

ガンマ線天文学の課題と今後への期待 : 理論的観点から

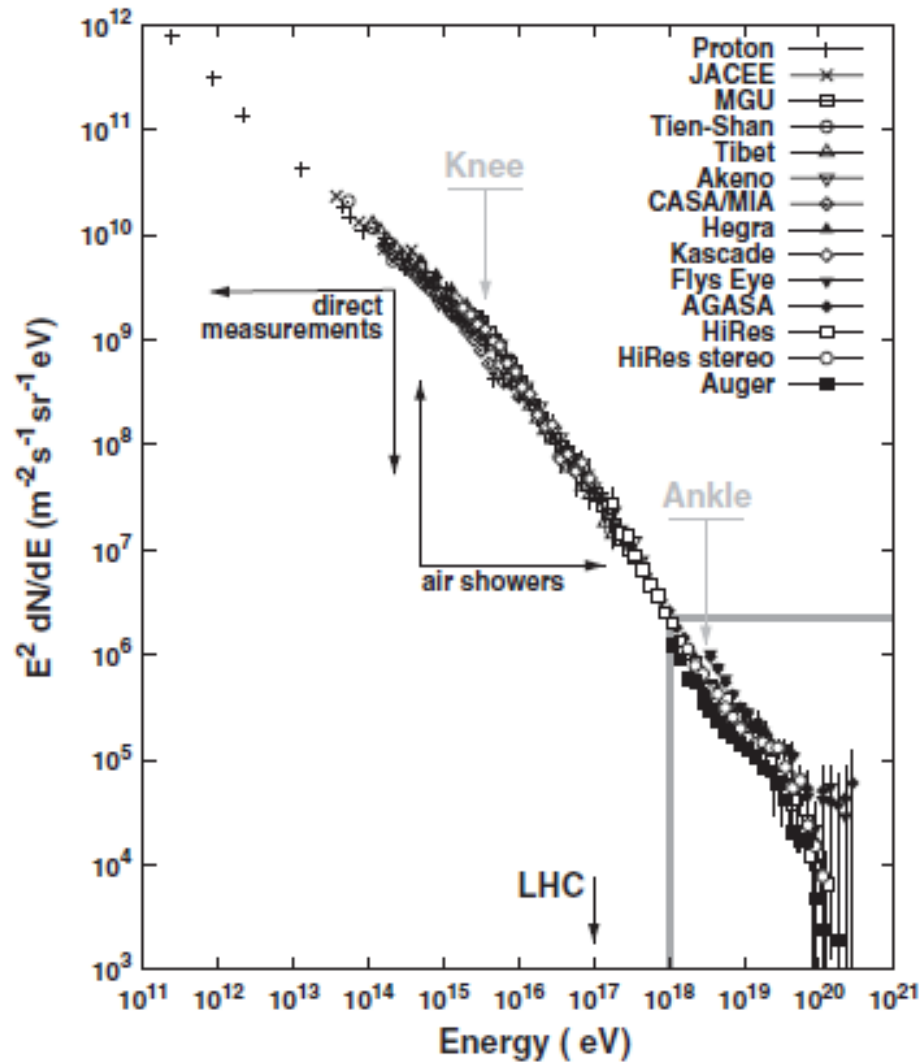
2015年天文学会秋季年会企画セッション
「ガンマ線天文台CTA で切り拓く
次世代の高エネルギー天文学」

2015年9月9日
高原文郎(阪大)

ガンマ線天文学の主要課題

- 宇宙線の起源
 - SNR
 - 星間雲、通常銀河、銀河団、背景放射
- 相対論的ジェットの物理
 - AGN, GRB, Pulsar & Pulsar Wind,,,
- 暗黒物質探査

