

# AMS-02の結果の理論的解釈

大平 豊 (青山学院大学)

---

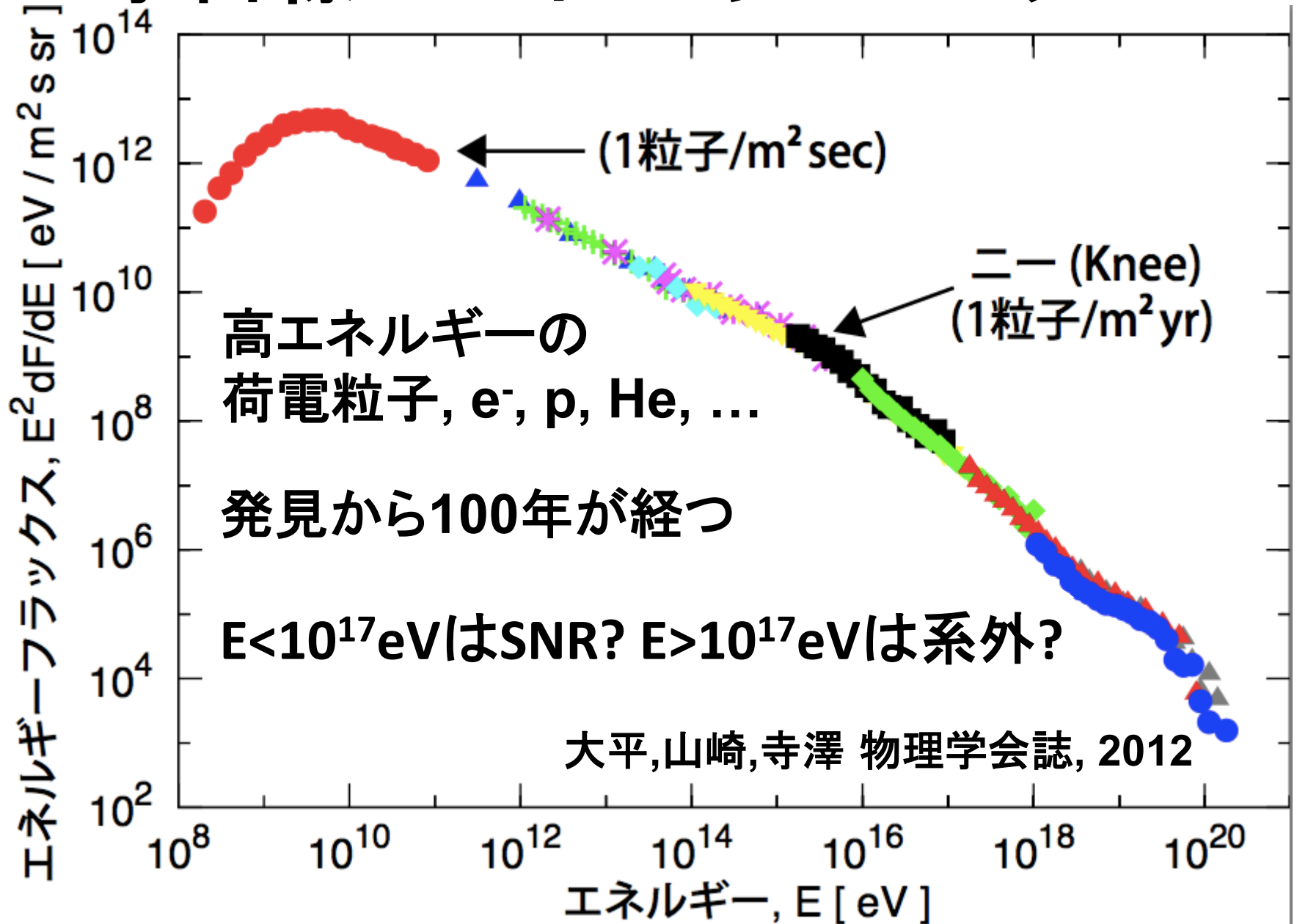
内容

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、  
 $1 \text{ eV/cm}^3$ 。銀河の構成要素の1つ

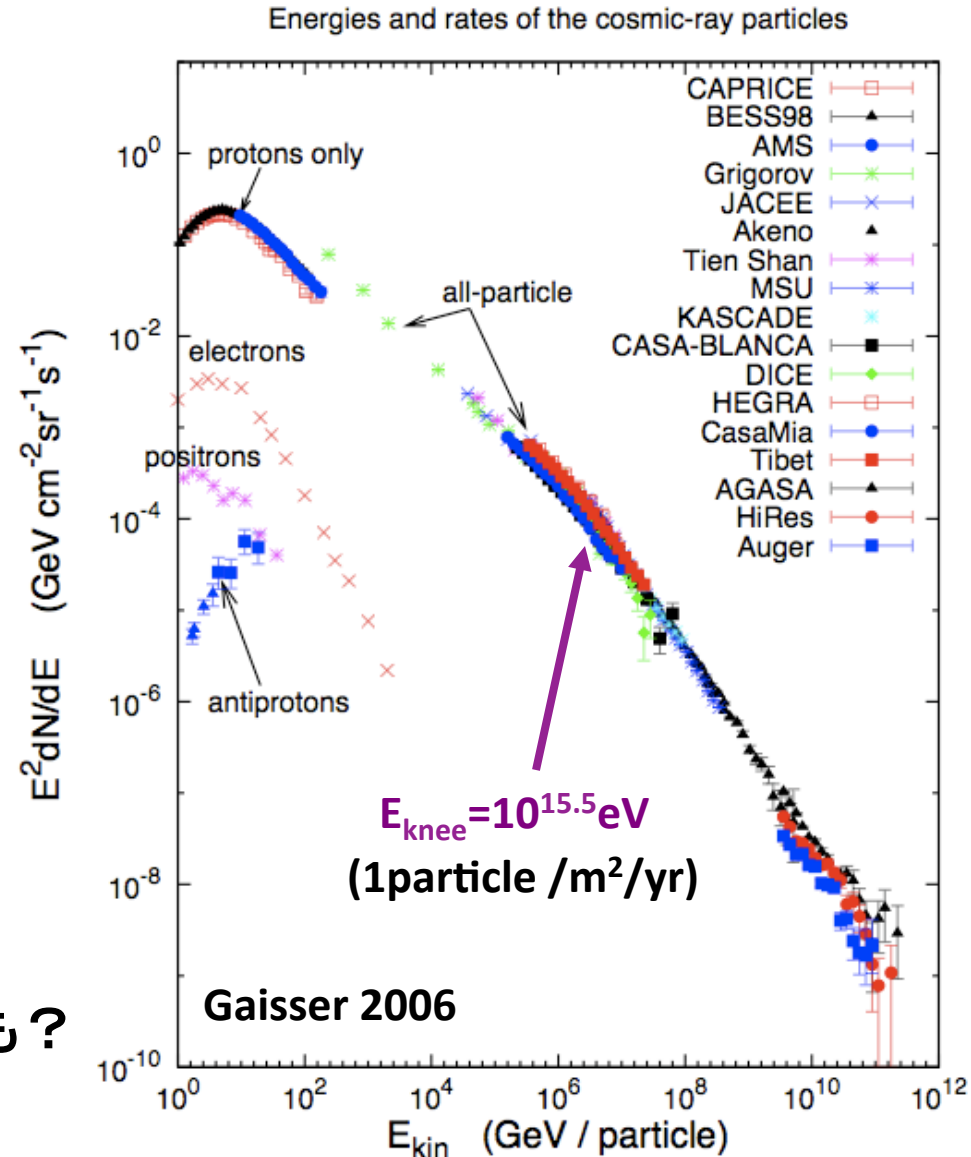
$\sim 10^{-9} / \text{cm}^3 @ \sim \text{GeV}$

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

宇宙線はガスの電離度を決めたり、  
 $^{10}\text{B}$ 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

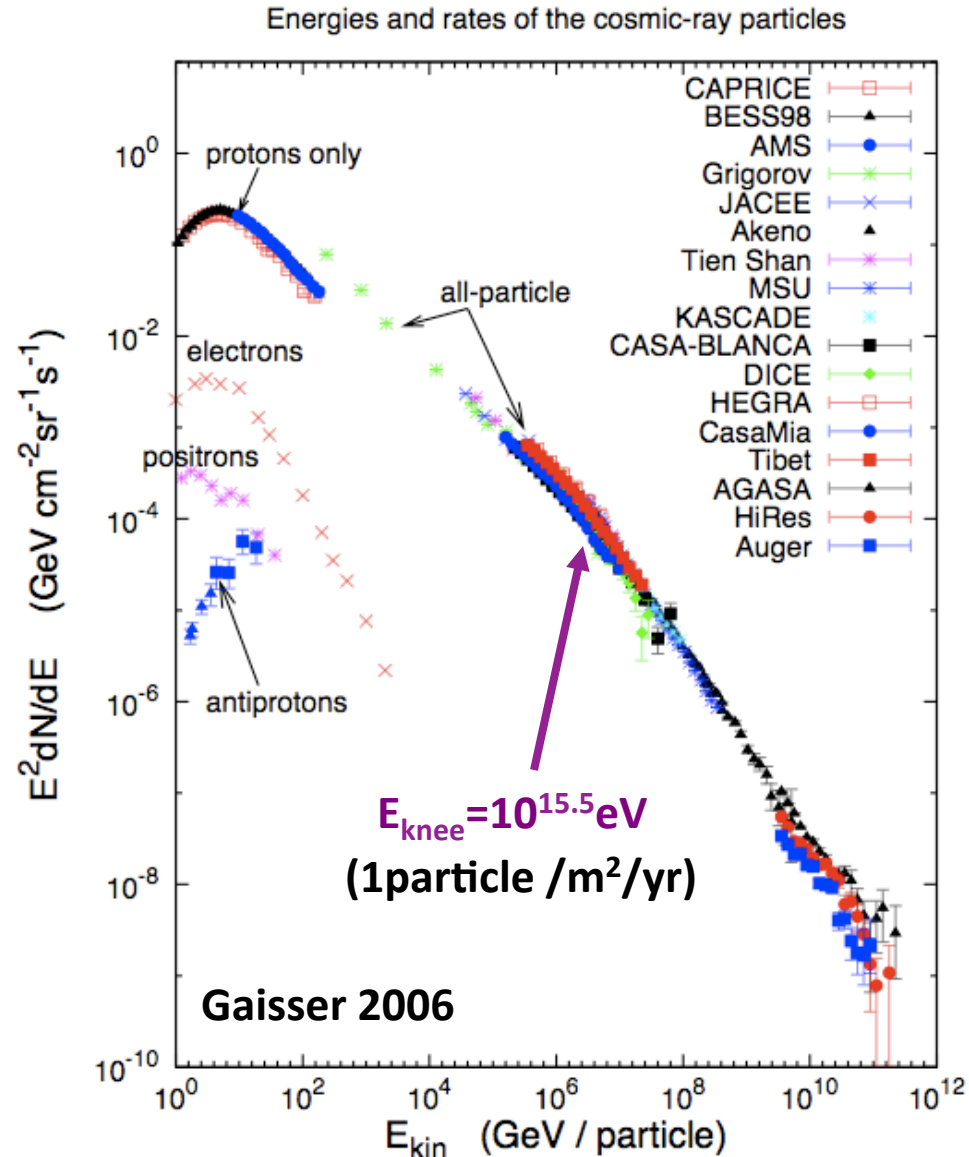
発見以来100年が経つが、

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

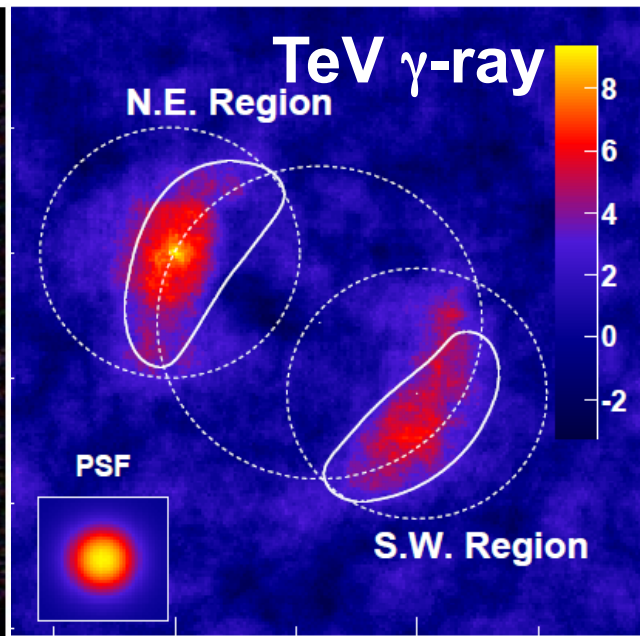
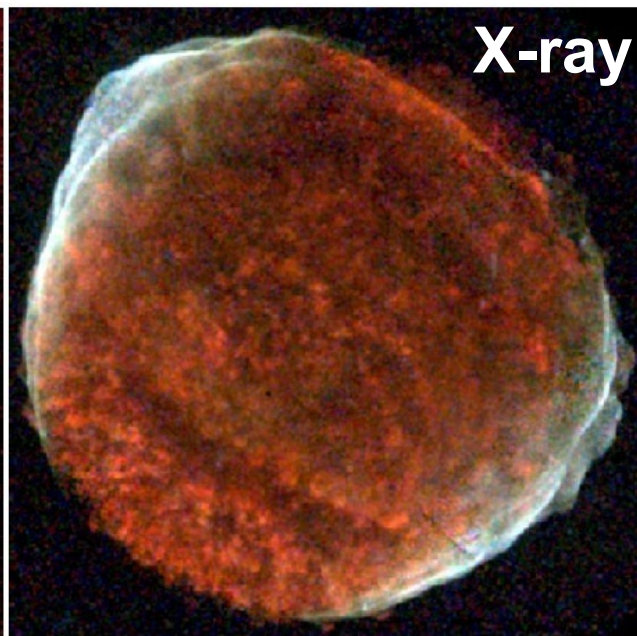
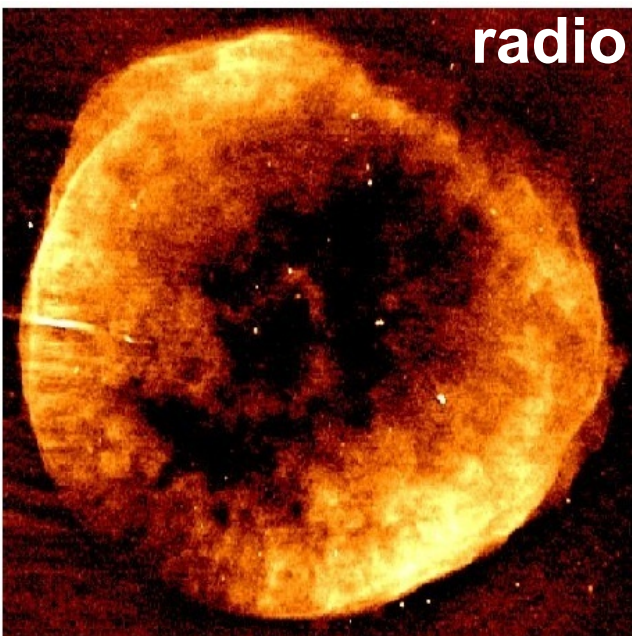
それ以上の宇宙線は銀河系外の  
ガンマ線バースト(GRB)、  
活動銀河核(AGN)、  
銀河団やマグネター  
が起源

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

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

膨張速度

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

電波: 電子の GeV までの加速 ( $\sim 300$  SNRs)

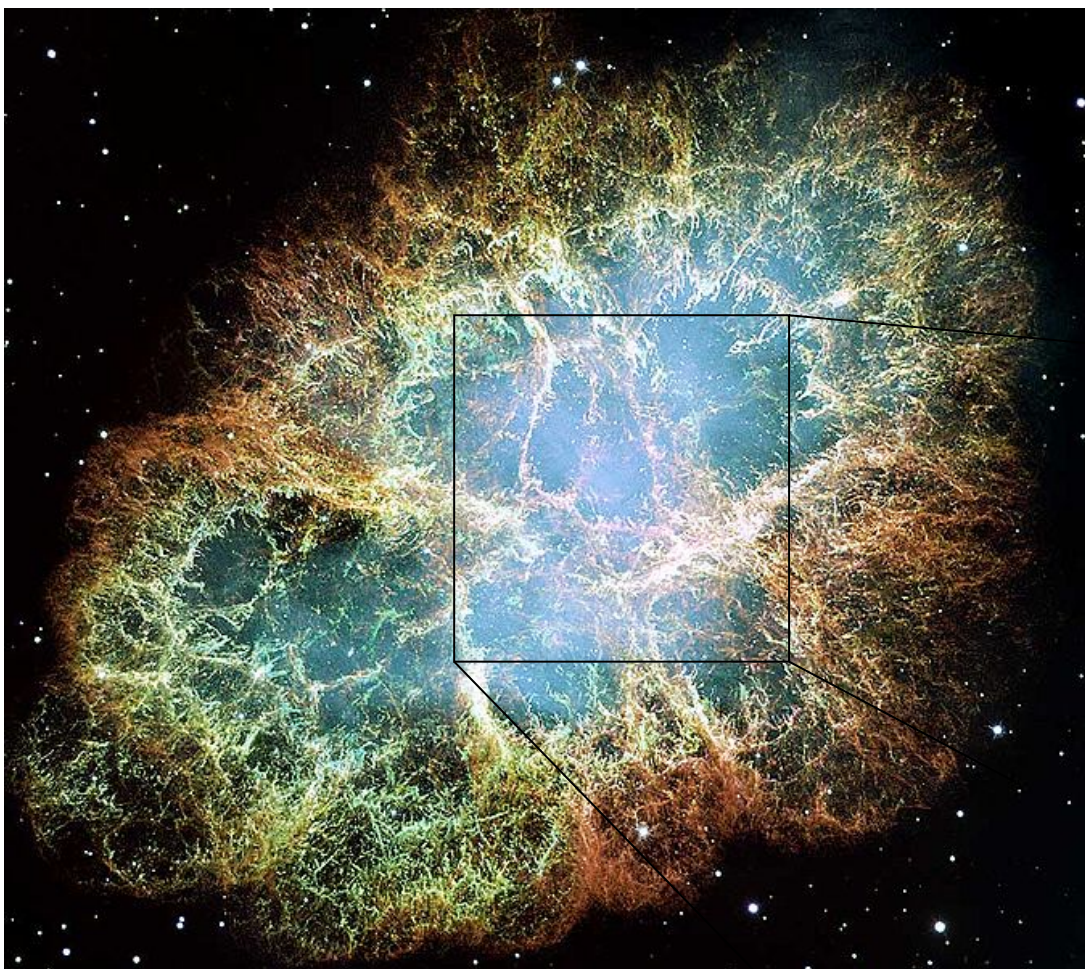
X線: 電子の TeV までの加速 ( $\sim 10$  SNRs)

