

銀河系内宇宙線の起源

～理論的研究を中心に～

川中 宣太 (京大基研)

研究会「宇宙線で繋ぐ文明・地球環境・太陽系・銀河」@京都大学理学研究科セミナーハウス
2022.10.25-26

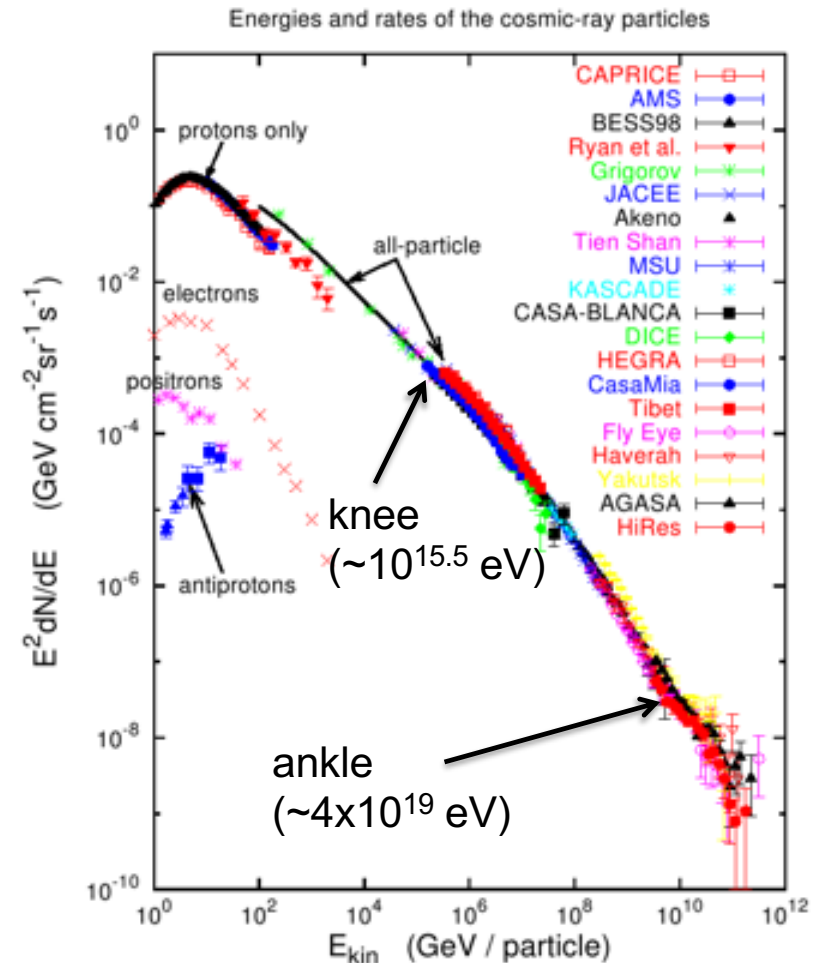
銀河系内宇宙線の起源 ～現象論的研究を中心に～

川中 宣太 (京大基研)

研究会「宇宙線で繋ぐ文明・地球環境・太陽系・銀河」@京都大学理学研究科セミナーハウス
2022.10.25-26

銀河系内宇宙線 (Galactic Cosmic-Ray)

- 地球に降り注ぐ宇宙線のうち、knee ($\sim 10^{15.5}$ eV \sim 3 PeV)以下のエネルギーのものは銀河系内起源と考えられている
- 主に陽子、原子核。電子や反粒子 (陽電子、反陽子など)も。
- ≥ 10 GeV 以上ではスペクトルはほぼ単一のべき ($\propto E^{-2.7}$)でフィットできる
- エネルギー密度 ~ 1 eV cm $^{-3}$ (CMB や星間磁場とほぼ同じ)
- knee と ankle の間についてはよく分かっていない (銀河系内? 外?)



宇宙線源としての超新星残骸

銀河系の体積 $\pi(10 \text{ kpc})^2 \times 1 \text{ kpc} \sim 10^{67} \text{ cm}^3$
~ GeV 宇宙線の銀河系内滞在時間 $\sim 10^7 \text{ yr}$ (後述)より、
宇宙線へのエネルギー注入レートは

$$\dot{E}_{\text{CR}} \sim \frac{10^{67} \text{ cm}^3 \cdot 1 \text{ eV cm}^{-3}}{10^7 \text{ yr}} \sim 3 \times 10^{40} \text{ erg s}^{-1}$$

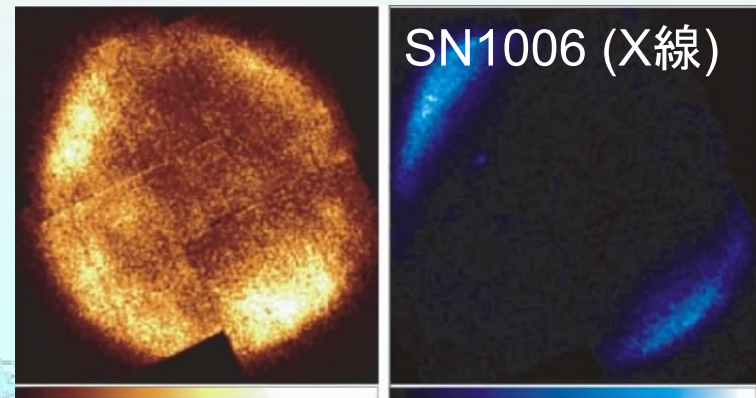
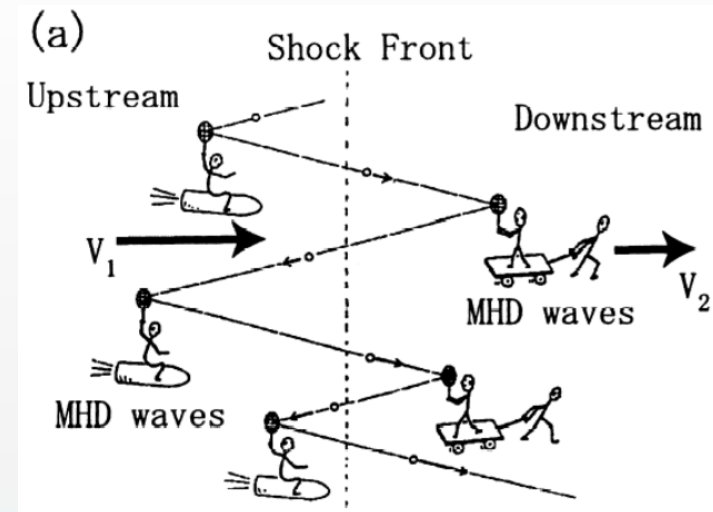
超新星爆発が銀河系内で~100年に1度起こるとすると、
そのエネルギー放出レートは

$$\dot{E}_{\text{SN}} \sim \frac{10^{51} \text{ erg}}{100 \text{ yr}} \sim 3 \times 10^{41} \text{ erg s}^{-1}$$

∴ ~10%を使えば宇宙線にエネルギーを供給可能

超新星残骸における衝撃波統計加速

- 超新星爆発のイジェクタが星間物質と衝突、**衝撃波**を形成
- 粒子が衝撃波の上流と下流を往復しながら加速 → **$\sim E^{-2}$ のスペクトル**
← 詳細は昨日の鈴木さんの講演
- X線観測: 非熱的電子起源の放射(シンクロトロン)が見える (Koyama+ 1995; 右下図)
- γ 線観測: pp 反応起源と考えられる放射が見える (Ackermann+ 2013 etc.)
← 詳細はこの後の佐野さんの講演



電子・陽子が超新星残骸の衝撃波で加速されていることは確かだろう

宇宙線の伝搬過程

荷電粒子なので、銀河系内の乱流磁場により
方向を曲げられながらランダムウォーク

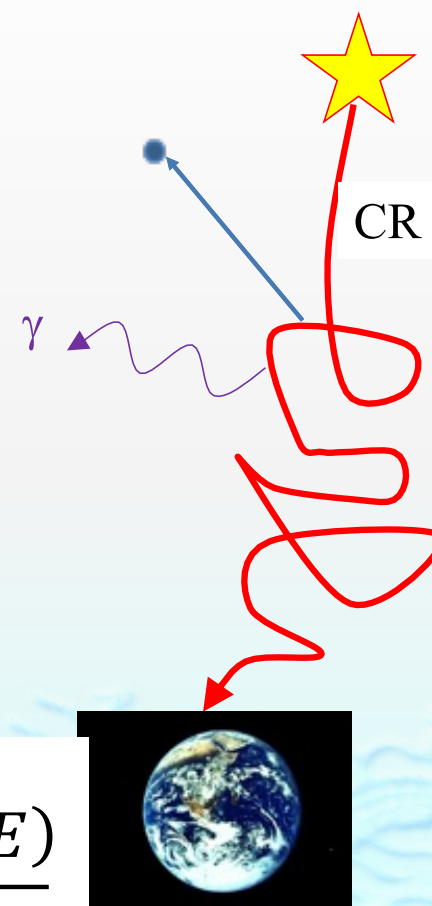
→ 拡散近似で記述

拡散係数：一般に磁場の乱れのスペクトル($\propto k^{-\beta}$)
によって決まり、宇宙線粒子のエネルギーに依存

→ $D \propto E^{2-\beta}$ (例：コルモゴロフ乱流なら $D \propto E^{1/3}$)

