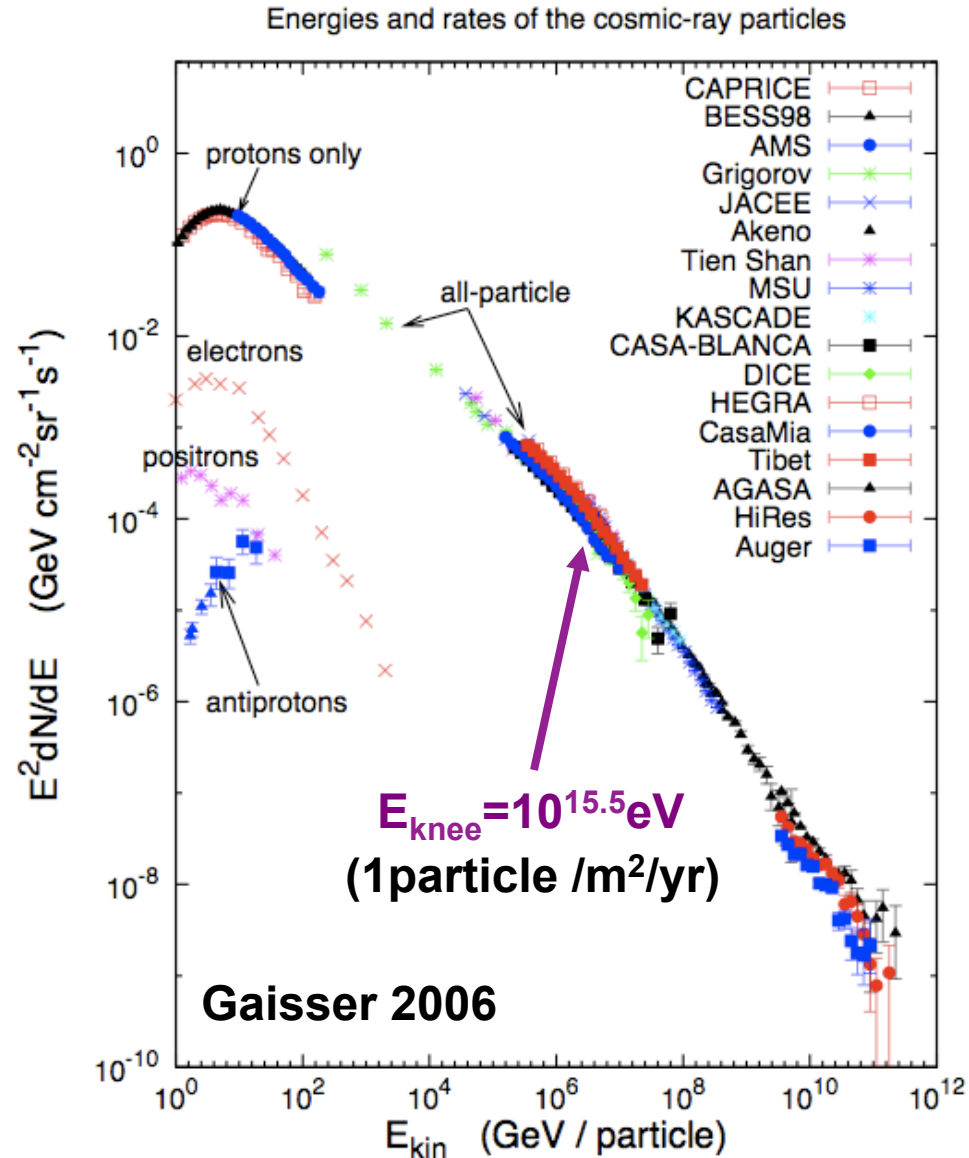
宇宙線: 宇宙から地球に降り注ぐ  
高エネルギー粒子

発見以来100年が経つが、  
未だ宇宙線の起源と加速機構は謎

$10^{17.5}$  まで、または  $10^{18.5}$  eV までは、  
銀河系内のSNRが起源

それ以上は銀河系外の  
GRB、AGN、銀河団やマグネター  
が起源

と思うのがの主流



# 超新星残骸 (SuperNova Remnant)

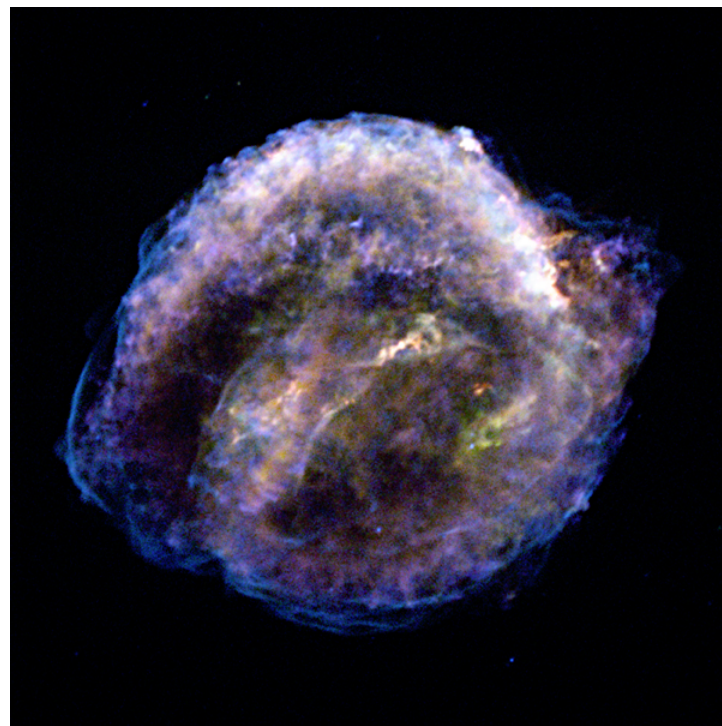
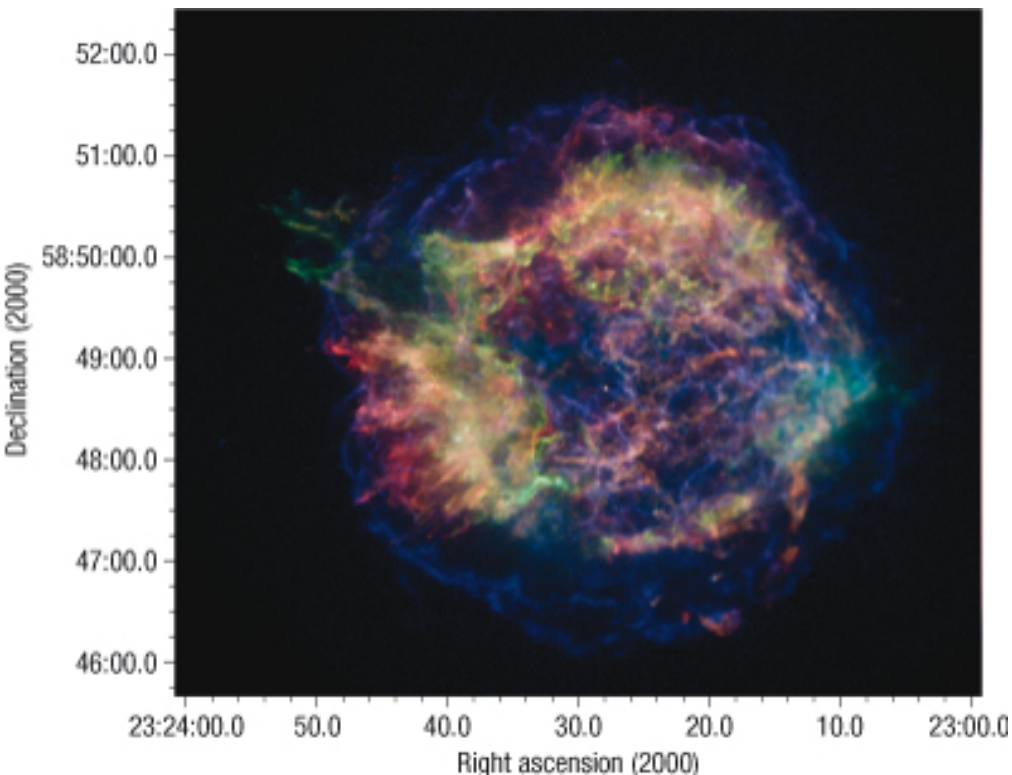
超新星残骸(SNR) : 星の大爆発の残骸

電波、赤外線、可視光、紫外線、X線、GeV- $\gamma$ 線、TeV- $\gamma$ 線で観測

Cas A

X線写真

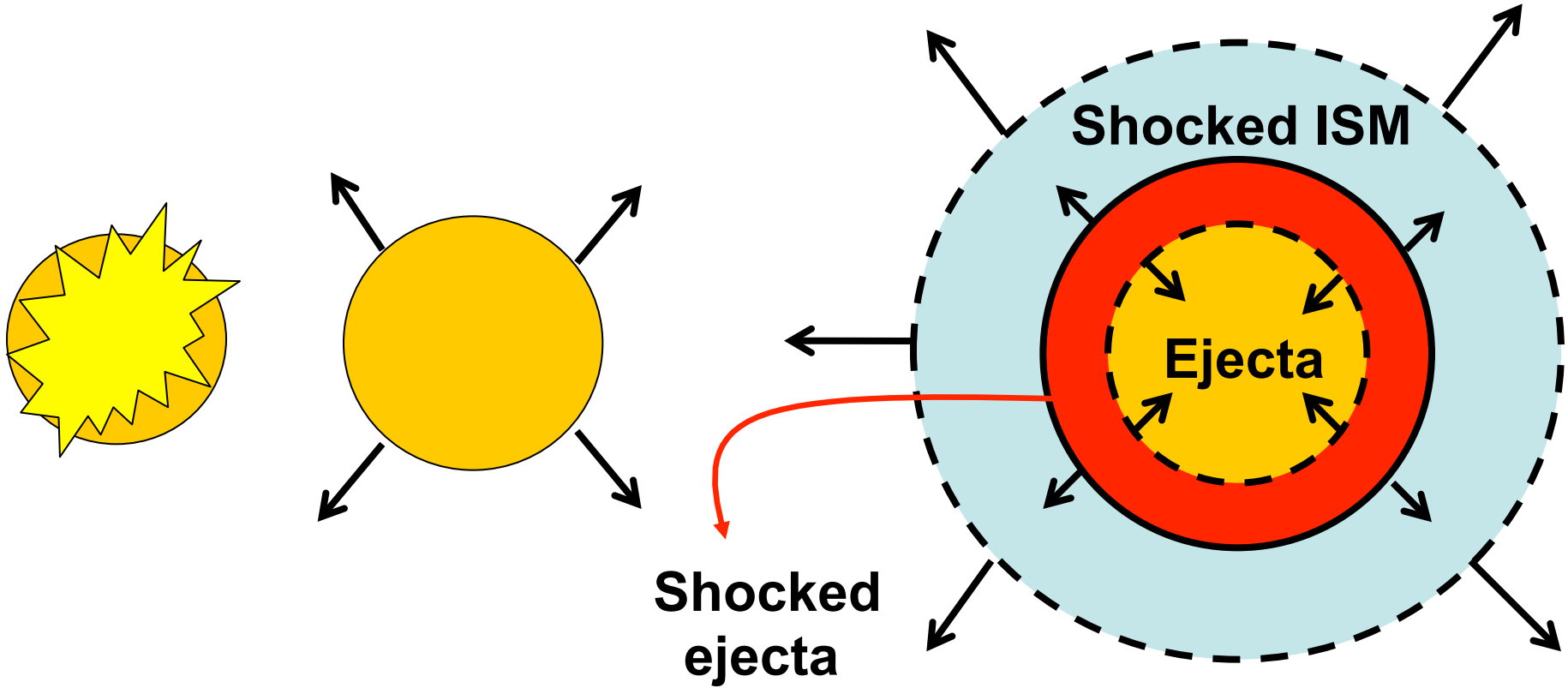
Kepler



Stage et al, Nature Physics 2, 614 - 619 (2006)

<http://chandra.harvard.edu/photo/2007/kepler/>

# 超新星残骸 (SuperNova Remnant)



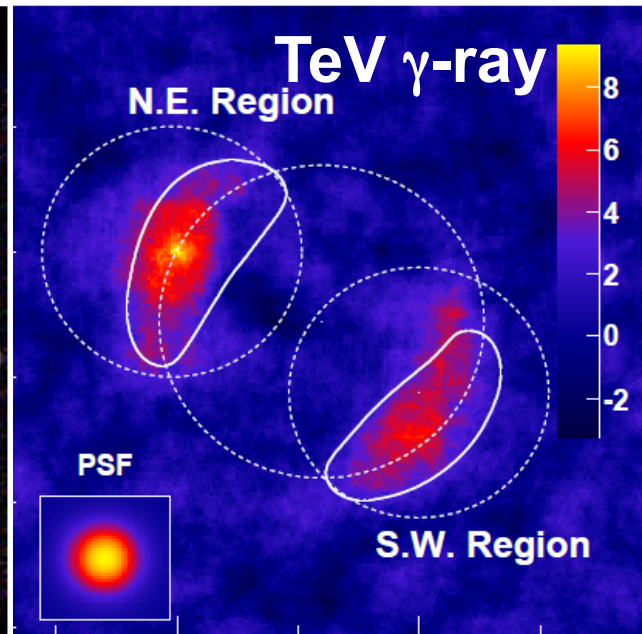
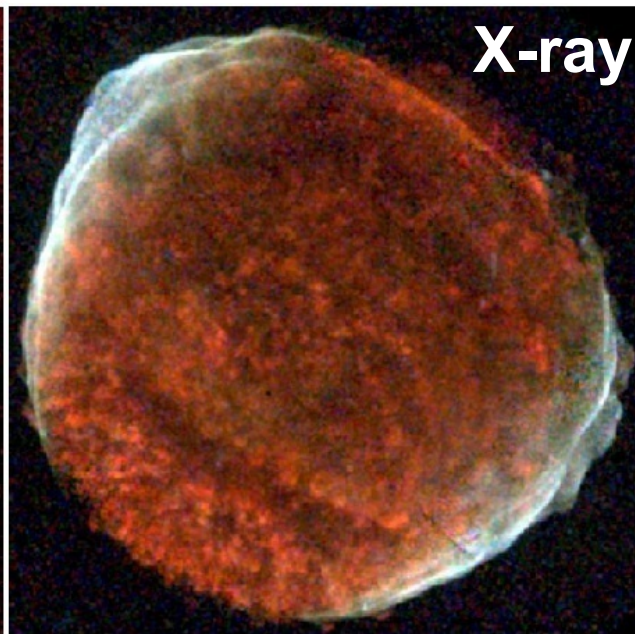
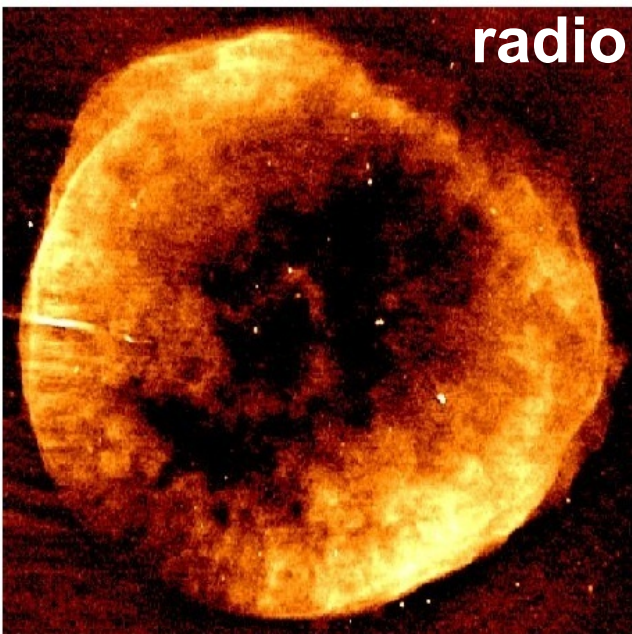
星の爆発  
Supernova

星の外層  
が熱膨張  
 $V \sim (E_{\text{exp}} / 2M_{\text{ej}})^{1/2}$   
 $\sim 0.03c$

星間ガス(ISM)や星周物質(CSM)  
と衝突し、2つの衝撃波を形成  
(Forward shock, reverse shock)  
Supernova remnant

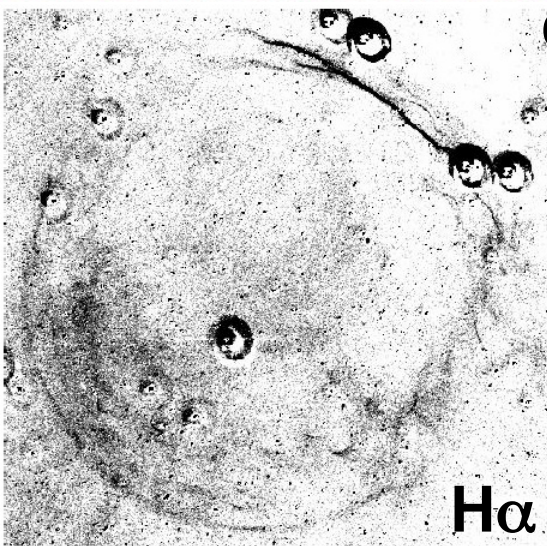


# 超新星残骸 (SNR) の観測



Cassam-Chennai et al. 2008

Acero et al. 2010



電波: 電子の GeV までの加速 ( $\sim 300$  SNRs)

X線: 電子の TeV までの加速 ( $\sim 10$  SNRs)

GeV- $\gamma$ : 陽子の TeV までの加速 ( $\sim 10$  SNRs)

TeV- $\gamma$ : 電子 or 陽子の 10TeV までの加速 ( $\sim 10$  SNRs)

$E_{\max,p} \sim 10^{15.5}$  eV?,  $E_{CR} \sim 10^{50}$  erg/SN?  $\rightarrow$  謎

# 銀河宇宙線

銀河宇宙線: p, He, ..., Fe, e<sup>-</sup>, e<sup>+</sup>,  $\bar{p}$ , ...

$$dN_{\text{CR } p}/dE \propto E^{-2.7}, \quad N_{\text{CR } e^-}/dE \propto E^{-3.1},$$

## 標準モデル

CR nuclei と CR e<sup>-</sup> の起源は超新星残骸(SNR)

加速機構は衝撃波統計加速(DSA)       $dN/dE \propto E^{-s}$       (s=2)

SNRがなくなるとときCRはSNRから解放       $dN_s/dE \propto E^{-s}$       (s=2)

s はCRの種類によらない

$D_{xx} \propto E^\delta$ で銀河内を拡散的に伝播して(Leaky box model)

$$dN_{\text{CR } p}/dE \propto E^{-(s+\delta)}, \quad dN_{\text{CR } e^-}/dE \propto E^{-(s+(1+\delta)/2)}$$

$$s+\delta = 2.7, \quad s = 2 \rightarrow \delta = 0.7$$



# 銀河宇宙線の起源

起源は超新星残骸(SNR) ← ガンマ線の観測から...(田中さんの発表)

SNRは、Type Ia SN と重力崩壊型SNの2つの起源がある  
( type Ib/c, type IIp, type IIb, ...)

