

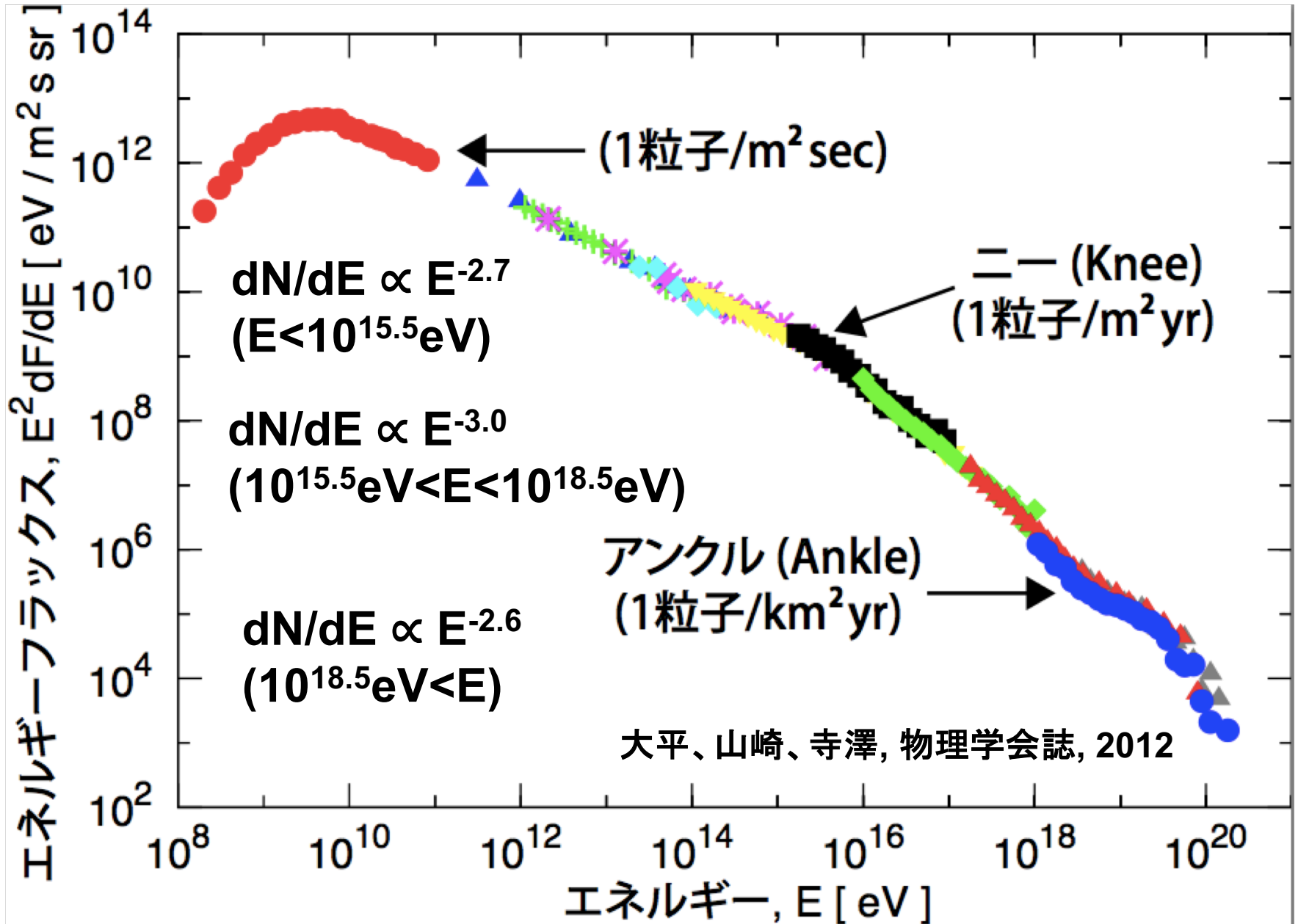
宇宙線の標準理論 未来に向けての再考

大平 豊 (東京大学)

内容

- 宇宙線の標準理論
- 最近の宇宙線の観測結果と標準理論の問題点
- 最近の理論的研究の進展

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 eV/cm^3 。銀河の構成要素の1つ

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

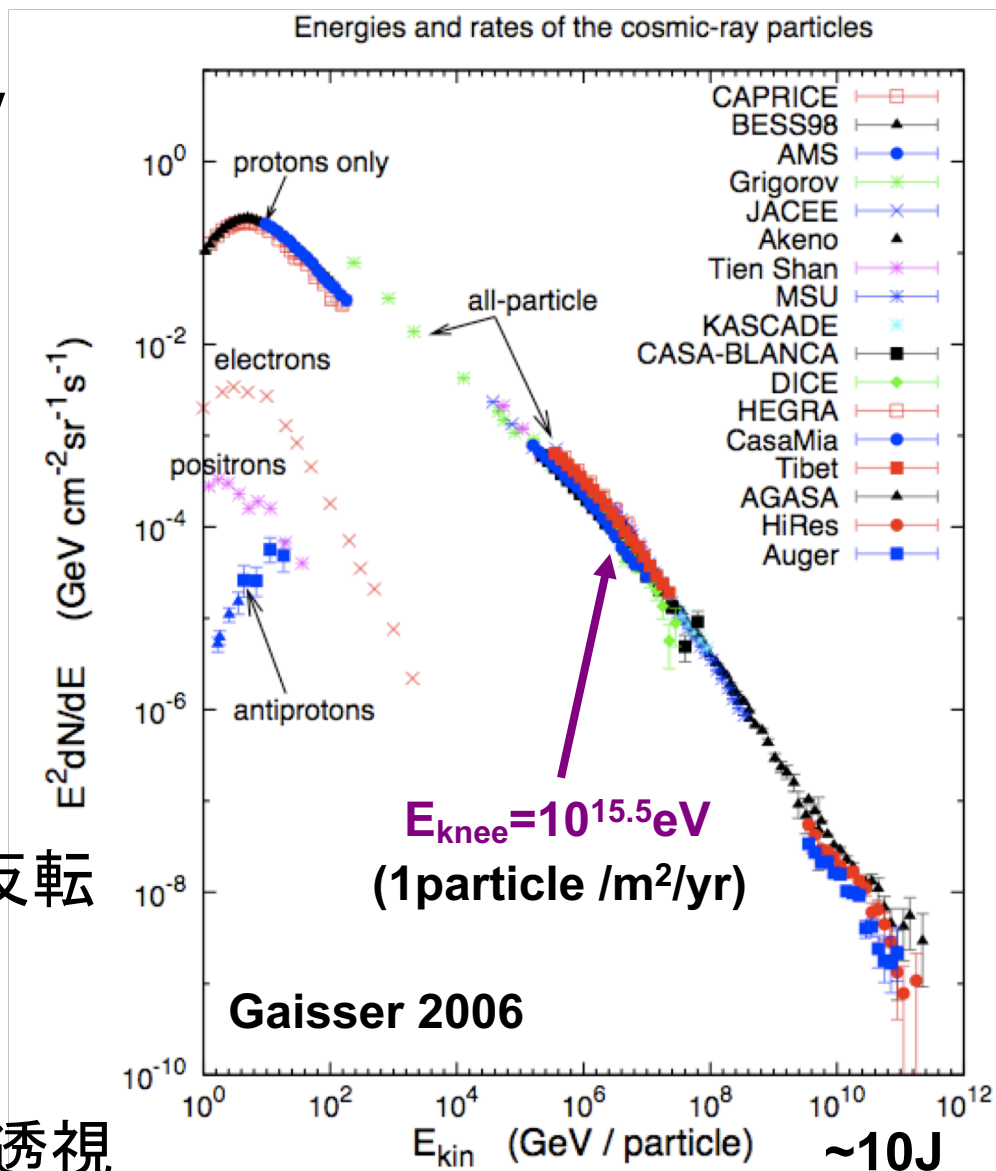
$$n_{\text{th}} \sim 10^0 / \text{cm}^3 @ \sim \text{eV}$$

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

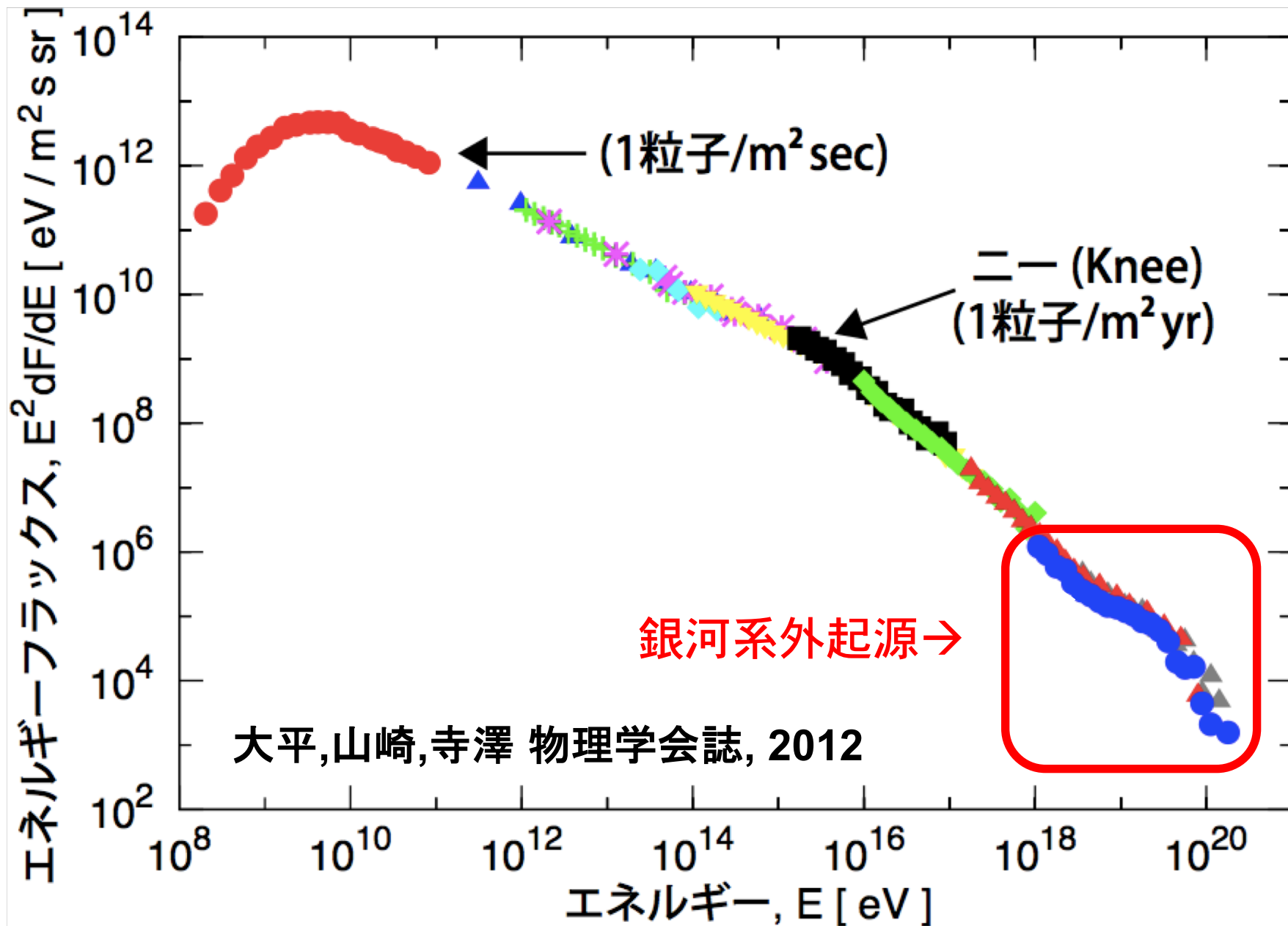
宇宙線によるメモリー内のビット反転

地球の気候変動にも重要？

宇宙線でピラミッドや火山内部を透視



銀河系外起源の宇宙線



超高エネルギー宇宙線の標準モデル

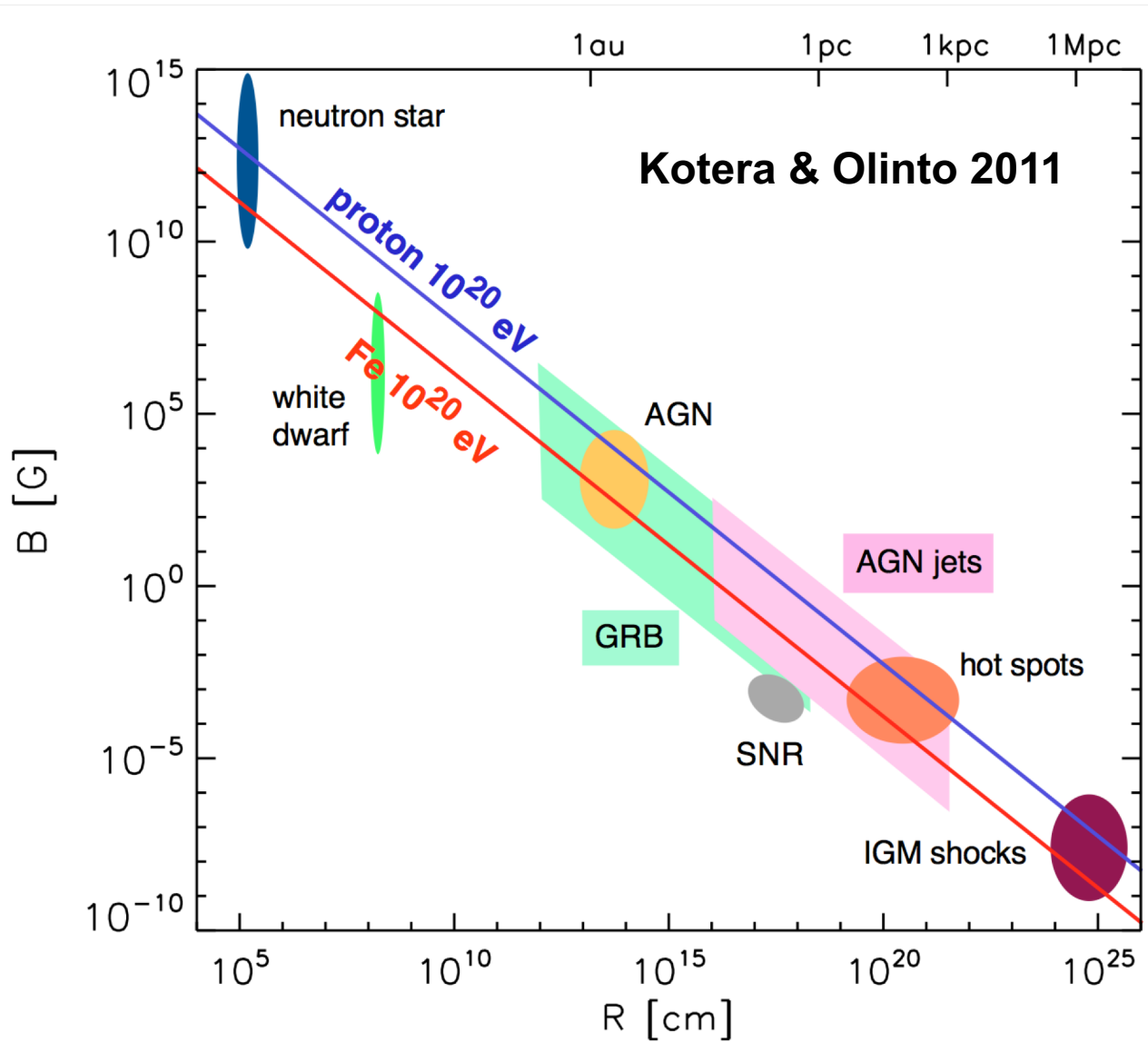
標準モデルはない。

なんかすごい爆発現象で、
(マグネター、ガンマ線バースト、活動銀河核、潮汐破壊現象)

加速機構はわからんけど、
束縛するために磁場は強いでしょうね。
どうやってそんな強い磁場ができるか知らんけど。。。

加速機構がわからんから
源でのエネルギースペクトルなんか予言できません。
銀河間空間の宇宙線の伝搬だけは計算できるから、
それだけ計算します。銀河間磁場は仮定するけどね。

Hillas diagram (宇宙線の最高エネルギー)



$$r_L = E_{\max} / ZeB$$

$$= R_{\text{size}}$$

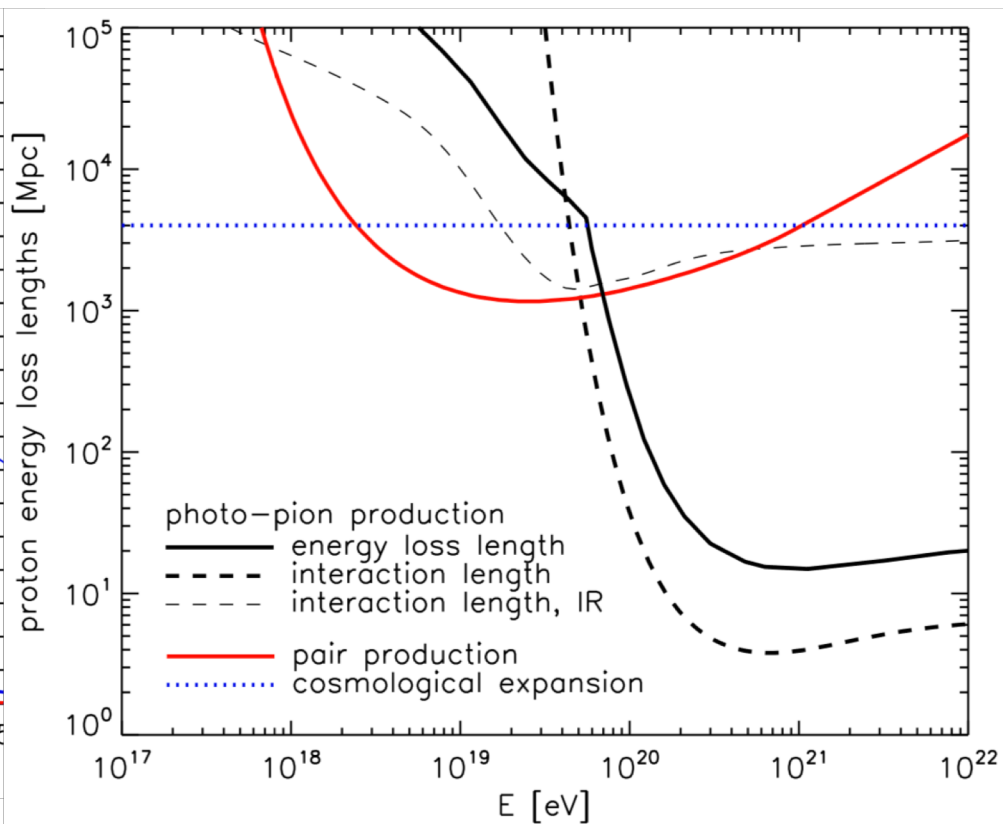
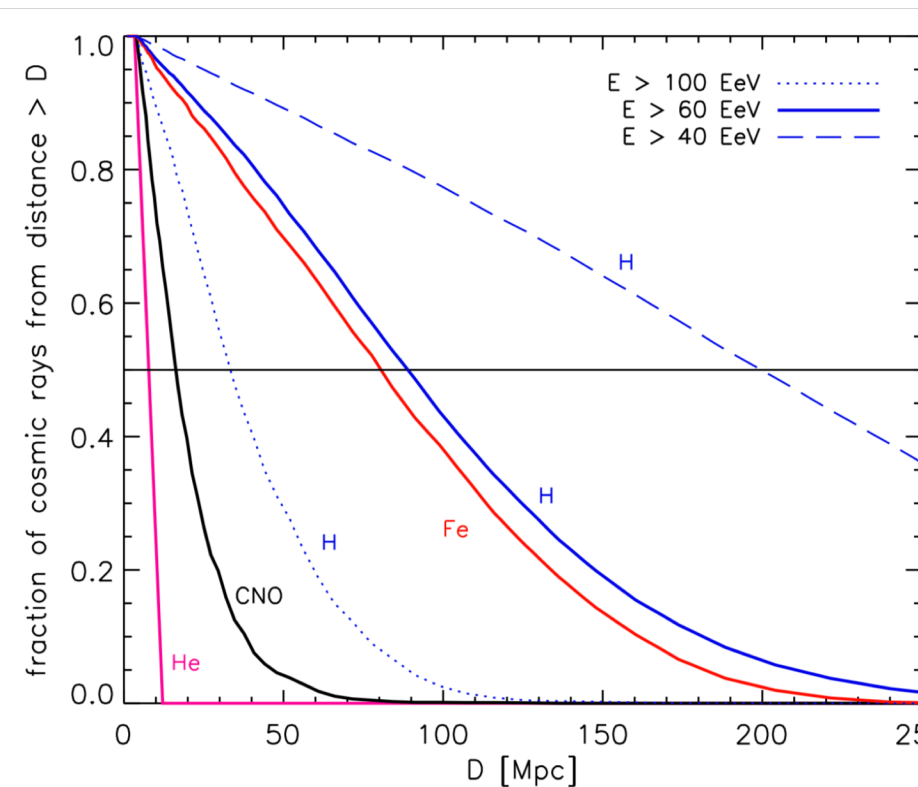
$$\rightarrow r_L / c = R_{\text{size}} / c$$

