

宇宙線と磁場

大平 豊 (東京大学)

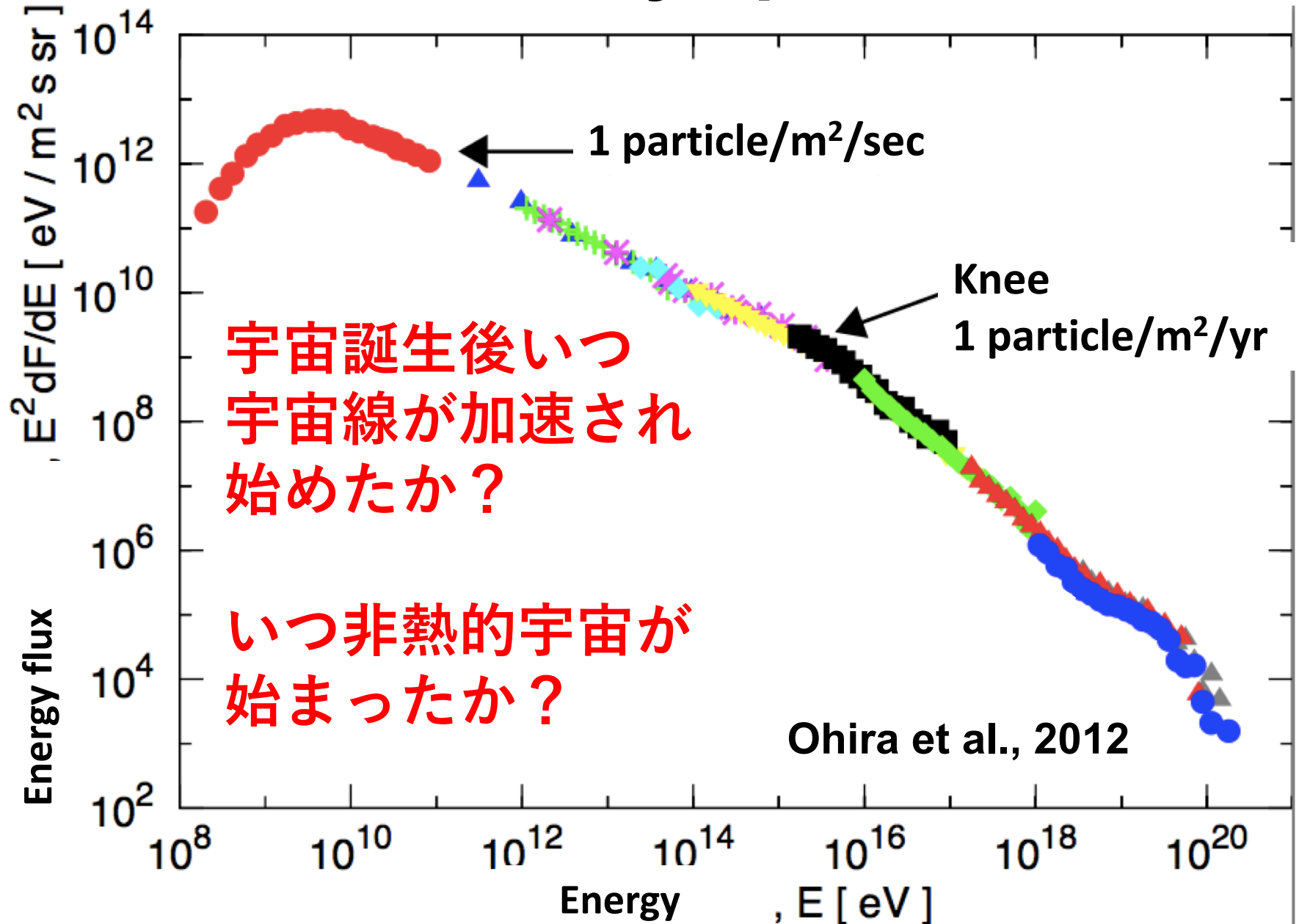
内容

- First cosmic ray. First jet. 非熱宇宙はいつ始まった？
- 磁場の起源。宇宙線、ジェット加速に重要な磁場。
- 現在の宇宙線の起源・加速・逃走・伝搬の問題

この研究会の開催趣旨

高エネルギー天文学の観測と理論に関して、**新しい研究課題 Seeds**発見や萌芽的研究につながるものを重要視します。そのため、アイデア段階のもの発表や研究会で深い議論を歓迎します。発表は1-2時間程度の枠を考えています。**研究会**を通じてそれぞれの課題に対して、**問題点の整理、新たなモデルや技術の必要性、組織・計画の構築に至ることを期待します。**この機会に現在の研究を暫く離れ、**未来を東広島（西条）**で語りませんか。皆さまのご参加お待ちしております。

Cosmic-ray spectrum



宇宙線による原始ガスの加熱

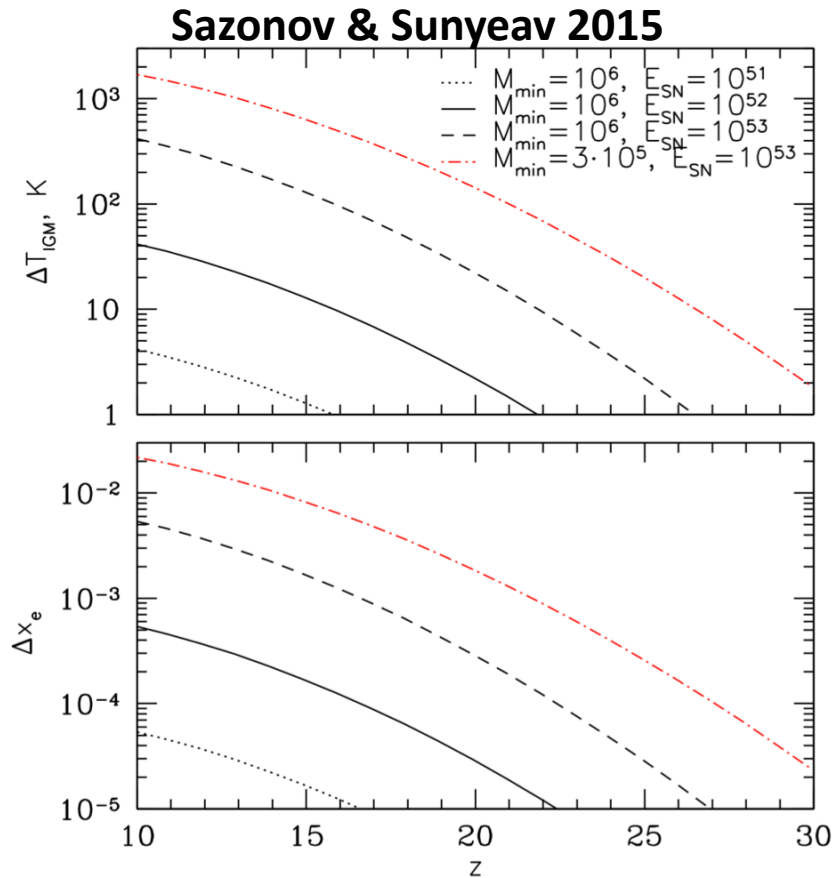


Figure 1. Increment of the IGM temperature (upper panel) and of the ionization fraction (lower panel) caused by LECRs from primordial SNe, as a function of redshift, for three values of the SN explosion energy, $E_{\text{SN}} = 10^{51}$ erg (dotted), 10^{52} erg (solid) and 10^{53} erg (dashed). The other parameters are $f_{\text{SN}} = 1$, $M_{\text{min}} = 10^6 M_{\odot}$, $M_{\text{max}} = 10^7 M_{\odot}$, $\eta = 0.05$ and $f_{\text{heat}} = 0.25$. For $E_{\text{SN}} = 10^{53}$ erg also a model with a lower minimum halo mass, $M_{\text{min}} = 3 \times 10^5 M_{\odot}$, is presented (dash-dotted).