GeV- $\gamma$ : 陽子の TeV までの加速 ( $\sim 10$  SNRs)

TeV- $\gamma$ : 電子 or 陽子の 10TeV までの加速 ( $\sim 10$  SNRs)



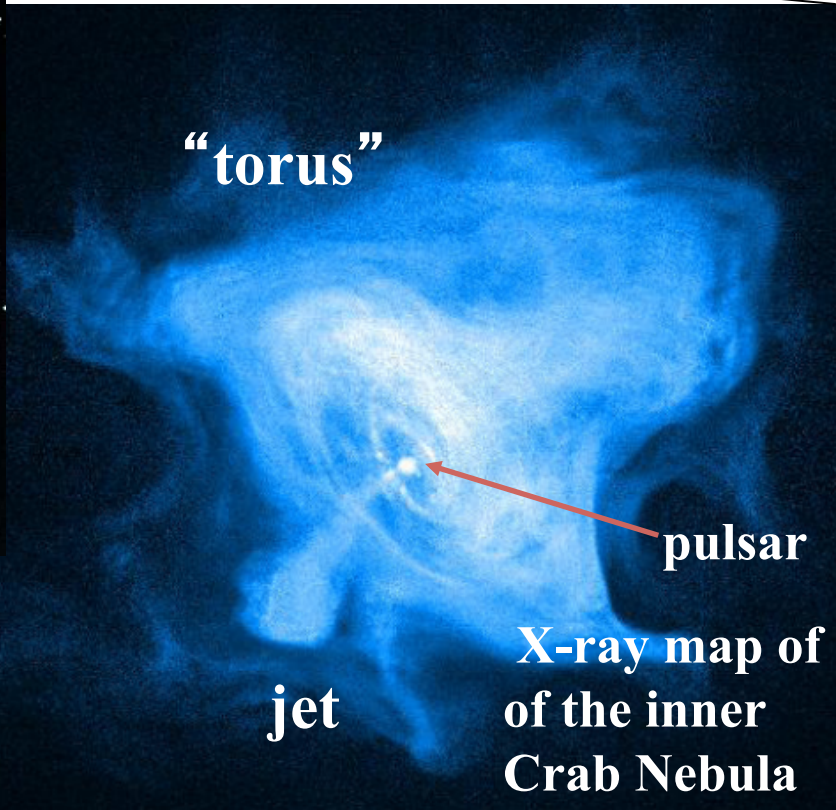
# パルサー星雲(Pulsar Wind Nebula)



Visible light

Crab Nebula

X-rays



“torus”

pulsar

jet

X-ray map of  
of the inner  
Crab Nebula

2pc  $\sim 6 \times 10^{18}$  cm

# 磁場中の荷電粒子の運動

そろった磁場 ( $r_g \gg \lambda_{\delta B}$ )  $\rightarrow$  螺旋運動  $\rightarrow$  磁場に束縛

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

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

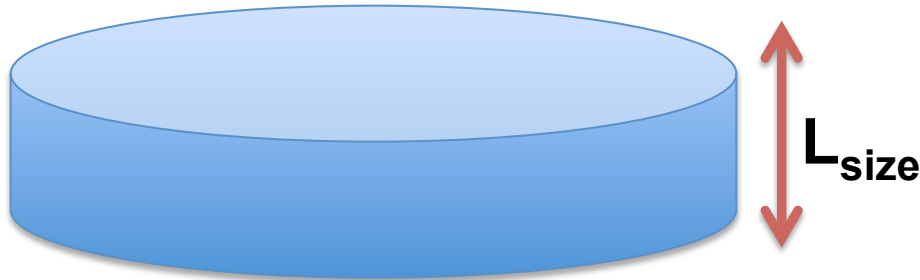
$$r_g = cP/eB \propto E, \quad \delta B_{\lambda=r_g} = \delta B_{\lambda=r_g}(E) \rightarrow D_{xx} \propto E^\delta$$

