

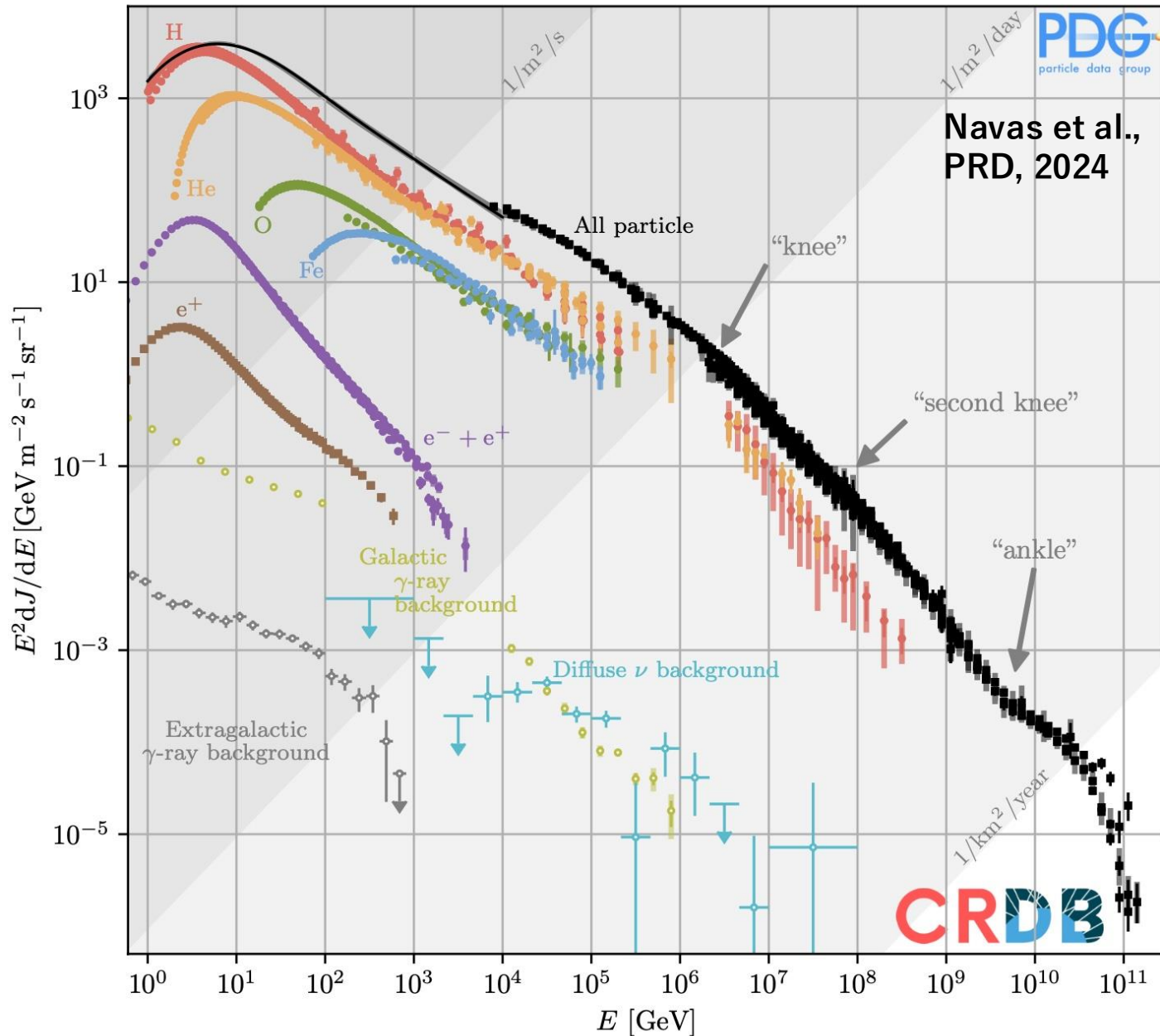
銀河宇宙線の伝搬 と原子核反応

大平 豊 (東京大学)

内容

- 銀河宇宙線と伝搬の標準モデル
- 銀河宇宙線の観測と伝搬モデルの比較
- 断面積の不定性

銀河宇宙線



宇宙線とは、宇宙から飛来する高エネルギーの荷電粒子(e^- , p , \dots , Fe , e^+ , \bar{p})

$E < 10^{17}$ eVの宇宙線は銀河系内起源

100年以上前に発見され、
未だに起源と加速機構は謎のまま。
宇宙物理学最大の謎の1つ。

人類が加速できる1粒子のエネルギーは、
LHC加速器で 7×10^{12} eV。
天然の加速器では、 $\sim 10^{20}$ eV。

銀河内の熱的粒子エネルギー(温度) ~ 1 eV
数密度 ~ 1 個/cm³

銀河内の宇宙線エネルギー $> \sim 10^9$ eV
数密度 $\sim 10^{-9}$ 個/cm³

銀河宇宙線の超新星残骸起源説

宇宙線のエネルギー密度 $\varepsilon \sim 1\text{eV}/\text{cm}^3$

銀河の体積 $V_{\text{gal}} \sim 10\text{kpc} \times 10\text{kpc} \times 1\text{kpc} \sim 3 \times 10^{66} \text{cm}^3$

宇宙線の銀河からの逃走時間 $t_{\text{esc}} \sim 10^7 \text{yr}$

$\rightarrow L_{\text{CR}} \sim dU_{\text{CR}}/dt \sim \varepsilon_{\text{CR}} V_{\text{gal}}/t_{\text{esc}} \sim 10^{41} \text{erg/s}$

超新星爆発の爆発エネルギー $E_{\text{SN}} \sim 10^{51} \text{erg}$

銀河全体の超新星爆発の頻度 $R_{\text{SN}} \sim 1/30\text{yr}$

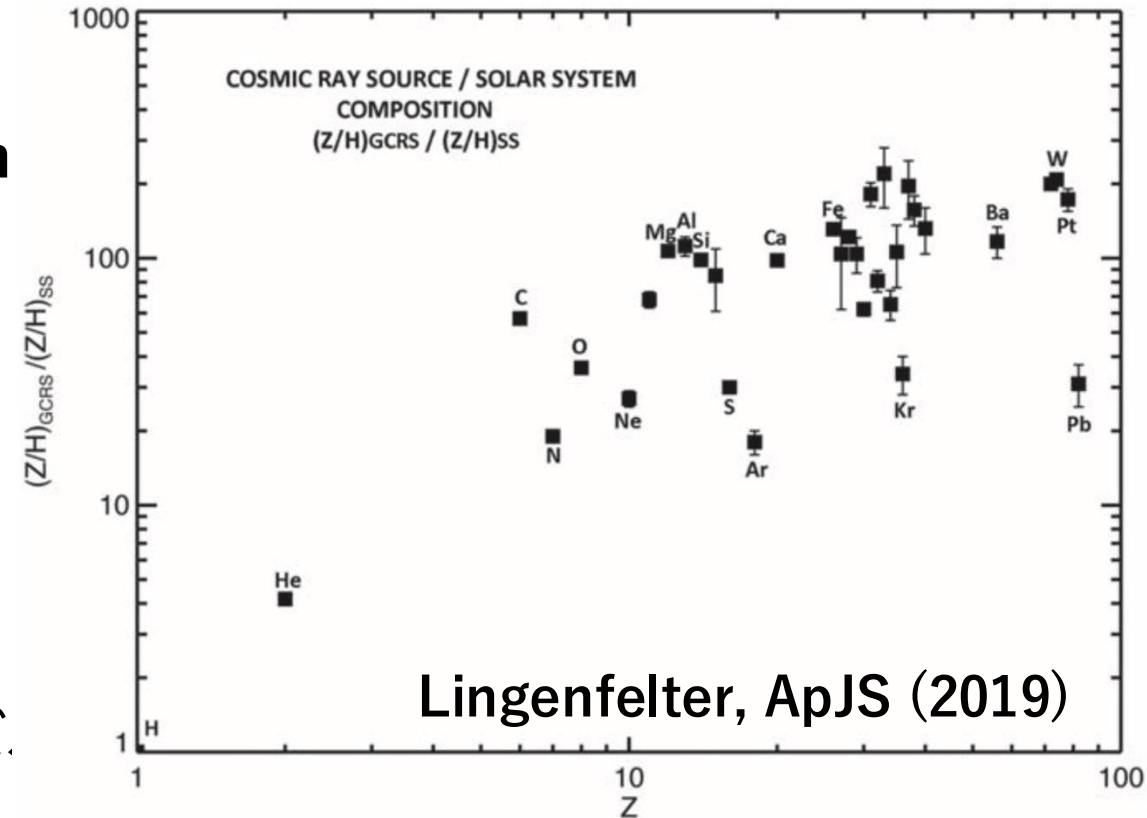
$\rightarrow L_{\text{SN}} \sim E_{\text{SN}} \times R_{\text{SN}} \sim 10^{42} \text{erg/s}$