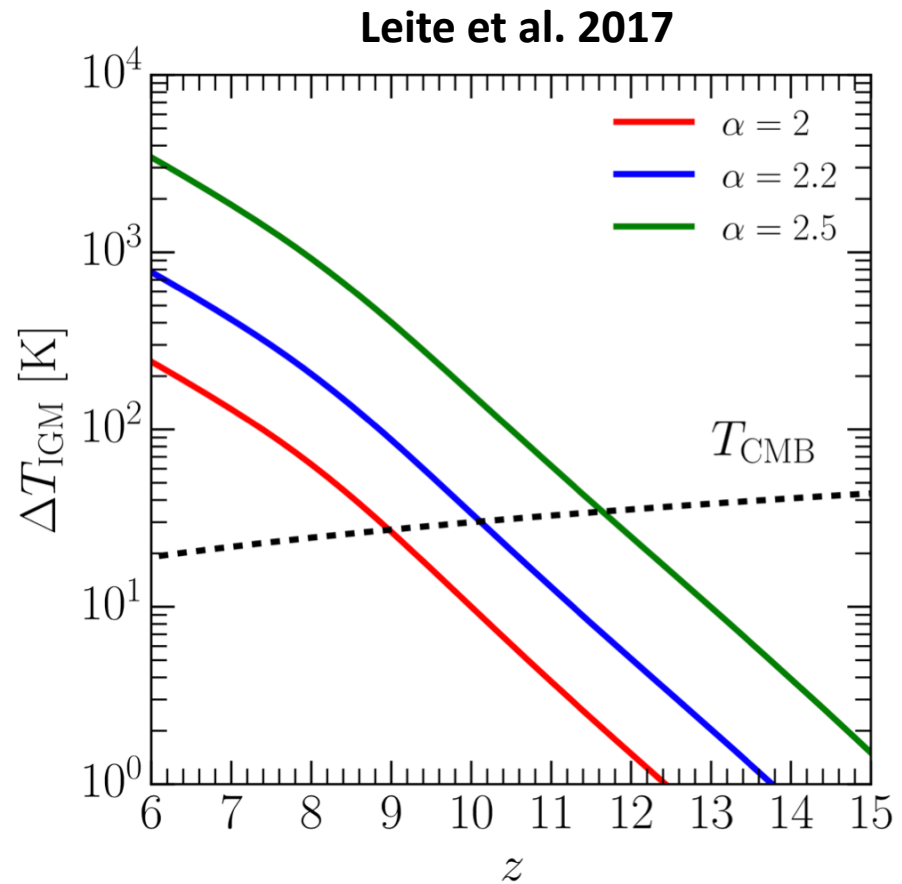


Figure 7. Increment of the average IGM temperature by CRs as a function of redshift for three values of the CR injection slope. The CMB temperature at the same redshift is shown by the dashed line.

宇宙線は再電離には効かないが、加熱には効く可能性あり

21 cmの観測

($z \sim 20$ での宇宙線や磁場に関する情報が得らる?)

電離損失の時間、10MeVの宇宙線が直進するとすると、

$$R_{\text{free}} \sim 1\text{Mpc} \left(\frac{1+z}{21} \right)^{-3} \left(\frac{E_{\text{CR}}}{10\text{MeV}} \right)^2$$

Sazonov & Sunyeav 2015

電離損失の時間、Bohm拡散($l_{\text{mfp}} = r_g$)で広がるとすると、

$$R_{\text{diff,B}} \sim 30\text{kpc} \left(\frac{1+z}{21} \right)^{-3/2} \left(\frac{E_{\text{CR}}}{10\text{MeV}} \right)^{5/4} \left(\frac{B}{10^{-16}\text{G}} \right)^{-1/2}$$

X線によって加熱される距離

$$R_{\text{Xray}} \sim 100\text{kpc} \left(\frac{1+z}{21} \right)^{-3} \left(\frac{E_{\text{Xray}}}{0.3\text{keV}} \right)^{3.2}$$

ハロー間の距離

$$R \sim 50\text{kpc}$$

$z \sim 20$ での21cmのパワースペクトルの強度や特徴的な空間スケールから、宇宙線と磁場の情報が得られるかも？

原始ガス加熱に重要な宇宙線のエネルギー

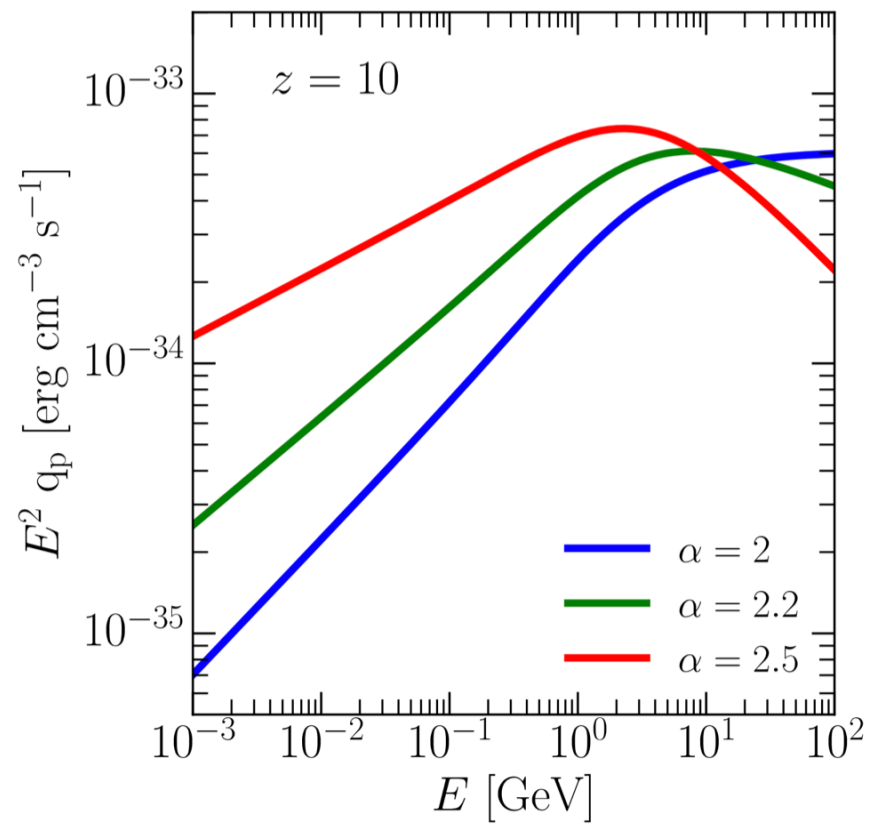


Figure 3. Source function of CR protons with respect to their kinetic energy at $z = 10$ for a spectrum slope $\alpha = 2$ (blue line), 2.2 (green) and 2.5 (red).

