

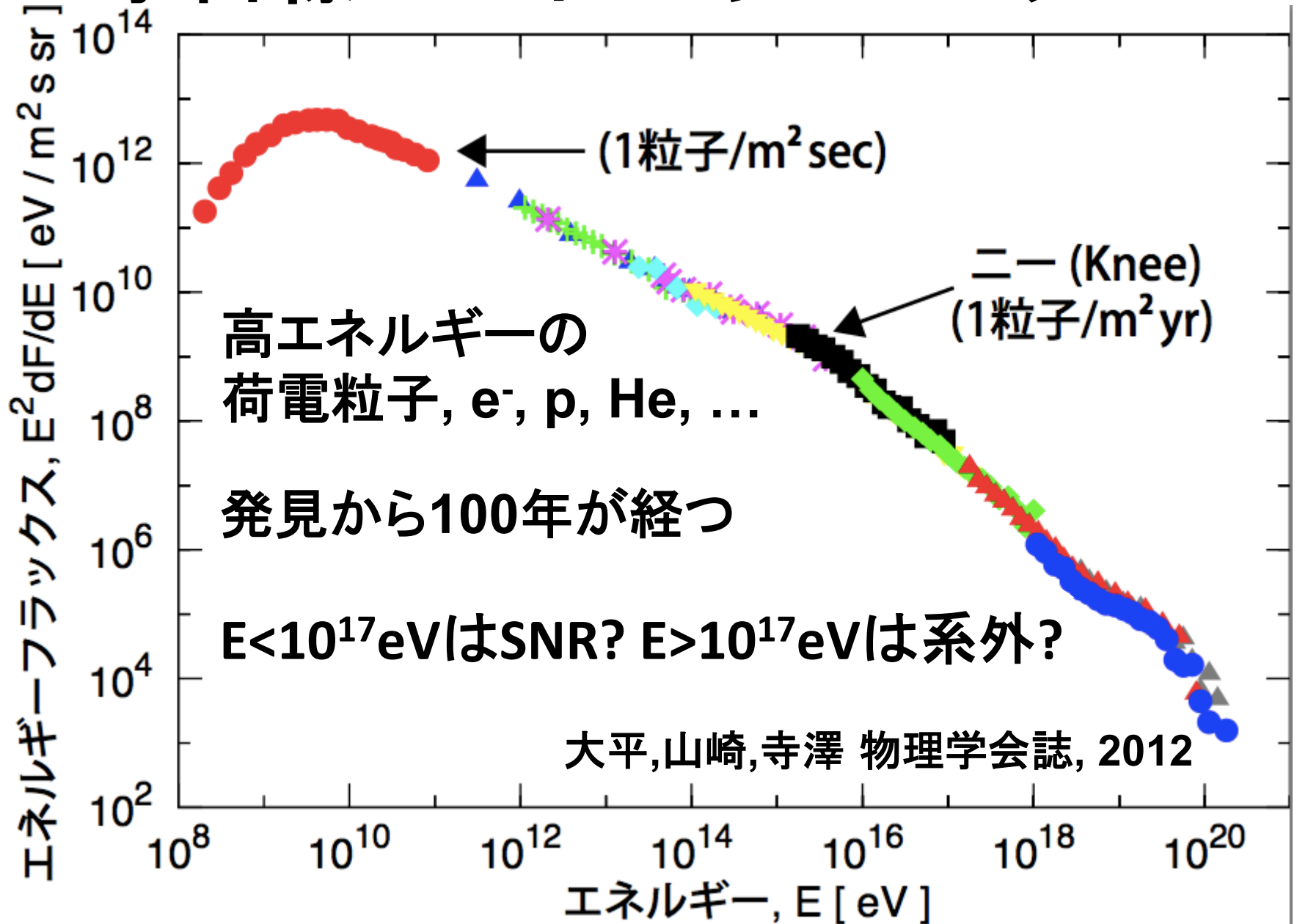
AMS-02の最新結果の解釈 (宇宙線の起源・加速・伝搬について)

大平 豊 (青山学院大学)

----- 内容 -----

宇宙線の標準モデル
AMS-02の結果と解釈
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 eV/cm^3 。銀河の構成要素の1つ

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

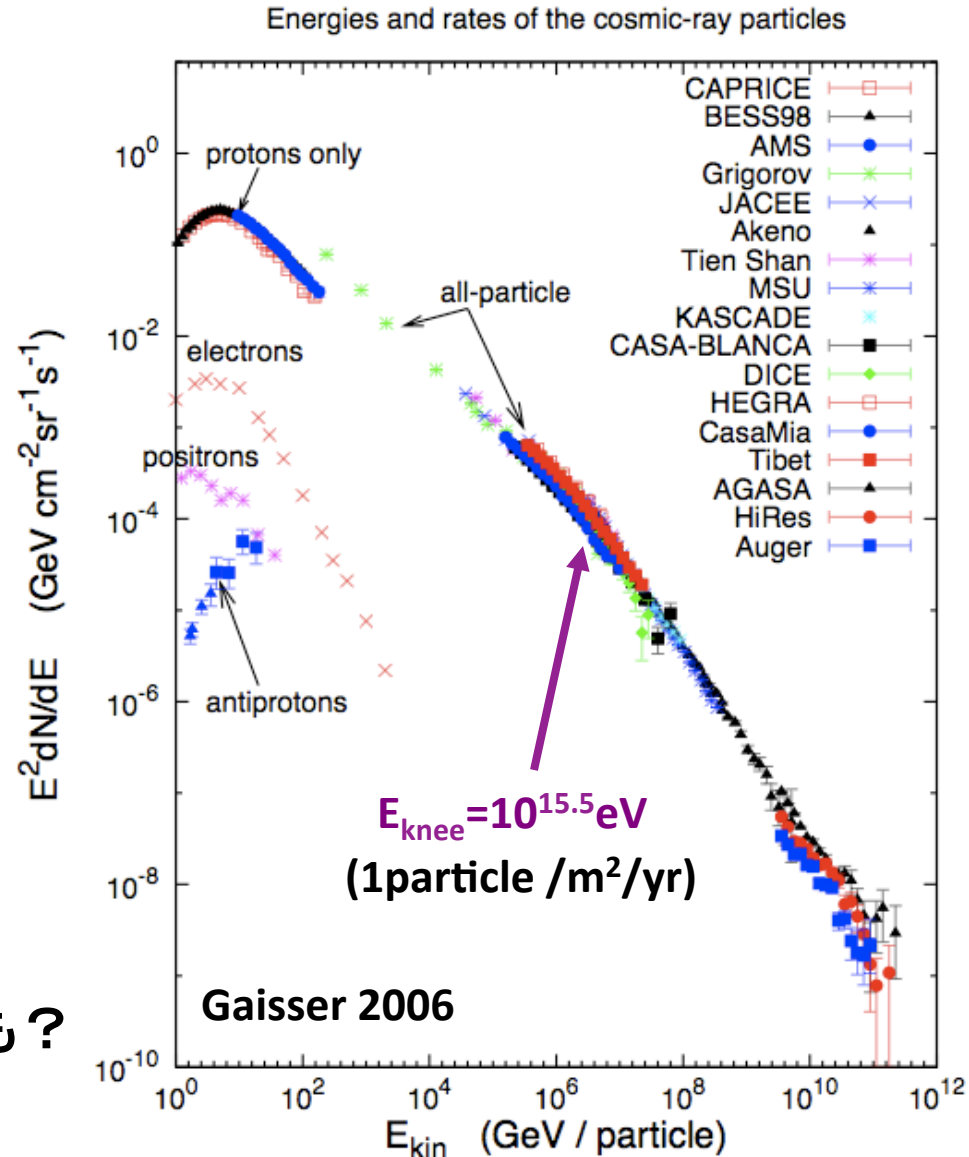
$$n_{\text{CR}} \sim 10^{-19} / \text{cm}^3 \text{ @ } \sim \text{PeV}$$

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

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。

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

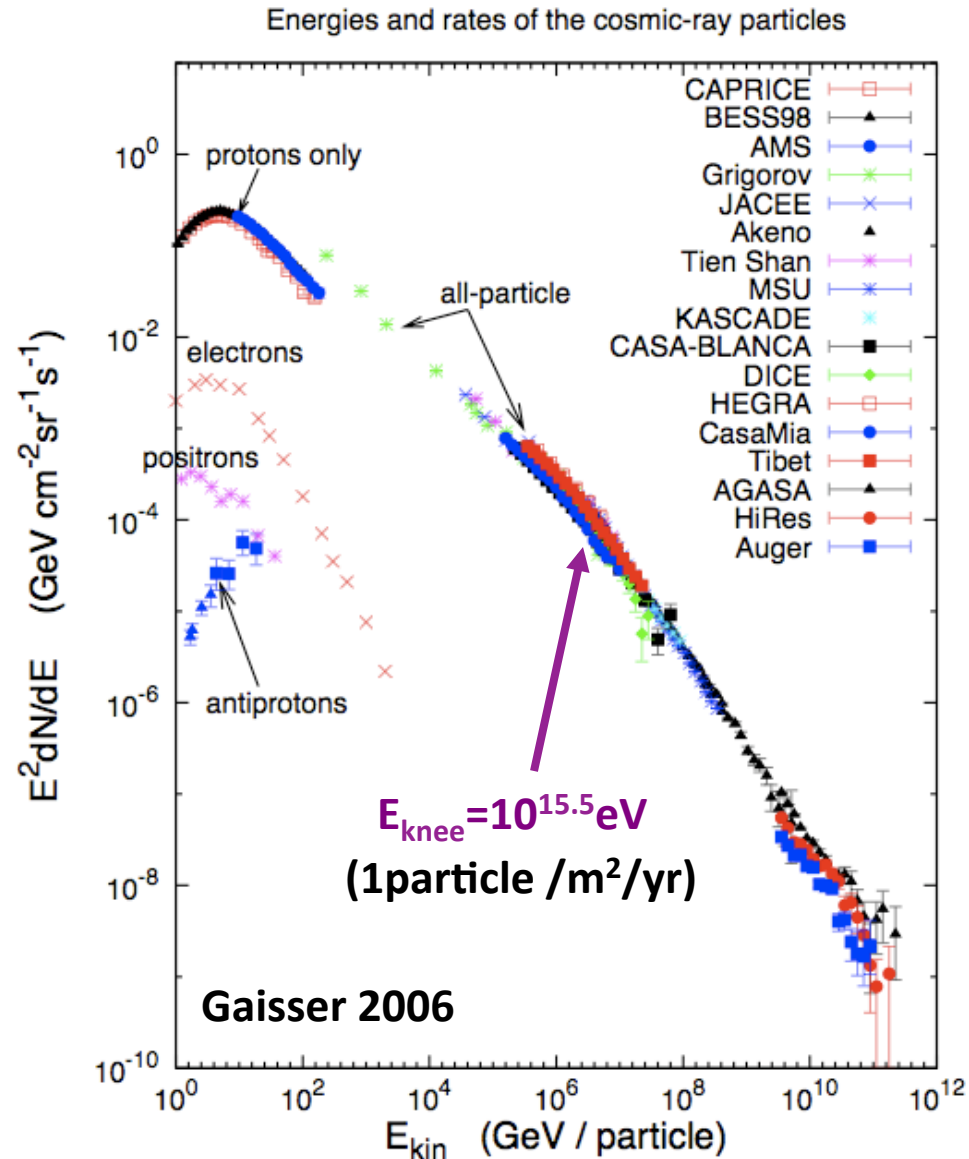
発見以来100年が経つが、

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、
銀河系内の超新星残骸(SNR)が起源

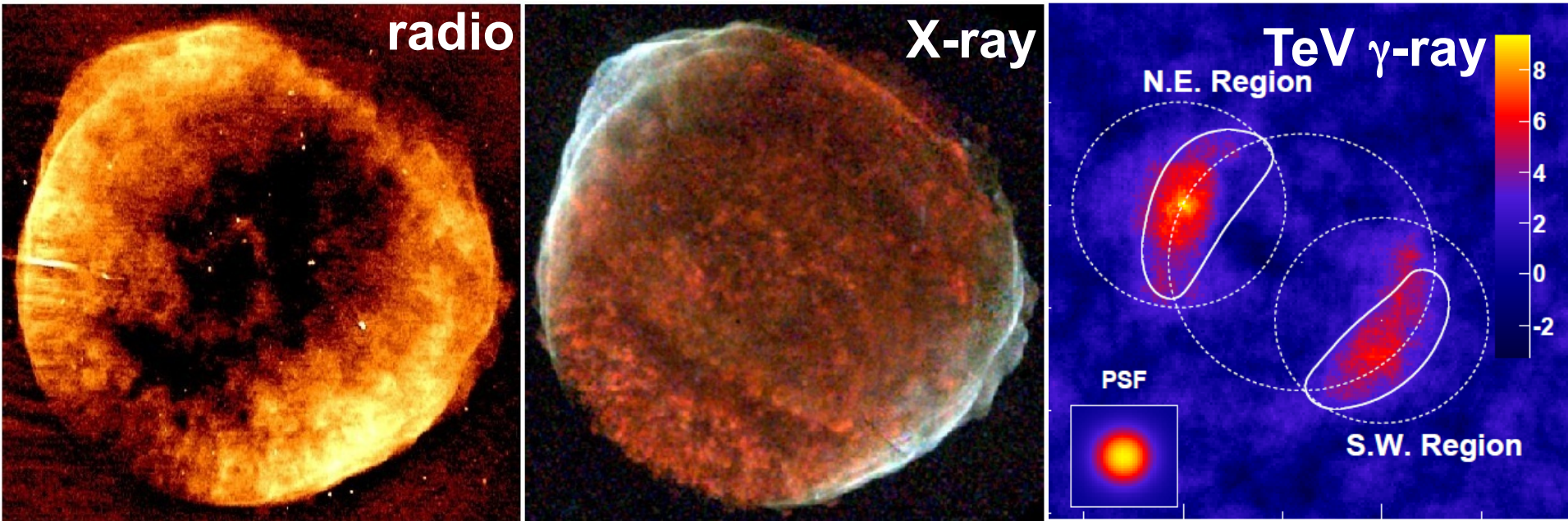
それ以上の宇宙線は銀河系外の
ガンマ線バースト(GRB)、
活動銀河核(AGN)、
銀河団や中性子星
が起源

と思うのがの主流



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

$$R \sim 10^{18} - 10^{20} \text{ cm}$$

電波: 電子の GeV までの加速 (~ 300 SNRs)

X線: 電子の TeV までの加速 (~ 10 SNRs)

膨張速度

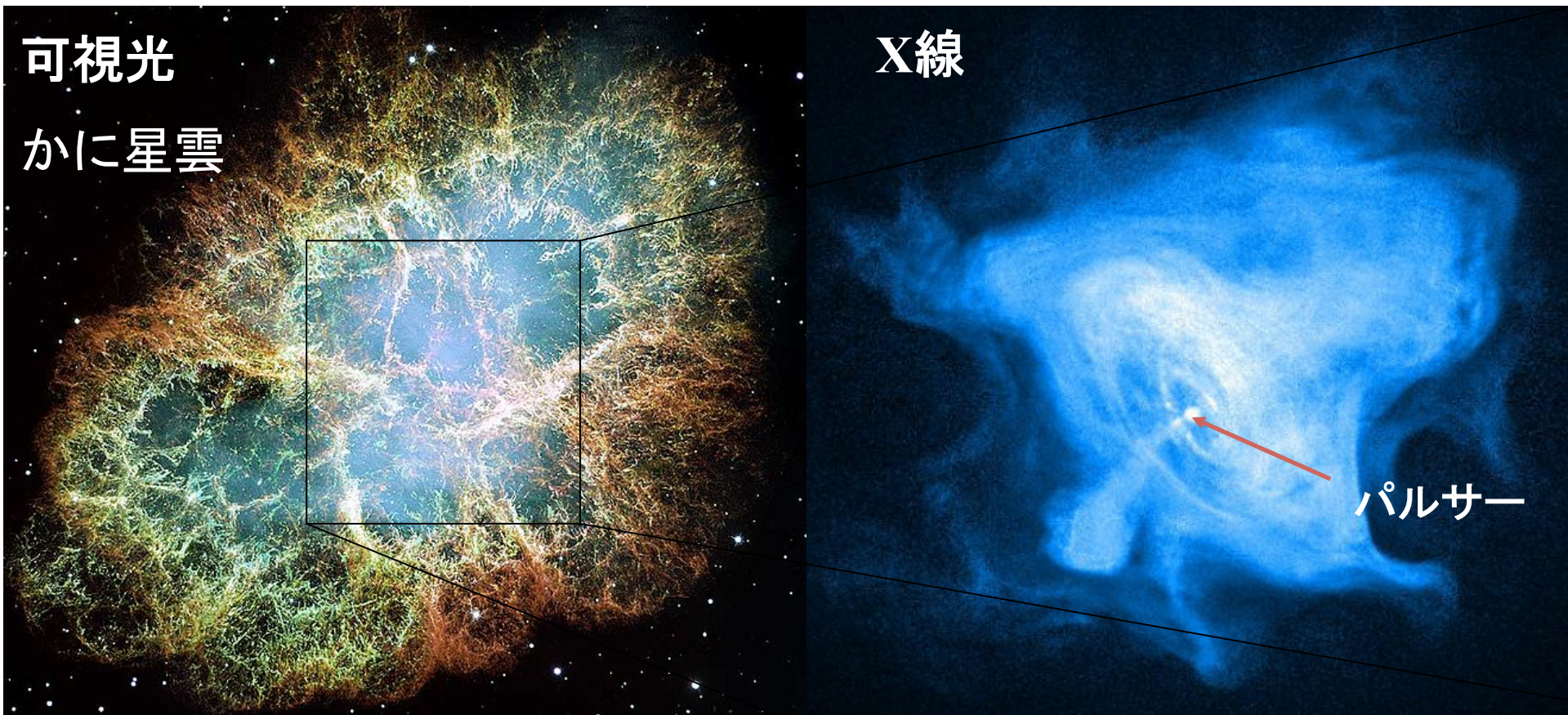
$$v/c \sim 10^{-2} - 10^{-3}$$

GeV- γ : 陽子の TeV までの加速 (~ 10 SNRs)

TeV- γ : 電子 or 陽子の 10TeV までの加速 (~ 10 SNRs)

SNRは e^+ も提供できる。 CR起源の π^+ の崩壊、 ^{56}Ni , ^{44}Ti などの崩壊過程

パルサー星雲(Pulsar Wind Nebula)



←→
2pc ~ 6×10^{18} cm

回転する中性子星から e^+ が吹き出されていると考えられている

注) PWNeから、どれだけ、どんなエネルギーで
 e^+ が銀河空間に解放されているはわかっていない

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 磁力線に束縛

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

平均自由行程より十分大きなスケールでは、拡散運動と見なせる

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

$$r_g = cP/eB \propto E, \quad \delta B_{\lambda=r_g} = \delta B_{\lambda=r_g}(E) \rightarrow D_{xx} \propto E^\delta$$