\rightarrow 爆発エネルギーの10%が銀河宇宙線に渡されれば、
観測を説明可能。

$1\text{eV} \sim 1.6 \times 10^{-12} \text{erg}$

$1\text{pc} \sim 3 \times 10^{18} \text{cm}$

$1\text{yr} \sim 3 \times 10^7 \text{sec}$

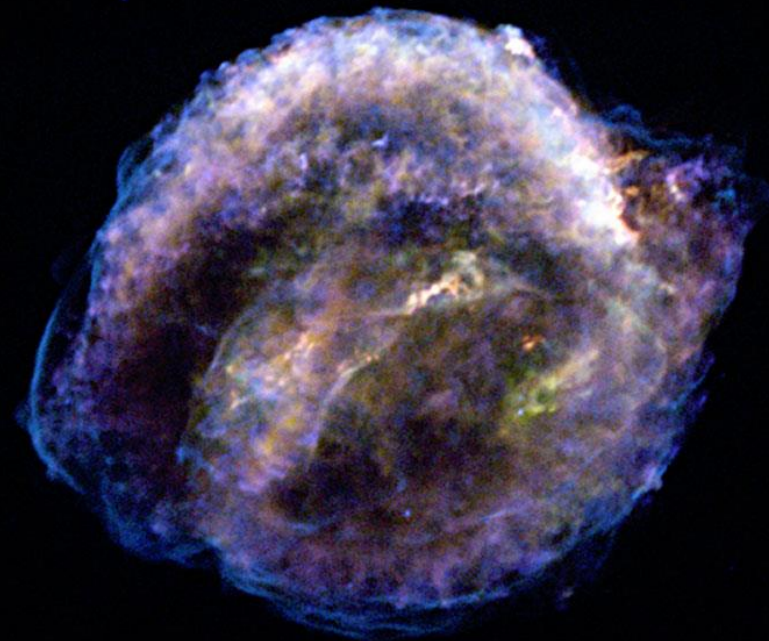
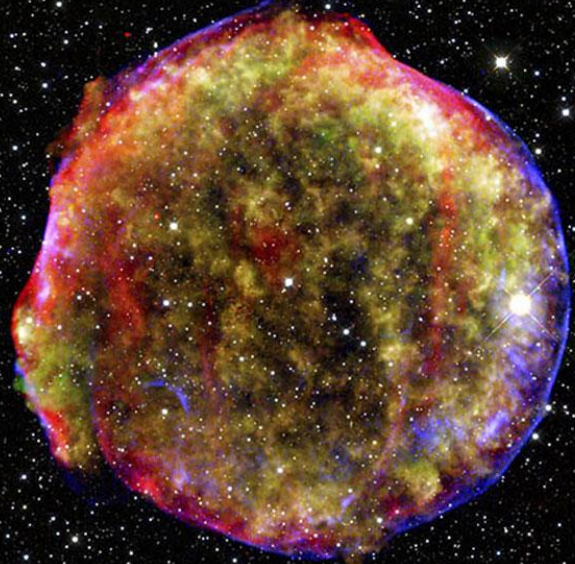