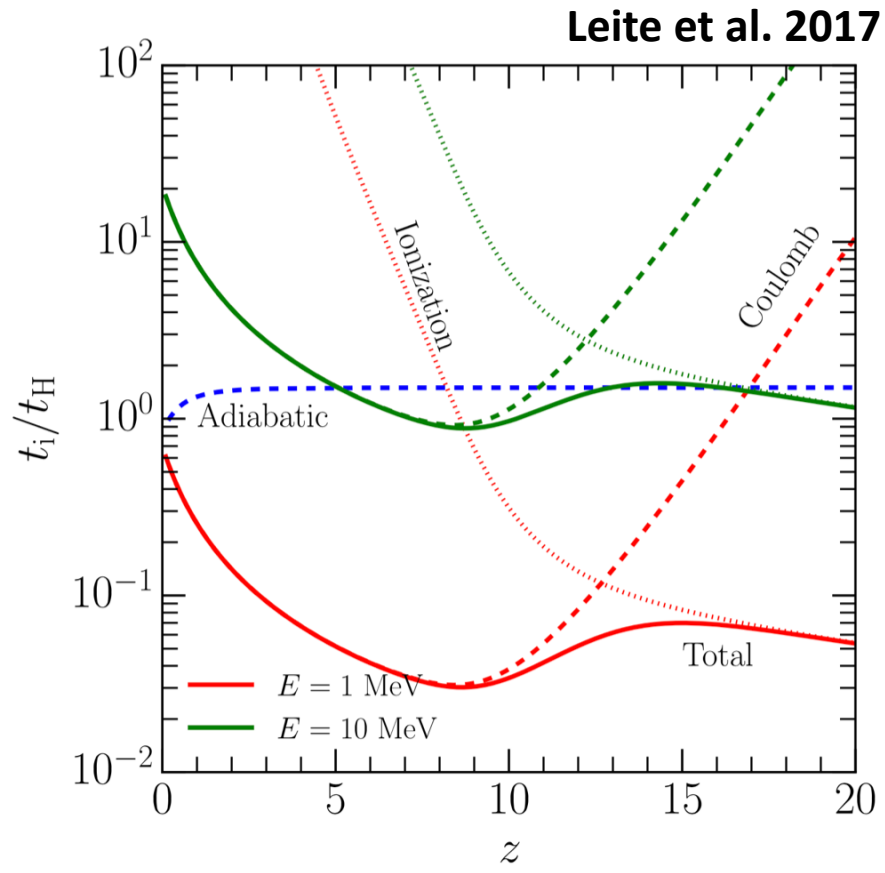
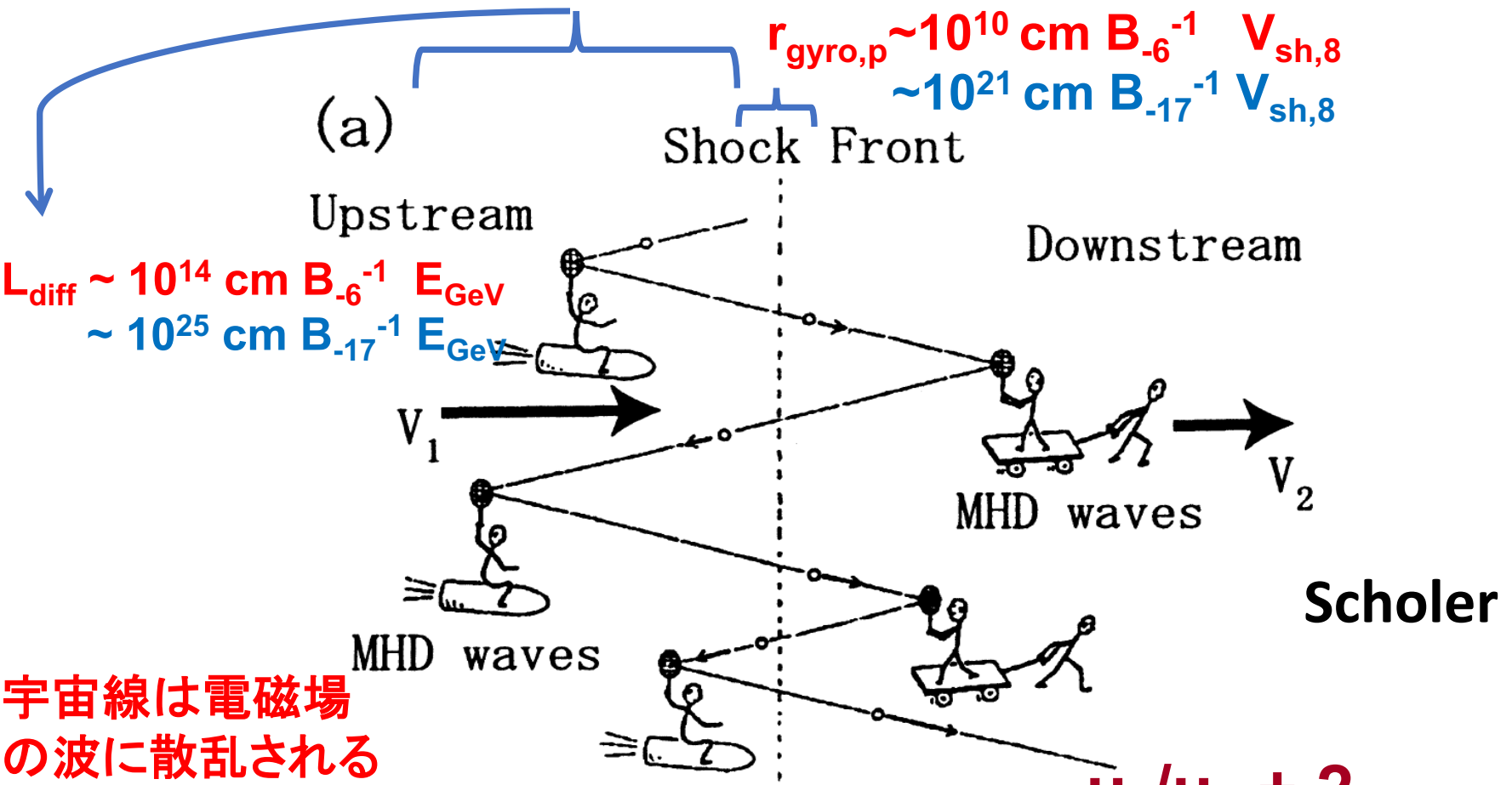


Figure 4. Energy-loss time-scales (see equations [25–27]) normalized to the Hubble time for CR protons of 1 and 10 MeV. The adiabatic time-scale (blue dashed line) is independent of the particle energy.

E <~ 10 MeV の宇宙線が加熱に効く。

構造形成に伴う衝撃波で加速される宇宙線は？ 初代宇宙線の最高エネルギーは？

Diffusive Shock Acceleration(DSA)



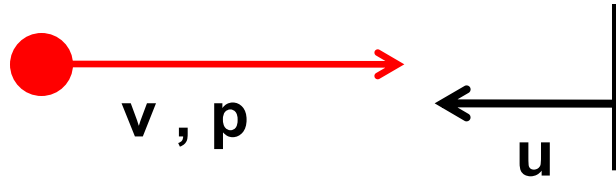
宇宙線は電磁場の波に散乱される

宇宙線は電磁場を励起する。

$$dN/dE \propto E^{-s} \quad s = \frac{u_1/u_2 + 2}{u_1/u_2 - 1} = 2$$

DSA機構の加速時間

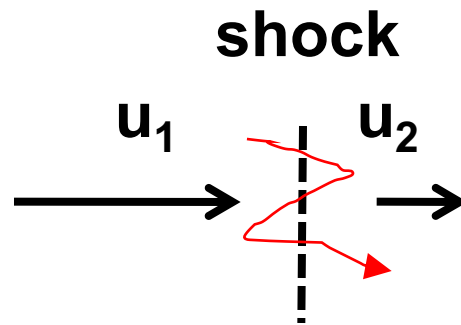
粒子と壁の1次元散乱



散乱後の運動量変化

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

衝撃波の場合



1往復後の運動量変化

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

1往復にかかる時間 $\Delta t = [\text{上流の滞在時間}] + [\text{下流の滞在時間}]$
 $\sim [\text{上流の滞在時間}]$

上流に染み出した
宇宙線の柱密度

$$n_{CR} (D_{xx}/u_{sh}) \sim n_{CR} v \Delta t$$

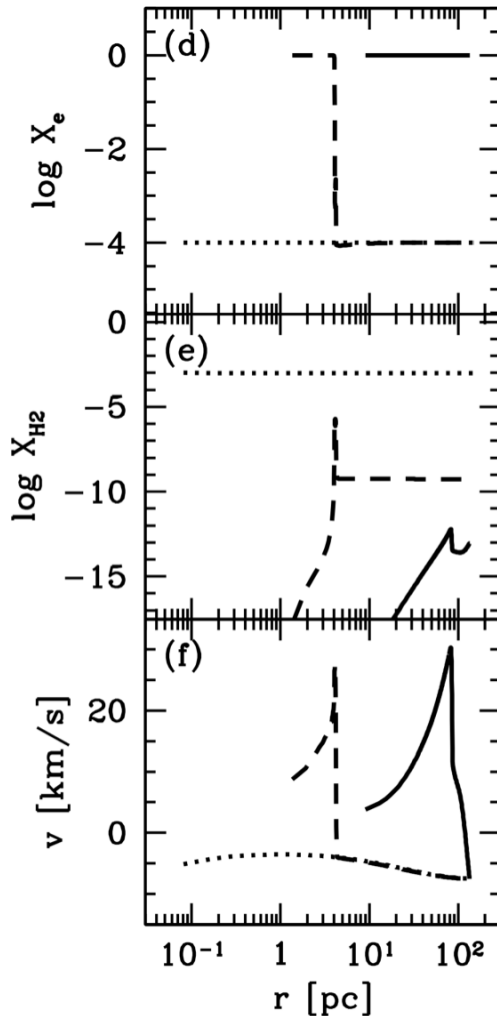
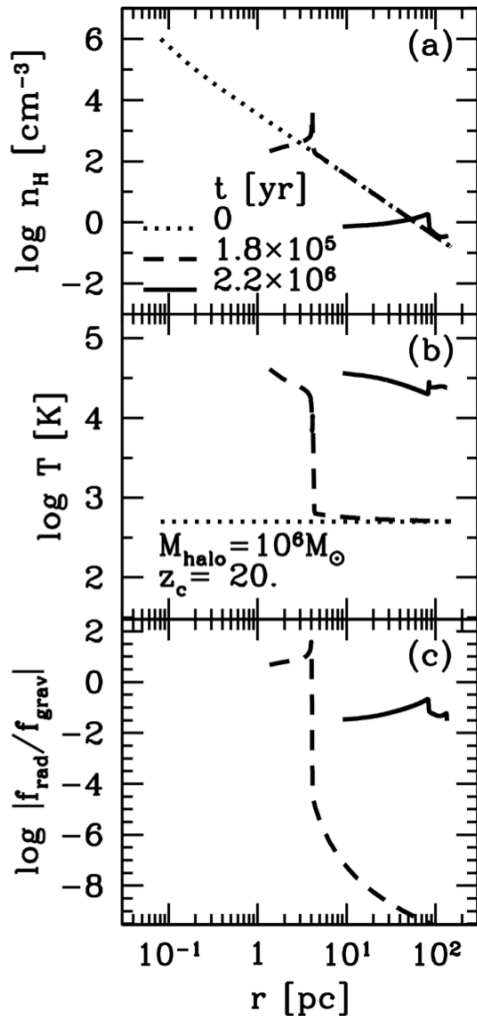
宇宙線密度 x 拡散長

下流からのflux x 滞在時間

$$t_{acc} = p \Delta t / \Delta p \sim D_{xx} / u_{sh}^2 \quad (\text{Krymsky et al. 1979, Drury 1983})$$

