

超新星残骸周りの宇宙線ハロー

(宇宙線の拡散係数に関するお話)

大平 豊 (青山学院大学)

銀河宇宙線

銀河宇宙線: p, He, ..., Fe, e⁻, e⁺, p, ...

$$dN_{\text{CR } p}/dE \propto E^{-2.75}, \quad N_{\text{CR } e^-}/dE \propto E^{-3.1},$$

標準モデル

CR nuclei と CR e⁻ 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

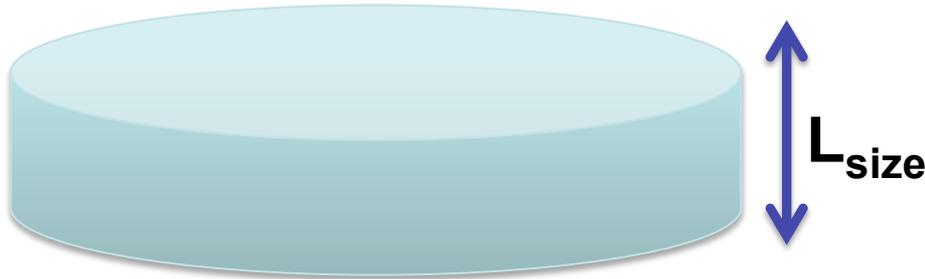
$D_{xx} \propto E^\delta$ で銀河内を拡散的に伝播して(Leaky box model)

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

$$s+\delta = 2.75, \quad s = 2 \rightarrow \delta = 0.75$$

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)

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

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

$$D_{\text{diff}}(E) = D_0 E^\delta$$

$$Q_{\text{sour}}(E) = Q_0 E^{-s}$$

$$\frac{dN_{\text{CR}}}{dE} = \frac{L_{\text{size}}^2 Q_0}{D_0} E^{-(s+\delta)}$$

B/C, $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$, CR anisotropy

加速された宇宙線の C や O 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 や Be^{10} が作られる

銀河内に長時間滞在するほど、 $\text{C} \rightarrow \text{B}$ の反応が生じる. (Bは安定)

→ 宇宙線 B と宇宙線 C の比のエネルギー依存性は、 $n_{\text{gas}} L_{\text{size}}^2/D$ のエネルギー依存性を教えてくれる.

^{10}Be は不安定. 銀河内に長時間滞在するほど、 $^{10}\text{Be} \rightarrow ^9\text{Be}$ の反応が生じる.

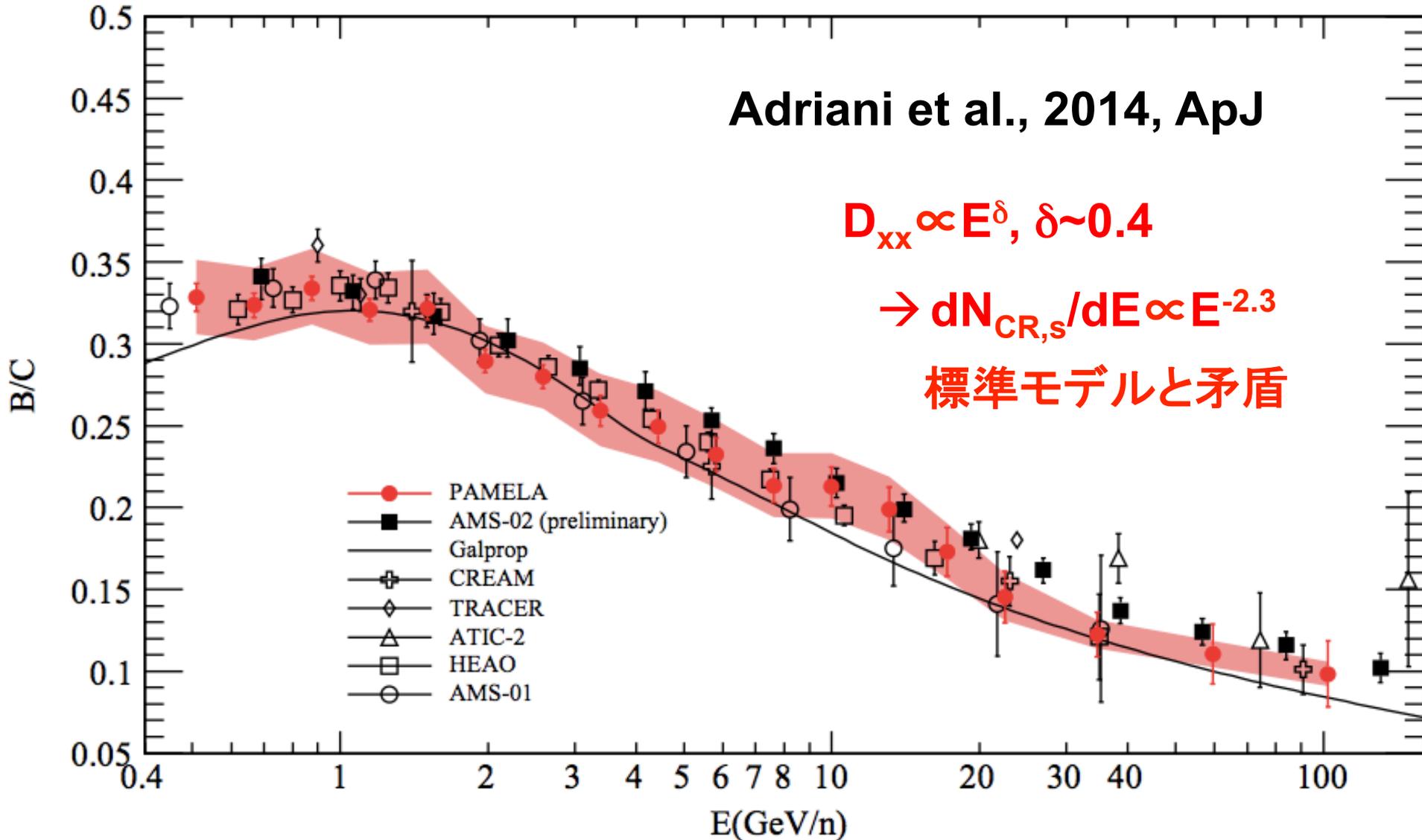
→ $\text{Be}^{10}/\text{Be}^9$ は滞在時間 L_{size}^2/D の絶対値を教えてくれる.
(AMS-02の結果はまだ. CALET, ISS-CREAMでは無理)