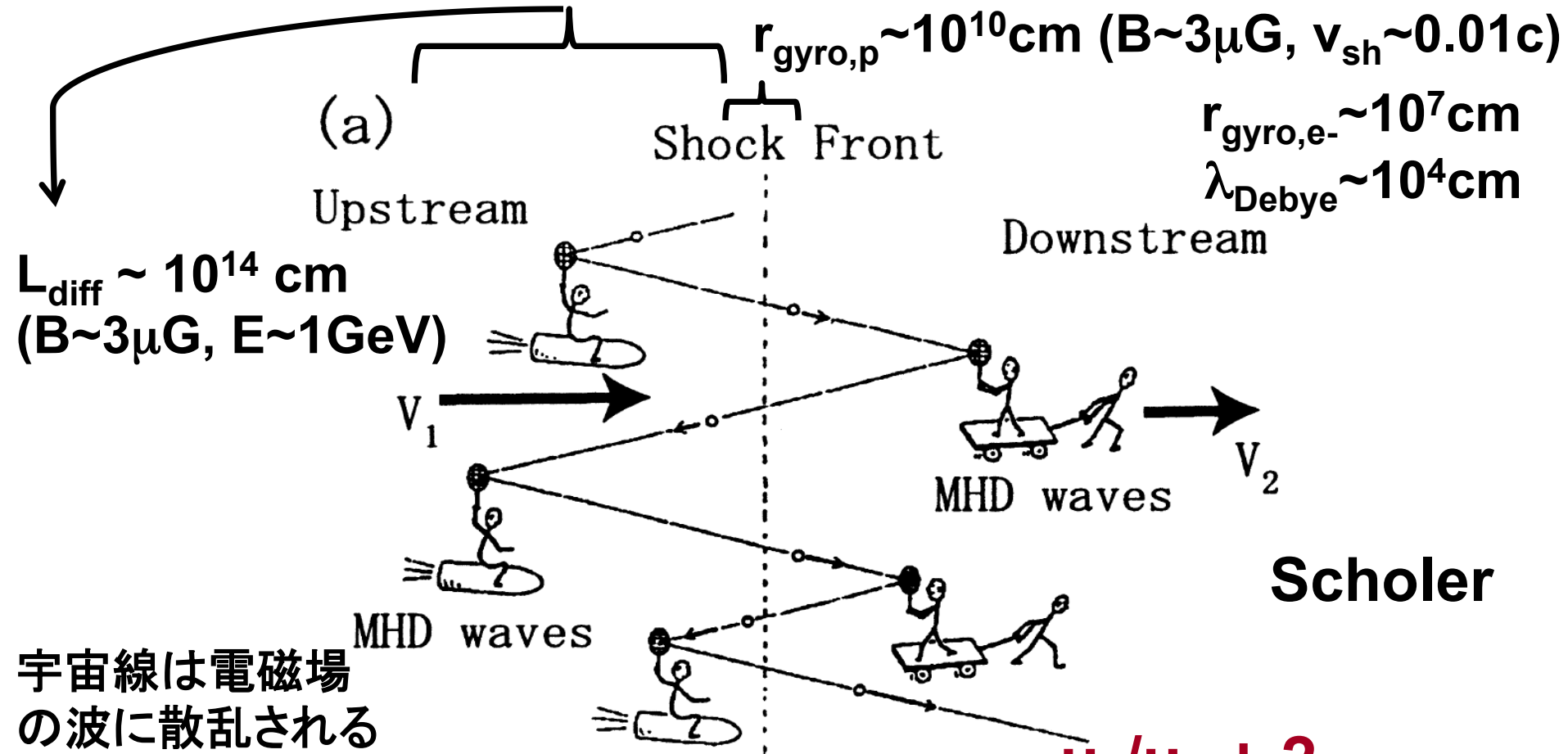
どのType のSNRがどのCRをどれだけ作るか？ → 謎

SNRのX線観測では、どちらのTypeも電子を  
少なくともTeVまでは加速している。

Ejecta を伝播するreverse shock？ → 謎  
ISM or CSMを伝搬するforward shock？

SNRのX線観測では、Reverse shockでの  
TeV電子加速は、Cas A だけ

# Diffusive Shock Acceleration(DSA)



宇宙線は電磁場の波に散乱される

宇宙線は電磁場を励起する。

$$dN/dE \propto E^{-s} \quad s = \frac{u_1/u_2 + 2}{u_1/u_2 - 1} = 2$$

Axford 1977, Krymsky 1977, Blandford&Ostriker 1978, Bell 1978

# 磁場中の荷電粒子の運動

そろった磁場 ( $r_g \ll \lambda_{\delta B}$ )  $\rightarrow$  螺旋運動  $\rightarrow$  磁場に束縛

乱れた磁場 ( $r_g \sim \lambda_{\delta B}$ )  $\rightarrow$  複雑な軌道

$$r_g = cP/eB$$

磁場の乱れがランダム位相  $\rightarrow$  拡散運動と見なせる

$$\langle (\Delta x)^2 \rangle \sim D_{xx} t, \quad D_{xx} \sim v^2 \tau_{sc} \sim v l_{mfp}, \quad l_{mfp} = \eta r_g$$

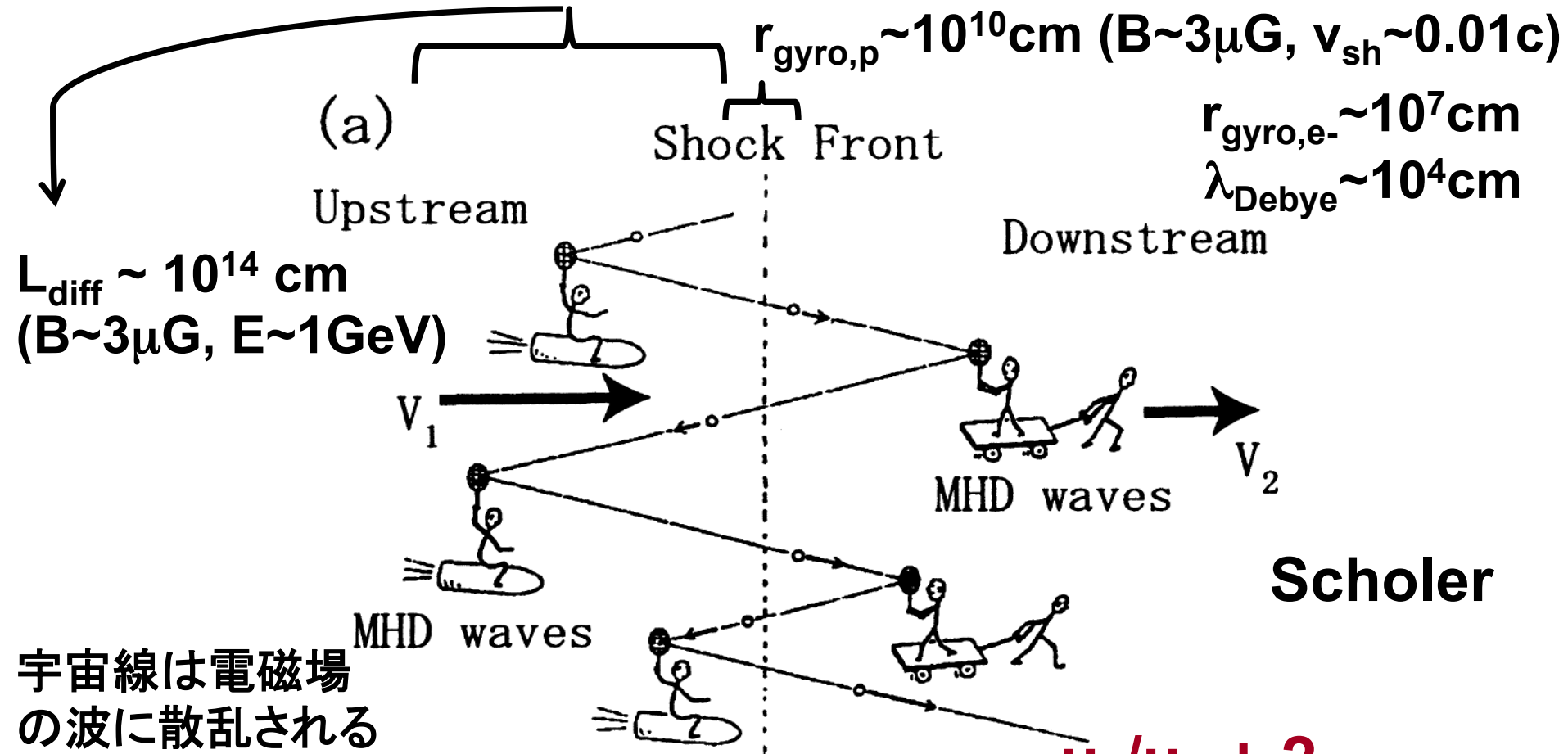
$$\eta = (B_0 / \delta B_k)^2$$

距離Lだけ広がるのにかかる時間  $t_{diff} \sim L^2 / D_{xx}$

磁場の乱れに位相の相関あり  $\rightarrow$  拡散運動と見なせない

$$\langle (\Delta x)^2 \rangle \propto t^\alpha \quad (\alpha \neq 1)$$

# Diffusive Shock Acceleration(DSA)



宇宙線は電磁場の波に散乱される

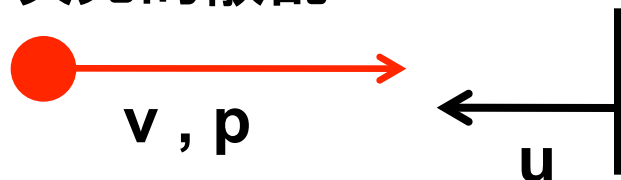
宇宙線は電磁場を励起する。

$$dN/dE \propto E^{-s} \quad s = \frac{u_1/u_2 + 2}{u_1/u_2 - 1} = 2$$

Axford 1977, Krymsky 1977, Blandford&Ostriker 1978, Bell 1978

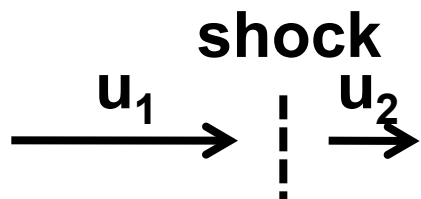
# ベキ型分布

粒子と壁の1次元散乱



散乱後  $\Delta p = 2 \frac{u}{v} p$

Shock の場合



壁に相当する散乱体は電磁場の波  
(プラズマ波動、MHD wave)

$$\frac{\Delta p}{p} = \delta = \frac{4(u_1 - u_2)}{3v} \xrightarrow{n \text{ 回往復}} p_n = p_0(1 + \delta)^n \sim \exp(n\delta)$$

上流から拡散的(等方的)に下流に入るCR flux:  $n_{CR} v/4$

十分下流に流れるCR flux:  $n_{CR} u_2$

下流に流れる確率:  $P_{esc} = 4u_2/v$ 、上流に戻る確率:  $P_{ret} = 1 - P_{esc}$

$$N(>p_n) \propto (1 - P_{esc})^n \sim \exp(-nP_{esc}) \propto p_n^{-3u_2/(u_1-u_2)}$$

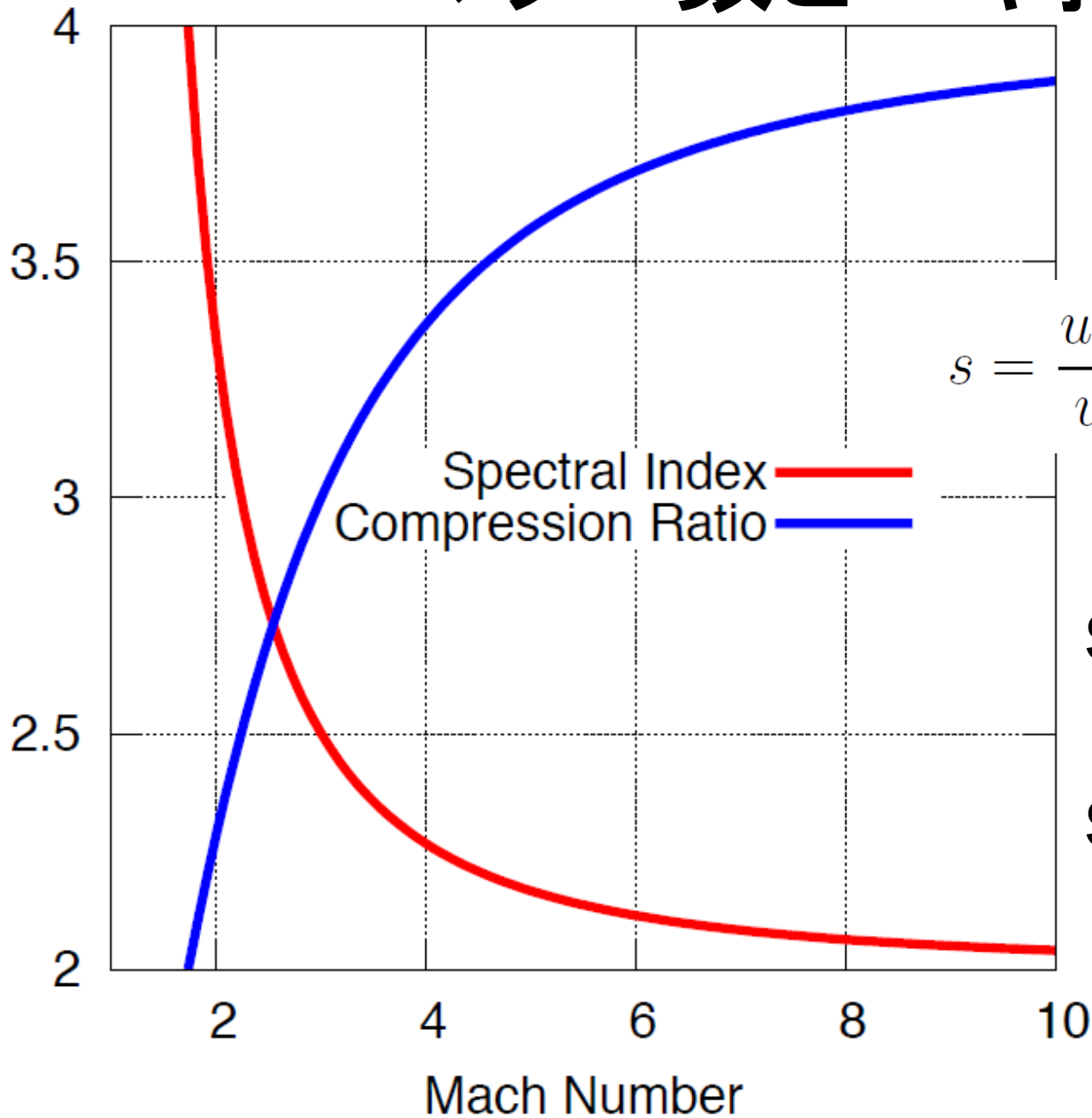
$$f(p)dp \propto dN(>p)/dp \propto p^{-s}$$

$$s = \frac{u_1/u_2 + 2}{u_1/u_2 - 1} \xrightarrow{u_1/u_2=4} 2$$

スペクトルは、粒子の種類によらない



# マッハ数とベキ指数



$$dN/dE \propto E^{-s}$$

$$s = \frac{u_1 + 2u_2}{u_1 - u_2} = 2 \frac{1 + M^{-2}}{1 - M^{-2}}$$

$$s \sim 2.0 \quad (M > 10)$$

$$s \sim 2.3 \rightarrow M \sim 4$$

# 銀河内の宇宙線の拡散

加速源から解放された宇宙線は、銀河内を拡散しながら地球に届く



銀河の外は磁場が急に弱くなって、一度銀河の外に出た宇宙線は二度と戻ってこない (Leaky box)

$$\frac{d^2 N_{\text{CR}}}{dt dE} = - \frac{dN_{\text{CR}}/dE}{t_{\text{esc}}(E)} + Q_{\text{sour}}(E) \xrightarrow{\text{定常}} \frac{dN_{\text{CR}}}{dE} = t_{\text{esc}}(E) Q_{\text{sour}}(E)$$

$$t_{\text{esc}}(E) = L_{\text{size}}^2 / D_{\text{diff}}(E)$$

$$D_{\text{diff}}(E) \propto E^\delta$$

$$Q_{\text{sour}}(E) \propto E^{-s}$$

$$\frac{dN_{\text{CR}}}{dE} \propto E^{-(s+\delta)}$$

# B/C, Be<sup>10</sup>/Be<sup>9</sup>

加速された宇宙線の C が、ガス中の陽子と原子核の衝突をすることで、宇宙線の B が作られる

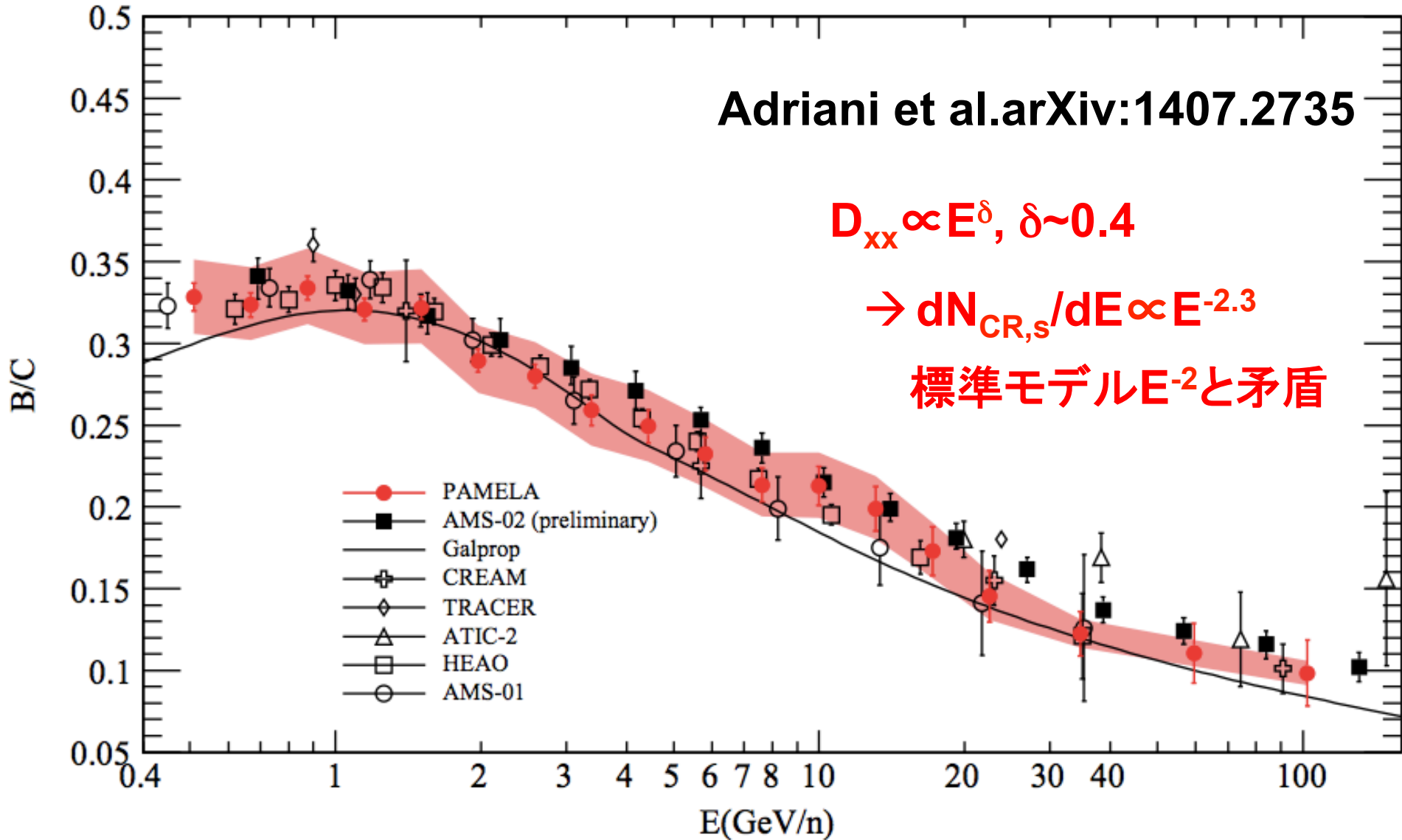
星間ガスや星の中では、Bはほとんどないので、直接 B が加速されることは考えなくてよい