$$\rightarrow t_{\text{gyro}} = t_{\text{dyn}}$$

注)これは、加速機構の物理を無視した議論

注)天体の磁場はよくわかっていない

超高エネルギー宇宙線(UHECR)の伝搬



Kotera & Ullmo 2011

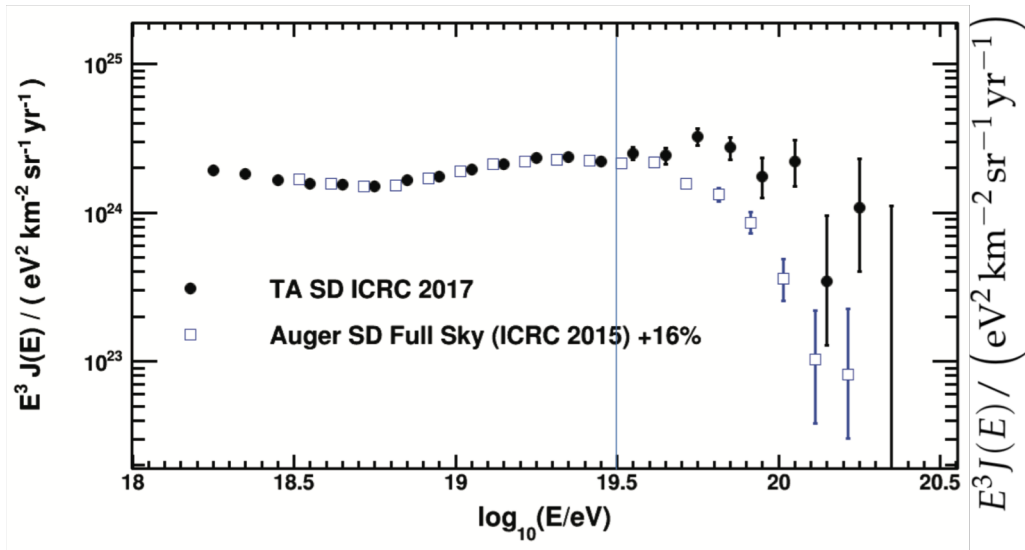
He (E > 60EeV) は、~10 Mpcしか進めない

H (E > 100EeV) は、~50 Mpcしか進めない

超高エネルギー宇宙線源はそれほど遠くない → 高い非等方性

UHECRのエネルギースペクトル

TA

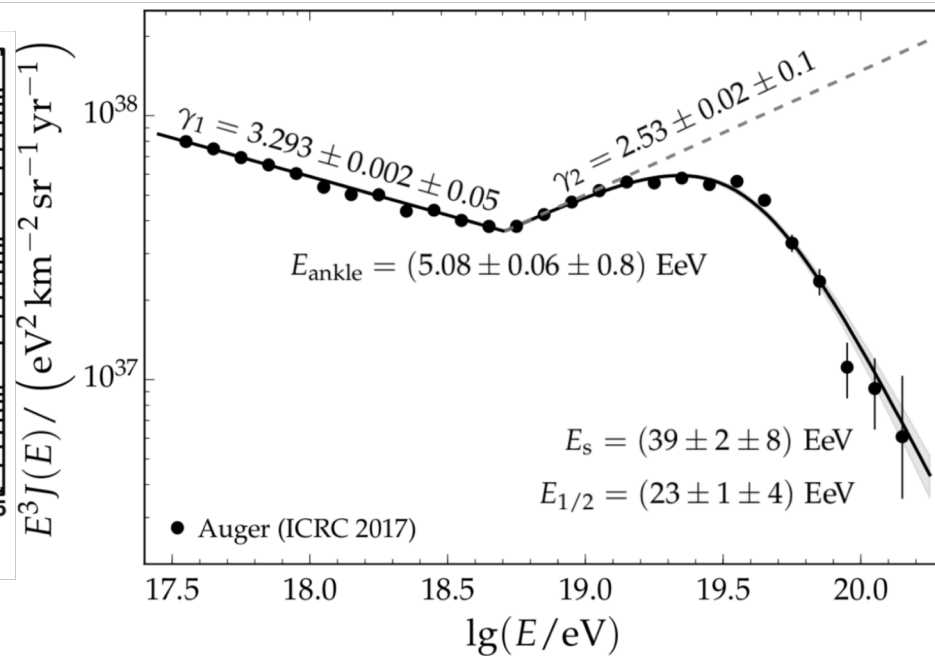


Matthews et al. 2017

Auger よりも E_{cut} が大きい

Proton dip modelで
スペクトルを説明可能

Pierre Auger

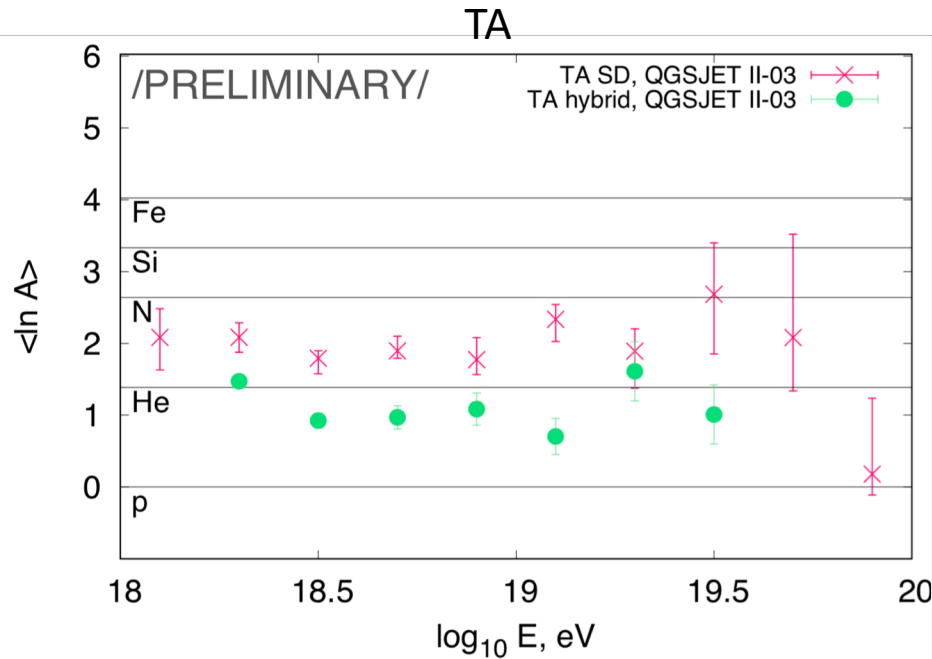


Fenu et al. 2017

ProtonのGZK cutoffの予言

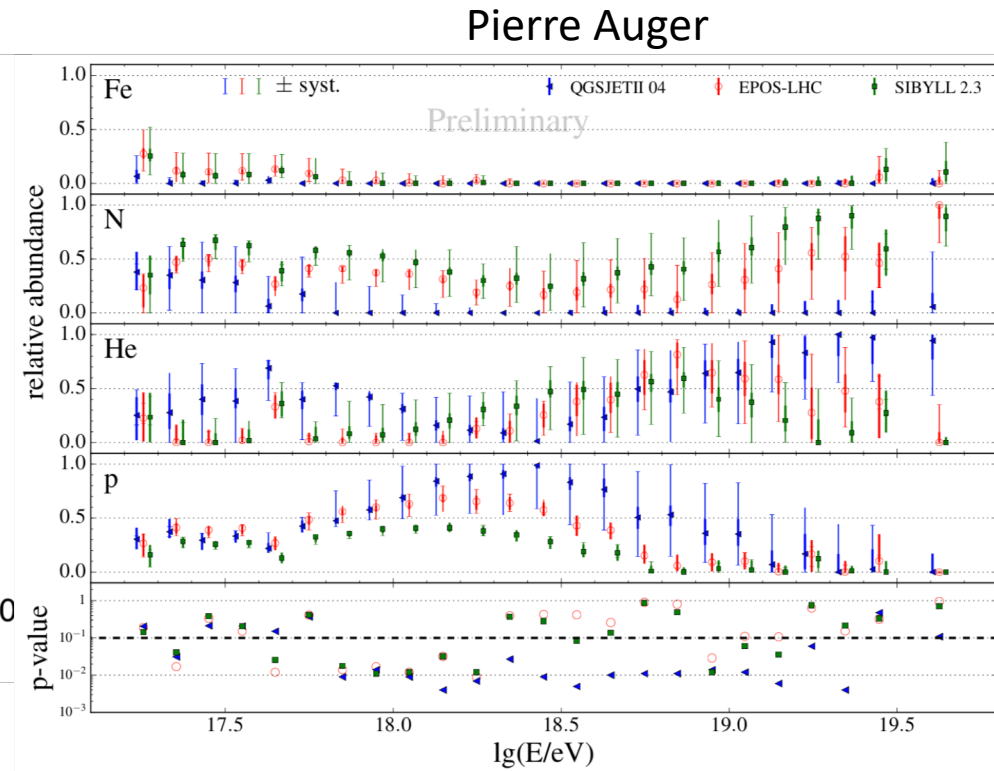
$E_{1/2} = 53 \text{ EeV}$ よりも、
観測は $E_{1/2} = 23 \text{ EeV}$ と小さい

UHECRの組成



Hanlon et al 2018

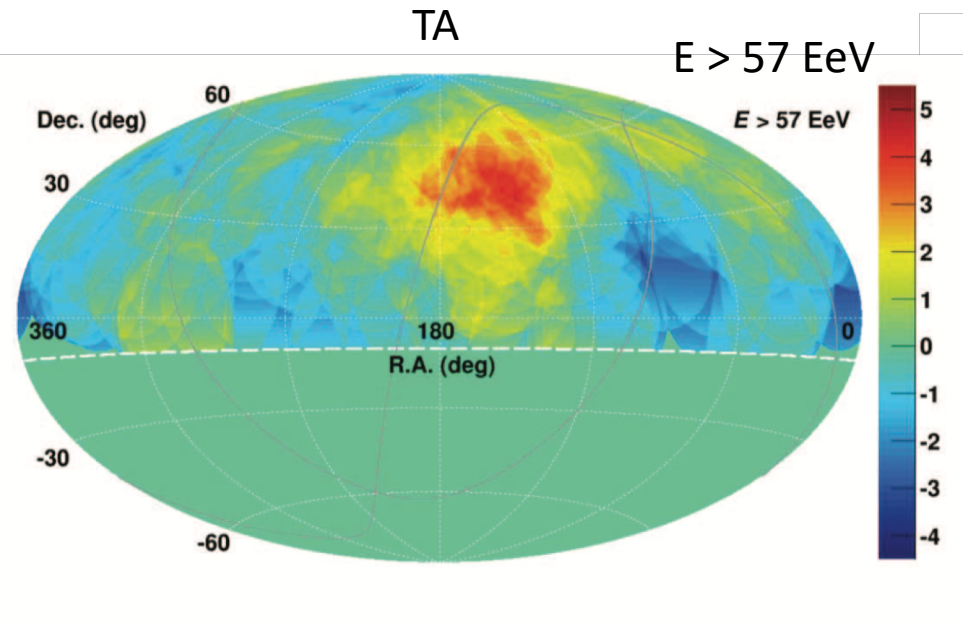
組成は He か H。
Feではない。



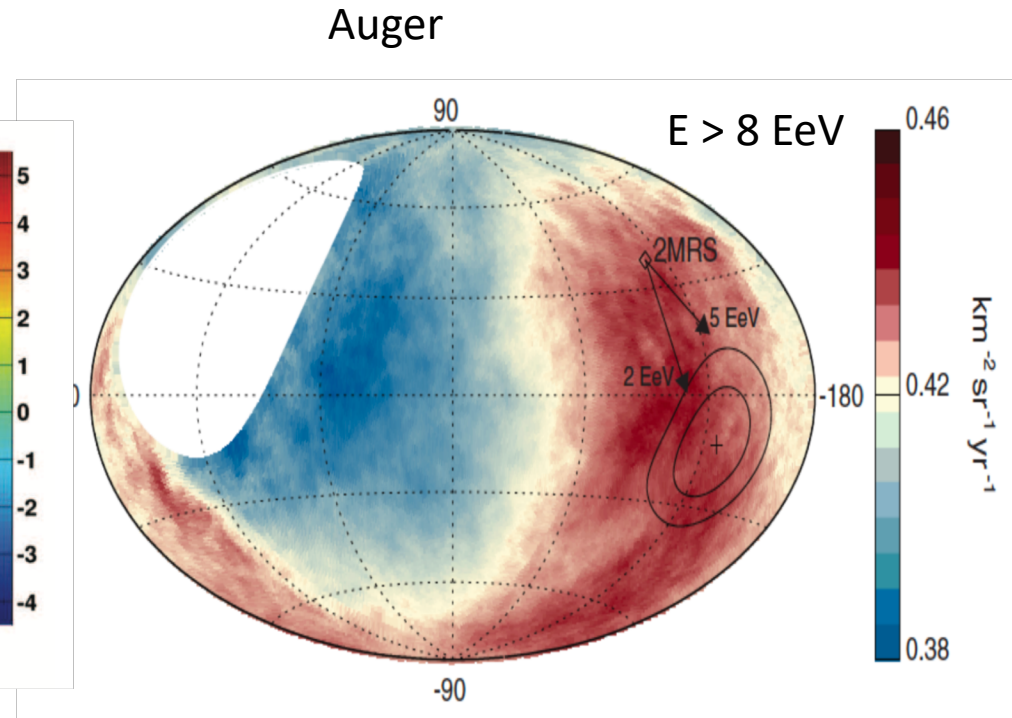
Bellido et al. 2017

組成は He か CNO あたり。
Feではない。

超高エネルギー宇宙線の非等方性



Matthews et al. 2017



Gora et al. 2018

銀河面から外れたところから
多くやってきている。
→銀河系外であることの証拠!?

銀河中心とは反対方向から
多くやってきている。
→銀河系外であることの証拠!?

超高エネルギー宇宙線の問題点

TA(北半球の実験)とAuger(南半球の実験)で
スペクトルや組成の結果が異なる。

組成を精密に決めるには、
原子核の反応断面積の実験データが不足している。

源は未だ不明

源候補の磁場も不明。非常に弱い磁場を示唆する観測もある。
(Inoue & Takahara 1996, Santana et al 2014)

相対論的衝撃波での衝撃波加速では、 $E_{\max} \ll 10^{20}$ eV

(Niemić et al. 2006, Lemoine et al. 2006,
Lemoine & Pelletier 2010, Sironi et al. 2013)

超高エネルギー宇宙線の将来展望

TA → TAx4, Auger → AugerPrime のアップグレードが進行中

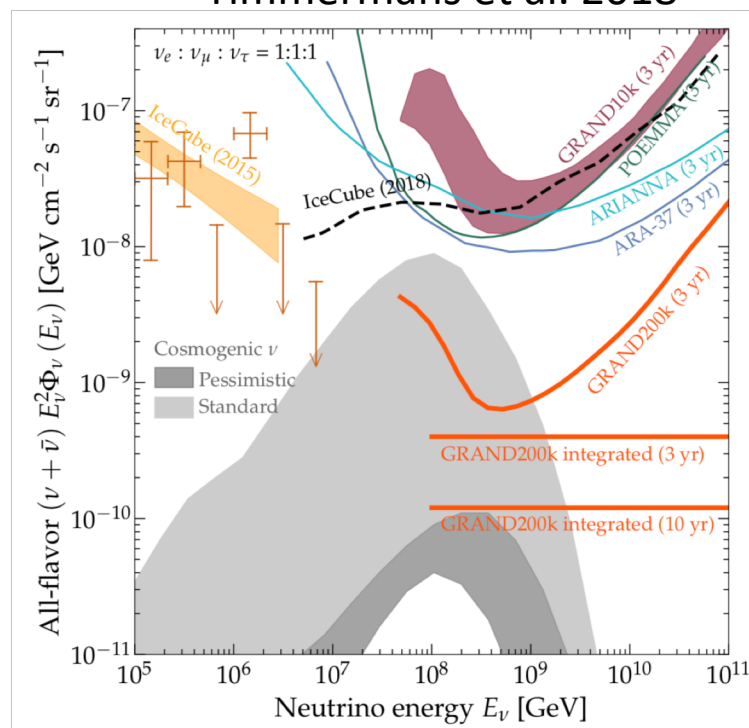
LHCが重元素同士の衝突実験を行なってくれるかも。

IceCubeによるGZKニュートリノの制限がモデルを棄却しめた。

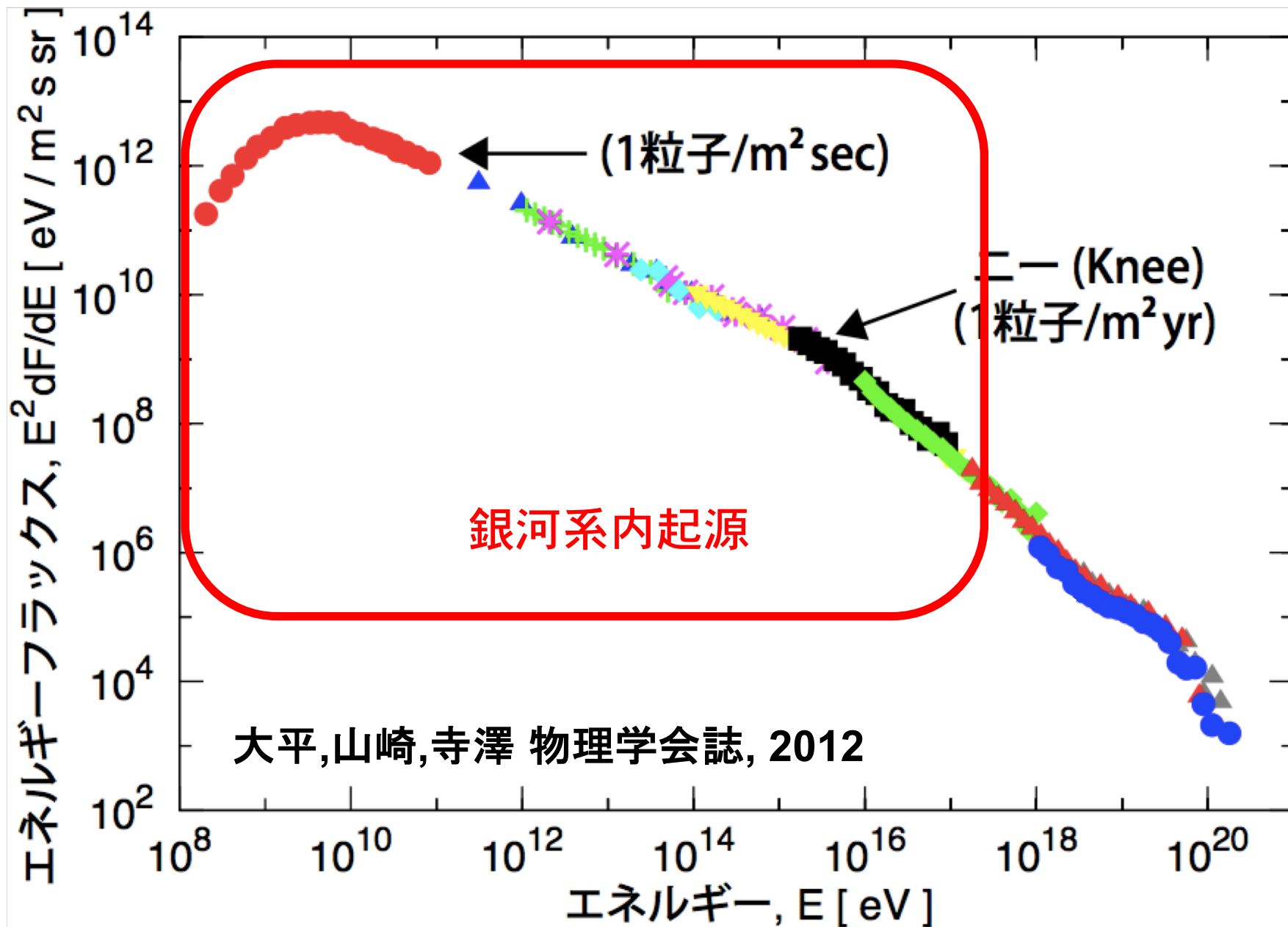
大規模なニュートリノ実験の計画もある → GRAND, IceCube Gen2

ニュートリノによって、光子では見れない超高エネルギー宇宙線の加速領域が見えるかも？

Timmermans et al. 2018



銀河系内起源の宇宙線



銀河宇宙線の標準理論

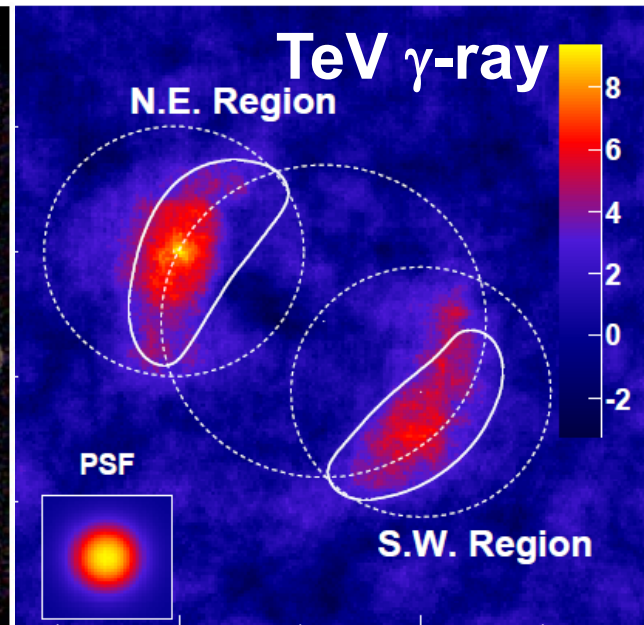
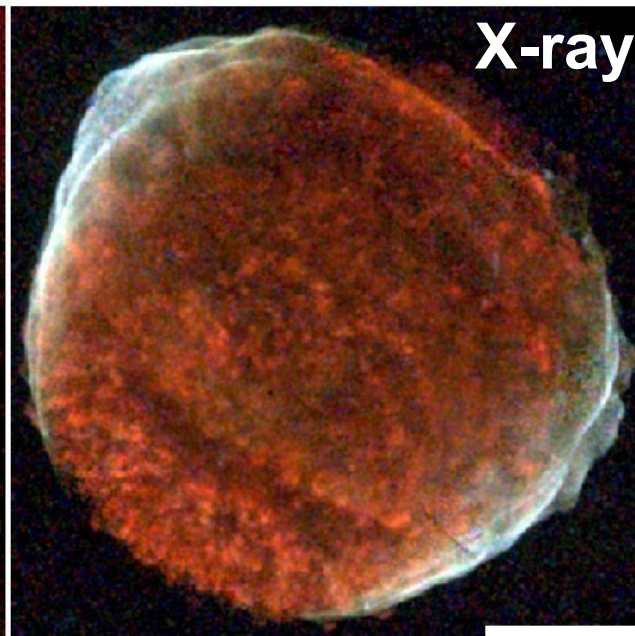
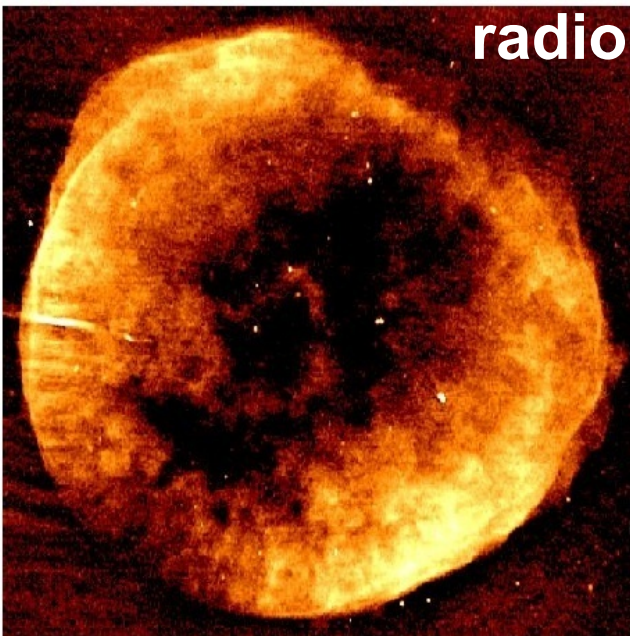
超新星残骸で

衝撃波統計加速によって加速され

銀河内磁場に曲げられながら
拡散運動して地球に飛来する

超新星残骸 (SuperNova Remnant)

超新星残骸(SNR)とは星の大爆発の残骸

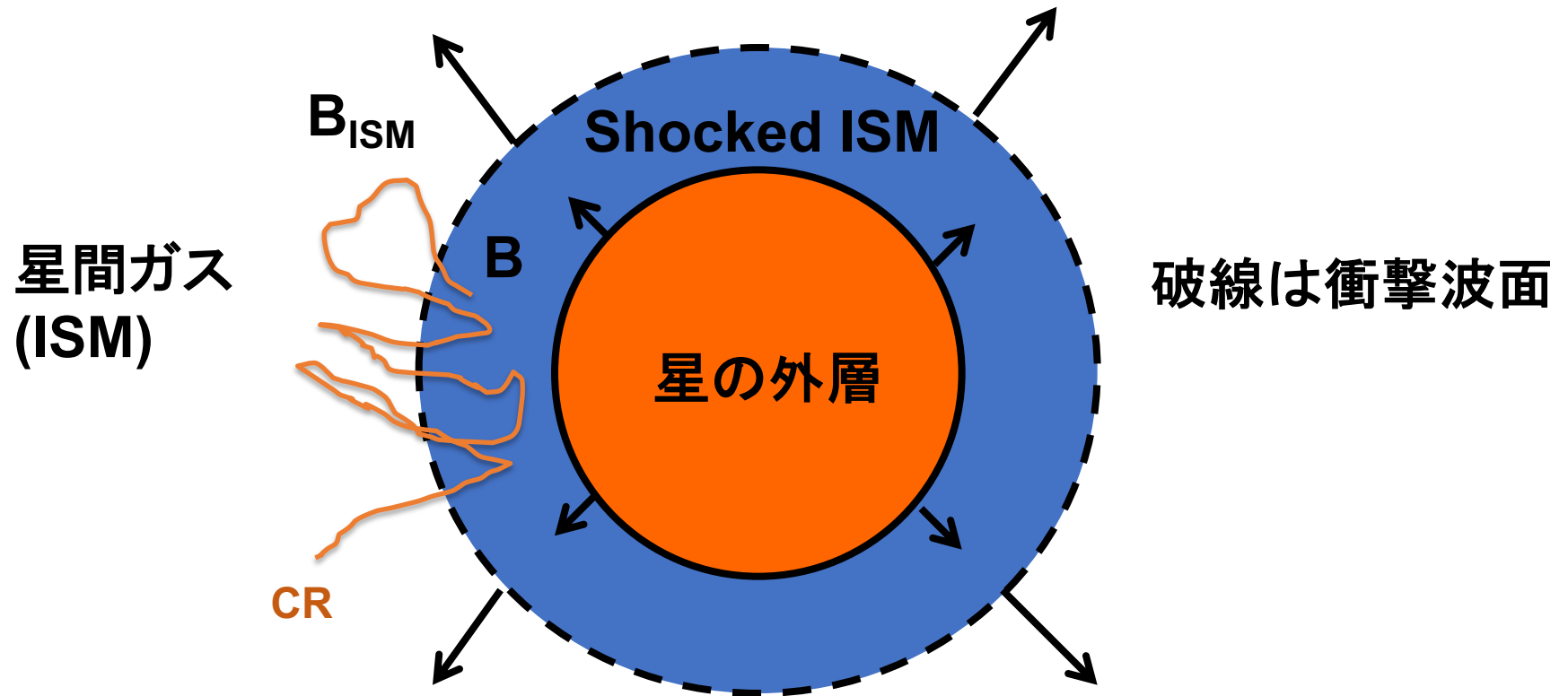


Cassam-Chenai et al. 2008

Acero et al. 2010

- 大きさ
 $R \sim 10^{18} - 10^{20}$ cm
- 膨張速度
 $v/c \sim 10^{-2} - 10^{-3}$
- 電波: 電子の GeV までの加速 (~ 300 SNRs)
- X線: 電子の TeV までの加速 (~ 14 SNRs)
- GeV- γ : 陽子の TeV までの加速 (~ 35 SNRs)
- TeV- γ : 電子 or 陽子の 10TeV までの加速 (~ 16 SNRs)