宇宙線は銀河面に垂直な方向に逃げやすい

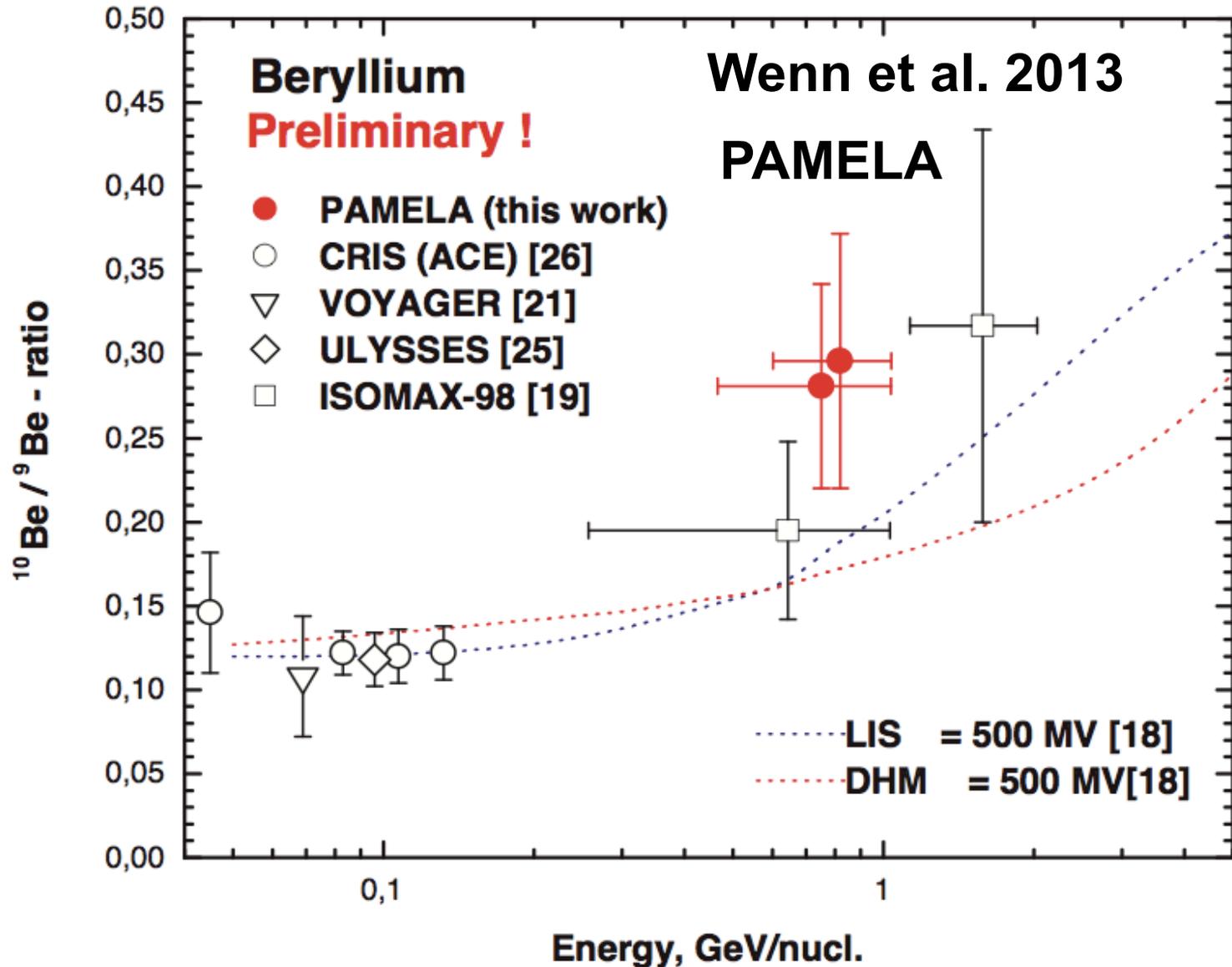
→ 非等方性の大きさは、 D/L_{size} に対して制限を与えてくれる

Galactic diffuse γ や radio synchrotron も L_{size} について情報を持つ

B/Cの観測結果

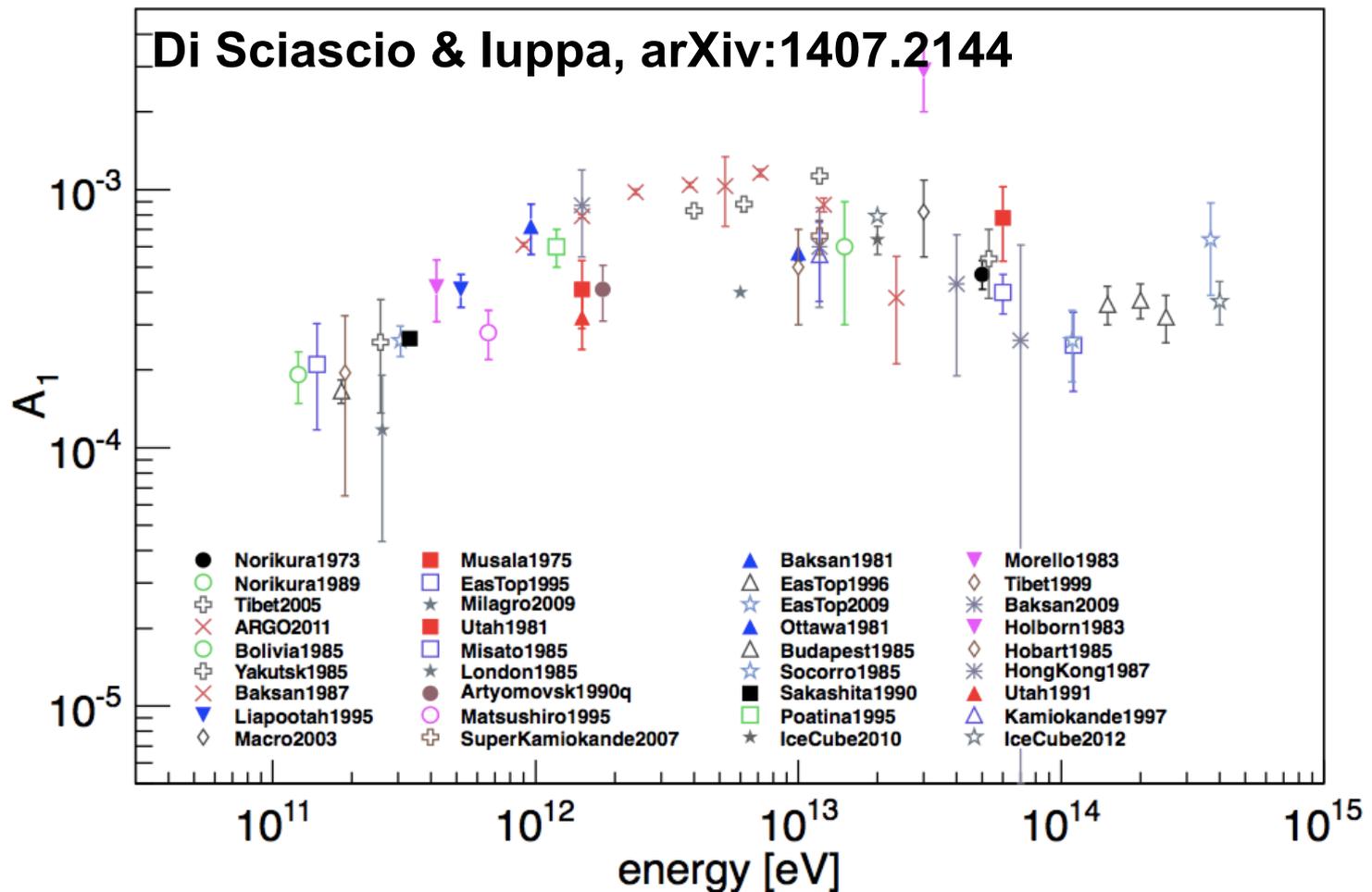