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

磁気乱流のシミュレーションや理論から、 $\delta > 0$ と考えられている

宇宙線の加速機構

宇宙線は荷電粒子なので、加速には電場が必要

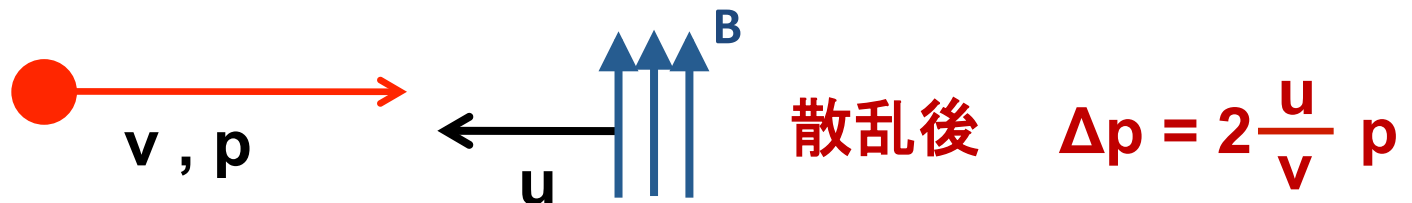
宇宙空間はプラズマで満ちている→電気伝導度が非常に高い状態

電荷を起源とする静電場は、あまり期待できない

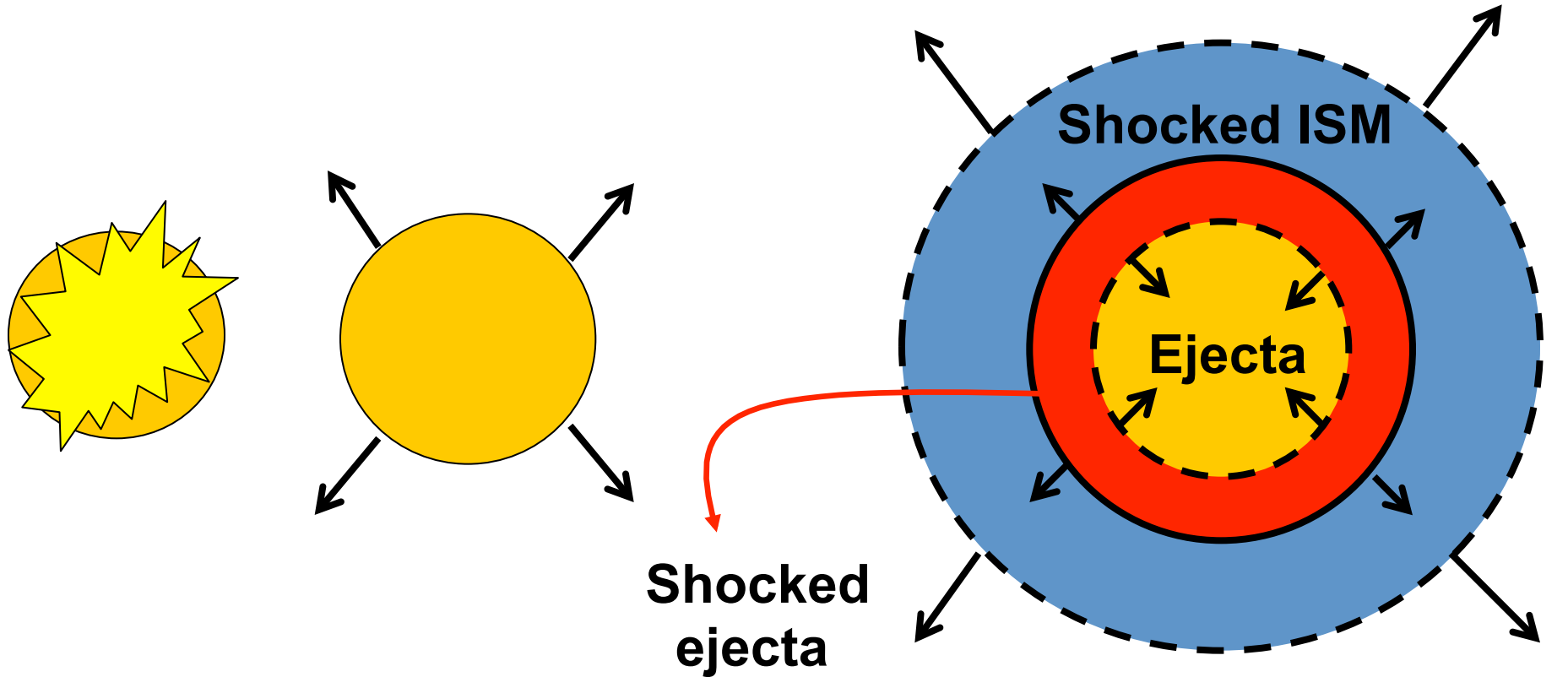
磁場が動いていると生じる電場、 $E = -v \times B$ による加速がよく考えられる

磁場による粒子の散乱は、磁場の静止系では粒子のエネルギーを変えない

→ 粒子と壁の弾性散乱と見なせる



超新星残骸と衝撃波加速

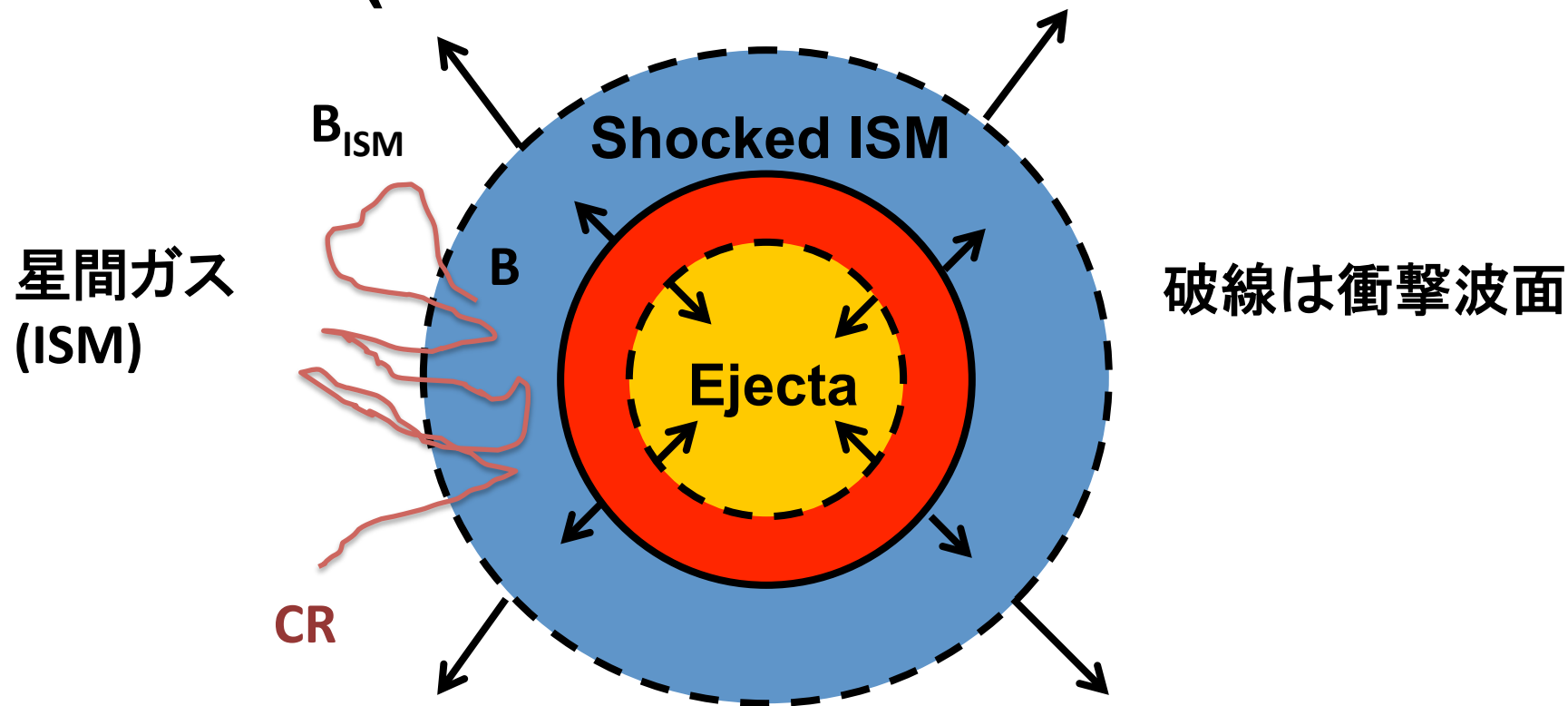


星の爆発
Supernova

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)と 衝撃波加速(Diffusive Shock Acceleration)



星間ガス(ISM)の磁場は、ほとんど静止している。衝撃波圧縮領域の磁場は外向きに動いている。衝撃波を何度も往復すると、宇宙線は動いている磁場に何度も叩かれて加速する。

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

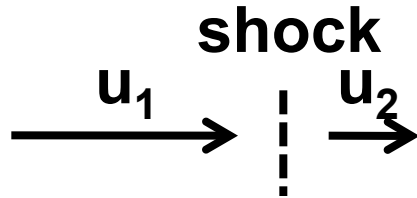
ベキ型分布

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: $P_{ret} = 1 - P_{esc}$

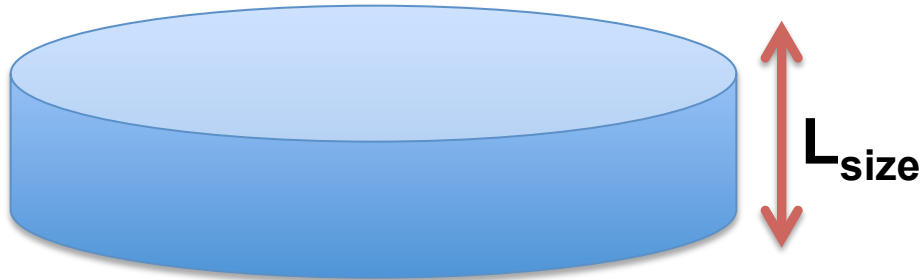
$$N(>p_n) \propto (1 - P_{esc})^n \sim \exp(-nP_{esc}) \propto p_n^{-3u_2/(u_1-u_2)}$$

$$f(p)dp \propto (dN(>p)/dp)dp \propto p^{-s} dp \quad s = \frac{u_1/u_2 + 2}{u_1/u_2 - 1} \xrightarrow{u_1/u_2=4} 2$$

スペクトルは、粒子の種類によらない

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)