銀河内に長時間滞在するほど、C → B の反応が生じる

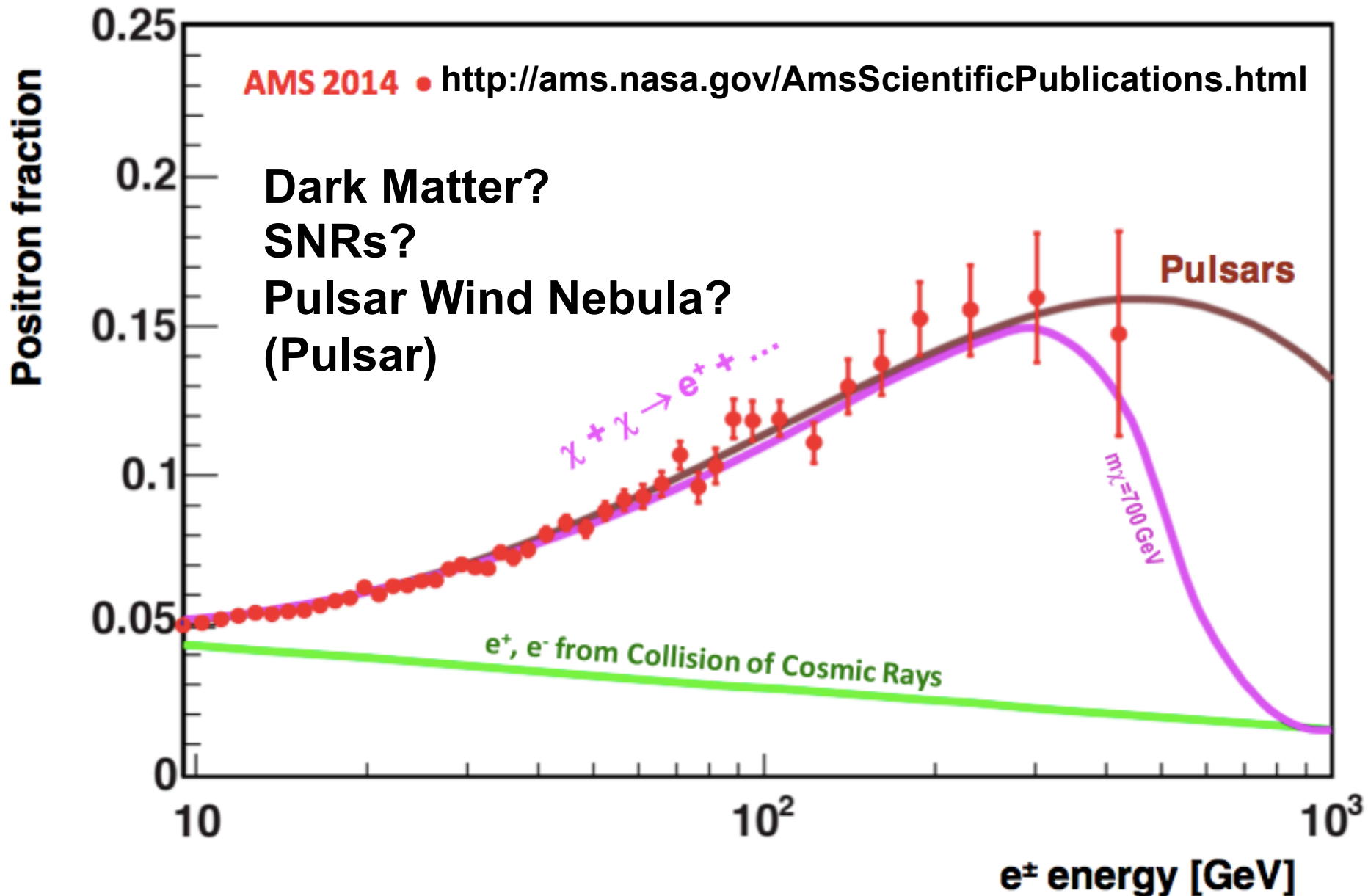
→ 宇宙線 B と宇宙線 C の比のエネルギー依存性は、滞在時間  $L^2/D$  のエネルギー依存性を教えてくれる。

→ Be<sup>10</sup>は不安定。Be<sup>10</sup>/Be<sup>9</sup>のエネルギー依存性も、滞在時間  $L^2/D$  のエネルギー依存性を教えてくれる。

# B/Cの最新の観測結果



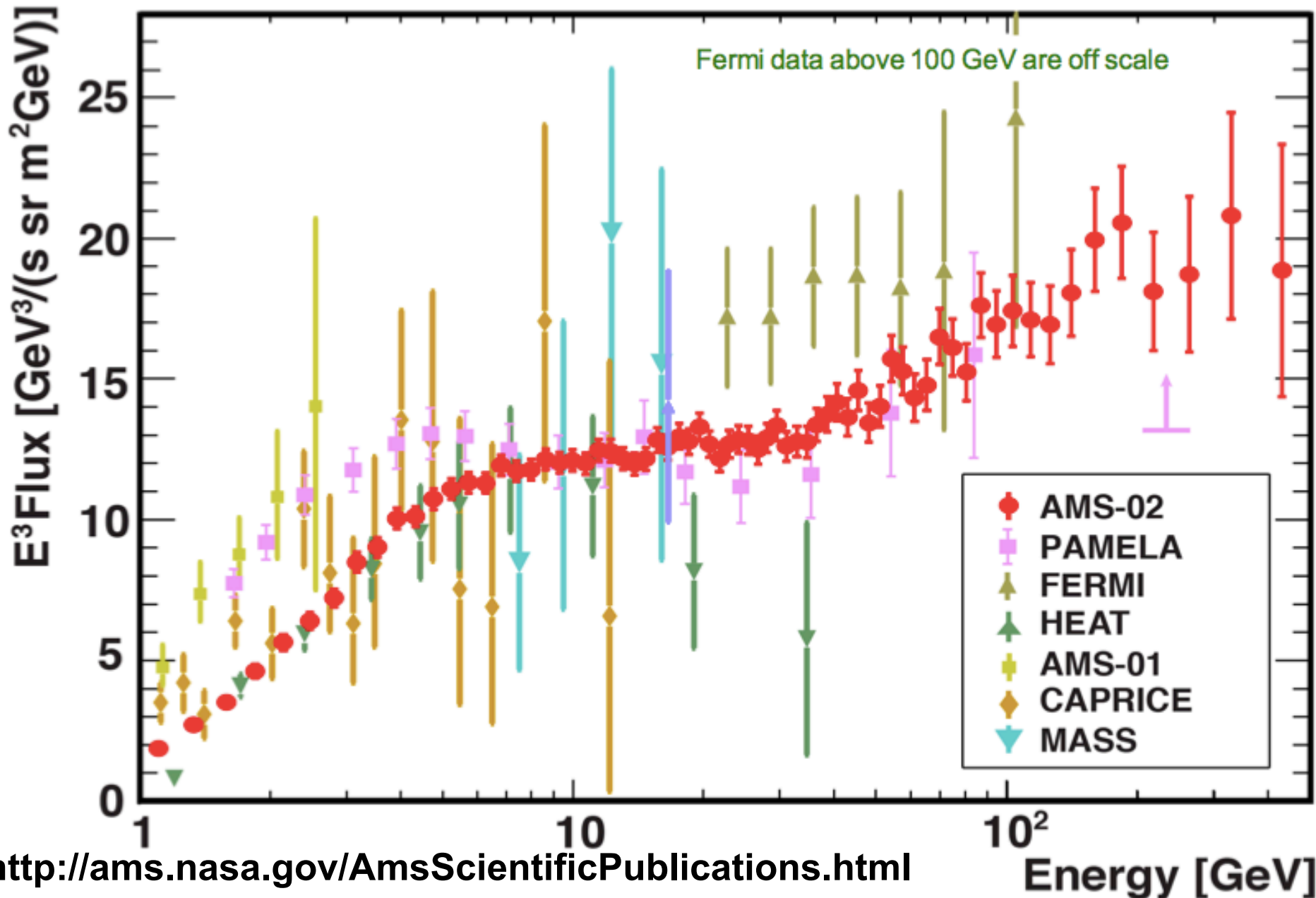
# New Positron Fraction results compared with models





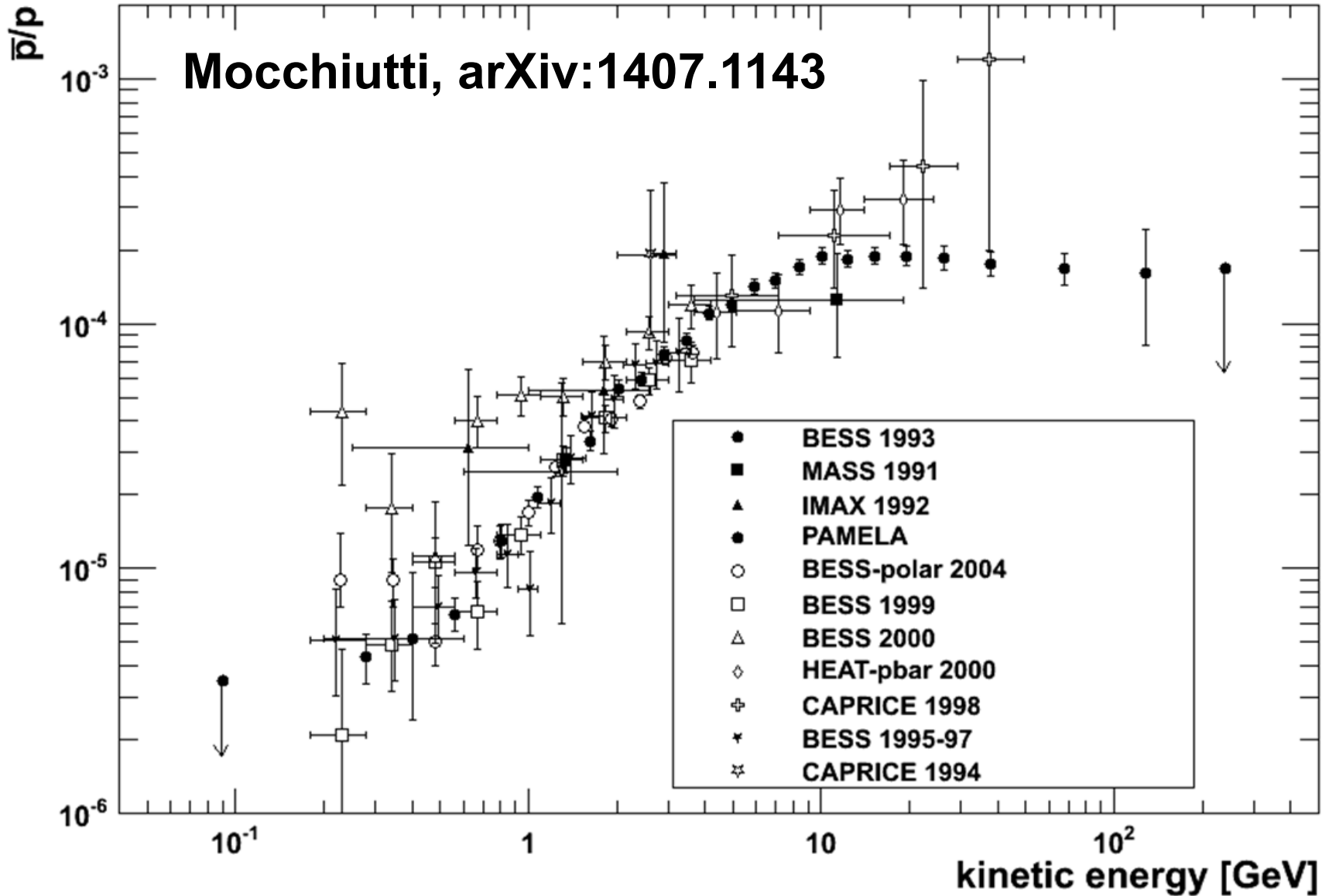
# AMS Positron Flux Data

Comparison with early work

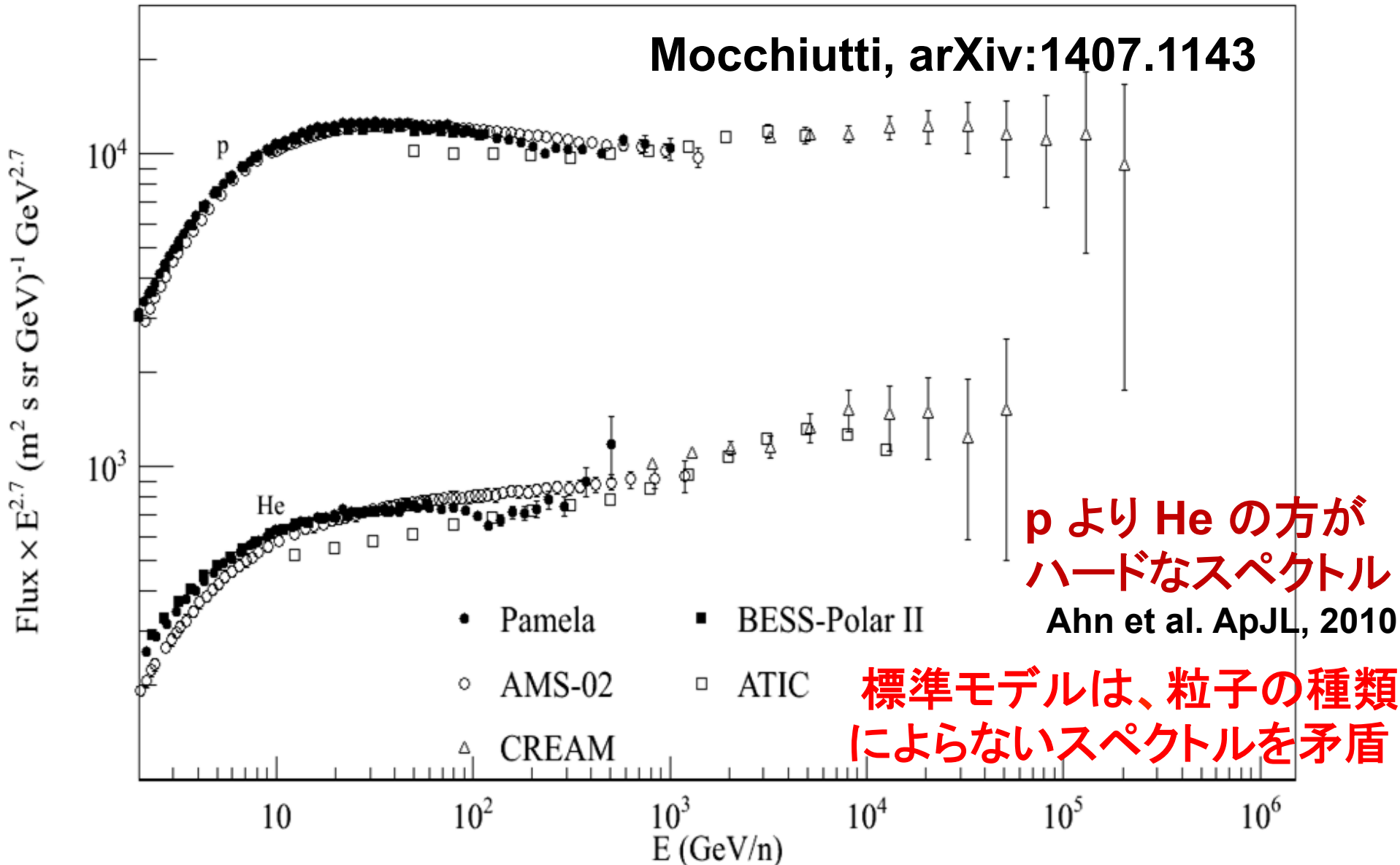


# $\bar{p}/p$

Mocchiutti, arXiv:1407.1143



# 最近の宇宙線の観測



# Galactic CR $e^-$ のスペクトル

$$\frac{\partial}{\partial t} f - \nabla D \nabla f + \frac{\partial}{\partial E} (\dot{E} f) = q_{\text{sour}}(E, x, y, z, t) = q_{\text{sour}}(E) \delta(z)$$

銀河面内に広がっている源

CR nuclei とは違い、CR  $e^-$  は銀河から逃げる前に冷える

→ 銀河からの逃走でスペクトルが決まるわけではない。

$$\frac{d^2 N_e}{dE dt} = - \frac{dN_e/dE}{t_{\text{cool}}(E)} + \underbrace{Q_{\text{sour}}(E)}_{\text{定常}} \longrightarrow dN_e/dE = t_{\text{cool}}(E) Q_{\text{sour}}(E)$$