$^{10}\text{Be} / ^9\text{Be}$ の観測結果

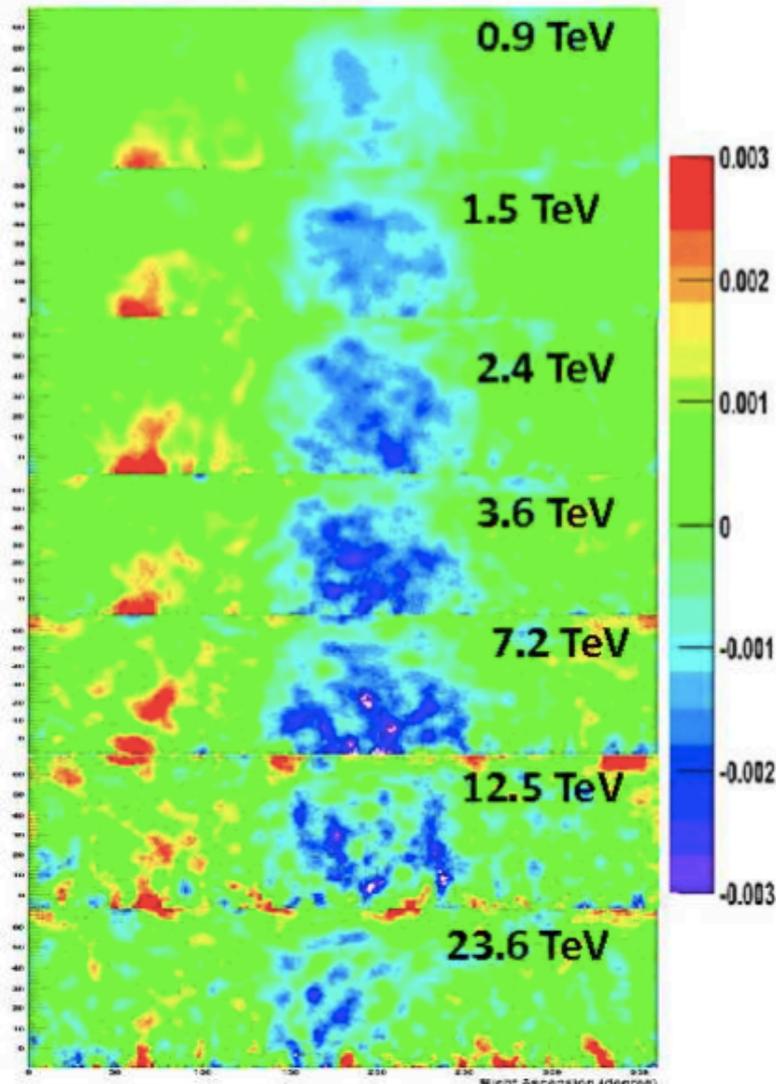


宇宙線の非等方性

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



宇宙線の非等方性(ARGO-YBG)