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

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

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

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

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

ジャイロ半径が同じ荷電粒子は同じスペクトルを予言。

B/C, pbar/p, e+/e-

加速された宇宙線の炭素 C が、ガス中の陽子と衝突して、宇宙線のホウ素 B が作られる

銀河内に長時間滞在するほど、 $C \rightarrow B$ の反応が生じる

→ B/C のエネルギー依存性は、滞在時間 L^2/D_{xx} のエネルギー依存性を教えてくれる。

標準モデルは B/C はエネルギーの減少関数

pbar, e+ も、宇宙線の陽子 p が星間ガスと衝突して作られる

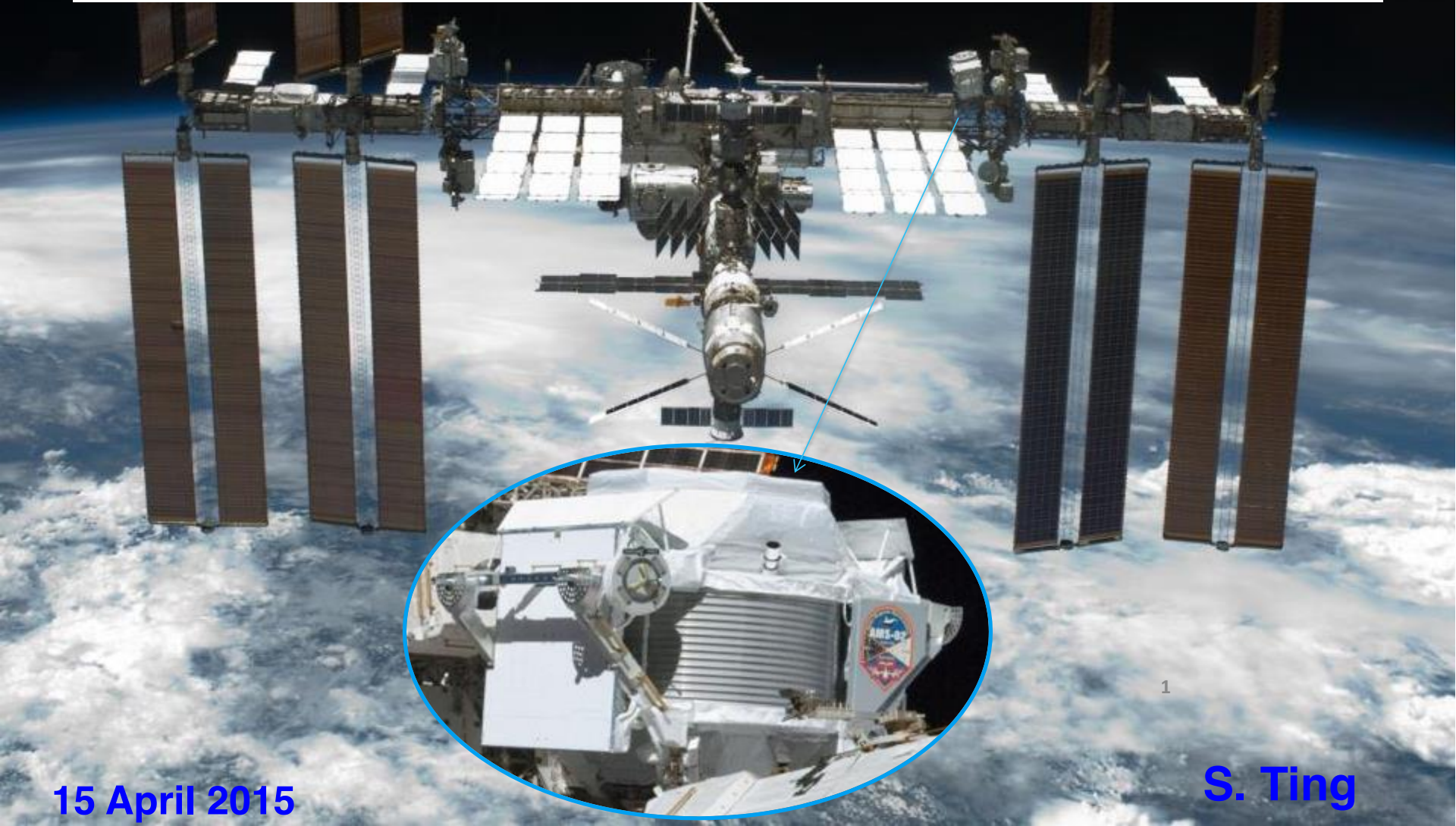
→ pbar/p, e+/p もエネルギーの**減少関数**と期待される

注意) ただし、そのエネルギー依存性は B/C と全く同じではない

$$E_B \sim E_C, E_{e^+} \sim 0.05E_p, E_{pbar} \ll E_p$$

AMS-02の結果と解釈

<https://indico.cern.ch/event/381134/timetable/#20150415>

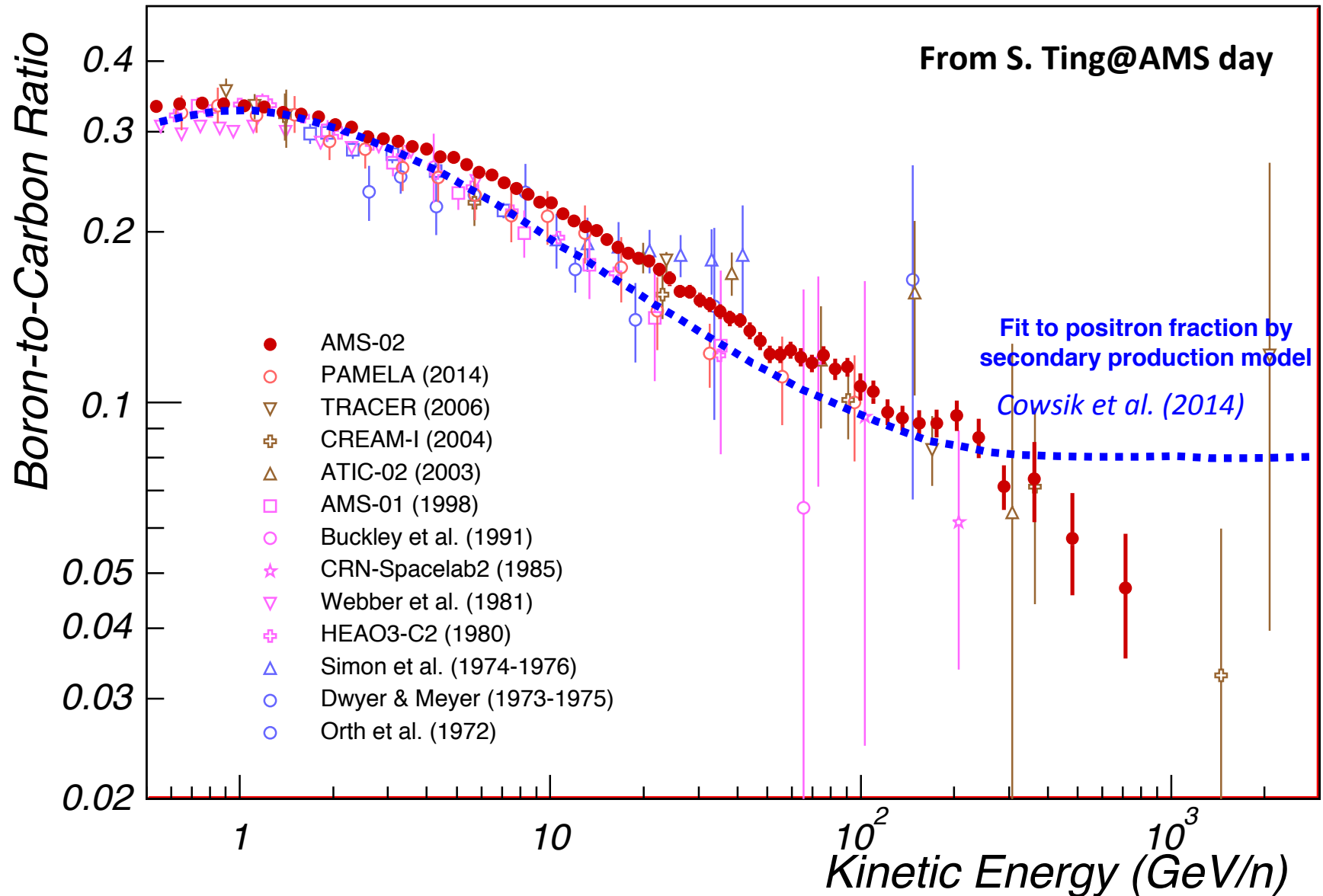


1

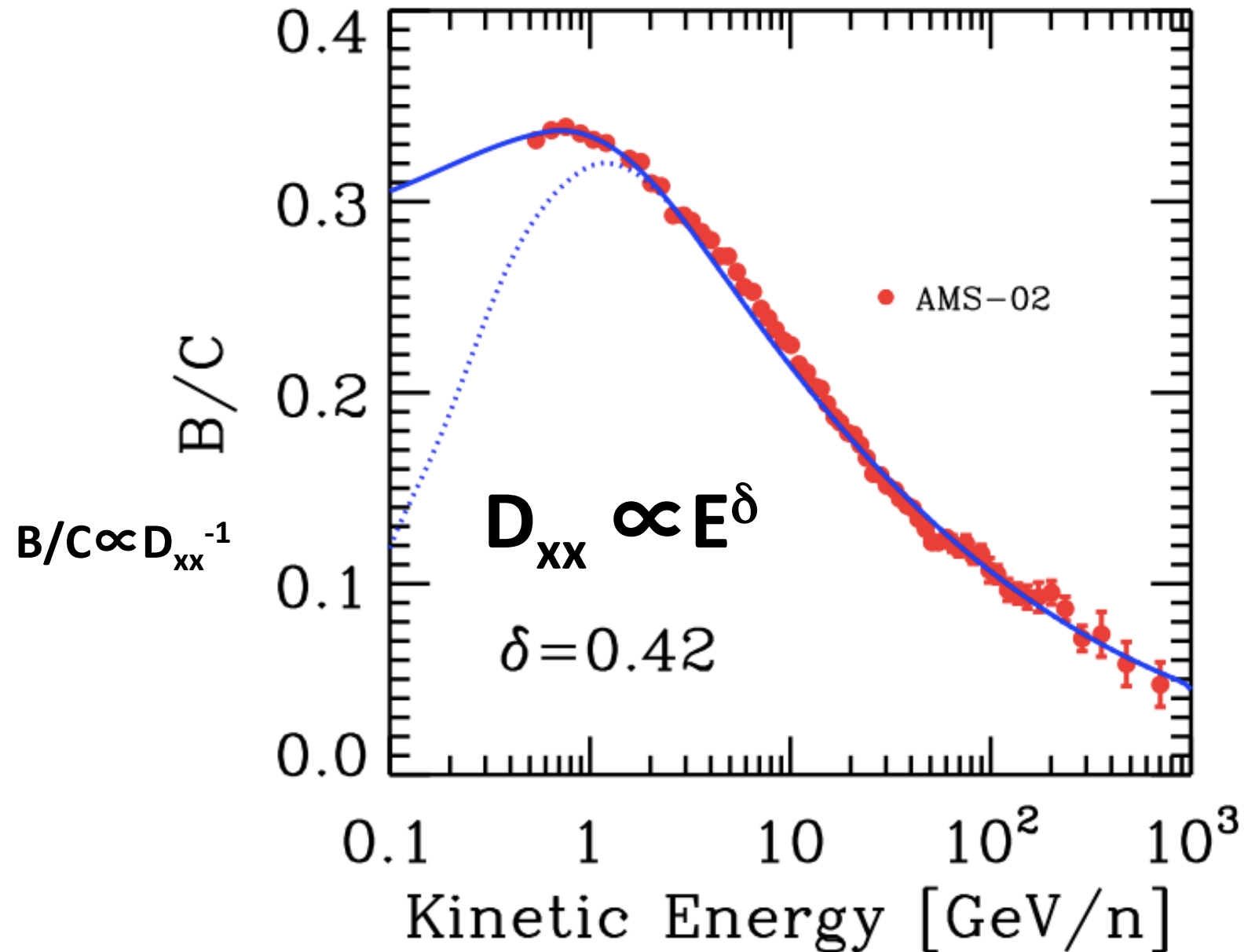
15 April 2015

S. Ting

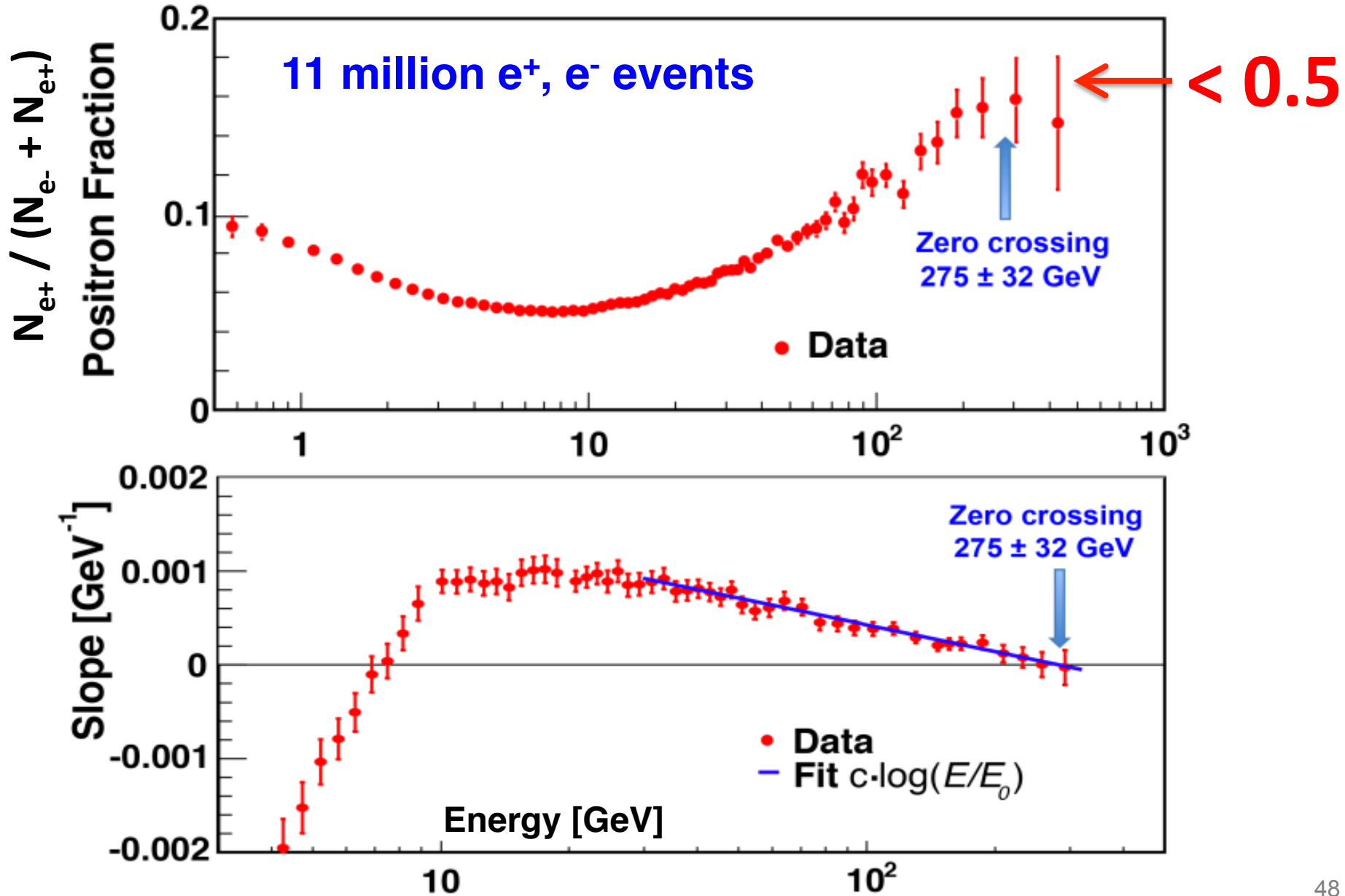
B/C Ratio converted in Kinetic Energy



Evoli et al. 2015, arXiv:1504.05175

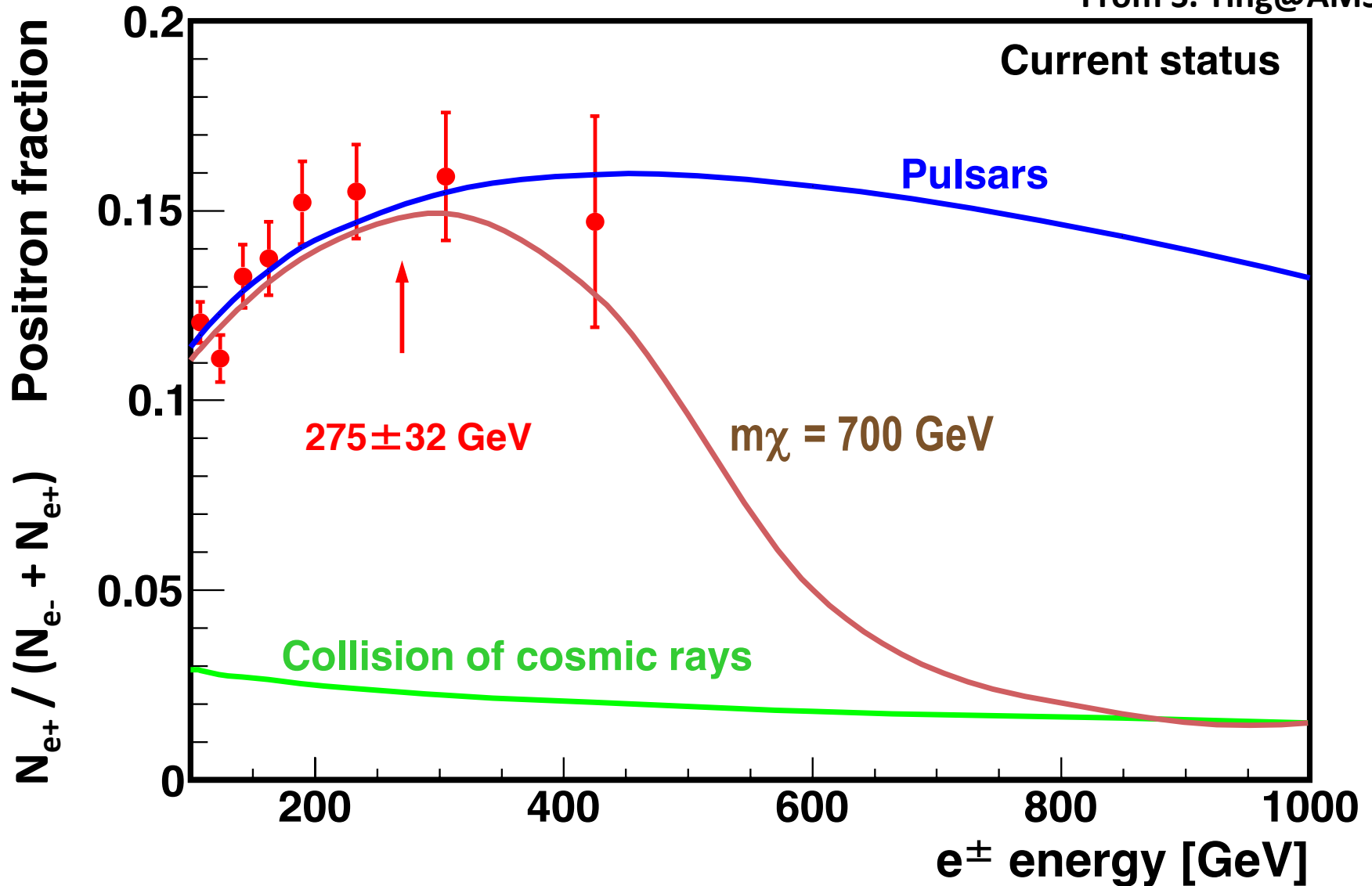


The energy beyond which it ceases to increase.



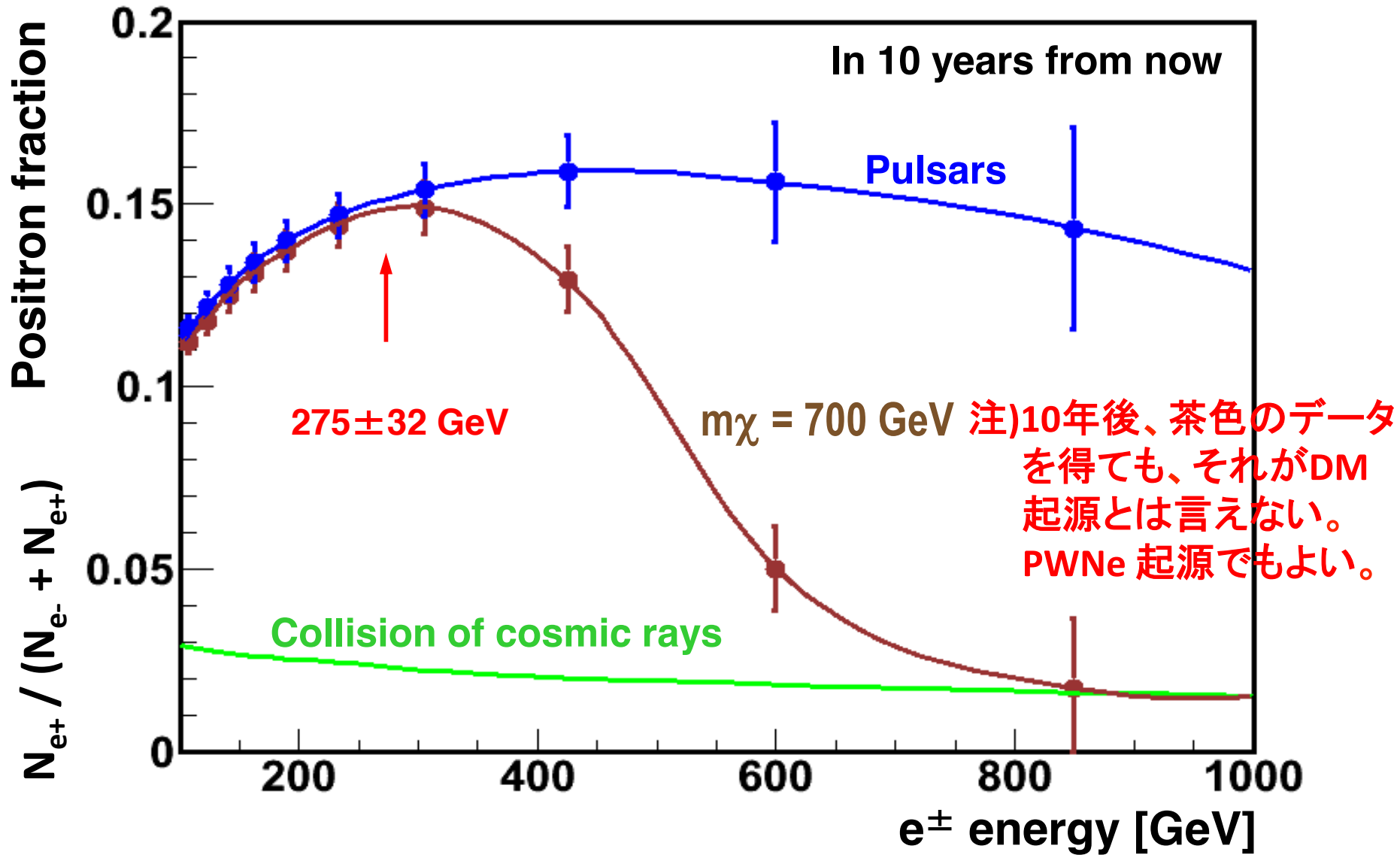
The expected rate at which it falls beyond the turning point.

From S. Ting@AMS day

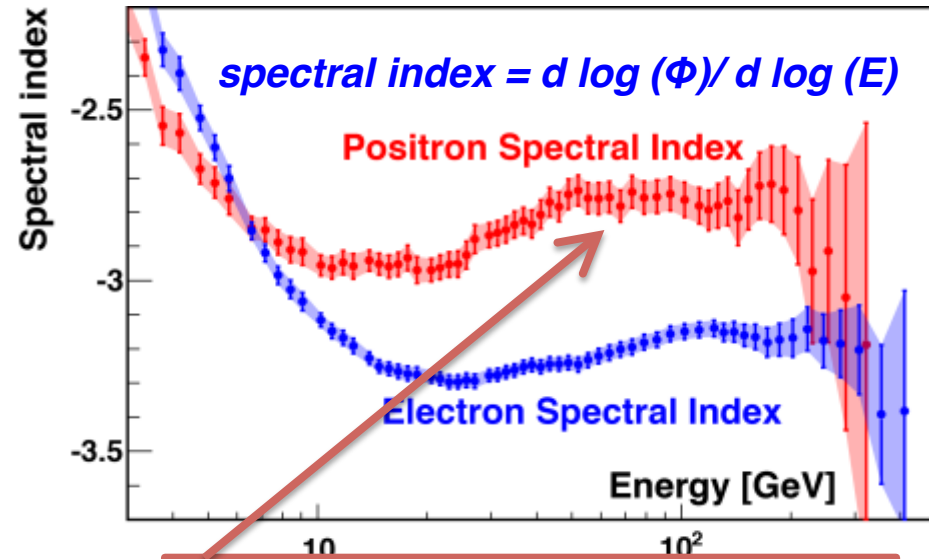
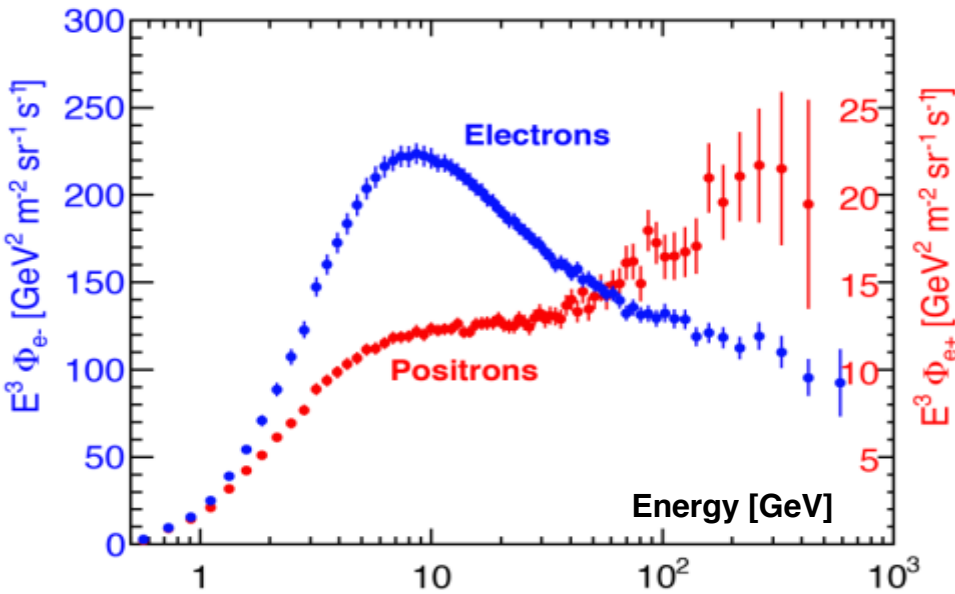


The expected rate at which it falls beyond the turning point.