定義：地球に寄与する源

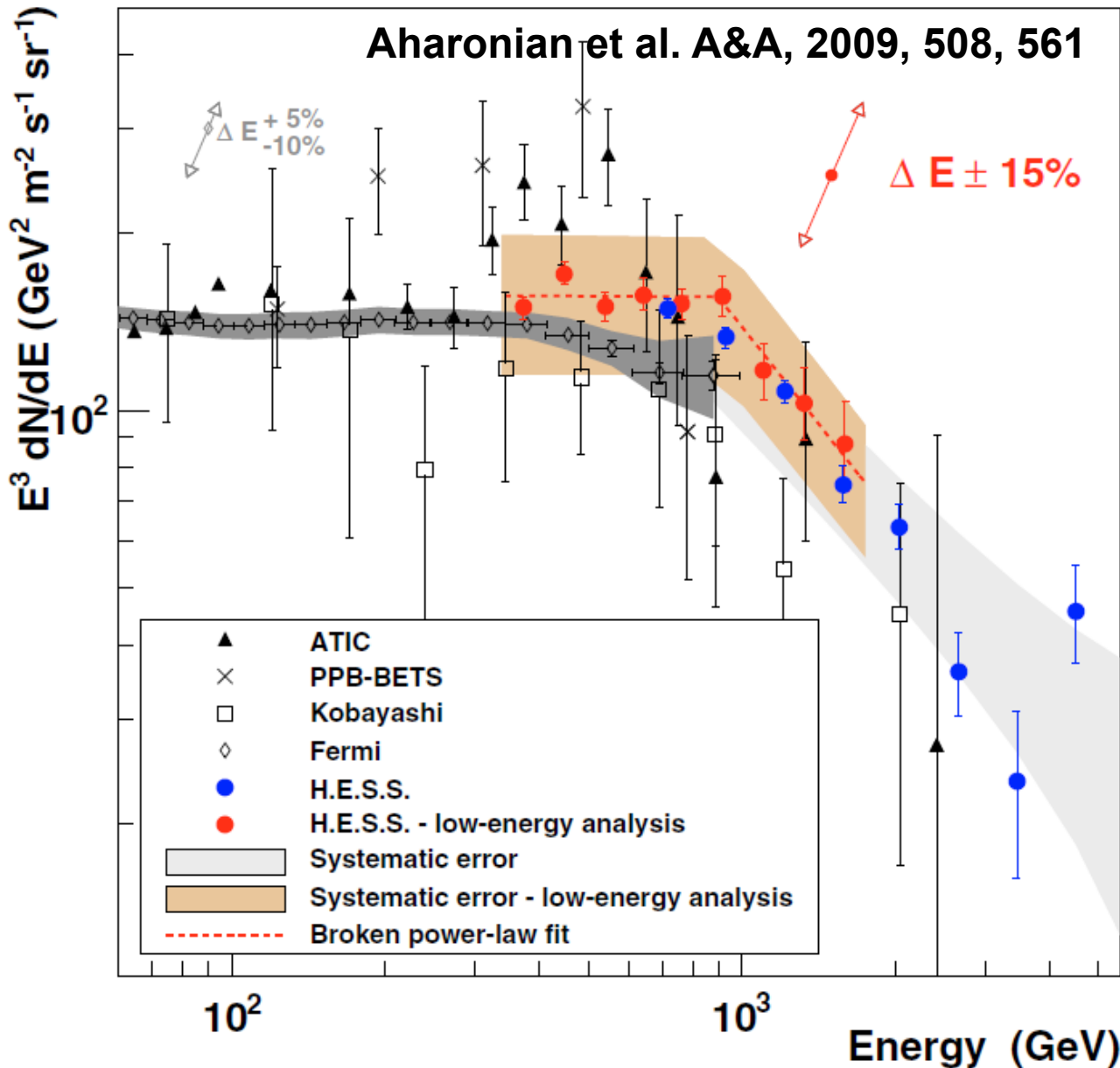
$$R_d \propto \{D_{\text{diff}}(E) t_{\text{cool}}(E)\}^{1/2}, D_{\text{diff}}(E) \propto E^\delta, t_{\text{cool}}(E) \propto E^{-1}, q_{\text{sour}}(E) \propto E^{-s}$$

$$Q_{\text{sour}}(E) \propto R_d^2 \times \frac{q_{\text{sour}}(E)}{R_d^3} \propto E^{-\{s+0.5(\delta-1)\}} \rightarrow \frac{dN_e}{dE} \propto E^{-\{s+0.5(\delta+1)\}}$$

$$\text{B/C観測 } \gamma \sim 0.4, s + 0.5(\delta+1) = 3.1 \rightarrow s \sim 2.4 \sim s_{\text{proton}}$$

$s < 3$  より、SNRで冷却が効いてはだめ → 長時間の閉じ込めはだめ

# 最近の宇宙線電子陽電子の観測



CR  $e^-$  spectrum

$$dN_e/dE \propto E^{-3.1}$$

折れ曲がり  
カットオフ

$$E_b \sim \text{TeV.}$$

CR p spectrum

$$dN/dE \propto E^{-2.75}$$

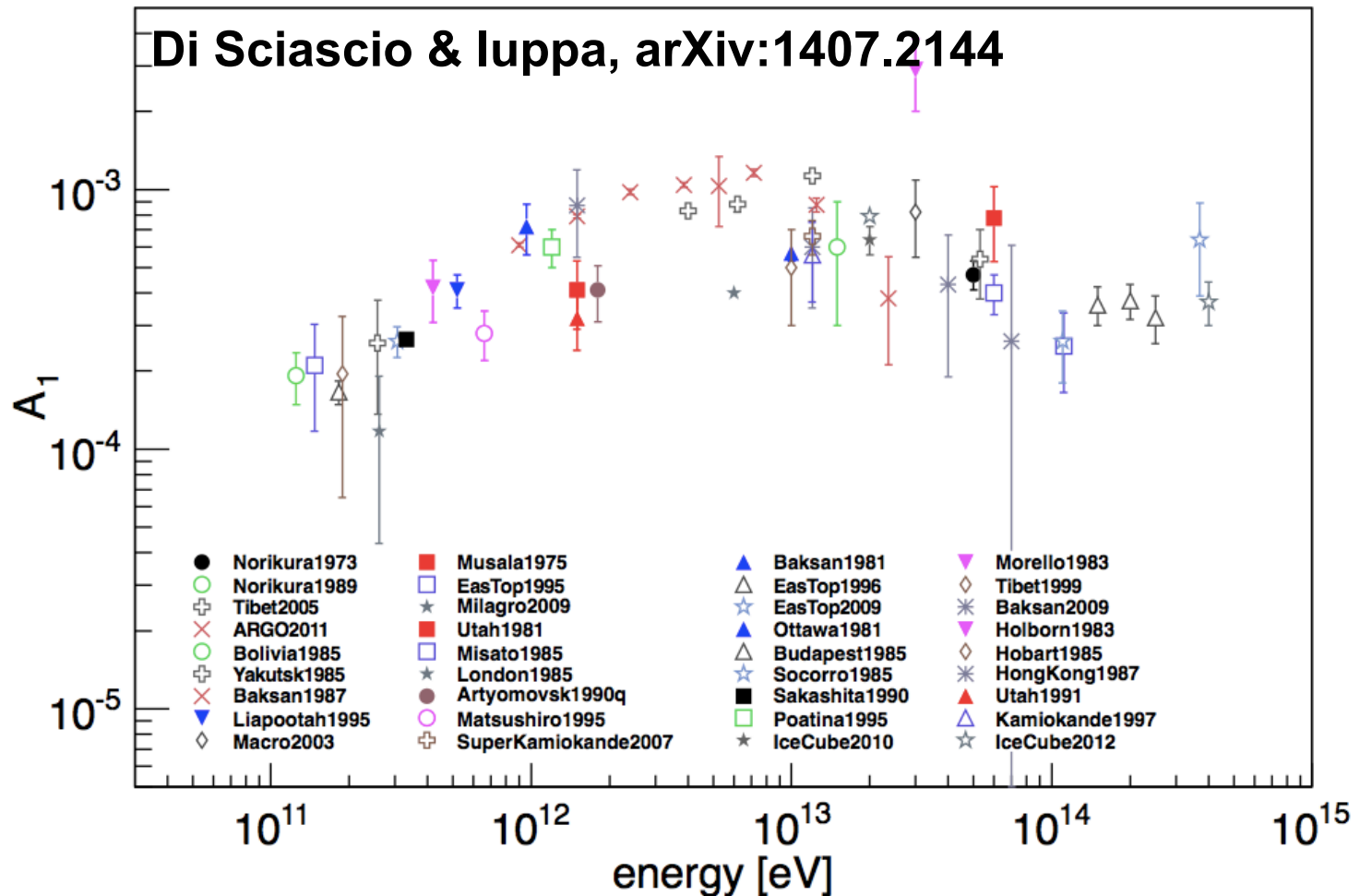
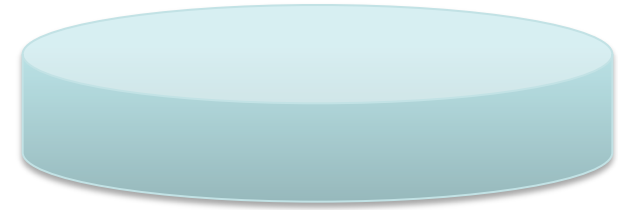
折れ曲がり  
カットオフ

$$E_b \sim \text{PeV.}$$

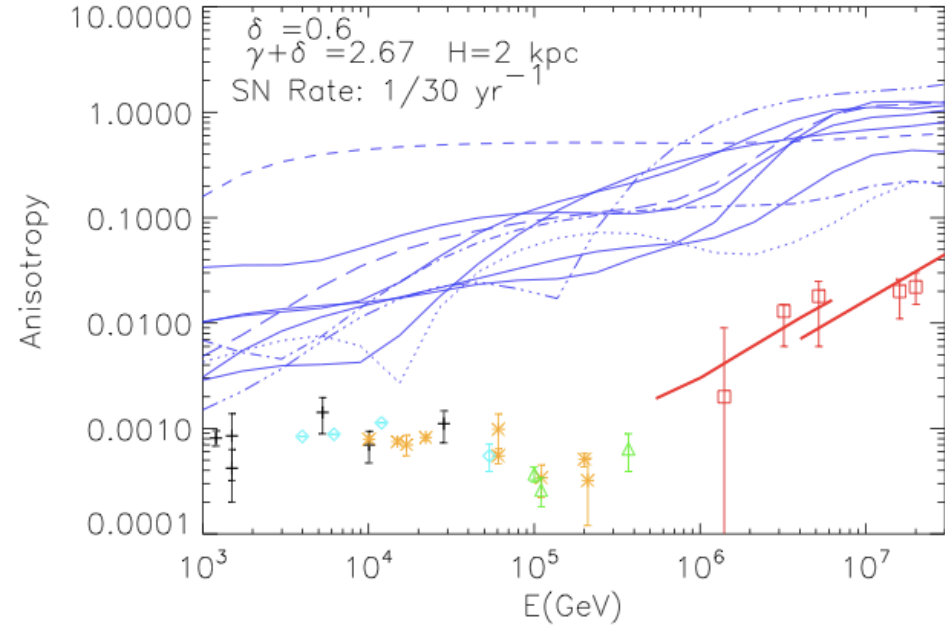
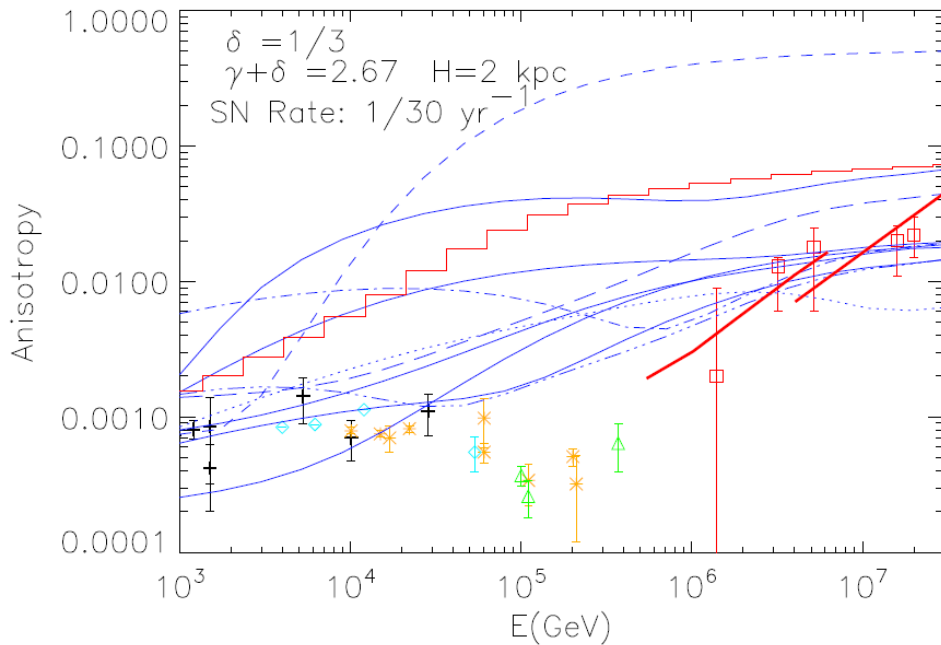


# 宇宙線の非等方性

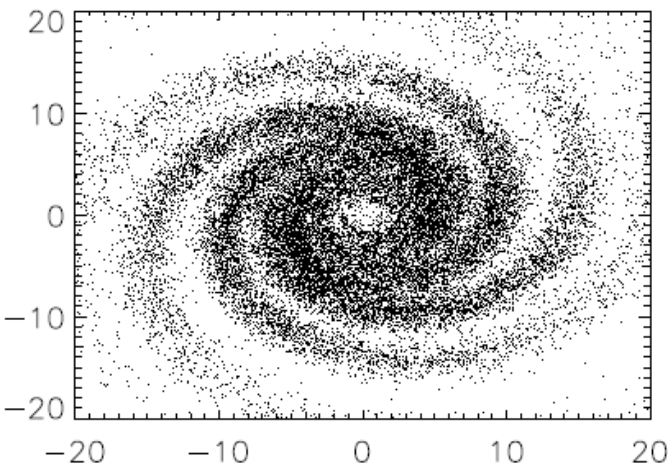
$$\delta_{\vec{x}} = \frac{3D(E)}{c} \frac{\nabla_{\vec{x}} n_{CR}(E, \vec{r}, t)}{n_{CR}}$$



# 宇宙線の非等方性



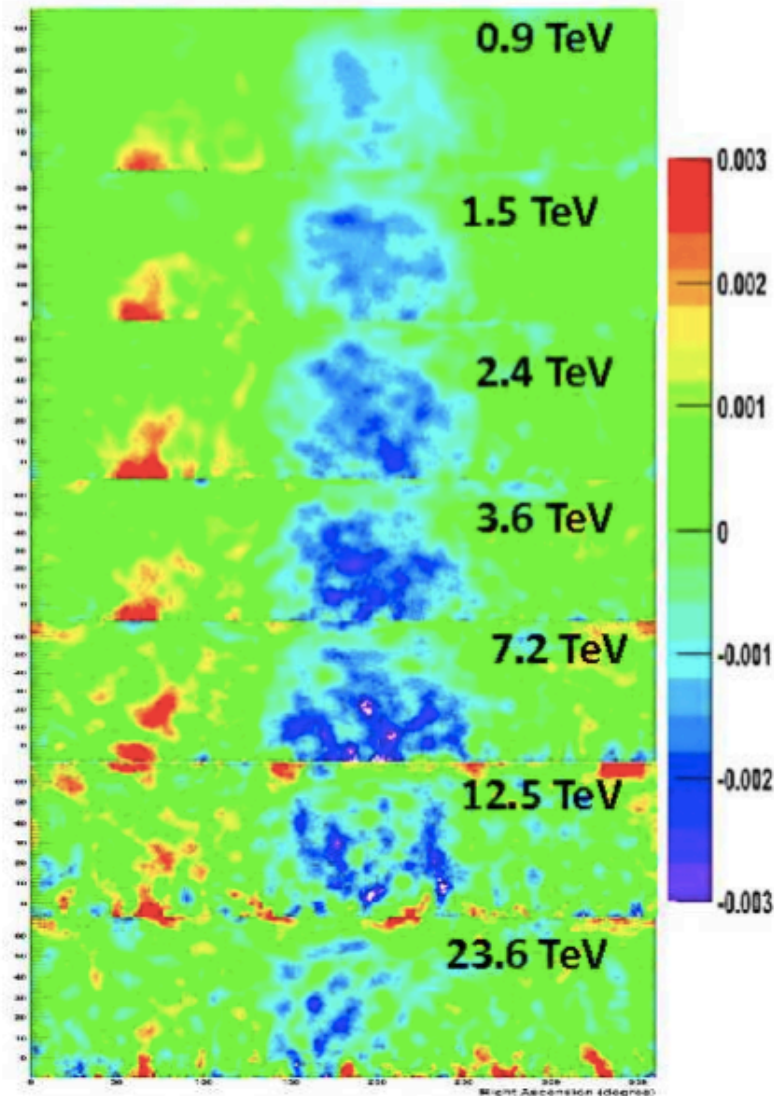
観測値は一様なCR源の理論予想より小さい Blasi & Amato, JCAP, 2012



$D_{xx} \propto E^{-\delta}$ ,  $\delta=0.6$  は観測と矛盾  
非一様なCR源で、 $\delta=0.3$ は問題ない？

$$\delta_{\vec{x}} = \frac{3D(E)}{c} \frac{\nabla_{\vec{x}} n_{CR}(E, \vec{r}, t)}{n_{CR}}$$

# 宇宙線の非等方性(ARGO-YBG)



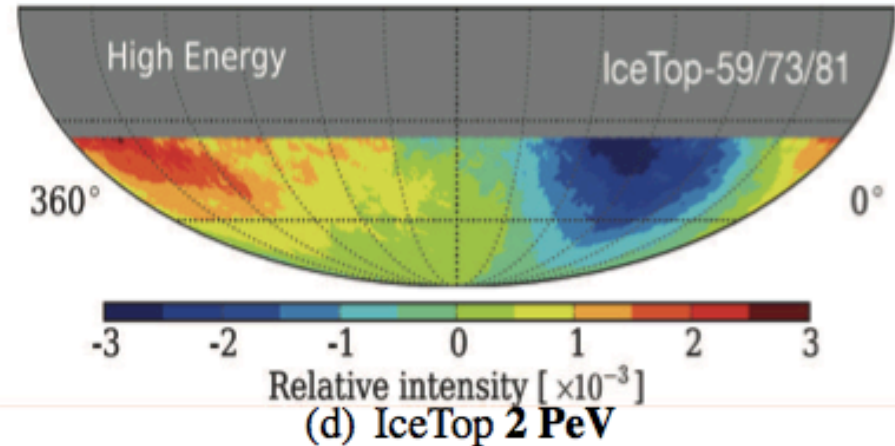
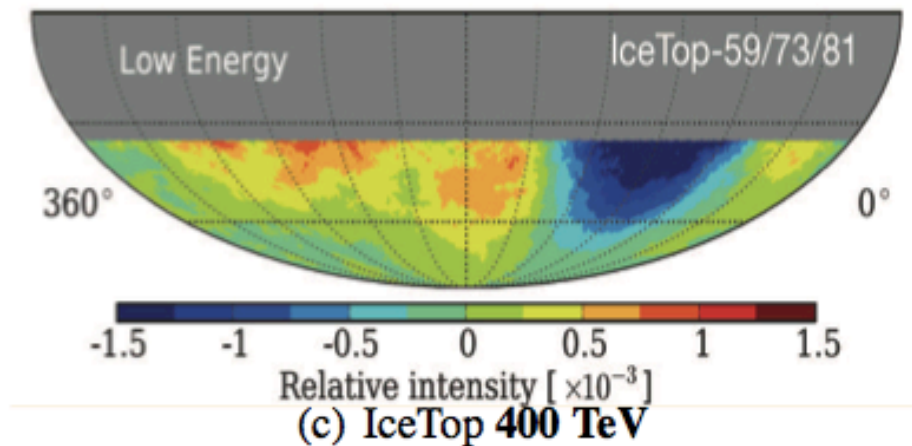
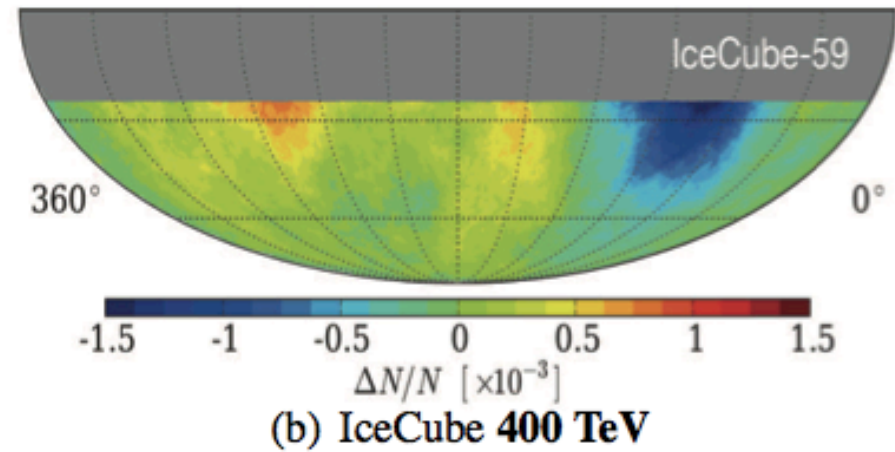
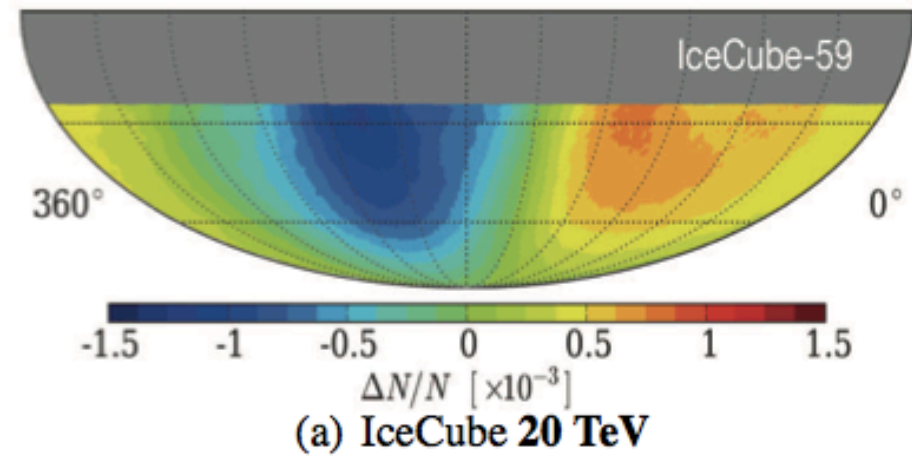
ARGO-YBJ