伝搬中のエネルギー損失(放射・2次粒子生成・破砕)
を含む最も単純な伝搬の方程式は

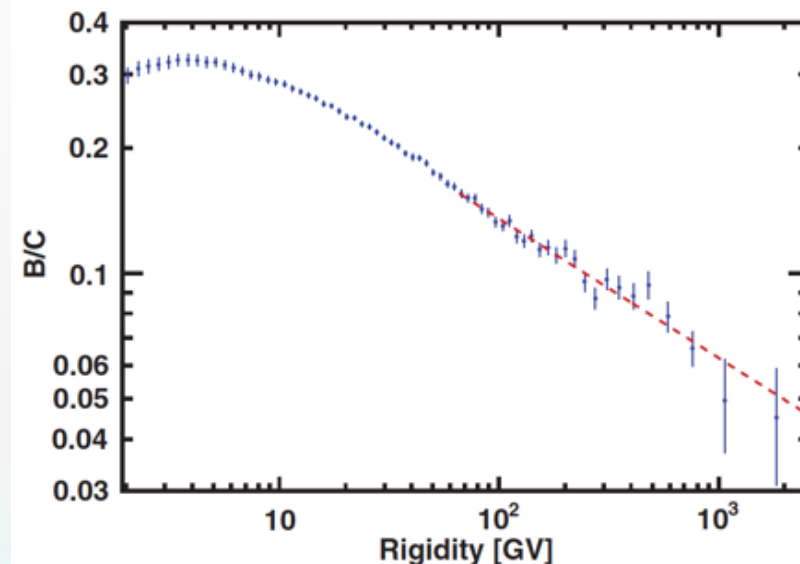
$$\frac{\partial}{\partial t} f(t, \vec{r}, E) = \underbrace{D(E) \nabla^2 f}_{\text{拡散}} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial E} [P(E) f]}_{E \text{ 損失}} + \underbrace{Q_{\text{CR}}(t, \vec{r}, E)}_{\text{ソース項}}$$



拡散係数のべきの測定: B/C ratio

宇宙線に含まれる Li, Be, B 原子核は超新星残骸で加速されたのではなく、星間空間を伝搬中に重い元素 (C, N, O,...) が破碎されて作られる (secondary origin)

このとき2次/1次原子核の比は1次原子核の銀河系内滞在時間 ($t_{esc} \propto D^{-1}$) によって決まる



AMS-02 coll. 2016, PRL

→ (例えば) B/C ratio のエネルギー依存性から拡散係数のべきが分かる

AMS-02 (2016) の結果 → $D \propto E^\delta$ として $\delta = 0.333 \pm 0.014 \pm 0.005$

(コルモゴロフ乱流と極めて整合的)

観測される宇宙線スペクトル

単位時間あたりの銀河系内全ての超新星残骸からの宇宙線へのエネルギー供給を $Q_{\text{CR}}(E)$ とすると、

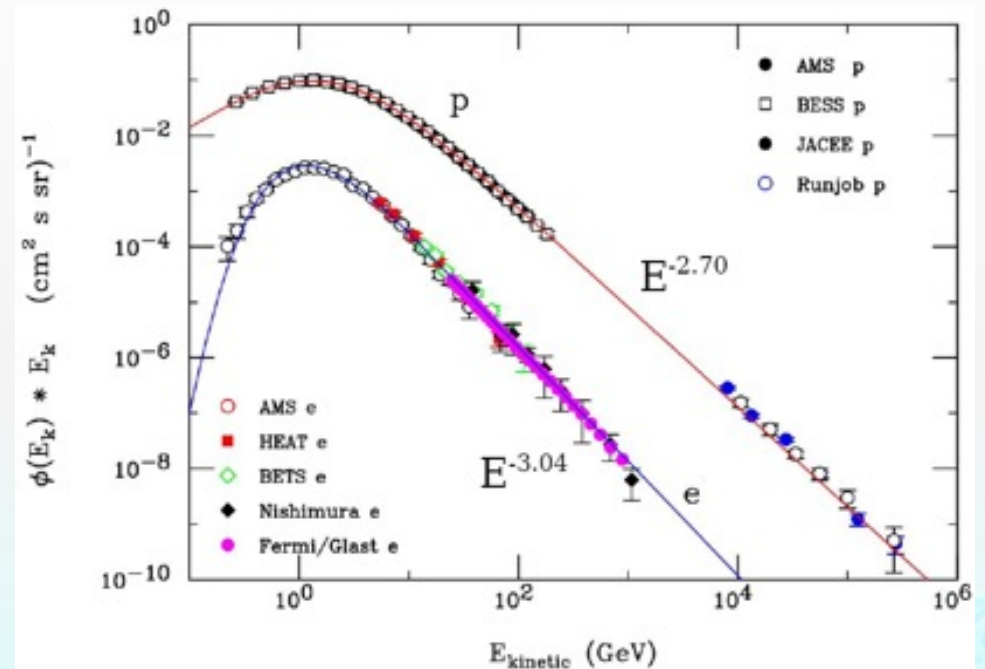
$$\frac{dN_{\text{CR}}}{dt} = -\frac{N_{\text{CR}}}{t_{\text{esc}}} + Q_{\text{CR}} \quad \xrightarrow{\text{定常状態では}} \quad \boxed{N_{\text{CR}} = t_{\text{esc}} \cdot Q_{\text{CR}}}$$

∴ 地球で観測される宇宙線のべきは、超新星残骸から放出されたものよりも拡散係数の分だけ steep になる
(i.e., $D \propto E^\delta$, $Q_{\text{CR}} \propto E^{-\alpha}$ なら $N_{\text{CR}} \propto E^{-\alpha-\delta}$)

宇宙線源でのスペクトル $\propto E^{-2}$, 拡散係数 $\propto E^{-0.333} \rightarrow N_{\text{CR}} \propto E^{-2.333}$
(実際は $\propto E^{-2.7}$ なので少しずれてる?)

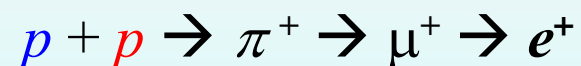
宇宙線電子 (e^-)

- フラックス: 陽子の $\sim 1\%$
- (少なくとも一部は) 超新星残骸で加速 (X線観測)
- 高エネルギーになるほど、伝播中速くエネルギー損失 (synchrotron / inverse Compton scattering)
- 生成時は陽子と同じスペクトルでも、観測されるときは陽子より steep
- $\sim 1\text{-}2 \text{ kpc}$ より遠方からは地球まで到達できない