初代星による周辺の電離

Kitayama et al. 2004



初代星の爆発直前のガスの状態

密度 $n \sim 1 \text{ cm}^{-3}$

温度 $T \sim 1 \text{ eV}$

電離度 $f_i \sim 1 \leftarrow$ 完全電離

磁場 $B < 10^{-19} - 10^{-17} \text{ G}$

(Doi & Susa 2011)

初代星の超新星残骸

$$V_{\text{sh}} \sim 0.01c E_{\text{SN},51}^{1/2} M_{\text{ej},1}^{-1/2}$$

$$t_{\text{Sedov}} \sim 1 \text{ kyr } E_{\text{SN},51}^{-1/2} M_{\text{ej},1}^{5/6} n_0^{-1/3}$$

$$R_{\text{Sedov}} \sim 4 \text{ pc } M_{\text{ej},1}^{-1/3} n_0^{-1/3}$$

of an H II region around a massive star with $M_{\text{star}} = 200 M_{\odot}$ inside a halo with $M_{\text{halo}} = 10^6 M_{\odot}$ and $w = 2.0$ at $z_c = 20$. Radial profiles are (dotted lines), $1.8 \times 10^5 \text{ yr}$ (dashed lines), and $2.2 \times 10^6 \text{ yr}$ (solid lines) for (a) hydrogen density, (b) temperature, (c) ratio of radiation force to gravity, (d) electron fraction, (e) H_2 fraction, and (f) radial velocity. [See the electronic edition of the Journal for a color version of this figure.]

磁場の起源と、 First CR, First Jet

Zweibel 2013

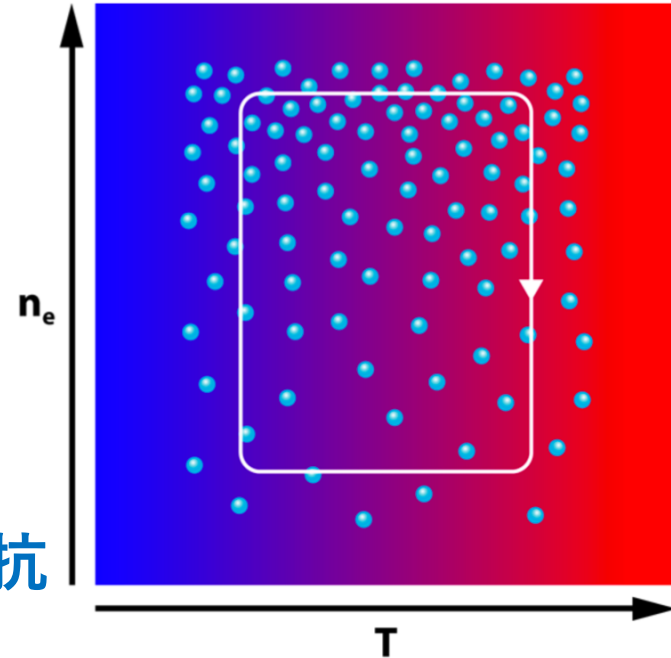
宇宙線Birmannバッテリー機構？

宇宙線+抵抗(慣性抵抗も含む)の非一様性

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = c \vec{\nabla} \times \vec{E}$$

$$\vec{E} = -\frac{\vec{u}_i}{c} \times \vec{B} - \frac{\vec{B} \times (\vec{\nabla} \times \vec{B})}{4\pi en_i} - \frac{\vec{\nabla} p_e}{en_i} + \text{抵抗}$$

$$p_e = p_{e,th} + p_{e,CR}$$



First high mass x-ray binary, high z quasar, high z GRB はJetでる？

降着円盤の角運動量輸送は？

円盤中のBirmannバッテリー or 輻射の非等方性から磁場を作り、
乱流ダイナモやMRIで磁場を増幅して → Jet?

前半のまとめ

宇宙誕生後、いつから宇宙線が加速され始めたか？
いつから非熱的宇宙が始まったか？ 謎である。

21cm の観測により、宇宙再電離期以前の宇宙線加速や磁場の情報が抜き出せるかもしれない。

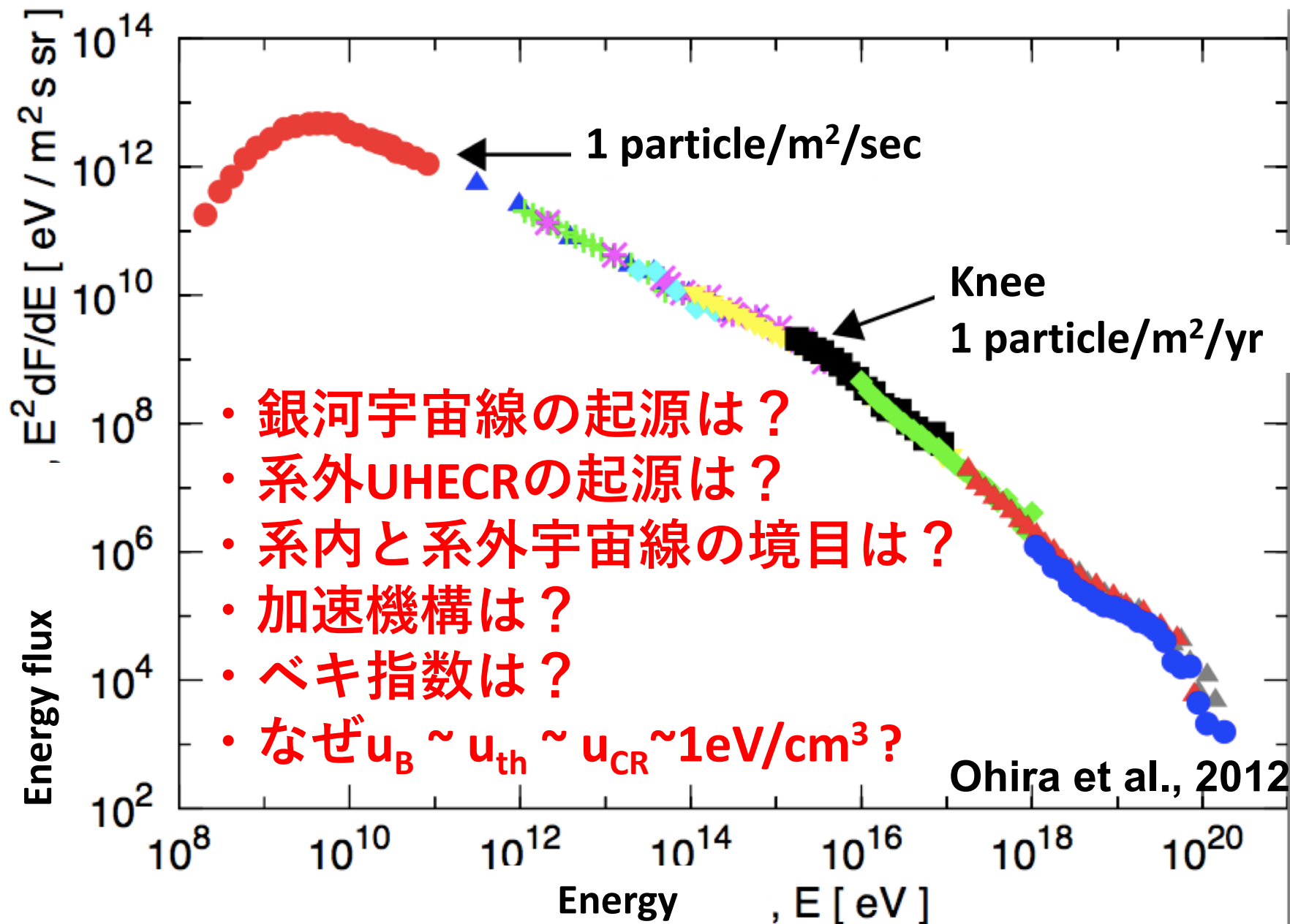
$z \sim 20$ の構造形成に伴う衝撃波は、中性ガス中の衝撃波となり、宇宙線を加速できない。

$z \sim 20$ の初代星の超新星残骸の無衝突衝撃波は、Weibel不安定性によって散逸される衝撃波となり、初代宇宙線が加速される。 $E_{\max,p} \sim 60 \text{ GeV}$, $E_{\max,e} \sim 30 \text{ GeV}$ 。

First UHECR, first neutron star, first pulsar, first magnetar,
first high mass X-ray binary, first GRB, first jet, ...