宇宙線組成は、太陽組成よりも重元素が多い。



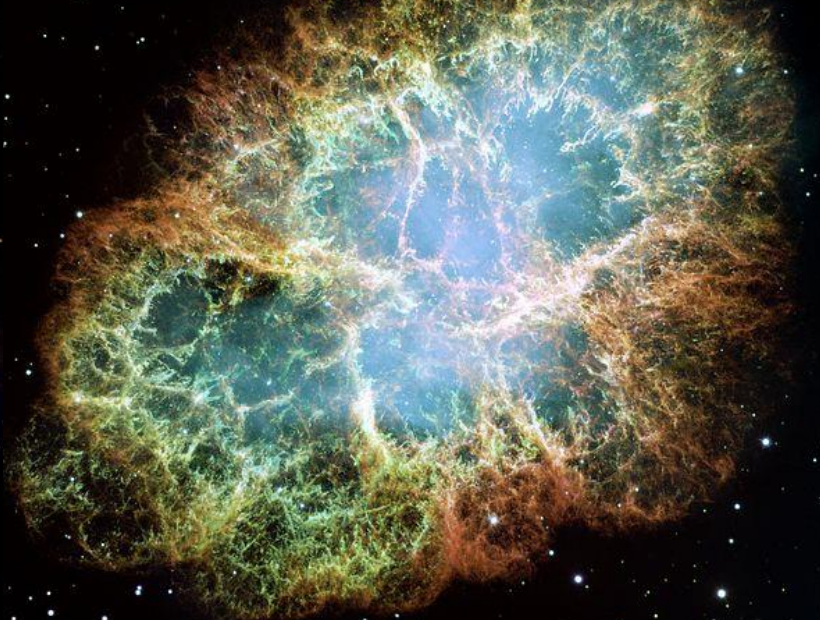
重元素をばら撒く超新星残骸が起源？

Hayakawa 1956, Hayakawa, Ito, Terashima 1958

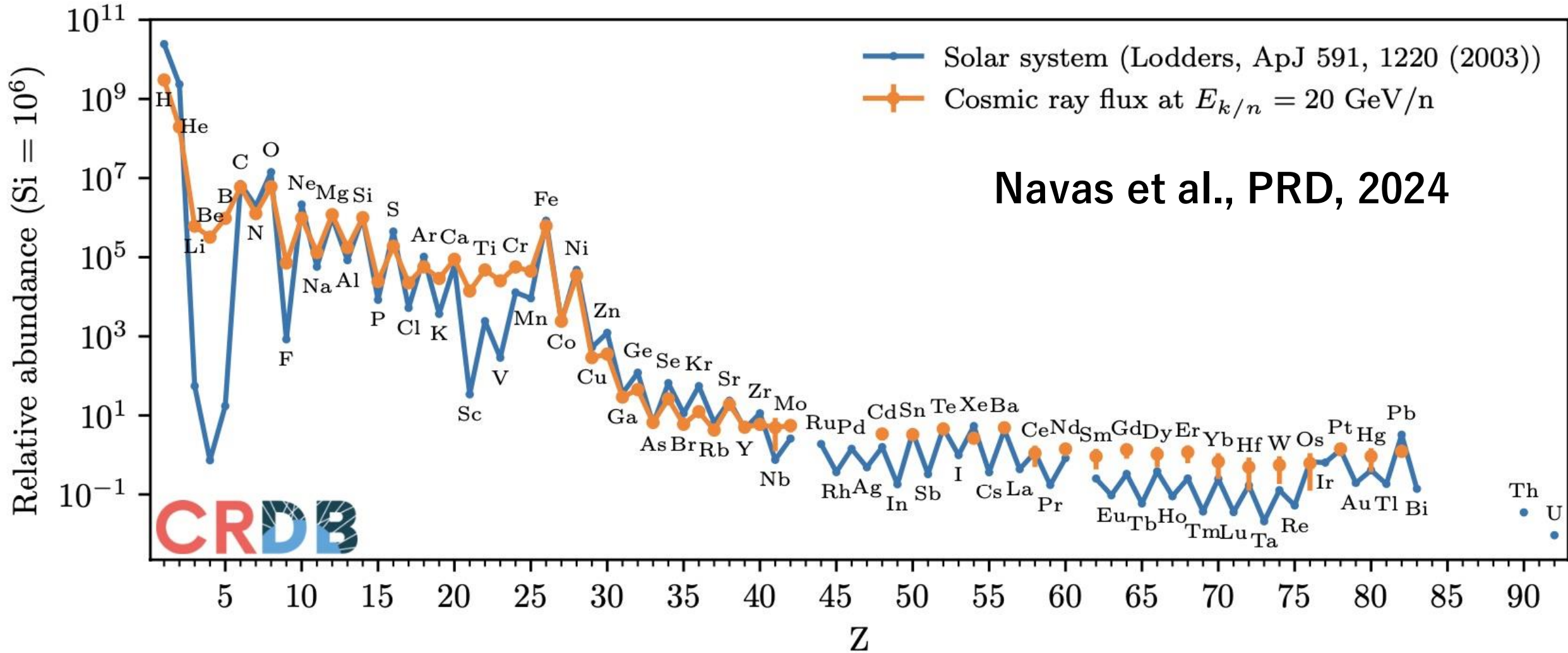


NASAのHPより

超新星残骸



CRの組成比

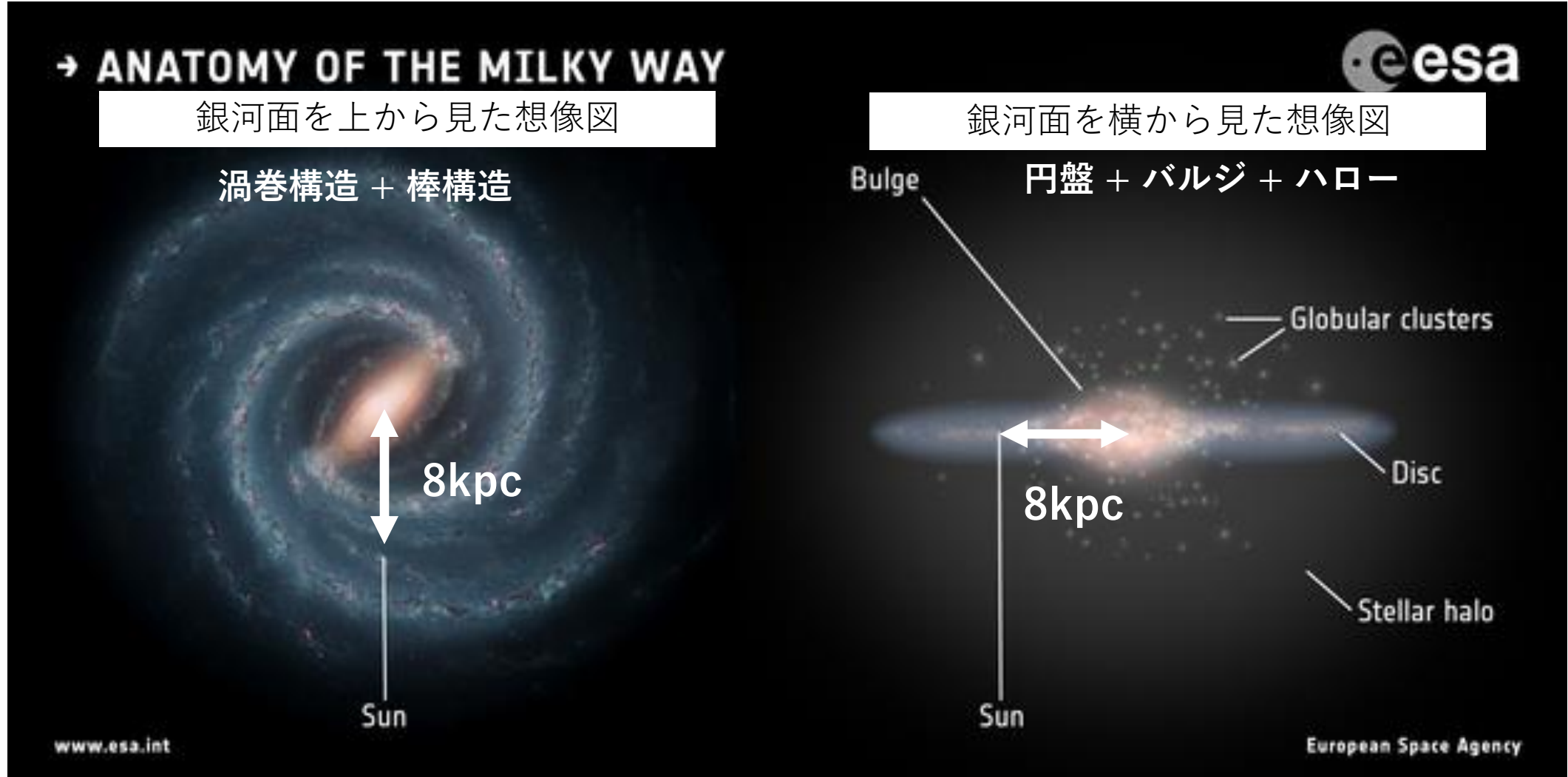


Li, Be, B は、C, N, O 起源の2次粒子。F は、Ne 起源の2次粒子。Sc, V, Ti, Cr, Mn は、Fe 起源の2次粒子。

天の河銀河

質量 $\sim 10^{12} M_{\text{sun}} \sim 10^{45} \text{ g}$ ($M_{\text{DM}} : M_{\text{gas}} : M_{\text{star}} \sim 84 : 12 : 4$)

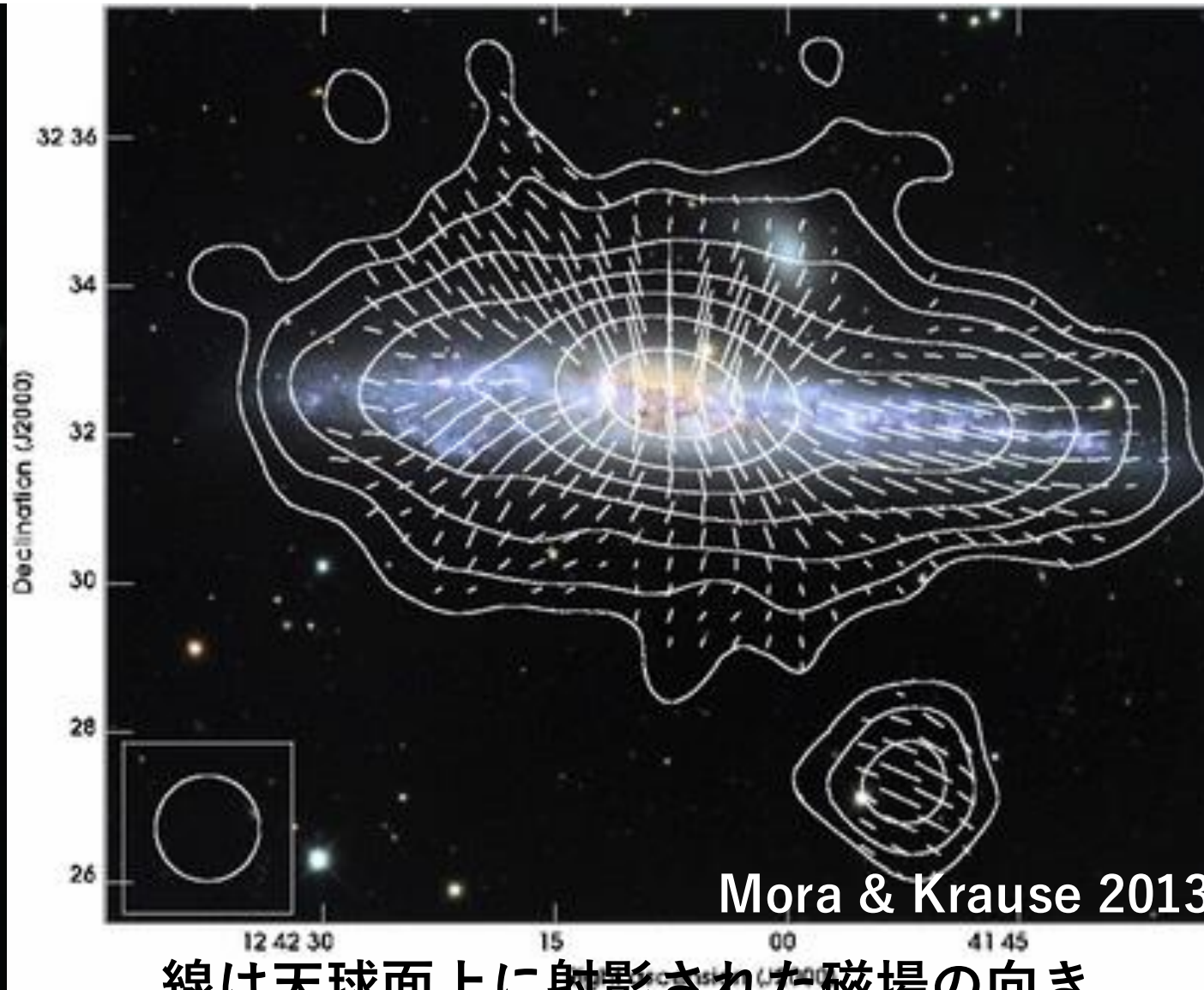
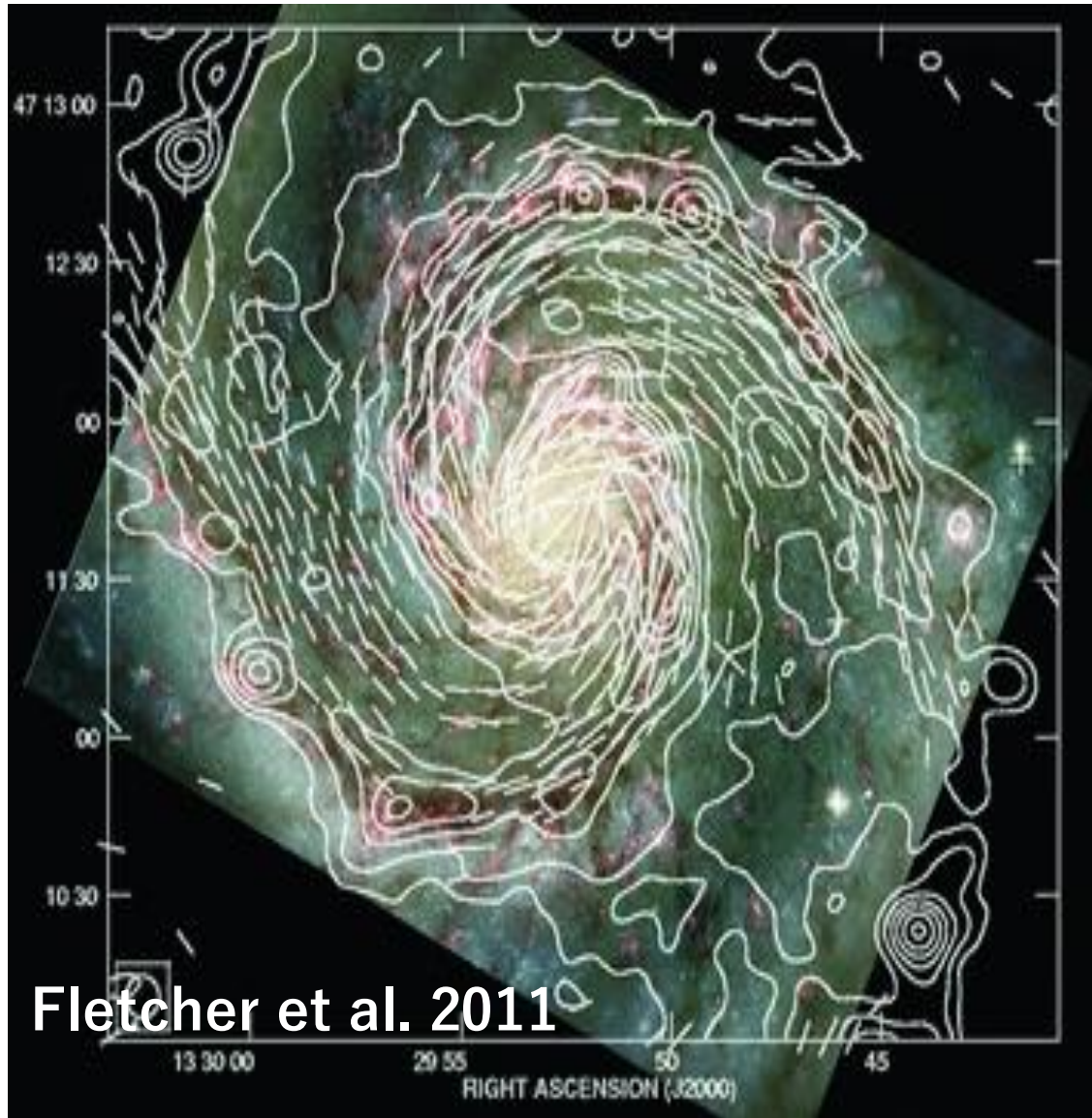
半径 $\sim 20 \text{ kpc} \sim 6 \times 10^{22} \text{ cm}$, ガスの垂直方向の厚み $\sim 0.2 \text{ kpc} \ll$ 半径