超新星残骸と衝撃波加速



星間ガスの磁場は静止。衝撃波圧縮領域の磁場は動いている。
衝撃波を往復すると、宇宙線は動く磁場に何度も叩かれて加速する。

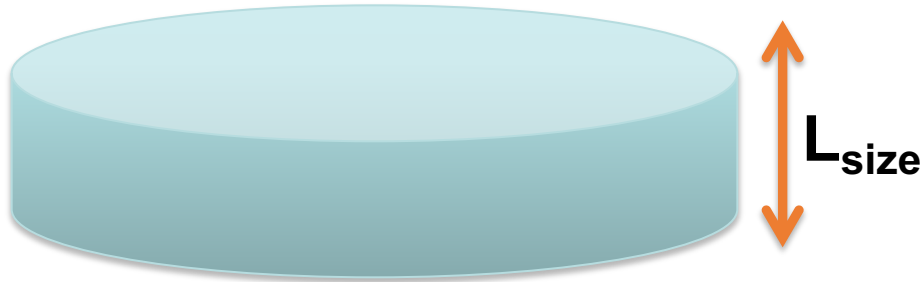
$$dN/dE \propto E^{-s}, s = (r + 2) / (r - 1),$$

r は衝撃波圧縮率 $\sim 4 \rightarrow dN/dE \propto E^{-2}$

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

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)

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

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

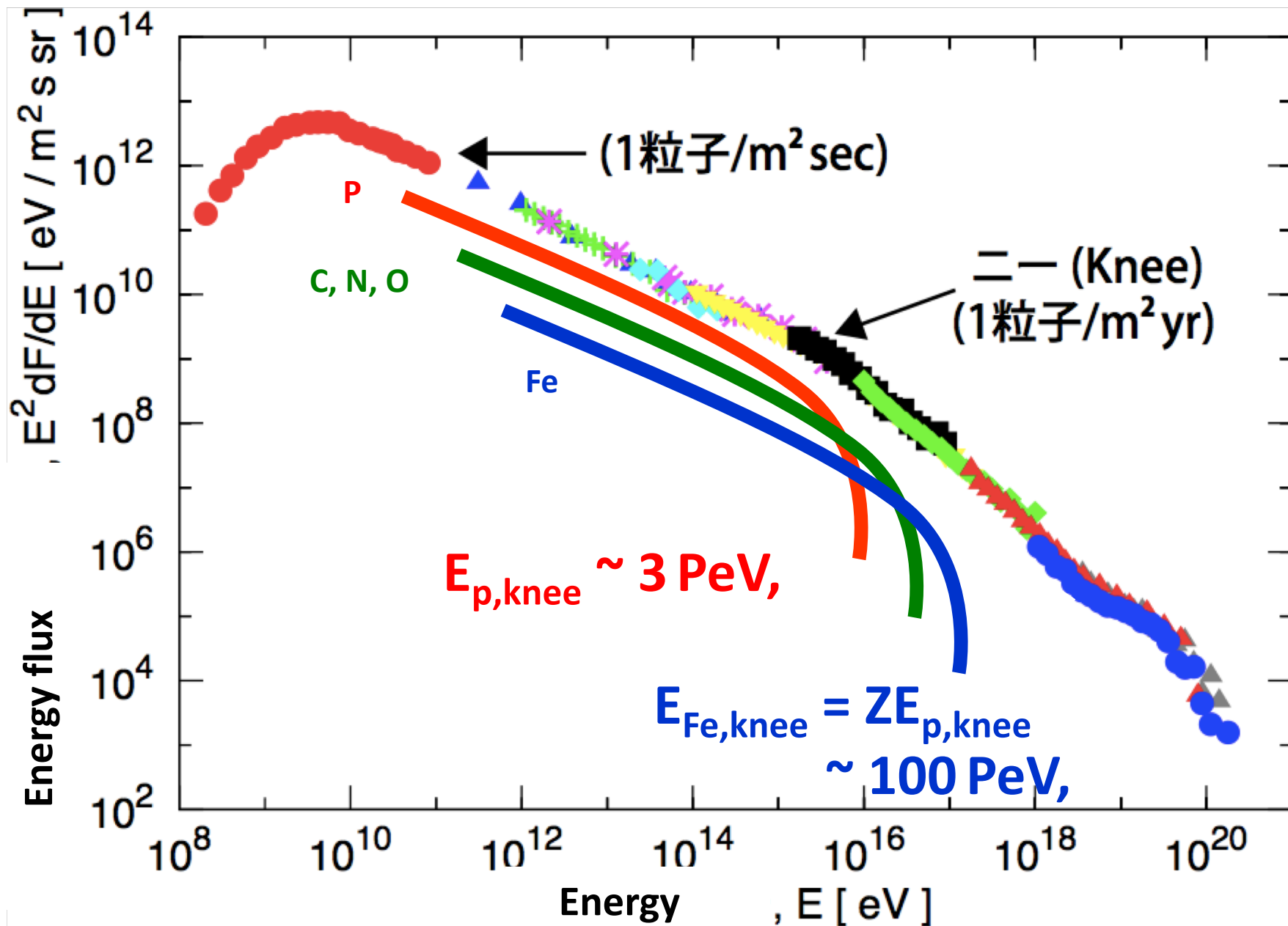
$$D_{\text{diff}}(E) = D_0 E^\delta$$

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

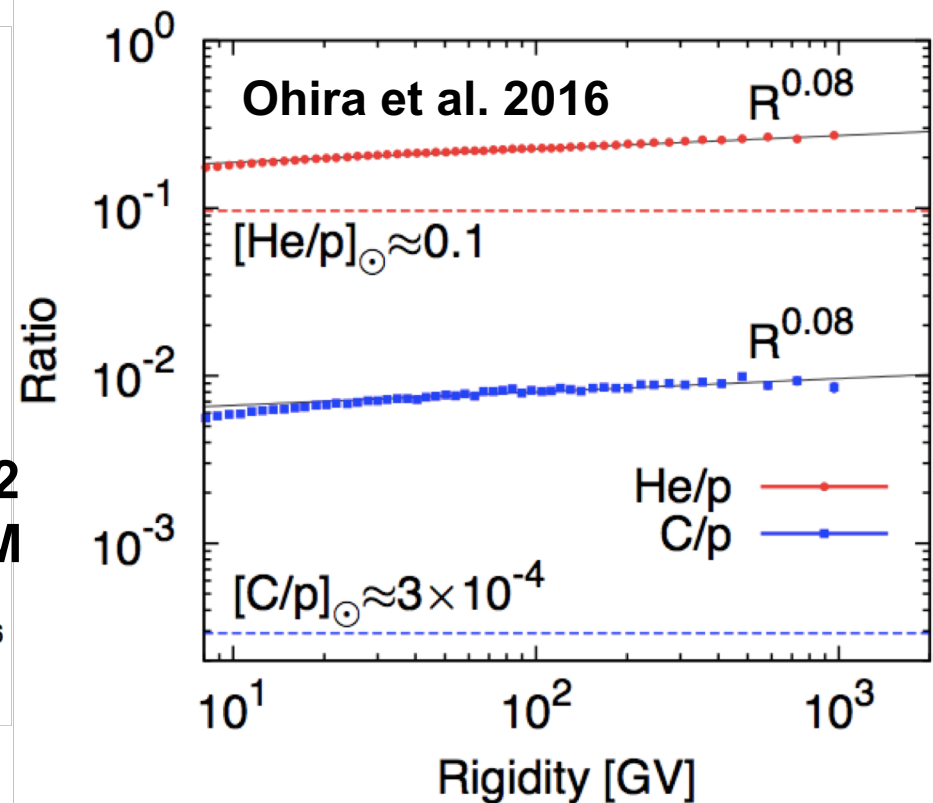
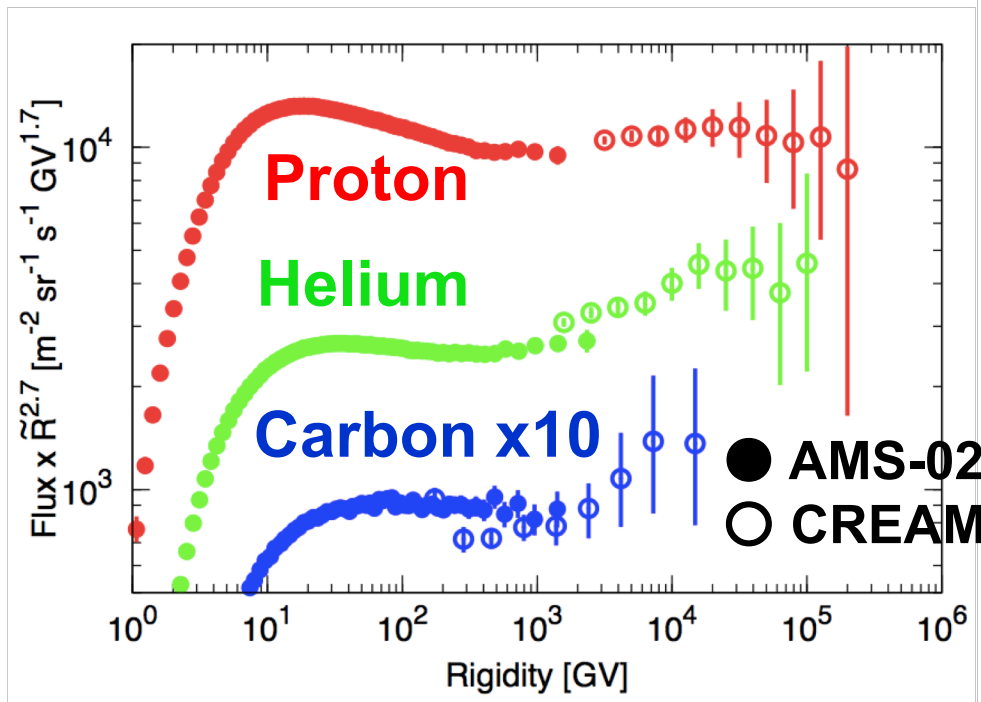
$$\frac{dN_{\text{CR}}}{dE} = \frac{L_{\text{size}}^2 Q_0}{D_0} E^{-(s+\delta)}$$

ジャイロ半径が同じ荷電粒子は同じスペクトルを予言。
観測から $s + \delta = 2.8$ → 標準モデルは、 $s = 2, \delta = 0.8$ を予言

銀河宇宙線スペクトルの標準的理解



最近の宇宙線直接観測の結果(その1)



P, He, C のスペクトルが $R \sim 300\text{GV}$ で折れ曲がる

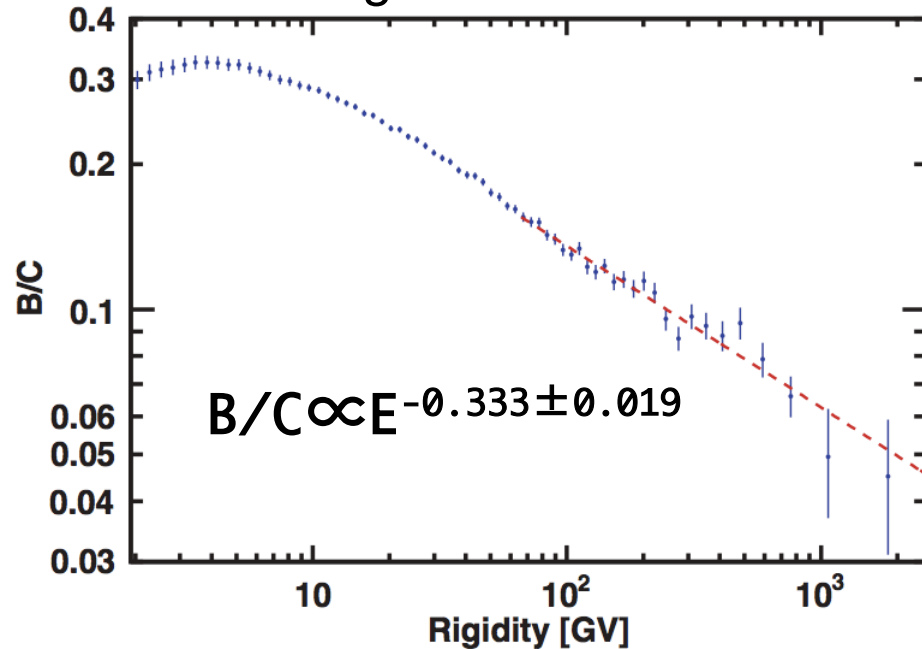
宇宙線ヘリウムの方が宇宙線陽子よりハードなスペクトル

標準モデルでは説明不可能

宇宙線炭素は、宇宙線ヘリウムと同じスペクトル

宇宙線B/Cの最新観測結果

Aguilar et al. 2016

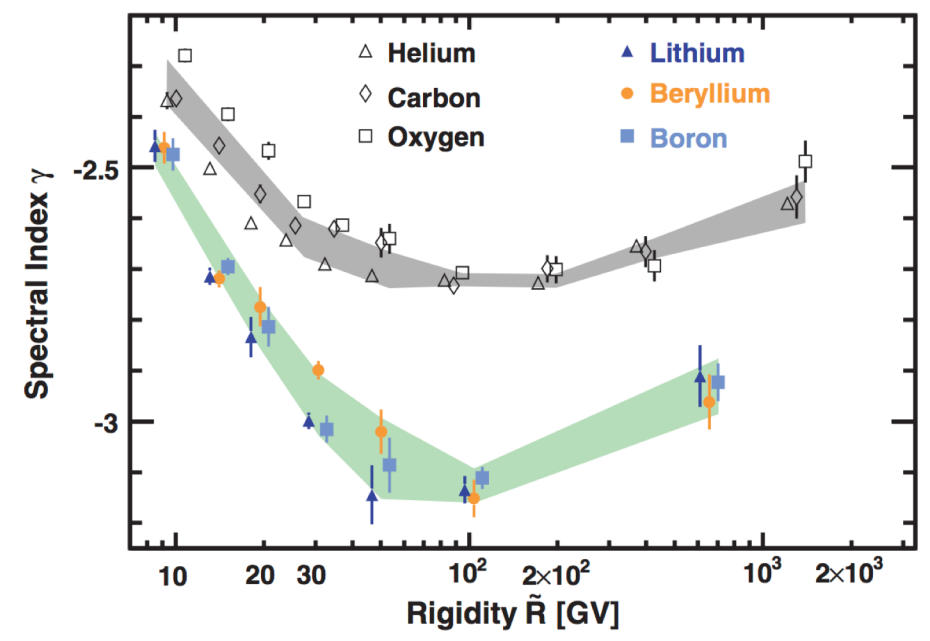


$$\delta = 0.333$$

$$s + \delta \sim 2.8 \rightarrow s \sim 2.4$$

加速の標準モデルの予言
 $s = 2.0$ と異なる.

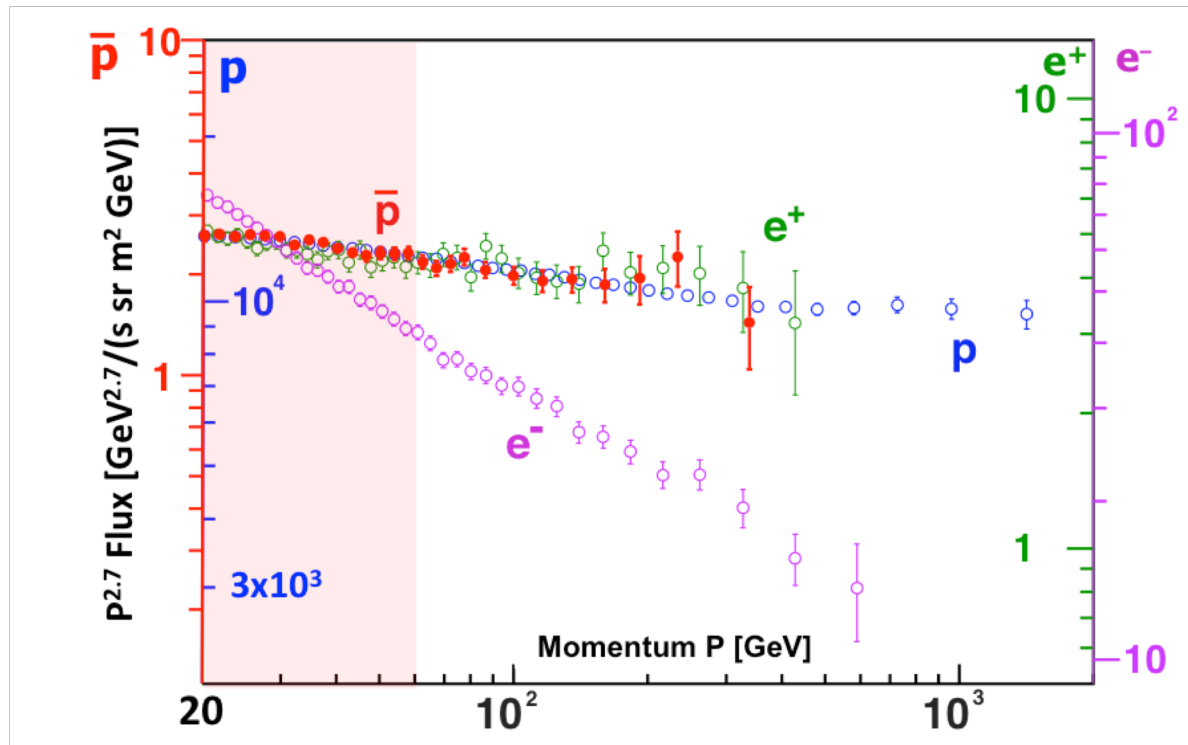
Aguilar et al. 2018



拡散係数のエネルギー依存性は、broken power law。
 $R \sim 300 \text{ GV}$ の構造は伝搬由来。

→銀河の磁気乱流スペクトルに構造あり。 $L \sim 3 \times 10^{14} \text{ cm}$

陽電子、反陽子宇宙線のスペクトル



観測結果は、 p 、 e^+ 、 \bar{p} が同じスペクトル。

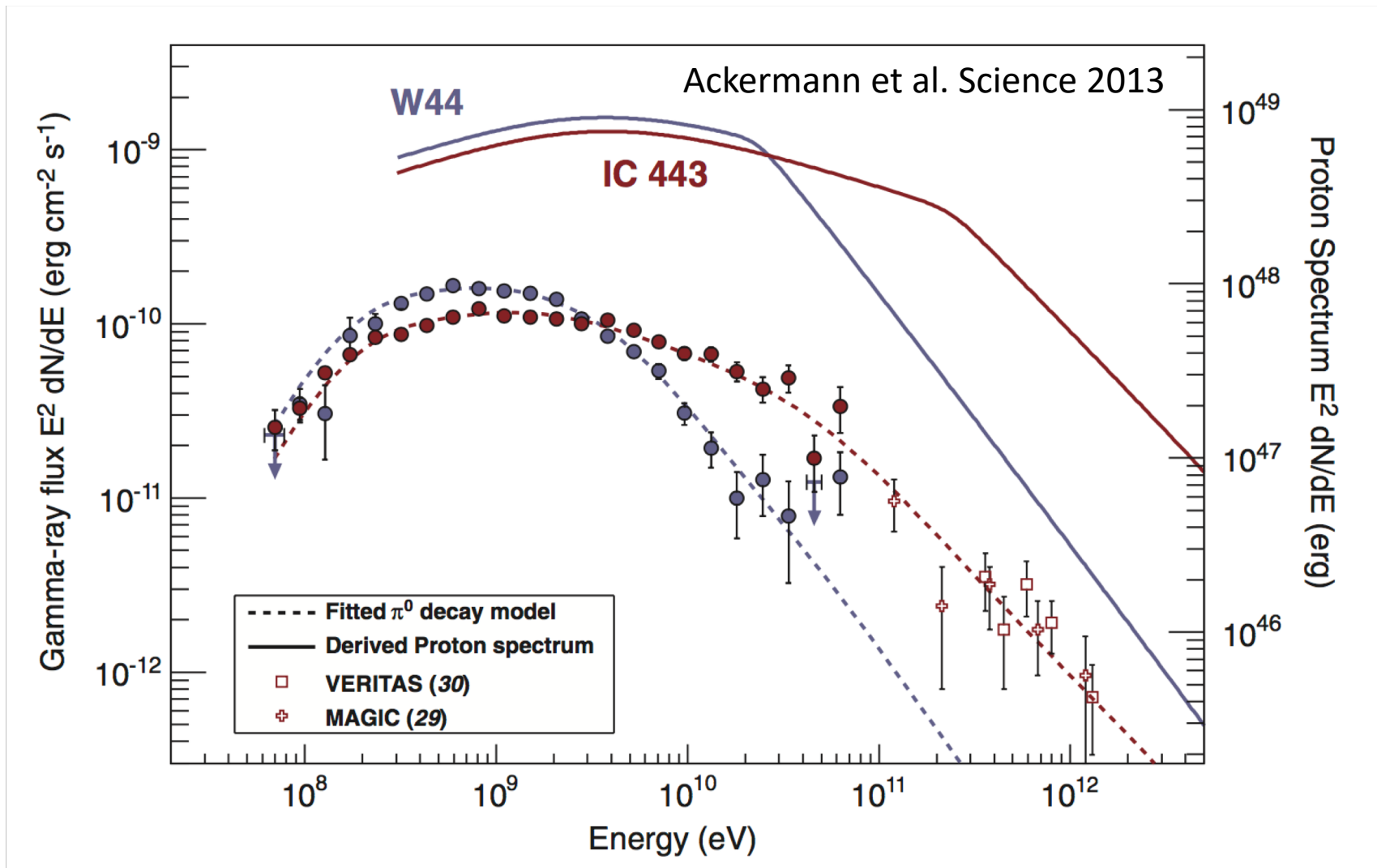
標準モデルは、 p 、 e^+ が \bar{p} よりもソフトなスペクトルを予言。

DM起源？ パルサー起源？ 宇宙線起源？

なぜ p 、 e^+ 、 \bar{p} が同じスペクトル？ (e.g. Kohri et al. 2016)

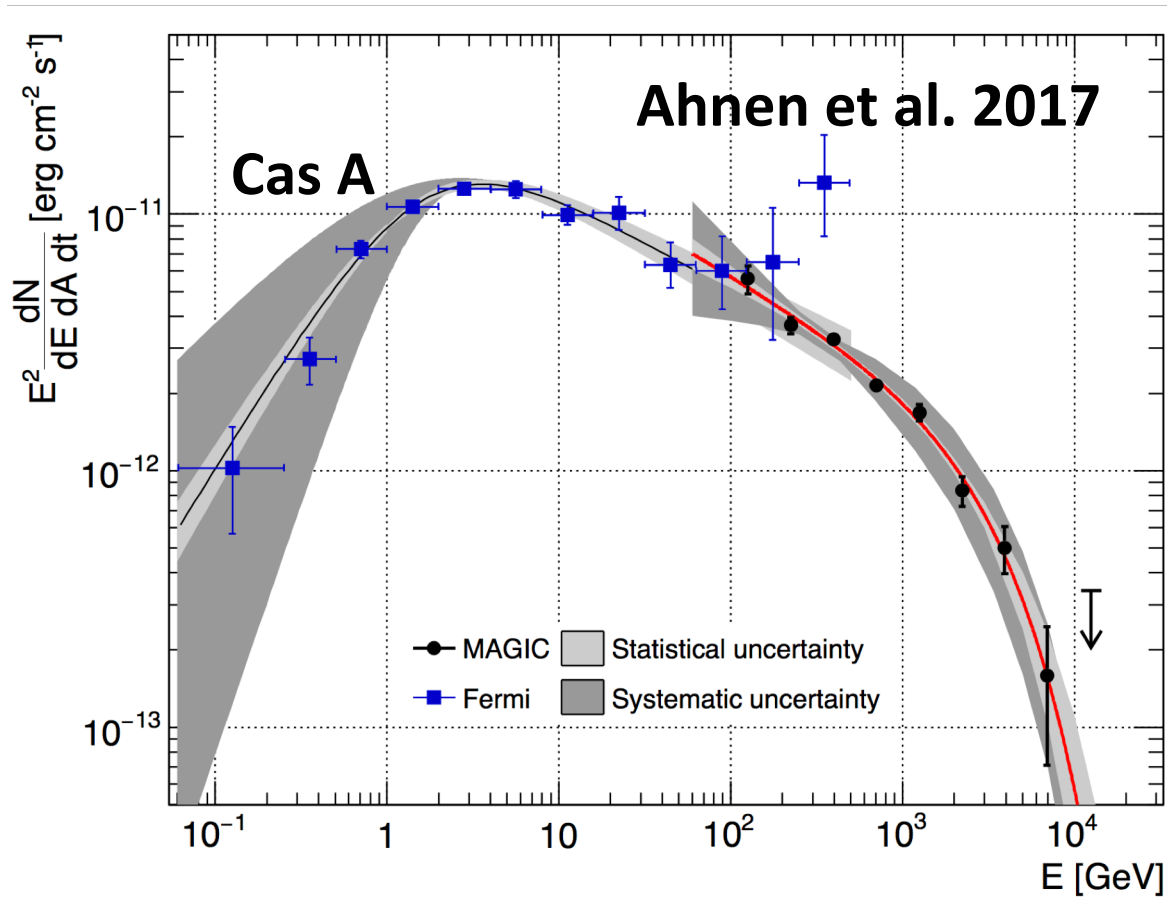
なぜ、 $N_{e^-} \sim N_{e^+}$ ？

超新星残骸のガンマ線の観測



加速された陽子起源のガンマ線(π^0 の崩壊)が観測された。
超新星残骸は、確かしに陽子を加速している。

超新星残骸のガンマ線の観測



$$U_{CR} \sim 10^{50} \text{ erg}$$

$$E_{max} \sim 10 \text{ TeV}$$

$$dN/dE \propto E^{-2.4}$$

最高エネルギーと
冪指数が
標準モデルと合わない

新しい、Knee宇宙線源の提唱

超新星残骸&パルサー星雲モデル(Ohira et al.2018),
合体後の高速回転ブラックホールモデル(Ioka et al 2017),
スーパーバブル

銀河宇宙線の謎、問題点

超新星残骸は、白色矮星の爆発起源と、大質量星の爆発起源がある (type Ia, Ib/c, IIp, type IIb, ...)。
どれが宇宙線を主に加速している？

大質量星は、星団として作られることが多い。
スーパーバブル内にある超新星残骸と、孤立した超新星残骸のどちらが主に宇宙線を加速している？

宇宙線電子、陽電子、反陽子の起源は？

銀河宇宙線の最高エネルギーは？ $10^{15.5}$ eV? 10^{17} eV? 10^{18} eV?