磁場の起源は？いつから銀河宇宙線は加速され始めた？

現在の宇宙線の古くからある問題



銀河宇宙線の標準モデル

起源は超新星残骸(SNR)である。

GeVガンマ線やTeVガンマ線の観測は、 $E_{CR} \sim 10\% E_{SN,51}$ と矛盾しない。
(Acero et al. ApJS 2016, Abdalla et al. arXiv:1802.05172)

どの爆発タイプの残骸が主に宇宙線を加速しているか？

この疑問に対する標準モデルはない。←宇宙線の組成比を用いた議論はある。

問題点) 観測された~300個のSNRの爆発タイプは、ほとんどが決まっていない。

エックス線屋さん！

加速機構は衝撃波統計加速(DSA)である。

SNRは衝撃波面を2枚持つ。どちらが主に宇宙線を供給しているか？

ISMまたはCSMを伝搬する衝撃波が主に宇宙線を供給していると思われる。
観測的証拠はない。←ガンマ線の角度分解能が足りない。ガンマ線屋さん！

SNRからの非熱的放射スペクトルは、DSAの予言と合わないことが多い。

DSA + 別の物理 (宇宙線の反作用、逃走過程、乱流加速、水素の電離)で説明可。

SNRから解放された宇宙線は、銀河内を拡散して地球に届く。

拡散中に、ISM乱流により再加速されるか？どれだけ銀河外に逃げ出すか？

銀河風の影響は？銀河の逃走境界はどこ？これら全て謎。

宇宙線の観測から決めるまたは制限することは可能。理論的に決めるは超難問。

観測してほしい物理量

超新星残骸の爆発タイプ, Ia, Ib, IIb, ...

磁場の空間分布 $\vec{B} = B(x, y, z)$, 拡散係数 D

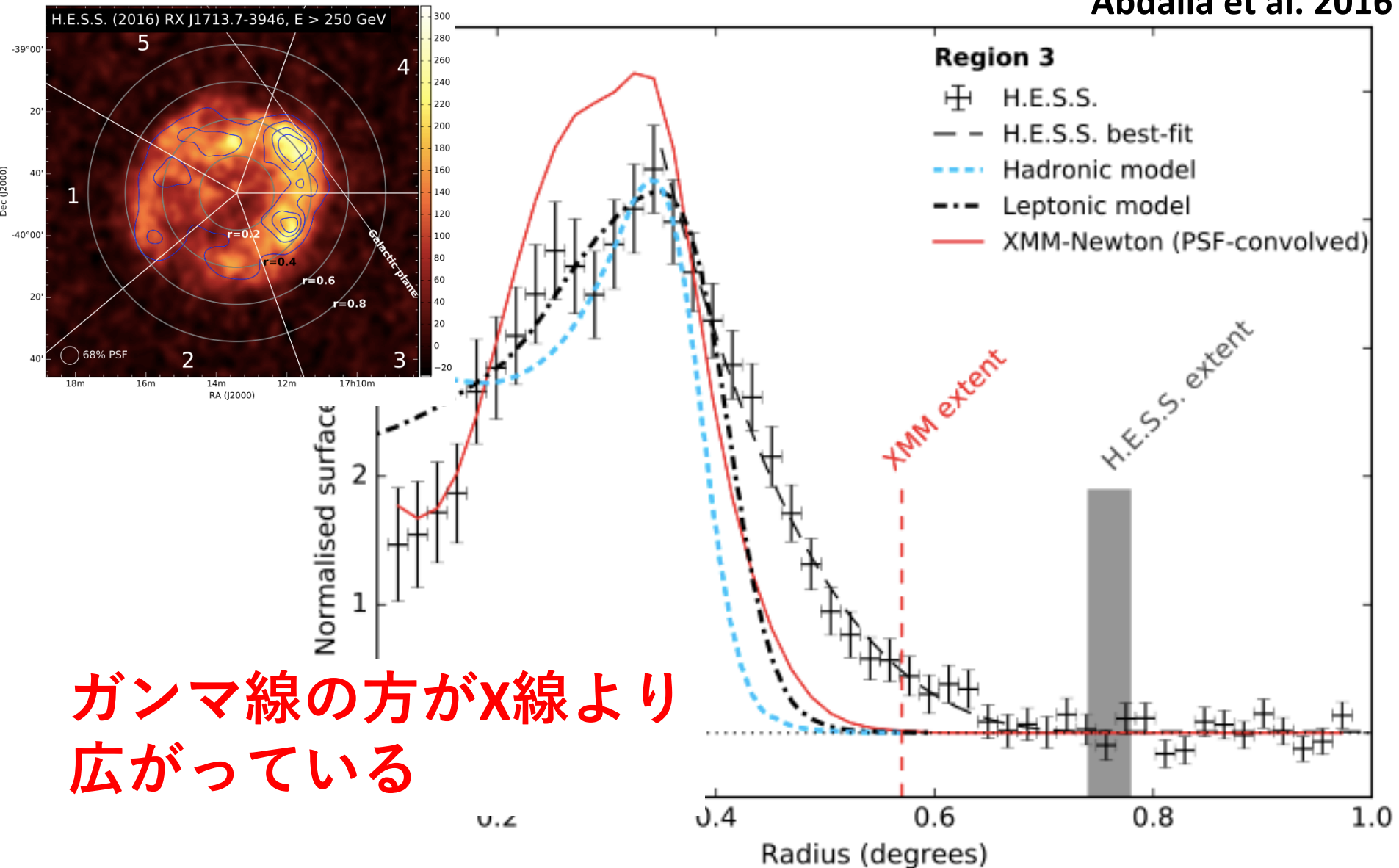
衝撃波の速度構造 $\vec{V} = V(x, y, z)$

熱的粒子と非加速粒子の間の情報

SNRで加速されている原子核の種類, 量

ガンマ線の衝撃波上流の空間分布

Abdalla et al. 2016



ガンマ線の方がX線より
広がっている

加速粒子の衝撃波上流の空間分布

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(D r^2 \frac{\partial n}{\partial r} \right)$$

$r_0 = u_0 t$ で定常注入, $D = \text{const.}$, $r > r_0$ での解は

$$n(r, t) = C \frac{r_0}{r} \exp \left\{ -\frac{(r - r_0)}{D/u_0} \right\}$$

$$t_0 = t_{\text{acc}} = \eta_{\text{acc}} D / u_0^2$$

$$l_{\text{diff}}(E_{\text{max}}) = \frac{D}{u_0} = \frac{r_0}{\eta_{\text{acc}}}$$

加速粒子の衝撃波上流の空間分布

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(D r^2 \frac{\partial n}{\partial r} \right)$$

$r_0 = u_0 t$ で定常注入, $D = \text{const.}$, $r > r_0$ での解は

$$n(r, t) = C \frac{r_0}{r} \exp \left\{ -\frac{(r - r_0)}{D/u_0} \right\}$$

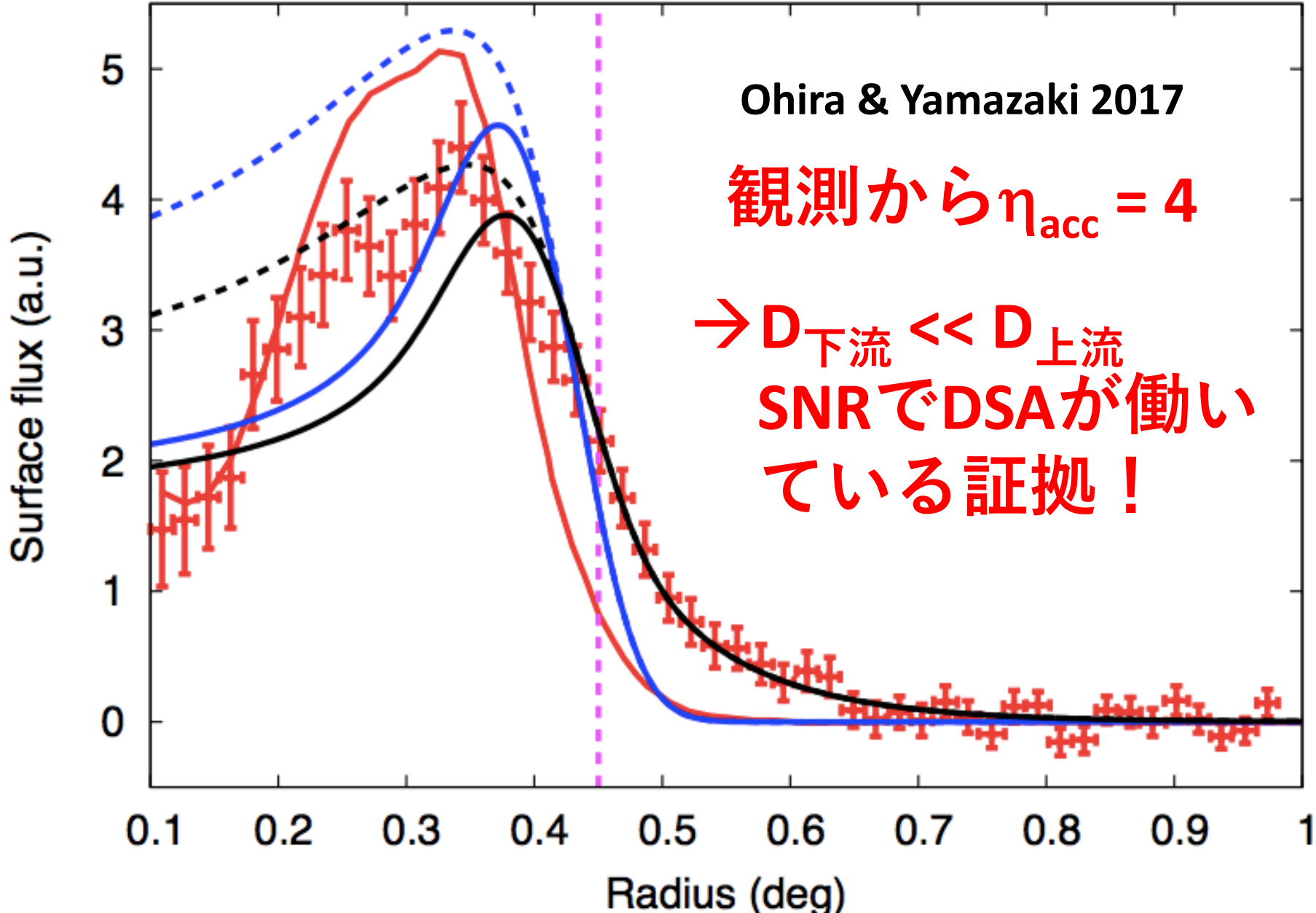
$t = t_{\text{acc}} \rightarrow E_{\text{max,age}}$, ($t = r_0/u_0$, $t_{\text{acc}} = \eta_{\text{acc}} D / u_0^2$)