Cui et al., ICRC, 2011

~10°スケールの揺らぎ

Di Sciascio & Iuppa, arXiv:1407.2144

# 宇宙線の非等方性(IceCube,IceTop)

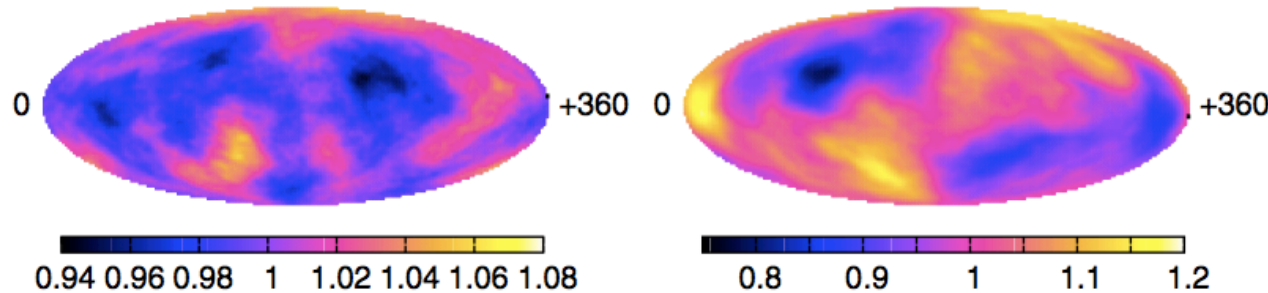


Abbasi et al., ApJ, 2012

Aartsen et al., ApJ 2013

Di Sciascio & Iuppa, arXiv:1407.2144

# ~10°スケールの非等方性の起源



Dipole anisotropy  
+  
Local B-field  
fluctuations

で説明可能

Giacinti&Sigl(2012)

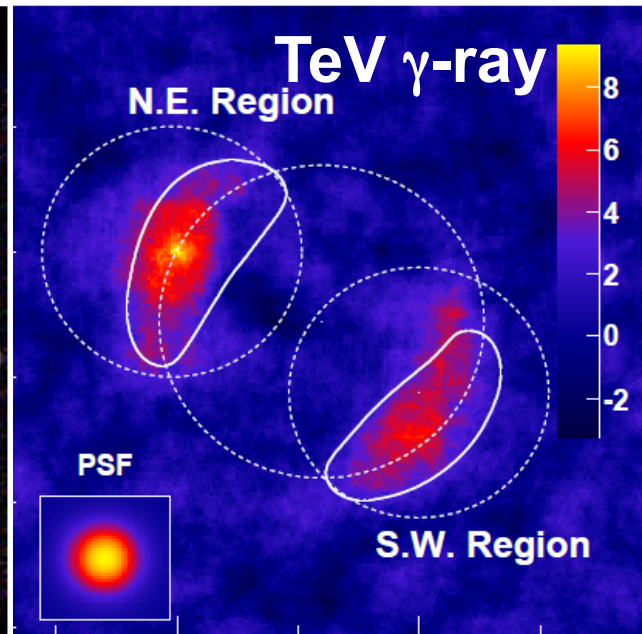
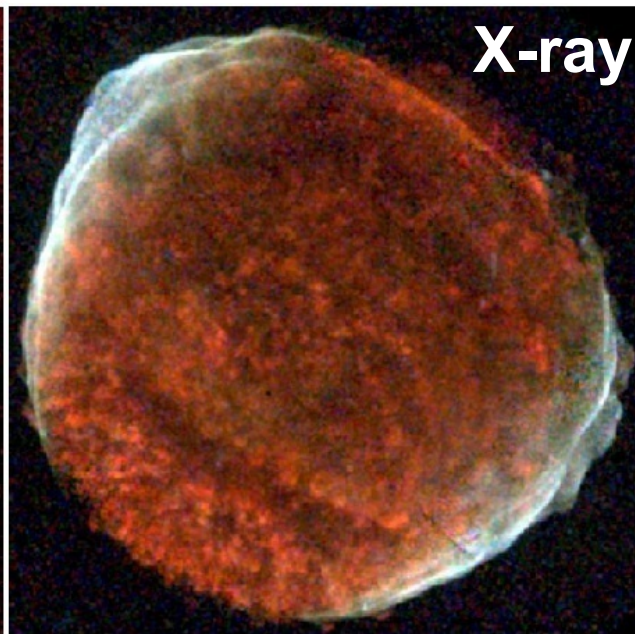
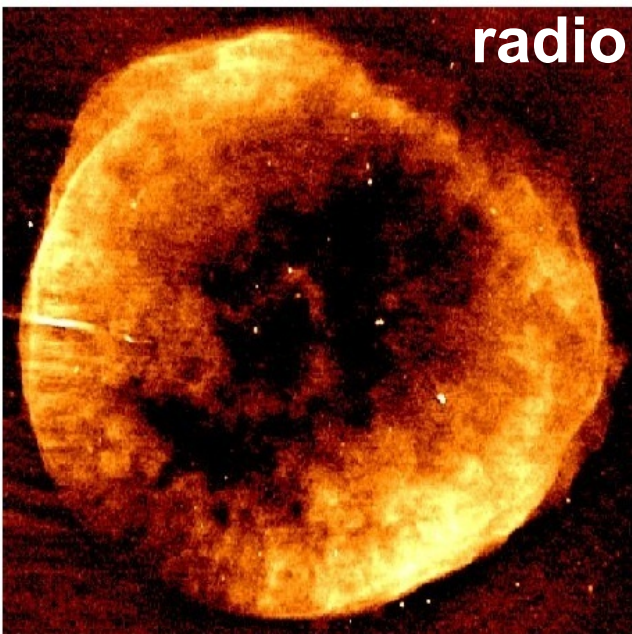
FIG. 1 (color online). Renormalized CR flux predicted at Earth for a concrete realization of the turbulent magnetic field, after subtracting the dipole and smoothing on  $20^\circ$  radius circles. Primaries with rigidities  $p/Z = 10^{16}$  eV (left panel) and  $5 \times 10^{16}$  eV (right panel). See text for the field parameters and boundary conditions on the sphere of radius  $R = 250$  pc.

地球磁気圏尾部で期待される  $100\text{AU} \times 1\text{nT} \times 10^6 \text{ cm/s} \sim 100\text{MV}$   
のポテンシャル差で、TeV粒子を加速 Drury, ICRC2013

Hotspot は地球磁気圏尾部→磁気再結合による粒子加速で  
TeV粒子を加速 Lazarian&Desiati(2010)

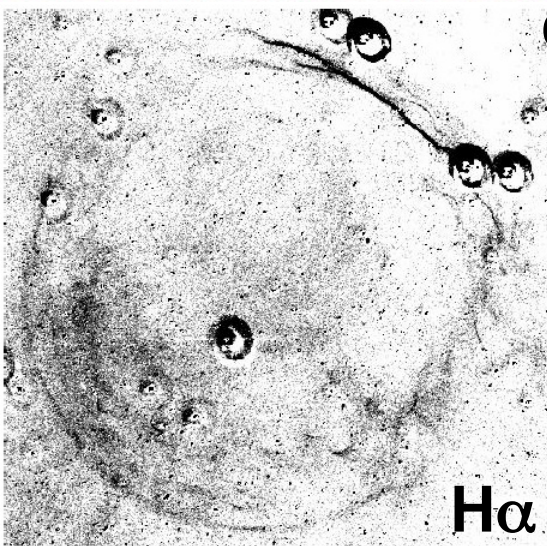


# 超新星残骸 (SNR) の観測



Cassam-Chennai et al. 2008

Acero et al. 2010



電波: 電子の GeV までの加速 ( $\sim 300$  SNRs)

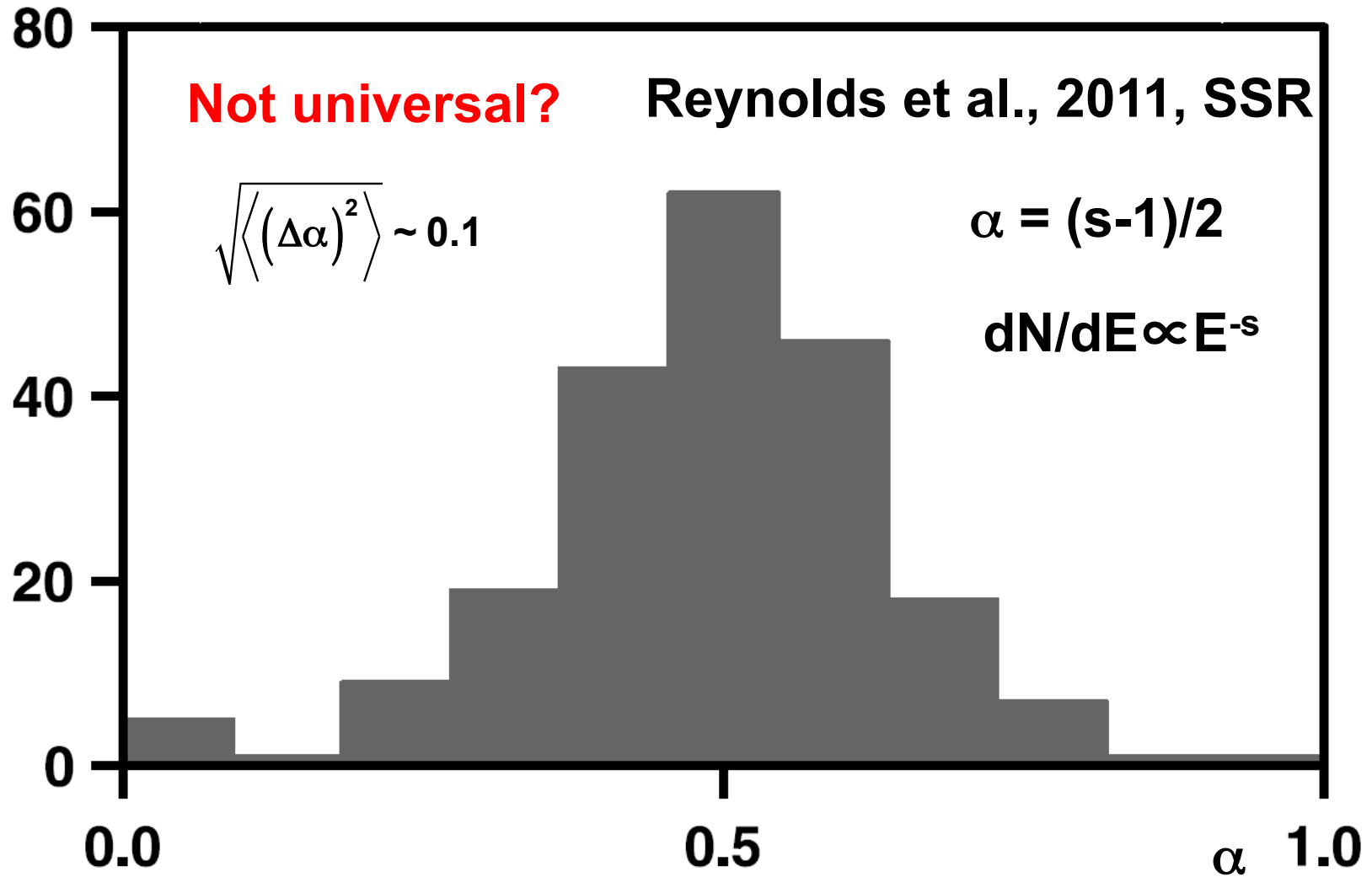
X線: 電子の TeV までの加速 ( $\sim 10$  SNRs)

GeV- $\gamma$ : 陽子の TeV までの加速 ( $\sim 10$  SNRs)

TeV- $\gamma$ : 電子 or 陽子の 10TeV までの加速 ( $\sim 10$  SNRs)

$E_{\max,p} \sim 10^{15.5}$  eV?,  $E_{CR} \sim 10^{50}$  erg/SN?  $\rightarrow$  謎

# Spectral index of radio synchrotron flux, $f_\nu \propto \nu^{-\alpha}$



標準加速理論(DSA)

$s = 2$  ( $\alpha = 0.5$ )

宇宙線の観測

$s_{\text{source}} \sim 2.4$  ( $\alpha \sim 0.7$ )

# Spectral index in Cas A (radio)

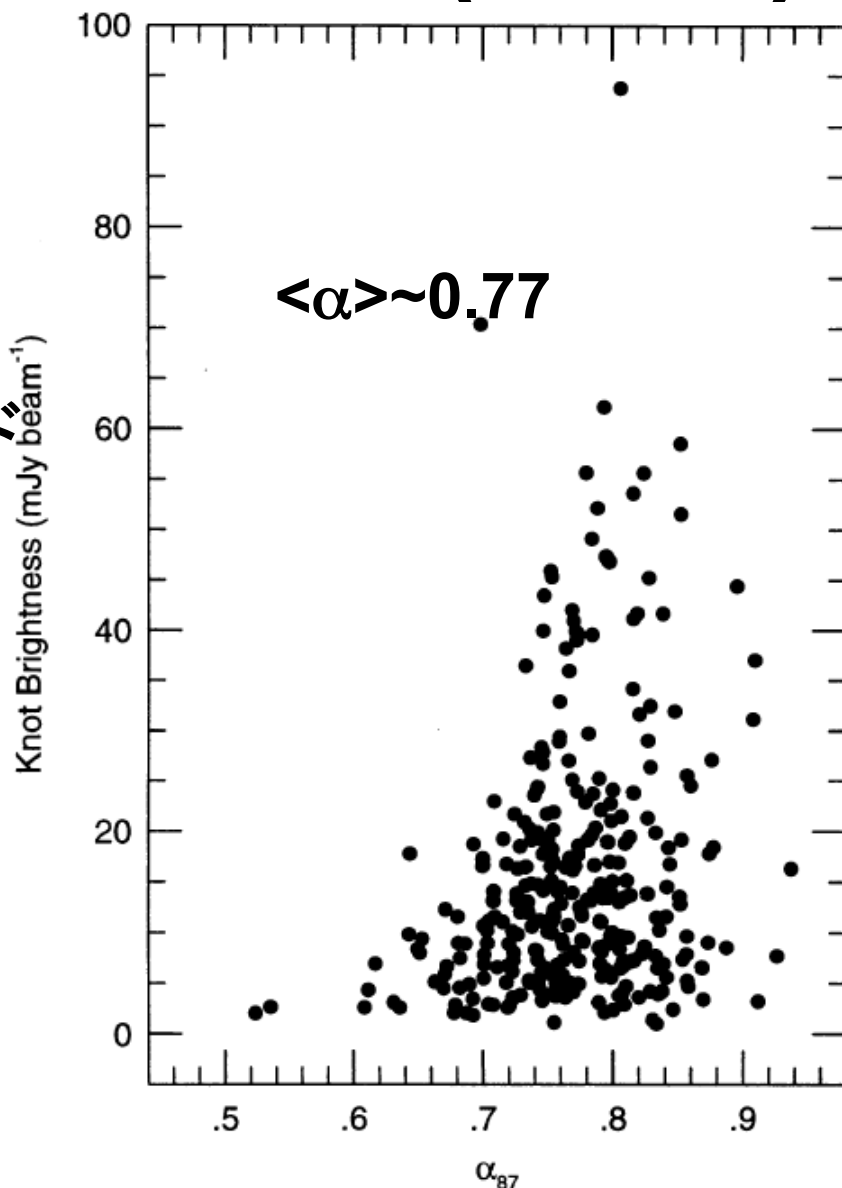
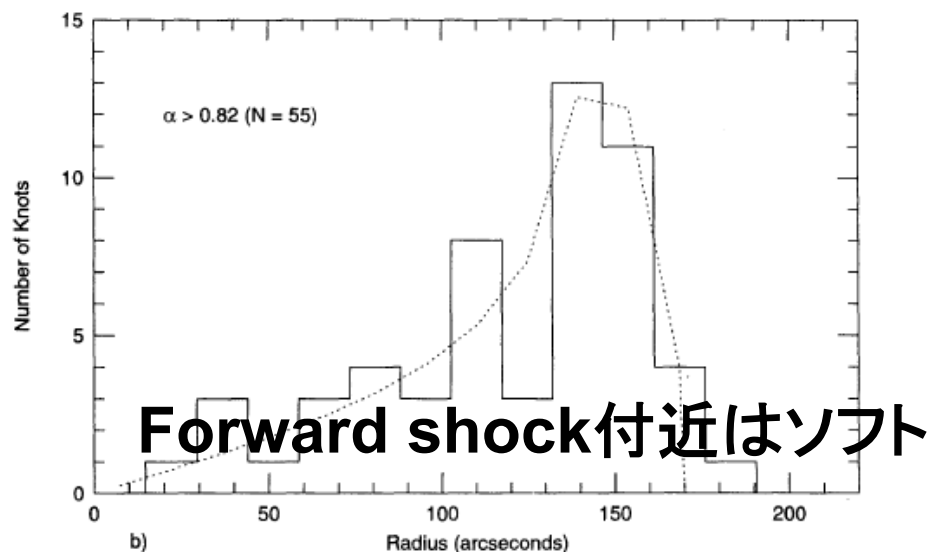
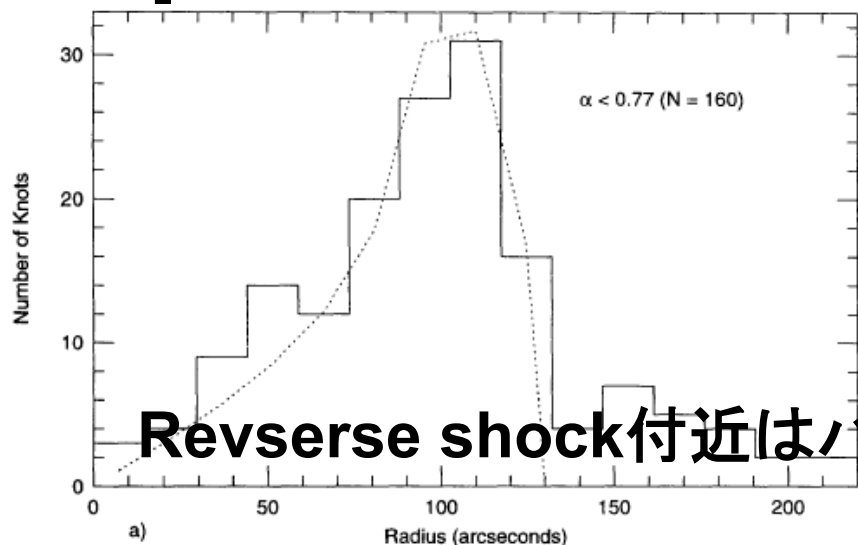