宇宙線のエネルギースペクトル標準理論で説明できない。
加速領域からの宇宙線の逃走が重要? (Ohira et al. 2010)

宇宙線を閉じ込めている銀河磁場の境界は何が決めている？

銀河宇宙線の将来展望

AMS-02, CALET, DAMPE, ISS-CREAM とまだまだ新しい観測結果がここ数年で出る予定。

1 PeV 近くまでの高精度な観測が期待できる。

SKAによる超新星残骸中の磁場や銀河内磁場の精密観測

超高精度X線分光による超新星残骸の精密診断

CTAによる銀河面全域にわたる超新星残骸のTeVガンマ線観測

30個 → 300-1000 個?

スパコンの性能向上に伴って、宇宙線加速機構や磁場生成機構の理解が進む

初代宇宙線(First cosmic ray)

現在の宇宙 $z = 0$ では、宇宙線が様々な天体現象に大きな影響を与える可能性が指摘されている。

宇宙線は、いつから重要な役割は果たしのだろうか？

宇宙線は、宇宙誕生後いつから加速され始めたのか？

初代宇宙線の最高エネルギーは？

初代宇宙線は周囲を加熱できる？ 21 cm に影響する？

詳しくは Ohira & Murase, arXiv:1812.02950 をみてください。

まとめ

- 100年の謎はまだ解けていない。
- まだまだ新しい宇宙観測が続く。
- 宇宙線の物理を完璧に理解できた時、
我々の銀河は、巨大な加速器実験となり、
新粒子発見へと繋がるはず。 e^+ , π , μ は、宇宙線で発見。
- 宇宙線加速を完璧に理解できた時、
高エネルギー天体現象の理解が飛躍的に進むはず。
観測されるほとんどの電磁波は、加速された粒子
が放射している。 GRB, AGN jet, Pulsar, ...

B/C

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、 $C \rightarrow B$ 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。

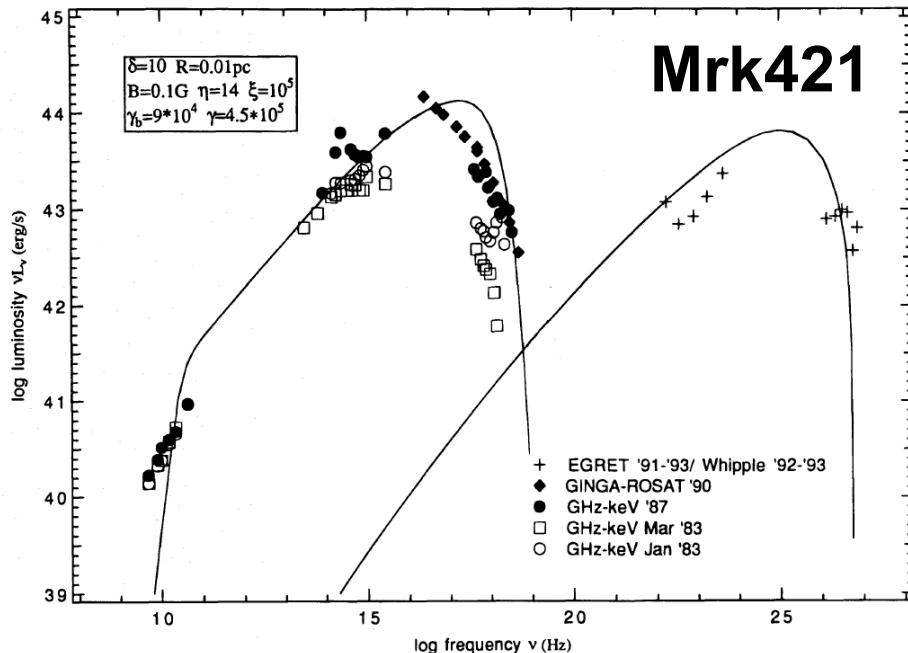
シンクロトロン放射の最高振動数 $\nu_{\text{syn,max}}$

電子の最高エネルギーは、 $t_{\text{acc}} = t_{\text{cool,syn}}$ で決まるとすると、

$$t_{\text{acc}} = \xi t_{\text{gyro}} \text{ のとき、 } E_{\text{max}} \propto \xi^{-1/2} B^{-1/2} \text{ となり } h\nu_{\text{syn,max}} \propto \xi^{-1} B^0$$

$$= \xi^{-1} m_e c^2 / \alpha$$

$$\sim 160 \xi^{-1} \text{ MeV}$$



Inoue & Takahara, ApJ, 1996

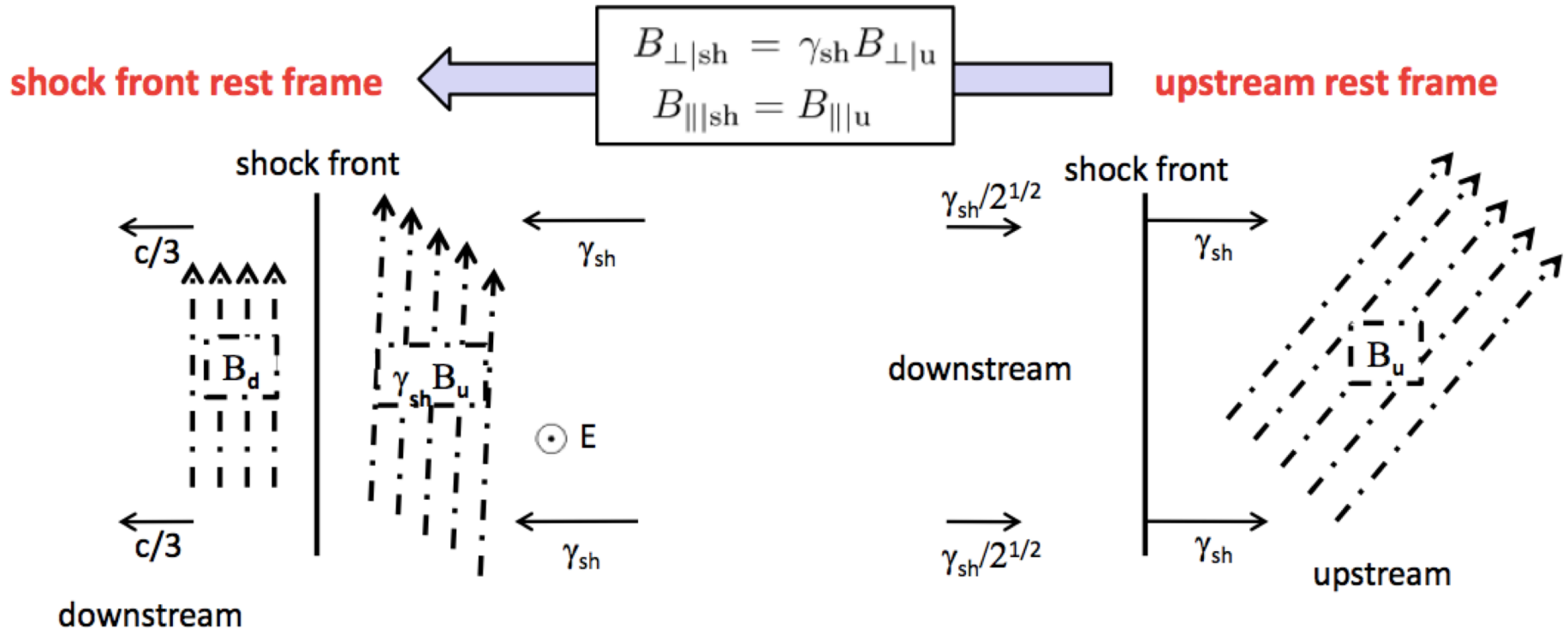
Blazarの観測は、

$$h\nu_{\text{syn,max}} \sim 1 - 10^3 \text{ eV}$$

$$\rightarrow \xi \sim 10^5 - 10^8$$

相対論的衝撃波では
UHECRをつくれない？

相対論的衝撃波



\Rightarrow ultra-relativistic shock waves are mostly perpendicular (superluminal)

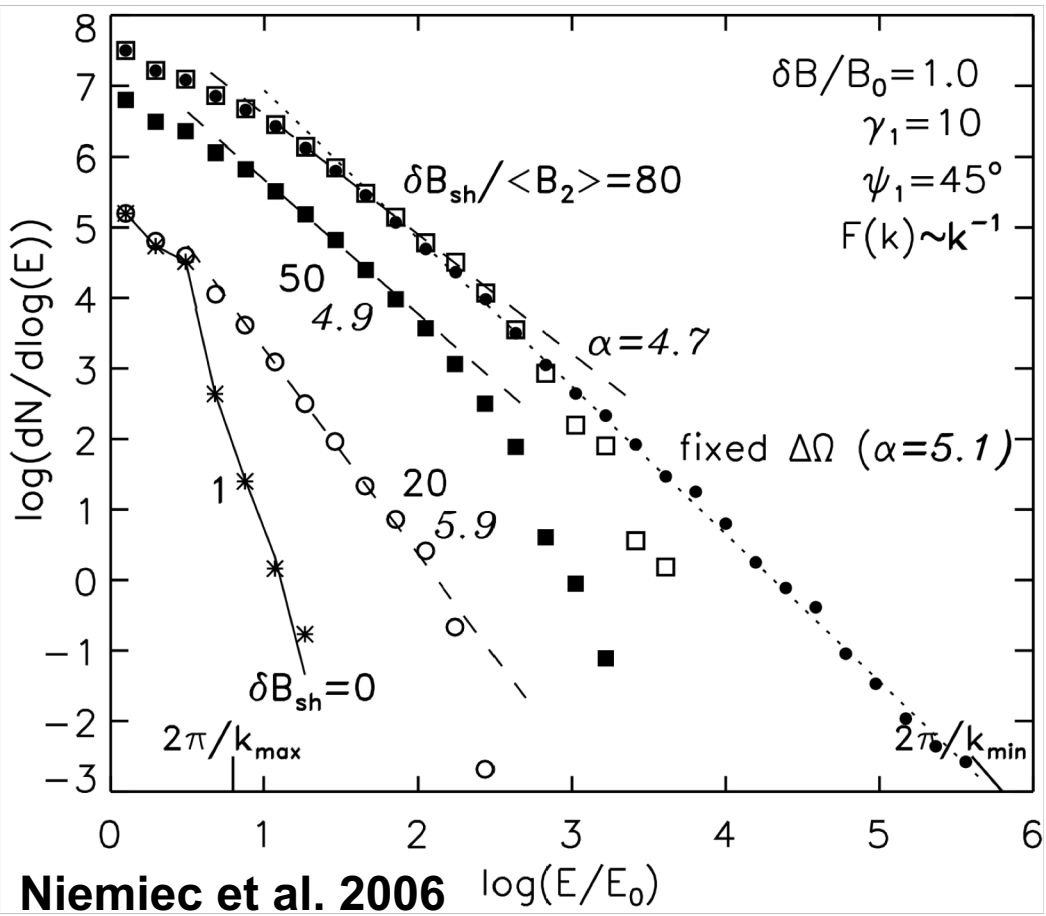
$V_{sh} / \cos \theta > c$ のとき、

Lemoine さんの発表スライドより

磁力線に沿った運動では、衝撃波を往復することができない。

磁力線を横切る拡散運動が必要

Superluminal shock を往復する条件 $\lambda_{\delta B} < r_g$



大きなスケールの揺らぎだけでは、
 下流は非等方乱流のため、磁場に
 垂直な拡散が抑えられる。

衝撃波下流から上流へ戻るために
 は、下流に小さなスケールの磁場
 の揺らぎが必要

$\lambda_{\delta B} < r_{L,CR}$ (Niemiec et al. 2006,
 Lemoine et al. 2006)

$\rightarrow \lambda_{mfp} \sim r_{gyro}^2 / \lambda_{\delta B} \propto E^2$

Not Bohm

一様垂直磁場 $B_0 + \delta B$ の揺らぎ を下流で衝撃波圧縮

$\lambda_{\delta B} < r_{gyro}$ となる揺らぎを足すと、粒子は加速される

$\lambda_{\delta B} < r_{gyro}$ の揺らぎの揺らぎの振幅が大きくなると、
 power law 領域も広がる。(e.g. Pelletier et al. 2009)

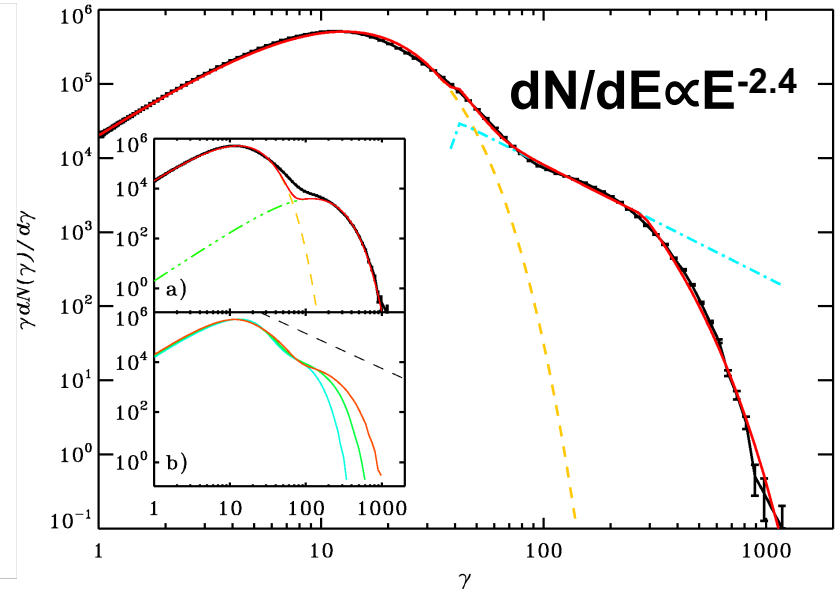
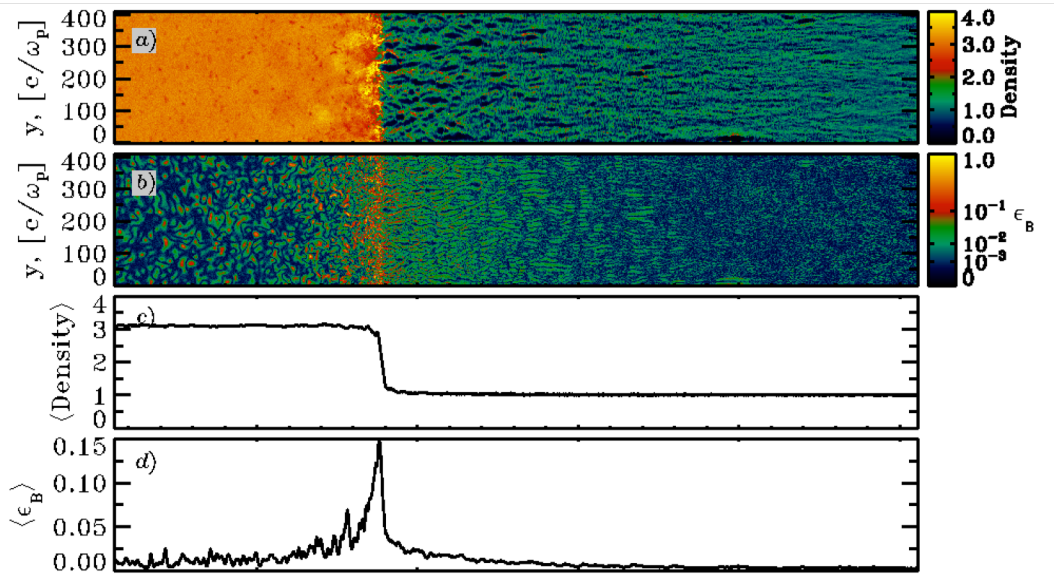
相対論的衝撃波は宇宙線を
 $10^{20} eV$ まで加速できない

(e.g. Lemoine & Pelletier 2010)

PIC simulations of relativistic shocks

Particle in cell simulation

マクスウェル方程式と沢山の荷電粒子の運動方程式を解く



Spitkovsky 2008

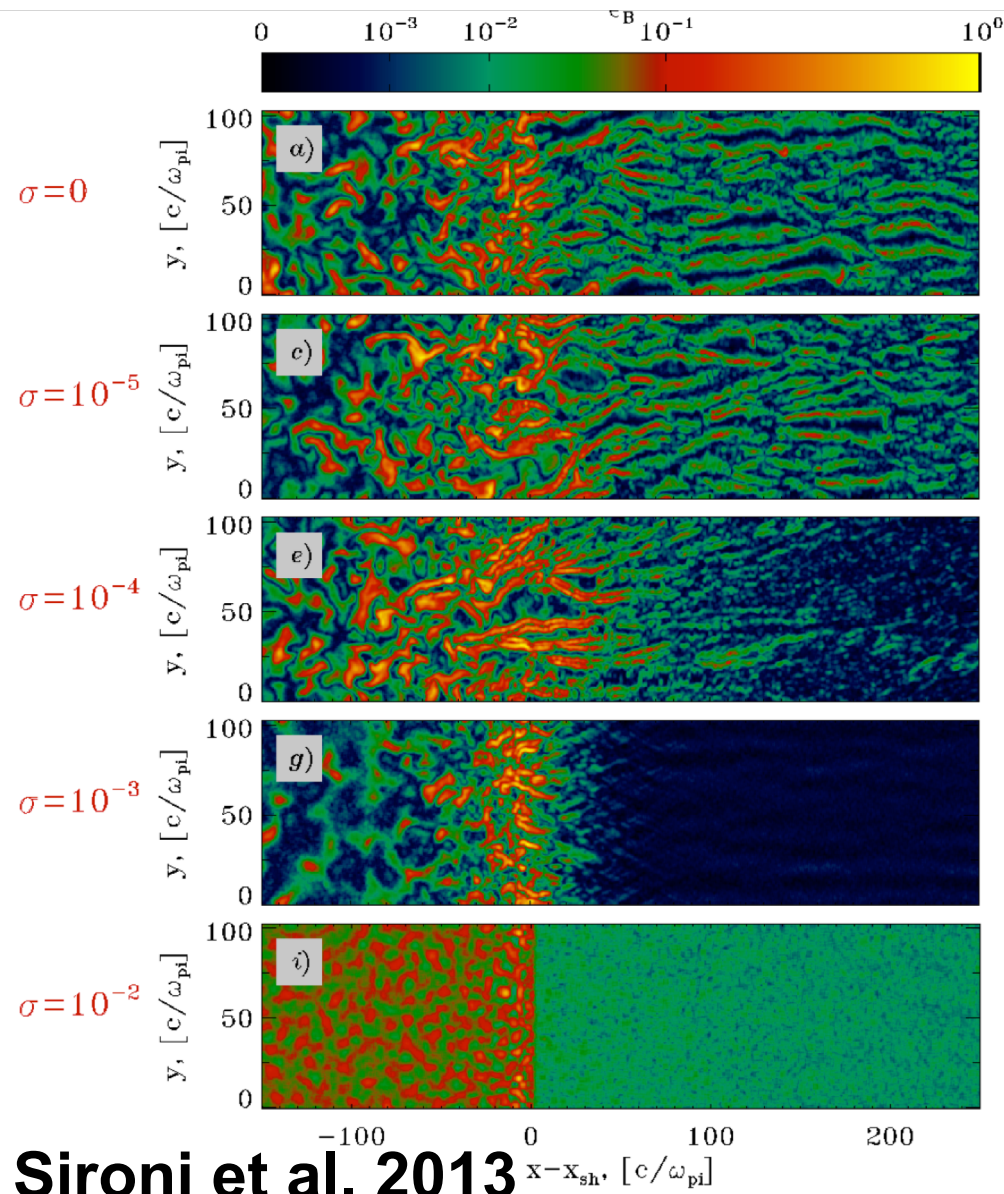
上流の一様磁場が弱い相対論的衝撃波では、

上流のプラズマはWeibel不安定性によって散逸される。

$\lambda_{\delta B} \sim c/\omega_p \ll r_{\text{gyro}} \rightarrow$ 粒子加速の注入条件を満たす。

Spectral index ~ 2.4

E_{\max} of Weibel mediated shocks



PIC simulations show

$$\lambda_{\delta B} \sim c/\omega_{pp} \ (\ll r_{gyro}).$$

→ Small angle scattering

$$\begin{aligned} \rightarrow D_{\theta\theta} &\sim (\delta\theta)^2 / \delta t \\ &\sim (\lambda_{\delta B}/r_{gyro})^2 / (\lambda_{\delta B}/c) \end{aligned}$$