From S. Ting@AMS day

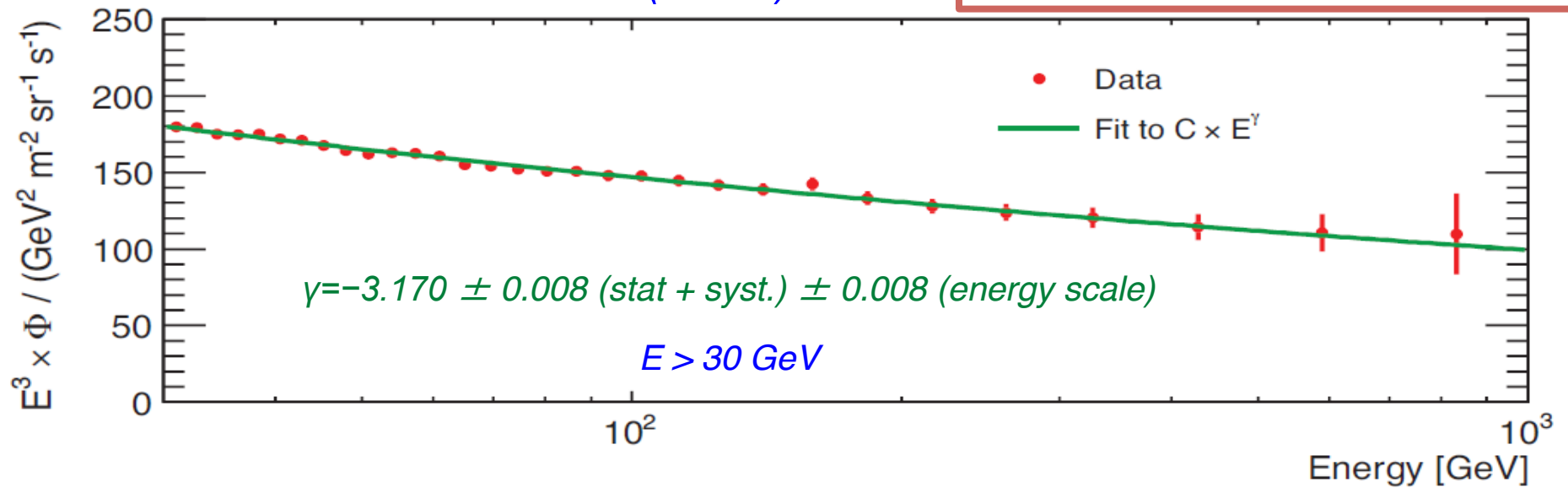


The Electron Flux and the Positron Flux



$$\Phi(e^+ + e^-) = C E^\gamma$$

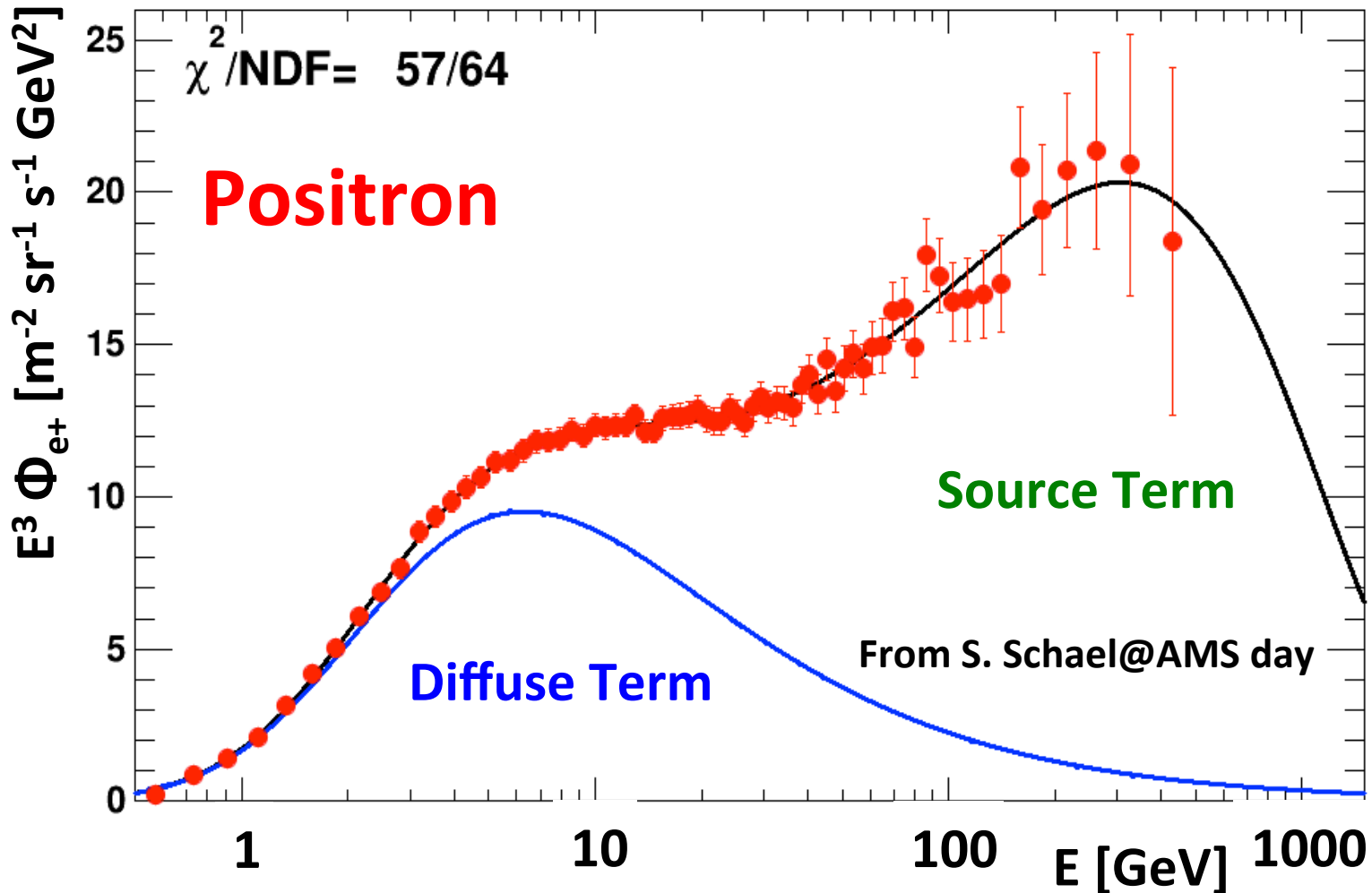
e+の幂指数 ~ p の幂指数



$$\Phi_{e^+}(E) = \frac{E^2}{\hat{E}^2} \left[C_{e^+} \hat{E}^{\gamma_{e^+}} + C_S \hat{E}^{\gamma_S} \exp(-\hat{E} / E_S) \right]$$

with $E_S = 540$ GeV from the $e^+ / (e^+ + e^-)$ fit and \hat{E} as the energy scale of the LIS

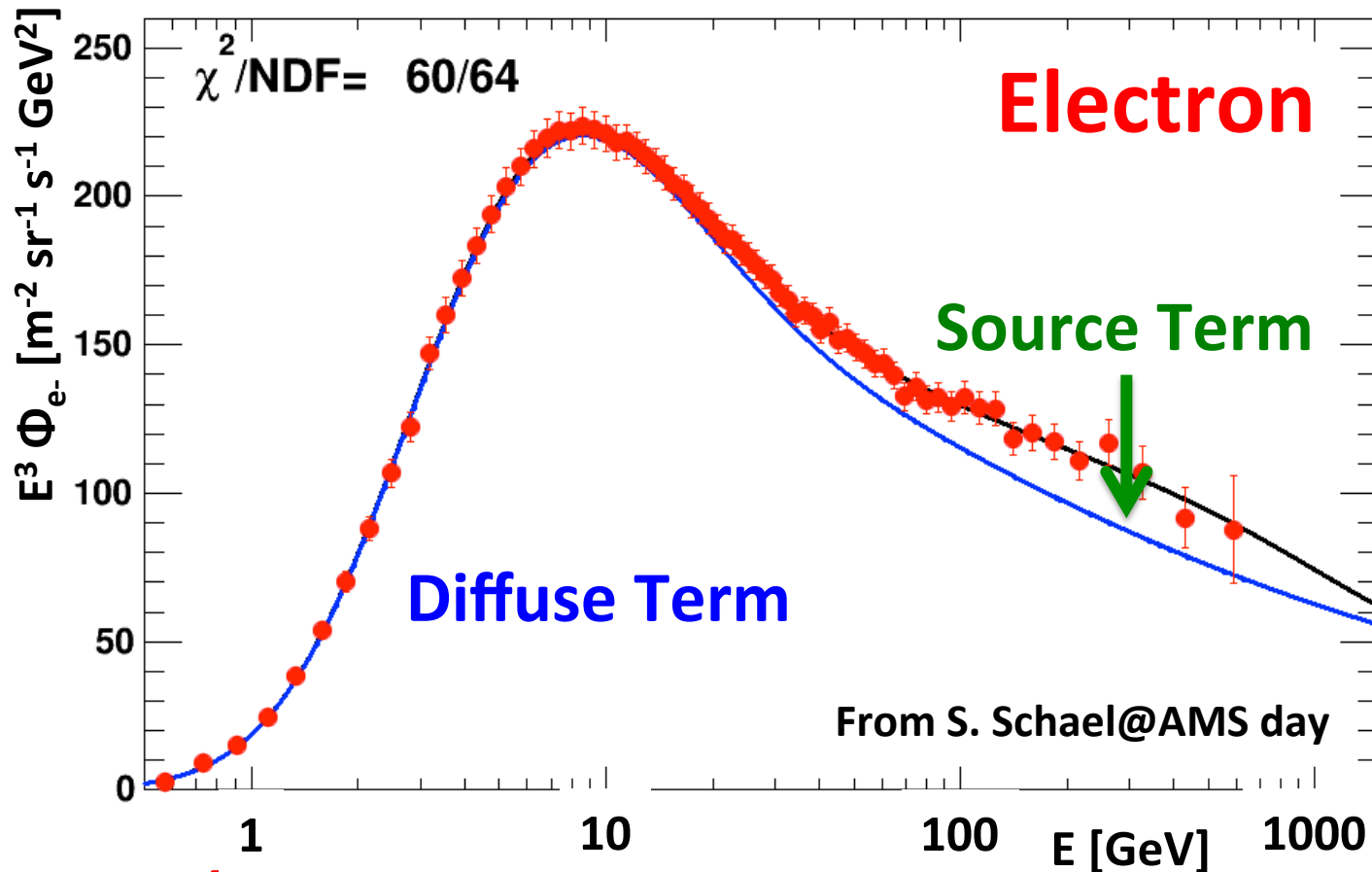
The Positron Flux has no sharp structures and is dominated at high energies by the source term.



The spectral index of the diffuse term has to become energy dependent:

$$\Phi_{e^-}(E) = \frac{E^2}{\hat{E}^2} \left[C_{e^-} \hat{E}^{\gamma_{e^-}(\hat{E})} + C_S \hat{E}^{\gamma_S} \exp(-\hat{E} / E_S) \right]$$

The source term parameters are constrained from the positron flux fit.

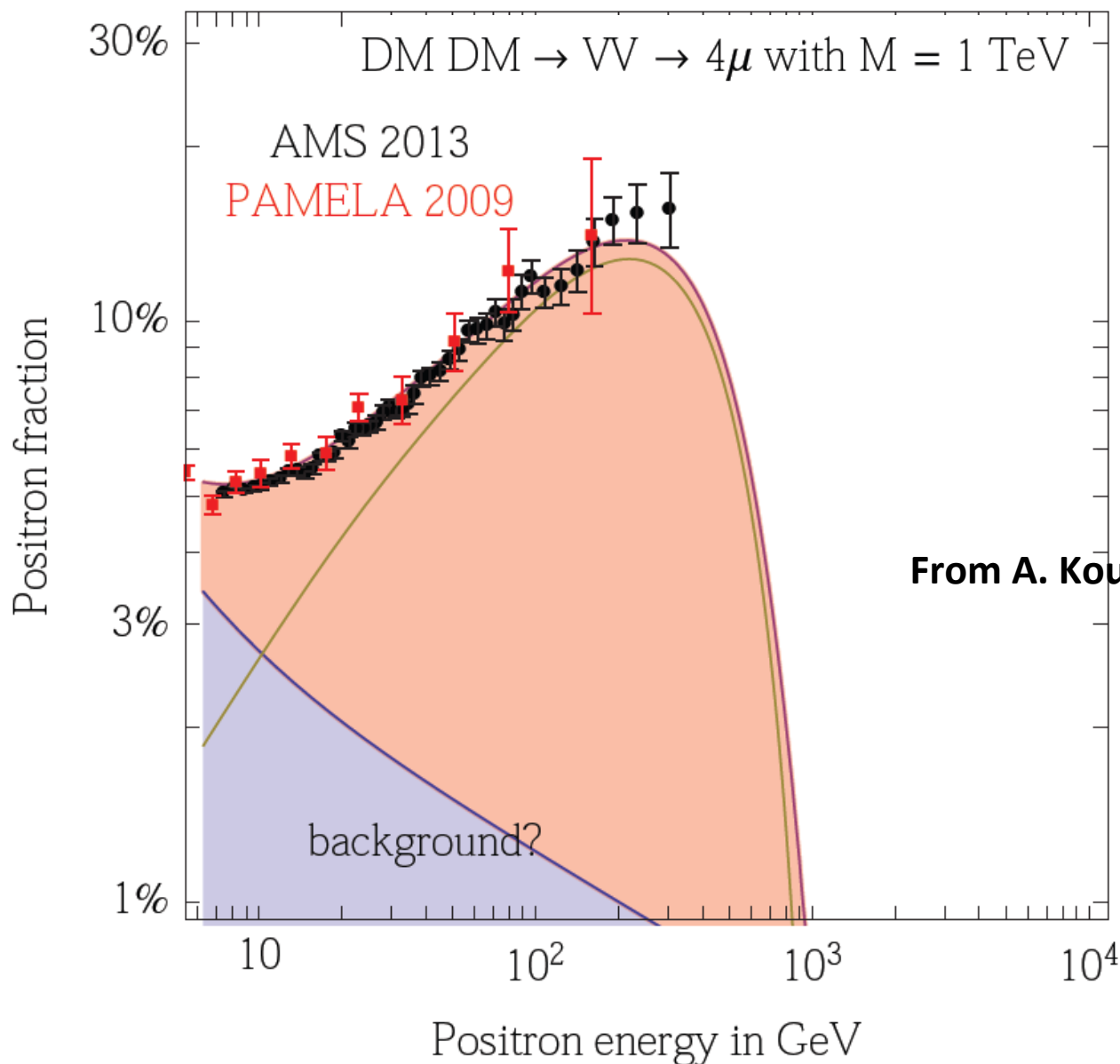


The Electron Flux

- has no sharp structures and is dominated by the diffuse term.
- is consistent with a charge symmetric source term.

Dark Matter model with intermediate state

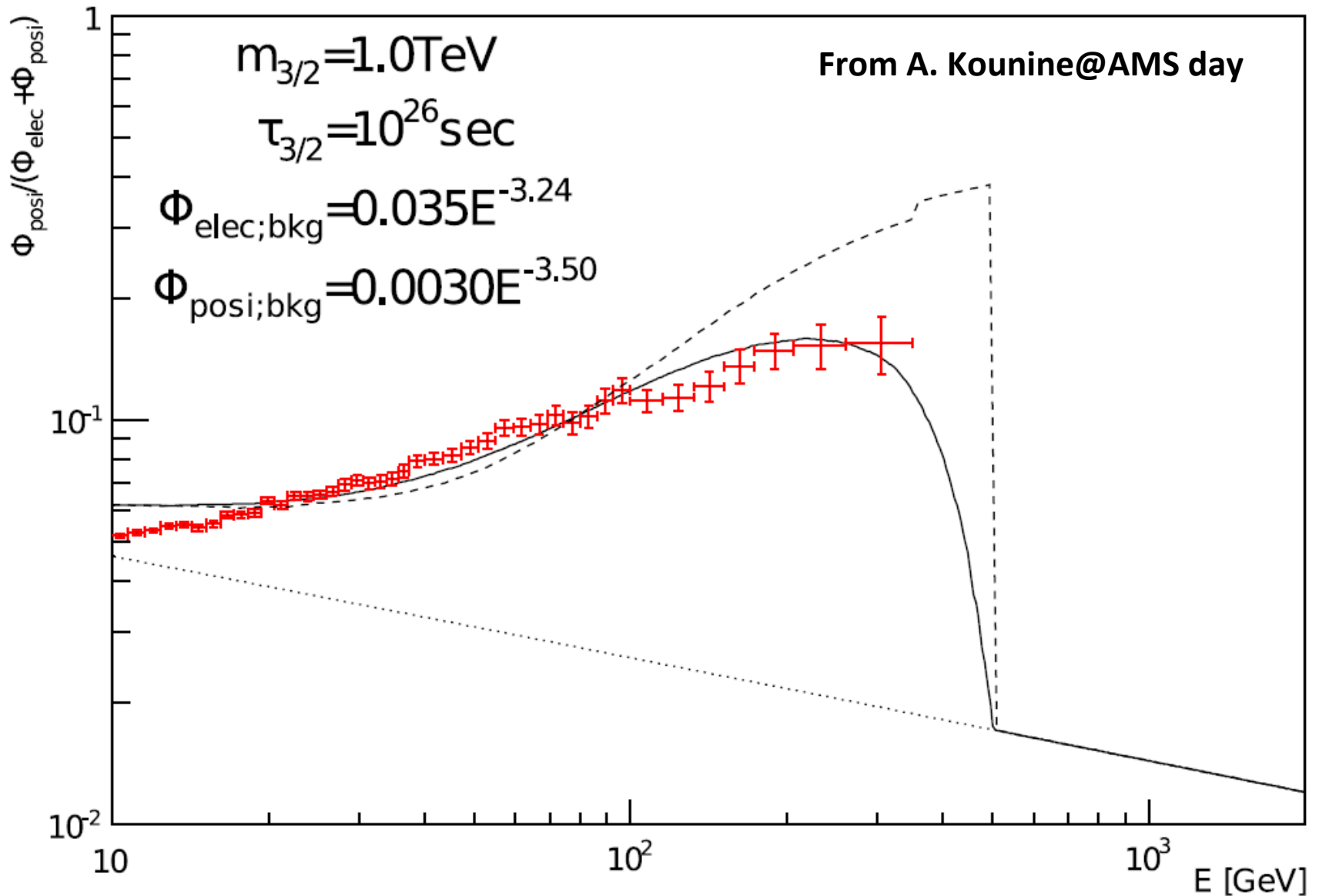
M.Cirelli, M.Kadastik, M.Raidal and A.Strumia, Nucl.Phys. B873 (2013) 530