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

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

# 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

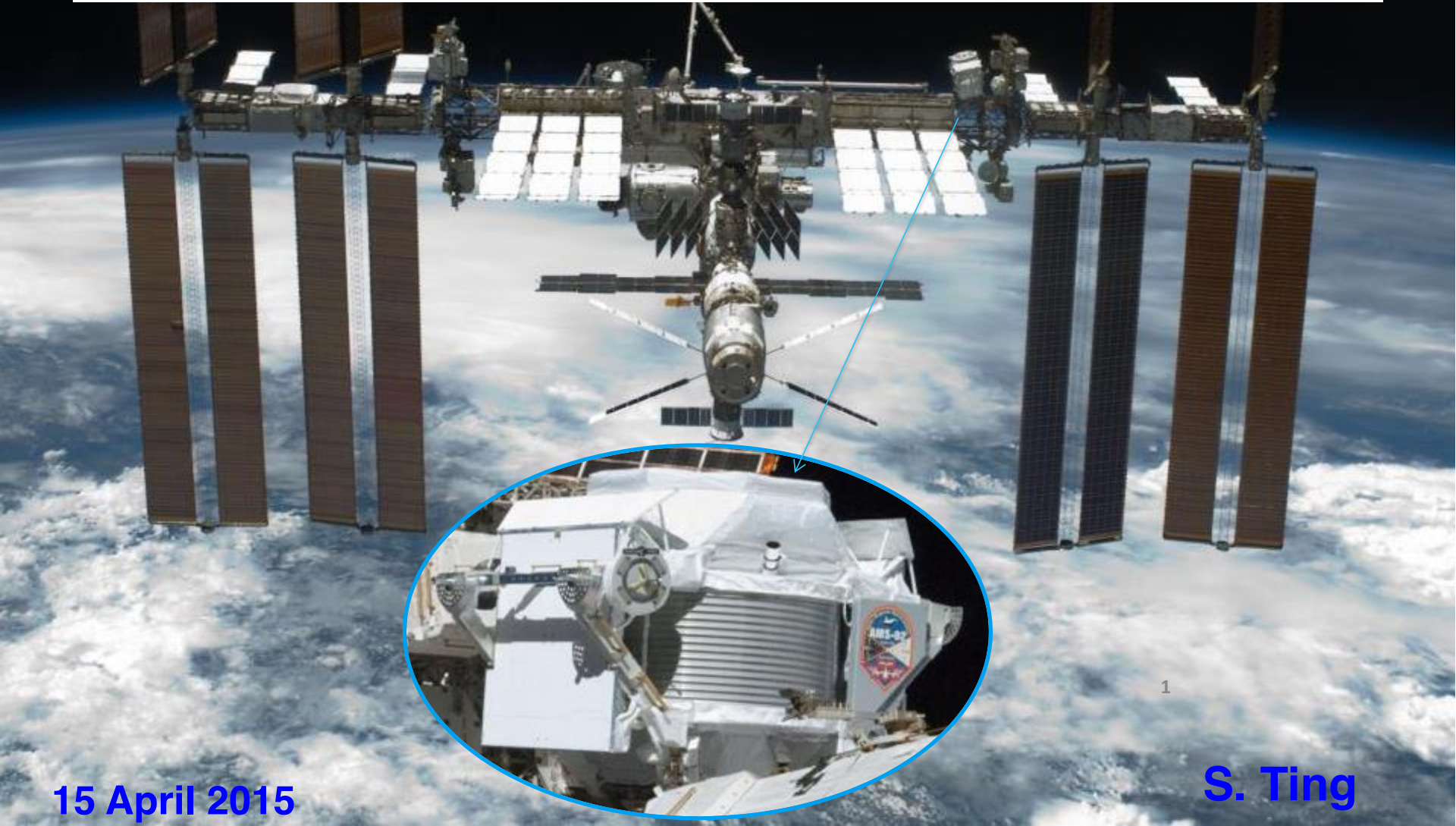
**→ pbar/p, e+/p もエネルギーの減少関数と期待される**

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

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

# AMS-02の結果と解釈

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

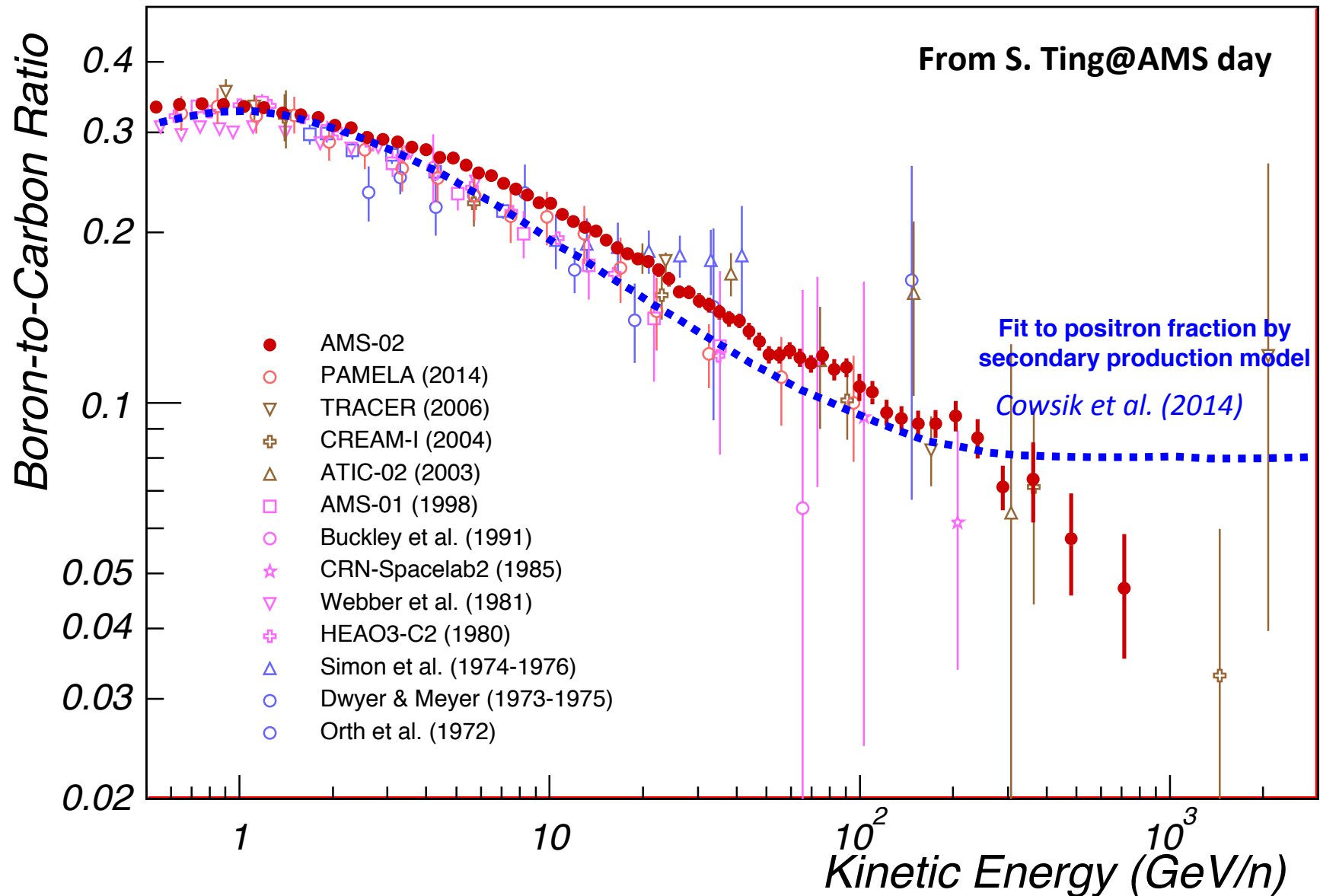


1

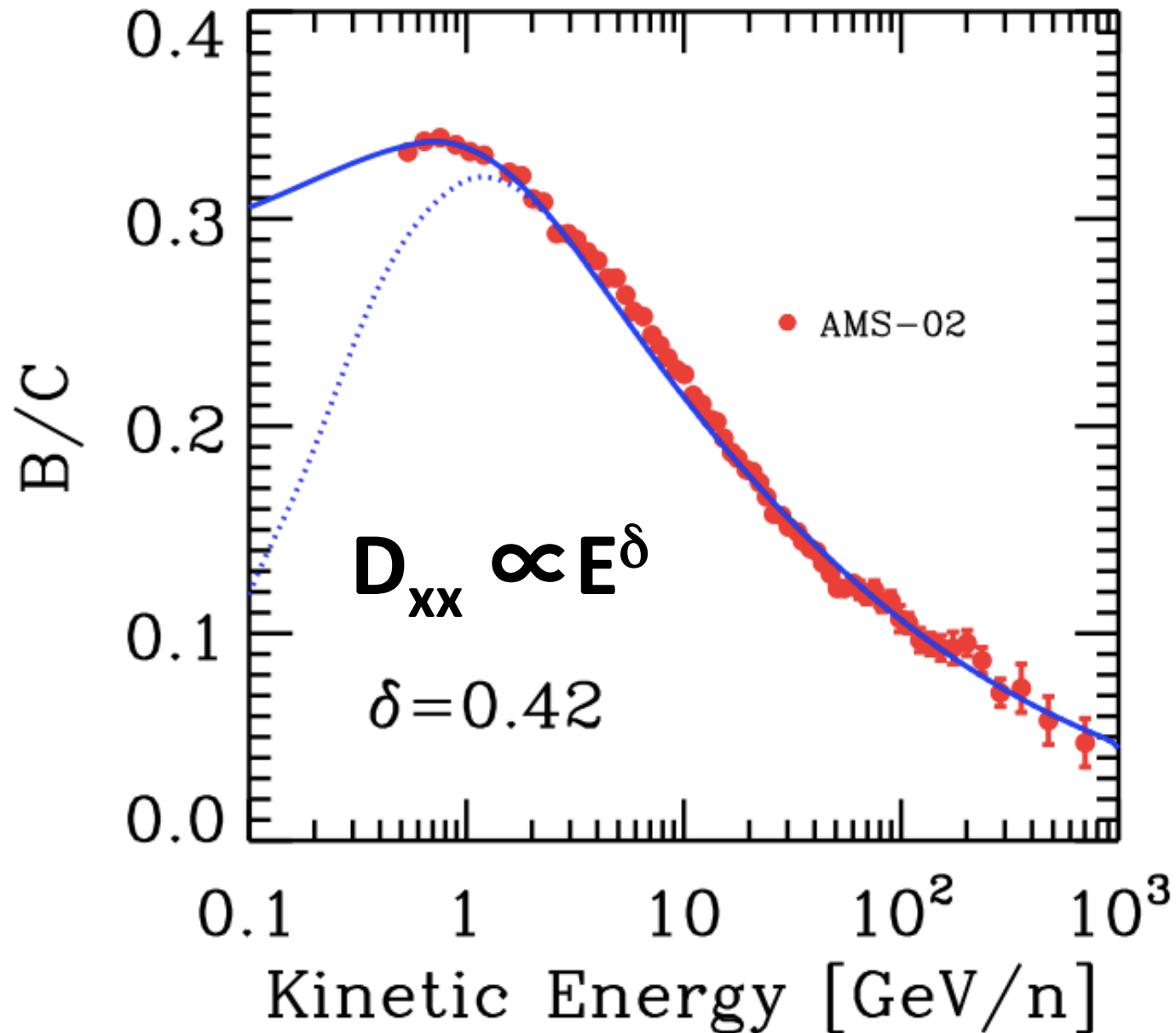
15 April 2015

S. Ting

# B/C Ratio converted in Kinetic Energy

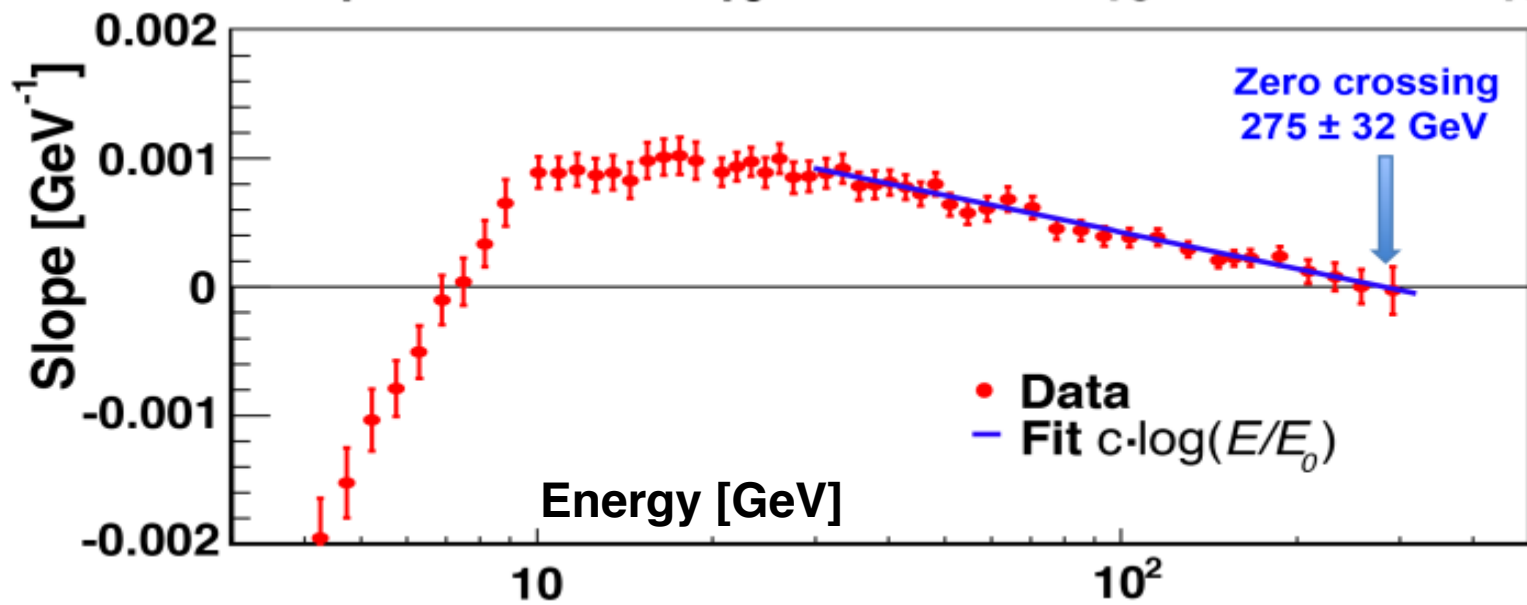
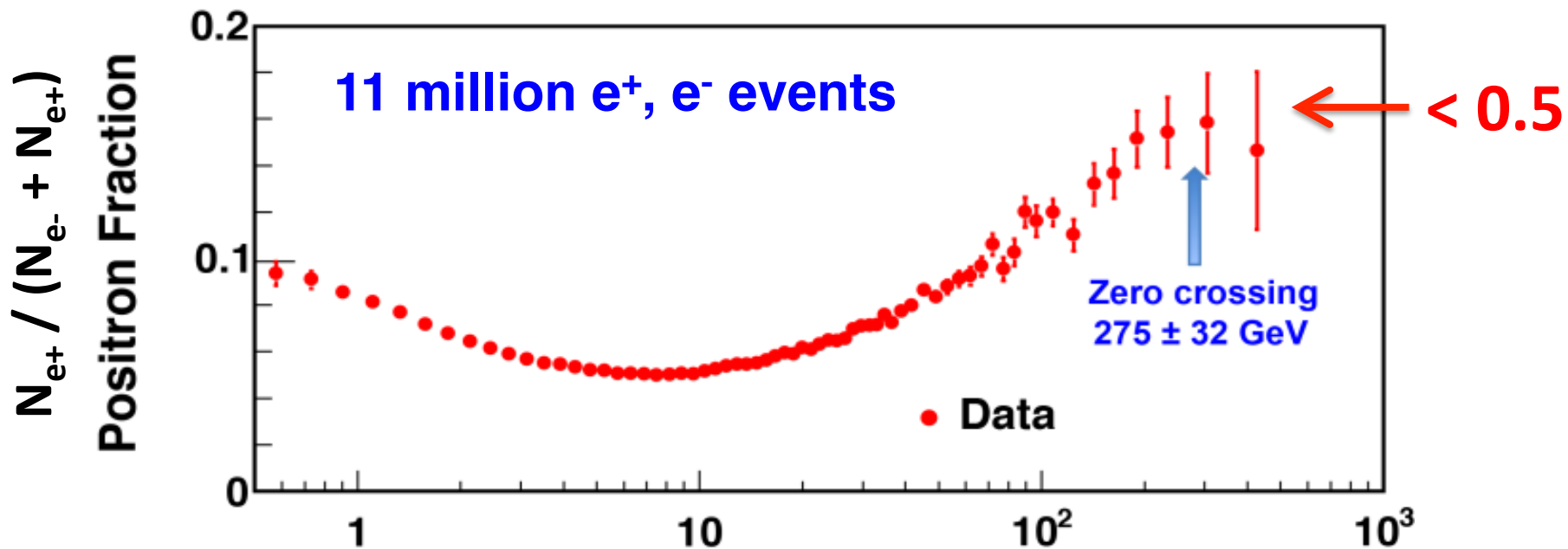


# Evoli et al. 2015, arXiv:1504.05175



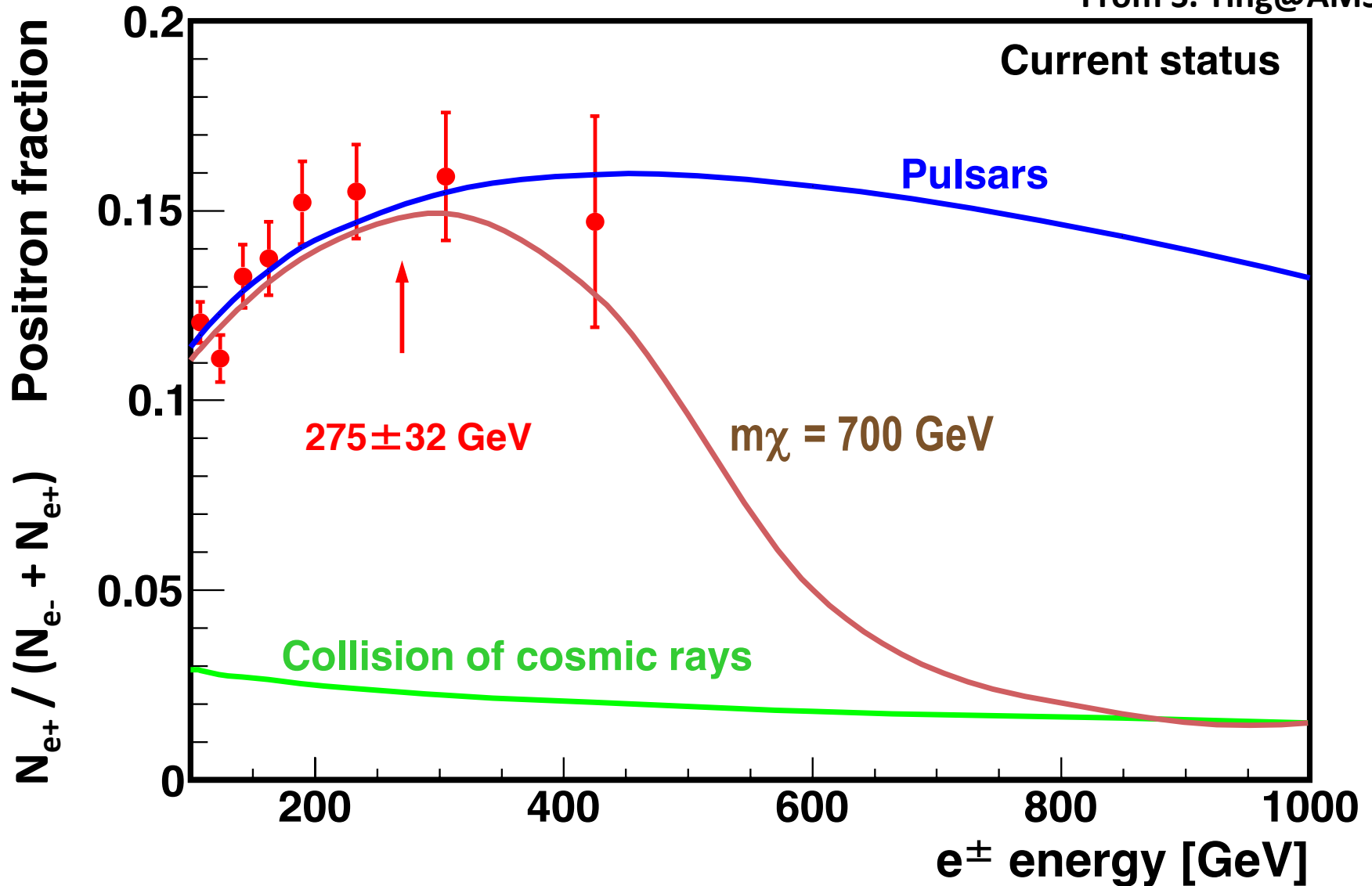


# The energy beyond which it ceases to increase.



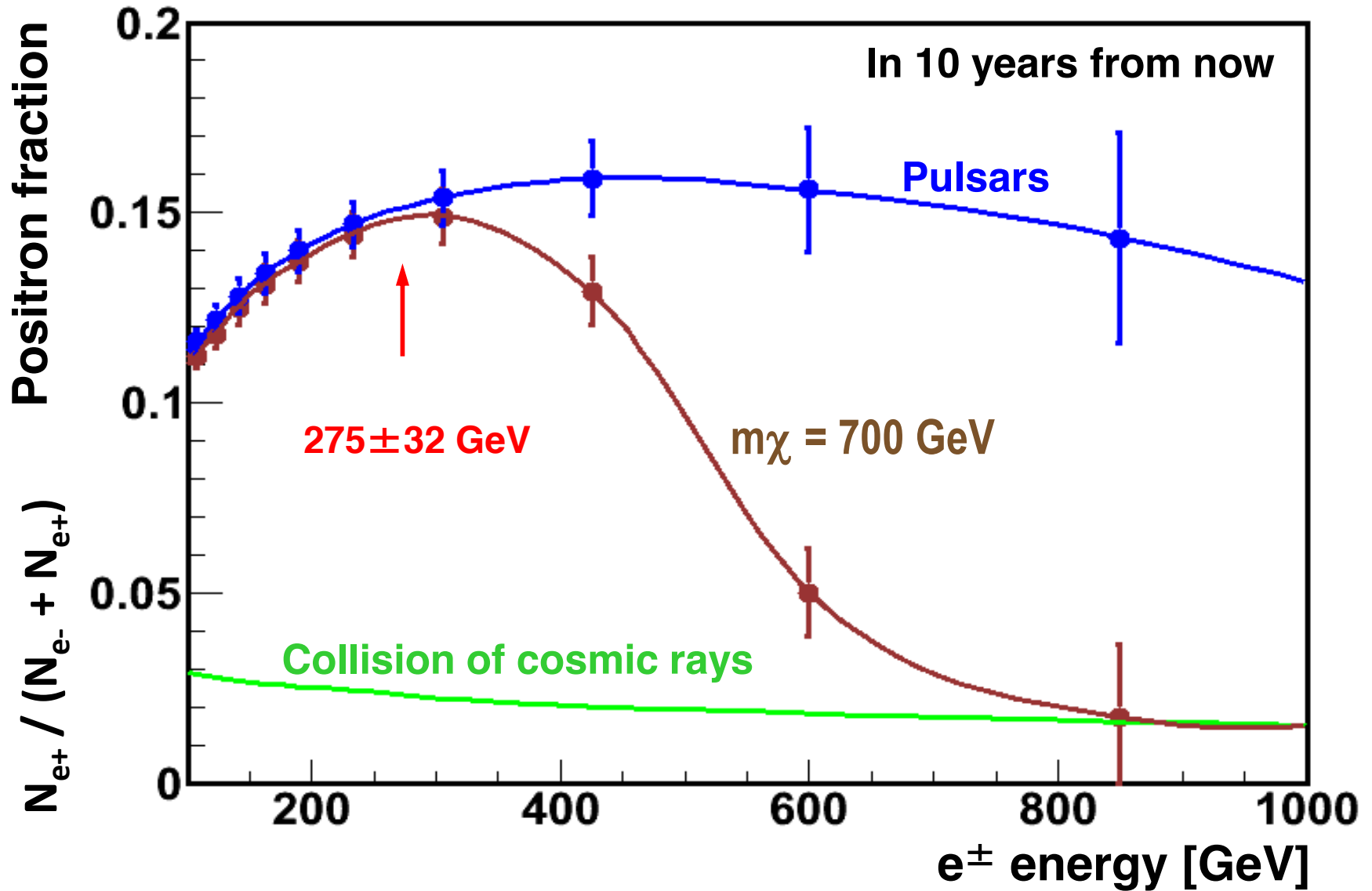
# The expected rate at which it falls beyond the turning point.

From S. Ting@AMS day

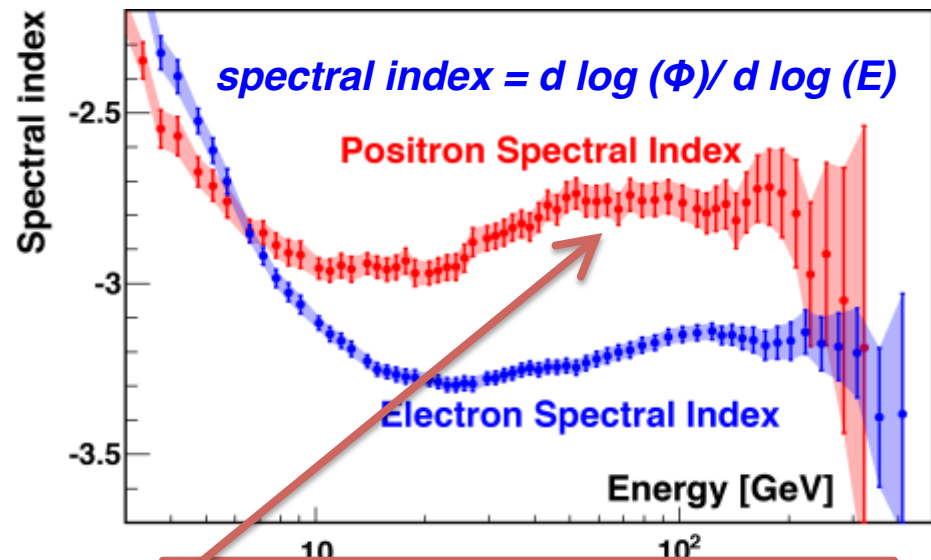
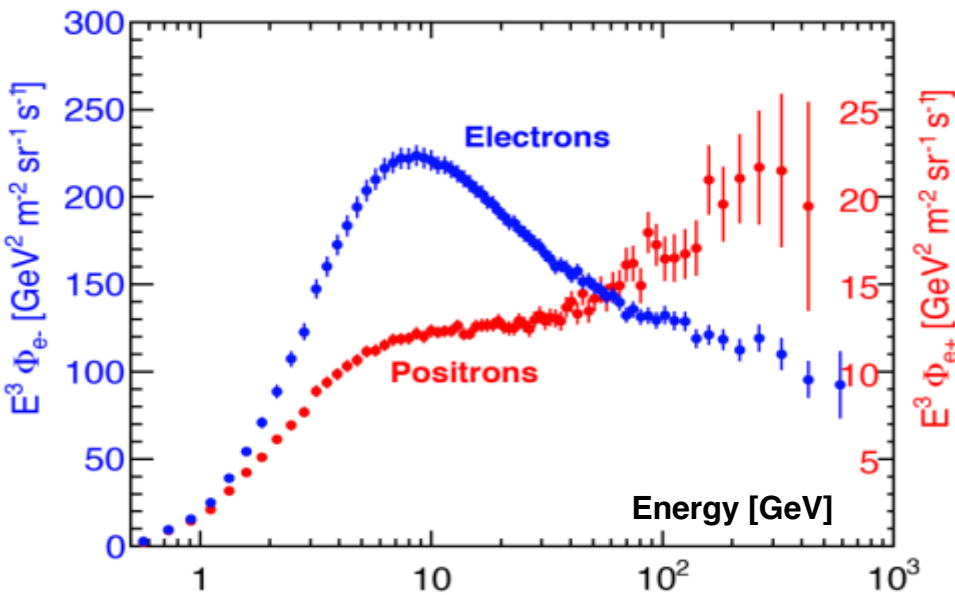