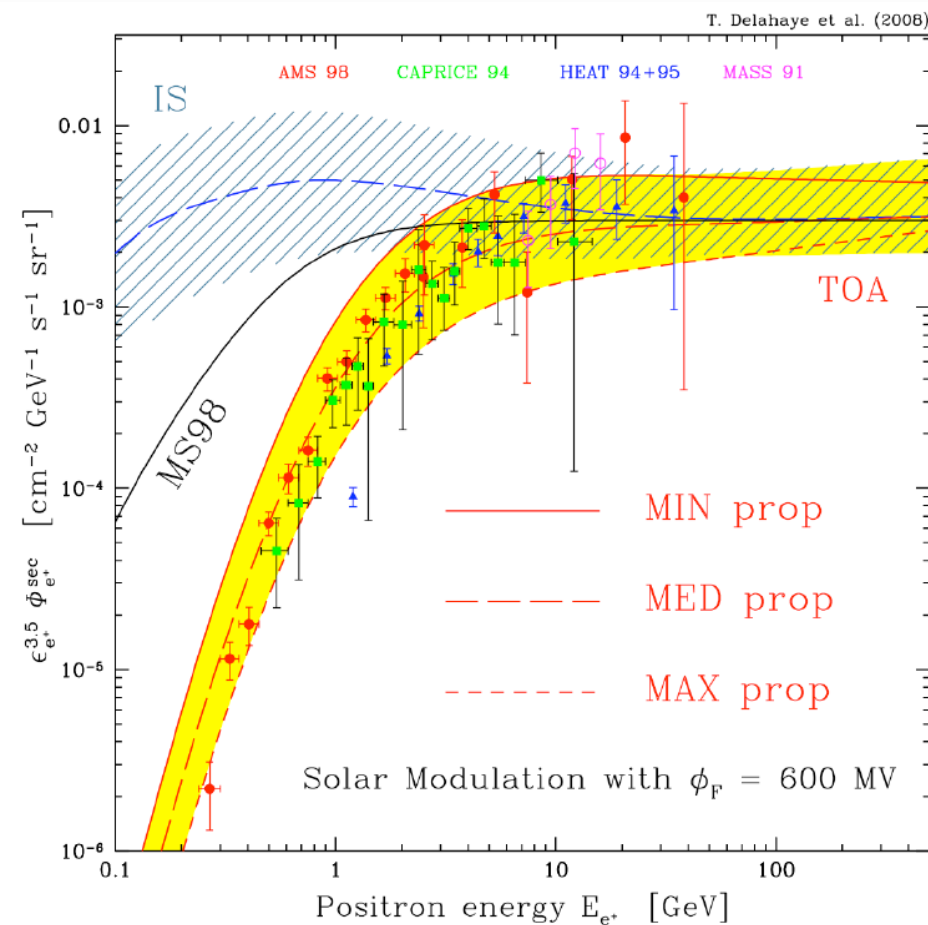


宇宙線陽電子 (e^+)

- フラックス: 電子の $\sim 10\%$ (陽子の $\sim 0.1\%$)
- 電子と同様にエネルギーを失う (synchrotron/inverse Compton scattering)
- “標準”モデルでは、宇宙線陽子と星間物質中の陽子との相互作用で生成



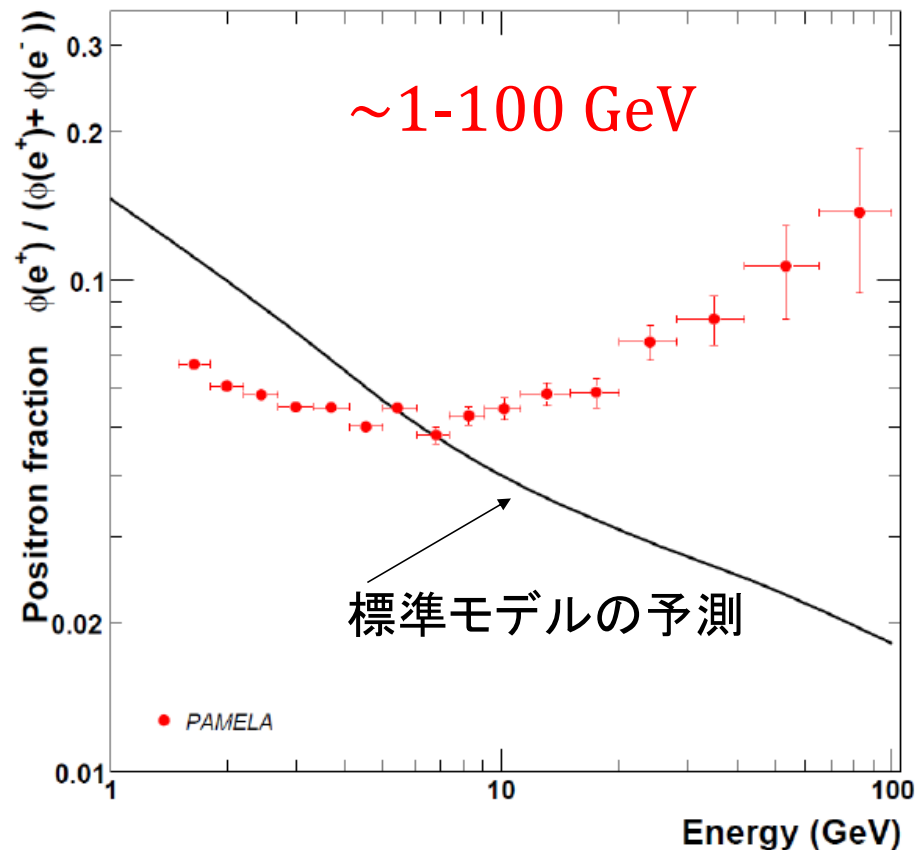
... secondary origin



ここまでのまとめ

- 「knee 以下 (\sim PeV 以下)の宇宙線は銀河系内の超新星残骸の衝撃波で生成された」とほとんどの人が信じてきた
- 宇宙線の伝搬の様子は拡散過程で近似される
- 宇宙線は primary origin (p, He, C, e, ...) と secondary origin (Li, Be, B, e^+ , ...) に分けられ、secondary は primary より steep なスペクトルになる \rightarrow 拡散係数の測定
- 宇宙線電子・陽電子は伝搬中の放射にによるエネルギー損失が無視できないため、その起源は地球のごく近傍に限られる

PAMELA : 陽電子超過の発見



(Adriani et al. 2008)

- 磁石により、電子/陽電子の区別が可能
- 宇宙線中の陽電子比 $e^+/(e^+ + e^-)$ がエネルギーとともに上昇していることを発見
- 宇宙線の標準モデルではありえない傾向 (次頁で解説)
- 別の陽電子源が必要?

なぜ PAMELA の結果が不思議なのか？

宇宙線陽電子は陽子の伝播中に生成される (secondary)