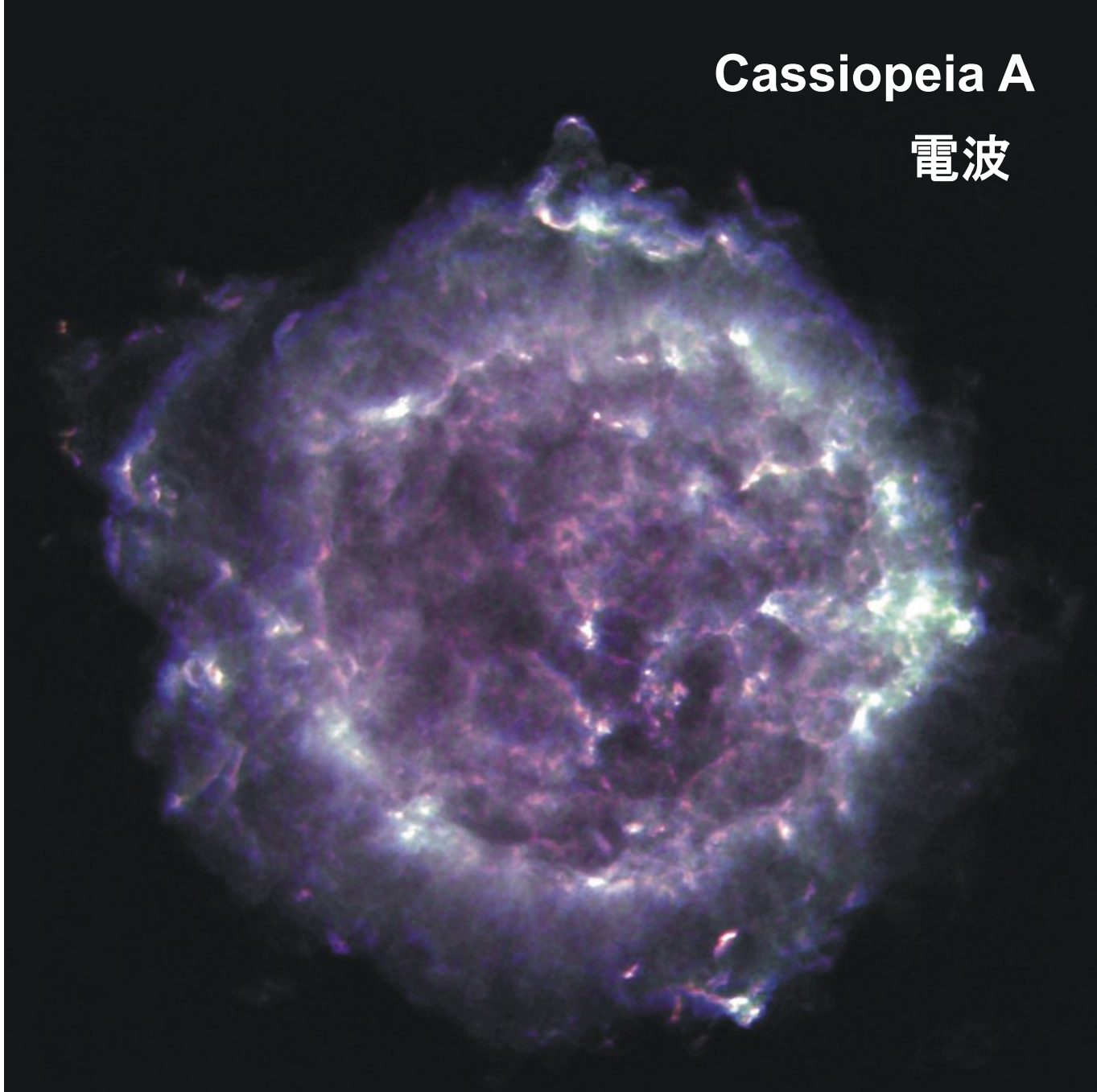
FIG. 4.—Histograms of projected radial position for (a) knots flatter than  $\alpha = 0.77$  and (b) knots steeper than  $\alpha = 0.82$ . Overlain in dotted lines, for comparison, are models of shells with uniform knot distributions and inner



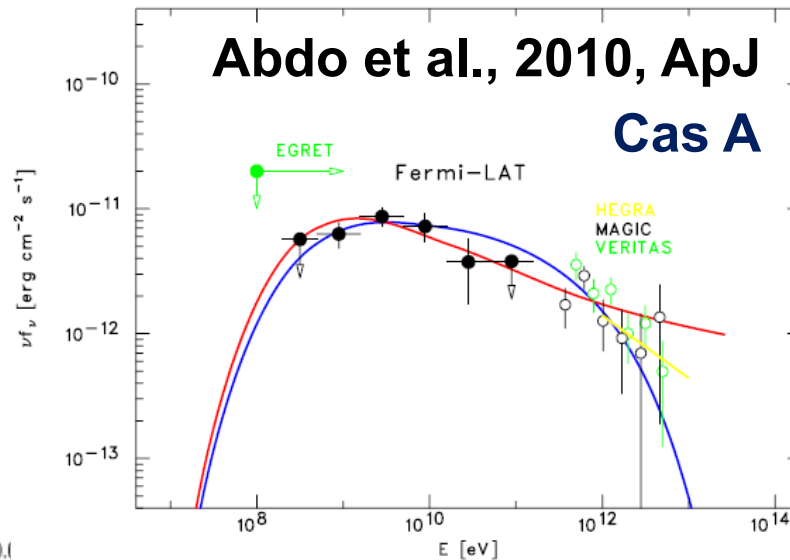
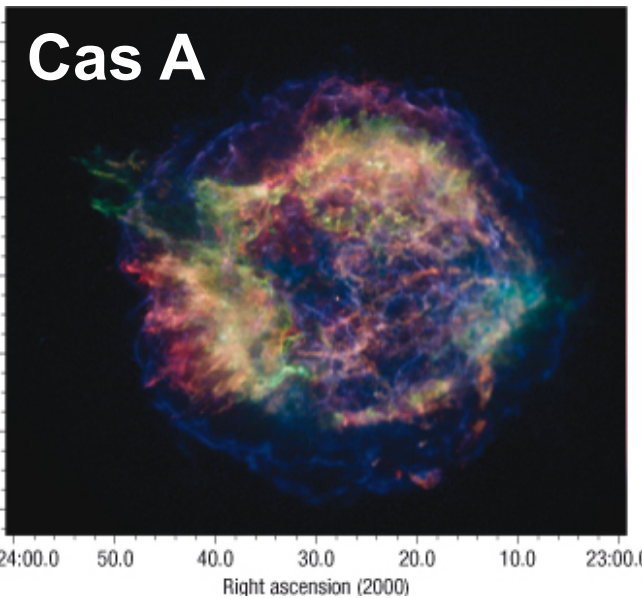
**Cassiopeia A**

**電波**

**Image courtesy of NRAO/AUI**



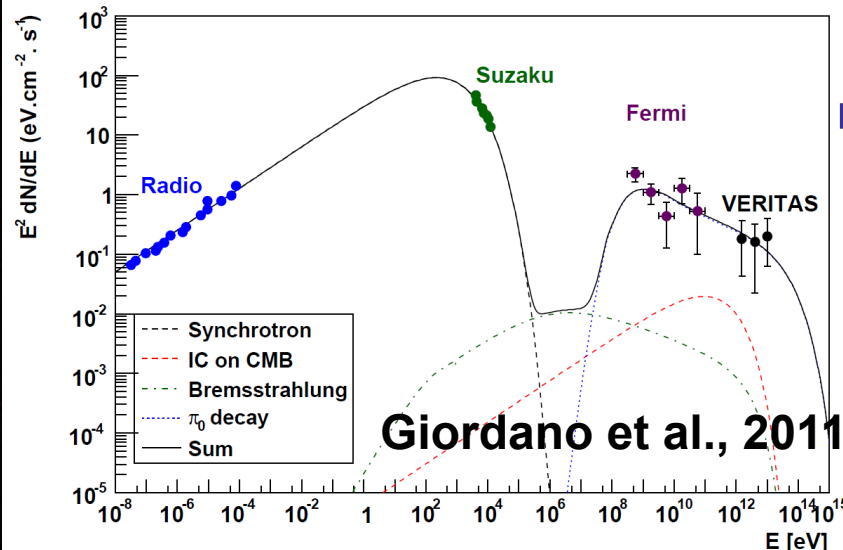
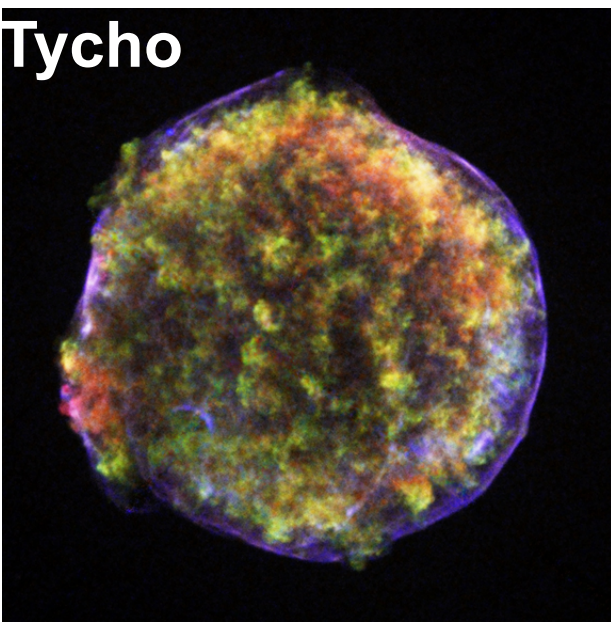
# Spectral index at the shock, $s$



$s = 2.1 - 2.3$

斜め衝撃波中の  
加速での非等方

Bell, Schure,  
Reville (2011)



$s = 2.1 - 2.3$

中性粒子の効果

Ohira et al., ApJL, 2009

Ohira&Takahara,  
ApJL, 2010

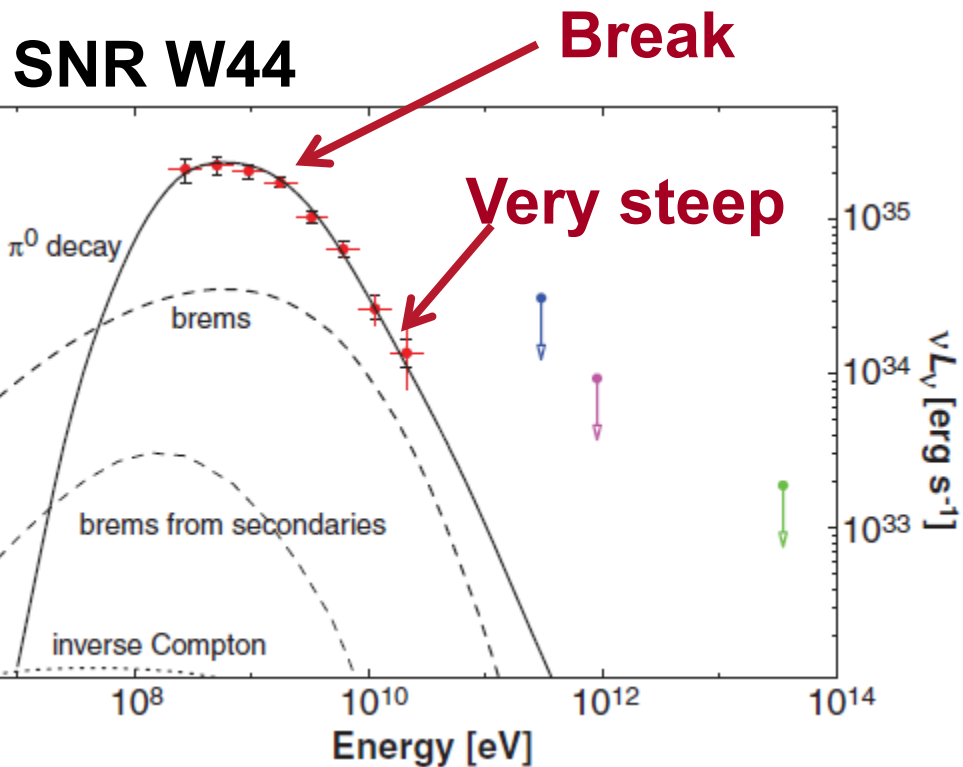
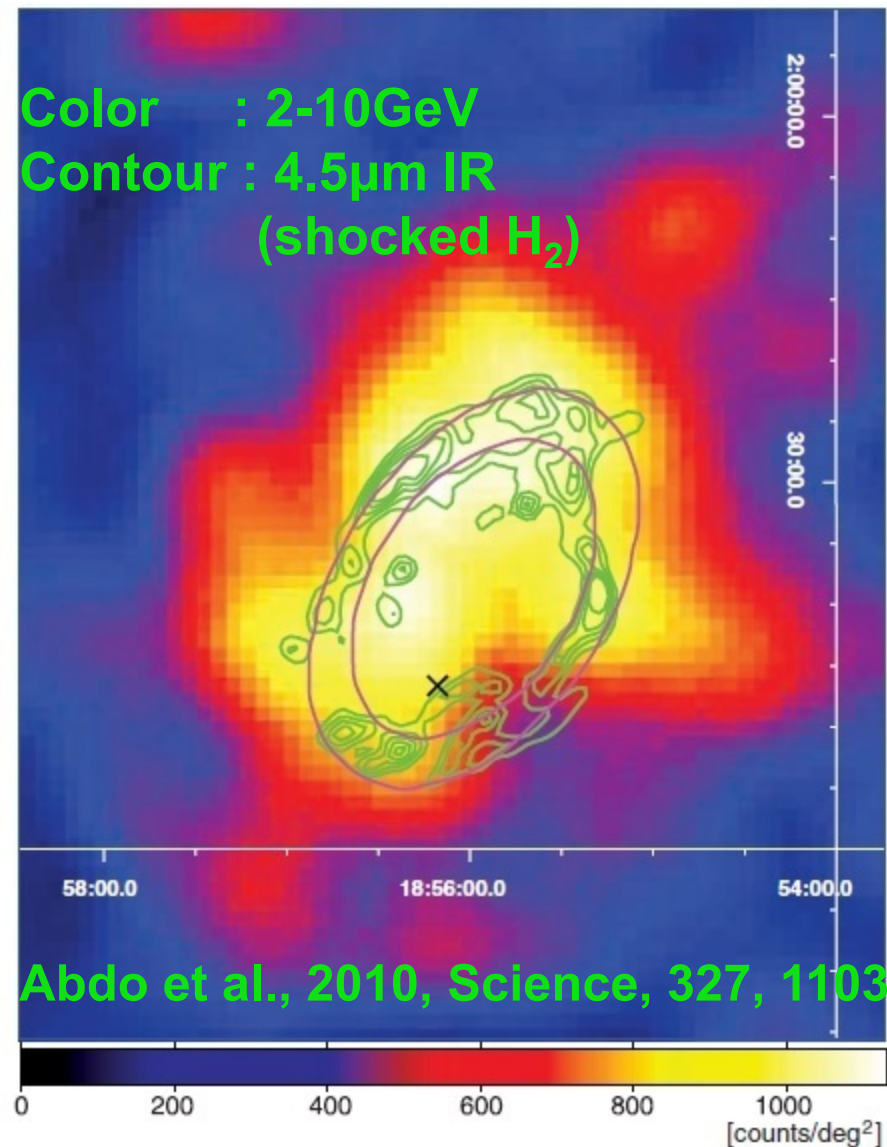
Ohira, ApJ, 2012