# The expected rate at which it falls beyond the turning point.

From S. Ting@AMS day

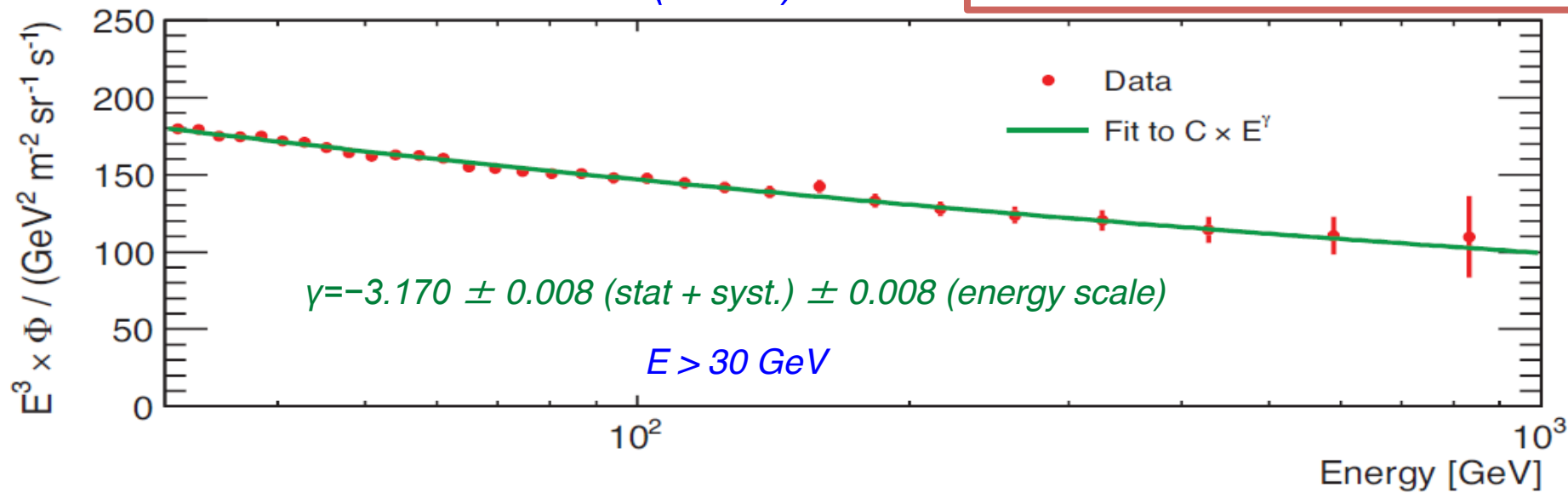


# The Electron Flux and the Positron Flux



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

e+の冪指数 ~ p の冪指数

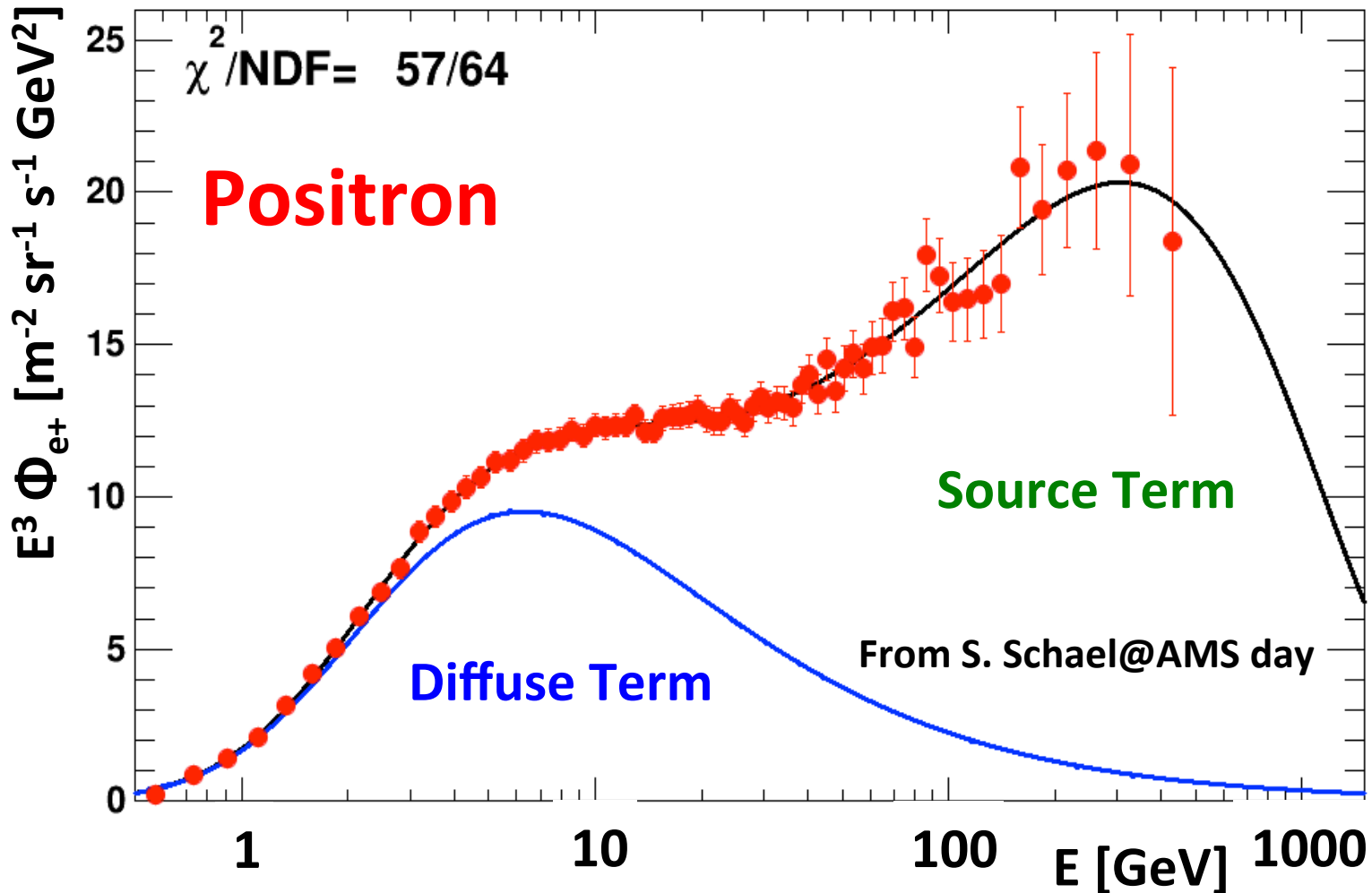




$$\Phi_{e^+}(E) = \frac{E^2}{\hat{E}^2} \left[ C_{e^+} \hat{E}^{\gamma_{e^+}} + C_S \hat{E}^{\gamma_S} \exp(-\hat{E} / E_S) \right]$$

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

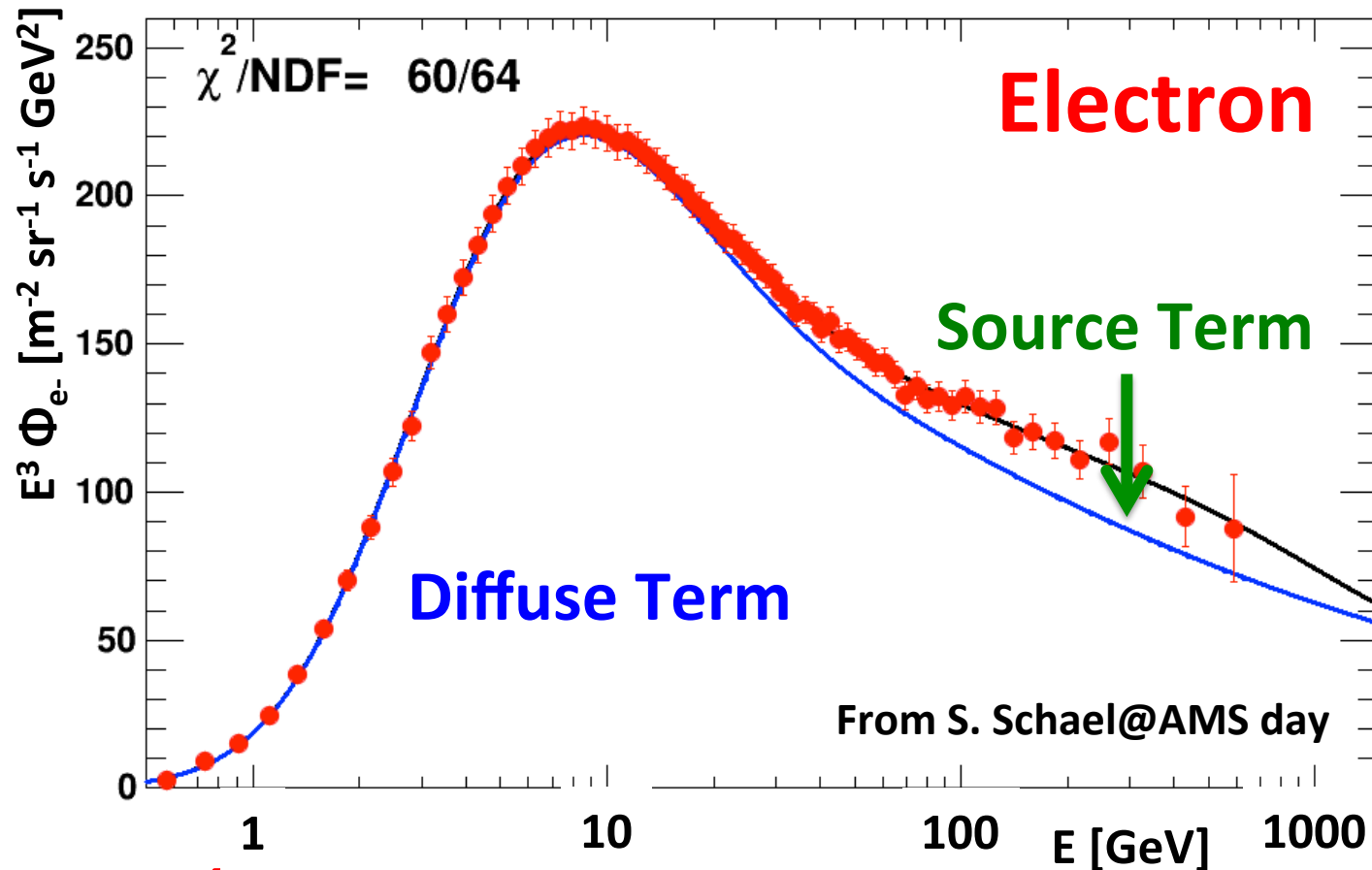
**The Positron Flux has no sharp structures and is dominated at high energies by the source term.**



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.

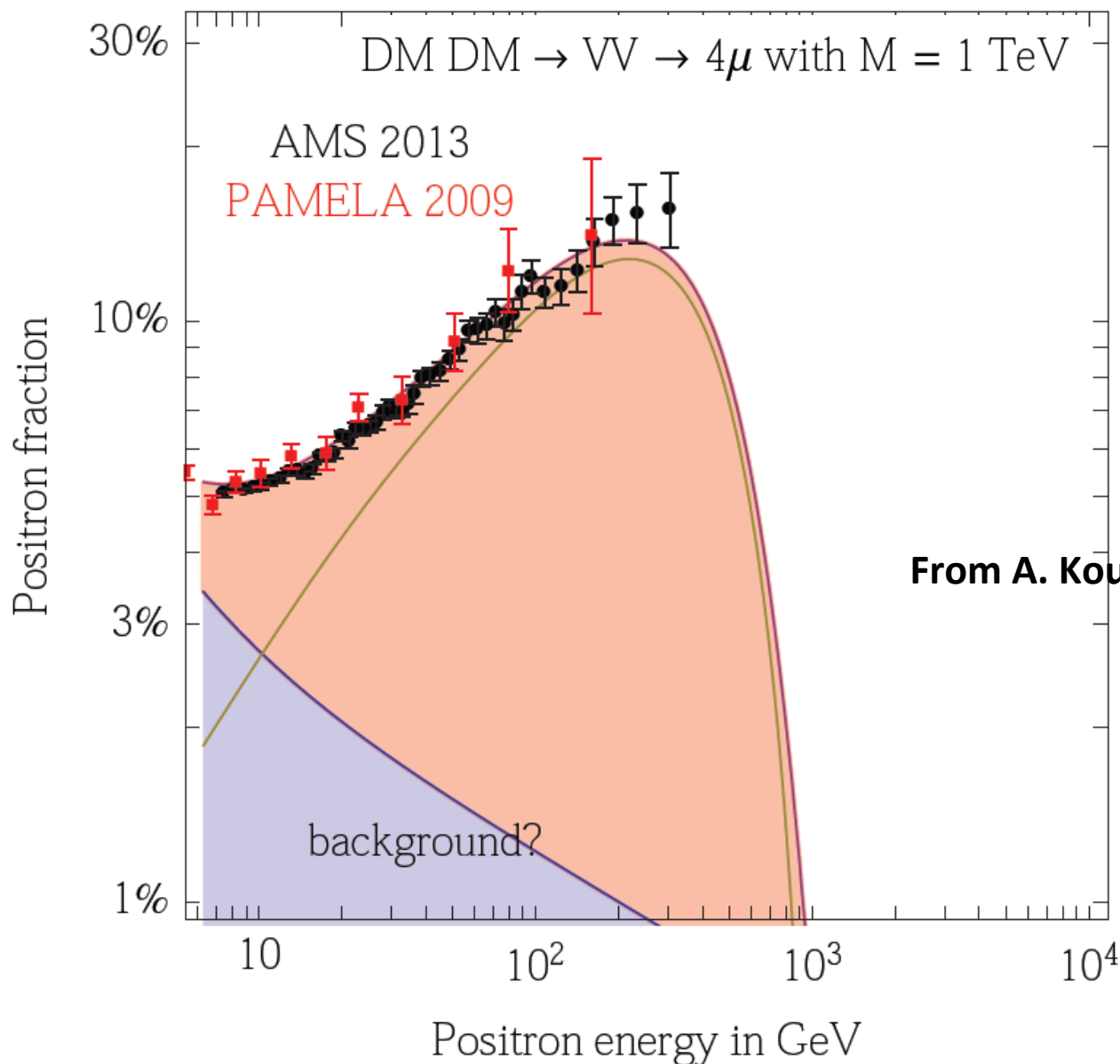


## The Electron Flux

- 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

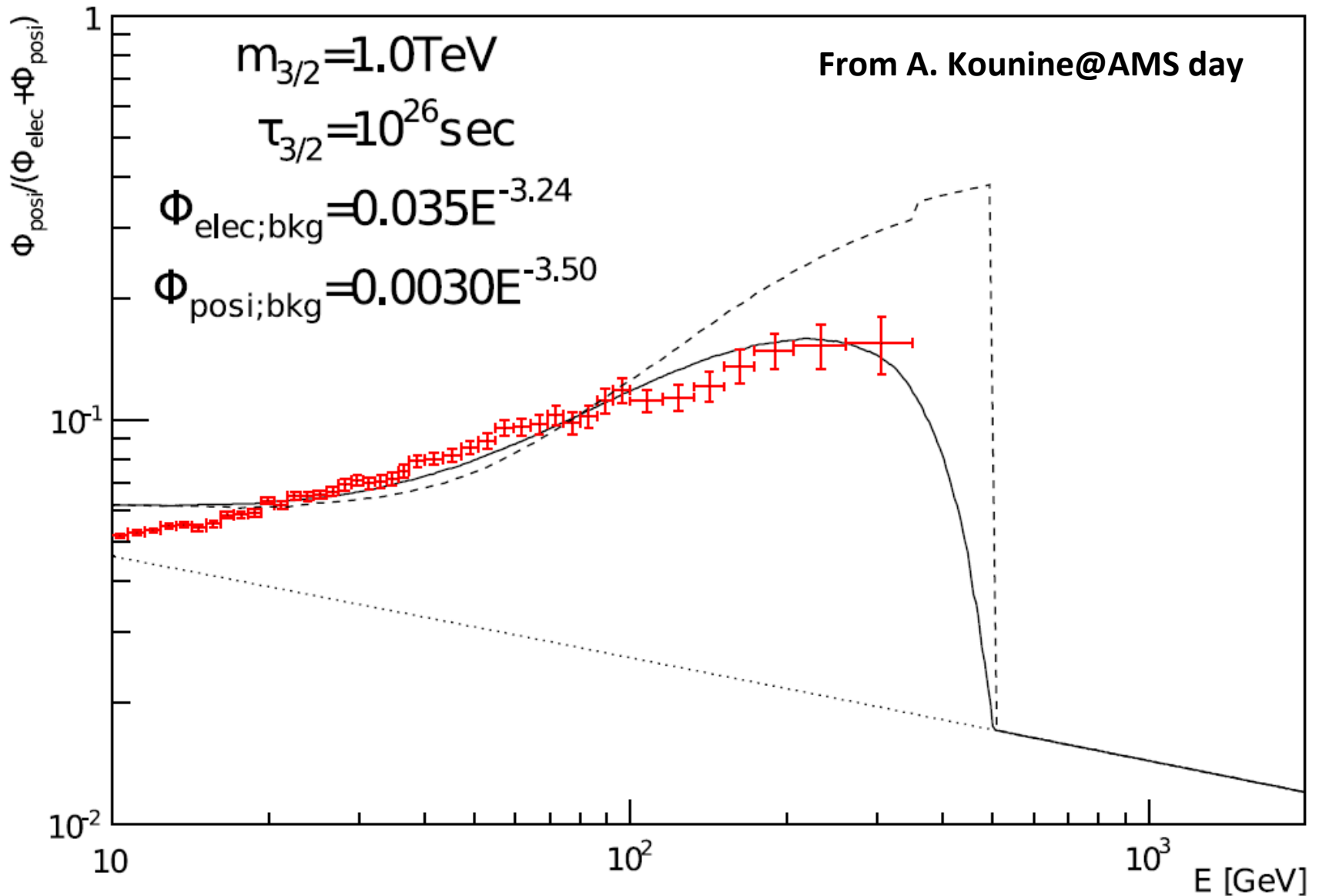
M.Cirelli, M.Kadastik, M.Raidal and A.Strumia, Nucl.Phys. B873 (2013) 530



From A. Kounine@AMS day

# Dark Matter model with gravitino

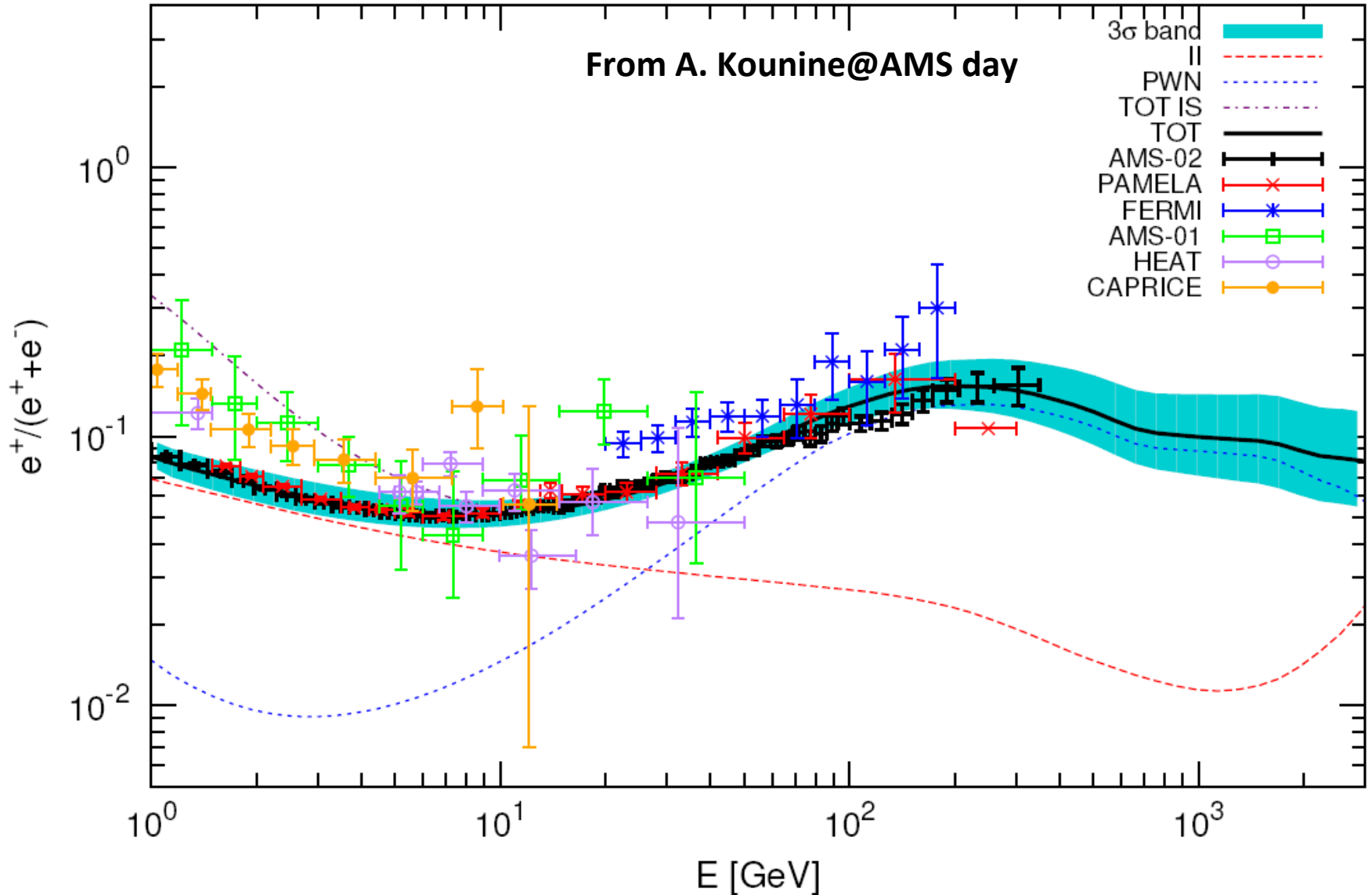
M. Ibe, S. Iwamoto, T. Moroi and N. Yokozaki, JHEP 1308 (2013) 029