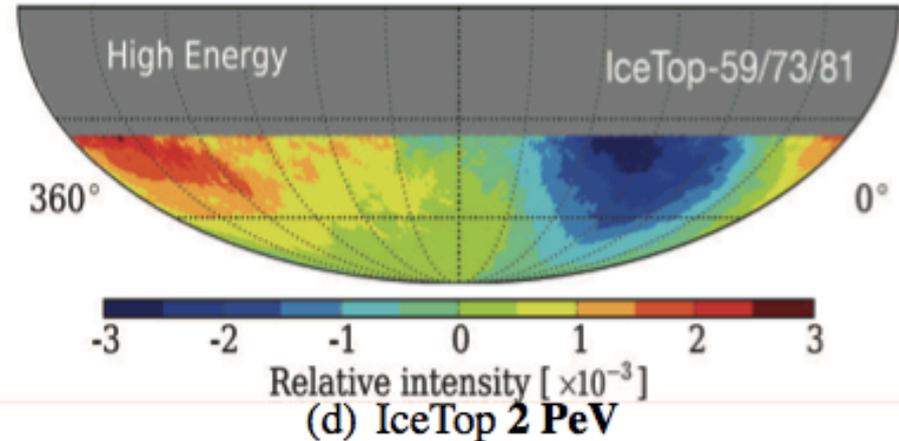
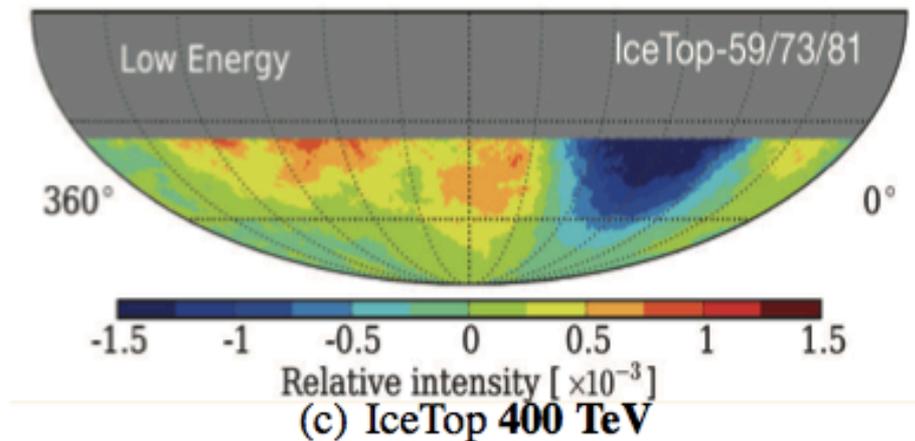
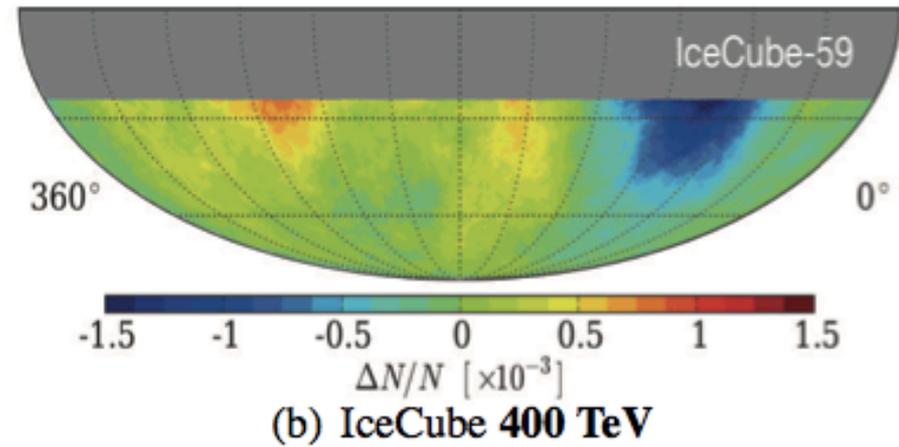
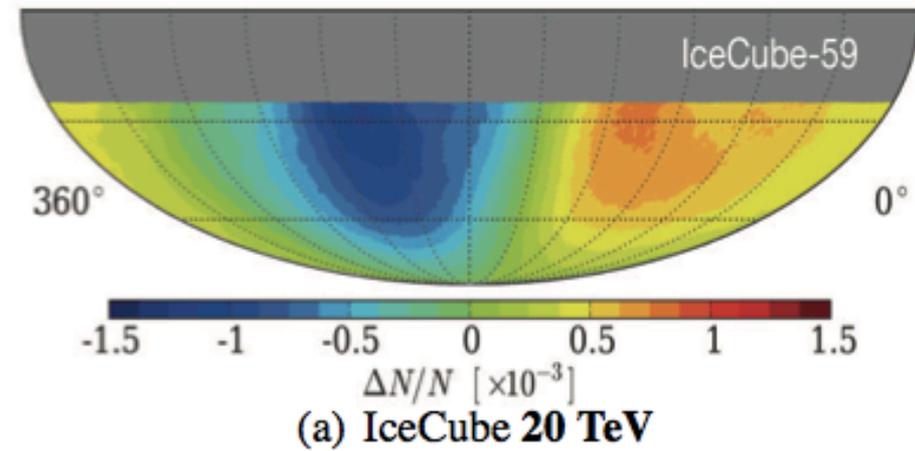
ARGO-YBJ
Cui et al., ICRC, 2011