From A. Kounine@AMS day

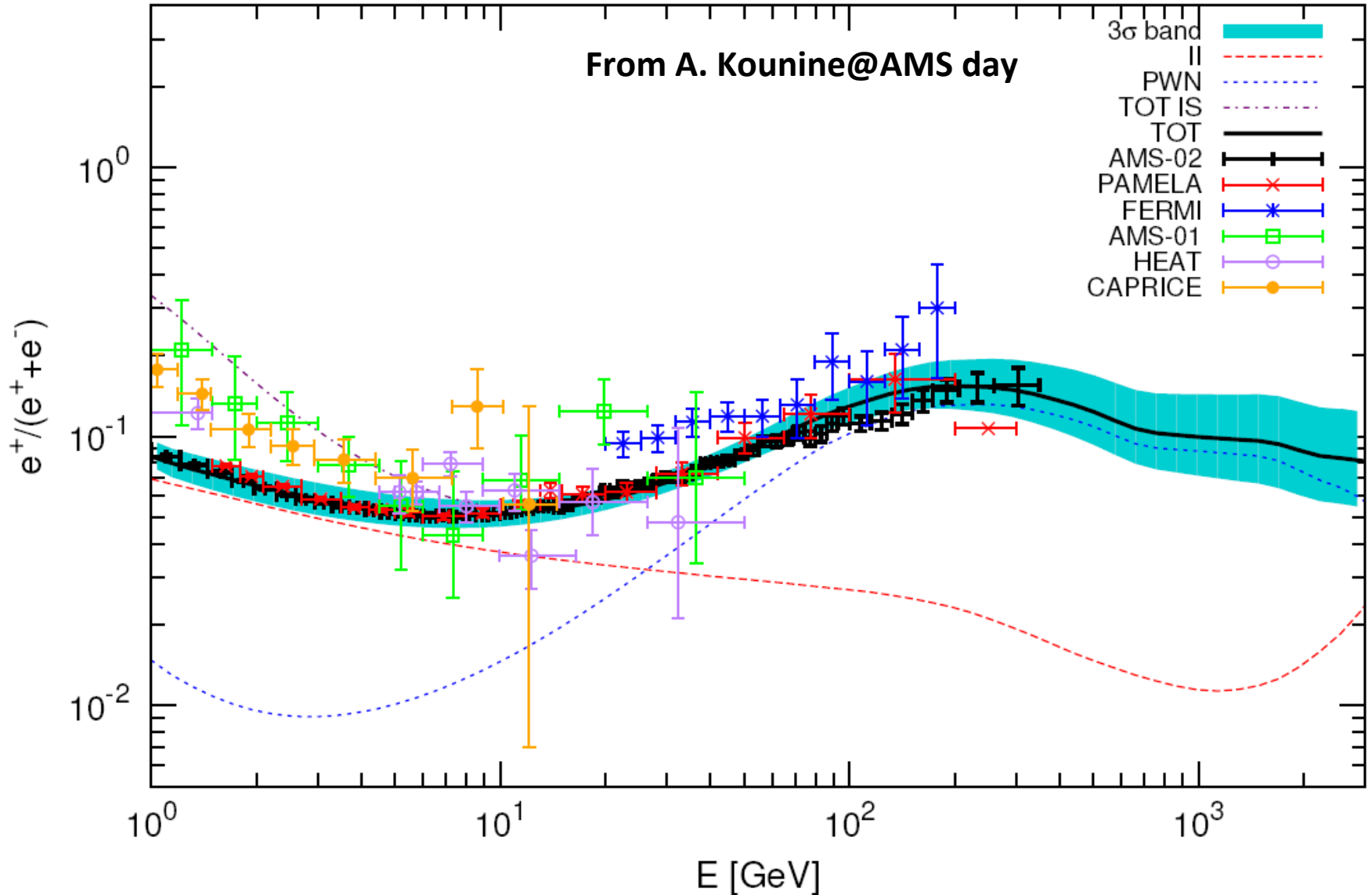
Dark Matter model with gravitino

M. Ibe, S. Iwamoto, T. Moroi and N. Yokozaki, JHEP 1308 (2013) 029



Production in Pulsars

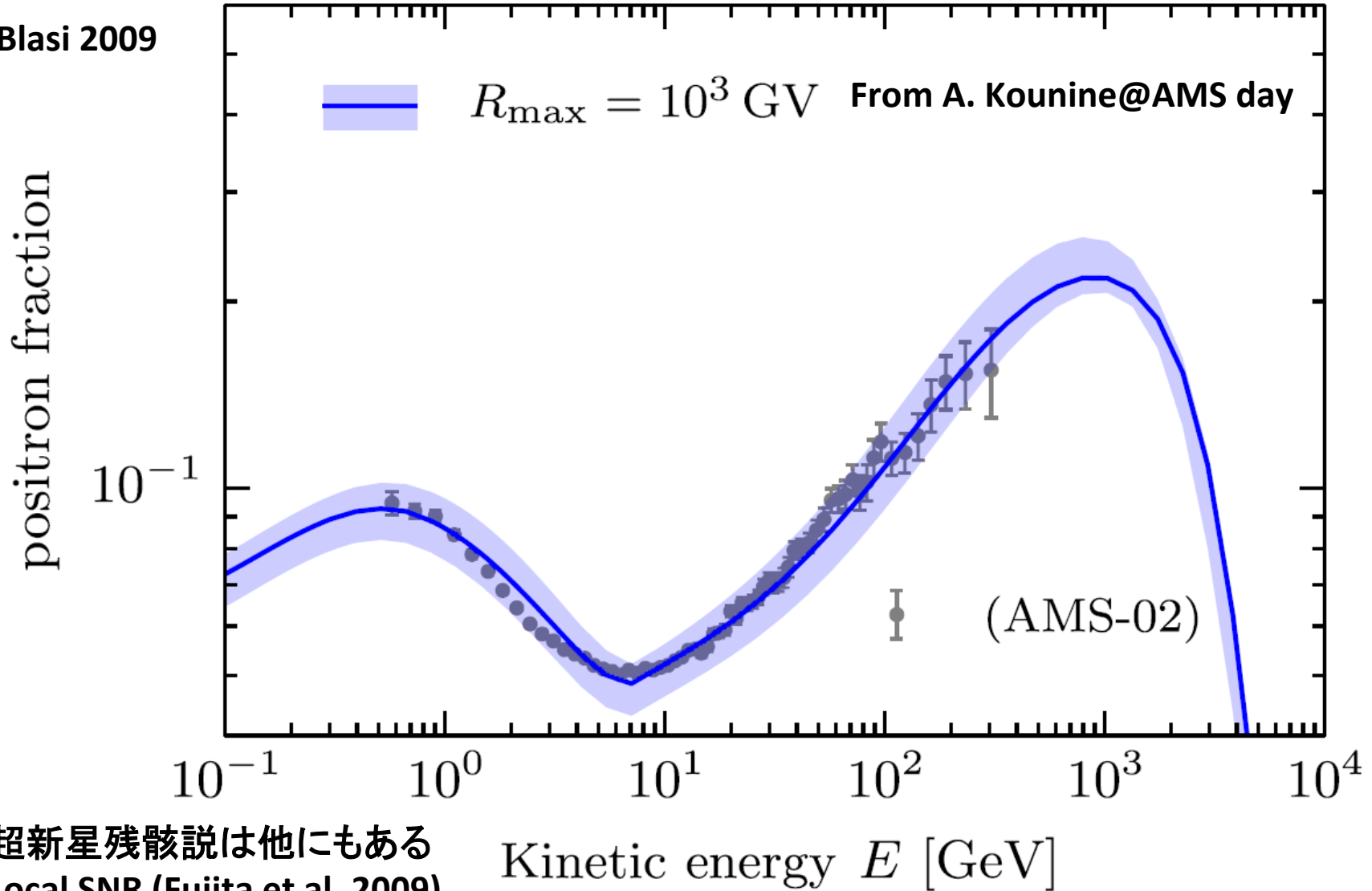
M. DiMauro, F. Donato, N. Fornengo, R. Lineros, A. Vittino, JCAP 1404 (2014) 006



Acceleration in SNRs

P. Mertsch and S. Sarkar, Phys.Rev. D 90 (2014) 061301(R)

Blasi 2009



超新星残骸説は他にもある
Local SNR (Fujita et al. 2009)

S. Sarkar talk on April 16

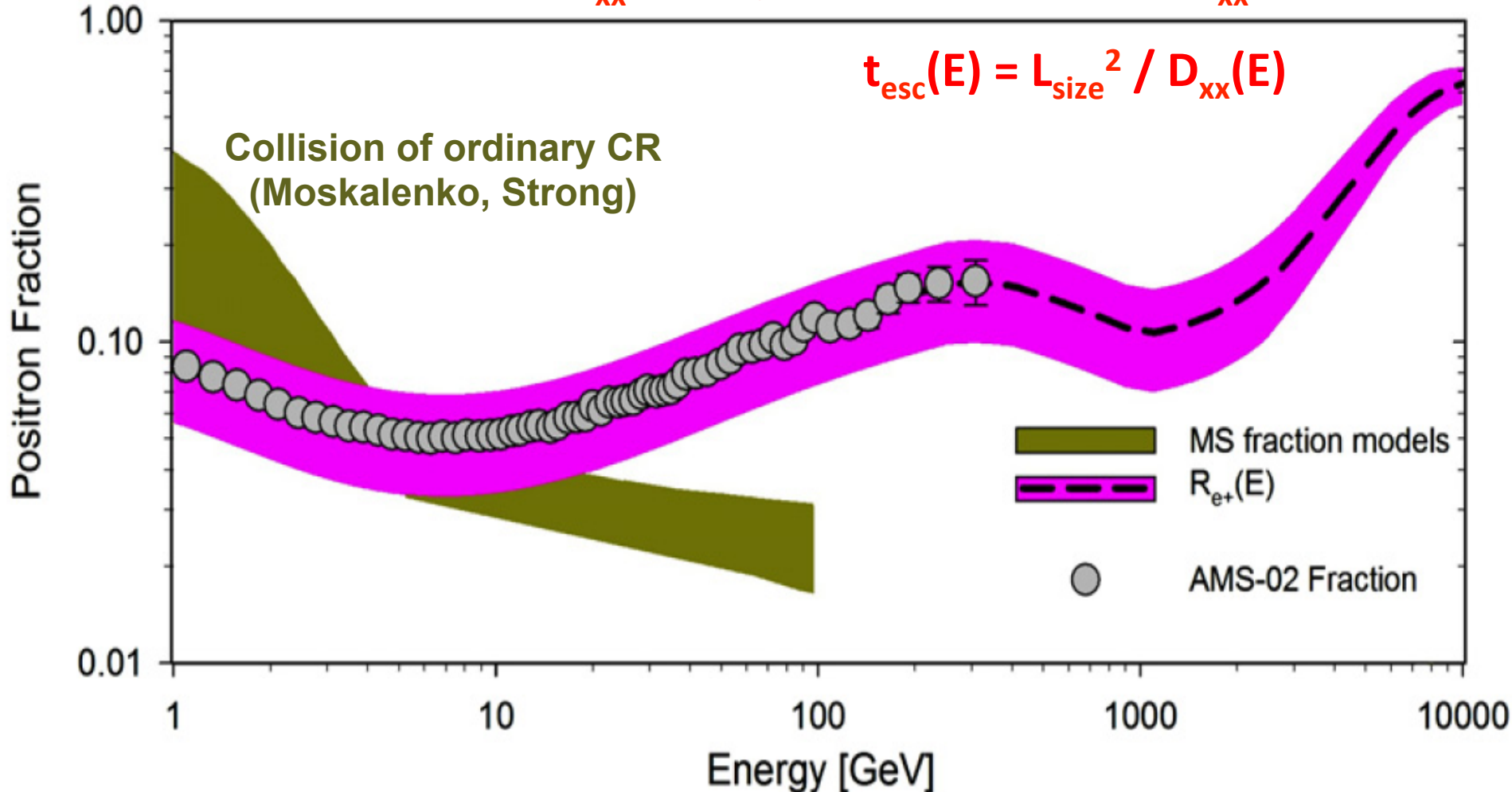
Propagation of secondaries

R. Cowsik, B. Burch, and T. Madziwa-Nussinov, Ap. J. 786 (2014) 124

CR source 近傍は $D_{xx} \propto E^{0.6}$, その他の銀河内は $D_{xx} \propto E^0$

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

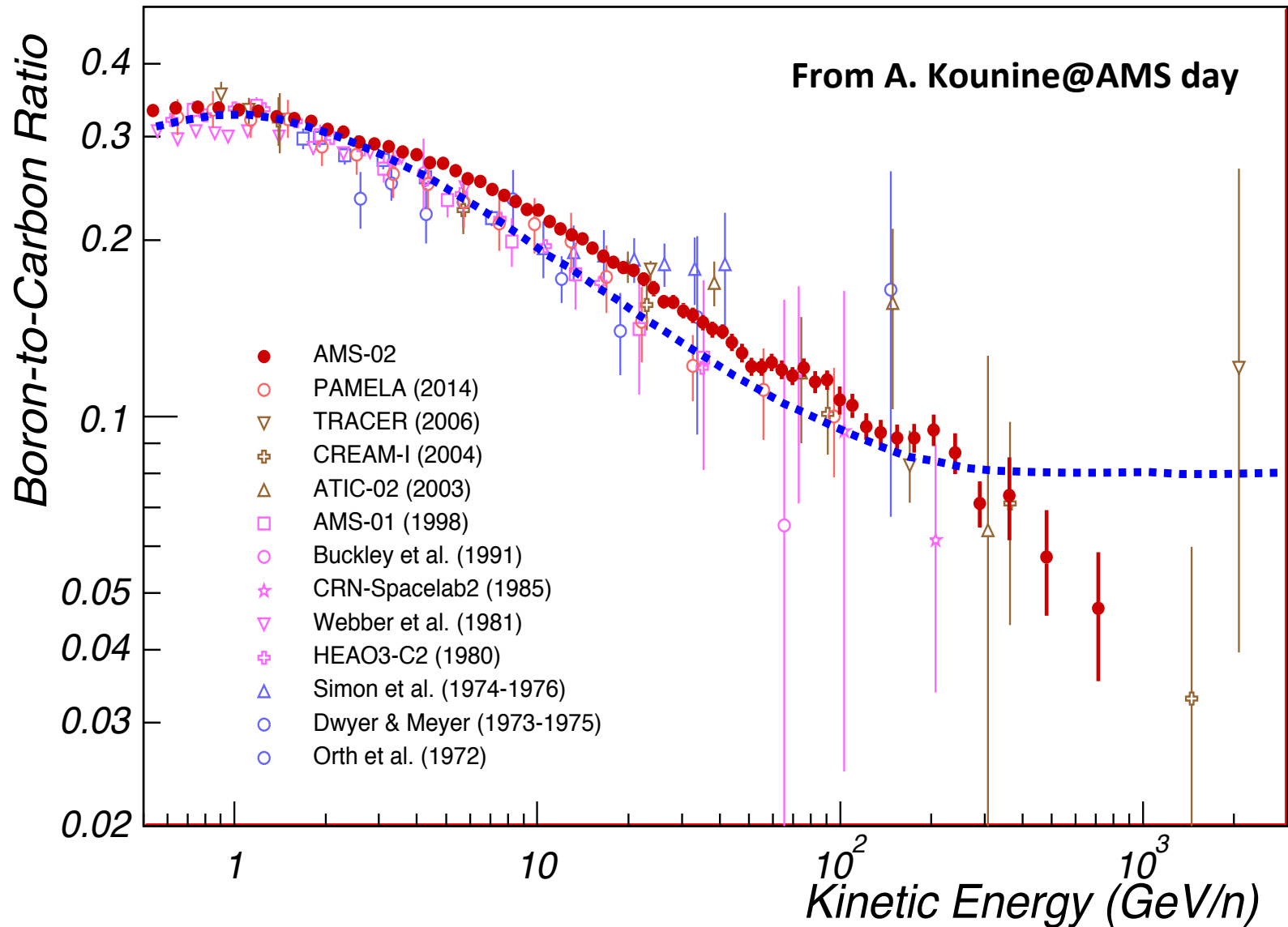
Collision of ordinary CR
(Moskalenko, Strong)



From A. Kounine@AMS day

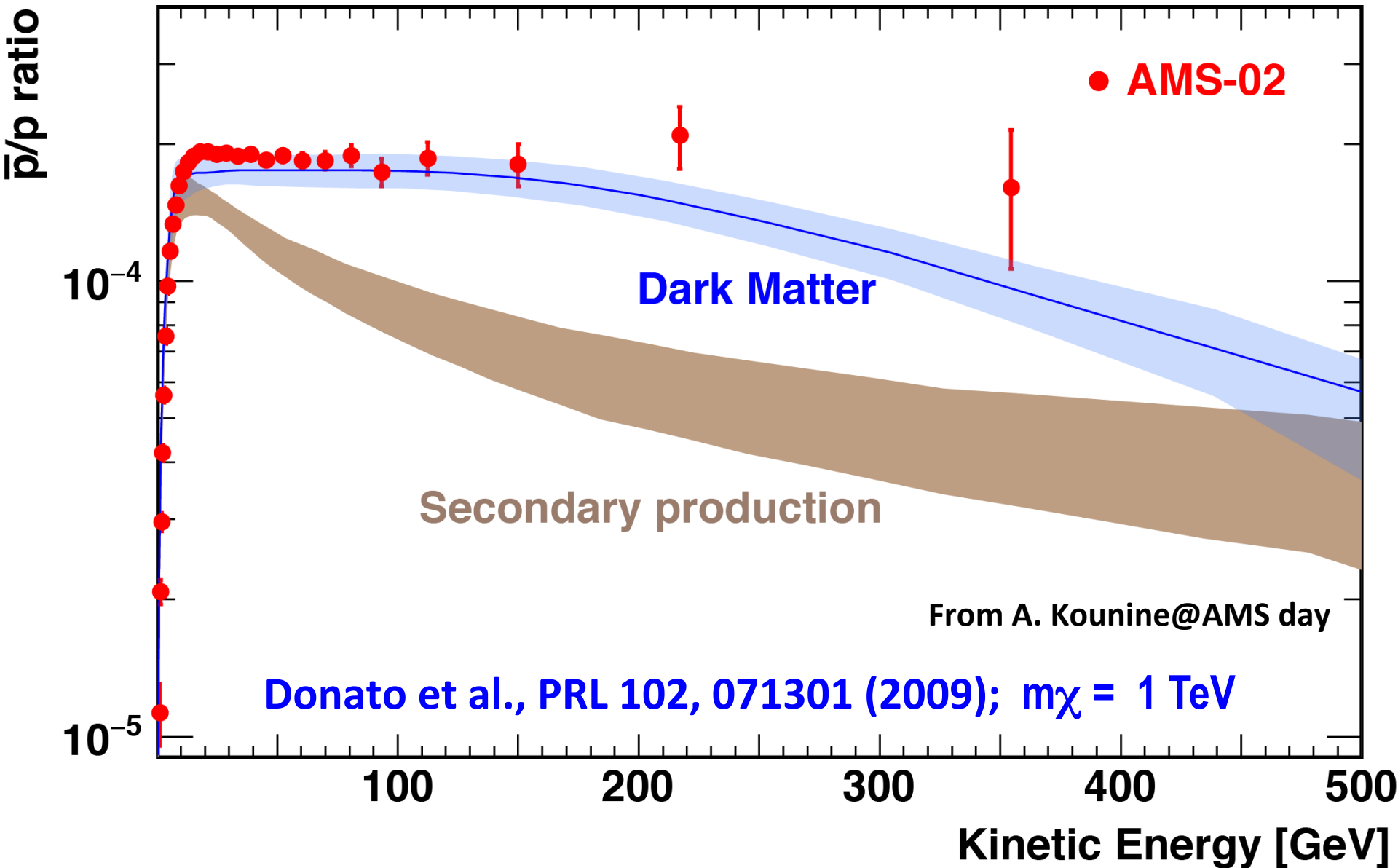
Propagation of secondaries

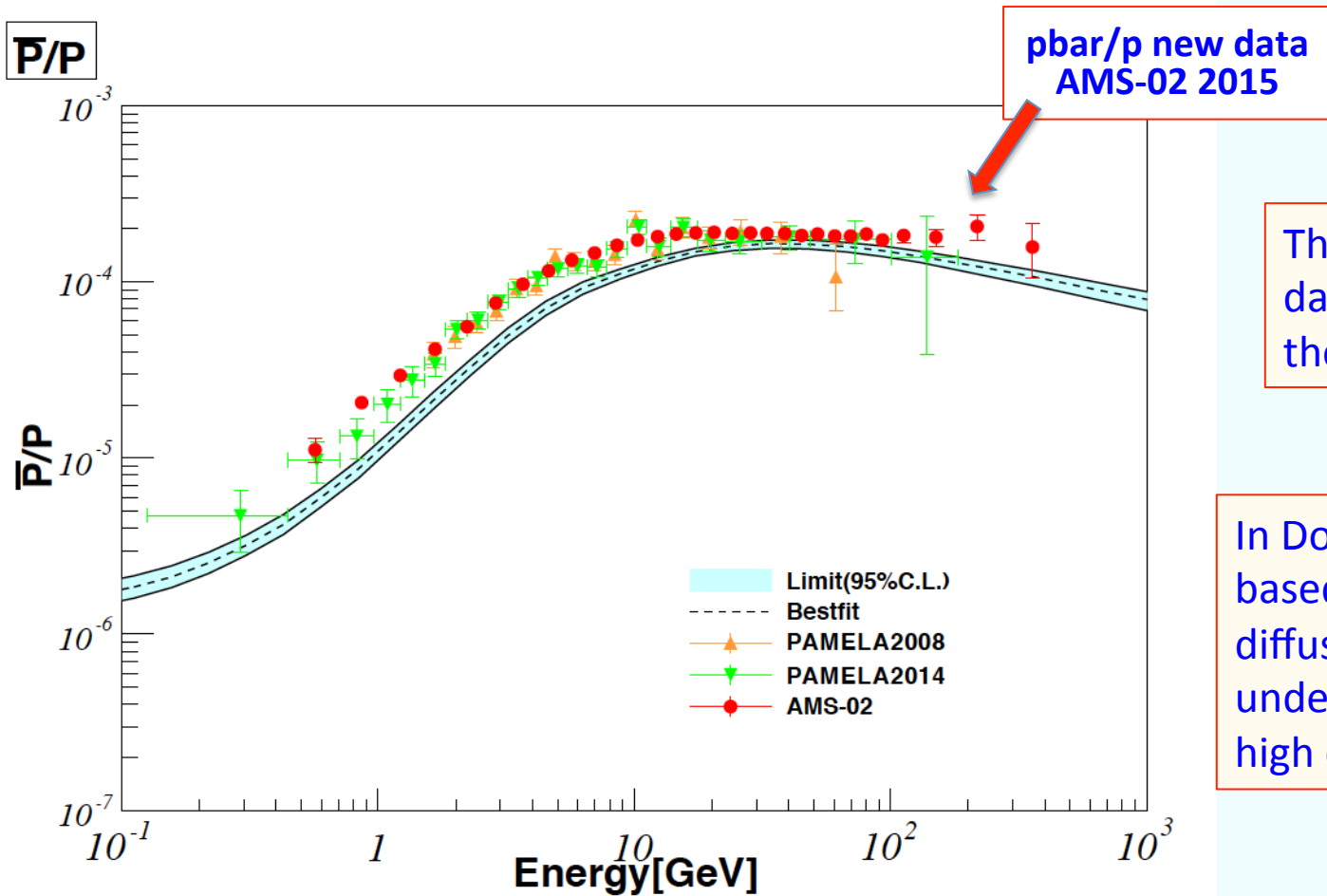
R. Cowsik, B. Burch, and T. Madziwa-Nussinov, Ap. J. 786 (2014) 124