銀河の大極的磁場

M51 (face-on view)

NGC 4631 (edge-on view)



線は天球面上に射影された磁場の向き

銀河内の宇宙線の運動

一様磁場の場合、磁力線の周りの螺旋運動 → 宇宙線は磁力線に束縛される。

乱れた磁場の場合、複雑な運動 → 宇宙線は、拡散的に振る舞う。

$$\langle(\Delta x)^2\rangle \sim D_{xx} t, \quad D_{xx} \sim v l_{\text{mfp}}/3, \quad l_{\text{mfp}} = (B_0/\delta B_{\perp=\text{rg}})^2 r_g$$

$$r_g = cP/ZeB \propto E, \quad \delta B_{\perp=\text{rg}} = \delta B_{\perp=\text{rg}}(E) \rightarrow D_{xx} \propto E^\delta (\delta > 0)$$

$\delta B_{\perp=\text{rg}}$ は、ジャイロ半径と同じ波長を持つ磁場ゆらぎの強度

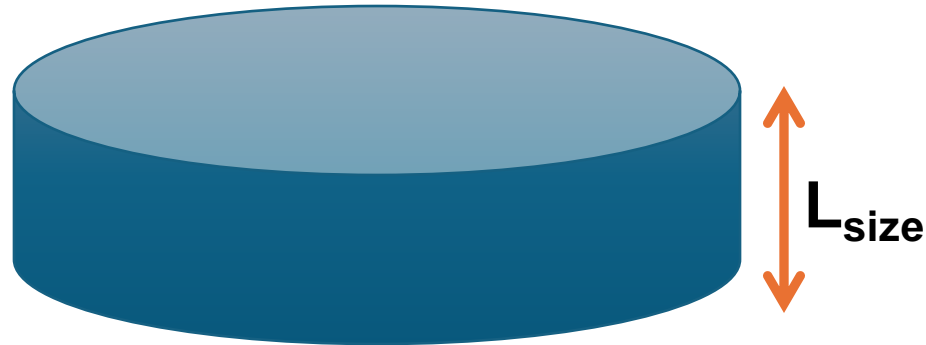
$$r_g(E=1\text{PeV}, B=3\mu\text{G}) \sim 1\text{pc}$$

$$\text{拡散時間: } t_{\text{diff}} \sim L^2/D_{xx} \propto E^{-\delta}$$

$$\text{拡散長: } R_{\text{diff}} \sim (D_{xx}t)^{0.5} \propto E^{0.5\delta}$$

1次宇宙線原子核(p, He, C, ..., Fe)の銀河内拡散

超新星残骸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)

$$\frac{d^2 N_{\text{CR}}}{dt dE} = - \frac{dN_{\text{CR}}/dE}{t_{\text{esc}}(E)} + Q_{s,1}(E) \xrightarrow{\text{定常}} \frac{dN_{\text{CR}}}{dE} = t_{\text{esc}}(E) Q_{s,1}(E)$$

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

$$D_{\text{xx}}(E) = D_0 (E/E_0)^\delta$$

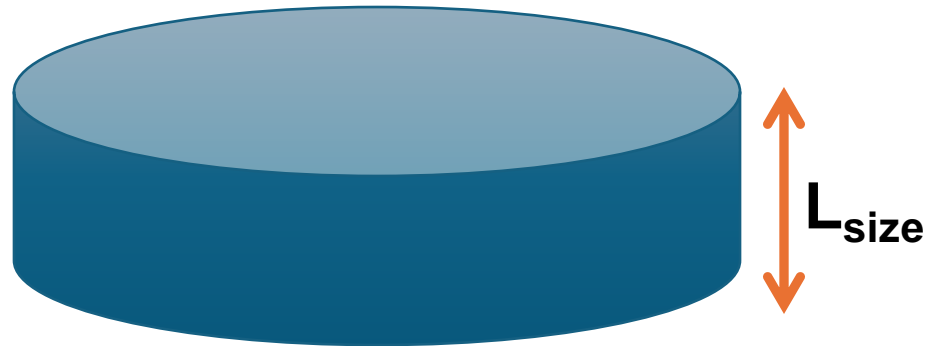
$$Q_{s,1}(E) = Q_0 (E/E_0)^{-s}$$

$$\frac{dN_{\text{CR}}}{dE} = \frac{L_{\text{size}}^2 Q_0}{D_0} (E/E_0)^{-(s+\delta)}$$

ジャイロ半径が同じ荷電粒子は同じスペクトルを予言.

2次宇宙線原子核(Li, Be, B, ..., p_{bar})の銀河内拡散

銀河内を伝搬中、1次宇宙線は2次宇宙線を生成する。



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)

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

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

$$D_{\text{xx}}(E) = D_0 (E/E_0)^\delta$$

$$Q_{s,2}(E) \propto \sigma_N dN_{\text{CR}1}/dE \propto \sigma_N (E/E_0)^{-(s+\delta)}$$

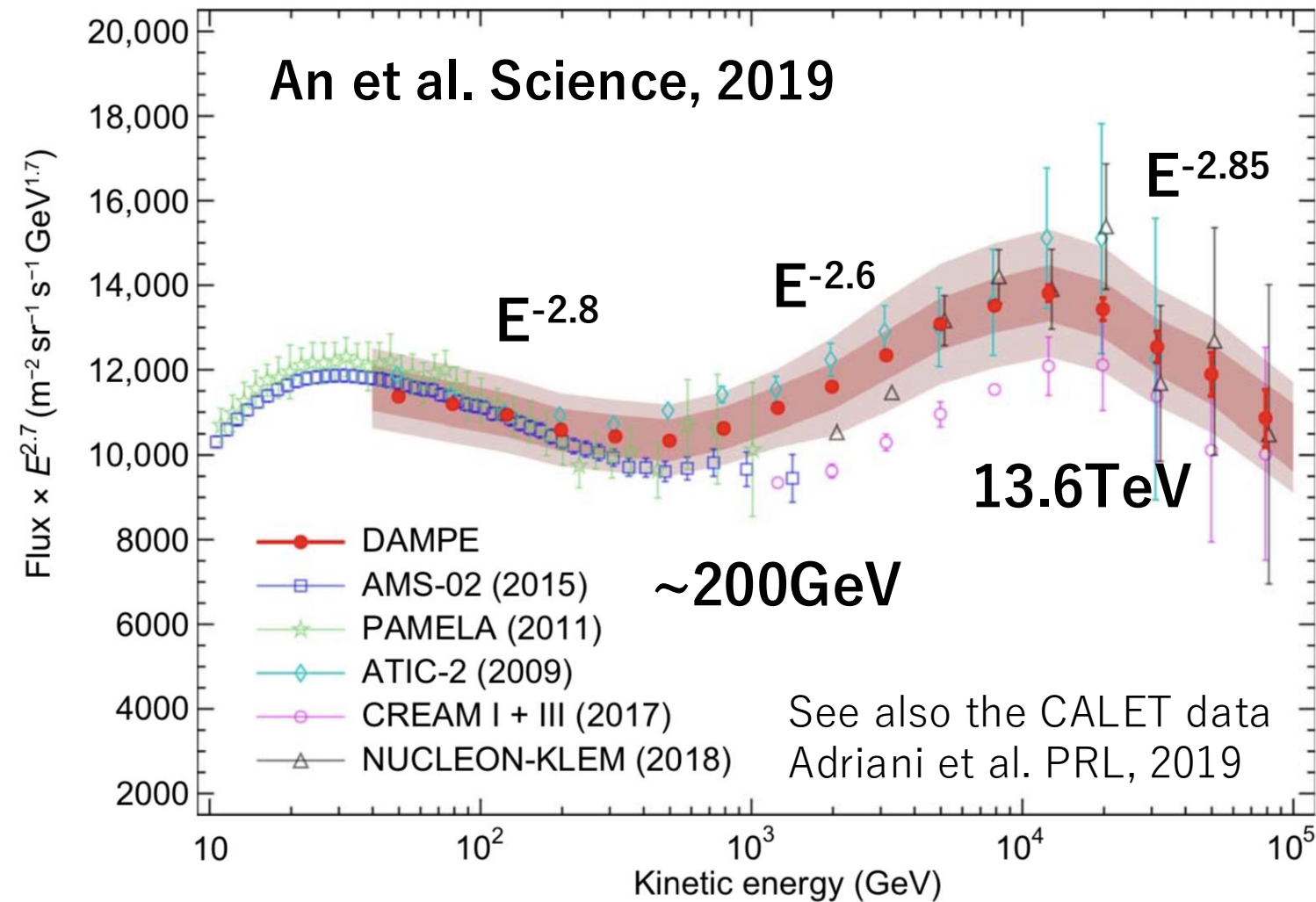
$$\frac{dN_{\text{CR}2}}{dE} \propto \sigma_N (E) (E/E_0)^{-(s+2\delta)}$$