~10°スケールの揺らぎ

観測されている非等方性は、
銀河面とは関係がなさそう。

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

銀河宇宙線の観測から期待される 拡散係数

$$D \approx 10^{28} \text{ cm}^2 / \text{s} \left(\frac{E}{10 \text{ GeV}} \right)^{0.3}$$

注) $L_{\text{size}} \gtrsim 4 \text{ kpc}$

銀河宇宙線の起源は超新星残骸？

超新星残骸(SNR)が宇宙線(CR)の起源なら、SNR近傍はCRが他の領域より多いはず

→ 宇宙線はガスや光子と相互作用してガンマ線を出すので、SNRがガンマ線で明るくなるはず。

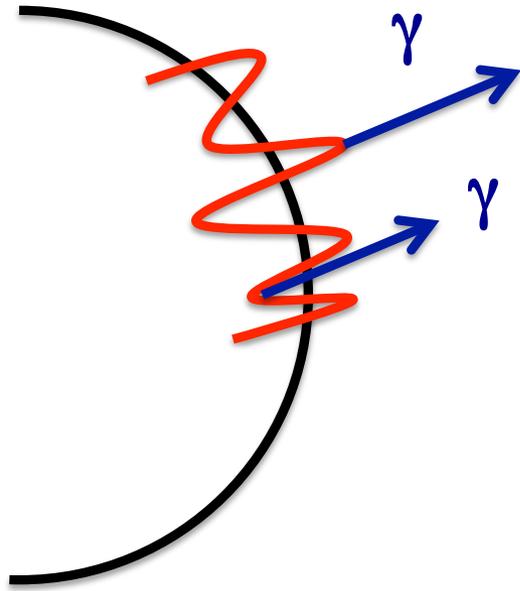
(e.g. Naito & Takahara 1994)