A. Oliva talk on April 17

AMS \bar{p}/p results and modeling





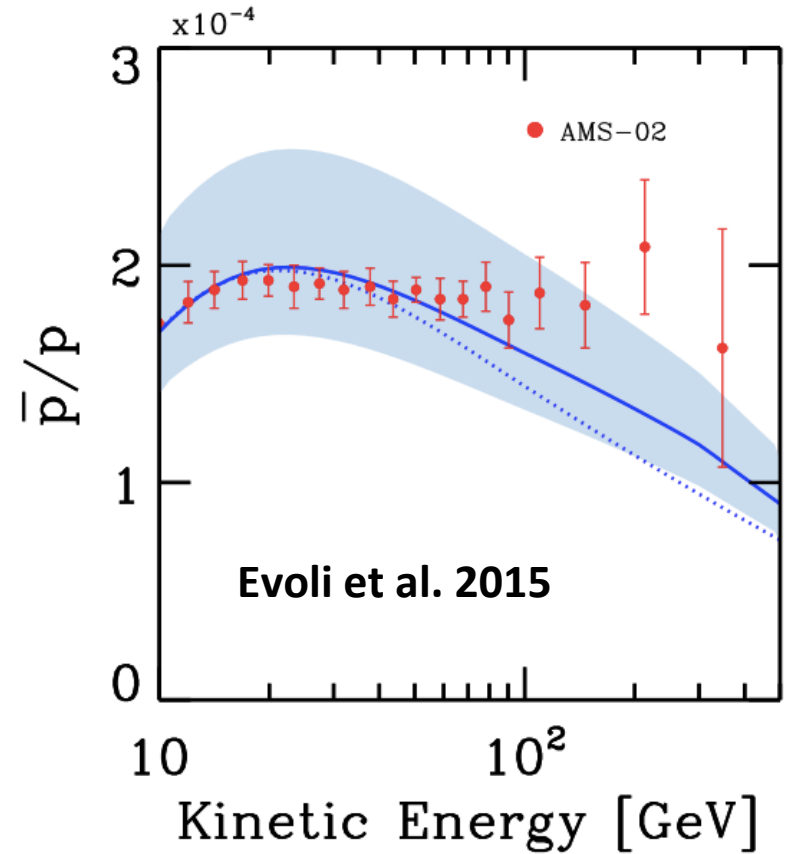
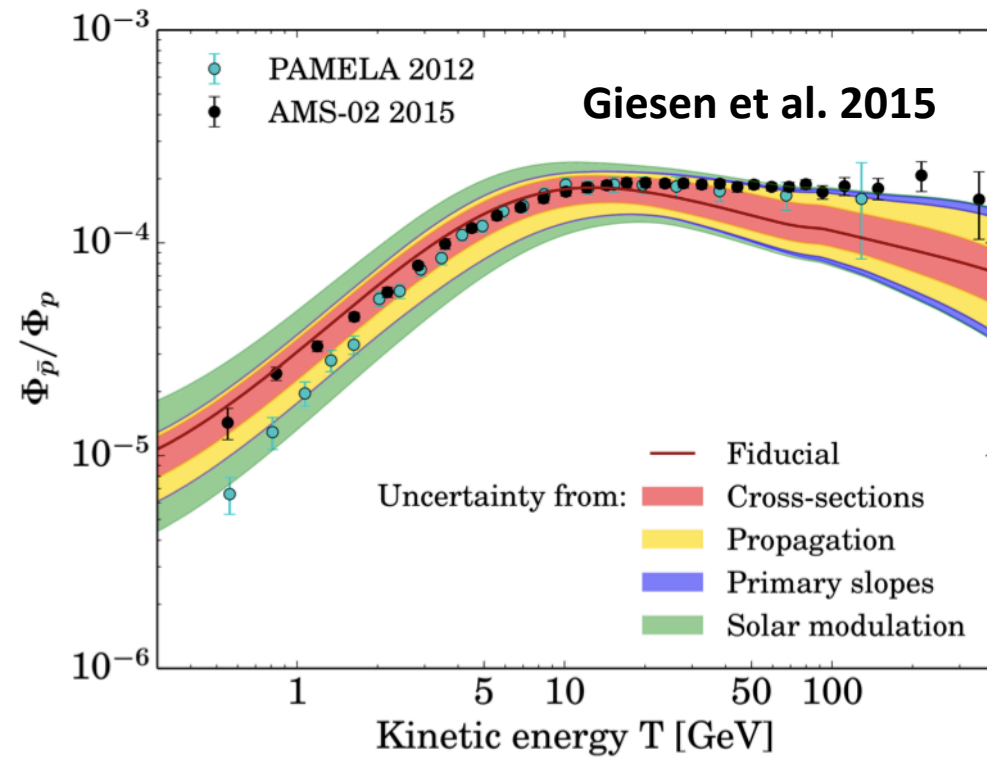
The AMS-02 pbar/p data are consistent with the background overall

In Donato et al. 2009 result based on the two-zone diffusion model actually underestimated the pbar at high energies.

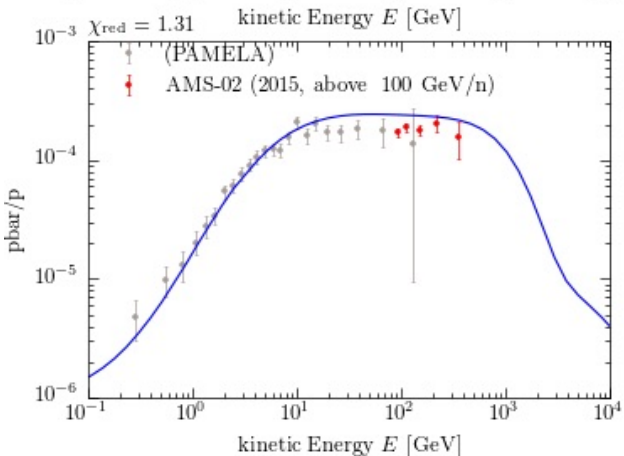
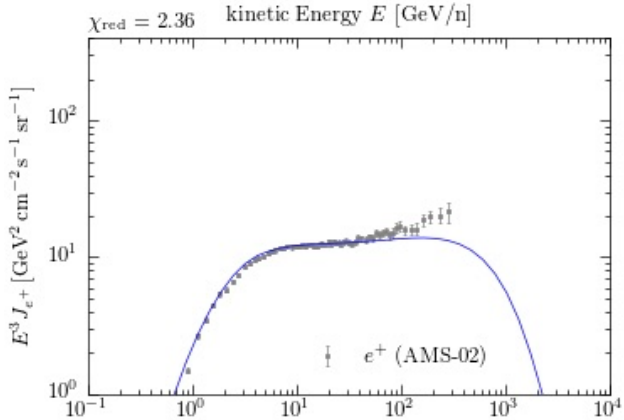
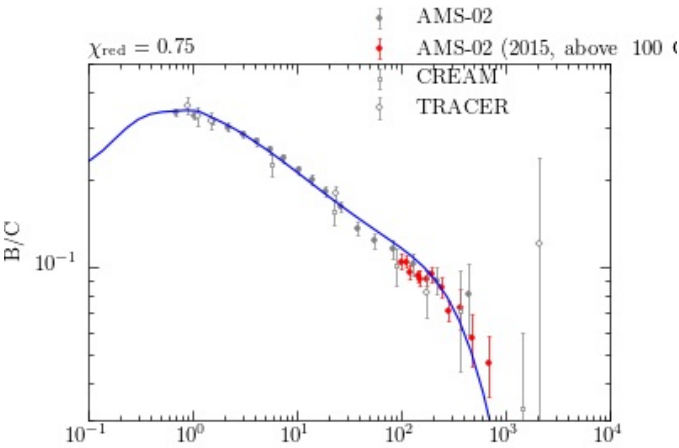
From Yue-Liang Wu@AMS day

Conclusion: our predictions and new data are highly consistent, except for a few data points at very high energies, which have relatively larger uncertainties. It is then crucial to make more precise measurements on this ratio at high energy region.

Giesen et al. 2015, Evoli et al. 2015

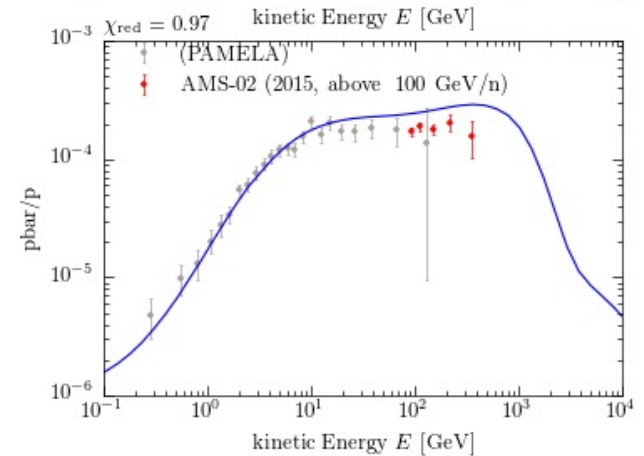
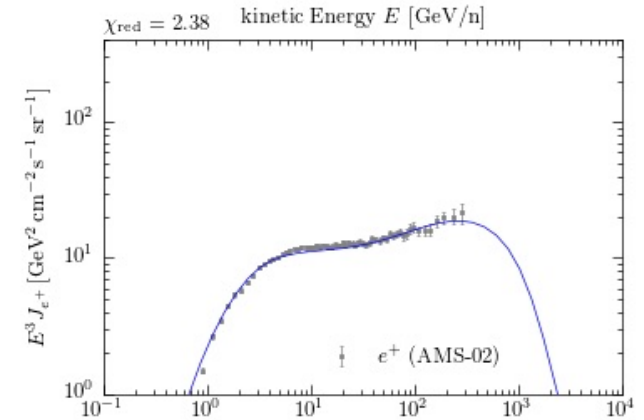
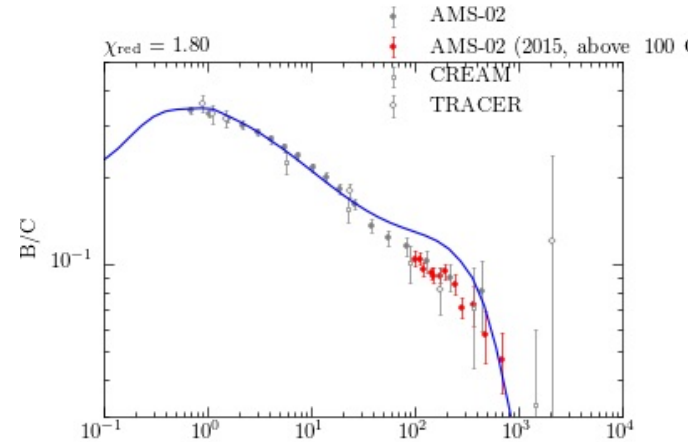


標準伝搬モデルの不定性や散乱断面積の不定性などを考慮すると、最新の \bar{p}/p は、宇宙線の標準モデルで説明可能



We have been trying (late last night!) to get better fits to the new data but it is not easy ... perhaps our model is *too* simple and some further refinements are necessary.

This is justified now that we have *precision* data from AMS!



Kohri et al. 2015, Kachelrieß et al. 2015

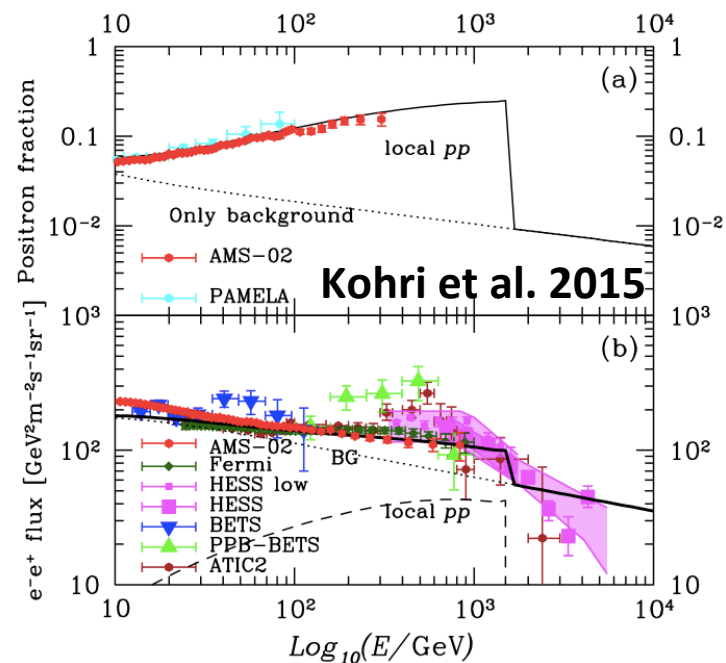
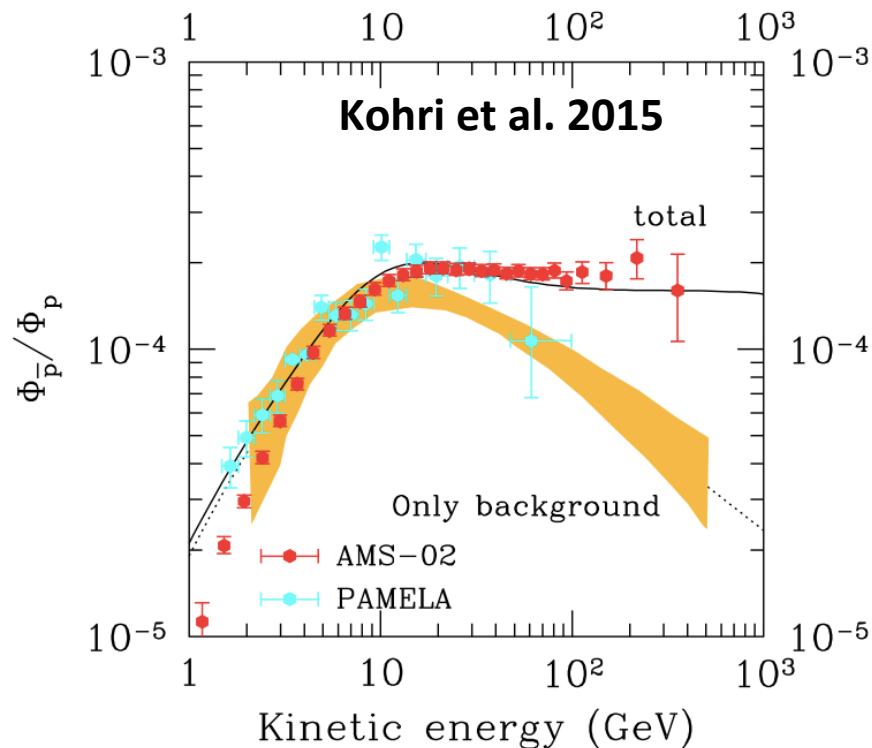
宇宙線の標準モデル + 近傍の超新星残骸

Kohri et al. 2015 近傍のSNRで沢山pp collisionが起きたとする

Kachelrieß et al. 2015 近傍のSNRから地球に伝搬する間に
沢山pp collisionが起きたとする

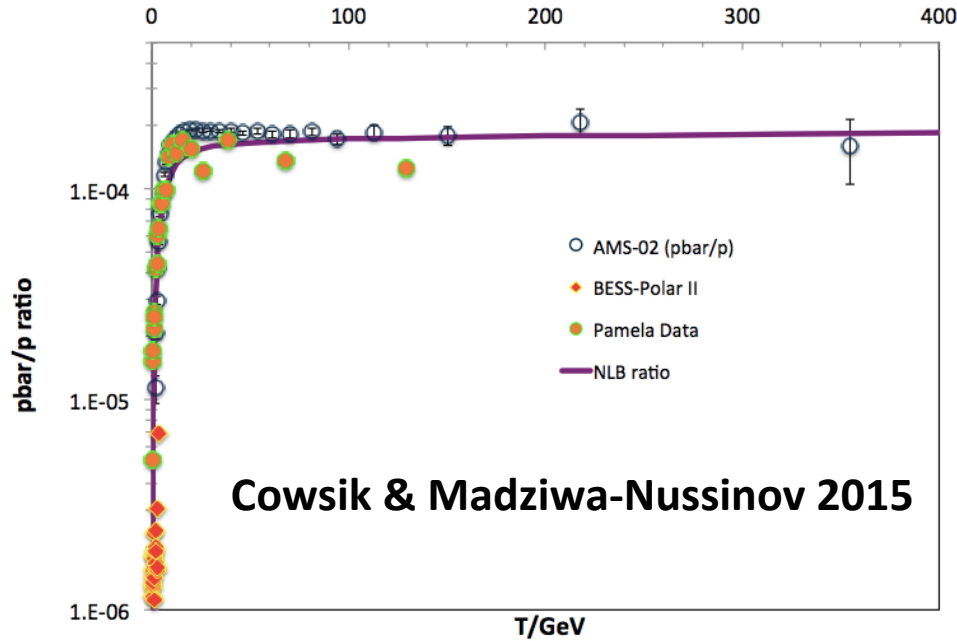
近傍起源のCRは、銀河の外に逃げ出していない→銀河内の滞在時間がエネルギーに寄らない