$$L_{\text{diff}}(E_{\text{max,age}}) / r_0 = D/u_0 r_0 = \mathbf{1 / \eta_{\text{acc}}}$$

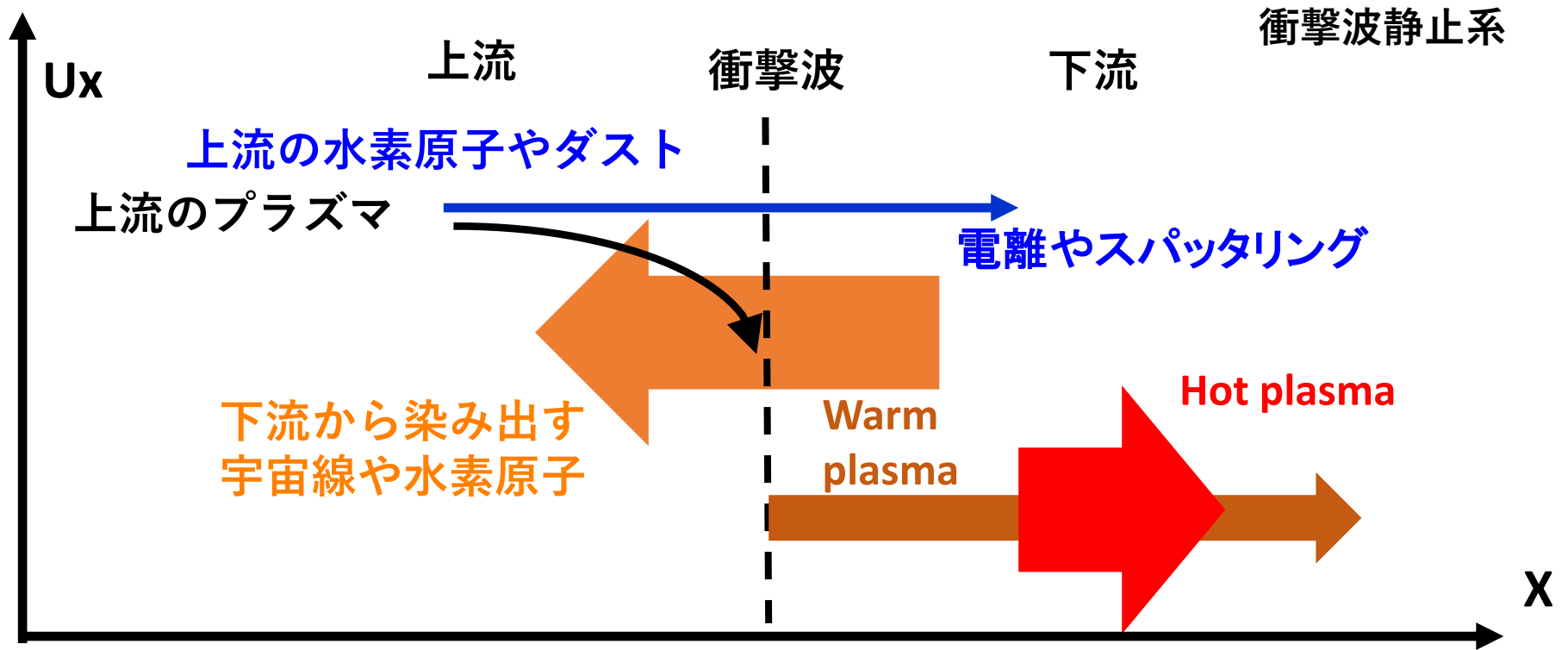
Ohira & Yamazaki 2017

DSA理論の予言は $\eta_{\text{acc}} \geq 4$ 。 $D_{\text{下流}} \ll D_{\text{上流}}$ の極限で $\eta_{\text{acc}} = 4$ 。

ガンマ線の広がりから得られる情報



輝線構造で探る衝撃波構造



上流のプラズマは下流から染み出す宇宙線などで衝撃波に入る前に減速する $\rightarrow T_{\text{down}} < (3/16)mV_{\text{sh}}^2$.

上流の水素原子やダストは上流で減速しない $\rightarrow T_{\text{down}} = (3/16)mV_{\text{sh}}^2$.

\rightarrow 輝線構造から衝撃波構造が抜き出せる。 $H\alpha$ 、X-ray.