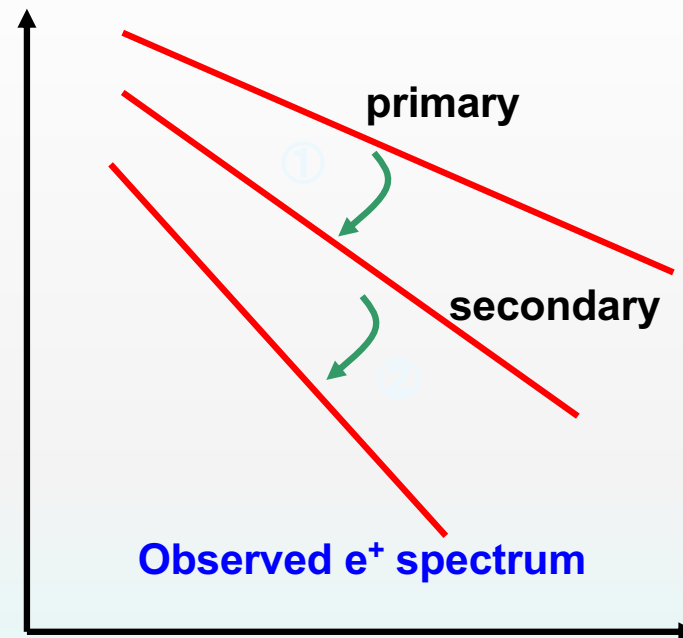
高エネルギーの陽子ほど、早く銀河系から脱出する

高エネルギーの陽電子ほど、その生成される数は少ない: ①

→ 生成された陽電子は、エネルギーが高いものほど伝播中のエネルギー損失が大きく、また銀河系からも早く脱出する: ②

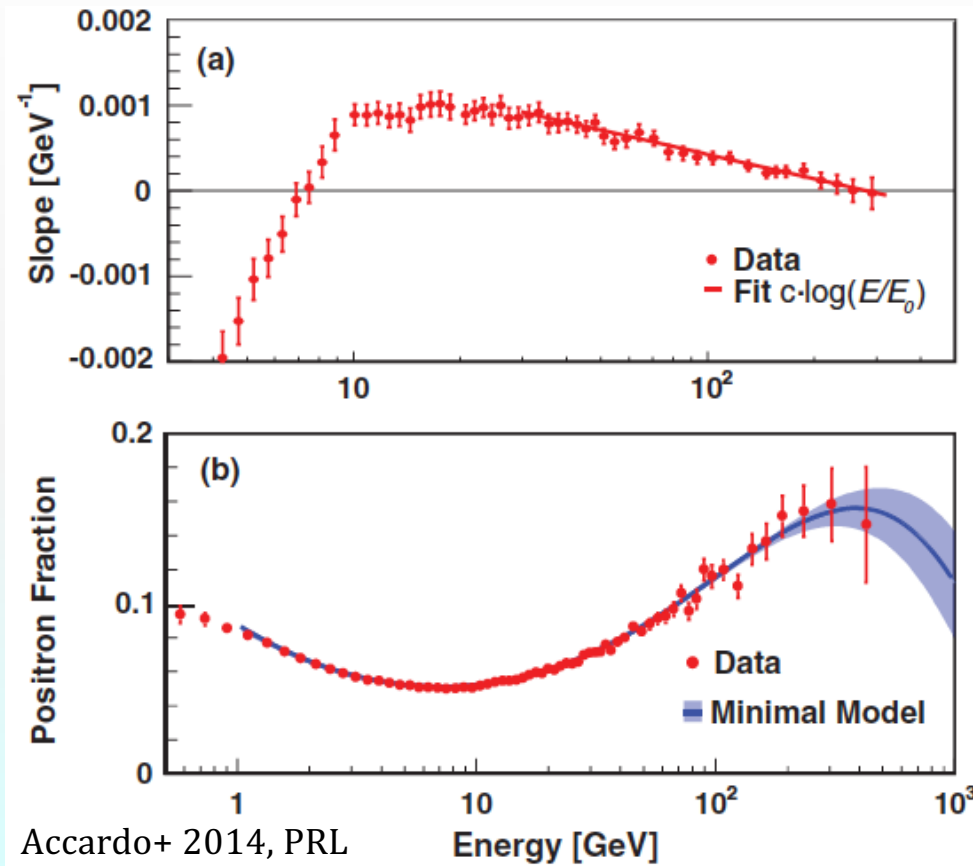
一方、電子は陽子同様、超新星残骸で生成 (primary)

→ ②によるスペクトル変化のみ



陽電子のスペクトルは (secondary ならば)、必ず電子より steep になるはず。

AMS-02: 陽電子比



より高エネルギー
(~300GeV)まで
伸びる

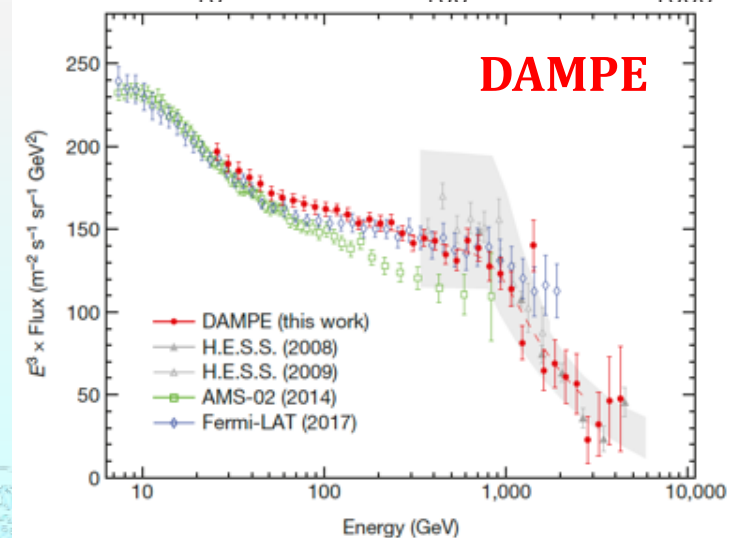
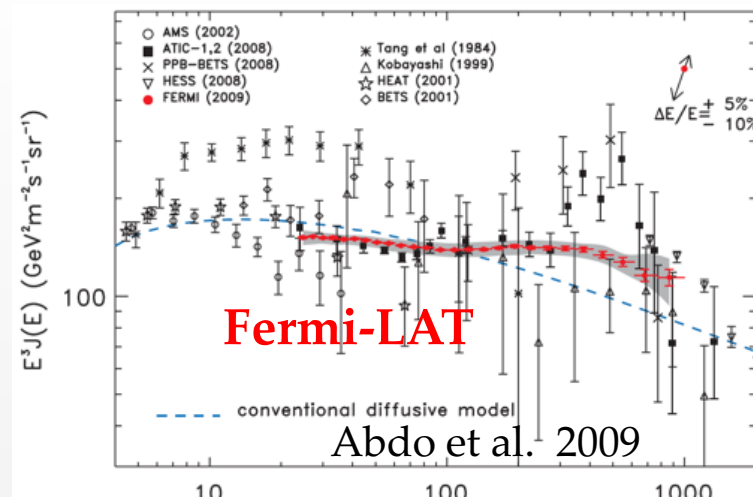
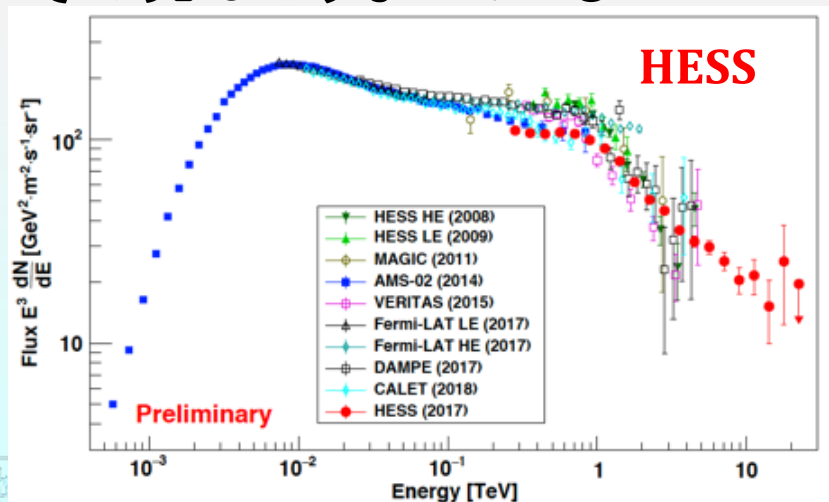
Peak &
Cutoff at
~300 GeV?

宇宙線電子 + 陽電子フラックス

- やはり標準モデルを超過しているように見える (Fermi-LAT, HESS, AMS-02, CALET, DAMPE)

→ 一次的な宇宙線 e^\pm 源が存在?

- ~ TeV で knee のような spectral break (HESS, CALET, DAMPE)
- その先はどうなっているか...?



宇宙線電子・陽電子源の候補

- **ダークマターの対消滅・崩壊**

論文多数.....

- **パルサー・パルサー風星雲**

Atoyan et al. 95; Chi+ 96; Zhang & Cheng 01; Yuksel+ 08; Buesching+ 08; Hooper+ 08; Profumo 08; Malyshev+09; Grasso+ 09; Lee et al. 2011; **NK, Ioka & Nojiri 10; NK, Ioka, Ohira & Kashiyama 11; Kisaka & NK 12; Asano et al. 2022** etc.

- **超新星残骸**

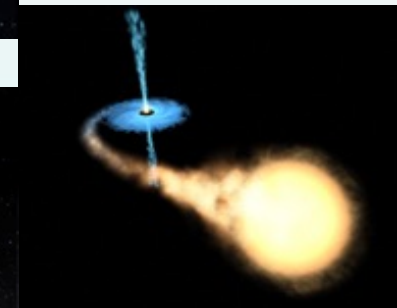
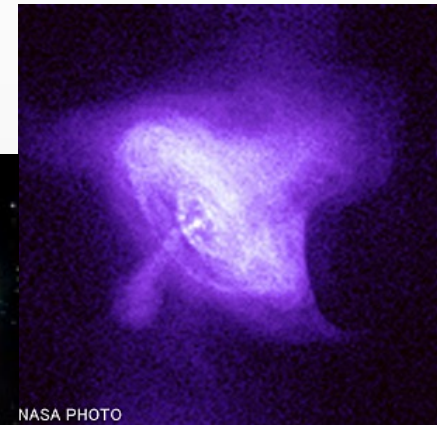
Pohl & Esposito 98; Kobayashi+ 04; Shaviv+ 09; Hu+ 09; Fujita+ 09; Blasi 09; Blasi & Serpico 09; Mertsch & Sarkar 09; Biermann+ 09; Ahlers+ 09; **NK 12** etc.