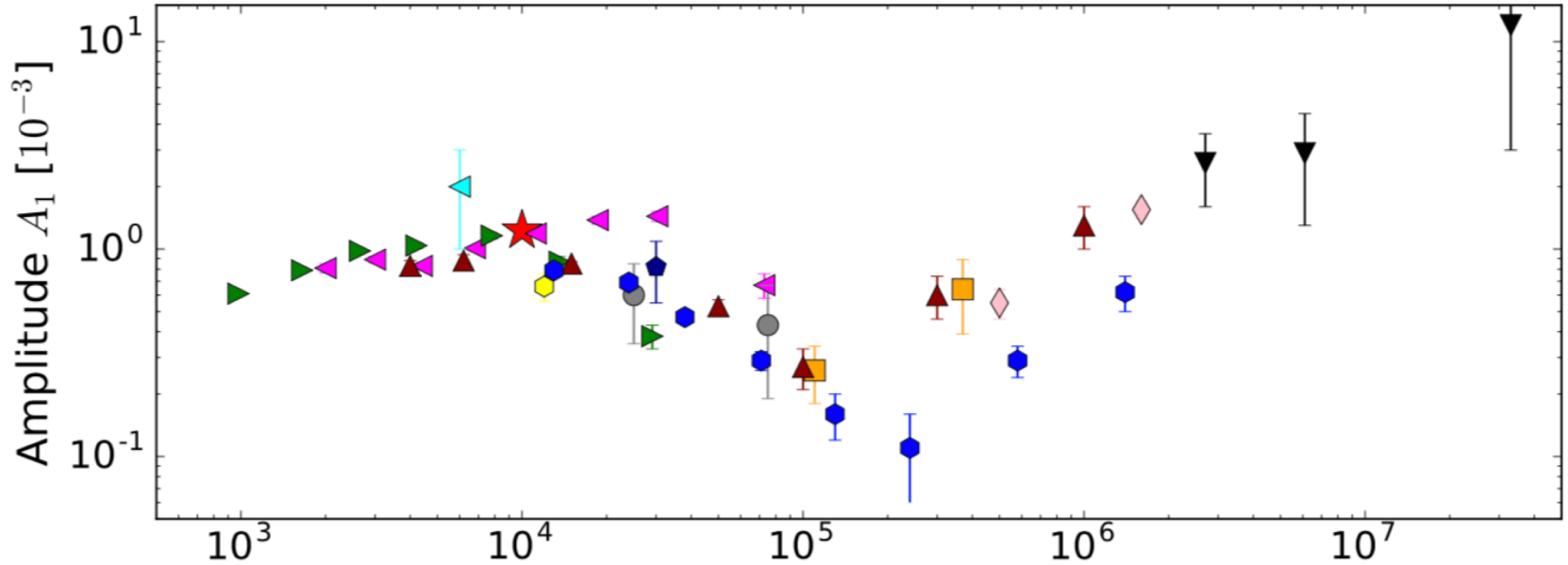
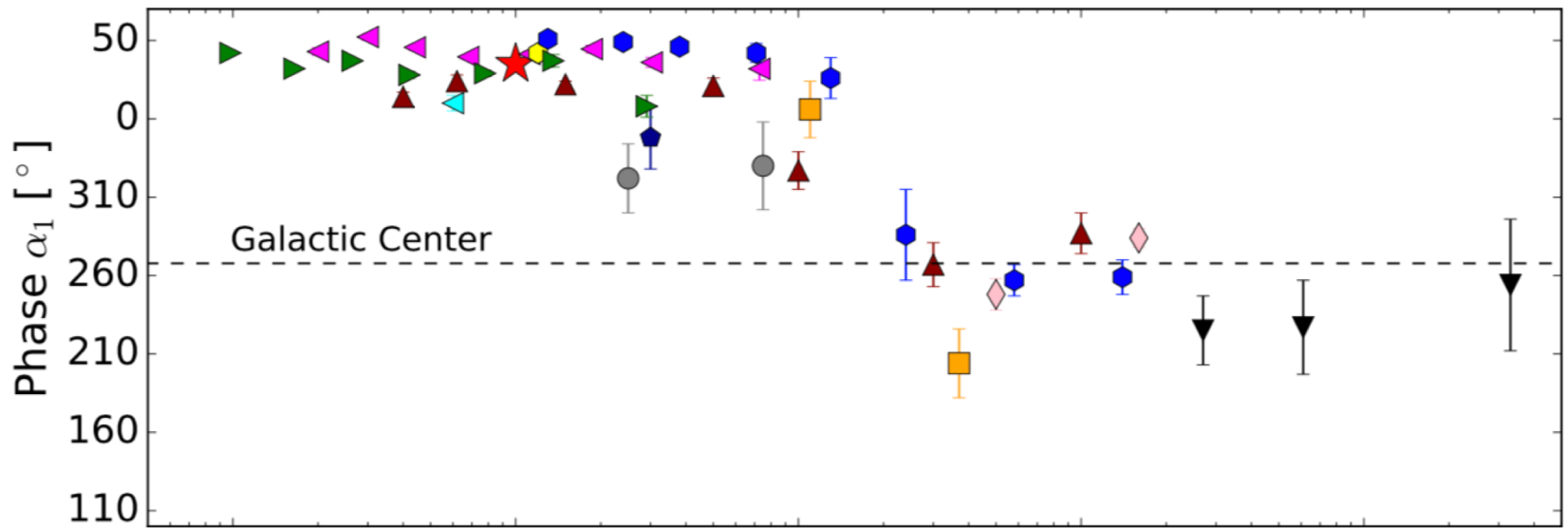
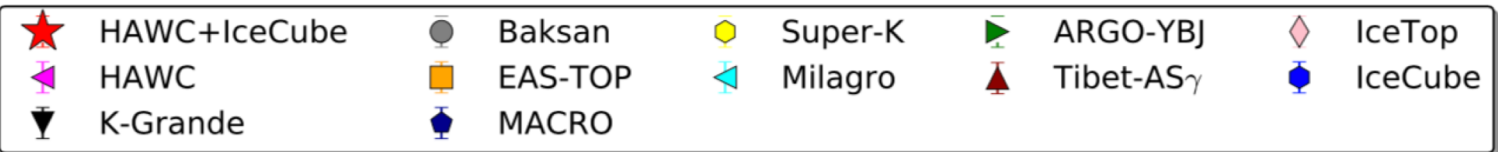
$$\begin{aligned} \rightarrow D_{xx} &\sim c\lambda_{mfp} \sim c (c/D_{\theta\theta}) \\ &\sim cr_{gyro}^2/\lambda_{\delta B} \propto E^2 \end{aligned}$$

$$R_{turb} \sim r_{gyro,sh} \quad \text{Not Bohm}$$

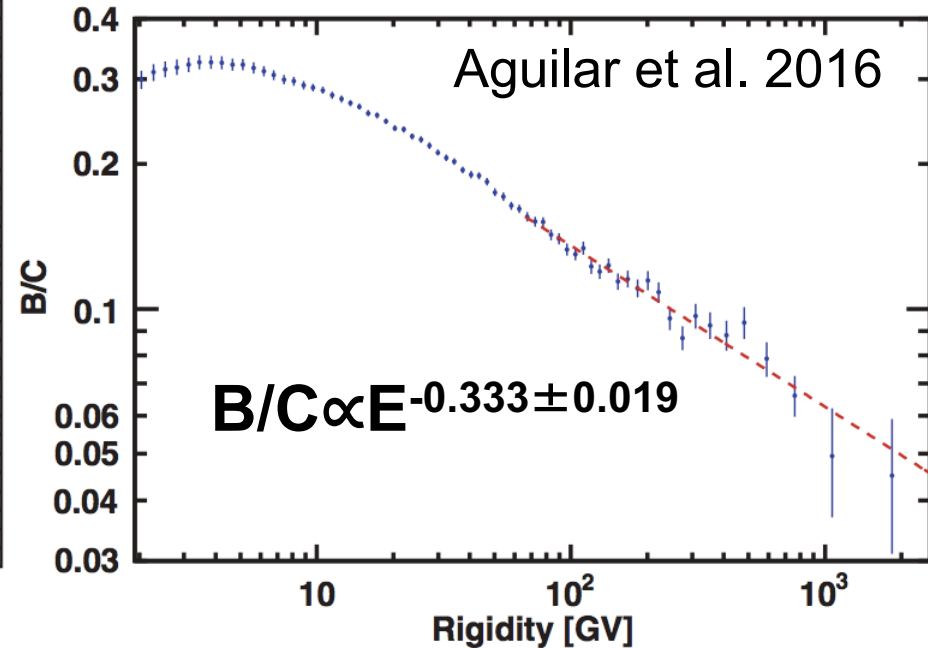
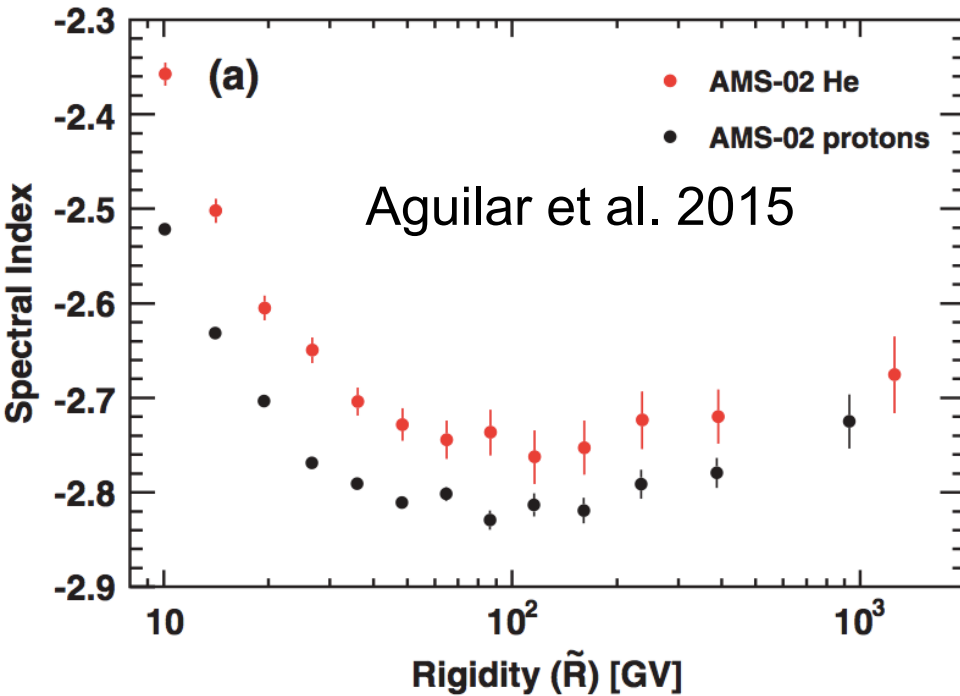
→ E_{\max} is limited by

$$R_{turb} \sim R_{diff} \sim D_{xx}/c$$

→ $E_{\max} \sim 10^{17} \text{ eV}$ for GRB



最新の銀河宇宙線の観測結果



冪指数 ~ **2.8 (p @100GeV)**
2.7 (He @100GeV)

$$\delta = 0.333$$

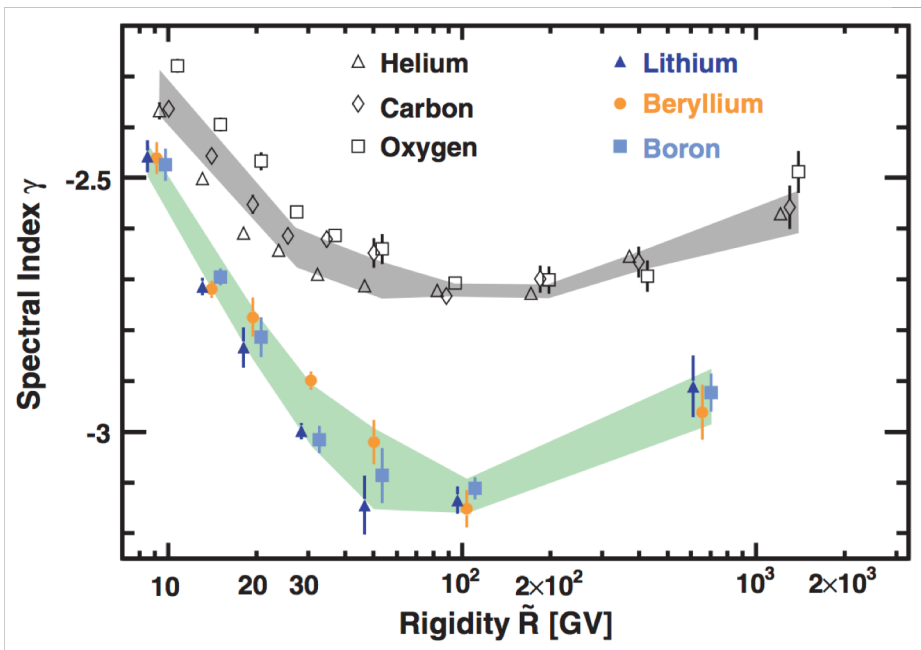
$$s + \delta \sim 2.7 - 2.8 \rightarrow s \sim 2.37 - 2.47$$

陽子とヘリウムで冪が異なる。CRの源の冪指数が2より大きい。

Rigidity以外の
物理量に依存

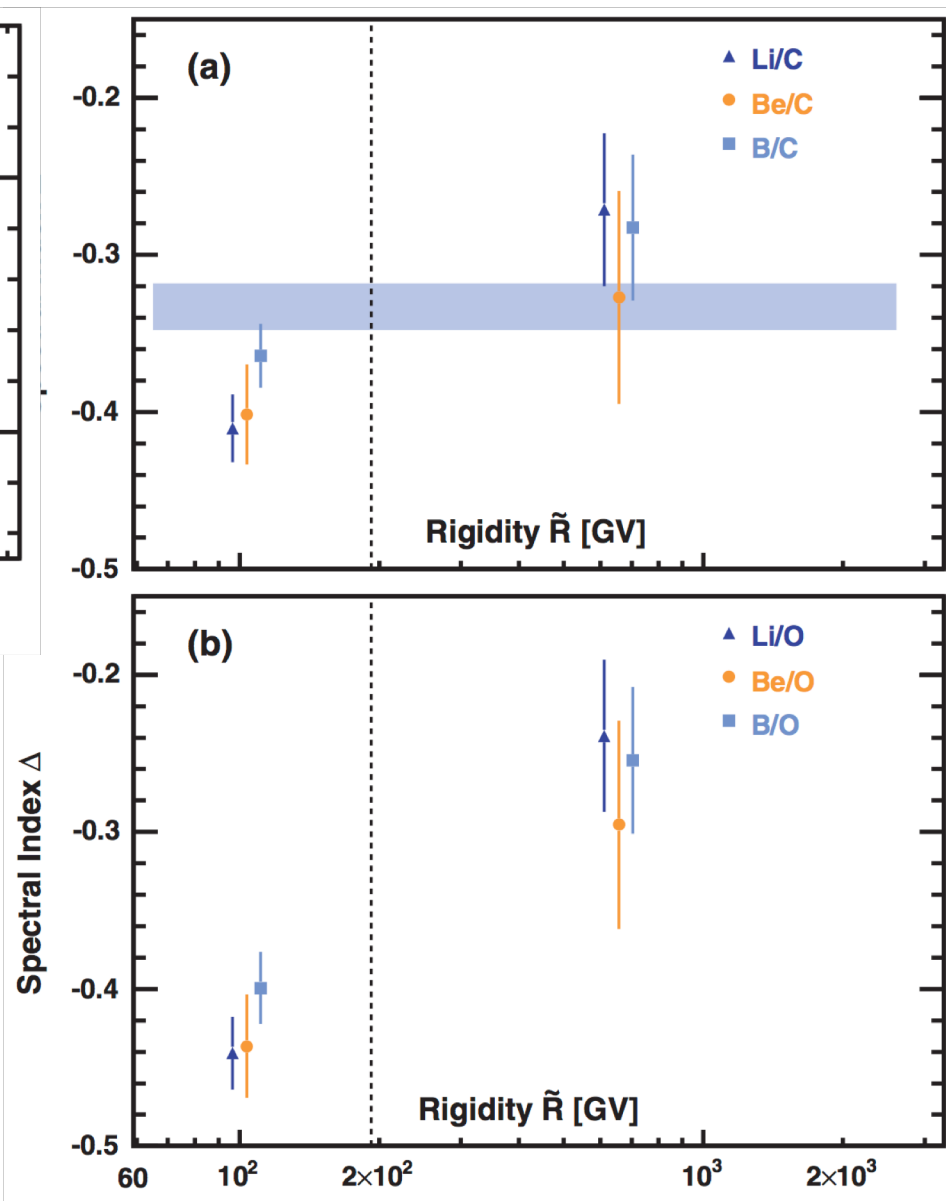
標準モデルの予言と違う！！

最近の宇宙線直接観測の結果(その2)



Aguilar et al. PRL, 2018

p, He, C, O の宇宙線スペクトルで見えている $R \sim 200$ GV の hardening は、銀河内の伝搬中に作られことを意味する。



宇宙線とノーベル物理学賞

ヴィクトール・フランツ・ヘス（宇宙線の発見）

チャールズ・ウィルソン（霧箱の考案）

カール・ディビッド・アンダーソン（2次宇宙線から陽電子を発見）

パトリック・ブラケット（ウィルソン霧箱の発展）

セシル・パルエル（2次宇宙線から中間子の発見）

ポール・ディラック(陽電子の存在を予言)

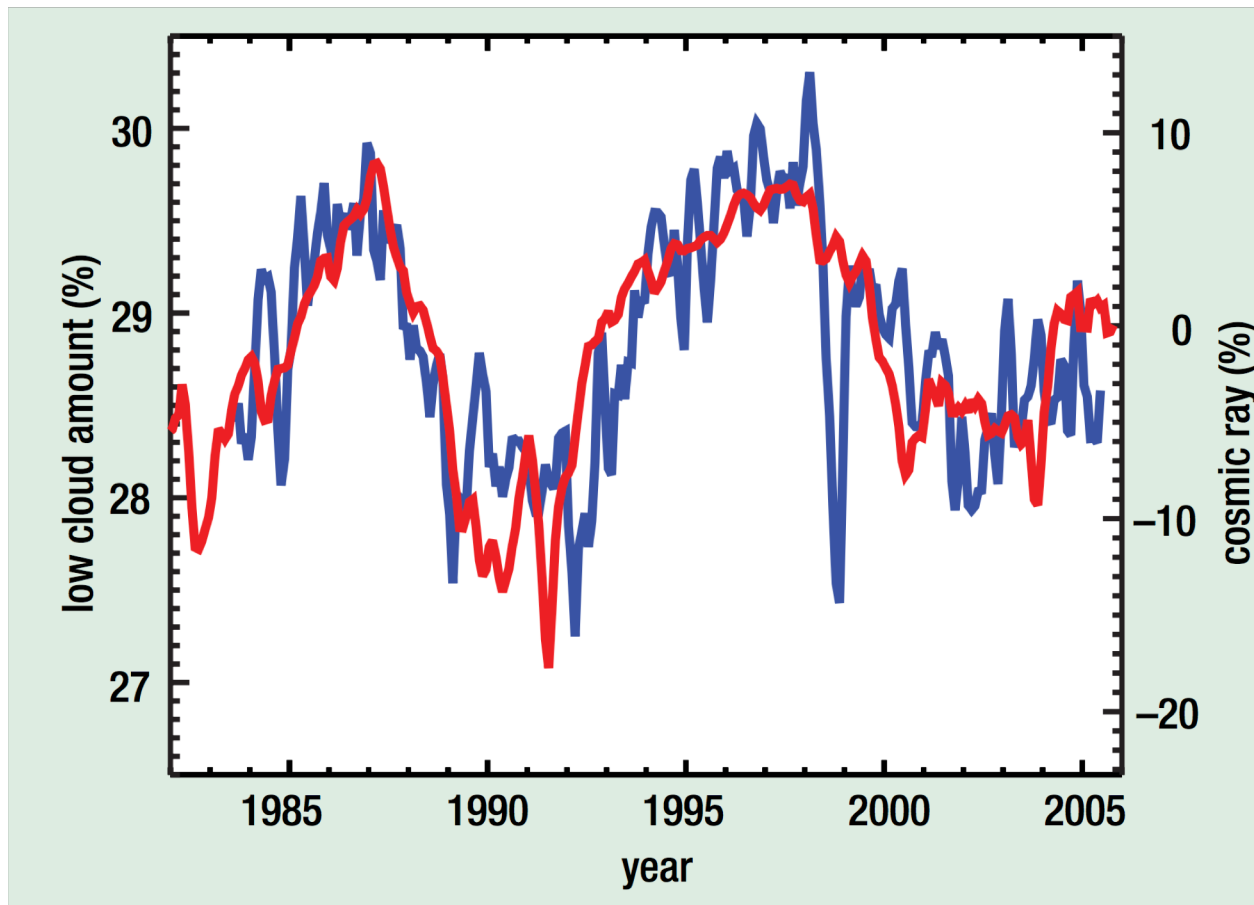
湯川秀樹(中間子の存在を予言)

1950年までのノーベル物理学賞の約13%が宇宙線に関係する。

宇宙線と雲と気候変動1

Svensmark & Friis-Christensen 1997, Svensmark PRL 1998

宇宙線の量の変化と低層雲雲量の変化に正の相関がある。
宇宙線が増えると、低層雲が増え、地球が冷える。

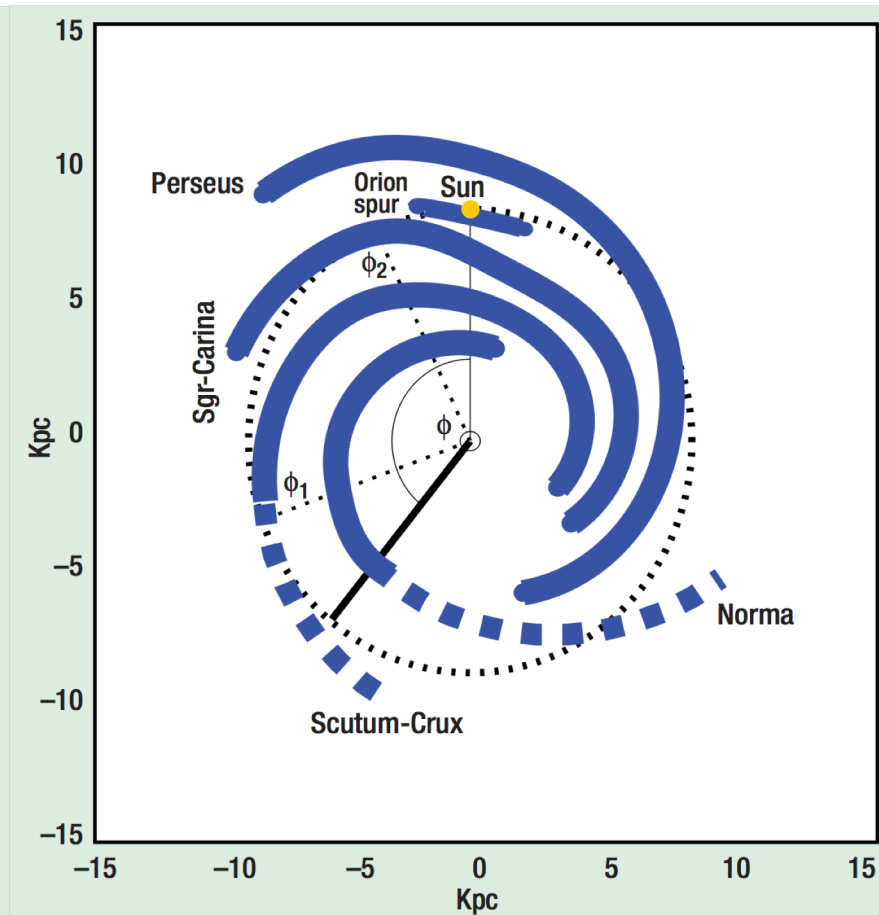
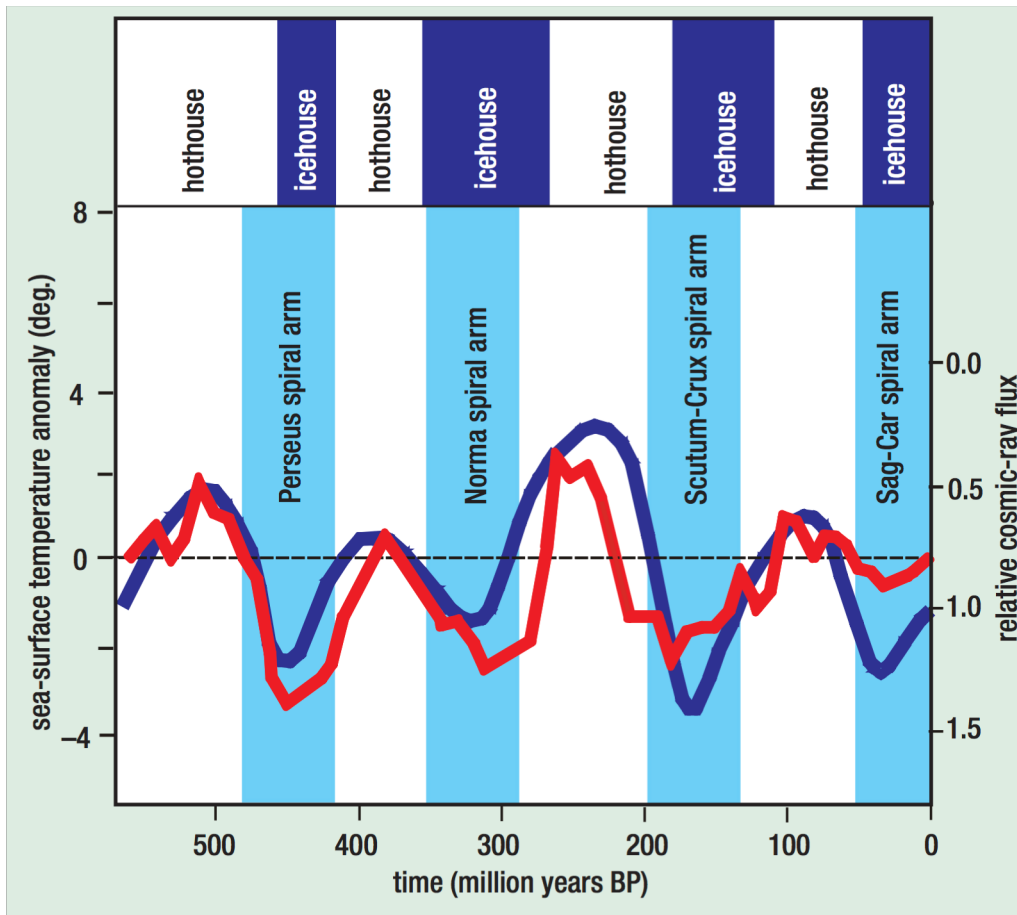