ガンマ線の観測量だけで、CRの総量やエネルギースペクトルを明らかにできるか？

→ 一般にはできない！

ガス分布や光子場、拡散係数、磁場の情報が必要

超新星残骸近傍からのガンマ線

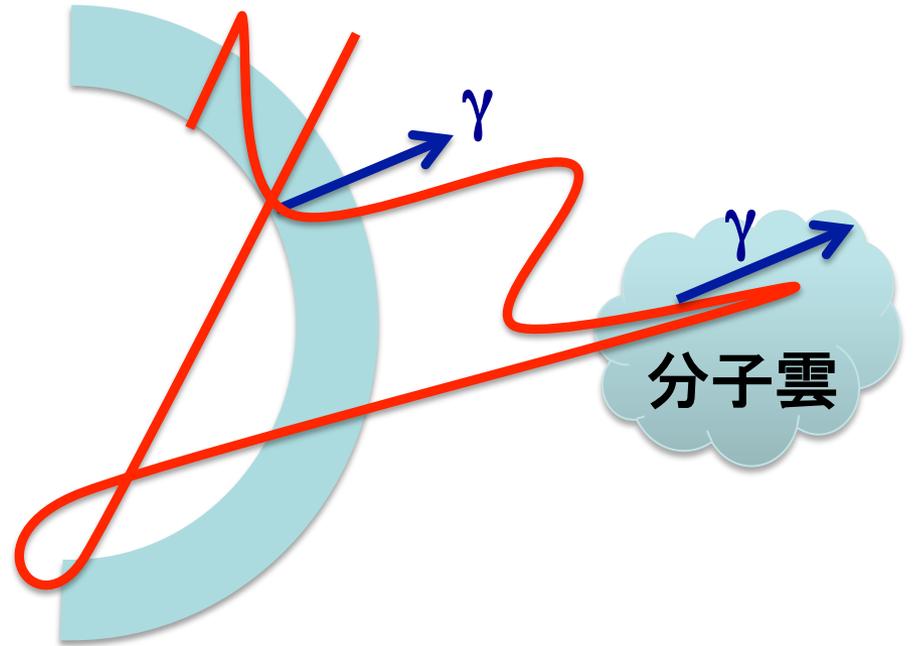


加速しているCRからの γ

加速領域のCRスペクトルがわかる

SNRの一生で、どれだけCRが作られるかはわからない

空間分解能が悪いと、加速しているのか逃走しているのか区別不能



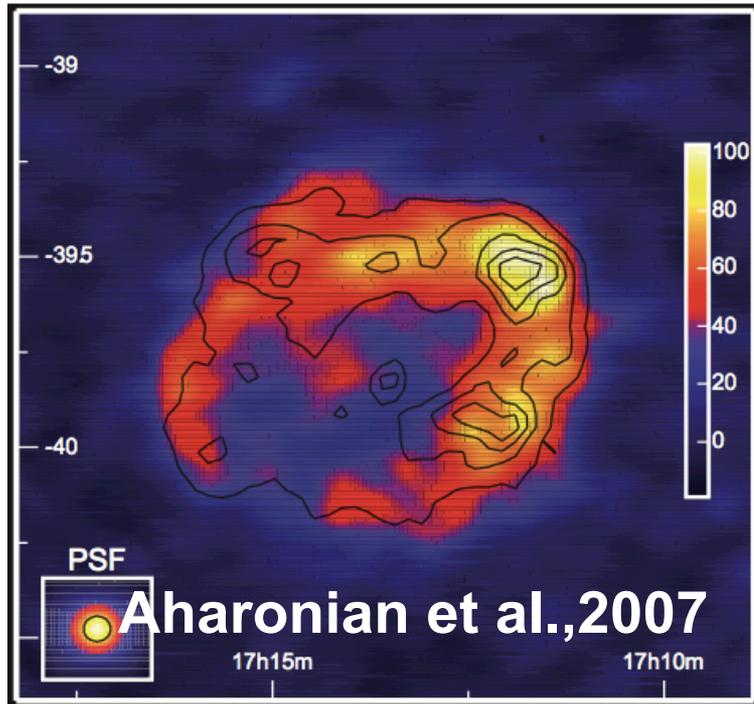
SNRから解放されたCRからの γ

密度が濃い領域内の宇宙線のスペクトルがわかる
(注: SNRも高密度領域)

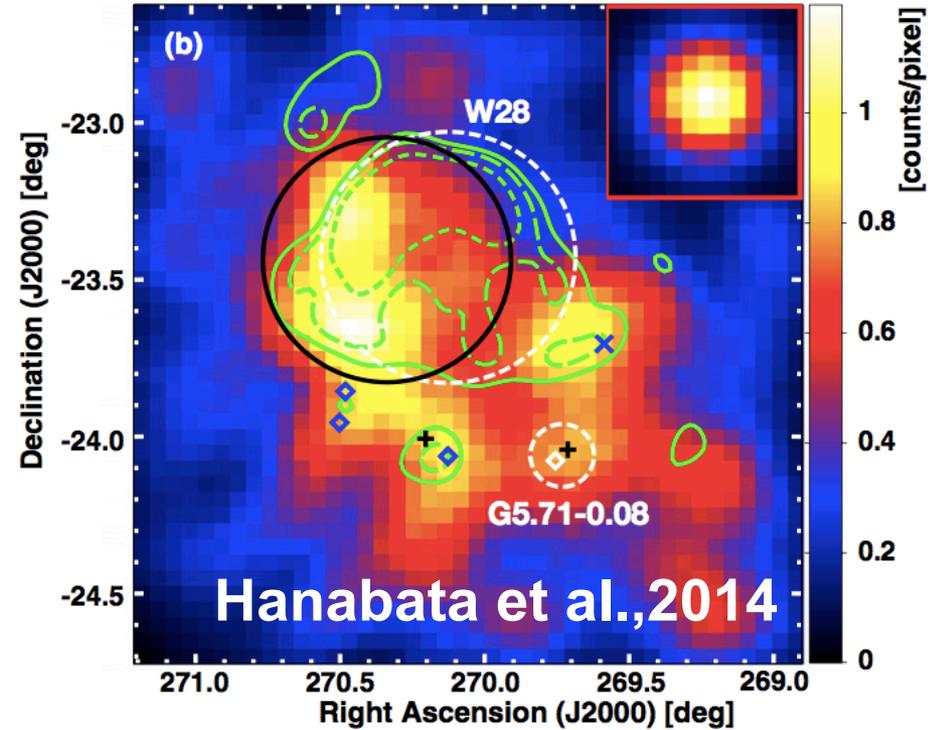
CRの総量はわからない

RX J 1713 and W28

RX J 1713



W28



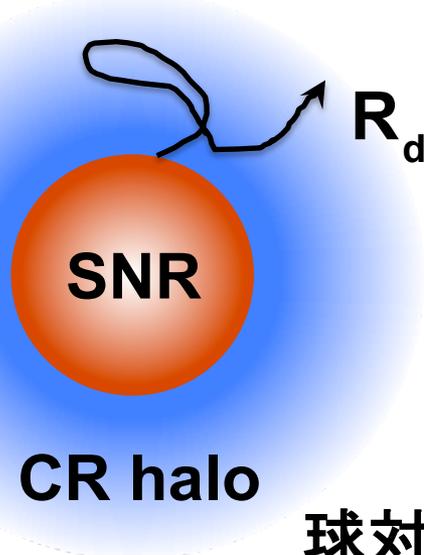
X線とTeVガンマ線はほとんど
同じ領域から放射されている

加速しているCRからの放射？

ガンマ線は、電波シェルの外から
も放射されている

逃走しているCRからの放射？

逃走している宇宙線からのガンマ線



$$R_{\text{diff}} = \sqrt{4D(E)t_{\text{age}}} \quad , \quad D(E) = \chi \left(\frac{E}{10\text{GeV}} \right)^{\delta} 10^{28} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$$