- **ブラックホール連星系**

Heinz & Sunyaev 02

- **ガンマ線バースト** Ioka 10

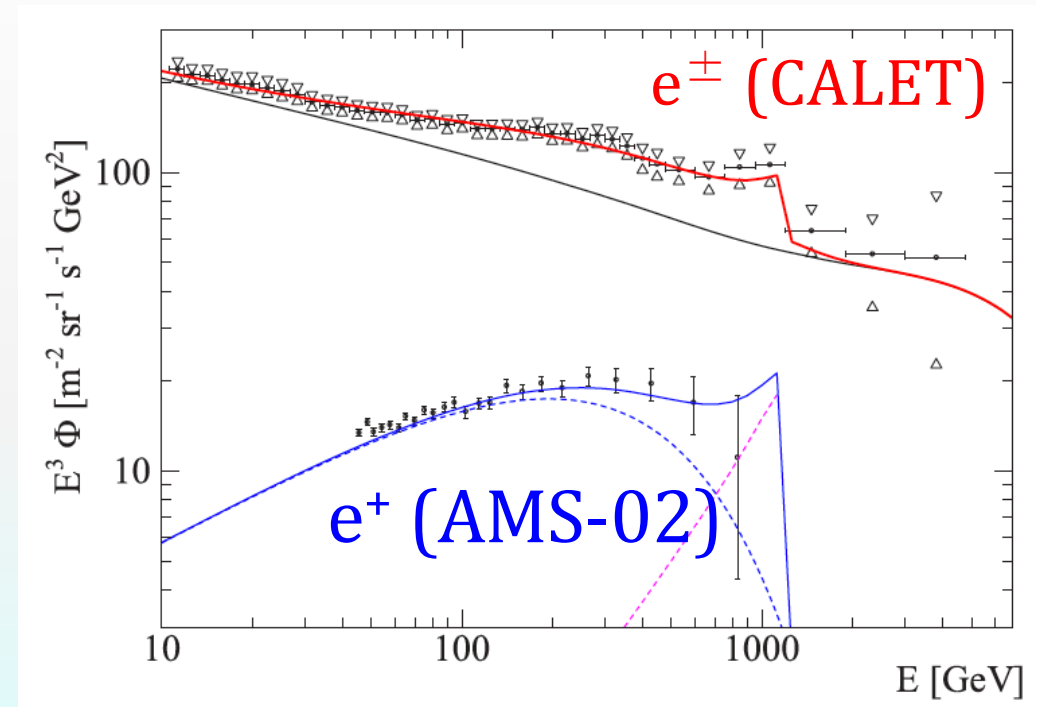
- **白色矮星** **Kashiyama, Ioka & NK 11**



最新のスペクトルフィットの例

銀河系内でランダムに形成される
超新星残骸・パルサーが起源の
宇宙線電子・陽電子のスペクトル
を Monte-Carlo simulation
→ CALET/AMS-02 の結果を自然
に説明

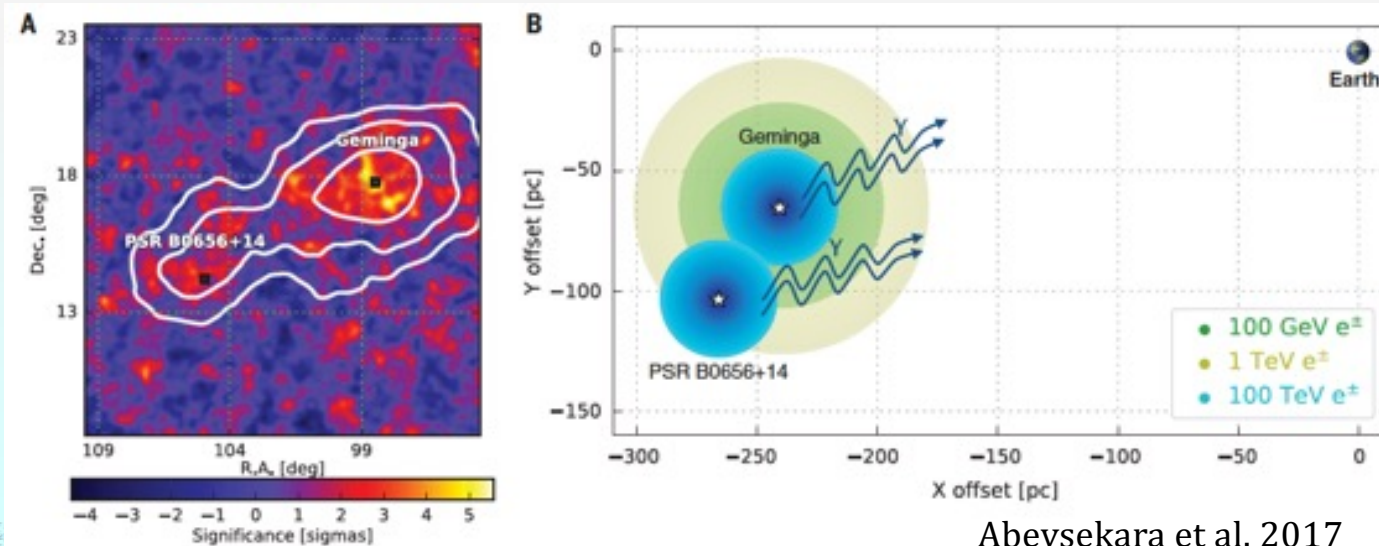
~ TeV に見られる sharp drop は
~400 kyr 前に近傍で起きた大き
めの超新星 ($E_e \sim 10^{49}$ erg) からの
寄与か？



Asano, Asaoka, Akaike, NK et al. 2022

パルサーの TeV halo

- 水チェレンコフガンマ線検出施設 HAWC により、2つのパルサー風星雲 (Geminga, PSR B0656+14) の周囲に広がった TeV ガンマ線構造を発見
- 高エネルギー電子が染み出して逆コンプトン散乱によりガンマ線を作っている? → **パルサー風星雲が宇宙線電子源であることの傍証**
- conventional な拡散係数で期待されるよりサイズが小さい → local に拡散係数が~2桁程度小さくなっている?



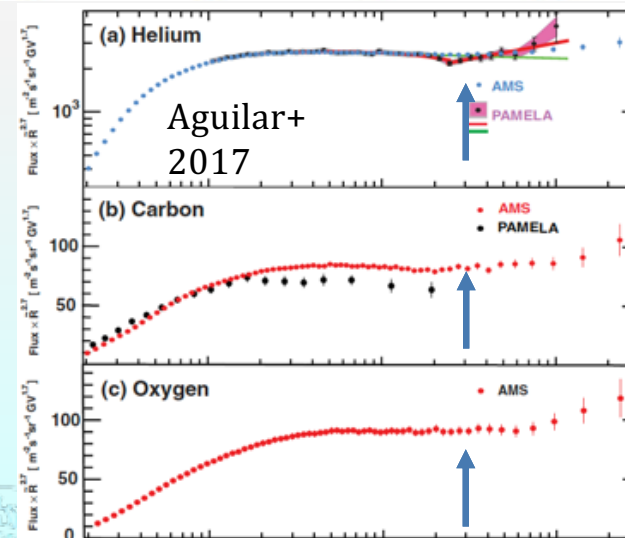
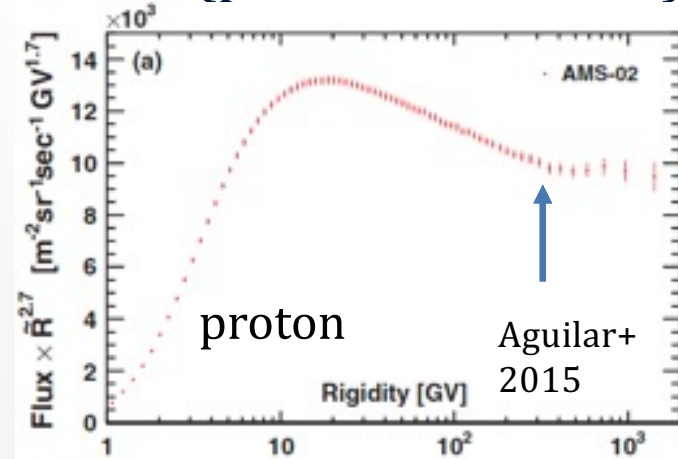
Abeysekara et al. 2017

宇宙線原子核のスペクトル (p, He, C, O, ..., Fe)

これがまたおかしい

- (1) スペクトルのべきがいずれも
~ 200 GV 以上で flat になっている
- (2) He 以上のスペクトルが全体的に陽子に比べてさらに flat になっている