$$\rightarrow \text{2次CR/1次CR} \propto \sigma_N (E) E^{-\delta}$$

2次宇宙線の注入スペクトルは、 $dN_{\text{CR}1}/dE$ に比例する。

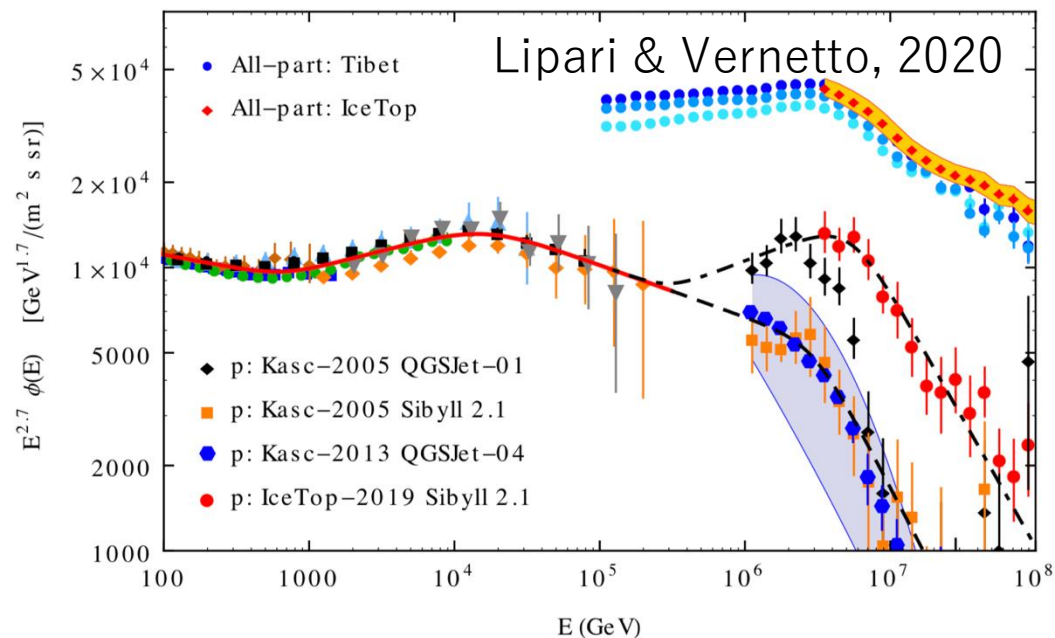
安定核2次宇宙線と不安定核2次宇宙線からわかることの説明を加える予定。

宇宙線陽子のエネルギースペクトル



標準モデルの予言

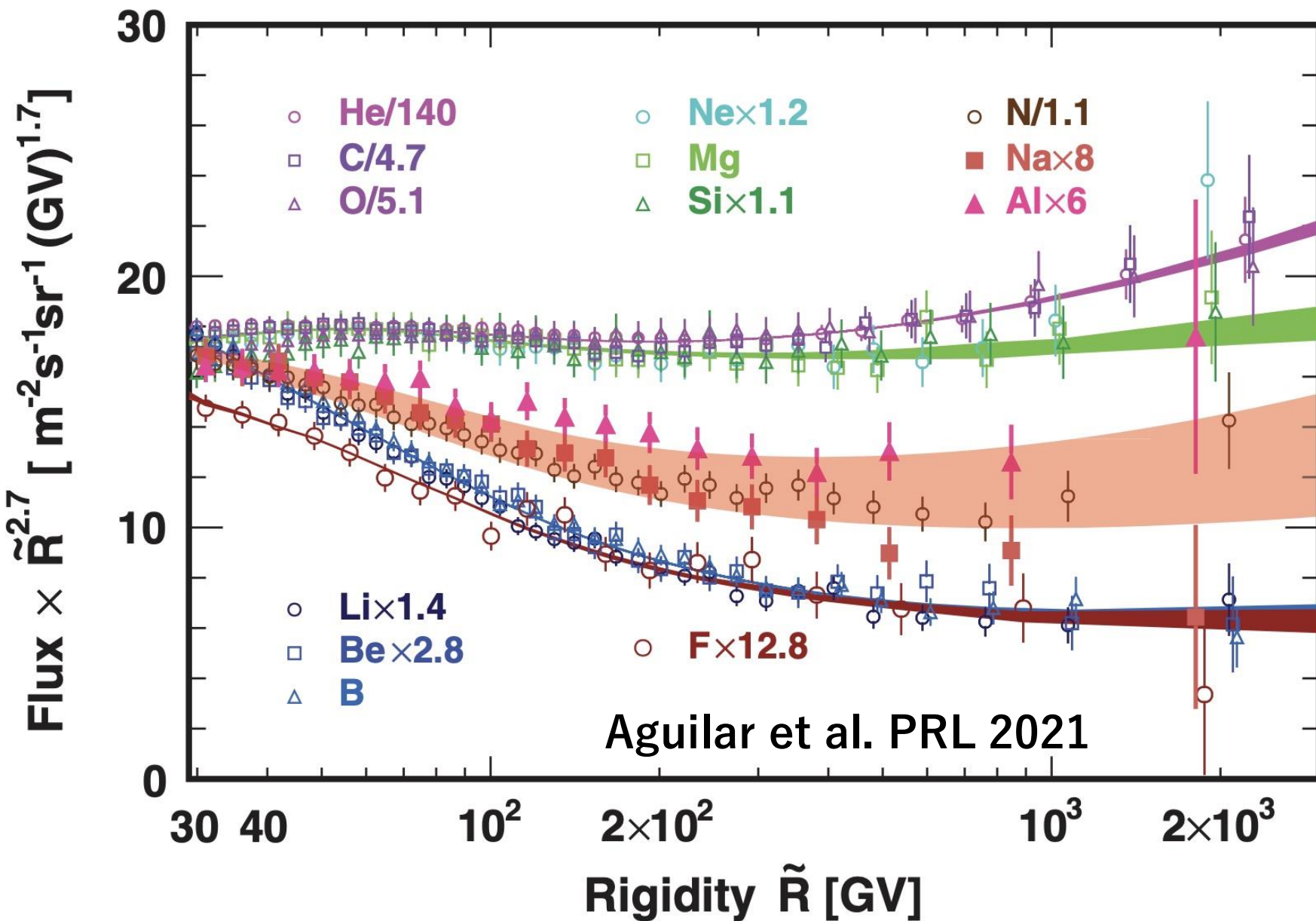
$$\frac{dn_{p,CRn}}{dE} \propto E^{-(s+\delta)}$$