Blasi et al., ApJ, 2012

Ohira, PRL, 2013

$s > 2$

# Middle-aged ( $10^4$ yr) SNRs の観測



単純な1つのべき型関数でない  
とつてもソフト  $dN/dE \propto E^{-3}$

加速理論  $dN/dE \propto E^{-2}$   
宇宙線観測  $dN/dE \propto E^{-2.4}$  と矛盾

SNRは分子雲とぶつかっている



# Very Young SNRs (SN1993J)

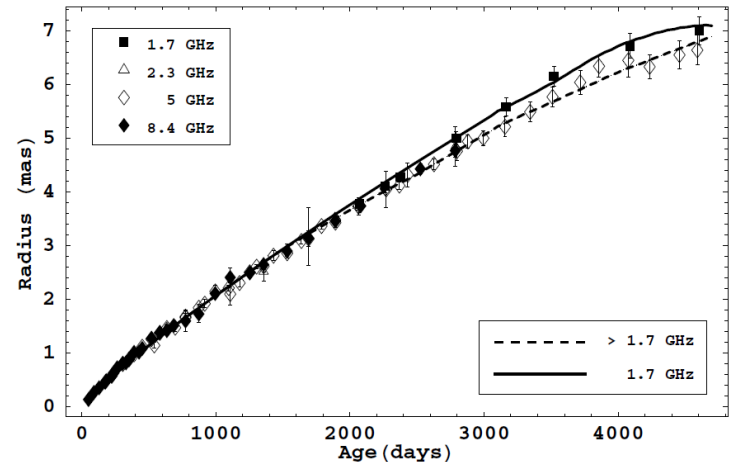
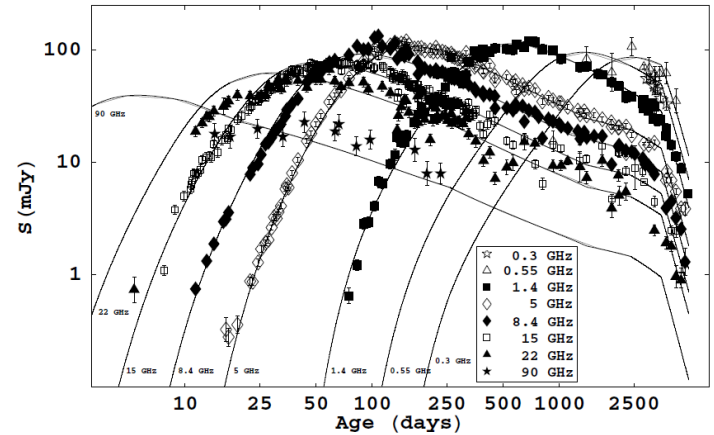
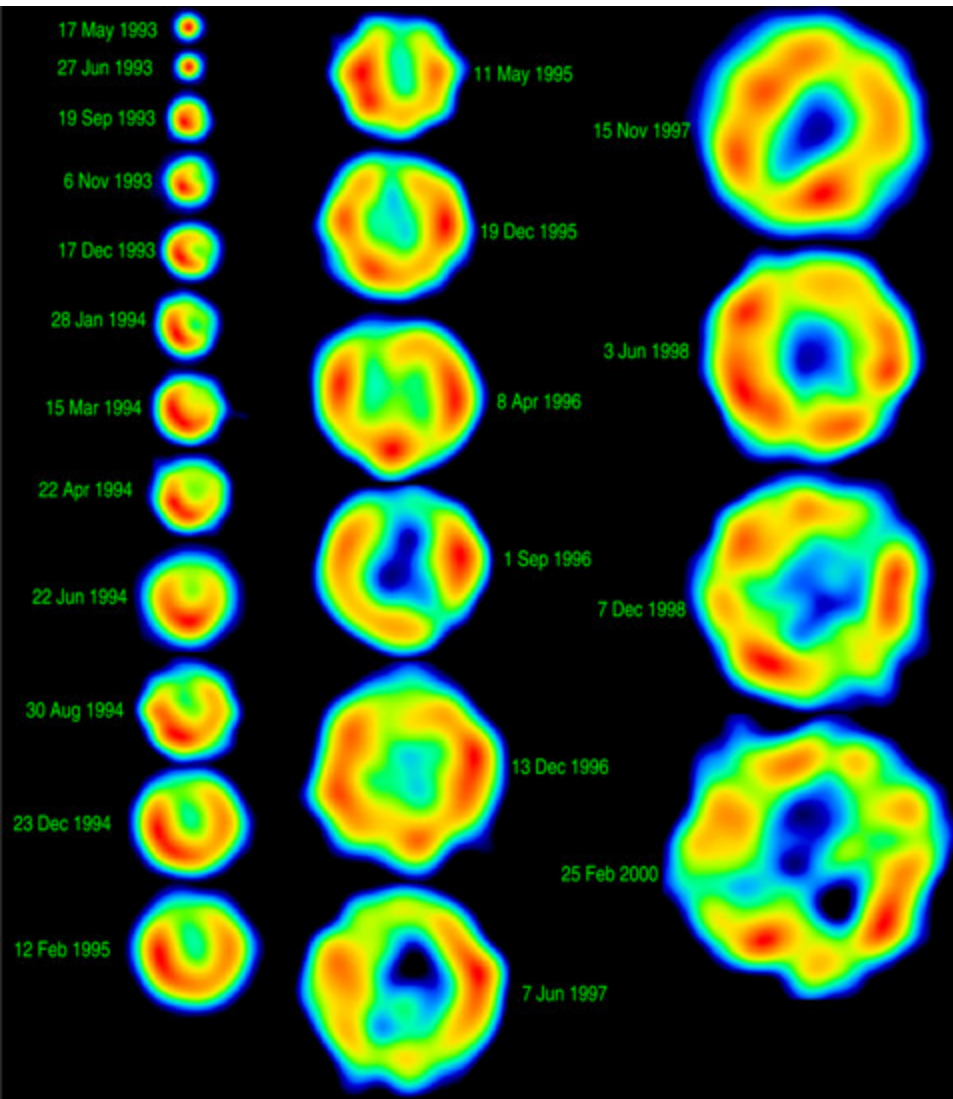


Fig. 1. *Top*, fit of RAMSES to the radio light curves reported in Weiler et al. (2007) up to an age of 4930 days. *Bottom*, simultaneous fit of RAMSES to the expansion curve reported in Paper I.

Marti-Vidal et al., 2011

$$dN/dE \propto E^{-2.55}$$

# SNR、CR観測と標準モデルの矛盾

銀河宇宙線の源として期待されるスペクトルは $E^{-2.3}-E^{-2.4}$

衝撃波加速理論は $dN/dE \propto E^{-2}$

陽子とヘリウムで異なる宇宙線スペクトル

衝撃波加速理論は、イオンの種類によらない

最高エネルギーが $E_{\text{knee}} \sim 10^{15.5}$  eVに達していない？

Middle-aged SNRs( $\sim 10^4$ yr)の $\gamma$ 線スペクトルから期待される $dN/dE$ は、Broken power lawでsteep ( $dN/dE \propto E^{-2.7}-E^{-3}$ )

**個々の矛盾は理論的説明は沢山ある。**

**SNRからのCRの逃走過程を考慮するとこれら全てが説明できる**

宇宙線陽電子が予想よりハード。DM起源の可能性あり。

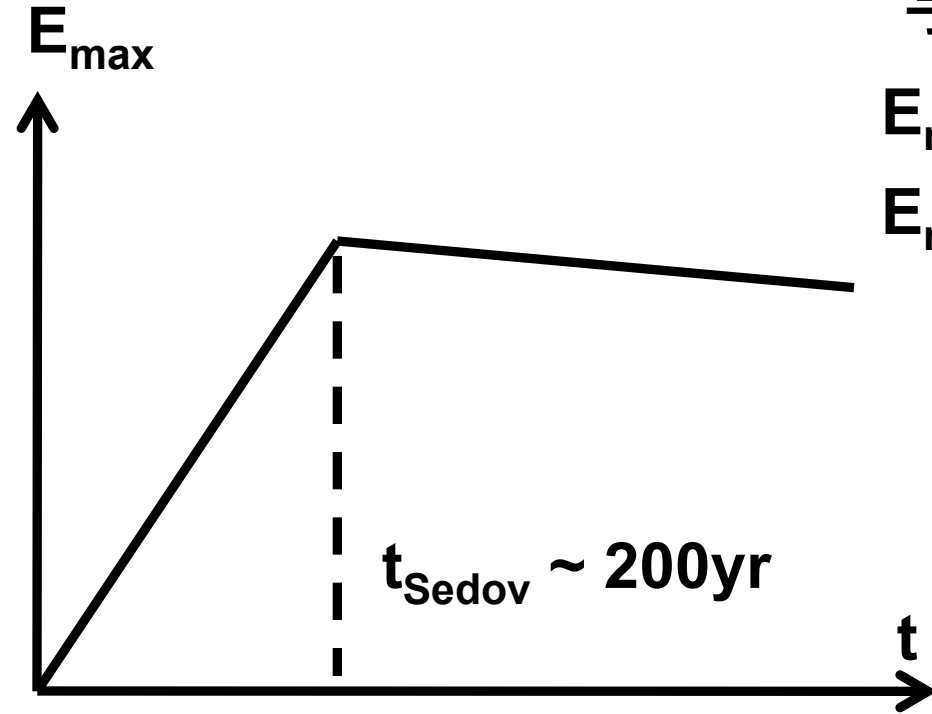
Young SNRs( $\sim 10^3$ yr)の電波とガンマ線観測は、 $dN/dE \propto E^{-2.1}-E^{-2.4}$

標準DSA理論の予言よりソフト

Radio SNe( $\sim <10$ yr)の電波観測は、 $dN/dE \propto E^{-2.5}-E^{-3}$

**理論的説明はいくつかある。どれも正しい可能性ある。**

# これまでの標準モデルのおさらい



宇宙線は衝撃波で加速  $dN/dE \propto E^{-s}$

$E_{\max}$  は時間とともに増加 ( $t < t_{\text{Sedov}}$ )

$E_{\max}$  はほぼ定数 ( $t > t_{\text{Sedov}}$ )

$$t_{\text{acc}}(E) \propto D/u_{\text{sh}}^2 \propto E/(u_{\text{sh}}^2 B)$$

衝撃波が弱くなり、マッハ数が1になると、SNR内の宇宙線が解放される

$$Q_{\text{sour}}(E) \propto E^{-s}$$

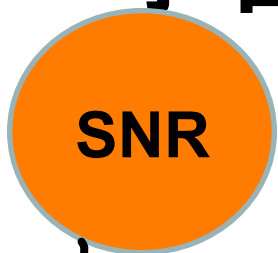
銀河内を伝搬して、地球にたどり着く

$$D_{\text{diff}}(E) \propto E^{\delta}, \quad dN/dE \propto E^{-(s+\delta)}$$

スペクトルは粒子の種類によらない

異なるエネルギーを持った宇宙線は同時に解放される。

# 宇宙線の加速源からの逃走



$$R_{sh} = R_{Sedov} \times \begin{cases} (t / t_{Sedov}) & (t < t_{Sedov}) \\ (t / t_{Sedov})^{2/5} & (t > t_{Sedov}) \end{cases}$$

$$R_{diff} \propto (Dt)^{1/2} \quad D \text{は拡散係数}$$

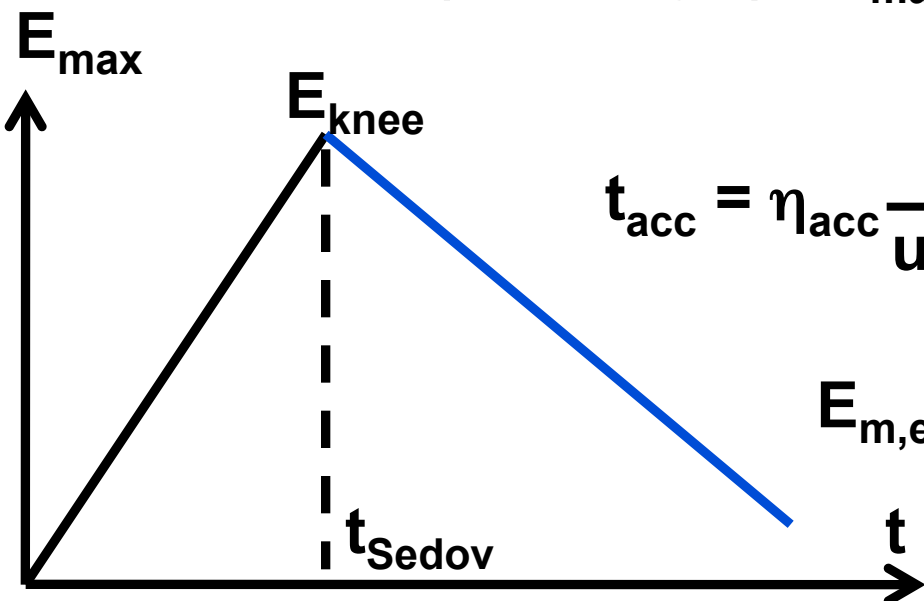
自由膨張段階 ( $t < 200\text{yr}$ ):  $E_{max}$  は年齢で決まる

$$E_{max} = E_{knee} (t / t_{Sedov}) \quad (\text{磁場の増幅が必要})$$

Sedov 段階 ( $t < 10^5\text{yr}$ ):  $E_{max}$  は閉じ込め条件で決まる

$E_{m,esc}$  は  $t_{esc} = t_{acc}$  で決める

$$t_{acc} = \eta_{acc} \frac{D}{u_{sh}^2}, \quad t_{esc} = \eta_{esc} \frac{R_{sh}^2}{D}, \quad D = \eta_g \frac{cE}{3eB}$$



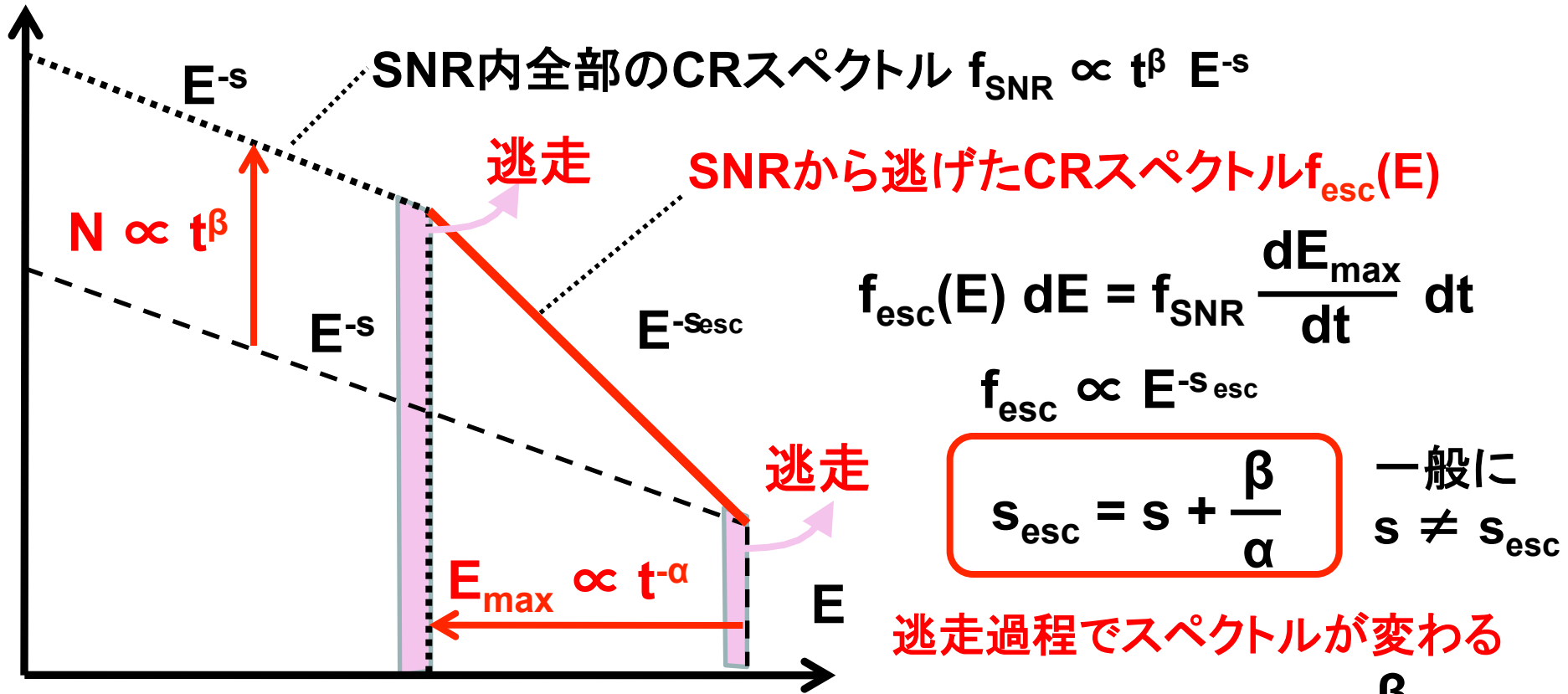
$$E_{m,esc} \propto \frac{B(t)t^{-1/5}}{\eta_g(t)} = E_{knee} (t / t_{Sedov})^{-\alpha}$$

$E_{m,esc}$  は時間とともに減少する

# 加速源から逃げた宇宙線のスペクトル

最高エネルギー  $E_{\max} \propto t^{-\alpha}$  ,  $\alpha > 0$

$dN/dE$   $E = mc^2$  のCRの数  $N(E=mc^2) \propto t^{\beta}$  ,  $\beta > 0$



Ohira et al, A&A, 2010

地球で観測される幕  $s_{\text{obs}} = s + \frac{\beta}{\alpha} + \delta$

$\beta_p > \beta_{\text{He}}$  ならCR He がハードなのも説明可 (Ohira & Ioka, ApJL, 2011)



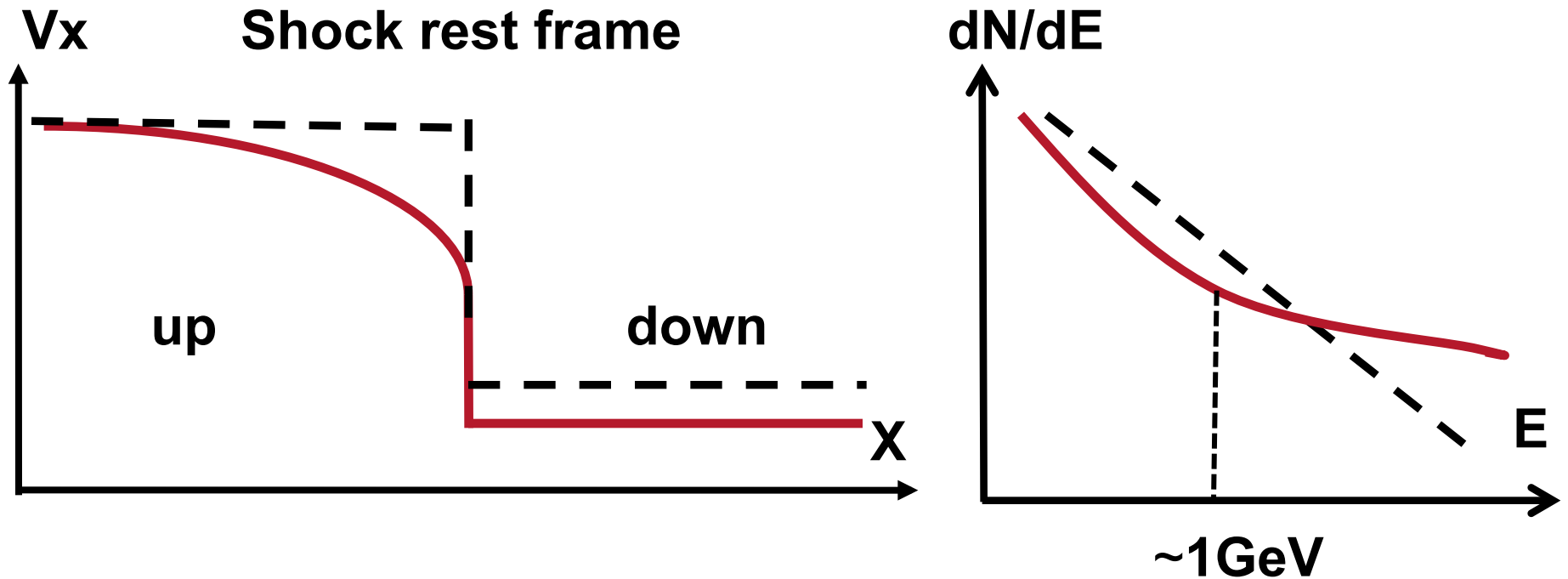
# スペクトル指数 $s$ についての研究

$$dN/dE \propto E^{-s}$$

|                     |         |                               |
|---------------------|---------|-------------------------------|
| Standard DSA theory | $s = 2$ | Blandford & Ostriker(1978)    |
| 宇宙線圧力の効果            | $s < 2$ | Drury & Volk(1981)            |
| Alfven波の効果          | $s > 2$ | Zirakashvili & Ptuskin(2009)  |
| 宇宙線の逃走の効果           | $s > 2$ | Ohira et al. (2010)           |
| 宇宙線の非等方散乱の効果        | $s > 2$ | Bell et al.(2011)             |
| 中性粒子の効果             | $s > 2$ | Ohira (2012), Ohira PRL(2013) |
| 宇宙線の準拡散の効果          | $s > 2$ | Kirk et al.(1996)             |
| 2次加速の効果             | $s > 2$ | Ohira ApJL(2013)              |

どれが正しい? → 謎

# 宇宙線の圧力の効果(Nonlinear DSA Model)



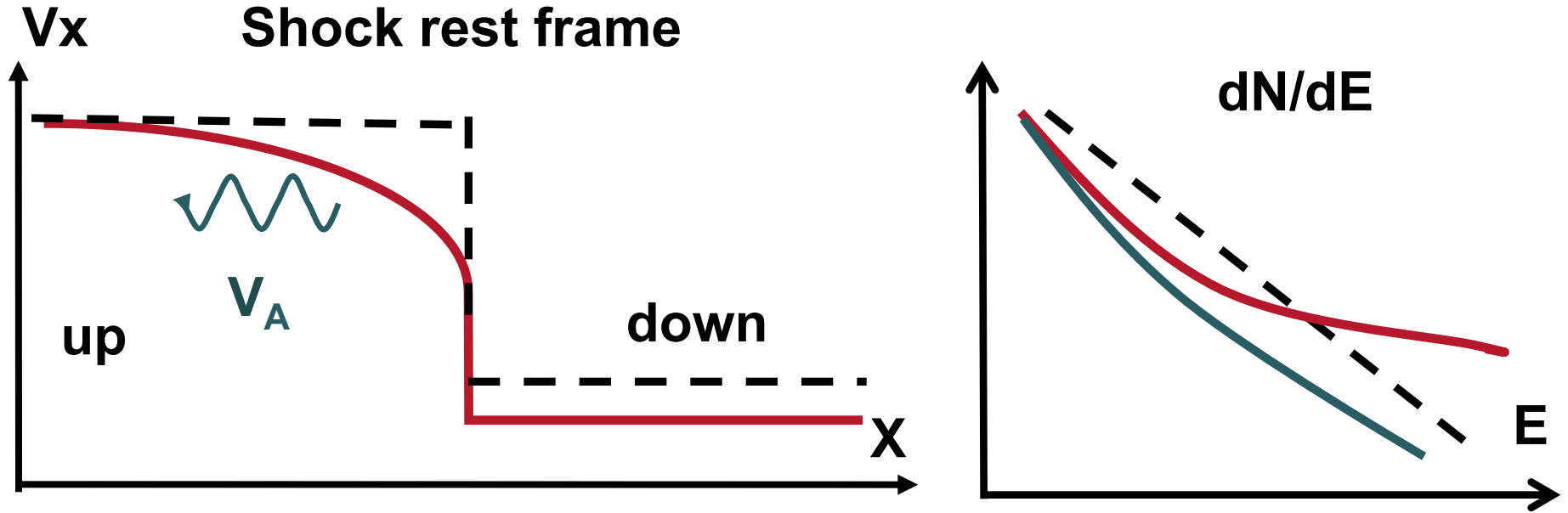
上流に染み出した宇宙線によって、衝撃波構造が変化

全体の圧縮率は大きく、不連続の跳びは小さくなる

1GeV 以下は  $s > 2$  , 1GeV以上は  $s < 2$  となる。  $dN/dE \propto E^{-s}$

e.g., Drury & Volk (1981), Malkov & Drury (2001)

# 非線形宇宙線加速モデル



宇宙線によって励起された磁場の波は、衝撃波上流に向う  
宇宙線の散乱体の速度が  $V_1 \rightarrow V_1 - V_A$ .