※ 標準的な衝撃波加速理論では、
べきは核種に関係なく1通りに決まるはず

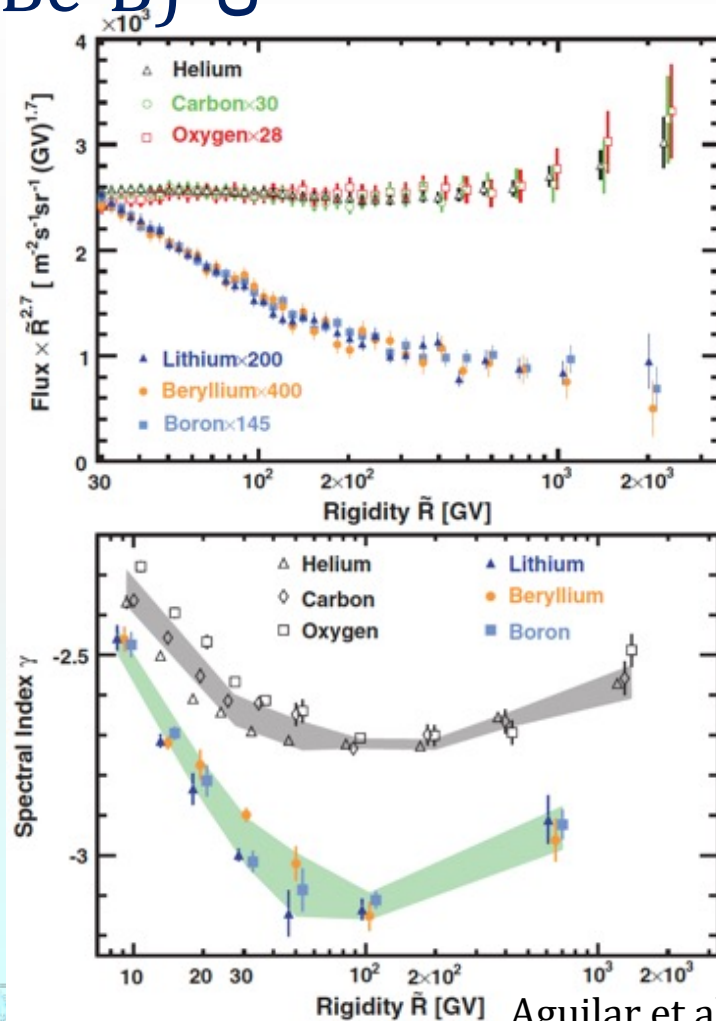


二次原子核 (Li-Be-B) も

AMS-02により、二次宇宙線の核種別のスペクトルが詳細に分かってきた

- (1) 二次粒子 (Li, Be, B) のスペクトルも ~ 200 GeV以上で flat に
- (2) 二次粒子の冪の変化の方が一次粒子より大きい

➡ 二次粒子の生成モデルに修正が必要？



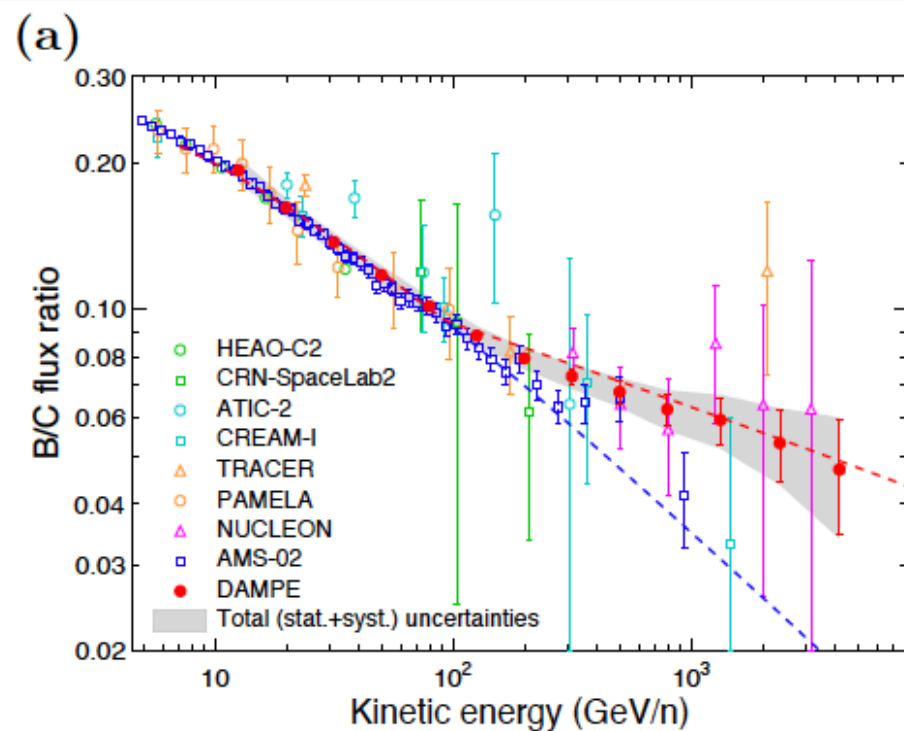
Aguilar et al. 2018

最新の B/C ratio の測定結果

DAMPE (Dark Matter Particle Explorer)
による $10 \text{ GeV/n} - 5.6 \text{ TeV/n}$ の
B/C ratio の測定

~ 100 GeV/n 以上でべきが
なだらかになっている

AMS-02 とは ~TeV で微妙に食い違う
(やたら系統誤差が小さいのが気になる)



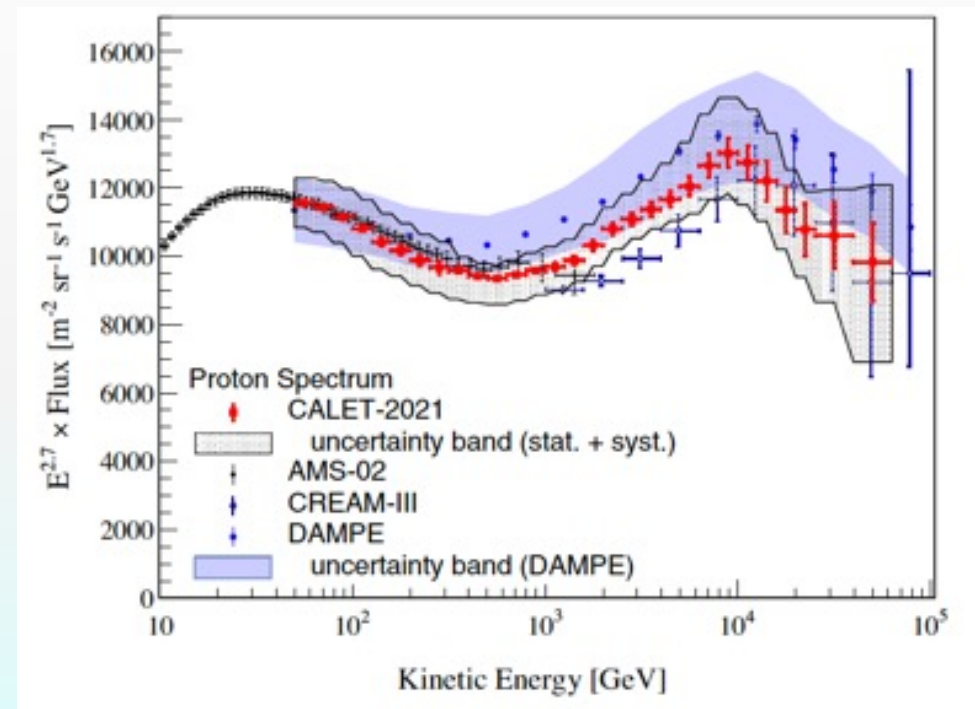
DAMPE collaboration (2210.08833)

~ 10 TeV からの softening

DAMPE, CALET: ~60 TeV までの陽子のスペクトルを高統計で測定

いったん ~ 100 GeV で flat (hard) になったスペクトルが、~ 10 TeV で steep (soft) になっている

knee より下のエネルギーでも結構ボキボキ折れている...