→ 2次粒子のスペクトルは1次粒子と同じ

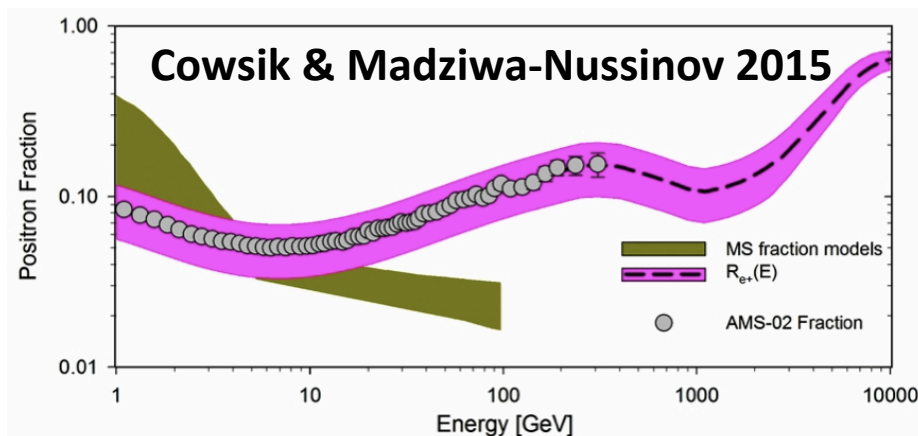
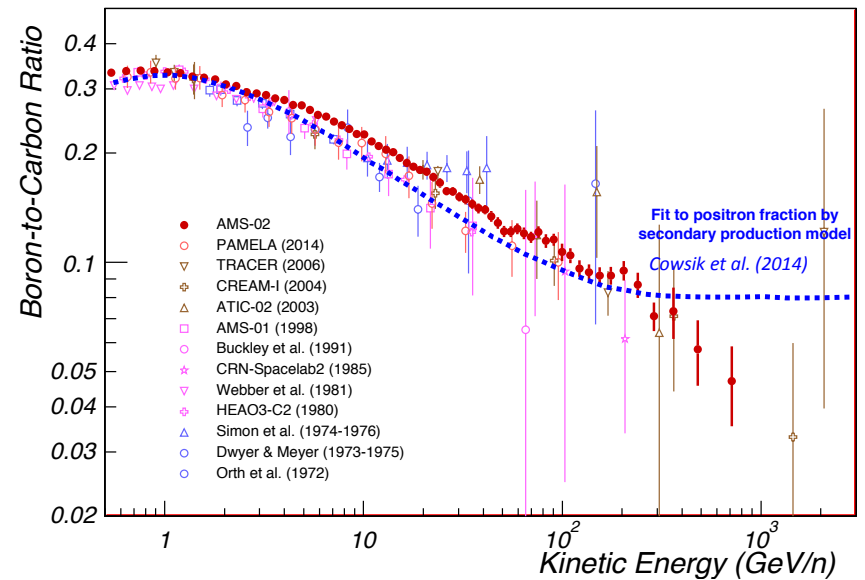


Cowsik & Madziwa-Nussinov 2015

CR source 近傍は $D_{\nu\nu} \propto E^{0.6}$, その他の銀河内は $D_{xx} \propto E^0$



B/C Ratio converted in Kinetic Energy



2次宇宙線の話はこれでおしまい。

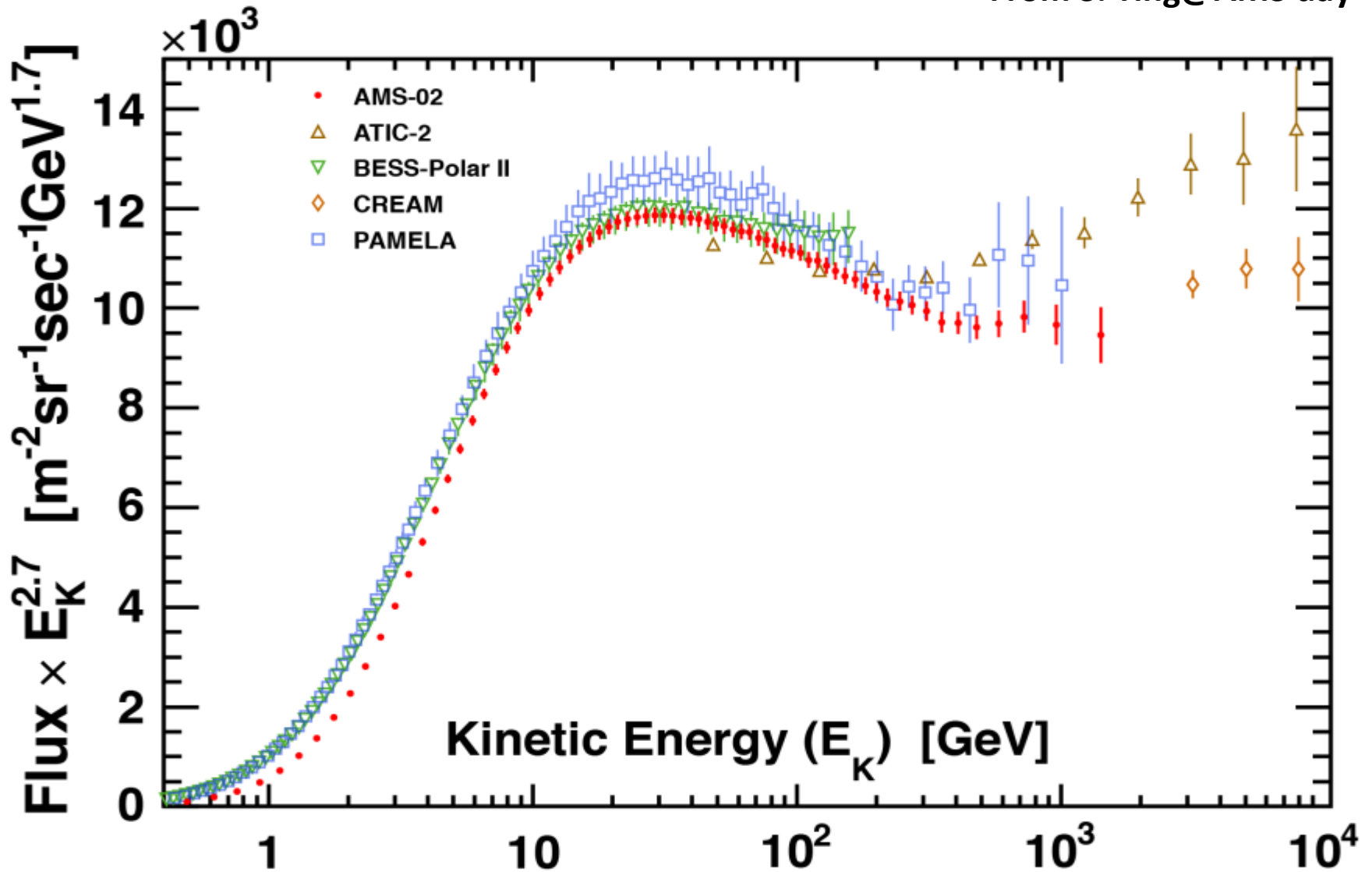
次からは、1次宇宙線の話

DMにしか興味ない人は、...

**宇宙線に関する古典的な標準モデルは
AMS02の結果を説明できない**

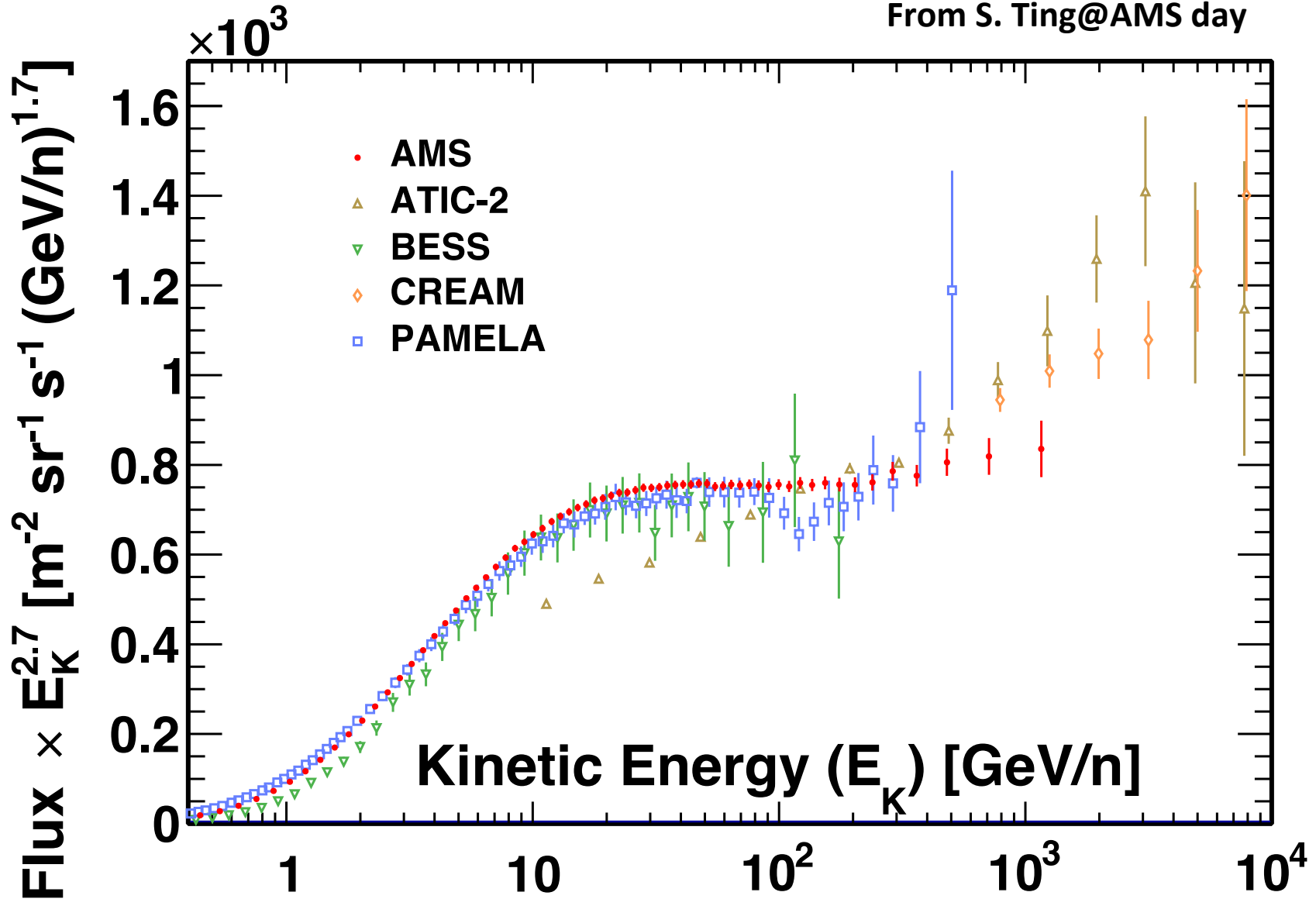
AMS proton flux

From S. Ting@AMS day

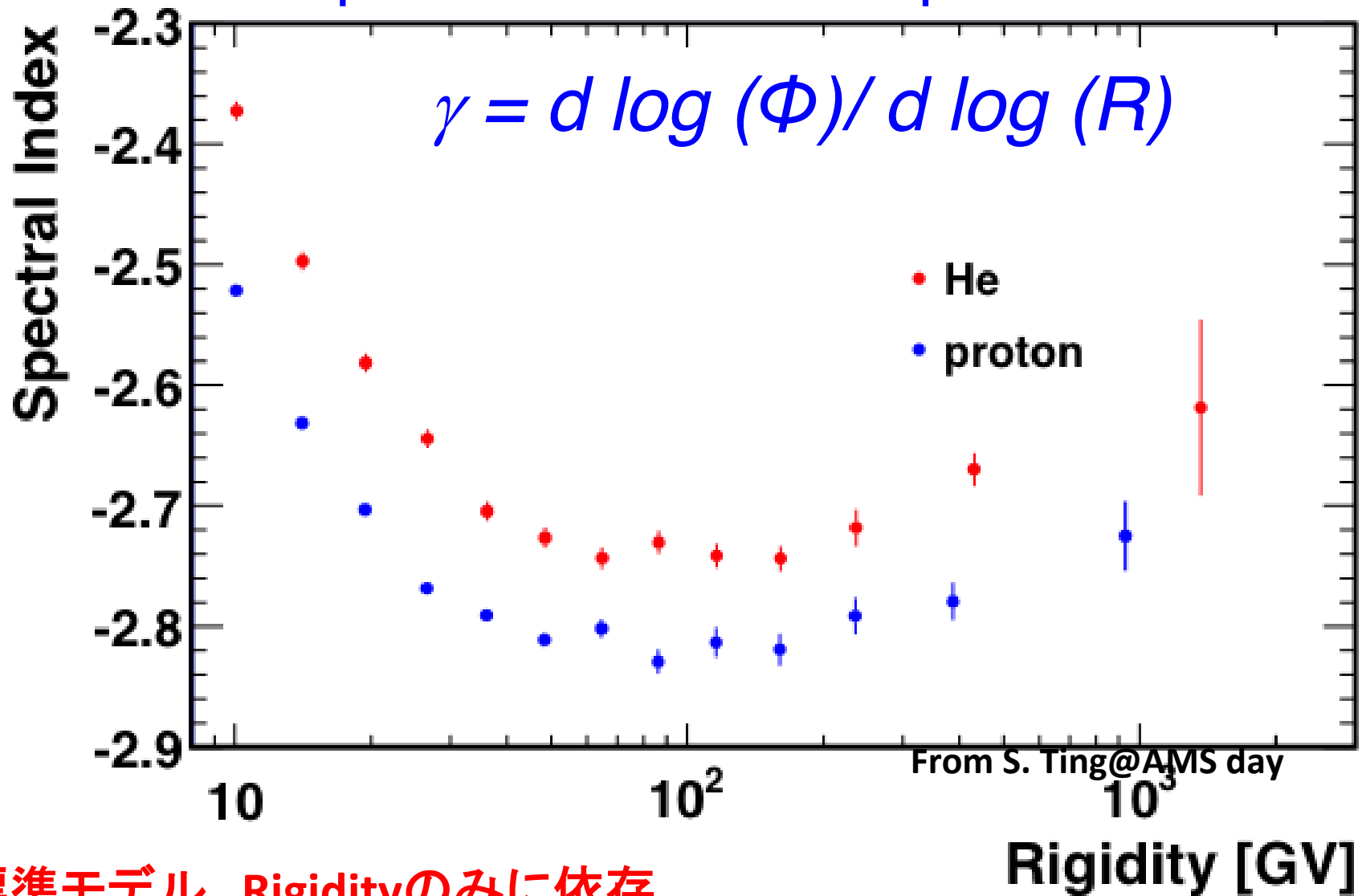


AMS Helium Flux

From S. Ting@AMS day



Model Independent Spectral Indices Comparison



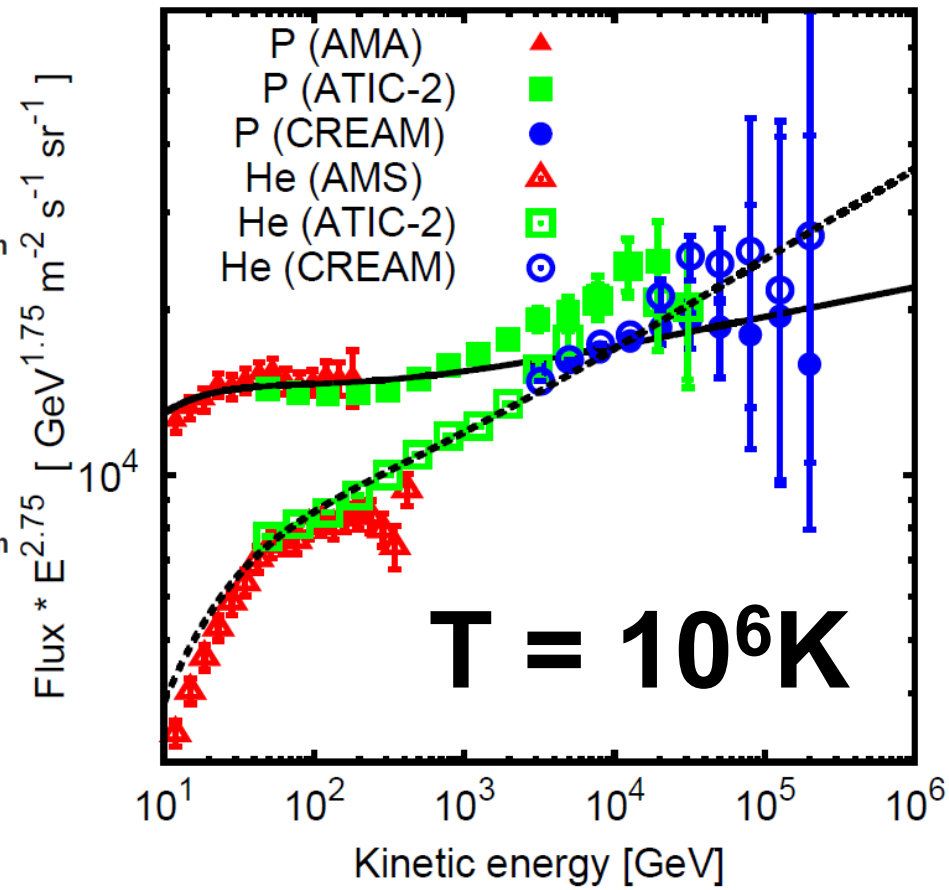
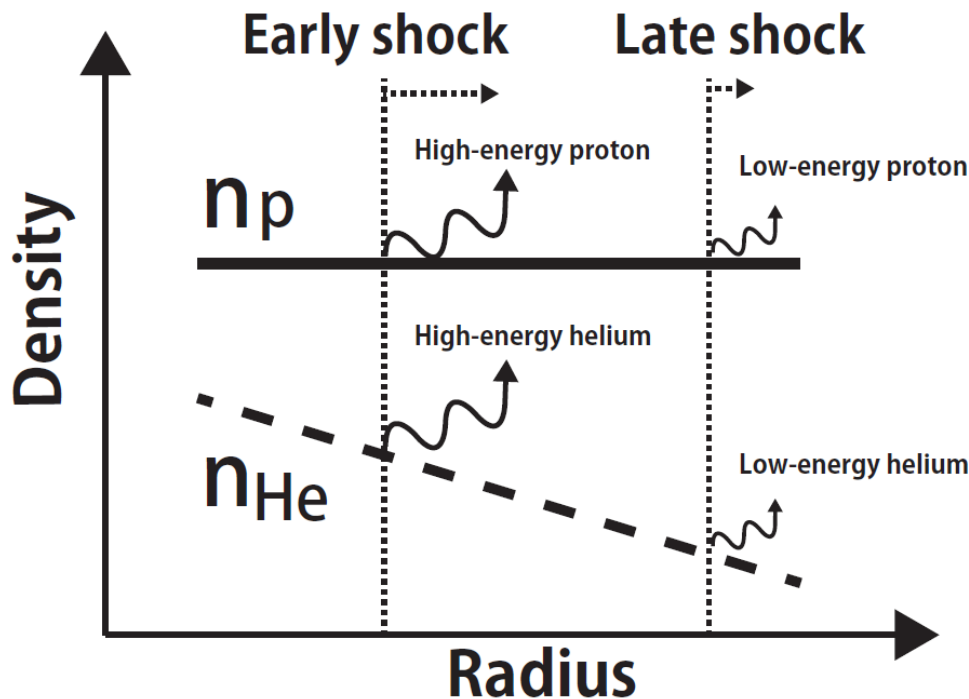
標準モデル Rigidityのみに依存