Svensmark
A&G 2007

宇宙線と雲と気候変動2

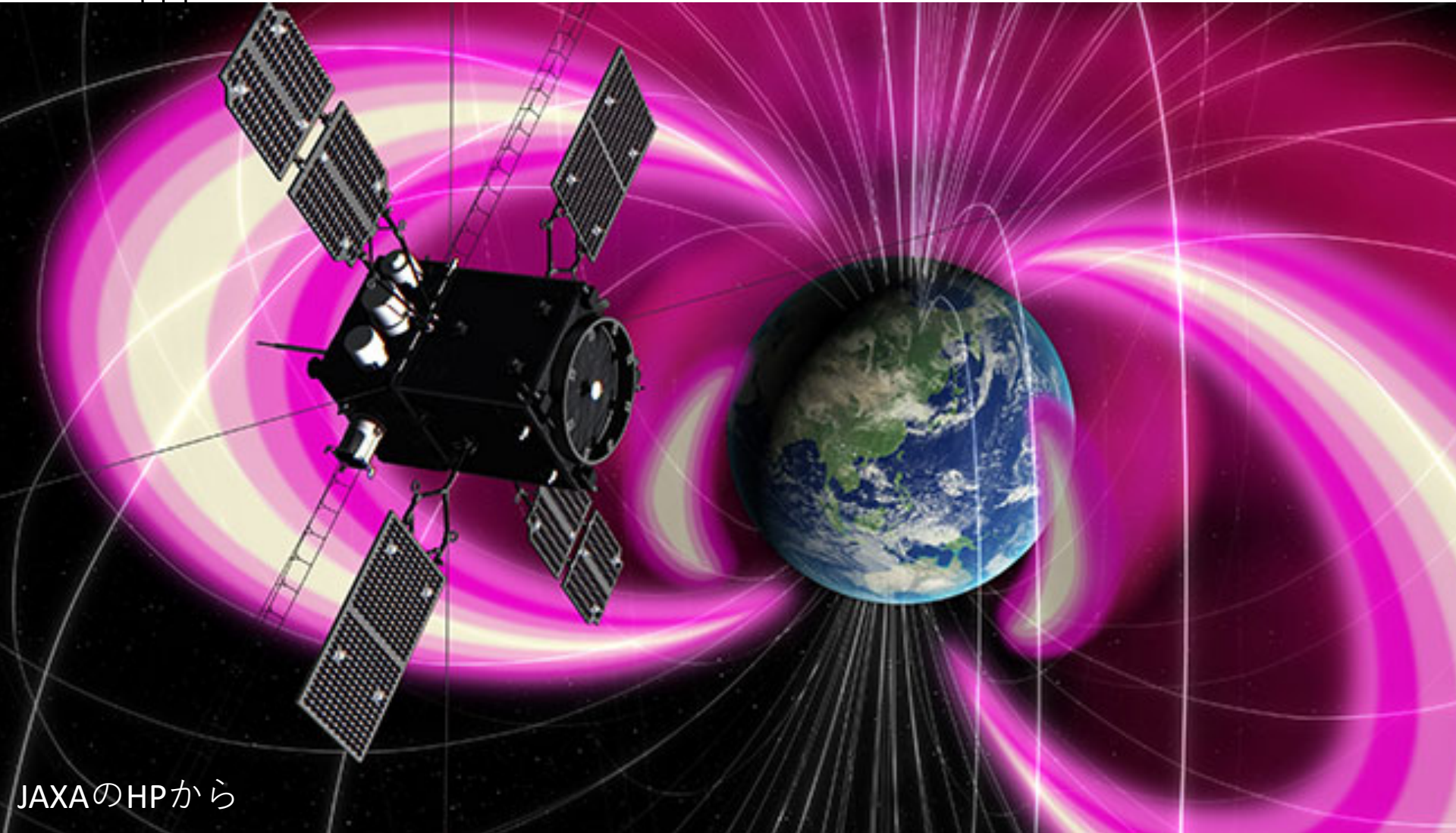
Shaviv, PRL, 2002, Shaviv & Veizer, GSA Today, 2003

10億年のタイムスケールの宇宙線の量の周期的変化と、
銀河の渦構造、地球の気温変化が一致する。



Svensmark A&G 2007

宇宙線とヴァン・アレン帯の内帯



JAXAのHPから

内側のヴァンアレン帯の高エネルギー粒子の起源は、宇宙線と地球大気の相互作用で作られる高エネルギー中性子。Li et al. Nature, 2017

ホウ素(B)の起源

ホウ素は、ビッグバンの時の元素合成や星の中で起きる元素合成では、作られない。

銀河内で、宇宙線と炭素や酸素、窒素が衝突することでホウ素が作られる。

ホウ素が使われる例

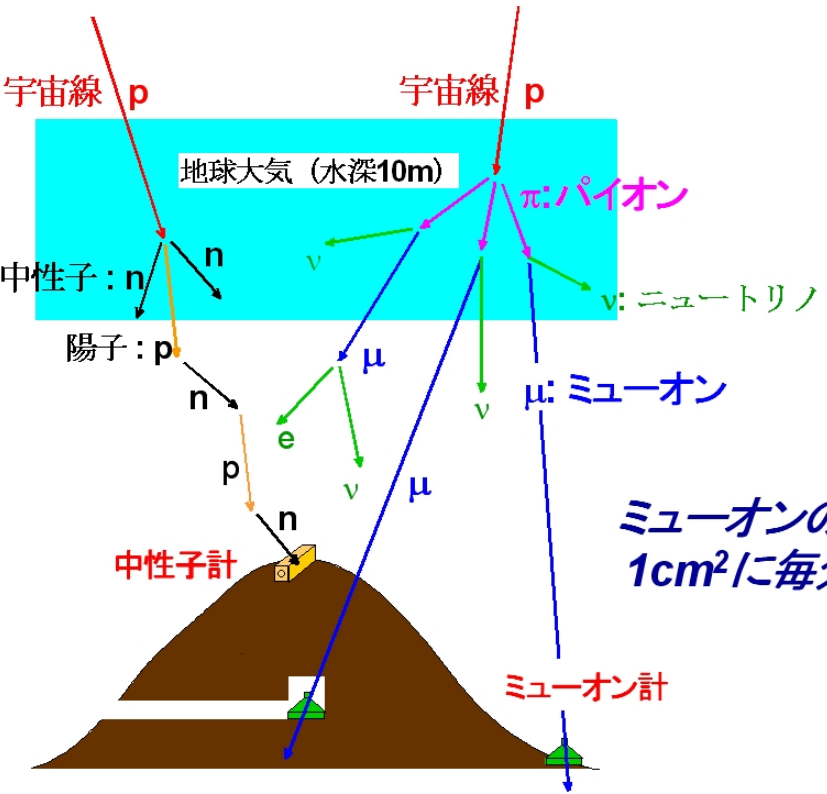
ゴキブリ退治に必要なホウ酸団子

原子炉から発生する中性子を吸収する制御棒

最強永久磁石 ネオジウム磁石

スライム (ホウ砂+洗濯糊)

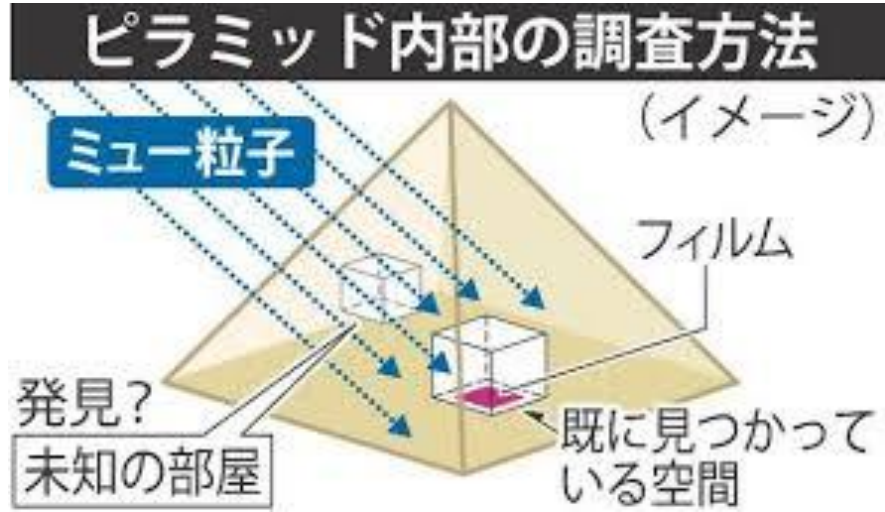
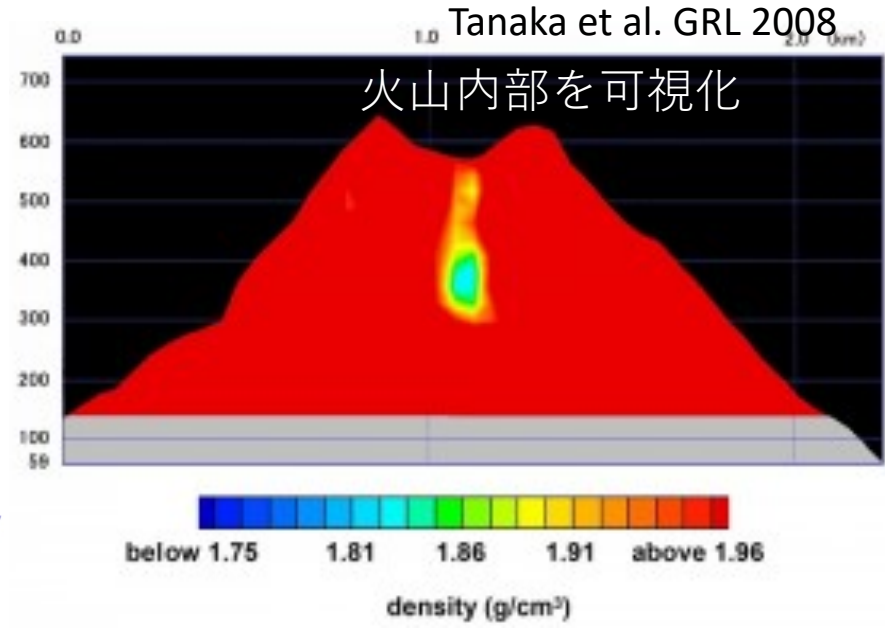
宇宙線を使った応用



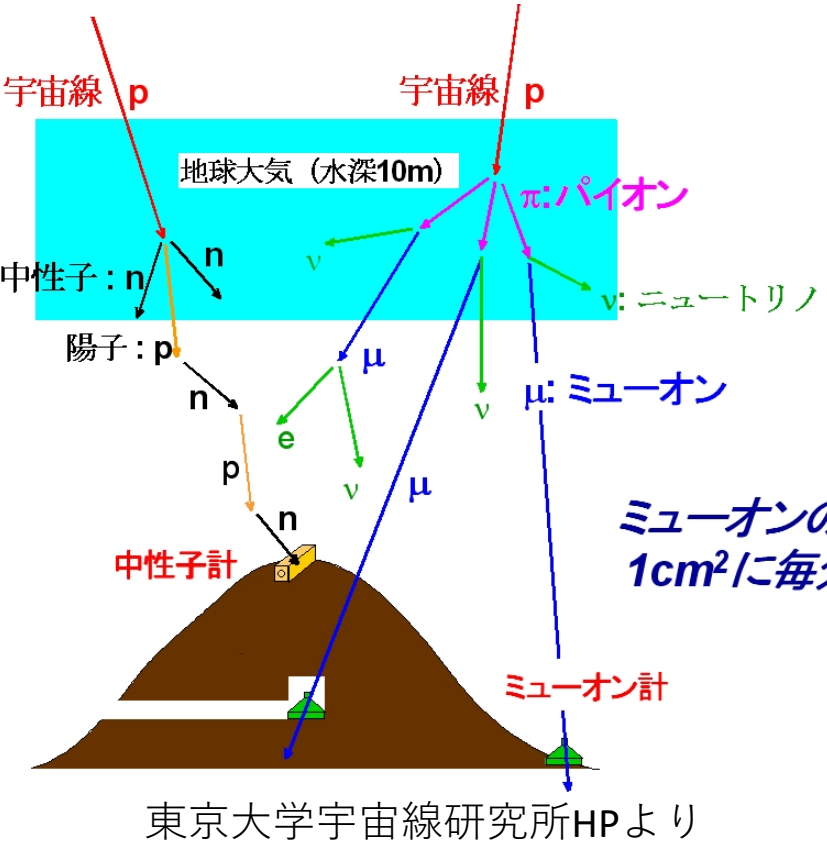
ミュオンの個数 = 1cm^2 に毎分1発!

東京大学宇宙線研究所HPより

他にも、宇宙線照射年代による隕石の年代測定の実用もある。



宇宙線とソフトエラー、雷、火山噴火



宇宙線が地球大気と衝突して、電子、陽子、中性子やミュー粒子を大量につくる

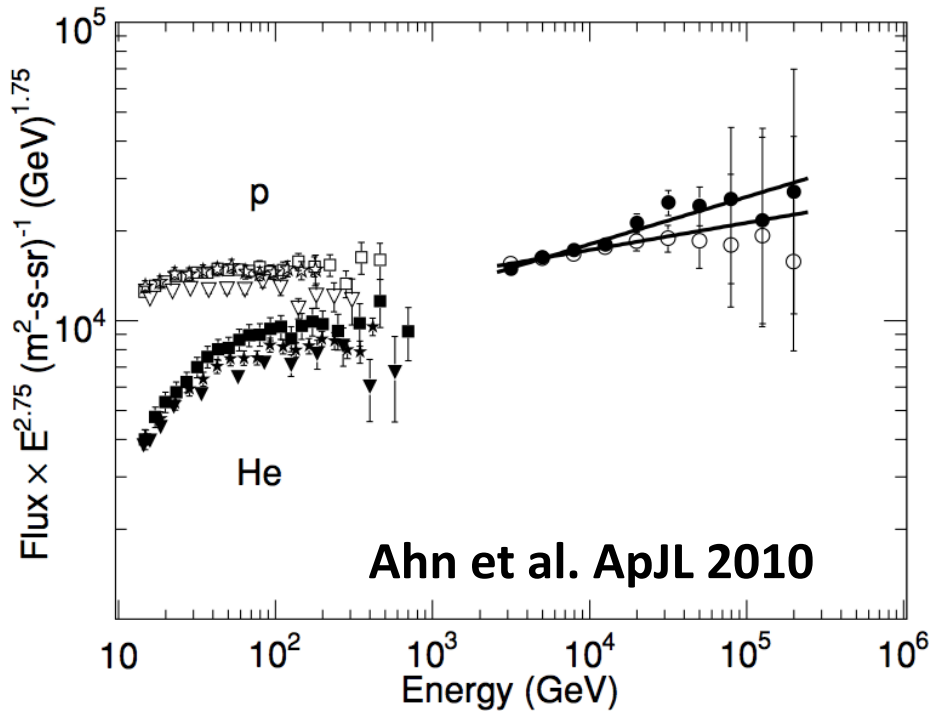
中性子が半導体内でビット反転を引き起こす。ソフトエラーと呼ばれ、Intelによって1978に明らかにされた。

宇宙線によって作られた大量の荷電粒子が放電のきっかけとなり雷が発生???

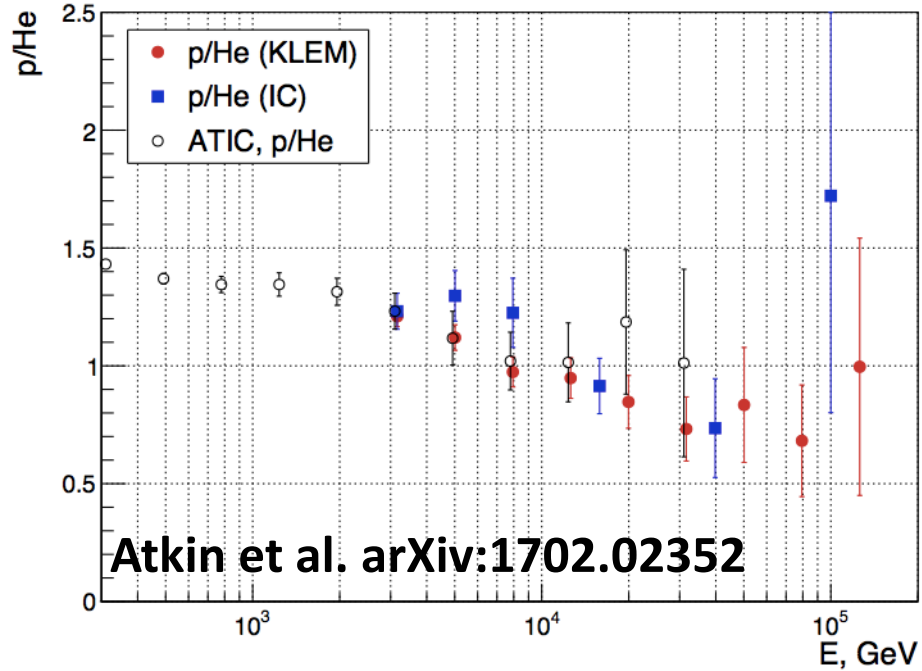
ミュー粒子が火山内部の過飽和状態を刺激して噴火???

Proton and Helium spectra ($E < 0.2 \text{ PeV}$)

CREAM

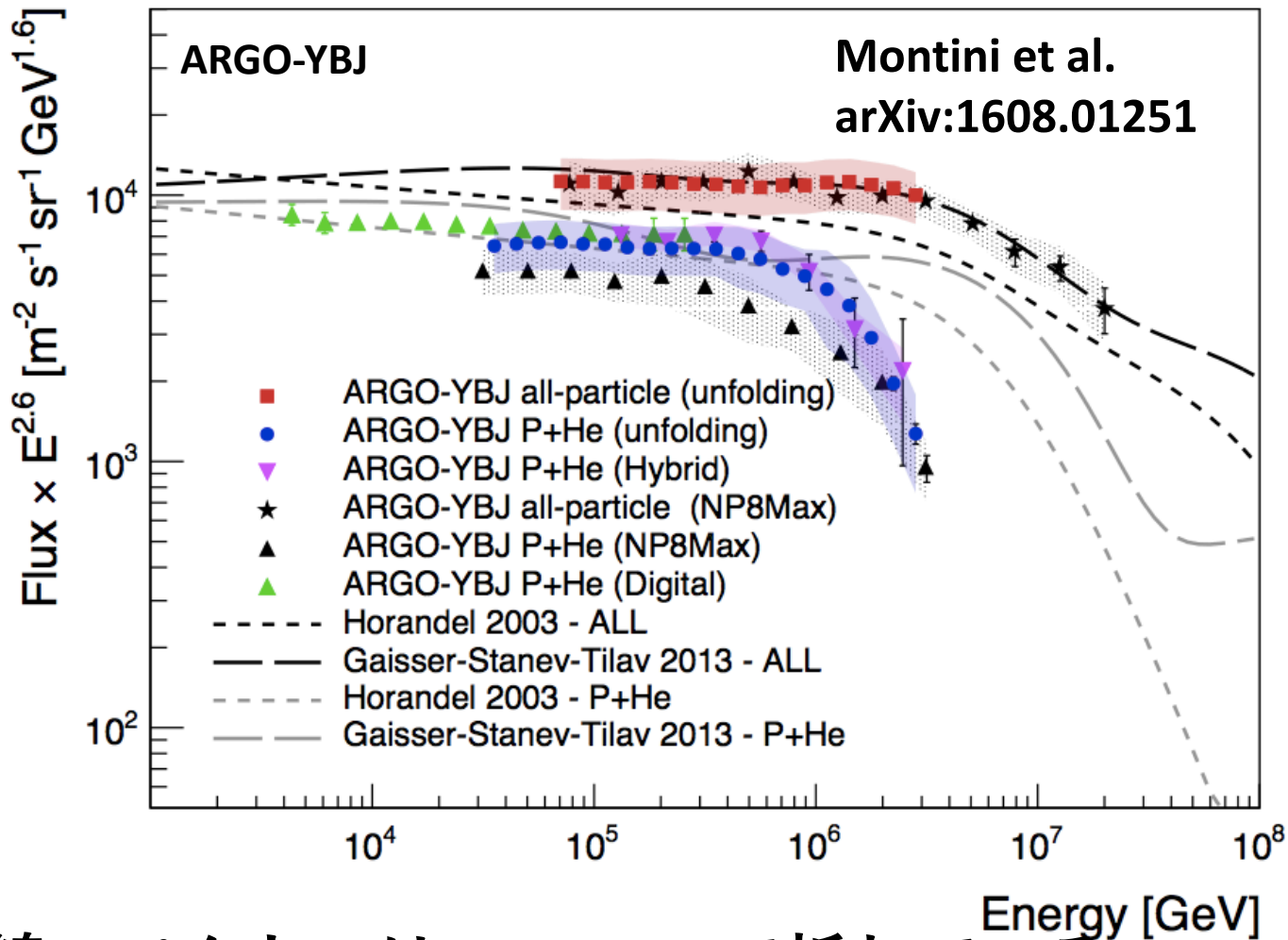


NUCLEON



宇宙線ヘリウムの方が宇宙線陽子よりハードなスペクトル
宇宙線ヘリウムは $E \sim 0.1 \text{ PeV}$ で陽子より多い!