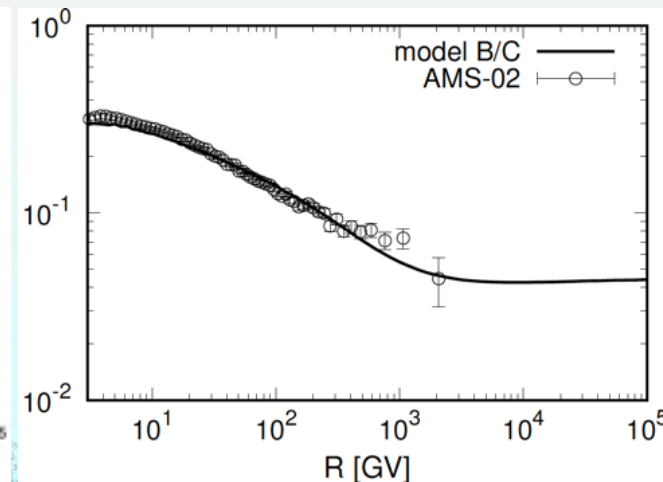
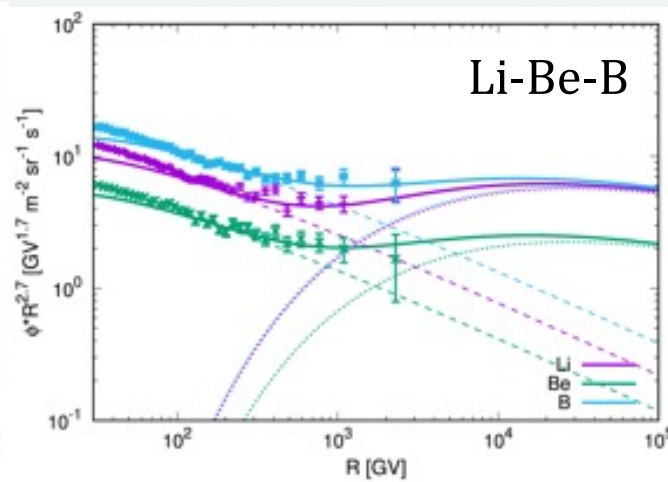
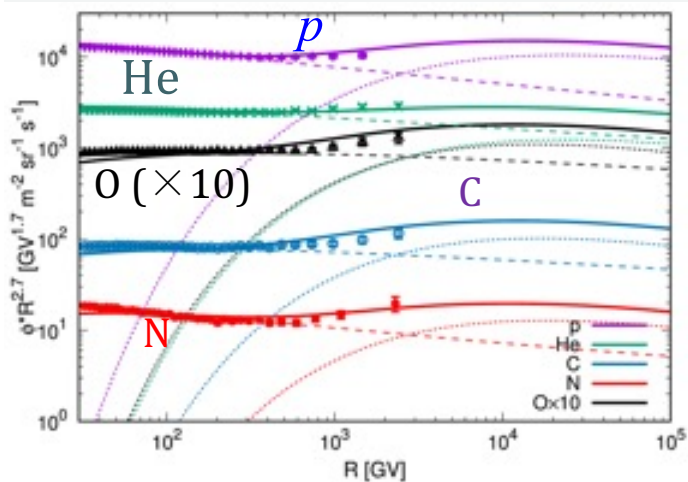
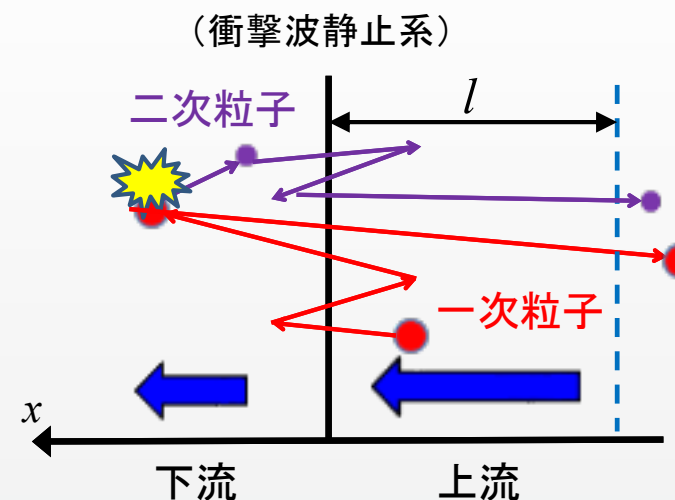
Adriani et al. 2022

考えられる可能性

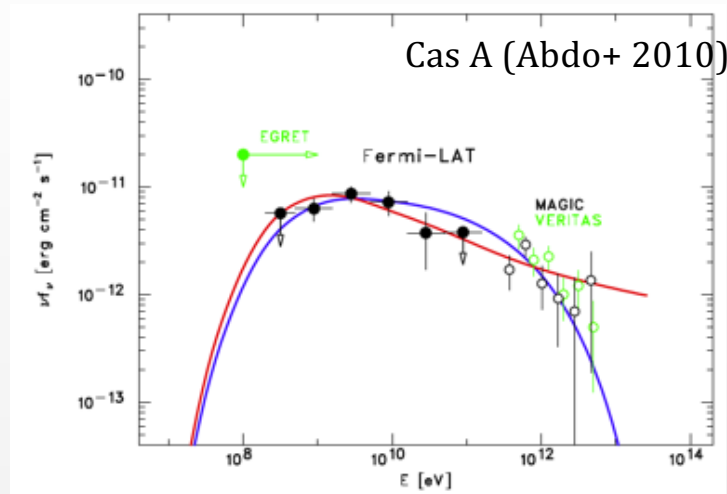
- 衝撃波加速理論の修正 (Ellison et al. 1997; Malkov & Drury 2001; Ptuskin et al. 2013 etc.)
 - ダスト加速？第一イオン化ポテンシャル？
- 超新星残骸の周辺環境 (Ohira & Ioka 2011; Ohira, NK & Ioka 2016)
- 地球近傍にある特別な超新星残骸が寄与 (Thoudam & Horandel 2012; NK & Yanagita 2018; NK & Lee 2021 etc.)
 - hardening と softening を同時に説明できる
- 拡散係数のエネルギー依存性が単純な power-law ではない (Blasi et al. 2012; Tomassetti 2012 etc.)
 - 全ての核種で break rigidity が同じなことを自然に説明

特別な超新星残骸を考慮した例 (NK & Lee 2021)

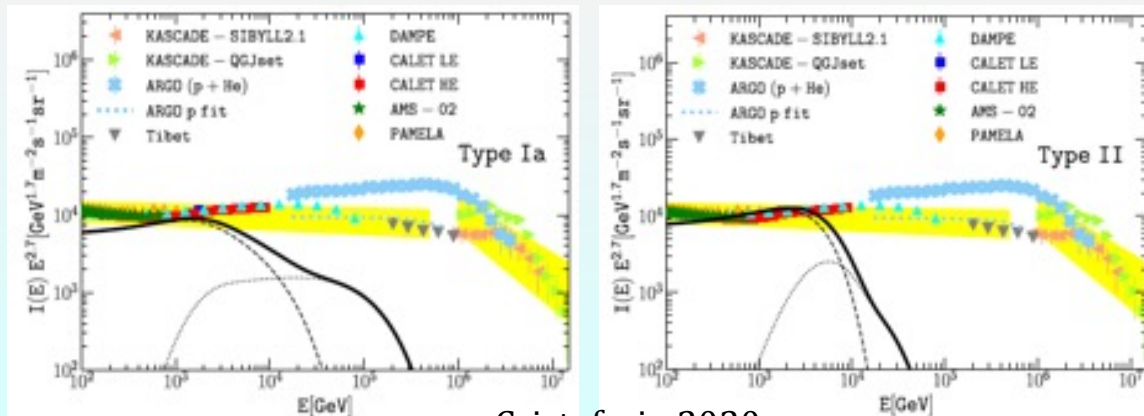
銀河系内に一様に分布する超新星残骸に加え、
距離 \sim kpc にある年齢 \sim 100 kyr の濃い星周物質に囲まれた超新星爆発で一次原子核 (p, He, O, C, O etc.) だけでなく二次原子核 (Li-Be-B) も大量に生成・加速 \rightarrow AMS-02 の結果と一致
B/C ratio の flattening も予言



一般に超新星残骸では PeV まで加速できない？



- ガンマ線で観測されている超新星残骸の多くは ~ 10 TeV 以下でカットオフを示している (Aharonian 2013 etc.)
- 実際星間磁場程度では超新星残骸で加速できる最高エネルギーはせいぜい ~ 100 TeV (Cesarsky & Lagage 1981 etc.)
- ある状況下では衝撃波近傍で磁場増幅してくれる？ (Lucek & Bell 2000; Bell 2004; 昨日の井上剛志さんの講演)
- 限られた超新星残骸のみ？ (Cristofari+ 2020)