(Galactic mean value $\chi \sim 1$, $\delta \sim 0.3$)

$$Q_{\text{CR},s} = Q_0 (E/\text{GeV})^{-s}$$

球対照的に拡散する場合

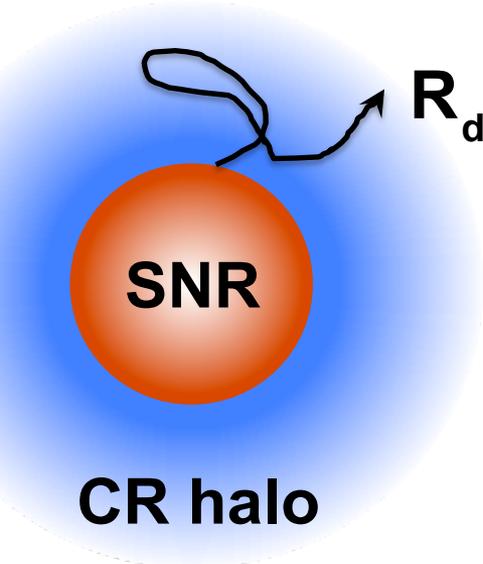
$$\text{CR density} \sim Q_{\text{CR},s} / R_{\text{diff}}^3 \propto Q_0 t_{\text{age}}^{-1.5} \chi^{-1.5} E^{-(s+1.5\delta)}$$

1次元的に拡散する場合(磁力線に沿って拡散)

$$\text{CR density} \sim Q_{\text{CR},s} / R_{\text{diff}} \propto Q_0 t_{\text{age}}^{-0.5} \chi^{-0.5} E^{-(s+0.5\delta)}$$

CR density $\propto F_{\gamma}$ と思うと、宇宙線の拡散モデルとしてどちらを選ぶかで、結果の Q_0 , χ , s , δ の値が変わる。

球対称的拡散の場合



$$R_{\text{diff}} = \sqrt{4D(E)t_{\text{age}}} \quad , \quad D(E) = \chi \left(\frac{E}{10\text{GeV}} \right)^\gamma 10^{28} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$$

(Galactic mean value $\chi \sim 1$, $\gamma \sim 0.3$)

$$\text{CR density} \sim N_{\text{CR,tot}} / R_{\text{diff}}^3 \propto \chi^{-1.5}$$

$$\rightarrow \text{Gamma-ray luminosity} \propto \chi^{-1.5}$$

$U_{\text{CR}} \sim 10^{50} \text{ erg}$ で F_γ を説明するには $\chi \sim 0.01$ (Fujita, Y., Ohira, Y. et al., 2009)

宇宙線が磁場揺らぎを増幅して $\chi \sim 0.01$.

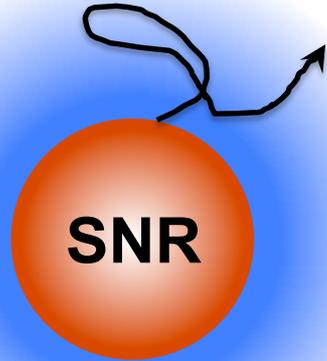
(Fujita, Y., Ohira, Y. et al., 2010
Malkov et al. 2013)

ISM へ広がる宇宙線は、周りのISMを押し

$$\rho_{\text{ISM}} \frac{Du_{\text{ISM}}}{Dt} = - \frac{\partial P_{\text{CR}}}{\partial r} \quad , \quad P_{\text{CR}} \sim U_{\text{CR}} / R_{\text{diff}}^3 \quad \rightarrow \quad u_{\text{ISM}} \approx \frac{t_{\text{age}}}{\rho_{\text{ISM}}} \frac{U_{\text{CR}}}{R_{\text{diff}}^4}$$

逃走宇宙線によって押されるISM

SNRの周りのISMを宇宙線の圧力が押す $u_{\text{ISM}} \approx \frac{t_{\text{age}}}{\rho_{\text{ISM}}} \frac{U_{\text{CR}}}{R_{\text{diff}}^4}$



CR halo

$$u_{\text{ISM}} \approx 10^3 \text{ km/s} \left(\frac{\chi}{0.01} \right)^{-2} \left(\frac{n_{\text{ISM}}}{10 \text{ cm}^{-3}} \right)^{-1} \left(\frac{t_{\text{age}}}{10^4 \text{ yr}} \right)^{-1} \left(\frac{U_{\text{CR}}}{10^{50} \text{ erg}} \right)$$

$$R_{\text{adv}} \approx u_{\text{ISM}} t_{\text{age}} \approx 10 \text{ pc} \left(\frac{\chi}{0.01} \right)^{-2} \left(\frac{n_{\text{ISM}}}{10 \text{ cm}^{-3}} \right)^{-1} \left(\frac{U_{\text{CR}}}{10^{50} \text{ erg}} \right)$$

$$R_{\text{diff}} \approx 3 \text{ pc} \left(\frac{\chi}{0.01} \right)^{1/2} \left(\frac{t_{\text{age}}}{10^4 \text{ yr}} \right)^{1/2} \left(\frac{E}{10 \text{ GeV}} \right)^{\delta/2}$$

SNR の後期段階の進化に重要 ($u_{\text{ISM}} \sim u_{\text{sh}}$).