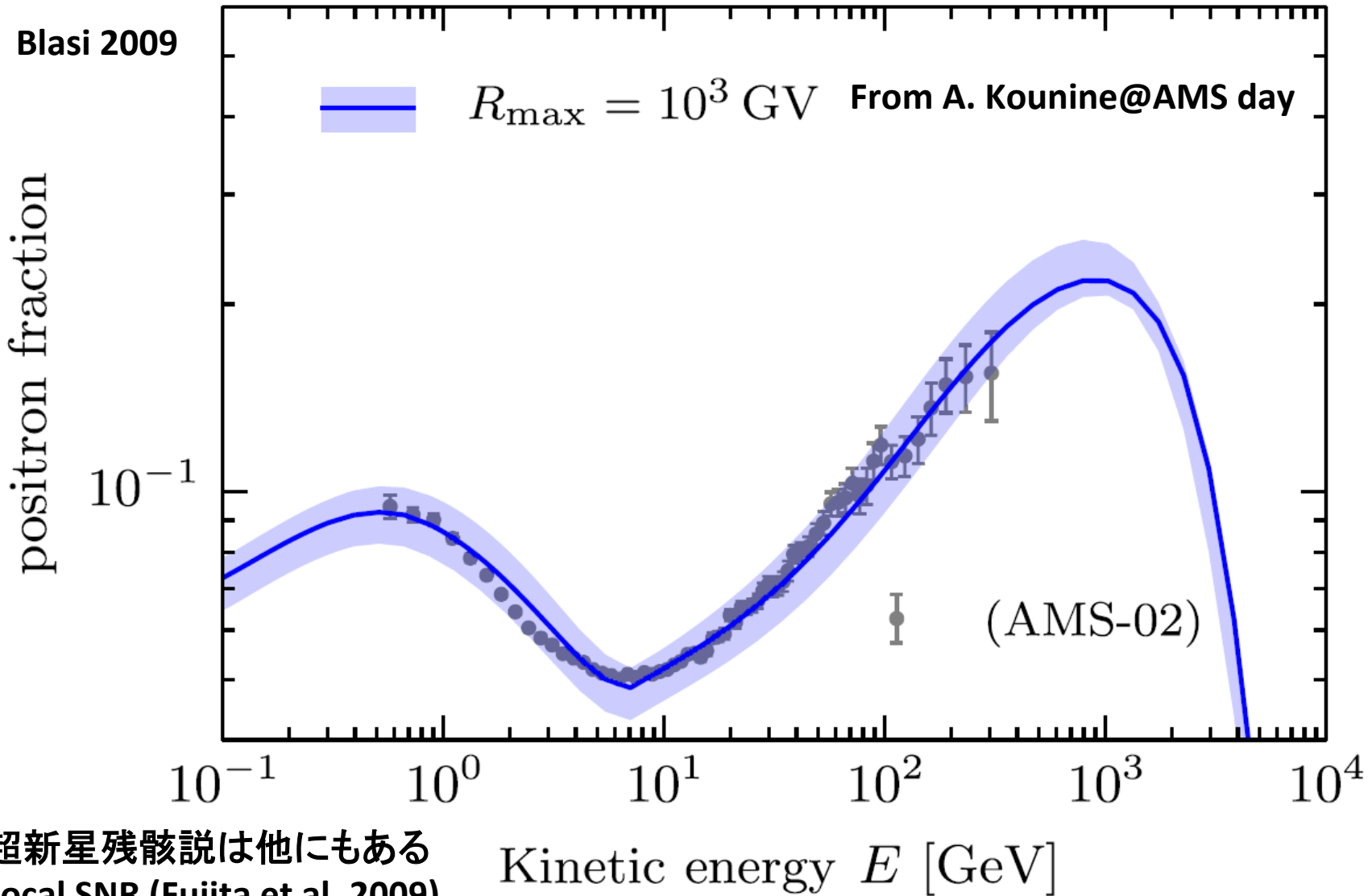
# Production in Pulsars

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)



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

S. Sarkar talk on April 16

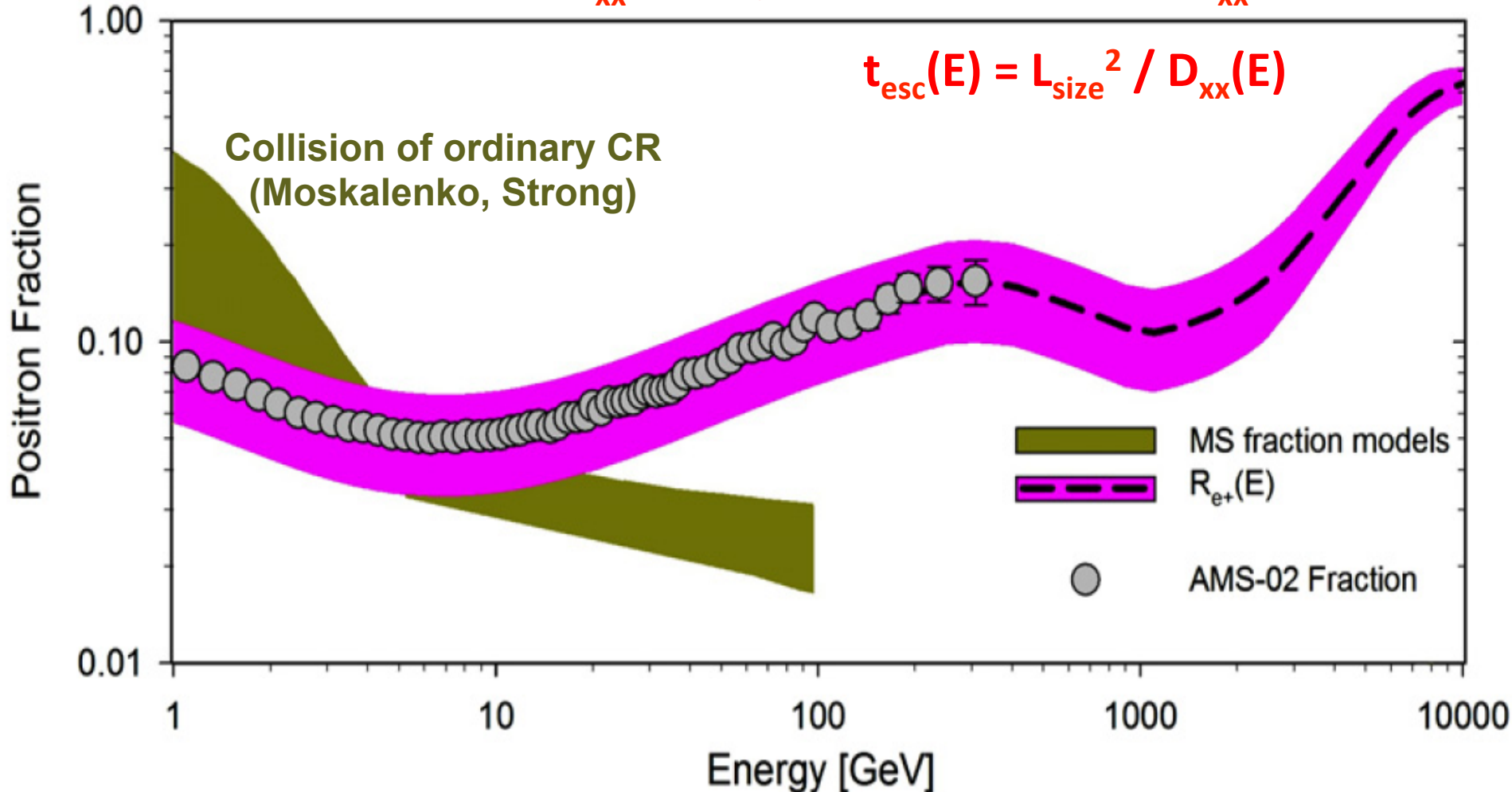
# Propagation of secondaries

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  $D_{xx} \propto E^0$

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

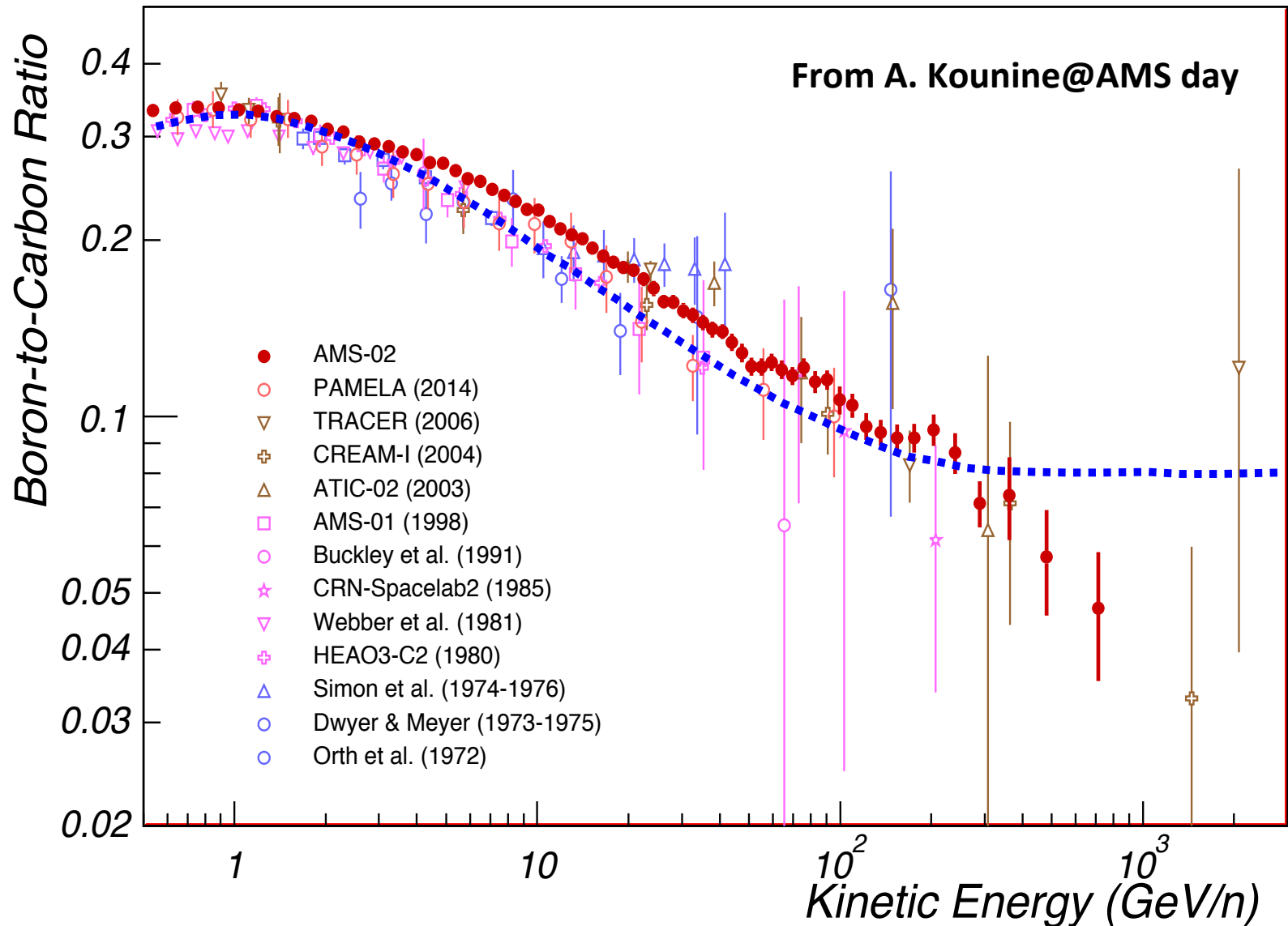
Collision of ordinary CR  
(Moskalenko, Strong)



From A. Kounine@AMS day

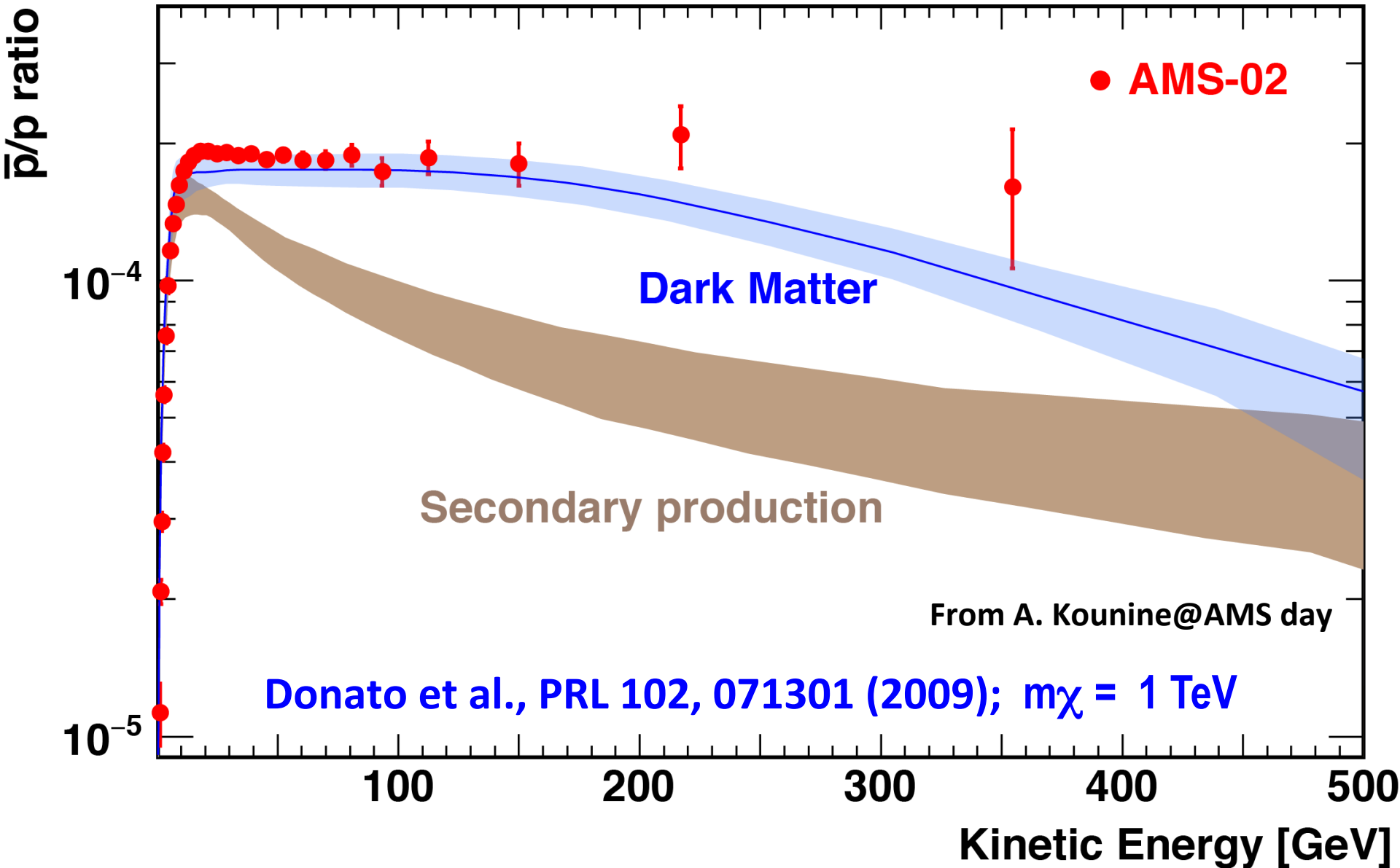
# Propagation of secondaries

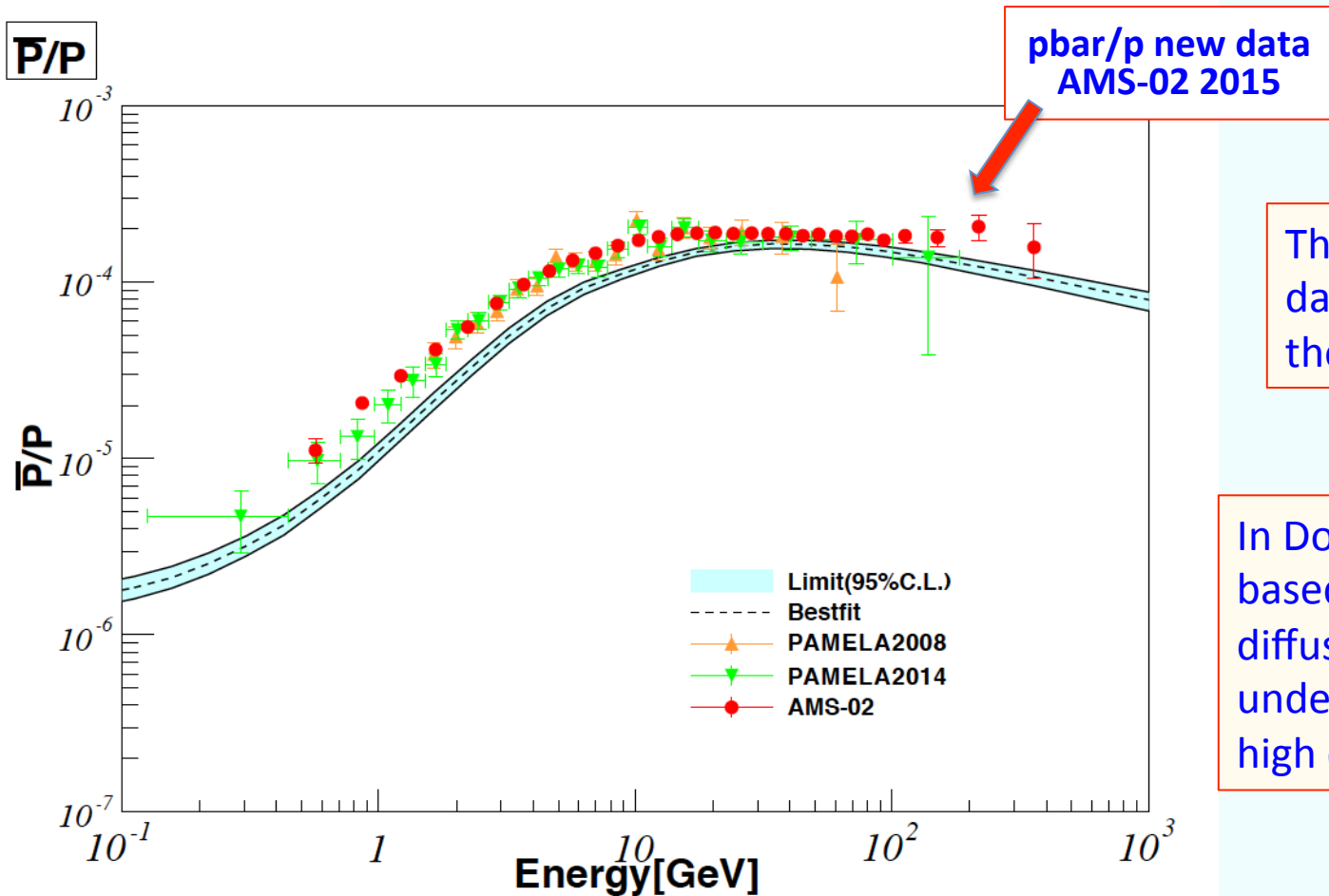
R. Cowsik, B. Burch, and T. Madziwa-Nussinov, Ap. J. 786 (2014) 124