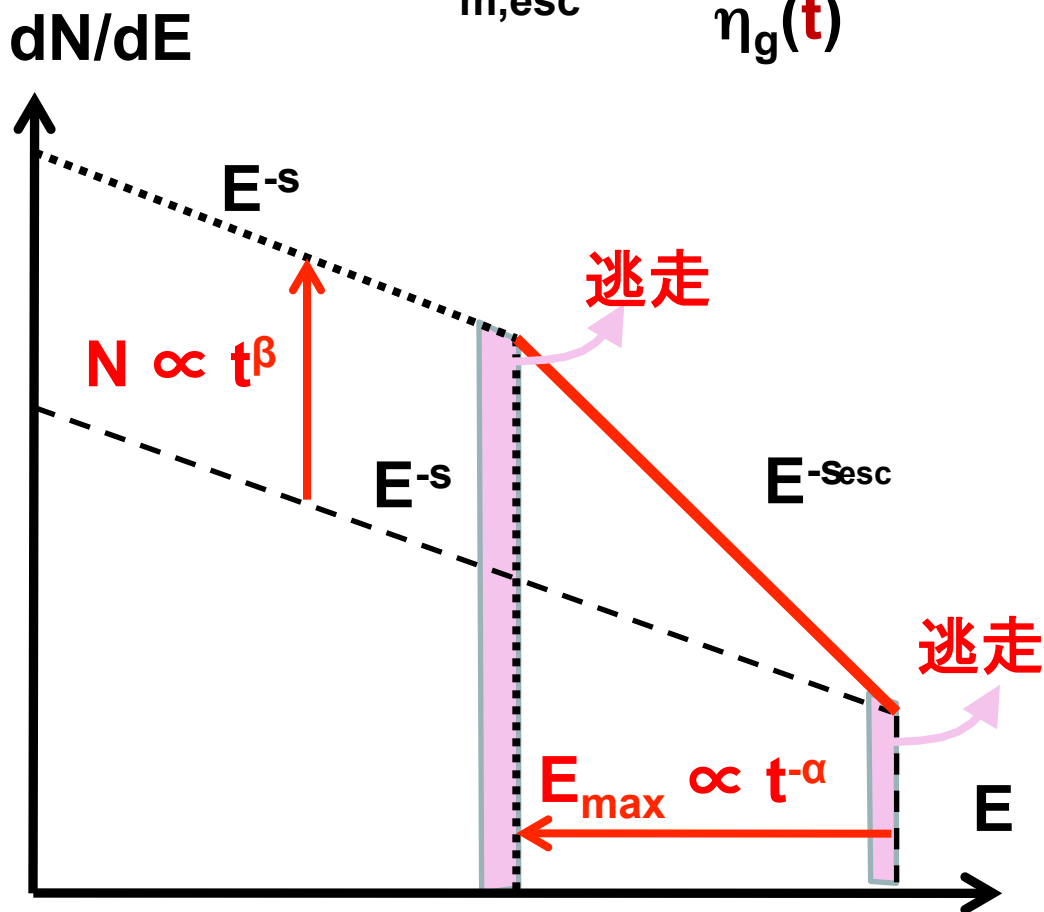
磁場が増幅されると  $V_A \sim V_1$

衝撃波上流と下流の散乱体の速度差が小さくなる  $V_1 - V_2 - V_A$

その結果、 $dN/dE \propto E^{-2}$ よりソフトになる

# $\alpha$ と $\beta$ についての研究

$$E_{m,esc} \propto \frac{B(t)t^{-1/5}}{\eta_g(t)} = E_{knee} (t / t_{Sedov})^{-\alpha}$$

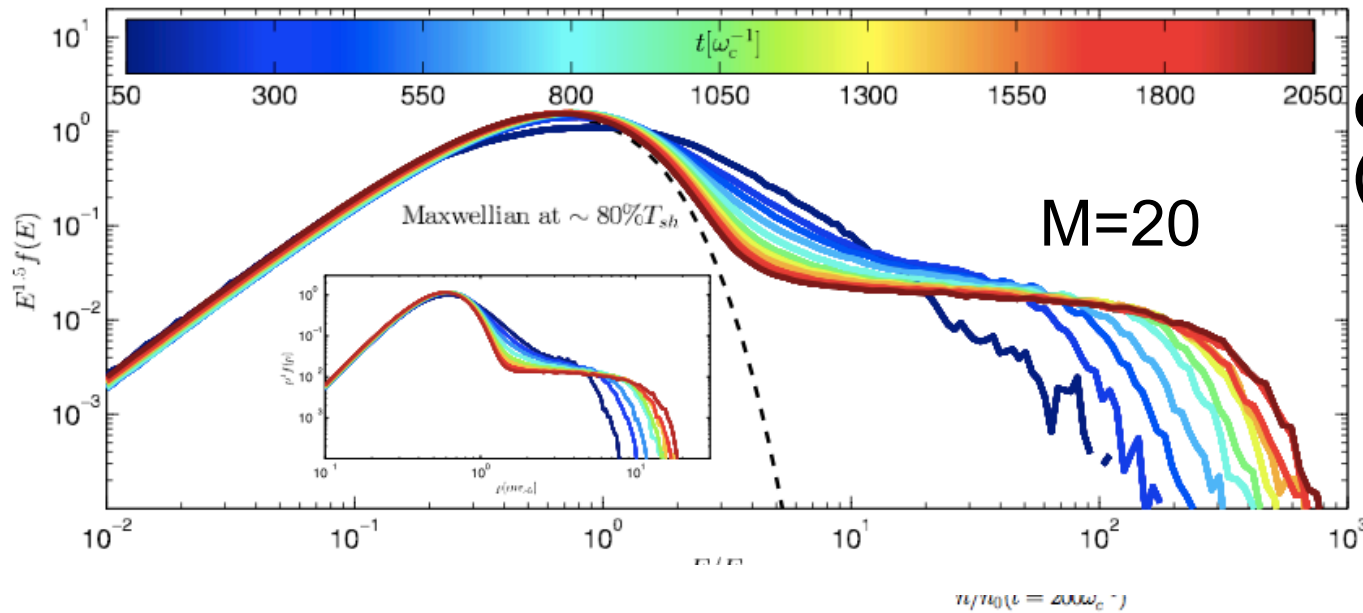


$\alpha$  は磁場SNR近傍の磁場の時間進化が重要

$\beta$  は宇宙線注入の時間進化が重要

→ Maxwell 方程式と沢山の荷電粒子の運動方程式を同時に計算するプラズマ粒子シミュレーションによる研究が盛ん

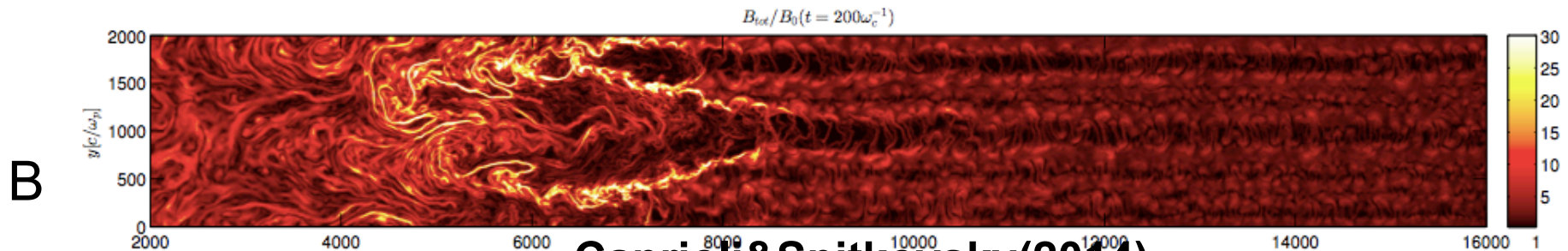
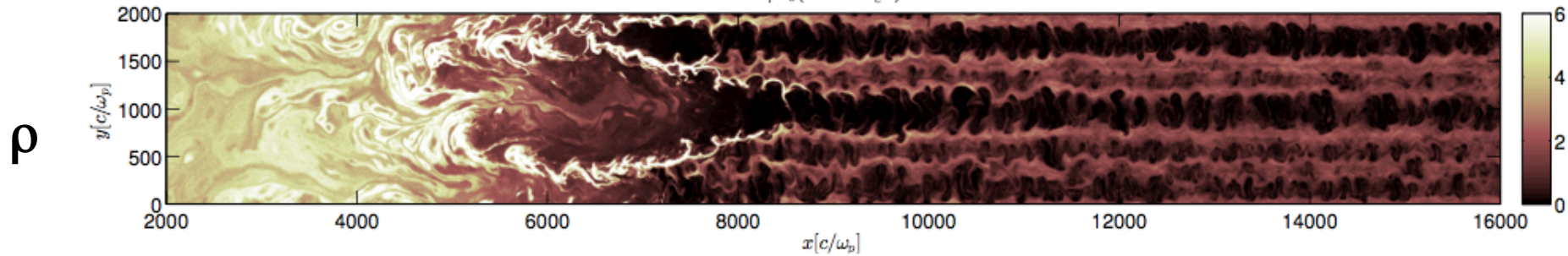
# Simulation (Maxwell eqs. & EOM of many p)



Caprioli & Spitkovsky (2014)

DSAを再現

$$dN/dE \propto E^{-2}$$



Caprioli & Spitkovsky (2014)

# 銀河宇宙線のその他の問題1 (磁場)

SNR は  $E_{\text{knee}} \sim 10^{15.5}$  eV まで陽子を加速できるか？

SNR は  $E_{\text{ankle}} \sim 10^{18.5}$  eV まで鉄 を加速できるか？

→ SNR の衝撃波近傍の磁場をどれだけ増幅できるか？

CRによる磁場の増幅 (e.g. Bell 2004)

水素原子の電離による増幅 (e.g. Ohira et al.2009)

上流の密度揺らぎによる増幅 (e.g. Inoue et al.2009)

Rayleigh-Taylor不安定による増幅 (e.g. Guo et al.2012)

これらの研究は、粒子加速と磁場増幅を同時に解いていない

最近、粒子加速と磁場増幅を同時に解く計算がされた

simulation: Bell et al.(2013), Caprioli & Spitkosky(2013, 2014)

$r_{\text{g,knee}} \sim 10^6 r_{\text{g,GeV}} \sim 10^8 r_{\text{g,th}}$  → 第一原理計算で kneeまで計算するのはまだまだ遠い未来！！

# 銀河宇宙線のその他の問題2(宇宙線量)

全てのSNRが1つあたり  $E_{CR} \sim 10^{50}$  erg をつくる？

→ pの衝撃波加速への注入機構やその依存性は何か？

simulation: Caprioli & Spitkovsky(2013, 2014), Ohira(2013)

→ 重元素の衝撃波加速への注入機構やその依存性は何か？

ダストの加速 (Ellison et al. 1997)

→ GeV 程度のCRの加速機構は本当に衝撃波加速(DSA)？

Fermi 2次加速の可能性 (Ohira 2013)

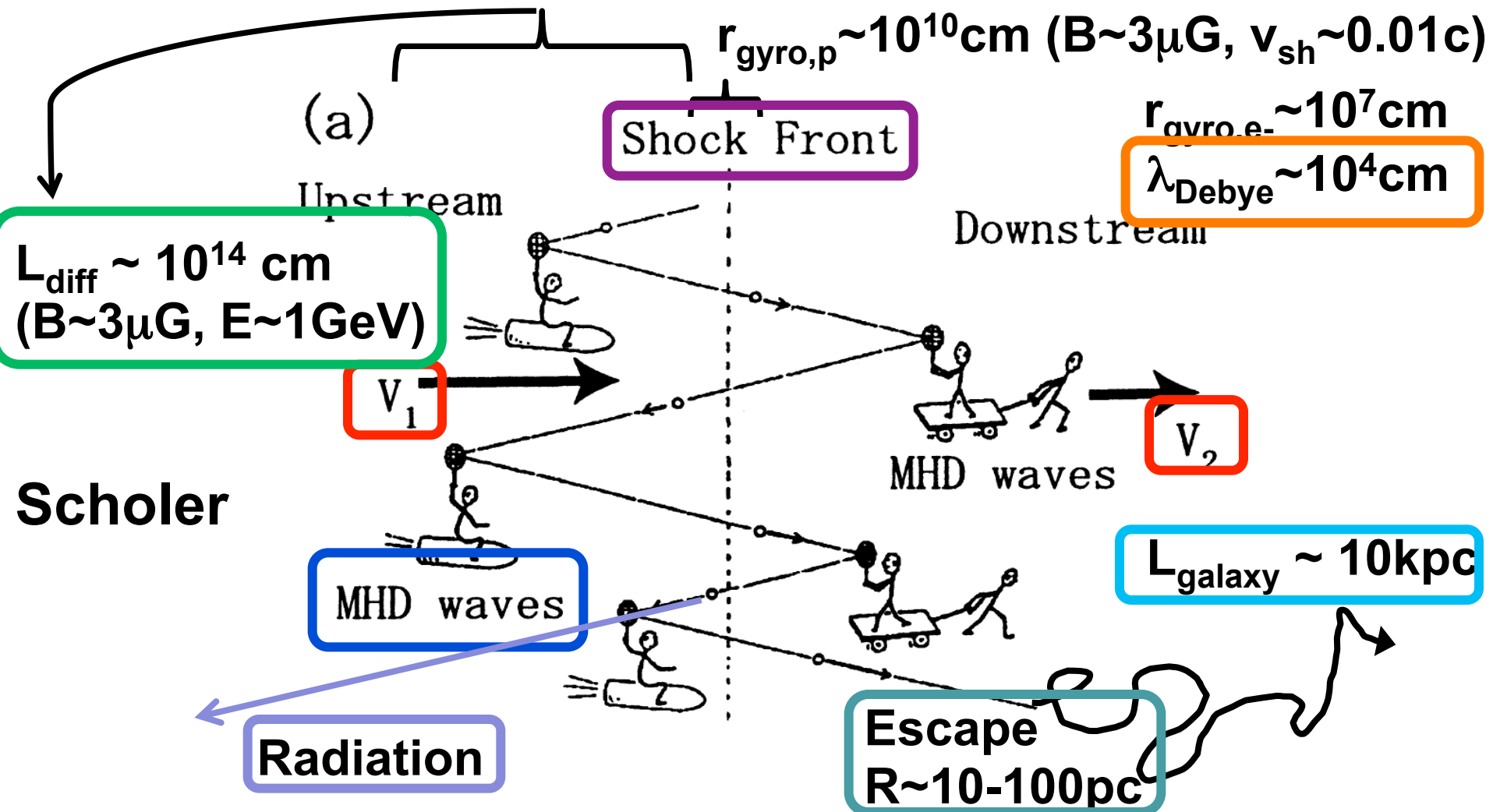
なぜ e-/p ratio  $\sim 0.01$  @10GeV？

→ e<sup>-</sup> の衝撃波加速への注入機構やその依存性は何か？

simulation: Riquelme & Spitkovsky(2011), Matsumoto et al.(2013), Kato(2014)

水素原子の電離の際に生じる反跳電子 Ohira(2013)

# 粒子加速、宇宙線の研究



無衝突衝撃波 衝撃波構造 宇宙線反作用 電子加熱・加速

磁場の増幅、散乱過程 銀河内伝搬 宇宙線の逃走 放射過程



# まとめ

B/Cの観測や非等方性の観測から、 $D_{xx} \propto E^{0.3} - E^{0.4}$   
 $dN_{CR,sour}/dE \propto E^{-2.3} - E^{-2.4}$ ,  $dN_{CR,e^-}/dE \propto E^{-3.1}$ ,  $E_{max,e^-} \sim \text{TeV}$   
宇宙線陽子より宇宙線ヘリウムの方がハード  
宇宙線陽電子が、単純な伝搬モデルの予言よりハード  
SNRの観測は、 $E^{-2}$ よりソフト  
最近の衝撃波加速理論は、 $E^{-2}$ よりソフトなスペクトルを予言

加速領域からの逃走後、CRスペクトルはソフトになる

$$dN/dE \propto t^\beta E^{-s}, E_{max} \propto t^{-\alpha} \rightarrow s_{esc} = s + \frac{\beta}{\alpha}$$

プラズマ粒子シミュレーションで、無衝突衝撃波の形成、宇宙線加速、磁場増幅が見え始めた。まだ現実的なパラメータではない

AMS02, ISS CEAM, CALET, Super Tiger, CTA, Astro H, ...  
と宇宙線に関する新しい観測が沢山行われる予定。