P+He spectrum ($E \sim 1 \text{ PeV}$)

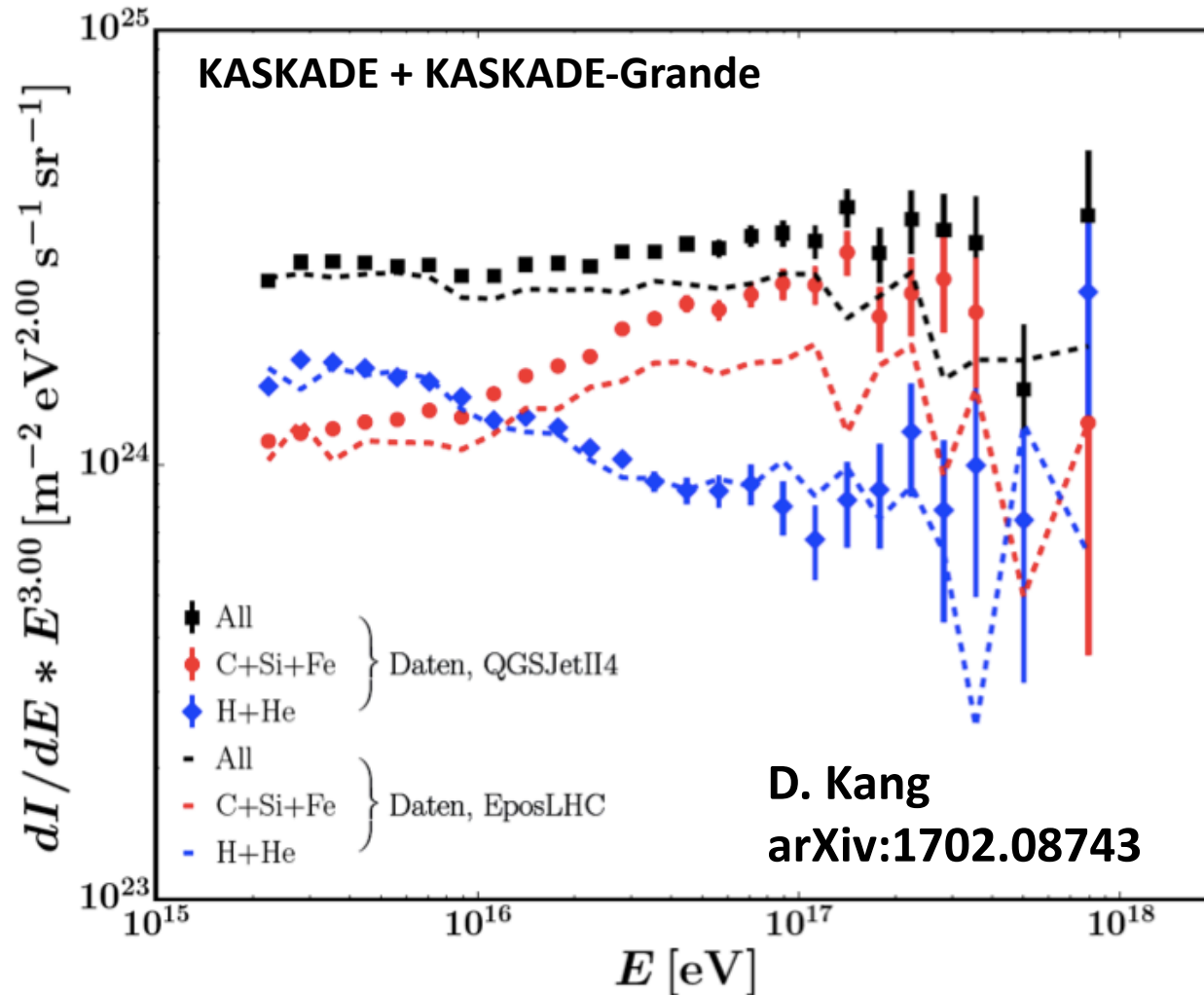


全宇宙線スペクトルは $E \sim 3 \text{ PeV}$ で折れている。

P+Heのスペクトルは $E \sim 1 \text{ PeV}$ で折れている。

$E \sim 1 \text{ PeV}$ でHeが支配的なら、陽子は $E \sim 0.5 \text{ PeV}$ で折れてい

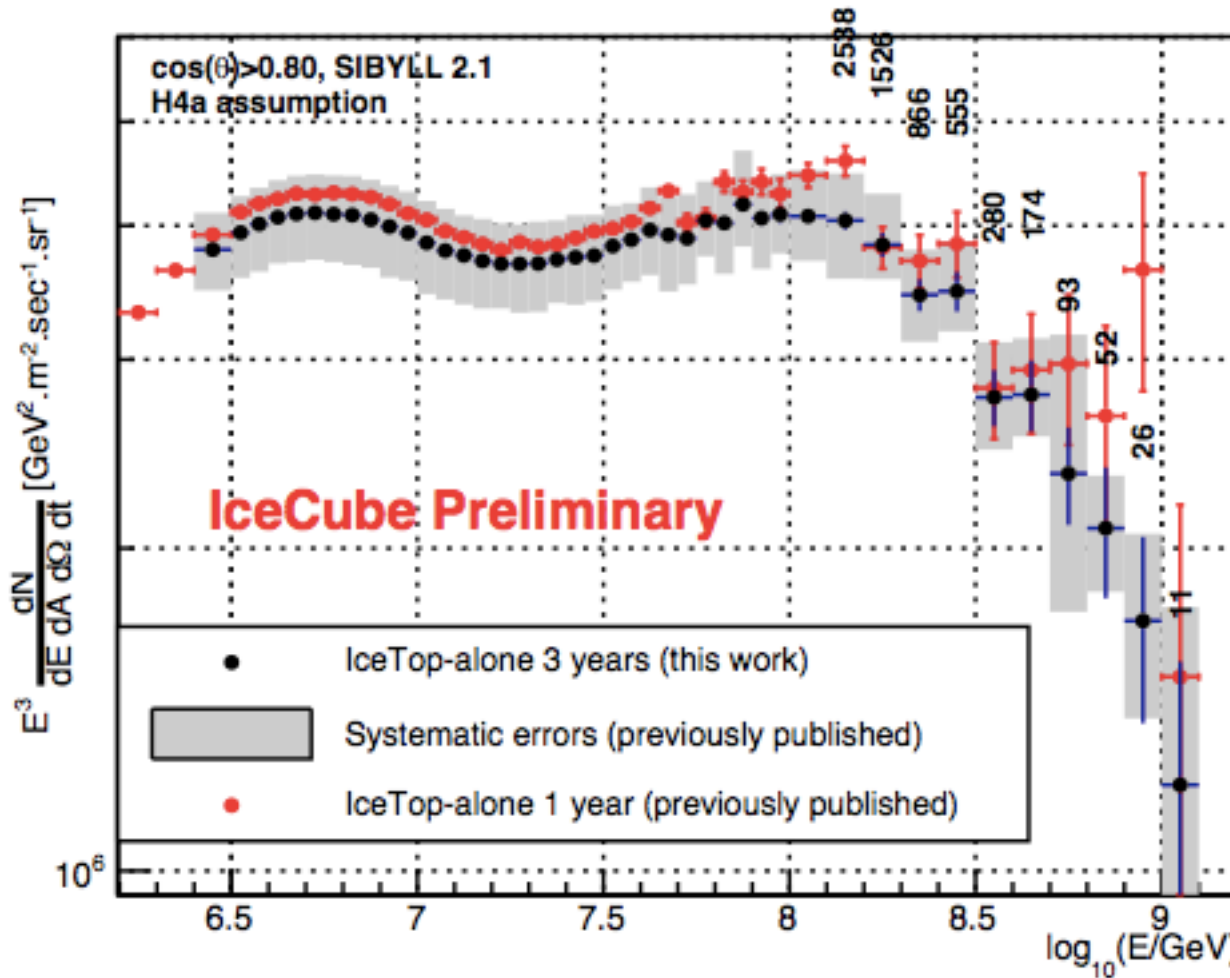
P+He spectrum ($E > 1 \text{ PeV}$)



$E > 10 \text{ PeV}$ で、重元素宇宙線が支配的。

P+Heは $E > 1 \text{ PeV}$ でも指数関数的に落ちていない。

Total CR spectrum (IceTop)



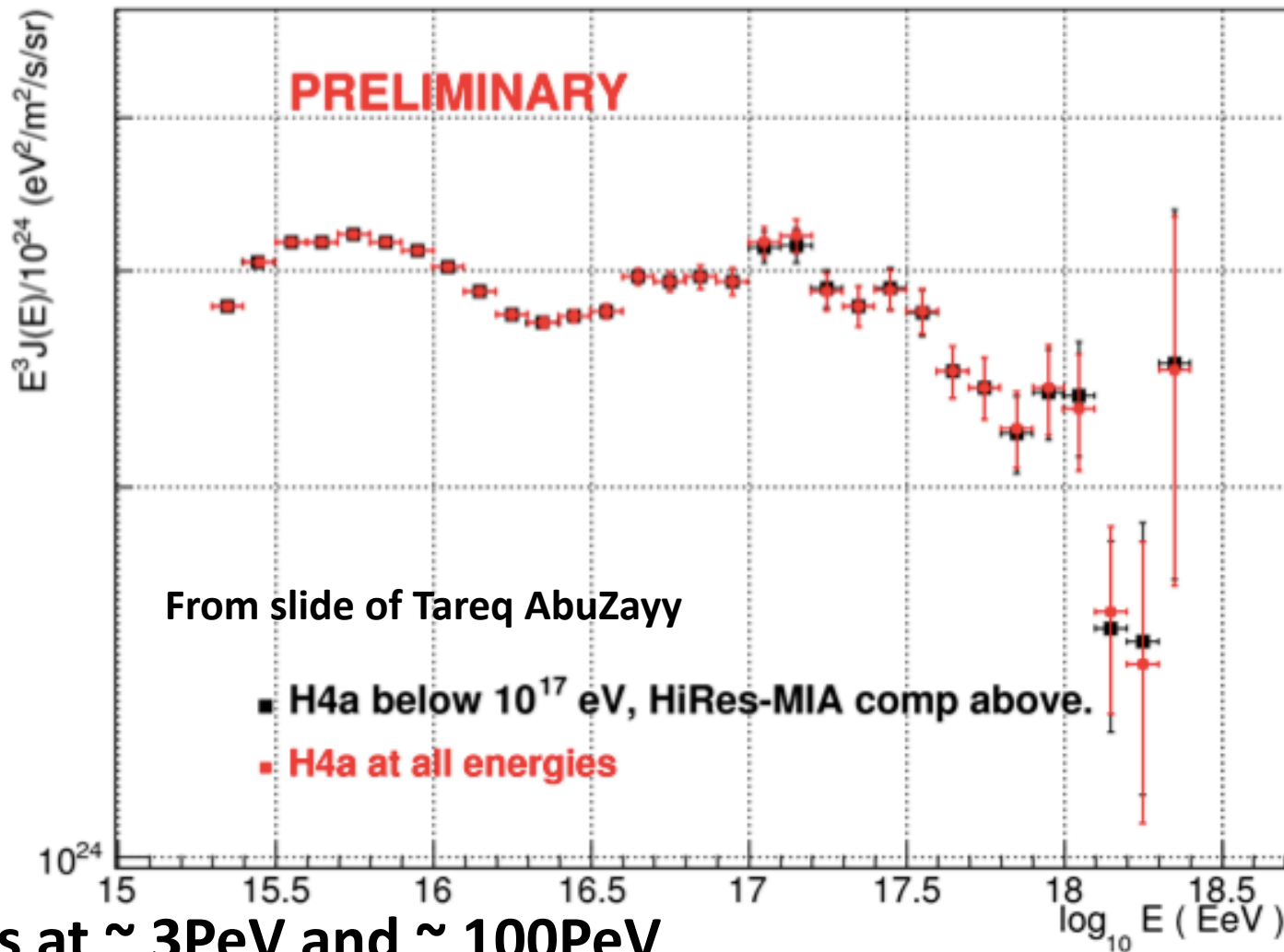
Breaks at $\sim 3\text{PeV}$ and $\sim 100\text{PeV}$

Rawlins et al. 2016

Dip structure at 10PeV

Total CR spectrum (Tale)

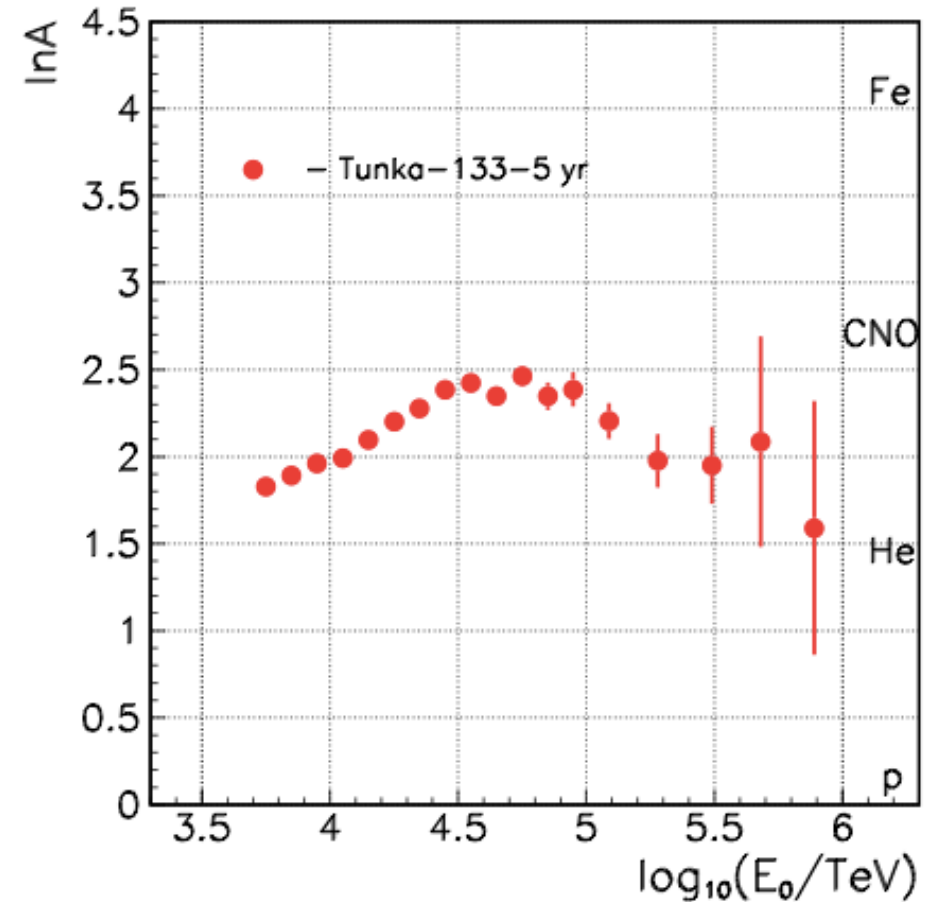
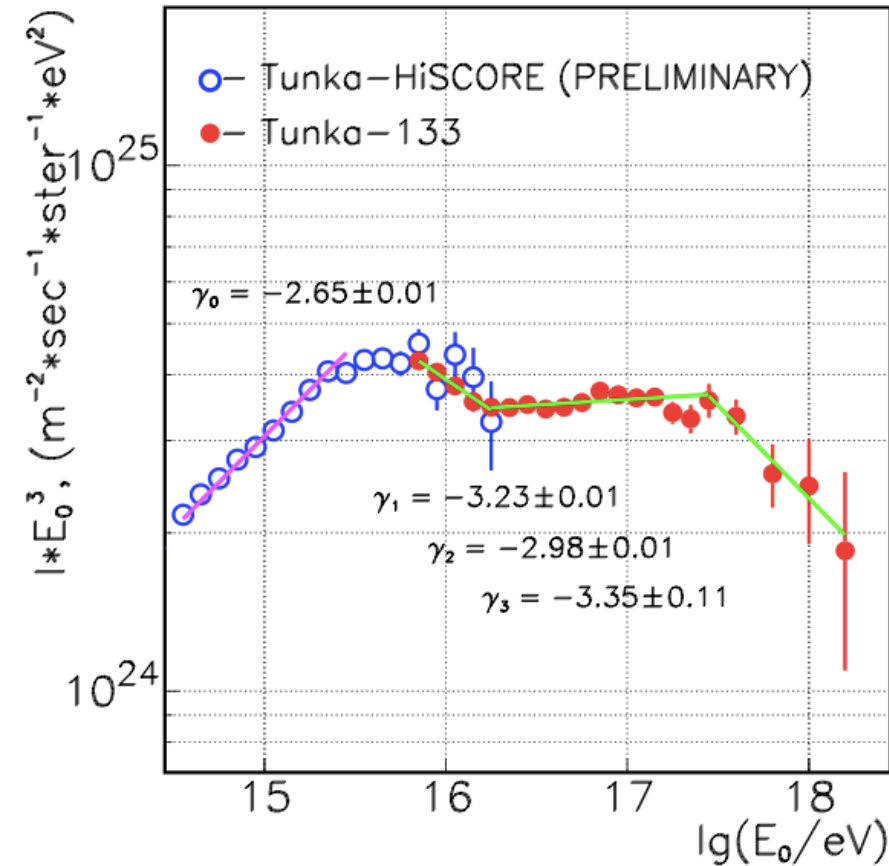
TALE Energy spectrum (Any Ckov/Scin/Mixed)



Breaks at $\sim 3\text{PeV}$ and $\sim 100\text{PeV}$

Dip structure at 10PeV

Total CR spectrum (Tunka-HiSCORE, Tunka-133)



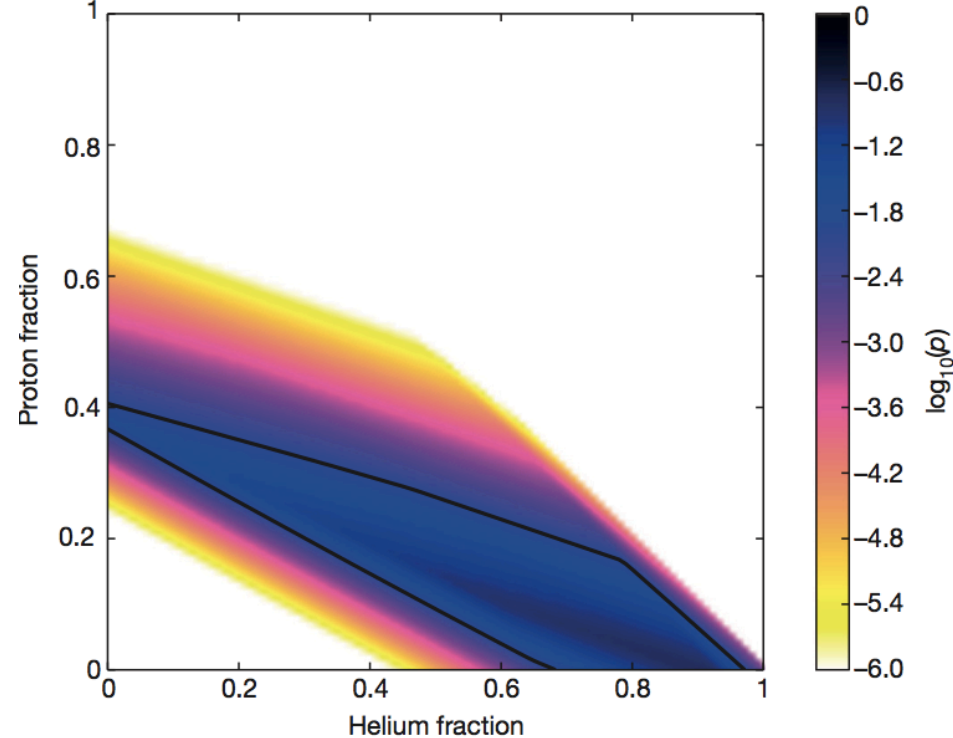
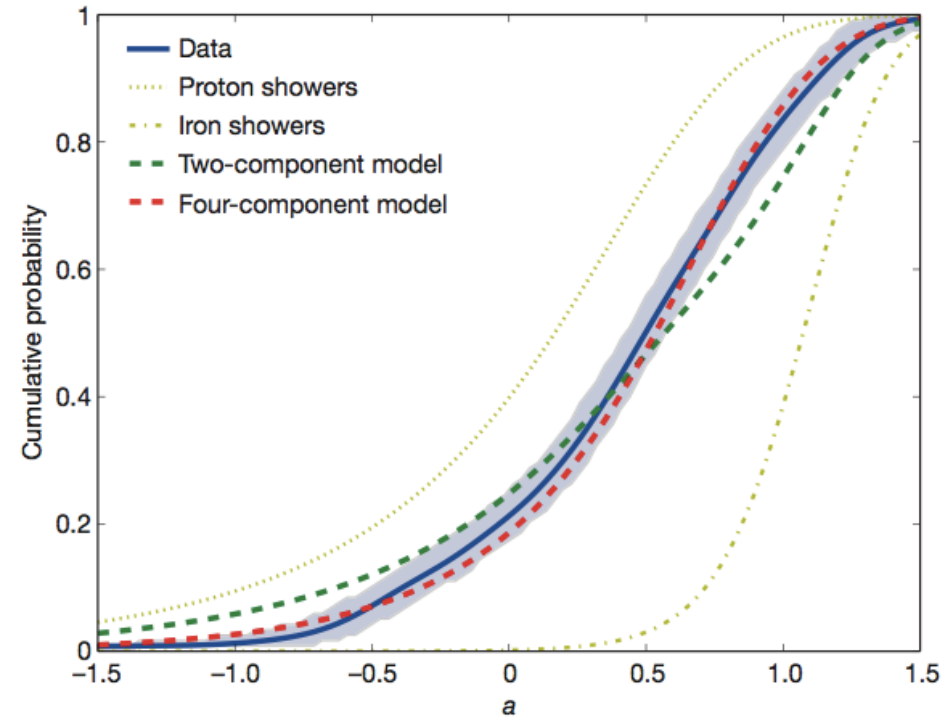
Breaks at $\sim 3\text{PeV}$ and $\sim 100\text{PeV}$

Dip structure at 10PeV

$E \sim 100\text{PeV}$ で鉄が支配的でない

LOFAR(E=100PeV-300PeV)

Buitink et al. Nature 2016



$$a = (\langle X_{\text{proton}} \rangle - X_{\text{max}}) / (\langle X_{\text{proton}} \rangle - X_{\text{iron}})$$

The cumulative X_{max} distribution shows that the total fraction of p+He at 100PeV is in the range [0.38,0.98] at a 99% confidence level, with a best-fit value of 0.8.

E ~ 100PeV で鉄が支配的でない。

Summary of CR observations

There are some unexpected results and tensions.