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

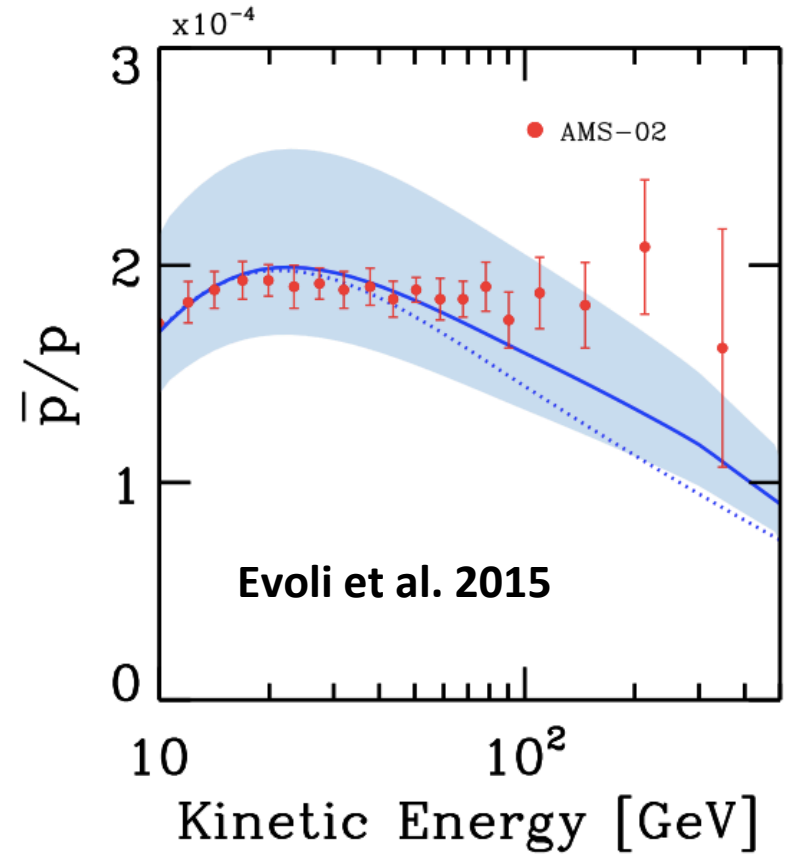
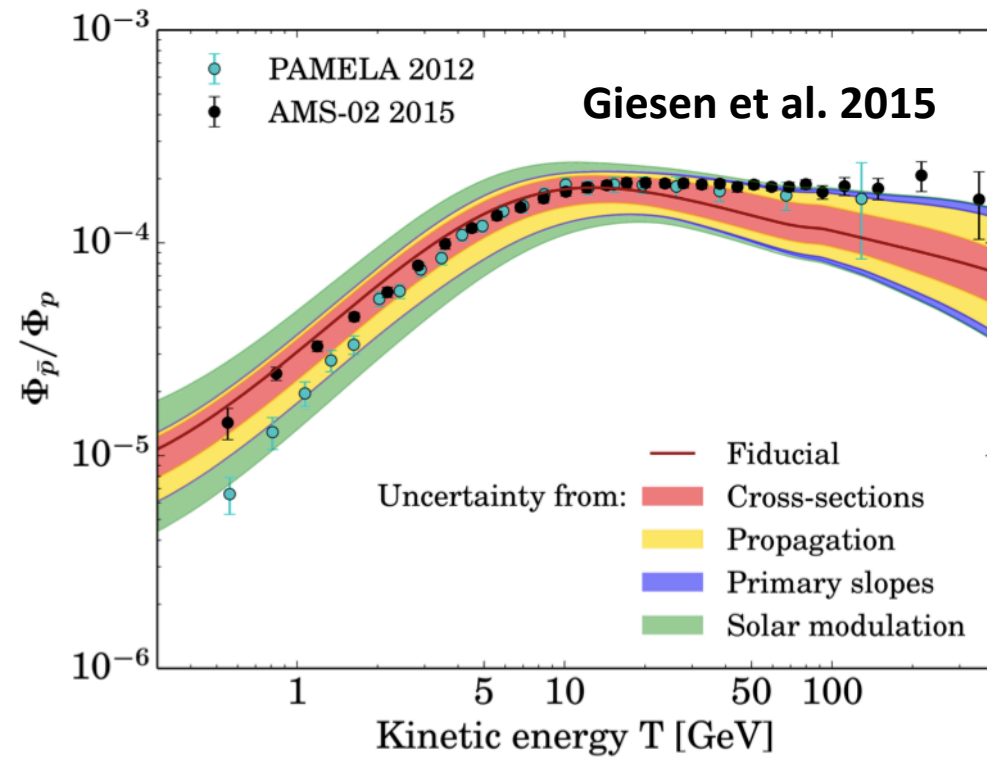
In Donato et al. 2009 result based on the two-zone diffusion model actually underestimated the pbar at high energies.

From Yue-Liang Wu@AMS day

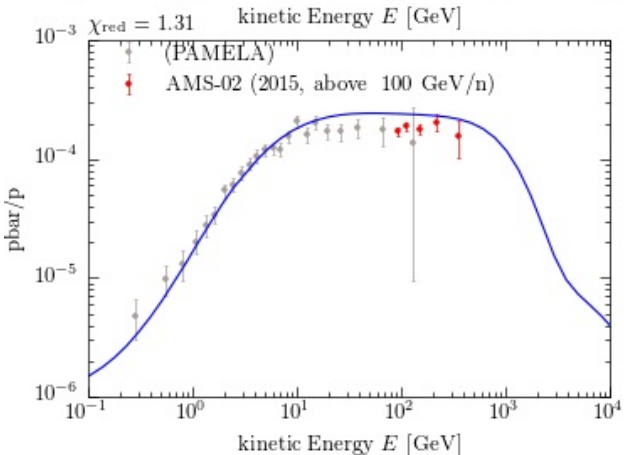
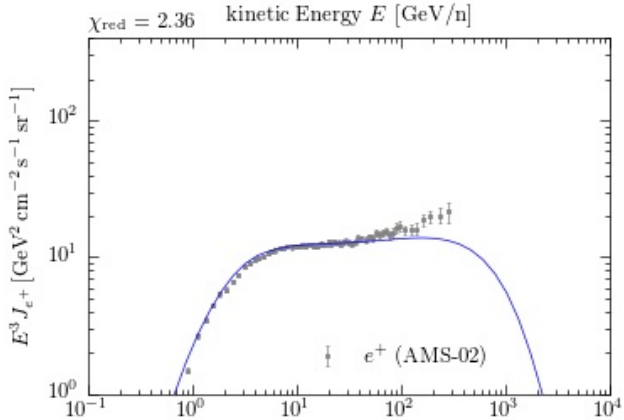
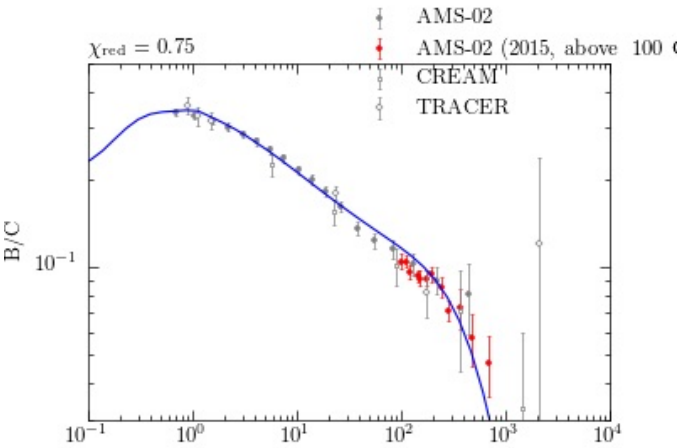
**Conclusion:** our predictions and new data are highly consistent, except for a few data points at very high energies, which have relatively larger uncertainties. It is then crucial to make more precise measurements on this ratio at high energy region.



# Giesen et al. 2015, Evoli et al. 2015

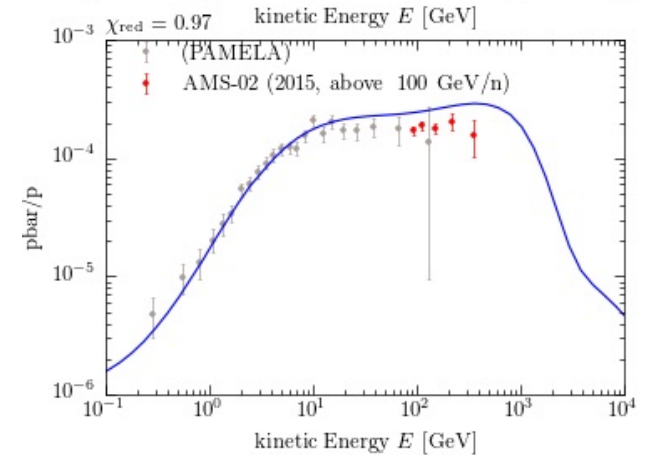
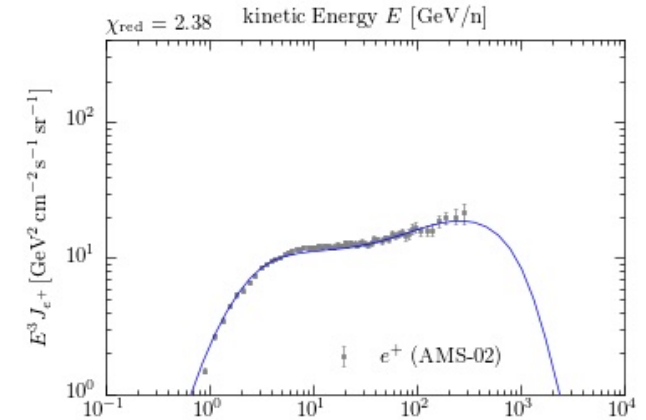
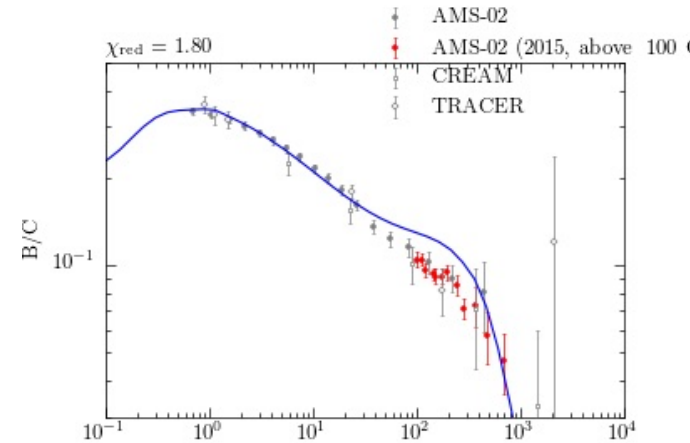


標準伝搬モデルの不定性や散乱断面積の不定性などを考慮すると、最新の  $\bar{p}/p$  は、宇宙線の標準モデルで説明可能



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

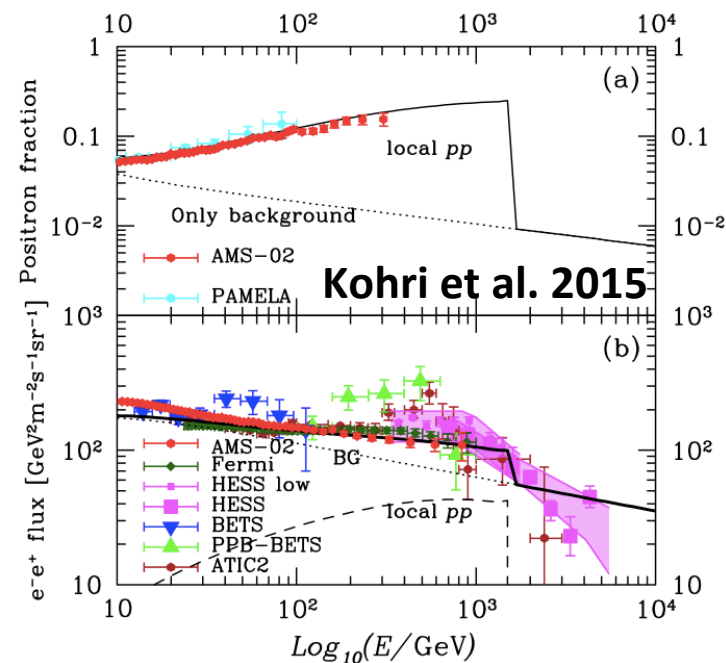
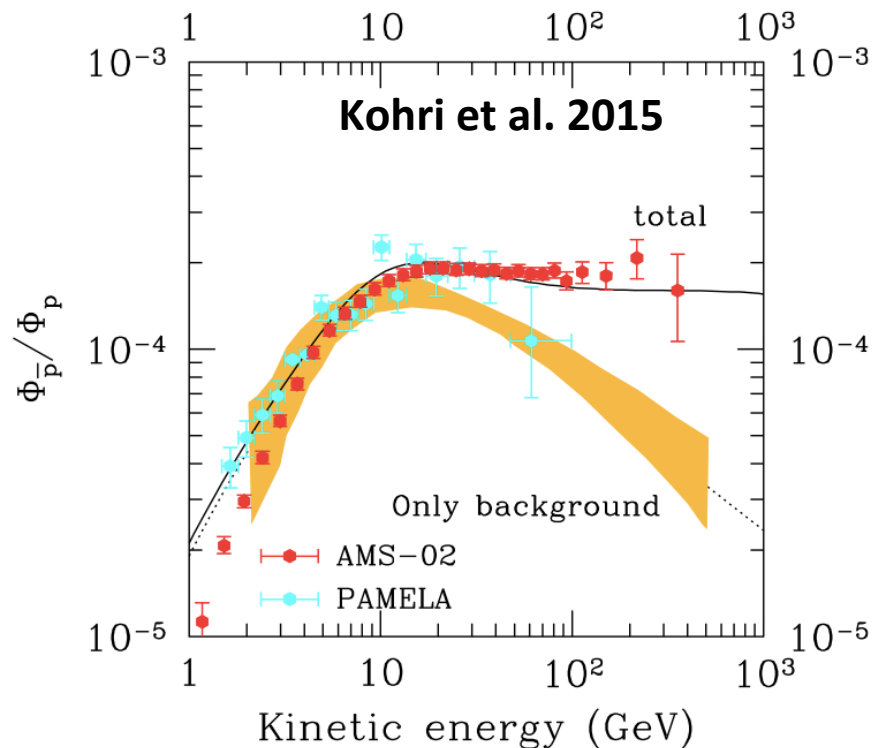
## 標準モデル + 近傍の超新星残骸

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

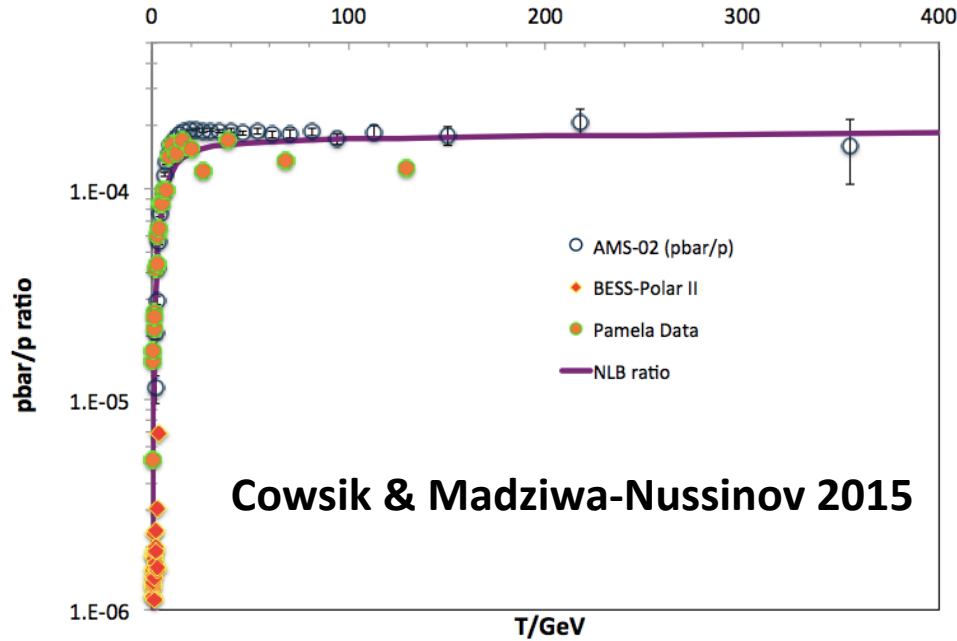
近傍起源のCRは、銀河の外に逃げ出していない→銀河内の滞在時間がエネルギーに寄らない