PeV付近の観測と比べると、
 $E \sim 10^{14.5}$ eVで折れ曲がり？

観測データは、 $D_{xx}(E)$ または $Q_{s,1}(E)$ または両方が単純な1つのべき型でないことを示す。

様々な原子核のエネルギースペクトル



全ての成分でR~200GVに折れ曲がりあり。

He, C, O ---1次

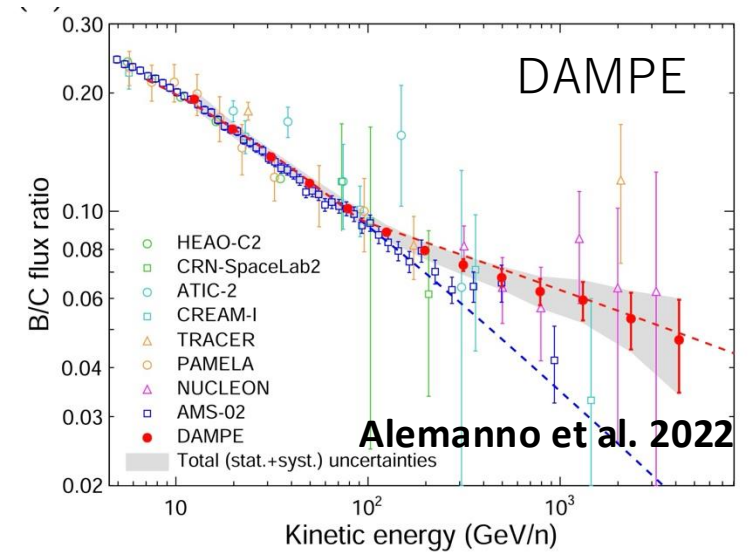
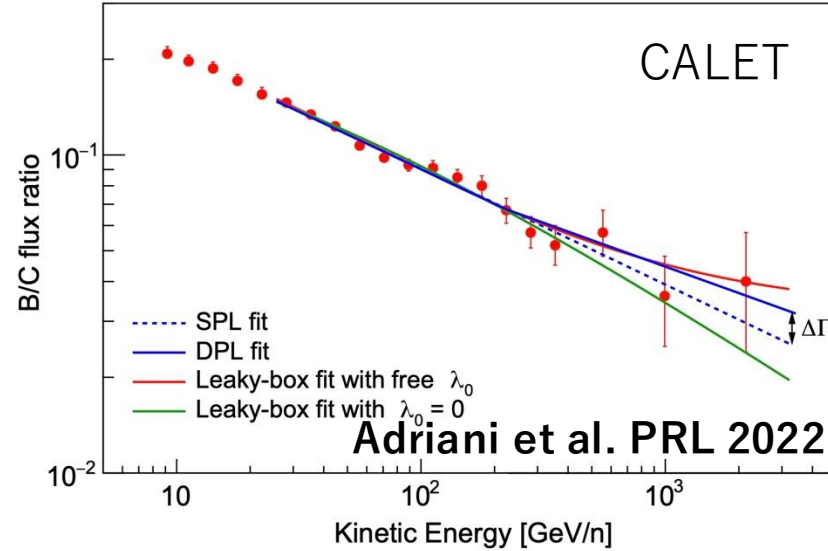
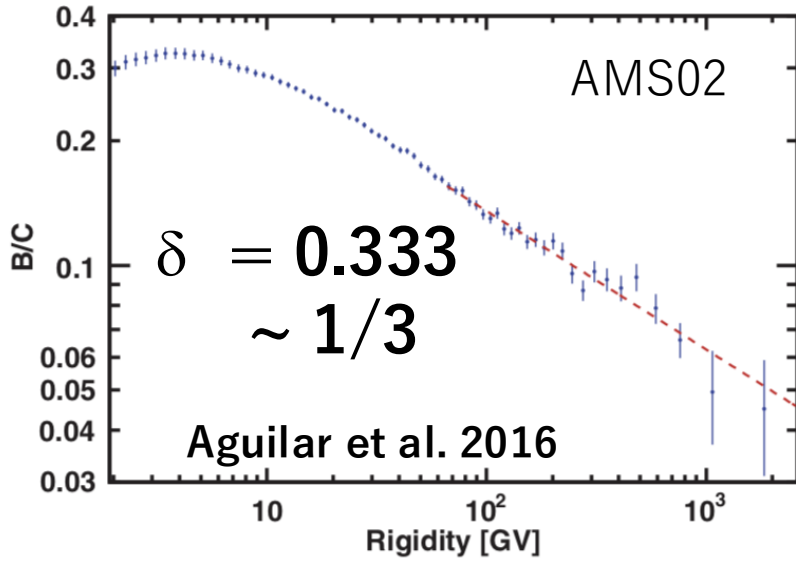
Ne, Mg, Si ---1次

N, Na, Al ---1次+ 2次

Li, Be, B, F--- 2次

R ~ 10TVは、
CALETとDAMPE
の統計が貯まるのを待つ

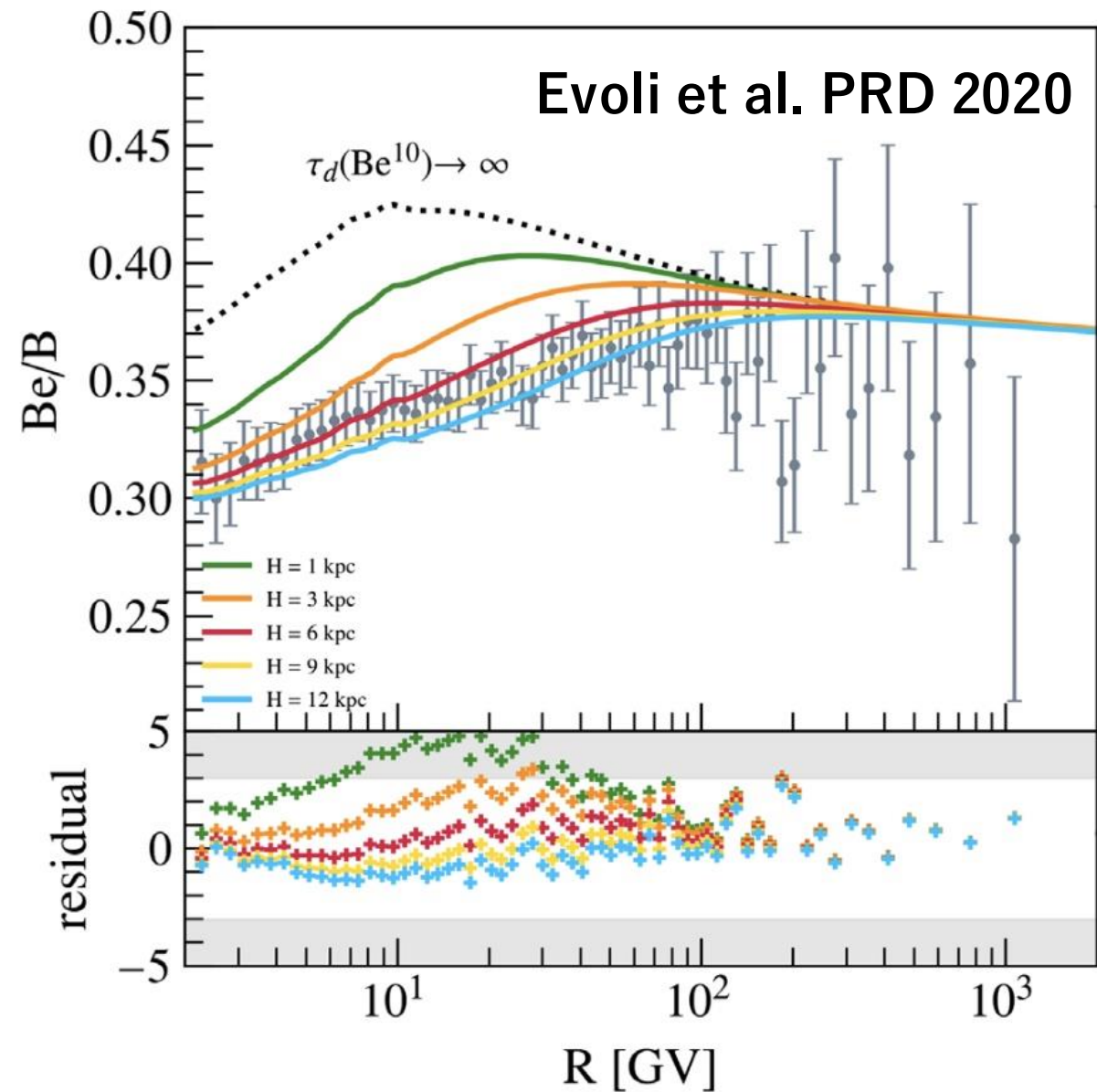
2次宇宙線/ 1次宇宙線(B/C, Be/C, Li/C, ...)



$$\frac{dN_{\text{CR2}}}{dE} / \frac{dN_{\text{CR1}}}{dE} \propto \sigma_N(E) E^{-\delta} \quad \begin{matrix} s + \delta = 2.85 \\ \delta = 0.333 \end{matrix} \quad \rightarrow s \sim 2.5$$

1次宇宙線のR~200GVでの折れ曲がり、 $D_{xx}(E)$ のエネルギー依存性がそこで折れているから。 $\sigma_N(E) \propto E^0$ を仮定している。