低エネルギー宇宙線の逃走にも影響?

宇宙線の輸送として、拡散だけでなく移流も重要 ($R_{\text{adv}} \sim R_{\text{diff}}$).

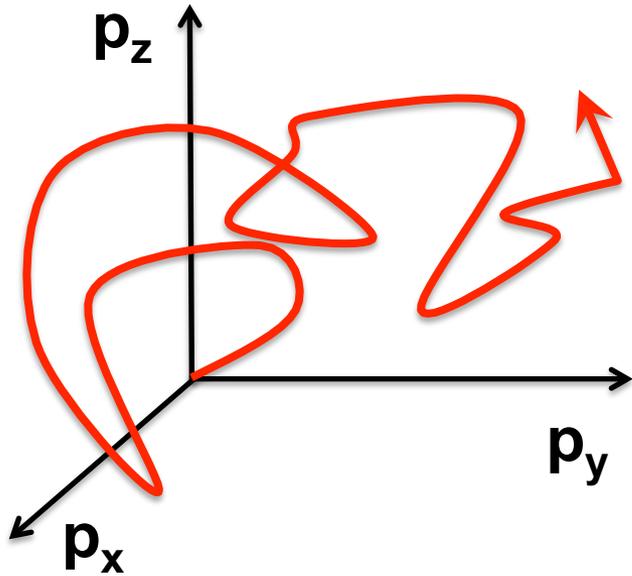
ガンマ線のスペクトルにも影響?

上流の密度揺らぎは、磁場揺らぎを成長させる

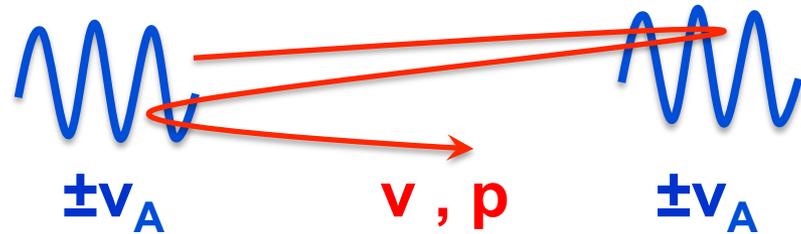
拡散係数 (χ, δ) にも影響?

拡散中の2次加速

3次元運動量空間中の拡散



$$\frac{\partial f}{\partial t} = \frac{1}{p^2} \frac{\partial}{\partial p} \left(p^2 D_{pp} \frac{\partial f}{\partial p} \right) \quad D_{pp} = \left\langle \frac{\Delta p \Delta p}{\Delta t} \right\rangle$$



運動量変化 $\Delta p \sim (v_A/v)p$

$$D_{pp} \sim \frac{\Delta p \Delta p}{\tau_{sc}} \sim p^2 \frac{v_A^2}{\tau_{sc} v^2} \sim p^2 \frac{v_A^2}{D_{xx}}$$

$$t_{acc} \sim p^2 / D_{pp} \sim D_{xx} / v_A^2 \sim 3 \times 10^5 \text{yr} (\chi / 0.01) (v_A / 30 \text{km/s})^{-2}$$

$$t_{esc} \sim L_{SNR}^2 / D_{xx} \sim 3 \times 10^5 \text{yr} (\chi / 0.01)^{-1} (L_{SNR} / 10 \text{pc})^2$$

$t_{acc} \sim t_{esc} \sim t_{age} \rightarrow \chi \sim 0.01$ なら 2次加速も重要.

Escaping CR e-による拡散係数の解明

SNRやPWNは、CR e- の源でもある

→ Escaping CR e- around SNRs.

Escaping CR e- + CMB → TeV gamma ray (CTA)

Photon field はガスと違ってほぼ一様

ガンマ線の像から1次元的か球対称的か区別可能

ガンマ線のエネルギーごとの広がりから、拡散係数のエネルギー依存性がわかる

Old PWNなら、 $R_{\text{diff}} = (4Dt_{\text{cool}})^{1/2}$ より、Dの絶対値も決まる

まとめ

SNRからのガンマ線スペクトルから、SNRで作られる宇宙線のスペクトルや総量を求めるためには、拡散係数や磁場構造を理解する必要がある。

銀河の平均的な拡散係数と、銀河面内やSNR近傍の拡散係数の関係は謎？

これまでの先行研究は、逃走宇宙線の拡散は、静止したISM中でのみ考えられていた。

SNRで作られた宇宙線が広がっていく際は、周囲のガスを押す

$\chi \sim 0.01$ なら、宇宙線によるISMの膨張は、SNRの進化や、宇宙線の伝搬、拡散係数に重要な影響を与える可能性がある。

$\chi \sim 0.01$ なら、伝搬中の宇宙線($< \sim \text{GeV}$)の2次加速が重要になる