→ 2次粒子のスペクトルは1次粒子と同じ

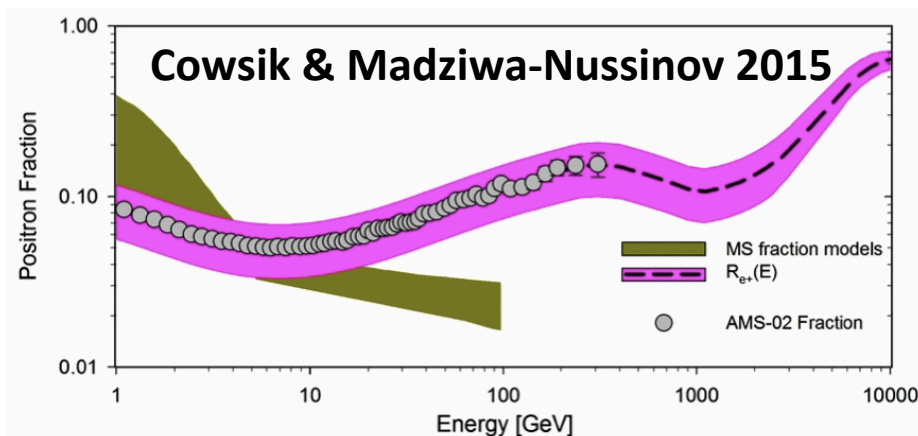
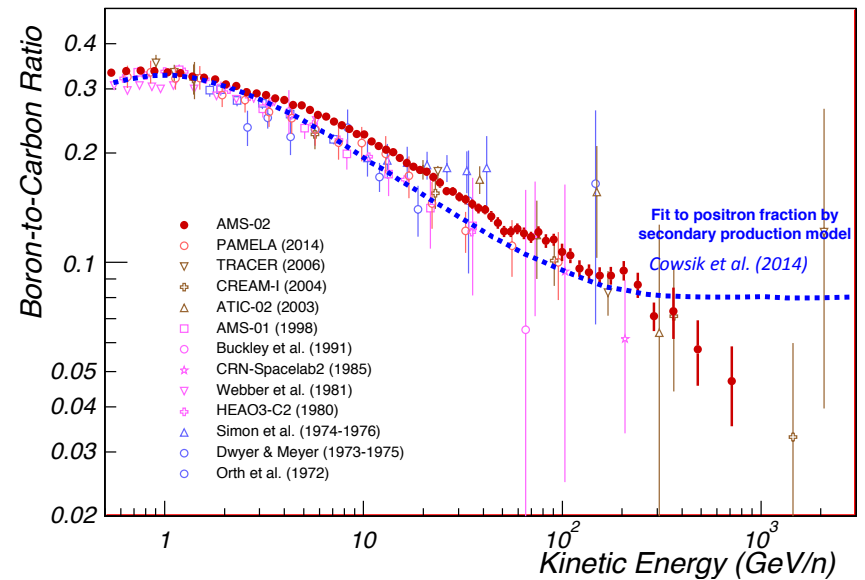


# Cowsik & Madziwa-Nussinov 2015

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

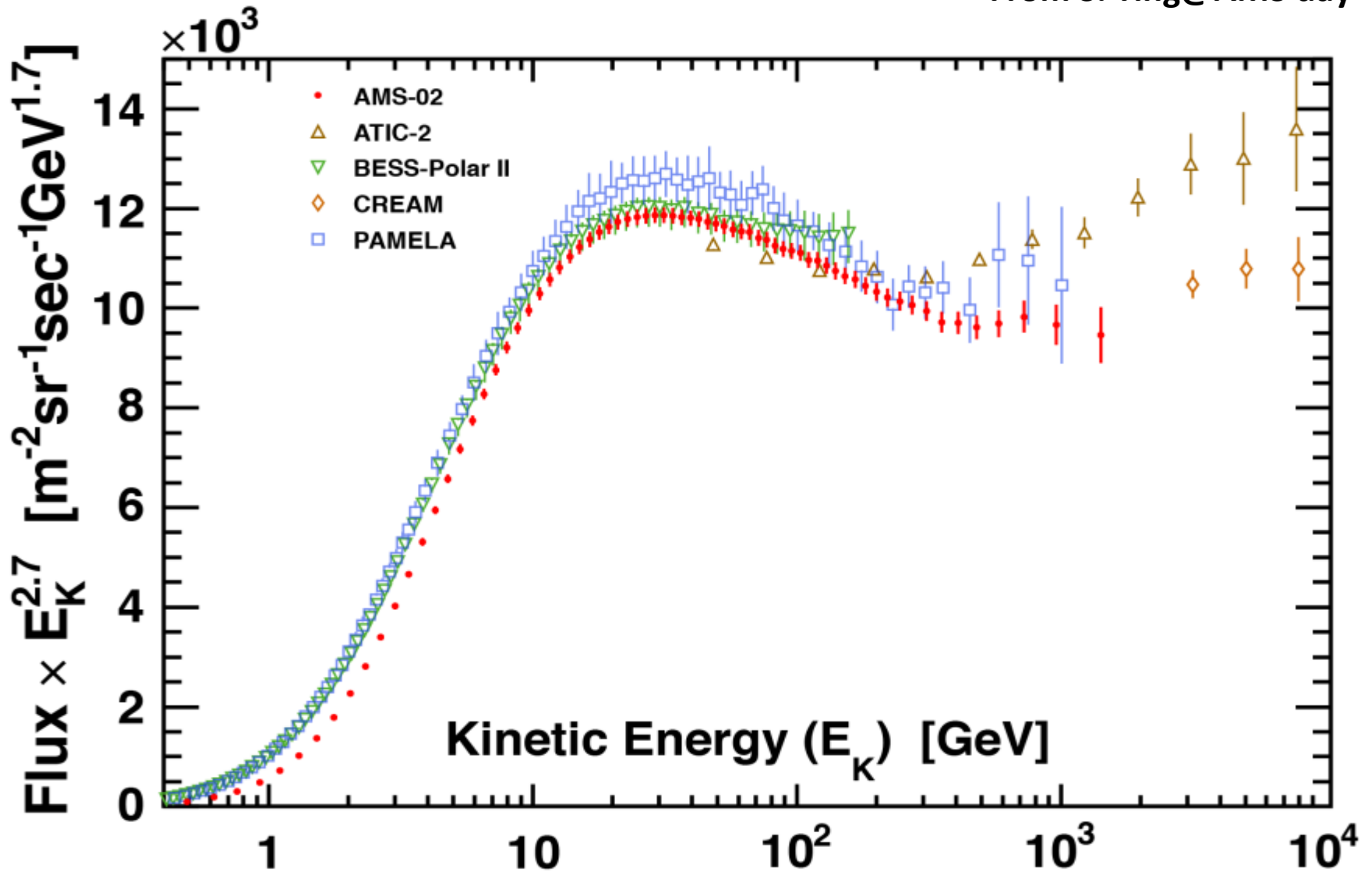


B/C Ratio converted in Kinetic Energy



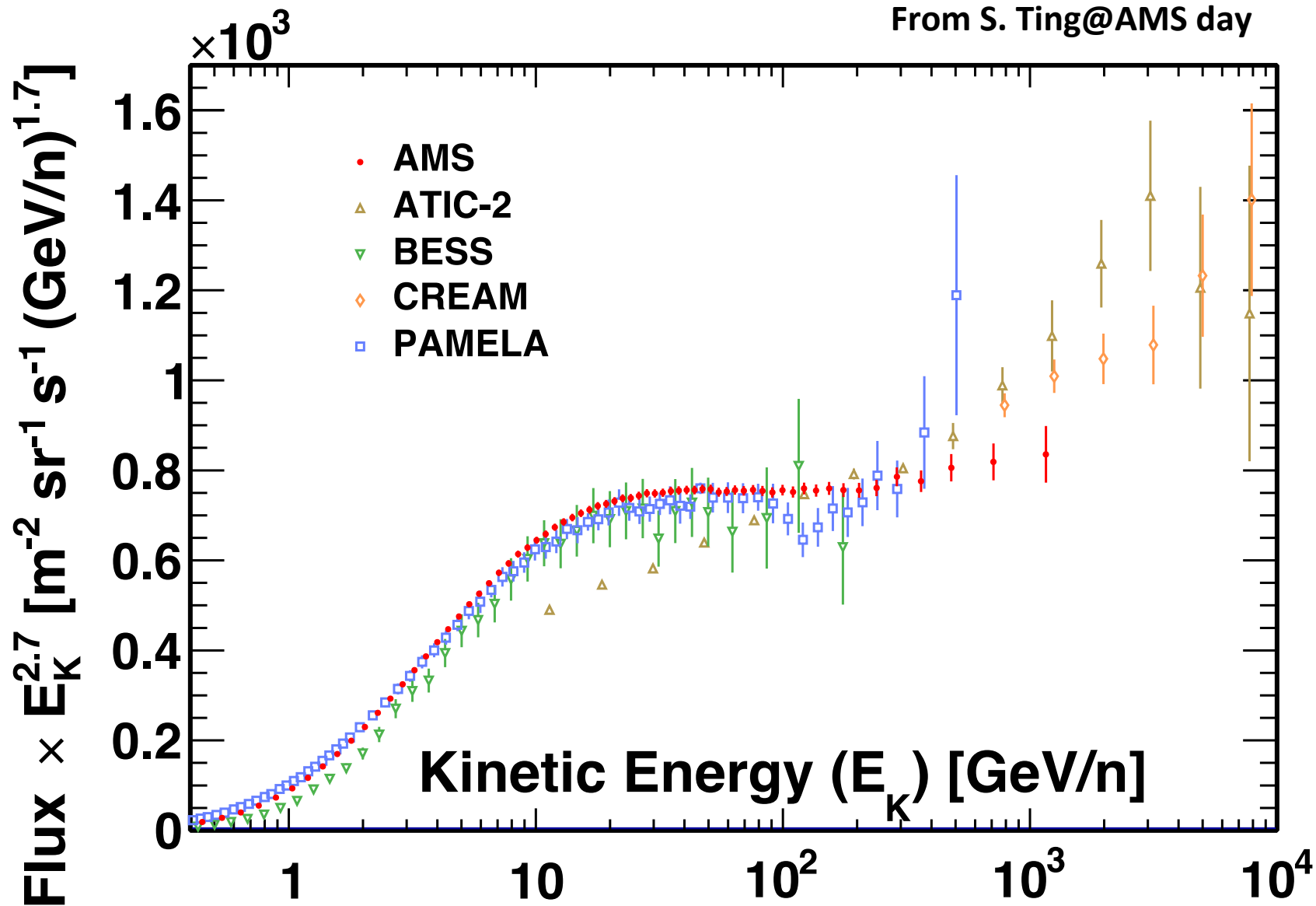
# AMS proton flux

From S. Ting@AMS day



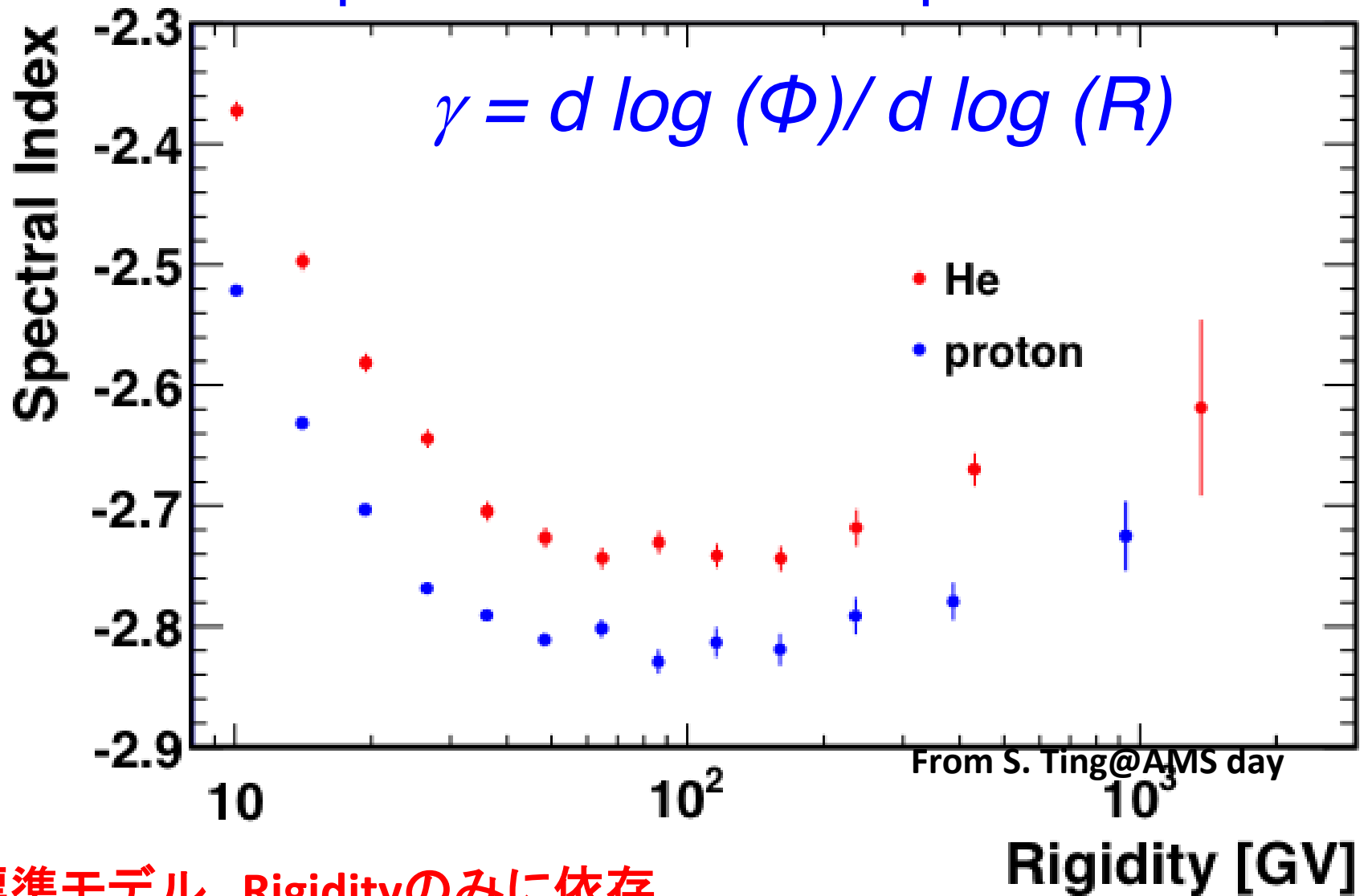
# AMS Helium Flux

From S. Ting@AMS day





# Model Independent Spectral Indices Comparison

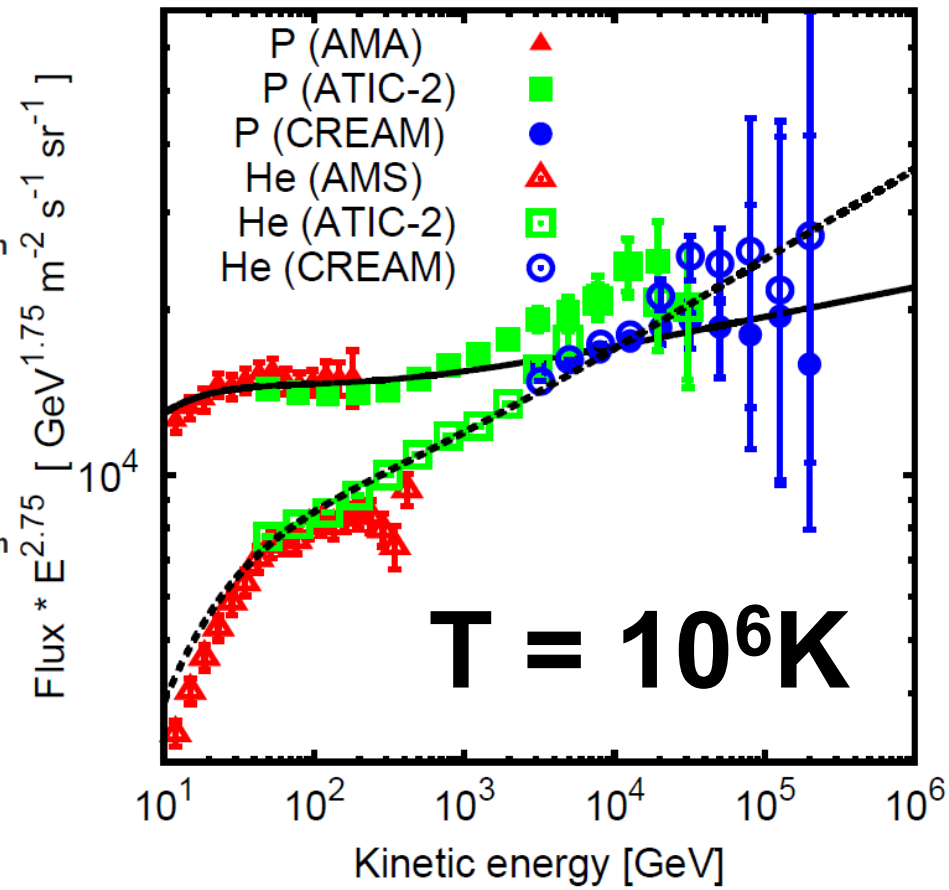
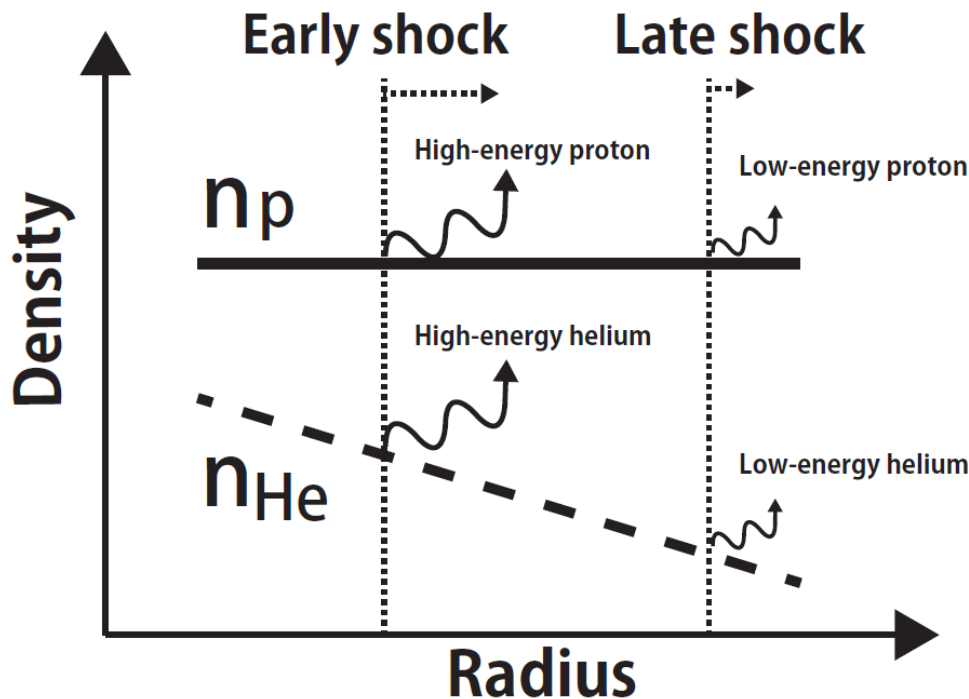