安定 2 次宇宙線 ^{11}B と不安定 2 次宇宙線 ^{10}Be



安定 2 次宇宙線 / 1 次宇宙線 $\propto L_{\text{size}} / D_0$

不安定 2 次宇宙線 / 安定 2 次宇宙線 $\propto L_{\text{size}} / D_0^{1/2}$

→ 2 つの観測量から、
宇宙線の銀河スケールの広がり L_{EB} と
拡散係数の絶対値 D_0 を独立に抜き出せる。

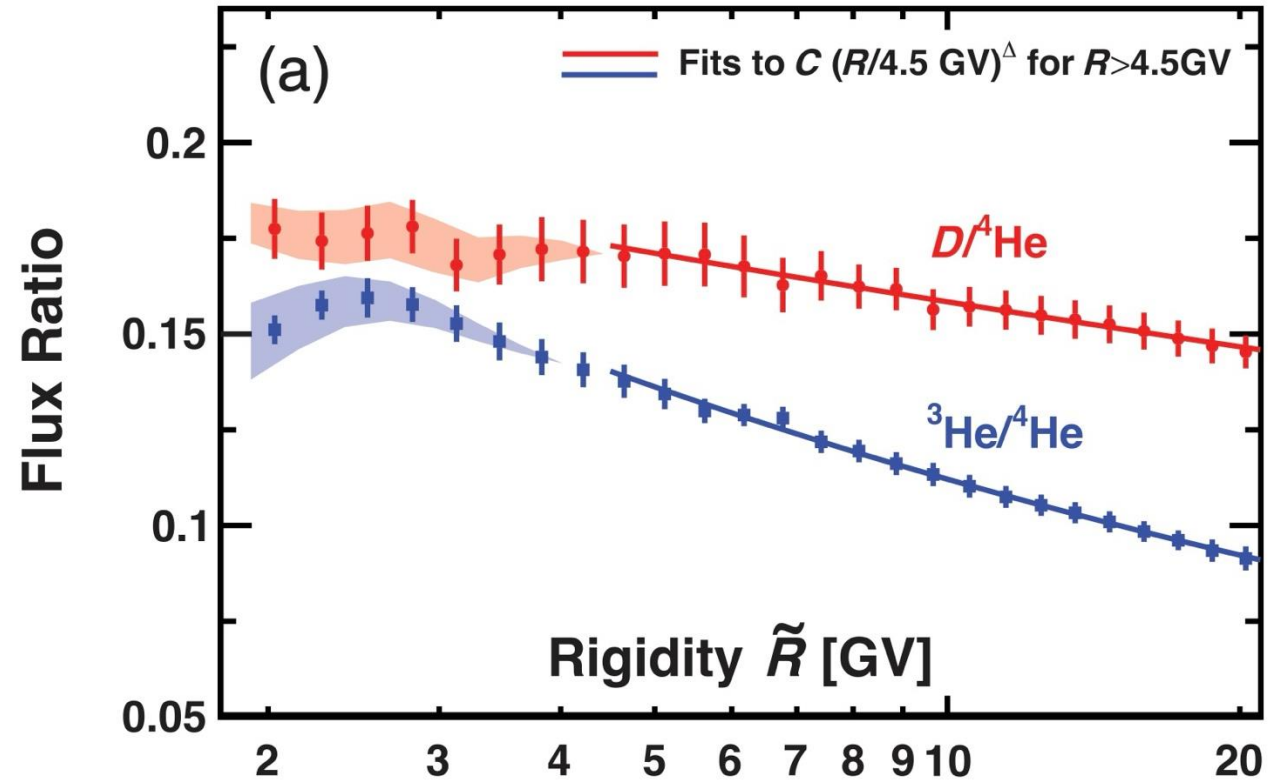
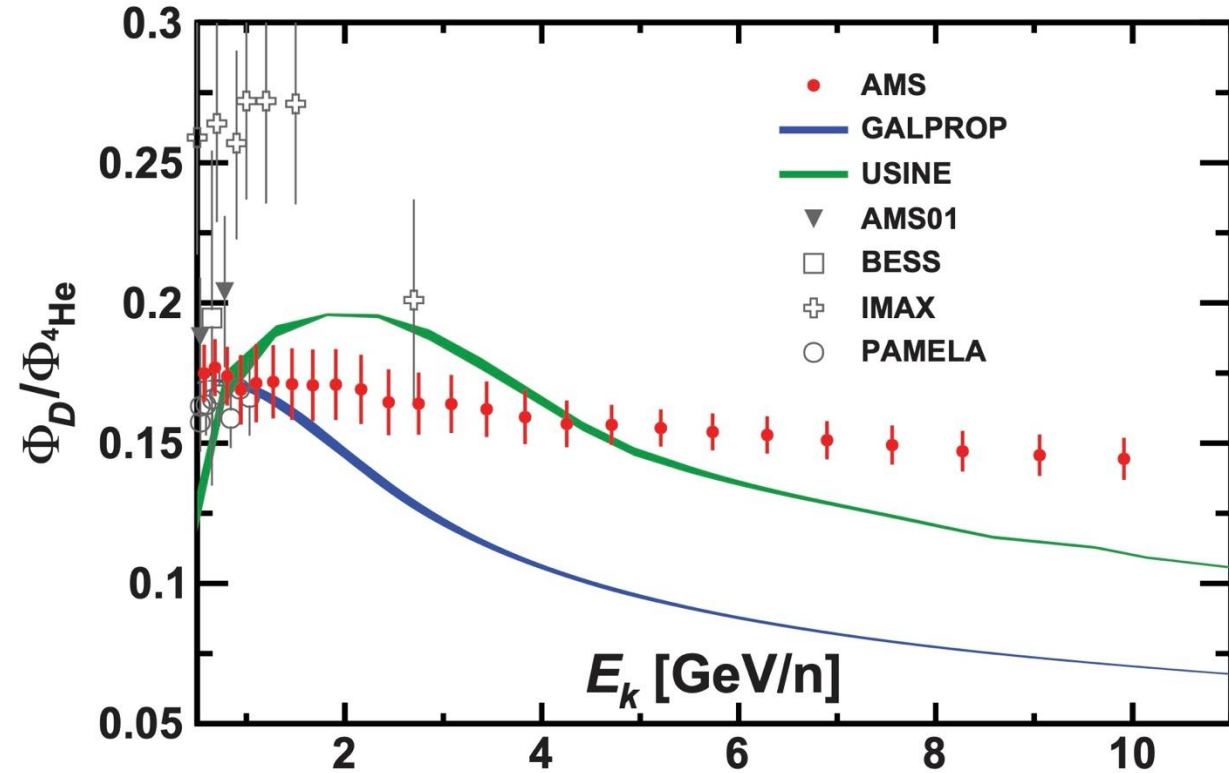
最新の AMS-02 の結果を説明するには、
宇宙線の銀河スケールの広がり

$$L_{\text{EB}} > \sim 6 \text{ kpc}$$

Evoli et al. PRD 2020

D/⁴He, ³He/⁴He,

Aguilar et al. PRL 2024

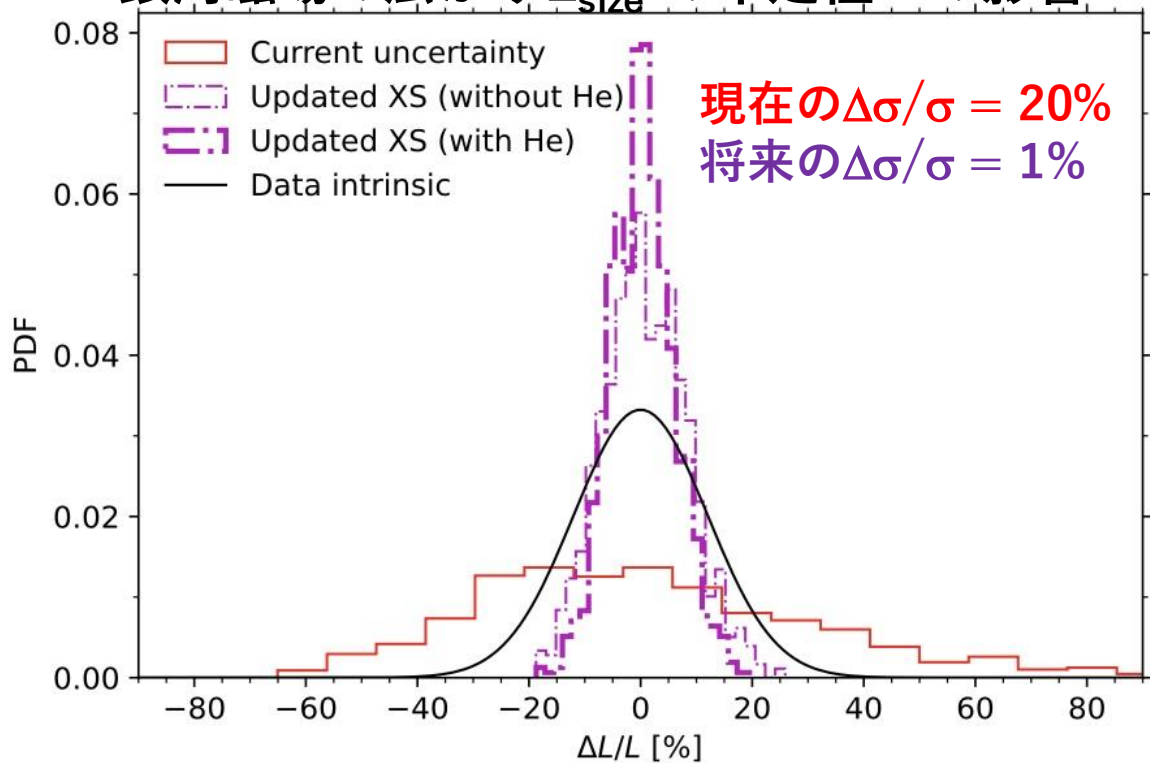


D と ³He は、⁴He の2次宇宙線とされていた。

⁴He と C の伝搬が同じなら、B/C, D/⁴He, ³He/⁴He のエネルギー依存性は同じと期待。でも、観測はそうではない。⁴HeとCの伝搬が違う？ Dが1次宇宙線として加速？