Non-thermal electron bremsstrahlung

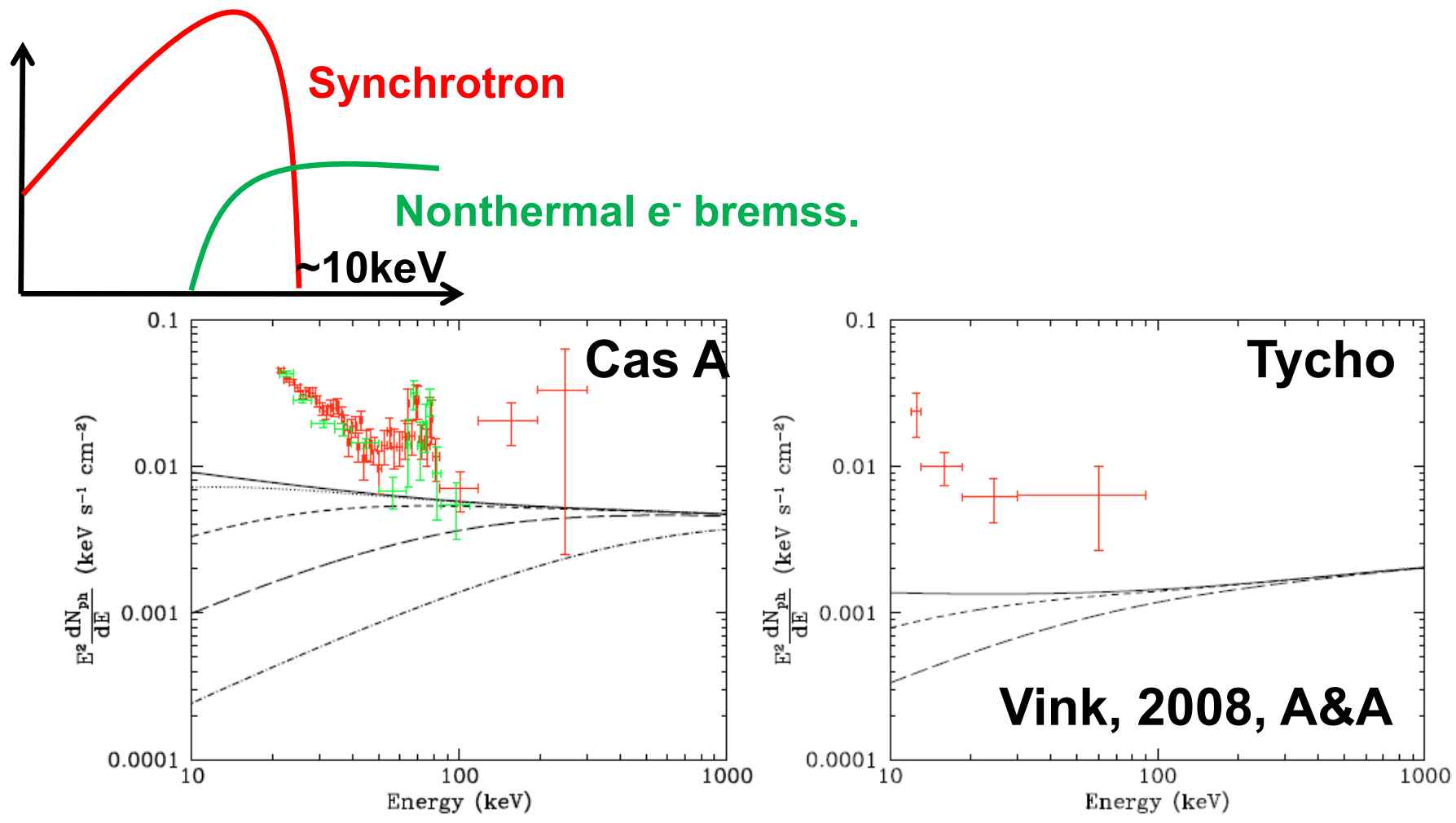
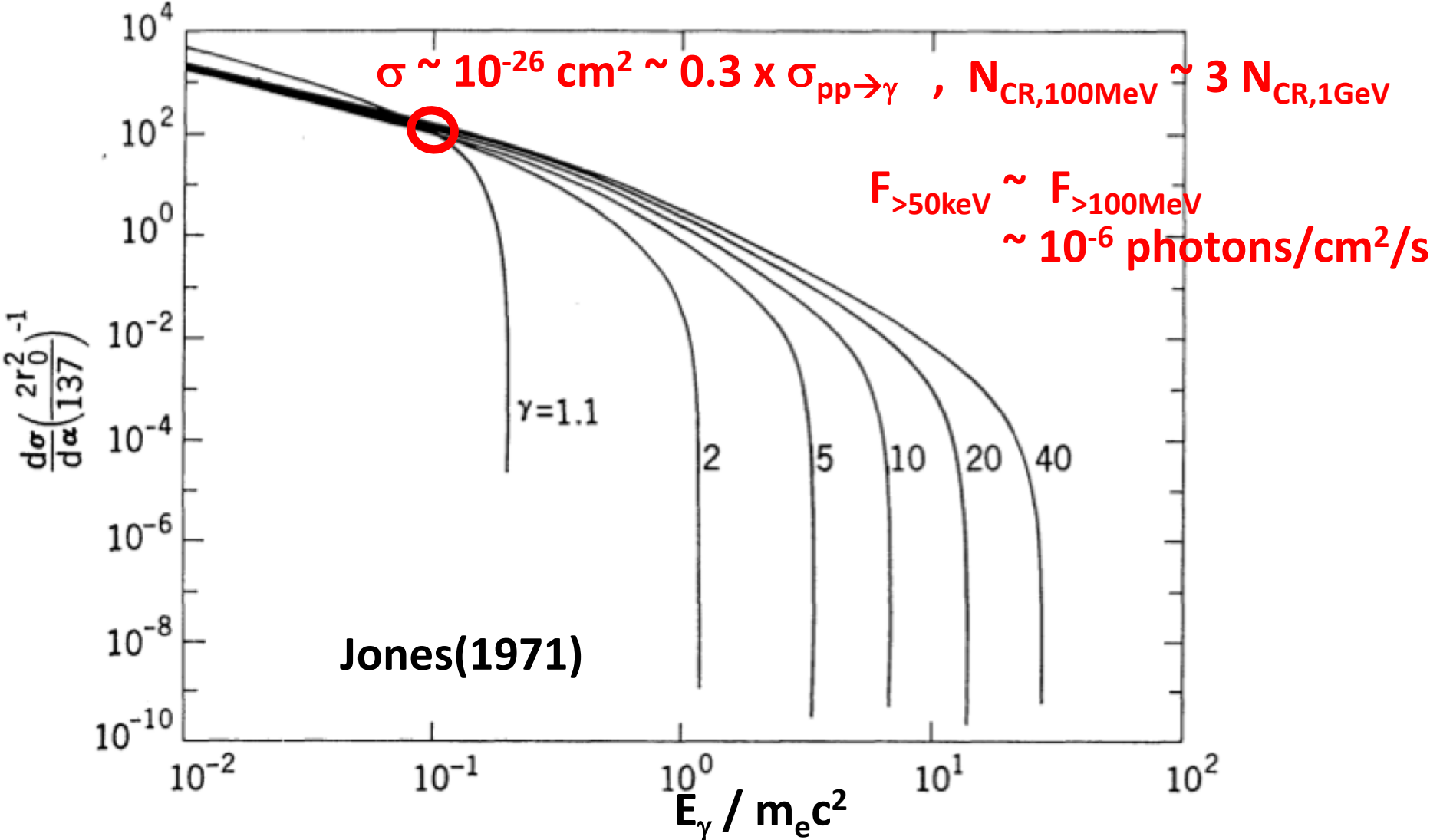


Fig. 3. *Left:* spectral energy distribution of Cas A, as measured with BeppoSAX-PDS (Vink et al. 2001, red) and INTEGRAL-IBIS (Renaud et al. 2006b, green), assuming a magnetic field of $\sim 300 \mu\text{G}$, a spectral energy index of -2.56 (corresponding to a radio-spectral index of $\alpha = -0.78$), and a background plasma with $\sum_i \langle n_i Z^2 \rangle = 10 \text{ cm}^{-3}$. The bremsstrahlung spectra were calculated using the analytic cross sections of Haug (1997). The model spectra are shown for $n_e t = 0, 2 \times 10^9, 2 \times 10^{10}, 2 \times 10^{11}$ and $2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3} \text{ s}$ (from top to bottom). *Right:* spectral energy distribution of Tycho's SNR, as measured by the BeppoSAX-PDS. The theoretical curves are for $B = 10 \mu\text{G}$, $\alpha = -0.6$, and $\sum_i \langle n_i Z^2 \rangle = 4 \text{ cm}^{-3}$. The different curves are for $n_e t = 0, 1 \times 10^{10}, 1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3} \text{ s}$.

Non-thermal proton (inverse) bremsstrahlung

高エネルギー陽子と熱的電子のクーロン相互作用で熱的電子が光子を放射する。



Synchrotron radiation from secondary e^\pm

CR ions produce π^\pm and π^0 by nuclear interactions.

↓

e^\pm

↓

γ

$$E_{e^\pm} \sim E_\gamma \sim 0.1 E_p, \quad L_{e^\pm} \sim 0.25 L_\gamma$$

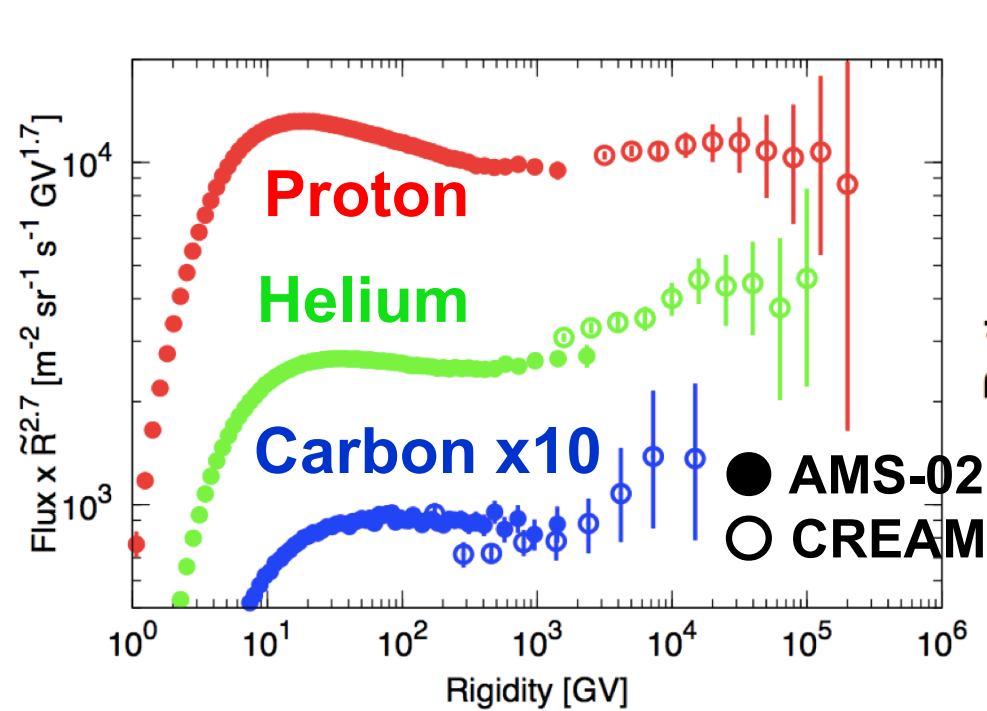
If there are CR protons with E_{knee} , they emit 300 TeV γ rays and e^\pm .

$$h\nu_{2\text{nd syn}} \sim 20 \text{ keV} \times E_{300\text{TeV}}^2 B_{10\mu\text{G}}$$