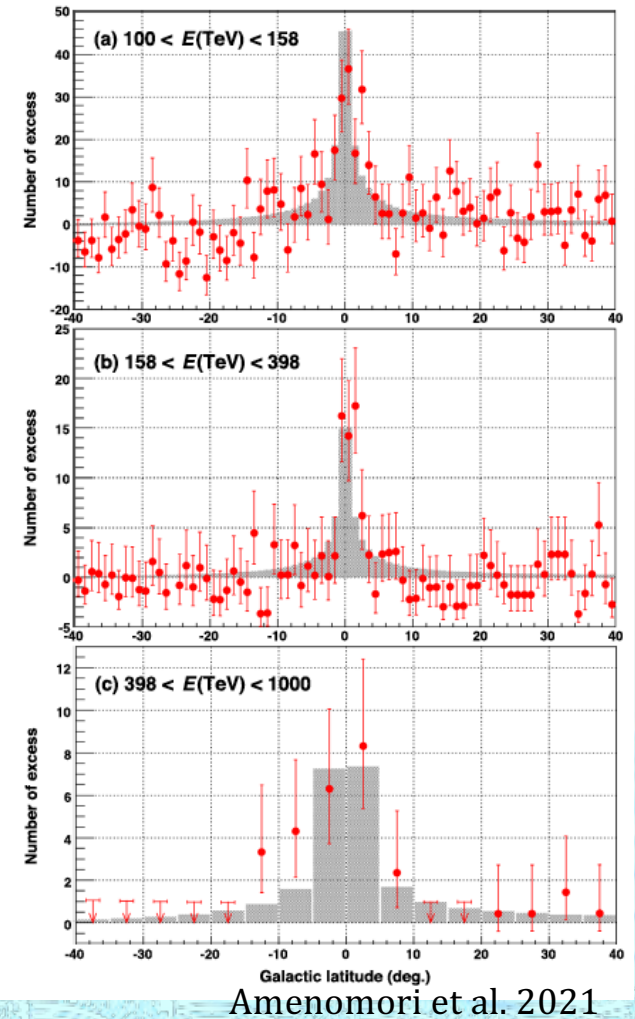
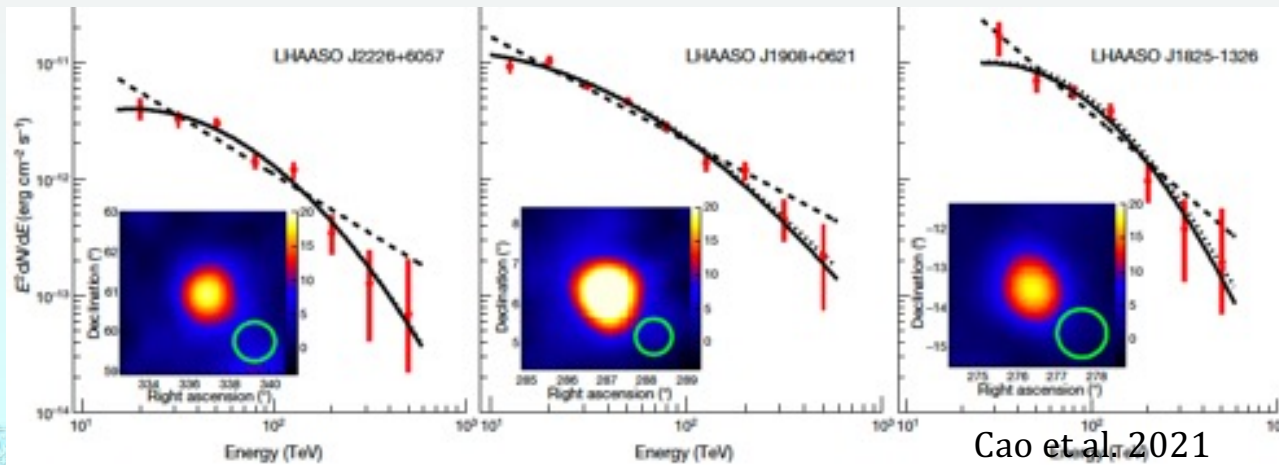
Cristofari+ 2020

Tibet AS γ , LHAASO

Tibet AS γ : 銀河系内の拡散ガンマ線の観測
→ 100 TeV < E < PeV のガンマ線が特に銀河面付近から到来している

LHAASO: 銀河系内の ~PeV ガンマ線源を12個同定、ただし天体の種類は確定できず (Crab Nebula を除く)

やはり銀河系内に PeV 加速源はある



PeV加速源の候補

- 一部の SNRs (Tibet AS γ ; LHAASO)
- Sgr A* (Fujita+ 2017)
- ミリ秒パルサー (Guepin+ 2018)
- 孤立ブラックホール (Ioka+ 2017)
- X線連星ジェット (Cooper+ 2020)
- パルサー風星雲 (Ohira+ 2018 etc.)
- 星団からの collective な星風 (Reimer+ 2006; LHAASO)
- Superbubbles (Bykov 2014)
- 降着率の低い状態にあるブラックホール連星 (Kimura, Sudoh, Kashiyama & NK 2021)
- etc.

結構なんでもありな状態ともいえる

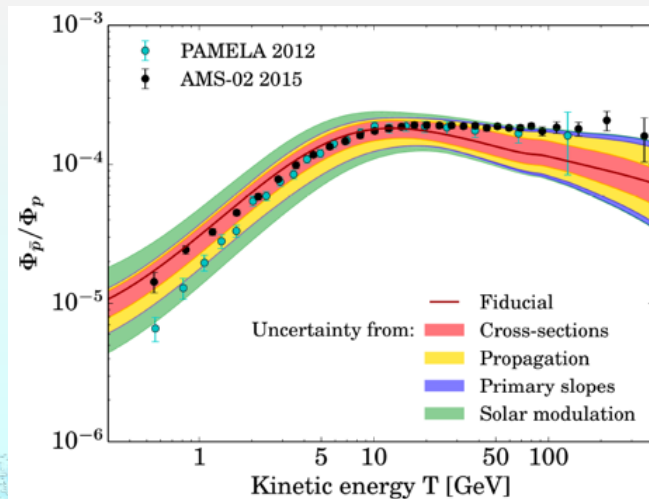
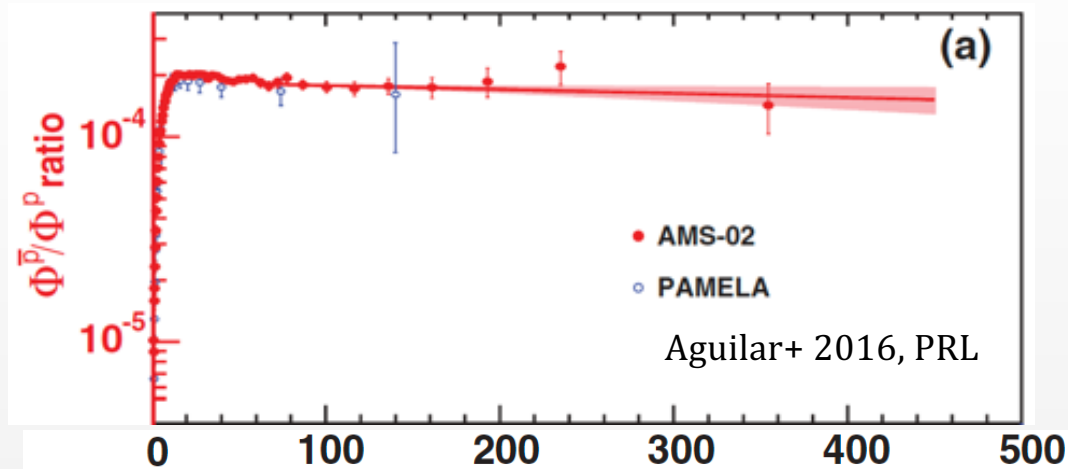
まとめ

- 「銀河系内宇宙線は全て超新星残骸で衝撃波統計加速によって同じように作られた」という標準的なシナリオは大きな変更を迫られている
- 電子・陽電子源は超新星残骸 + パルサー風星雲？
- ~ 200 GeV からの hardening \rightarrow ~ 10 TeV からの softening は宇宙線源由来？それとも拡散係数のエネルギー依存性由来？
- PeV 加速源の正体は高エネルギーガンマ線観測によって手がかりが得られつつある。が、山程ある理論モデルはそこまで絞られてはいない

銀河系内宇宙線の標準的シナリオ

	標準的理解	確立度(個人的見解)
起源	銀河系内の超新星残骸	★★★
加速機構	衝撃波統計加速	★★★★
伝搬過程	乱流磁場による拡散 ($D \propto E^\delta$)	★★★★
二次粒子 (Li-Be-B, 反粒子)の生成	伝搬中の星間物質との衝突による破碎・ハドロン相互作用	★★★★
最高エネルギー	少なくとも陽子は \geq PeV	★★★★★

AMS-02: 反陽子/陽子比



反陽子はpp反応で生成される
(secondary origin)

→ 陽電子と同様、陽子よりも
steepになるはず

→ しかし、観測ではエネルギー
によらずほぼ一定

→ primary sourceがある？

※断面積の不定性も？