断面積の不定性が与える影響

銀河磁場の広がり L_{size} の不定性への影響

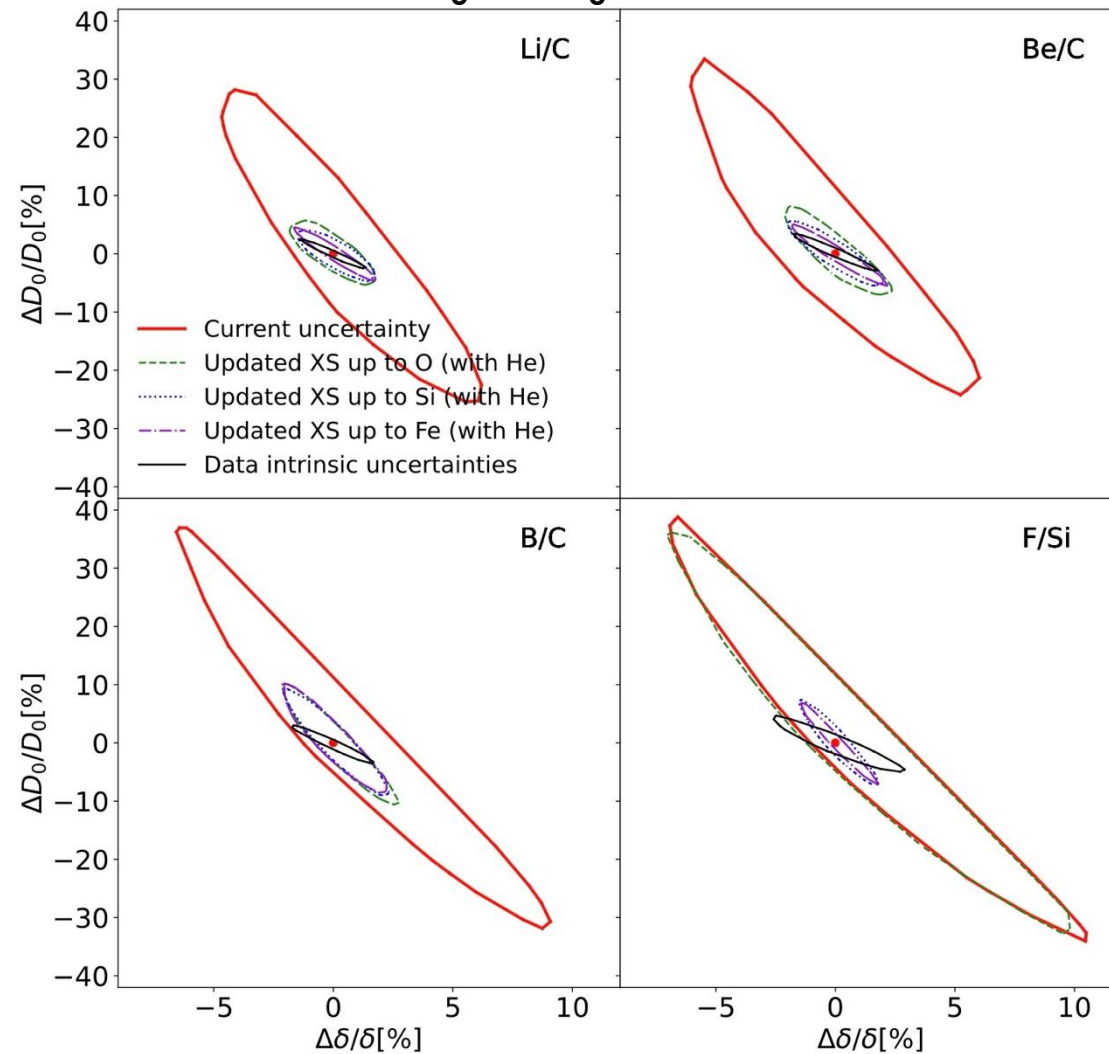


Génolini et al., PRC, 2024

現在の断面積の精度だと赤線 $\Delta L/L \sim 30\%$

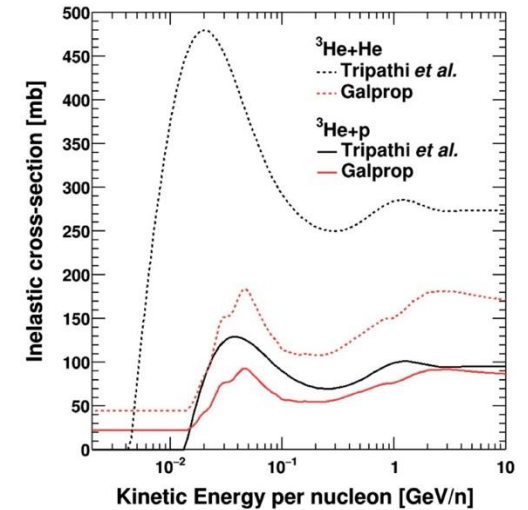
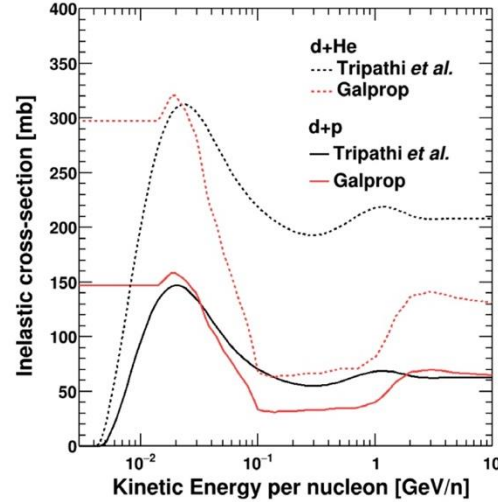
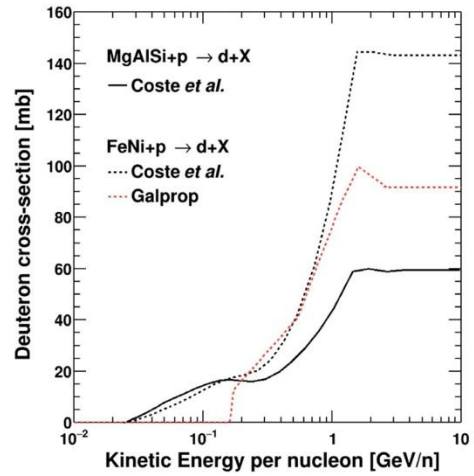
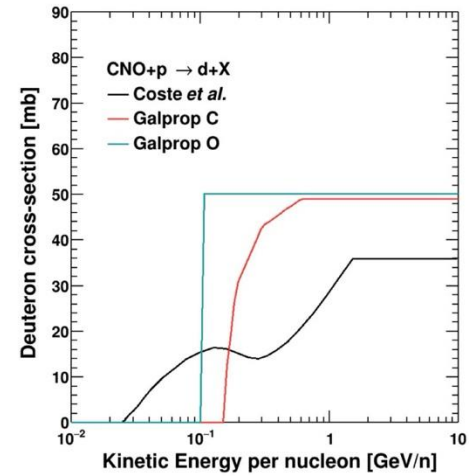
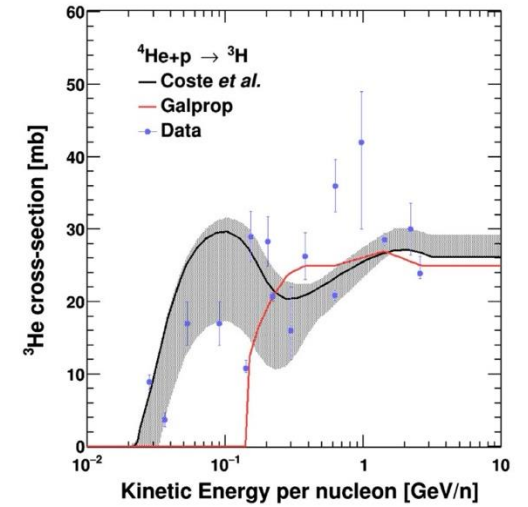
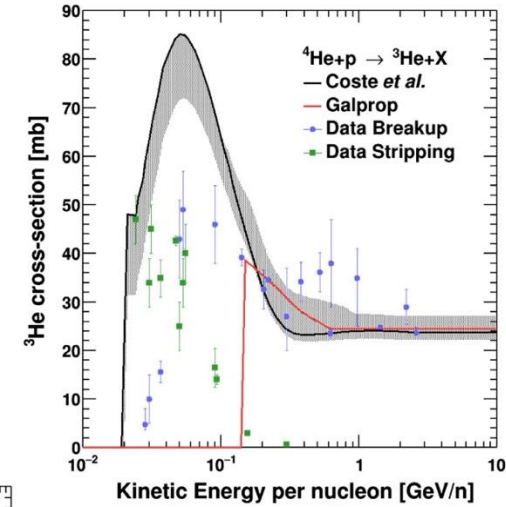
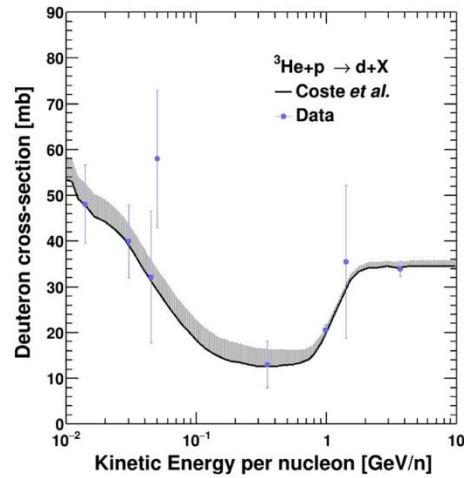
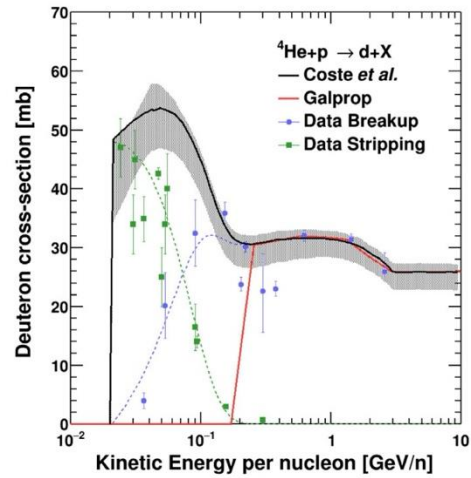
将来の断面積の精度だと紫線 $\Delta L/L \sim 5\%$

拡散係数 $D = D_0(E/E_0)^\delta$ の不定性への影響



Génolini et al., PRC, 2024

Dと ^3He に関する断面積の不定性



D, ^3He の生成断面積やD, ^3He の非弾性散乱の断面積などの不定性が大きい。
Dや ^3He の宇宙線観測の結果を有効活用できない。

銀河宇宙線と原子核断面積 との関係に関する文献

- Génolini et al., PRC, 109, 064914 (2024)
- Génolini et al., PRC, 98, 034611 (2018)
- Gomez-Coral et al., PRD, 107, 123008 (2023)
- Weinrich et al., A&A, 639, A131 (2020)
- Maurin et al., A&A, 667, A25 (2022)
- Maurin et al., A&A, 668, A7 (2022)
- Evoli et al. PRD, 99, 103023 (2019)