CR He dominates at $\sim 0.1\text{PeV}$. (CREAM, NUCLEON)

The p+He spectrum breaks at $\sim 1\text{PeV} < 3\text{PeV}$. (ARGO-YBG)

The p+He spectrum does not fall off exponentially above 3PeV . (KASKADE+KASKADE-Grande)

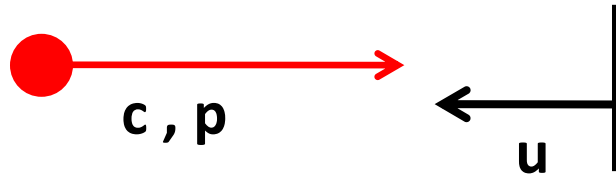
Heavy CRs dominate over the CR p+He at $\sim 100\text{PeV}$. (KASKADE+KASKADE-Grande)

**The total CR spectrum breaks at 3PeV and 100PeV , and dips at 10PeV .
(IceTop, TALE, Tunka-133)**

CR p+He dominates over heavy CRs at $\sim 100\text{PeV}$. (LOFAR)

E_{\max} of DSA

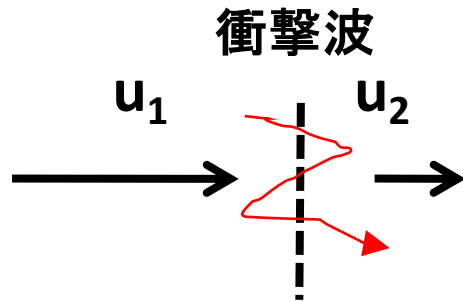
壁との1次元散乱による運動量変化, Δp



散乱後、

$$\Delta p = 2 \frac{u}{c} p$$

衝撃波の場合



1往復で得る運動量 Δp

$$\Delta p = \frac{4(u_1 - u_2)}{3c} p = \frac{u_1}{c} p$$

1往復に要する時間, $\Delta t = (\lambda_{\text{mfp},1}/u_1 + \lambda_{\text{mfp},2}/u_2) \sim T_{\text{gyro},1}(c/u_1) + T_{\text{gyro},2}(c/u_2)$

$$t_{\text{acc}} = p \Delta t / \Delta p \sim T_{\text{gyro},1}(c/u_{\text{sh}})^2 + 4T_{\text{gyro},2}(c/u_{\text{sh}})^2 \quad (\text{Krymsky et al. 1979, Drury 1983})$$

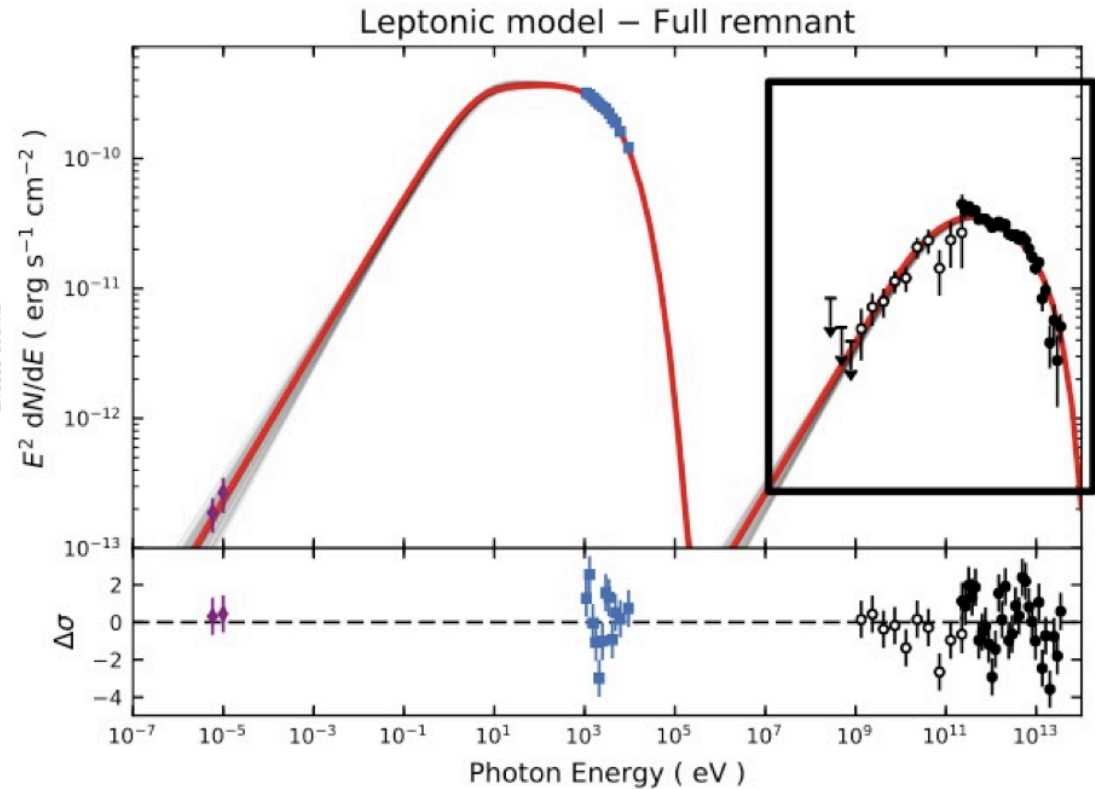
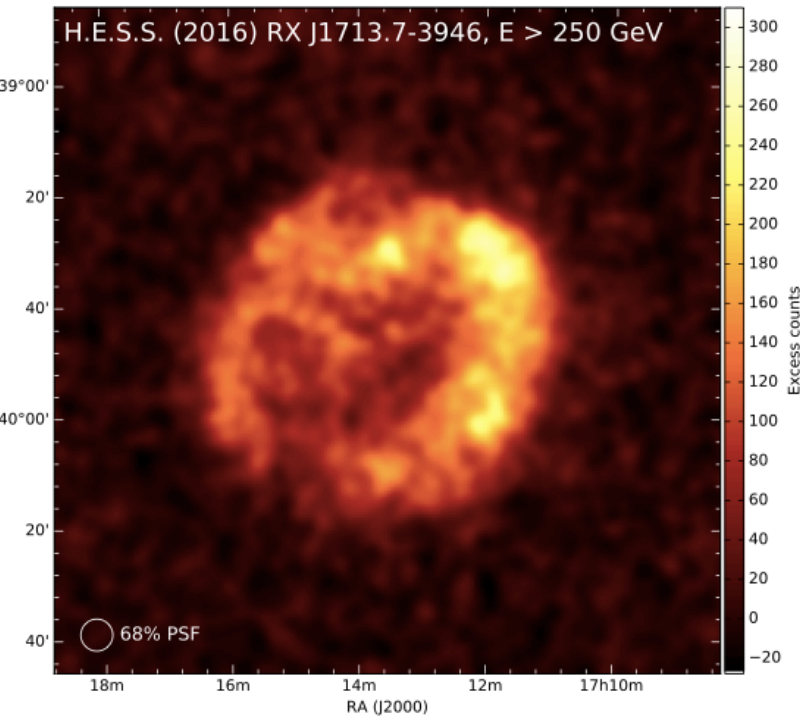
$$t_{\text{acc}} = t_{\text{Sedov}} \sim 200 \text{yr}, \text{ and } T_{\text{gyro},1} \gg T_{\text{gyro},2}$$

$$\rightarrow E_{\max} \sim 0.03 \text{PeV } B_{\text{up},1\mu\text{G}} (\lambda_{\text{mfp}}/r_g) (u_{\text{sh}}/3000 \text{km/s})^2$$

陽子を3PeVまで加速するには、上流で $B > \sim 100 \mu\text{G}$ が必要。
 $3 \mu\text{G} \rightarrow 100 \mu\text{G}$ の上流での増幅は、誰も再現できていない。

RX J1713.7-3946

Abdalla+2017



If γ -rays are due to IC, we can measure B_{down} .

$$vF_{\text{Vsyn}}/vF_{\text{VIC}} \sim 16 \rightarrow B_{\text{down}} \sim 12 \mu\text{G}$$

Ohira&Yamazaki17

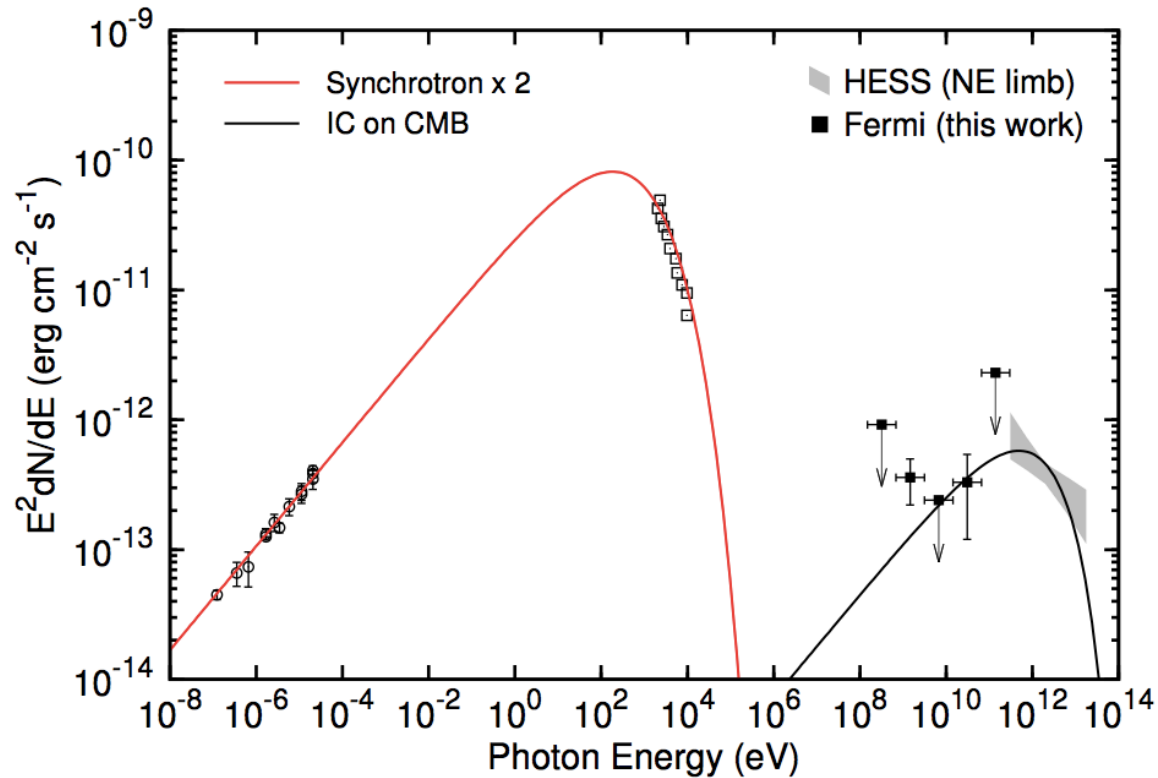
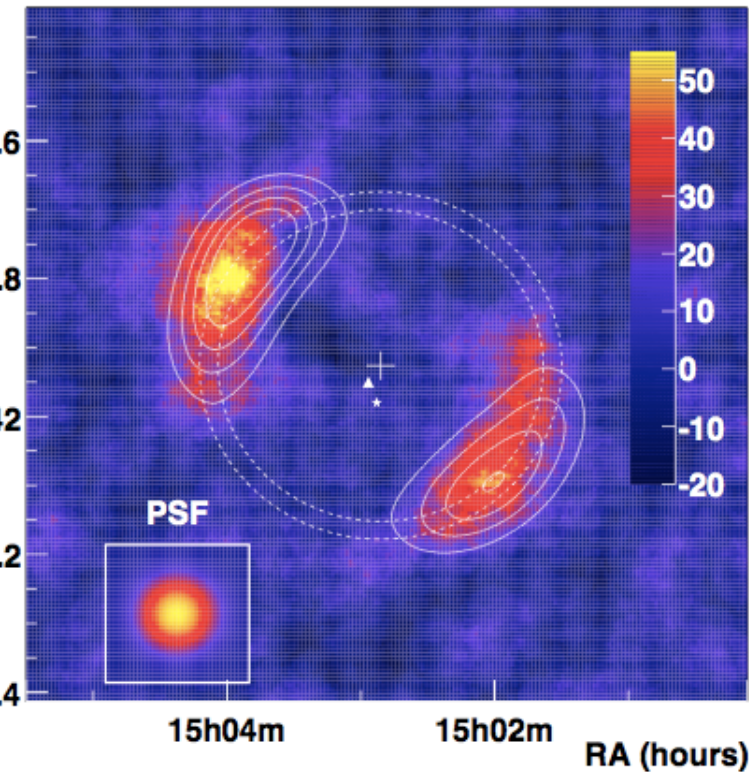
If γ -rays are due to the pion decay, we can estimate $E_{\text{p,max}}$.

$$E_{\gamma,\text{max}} \sim 0.01\text{PeV} \rightarrow E_{\text{p,max}} \sim 0.1 \text{ PeV}$$

SN1006

Acero+2010

Xing+2016



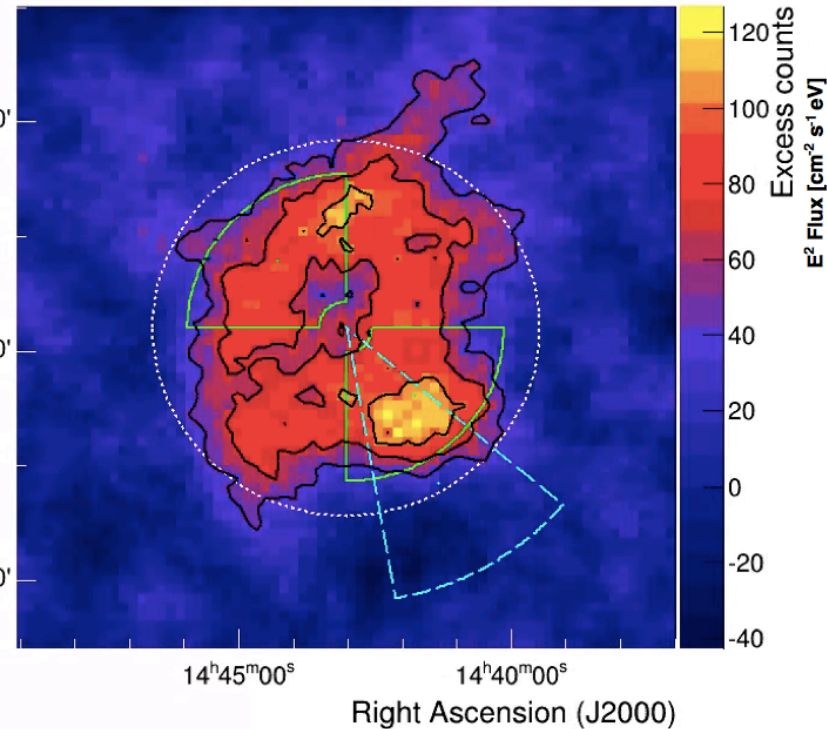
If γ -rays are due to IC, we can measure B_{down} .

$$\nu F_{\nu_{\text{syn}}}/\nu F_{\nu_{\text{IC}}} \sim 100 \rightarrow B_{\text{down}} \sim 30 \mu\text{G}$$

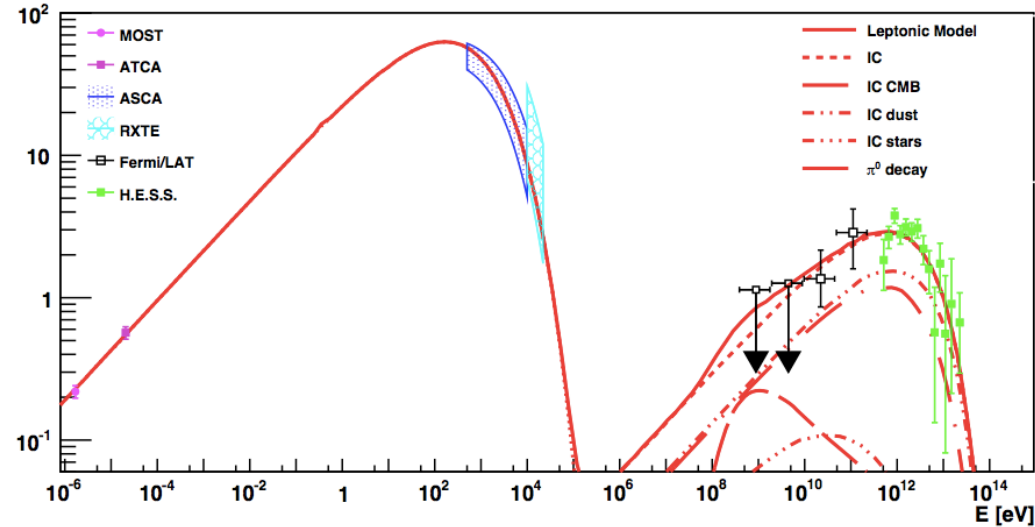
If γ -rays are due to the pion decay, we can estimate $E_{p,\text{max}}$.

$$E_{\gamma,\text{max}} \sim 0.008 \text{PeV} \rightarrow E_{p,\text{max}} \sim 0.08 \text{PeV}$$

RCW86



Abramowski+2016



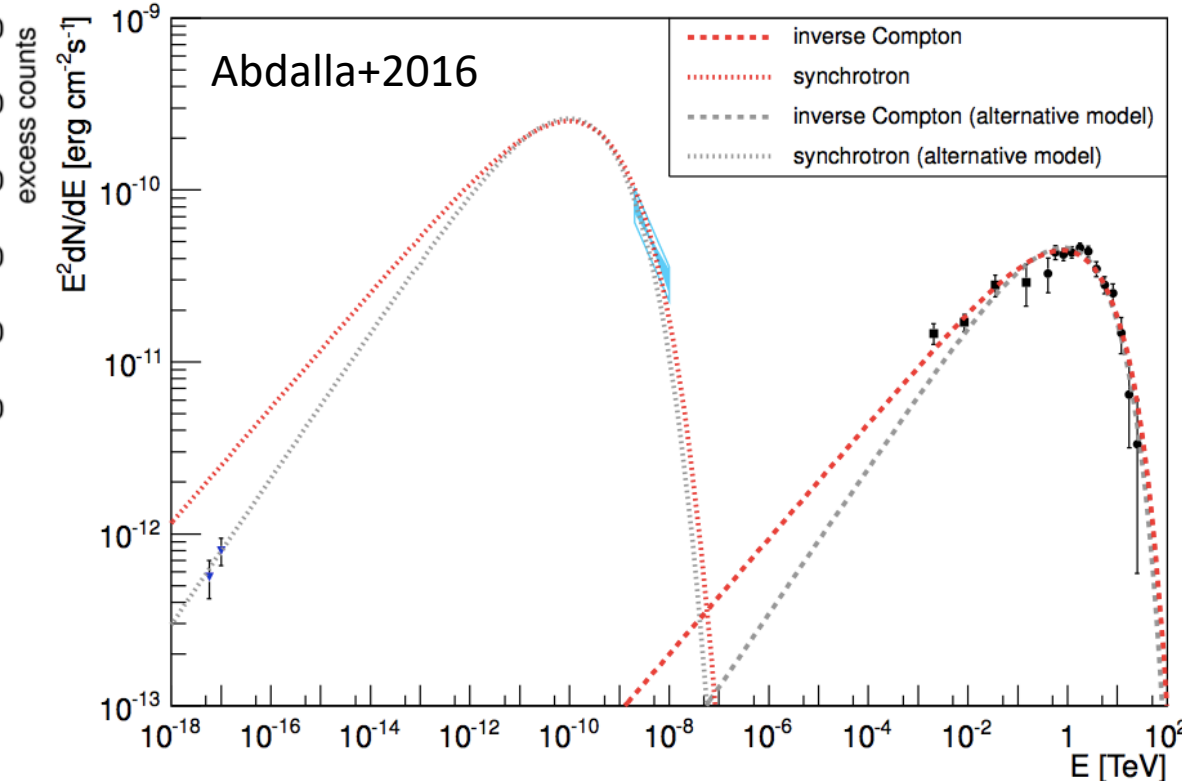
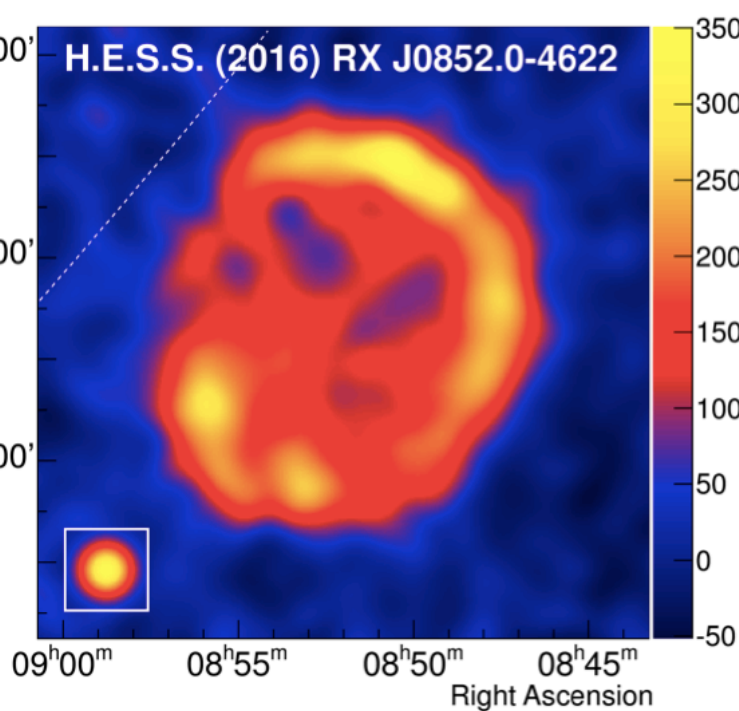
If γ -rays are due to IC, we can measure B_{down} .

$$vF_{v_{\text{syn}}}/vF_{v_{\text{IC}}} \sim 50 \rightarrow B_{\text{down}} \sim 22 \mu\text{G}$$

If γ -rays are due to the pion decay, we can estimate $E_{p,\text{max}}$.

$$E_{\gamma,\text{max}} \sim 0.0035\text{PeV} \rightarrow E_{p,\text{max}} \sim 0.035 \text{ PeV}$$

RX J0852.0-4622 (Vela Junior)



If γ -rays are due to IC, we can measure B_{down} .

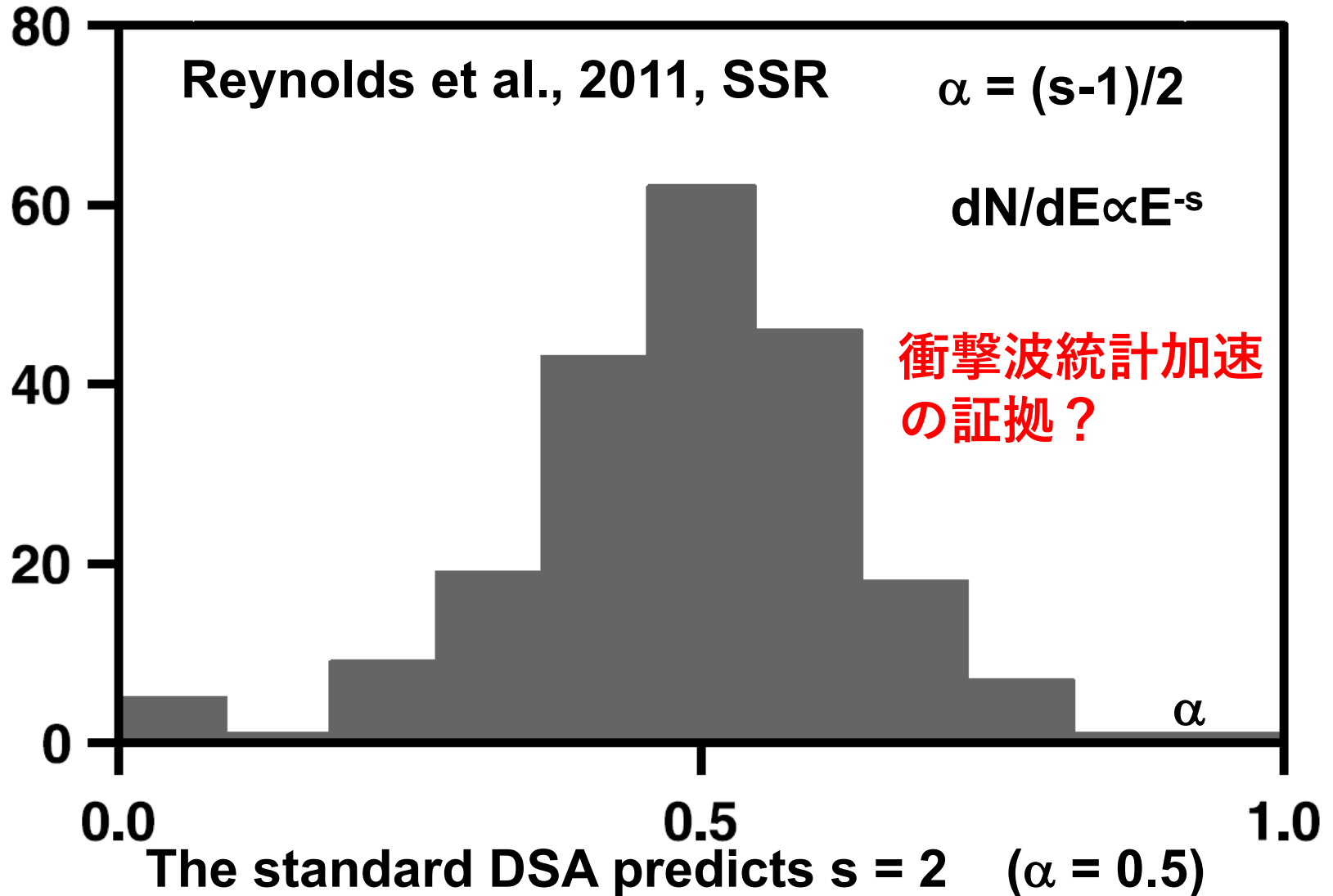
$$\nu F_{\nu_{\text{syn}}}/\nu F_{\nu_{\text{IC}}} \sim 4 \rightarrow B_{\text{down}} \sim 7 \mu\text{G}$$

If γ -rays are due to the pion decay, we can estimate $E_{p,\text{max}}$.

$$E_{\gamma,\text{max}} \sim 0.0055 \text{ PeV} \rightarrow E_{p,\text{max}} \sim 0.055 \text{ PeV}$$

超新星残骸の電波の観測

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



超新星残骸のガンマ線の観測

Abdalla et al. 2016