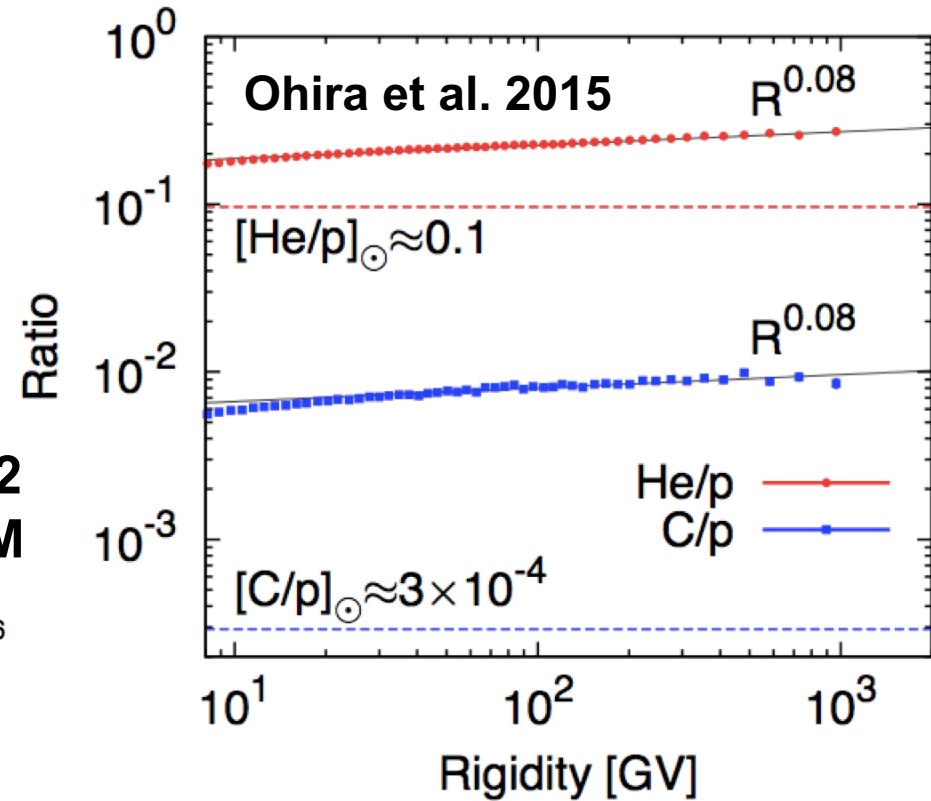
If $t_{\text{cool,syn}} \sim 400 \text{ yr } E_{300\text{TeV}}^{-1} B_{10\mu\text{G}}^{-2} < t_{\text{age}}$, $L_{x,2\text{nd syn}} \sim L_{e^\pm} \sim 0.25 L_\gamma$.

$$\rightarrow (\nu F\nu)_{20\text{keV}} \sim 0.25 (\nu F\nu)_{300\text{TeV}} < \sim 10^{-13} \text{ erg/cm}^2/\text{s}$$

最近の宇宙線直接観測の結果



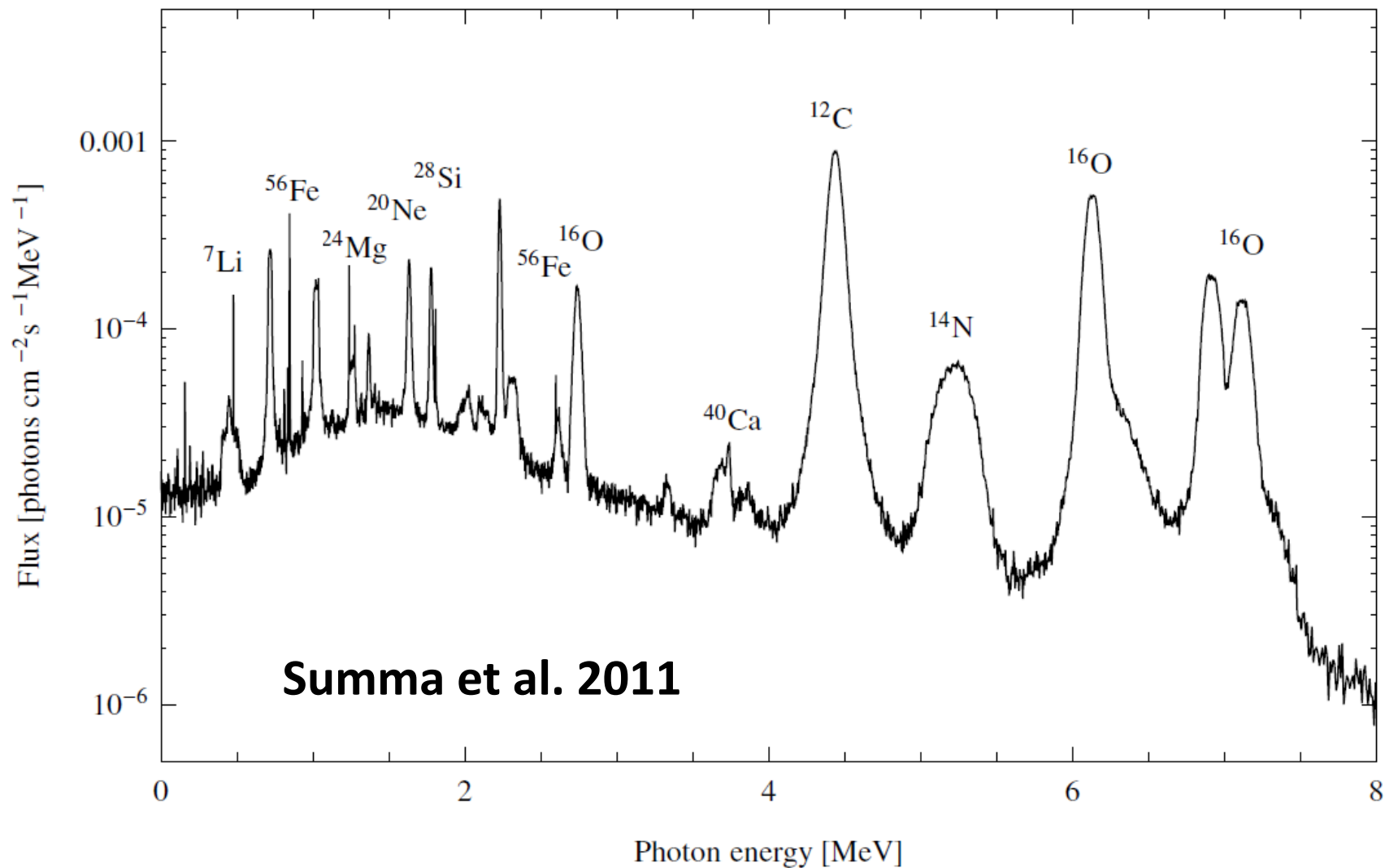
Spectra of CR p and He
(and C) break at $R \sim 300 \text{GV}$.



Spectra of CR He and C are
harder than that of CR p.

陽子以外の宇宙線原子核の観測が面白い結果を出している。
SNRの観測からも、宇宙線原子核の情報が欲しい

原子核からのガンマ線の輝線



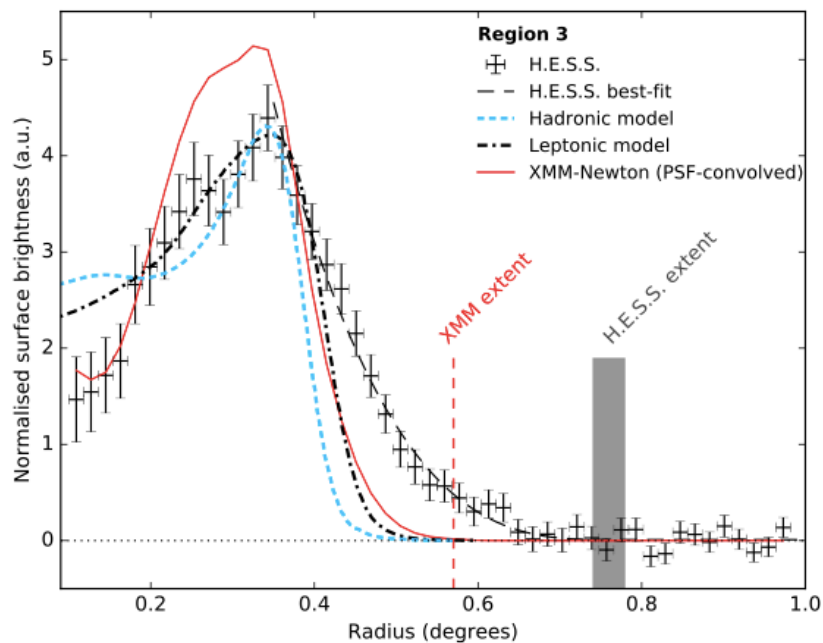
後半のまとめ

宇宙線の直接観測の進展は素晴らしい。結果も驚くことばかり。

Fermi, Chandra, ... も素晴らしい観測結果を提供してくれた。

これからの電磁波観測への要望

ガンマ線の角度分解の向上



MeVガンマ線観測