AMS-02 粒子の種類にも依存, 粒子の種類によらない折れ曲がり

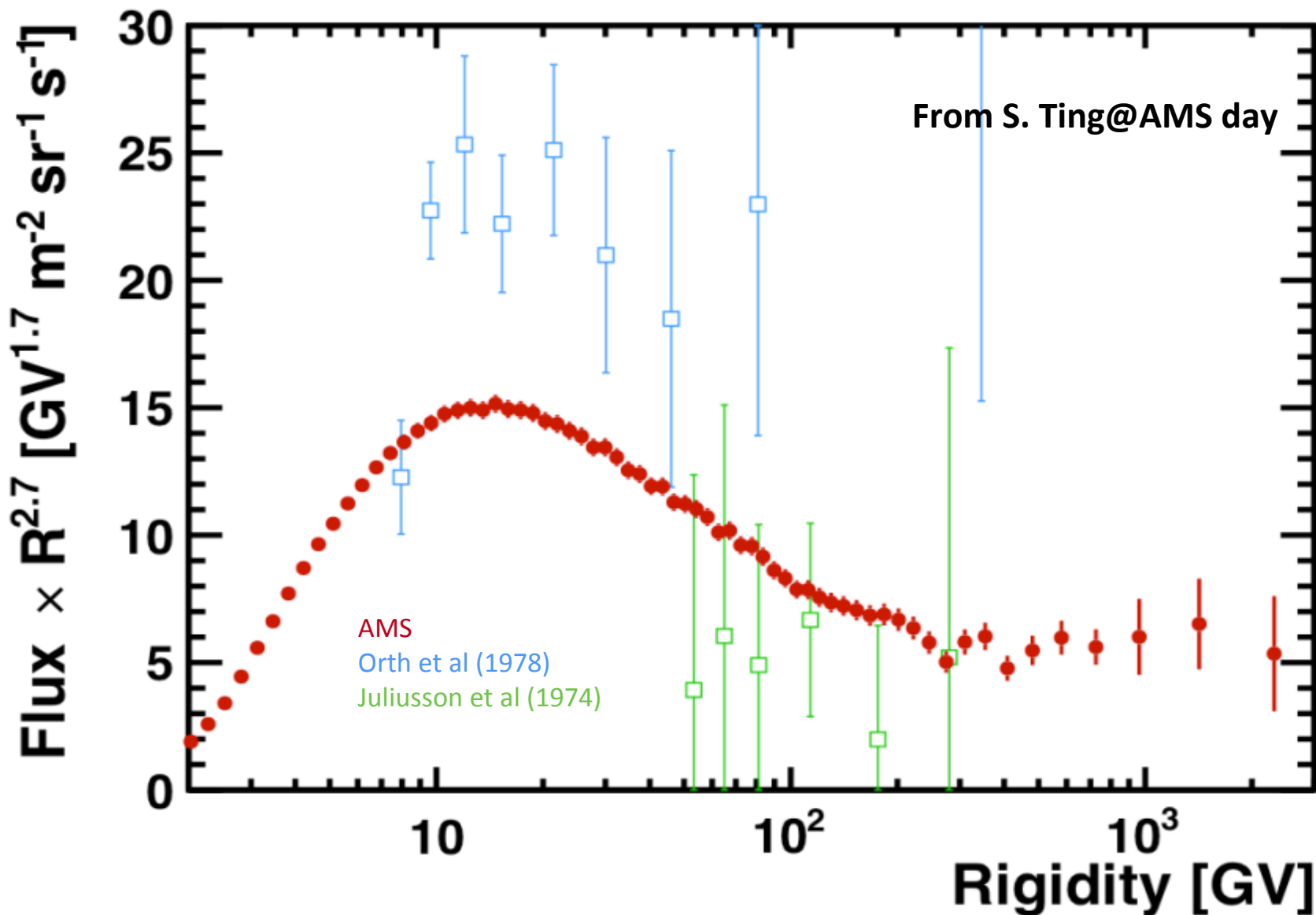
Ohira & Ioka 2011

非一様な元素組成比 $p/He \rightarrow CR\ He$ が $CR\ p$ よりハードなスペクトル
高温ガス中 ($T=10^6\text{K}$) のSNR \rightarrow 粒子種によらない折れ曲がり @ $\sim 100\text{GeV}$

非一様な元素組成比 + 高温ガス \rightarrow 宇宙線はスーパーバブル起源
(SNRが沢山重なったもの)

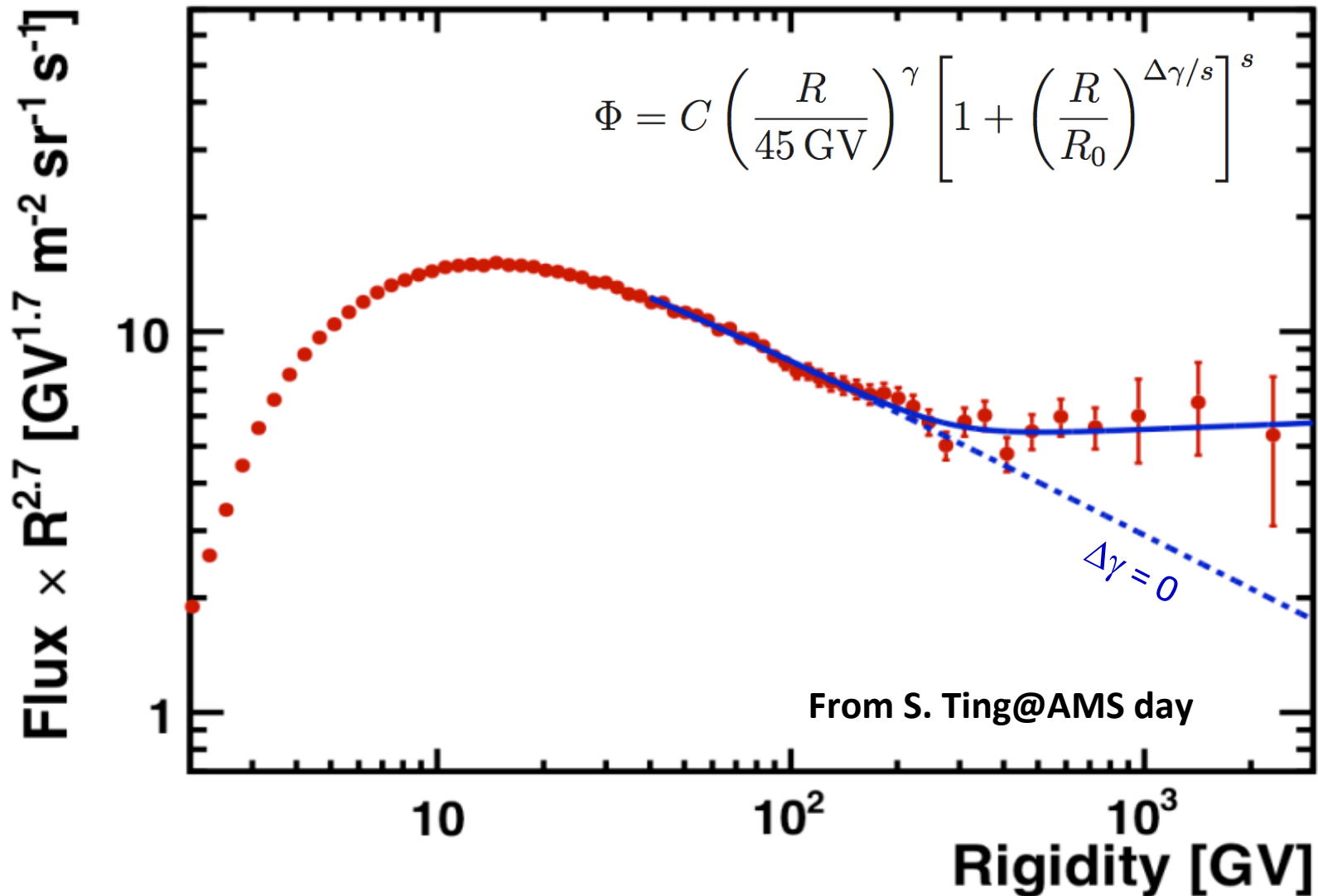


AMS Lithium flux – current status



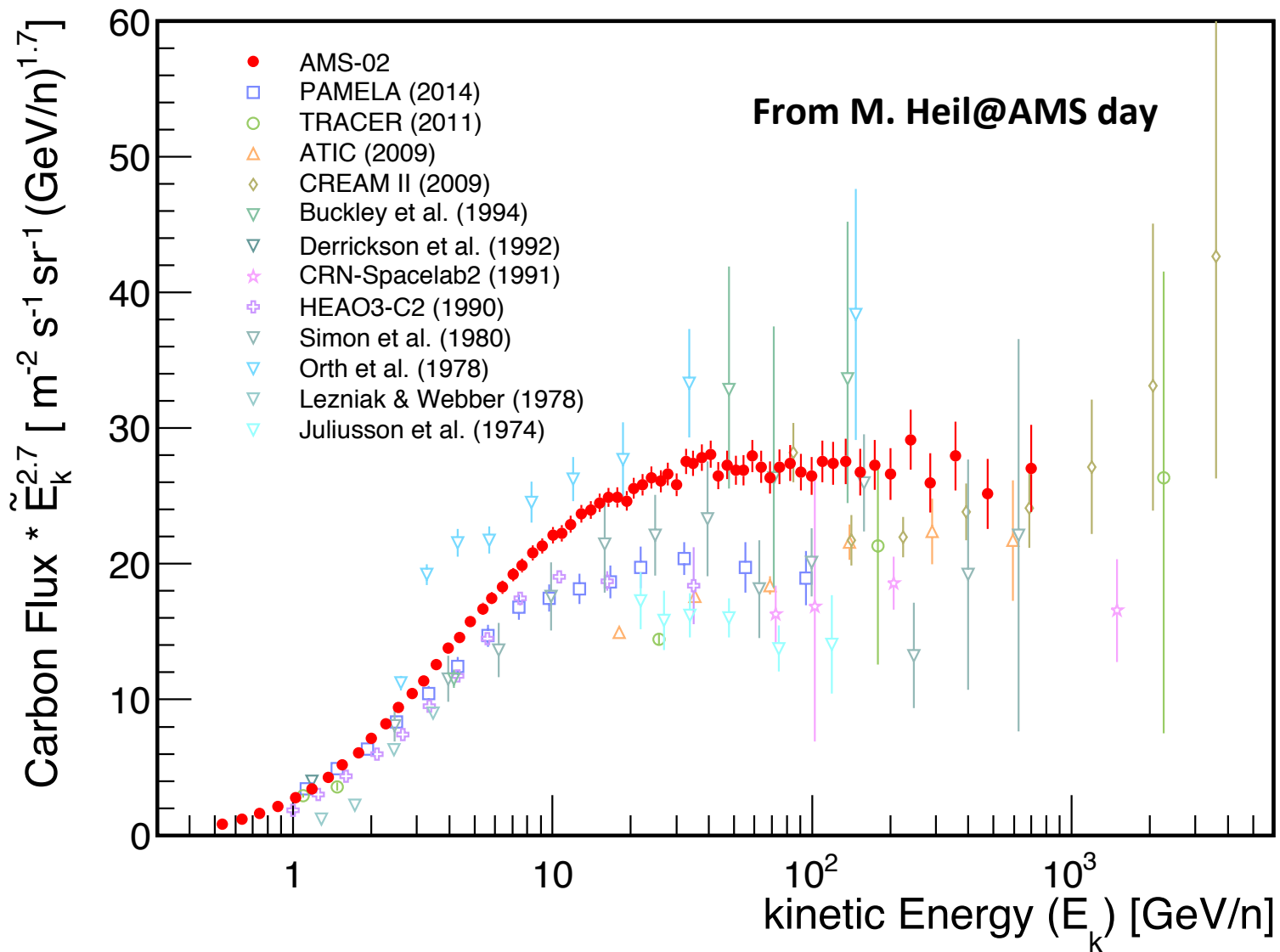
To be presented by L. Derome (LPSC, Grenoble)

Lithium flux with two power law fit

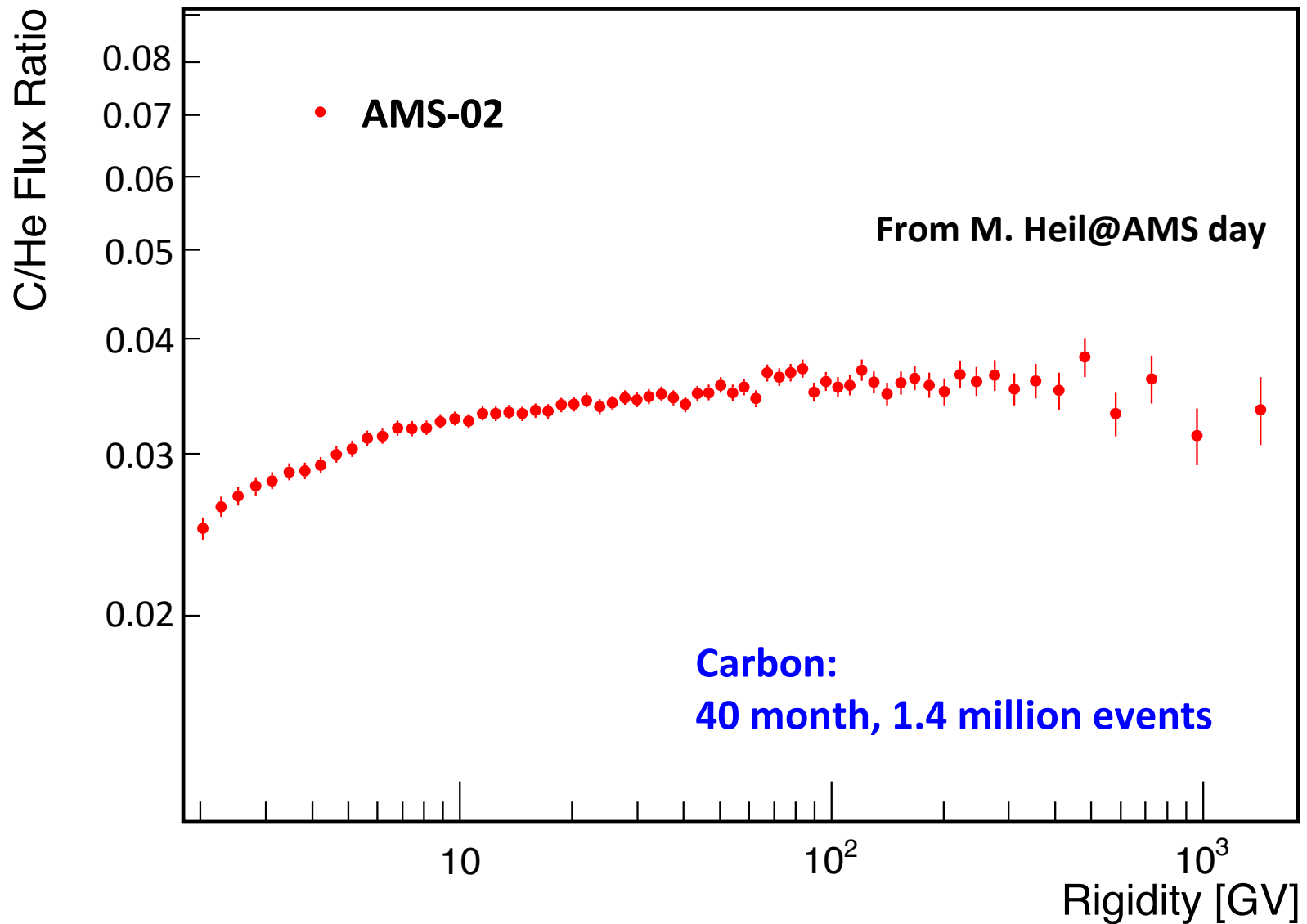


Slope changes at about the same rigidity as for protons and helium

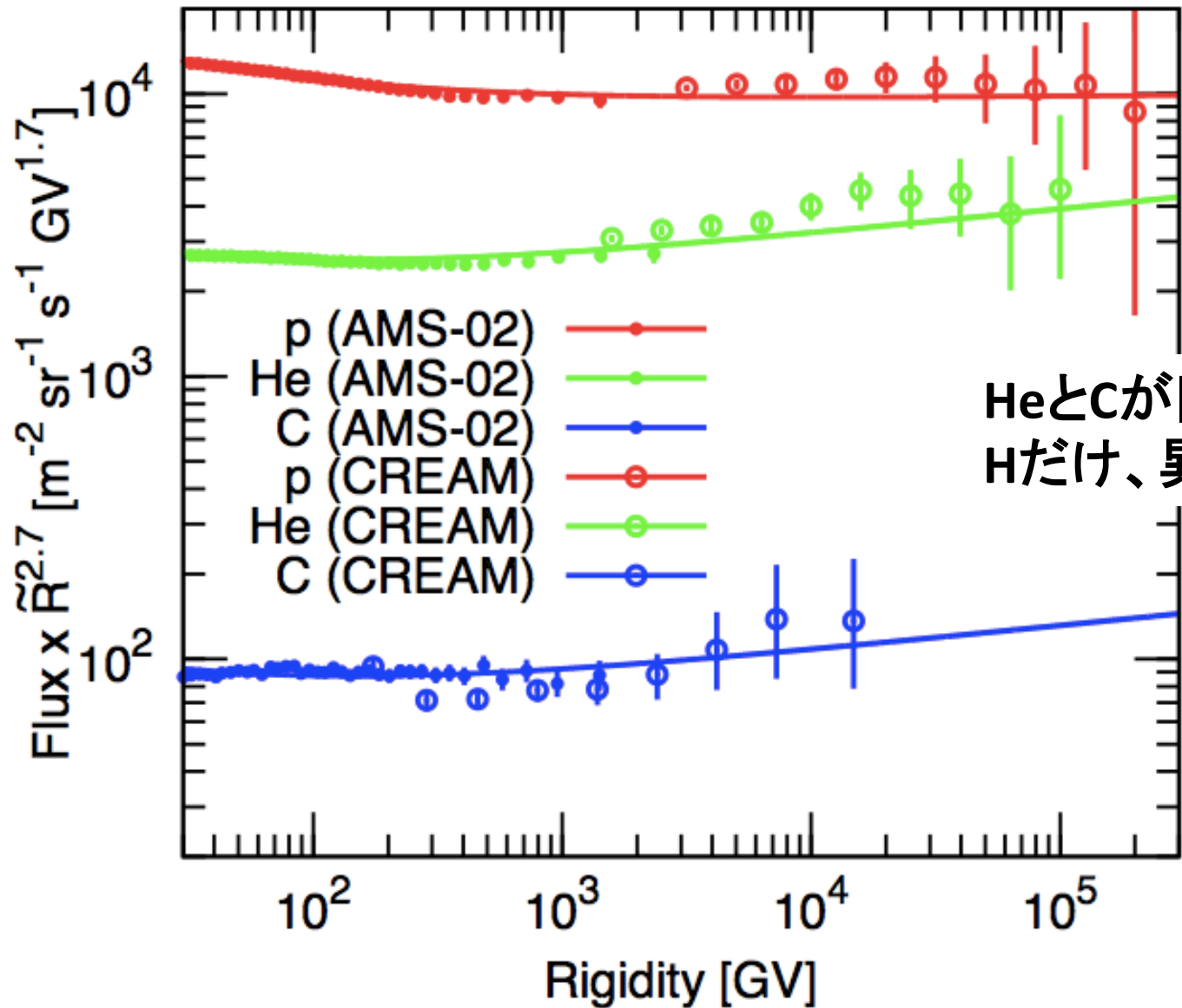
Carbon Flux



C / He Flux - Ratio



Ohira, Kawanaka, Ioka, 2015



HeとCが同じ空間分布
Hだけ、異なる空間分布

まとめ

宇宙線の標準モデル

宇宙線は拡散運動($D_{xx} \propto E^\delta$)をしながら銀河から抜け出す

→ B/C , pbar/p, e+/p はエネルギーの減少関数となることを予言

1次宇宙線のスペクトルはrigidity(ジャイロ半径/B)が同じなら、同じ

AMS-02の最新結果

$B/C \propto E^{-0.4}$, $pbar/p \propto E^0$, $e+/p \propto E^0$, $e+$ fraction $< \sim 0.1$, $p/He \propto E^{0.1}$
 p, He, Li のbreak@ $\sim 100GV$, $C/He \propto E^0$

- ・ $pbar/p \propto E^0$ は宇宙線の標準モデルで説明可能
- ・ $B/C \propto E^{-0.4}$ と $e+/p \propto E^0$ を同時に説明する伝搬モデルはなさそう
- B と e+ は違う源? 例)Bは銀河内伝搬で e+ は pulsars or local SNR
- ・ DMでないとは説明できない観測結果は今のところない

AMS-02以外にも宇宙線やDMのは、ガンマ線でも探れる(銀河中心など)。
宇宙線観測装置 CALETがISSに対最近、設置。ISS CREAMも来年設置。