標準モデル AMS-02 Rigidityのみに依存  
粒子の種類にも依存, 粒子の種類によらない折れ曲がり

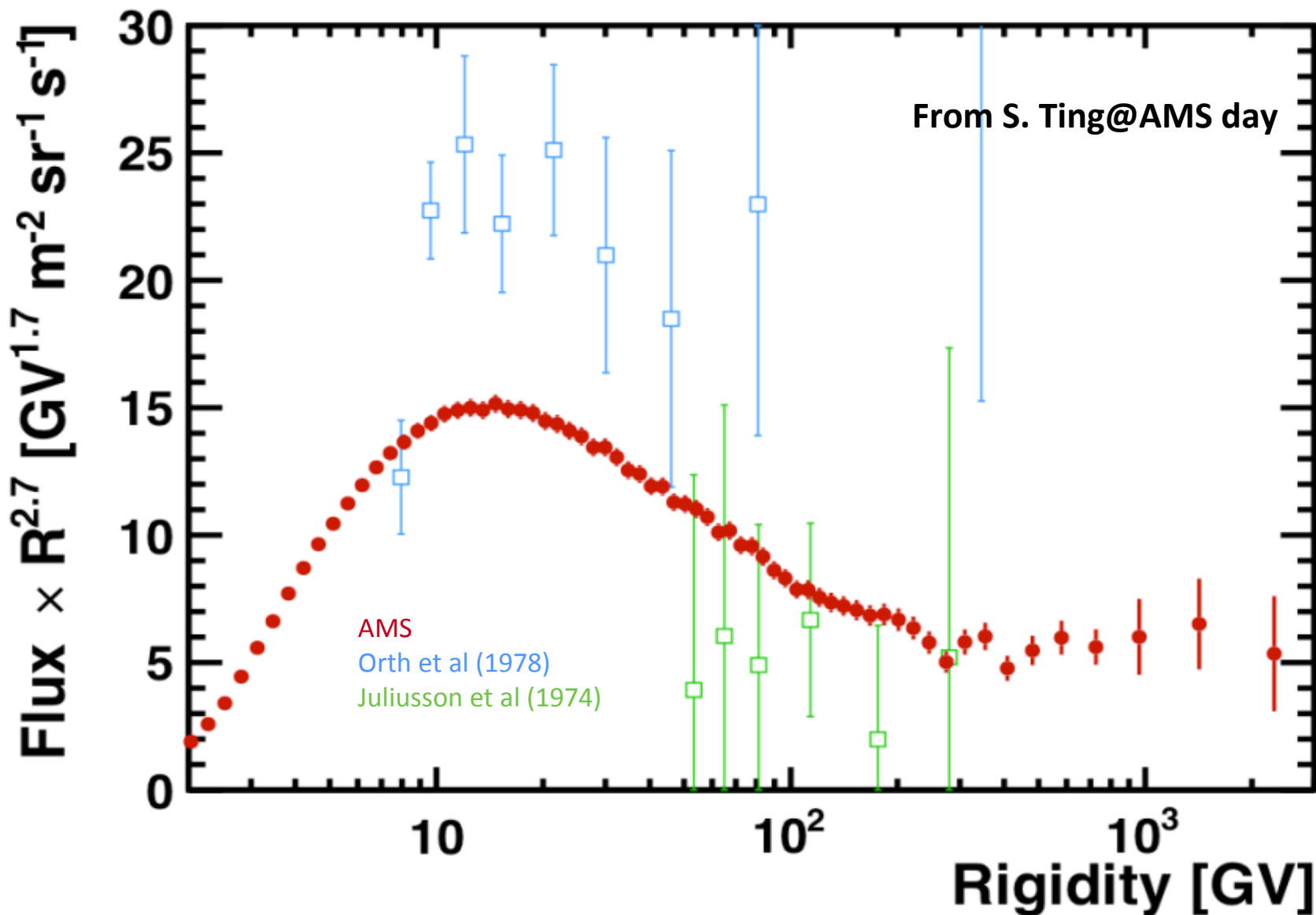
# Ohira & Ioka 2011

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)

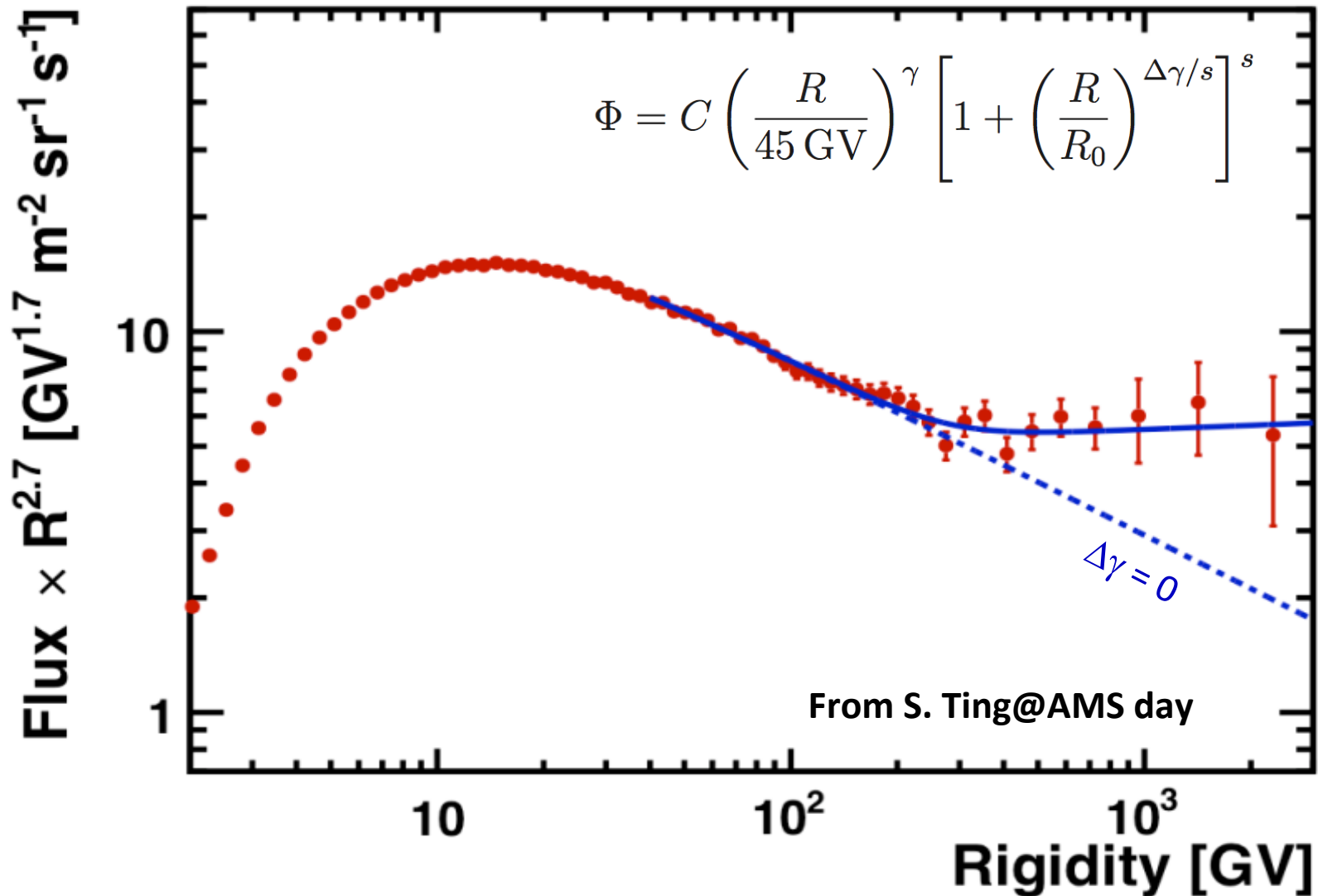


# AMS Lithium flux – current status



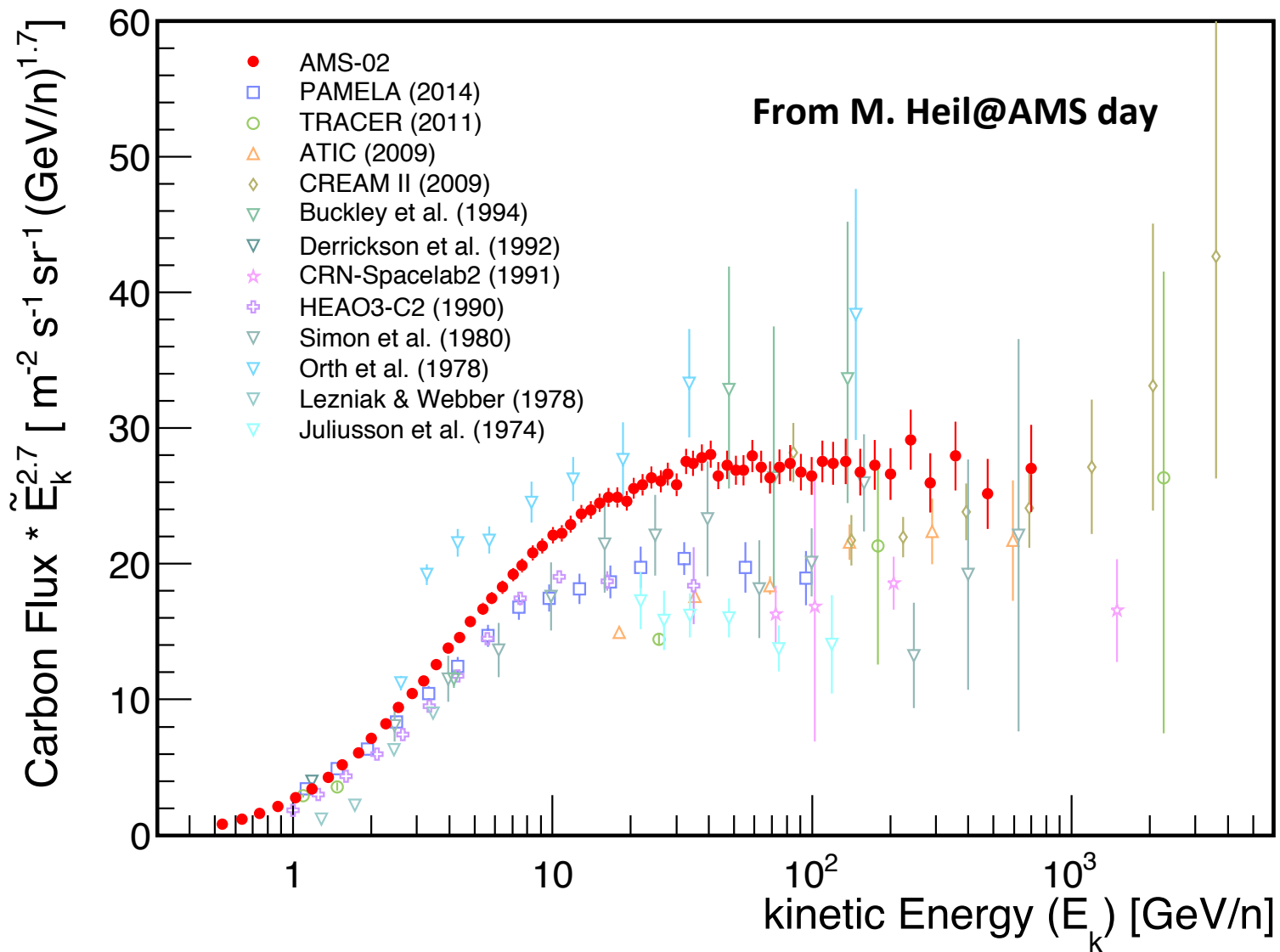
To be presented by L. Derome (LPSC, Grenoble)

# Lithium flux with two power law fit

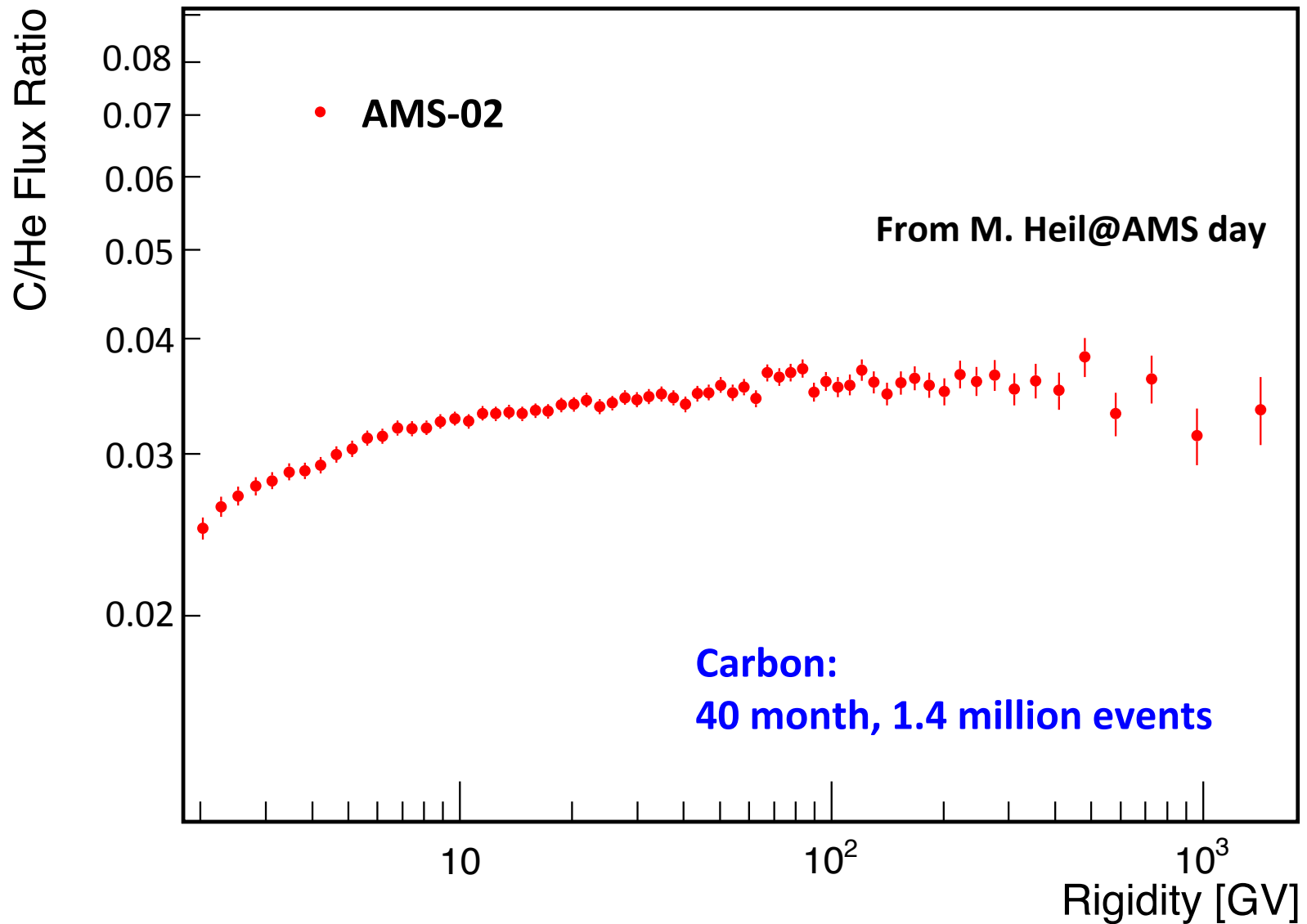


Slope changes at about the same rigidity as for protons and helium

# Carbon Flux



# C / He Flux - Ratio





# 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2次粒子モデルはなさそう  
→  $B$  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以外にも宇宙線の物理は、宇宙線の非等方性やガンマ線でも探れる  
今年度は、宇宙線観測装置 CALET と ISS CREAM が ISS に設置予定