宇宙線の起源



From Letessier-Sevon & Stanev 2011
RMP 83, 907

銀河宇宙線の理解

- 源 超新星残骸
- 加速 衝撃波統計加速
- 伝播 磁気乱流との散乱、二次粒子生成

□ 理論の展開 衝撃波加速理論

- ◆ 無衝突衝撃波、非線形構造、磁場増幅、
中性粒子の役割、電子と陽子、時間依存性、
閉じ込めと解放、、、

□ 観測的検証

- ◆ 宇宙線直接観測の新展開
- ◆ ガンマ線観測による間接的検証

超新星残骸や星間空間での宇宙線の存在の様子

図1

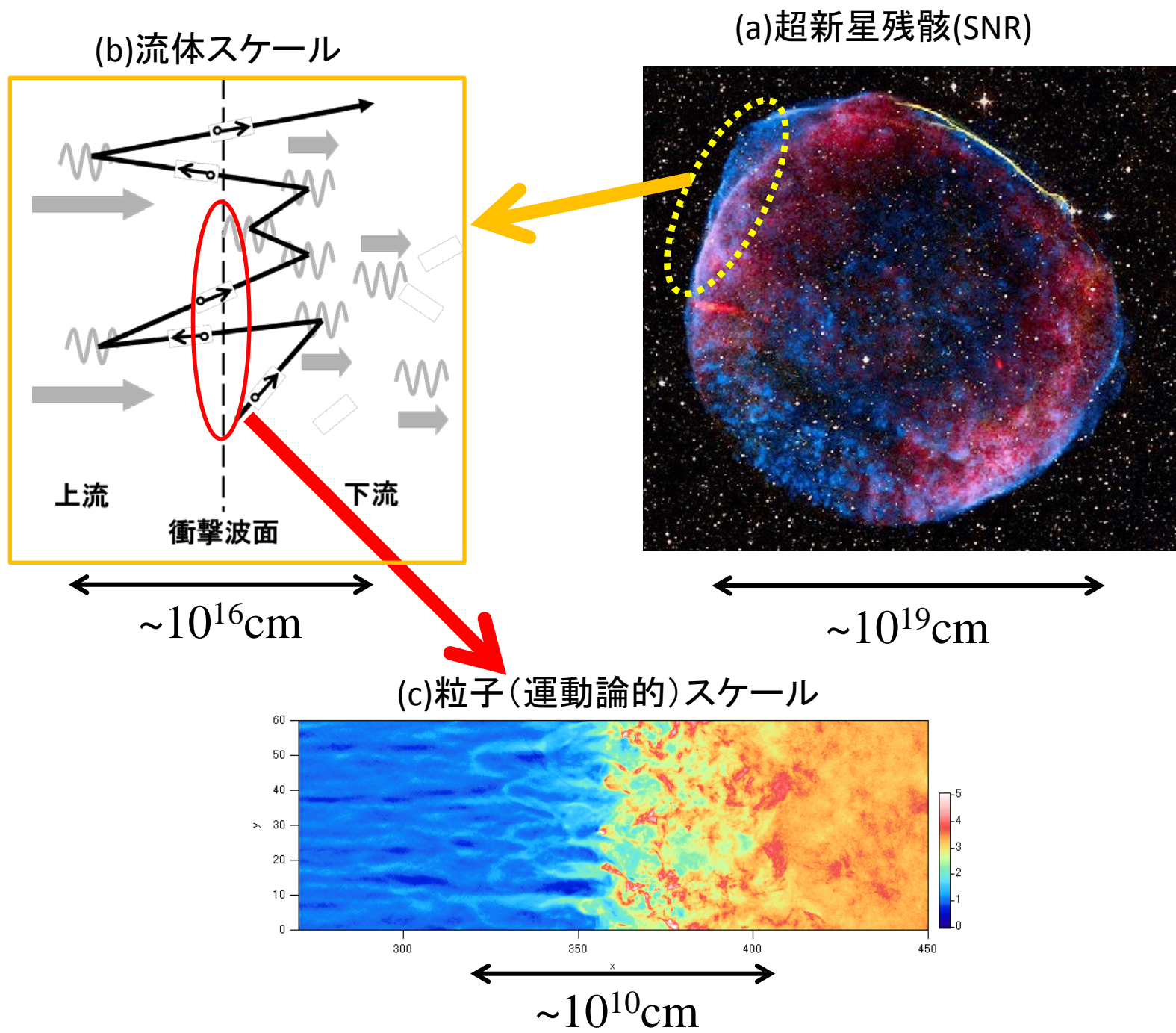
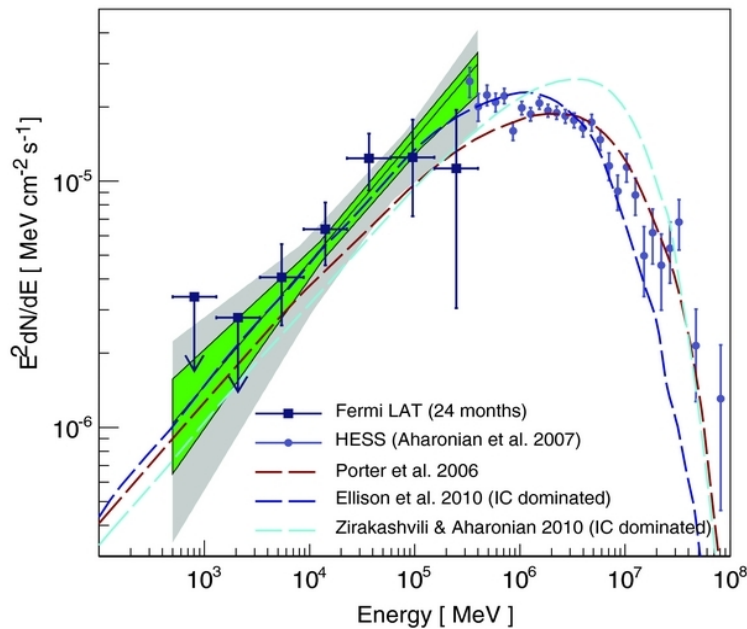
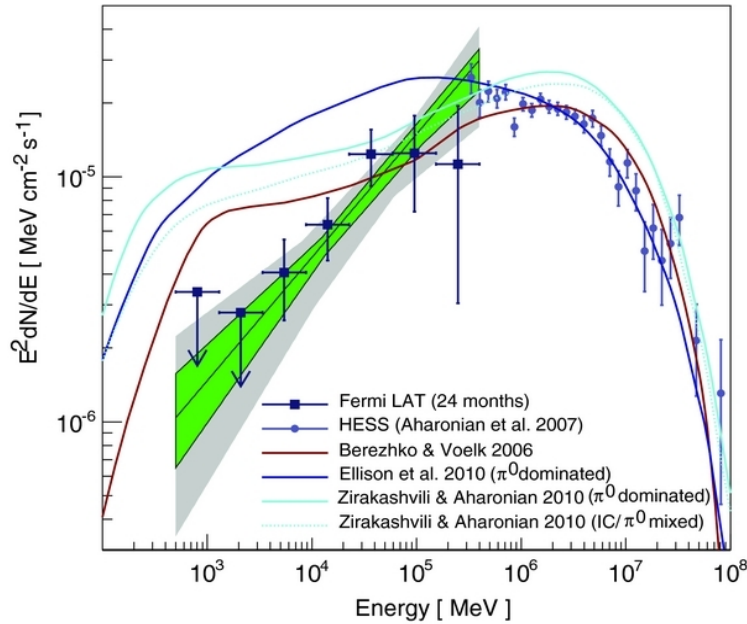
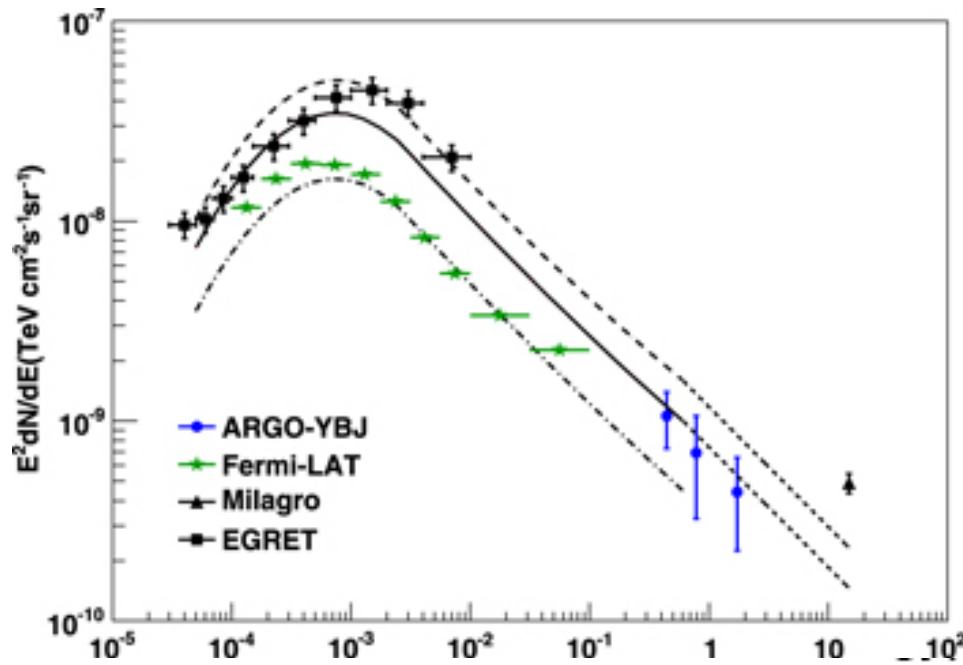


Figure 3 from Observations of the Young Supernova Remnant RX J1713.7–3946 with the Fermi Large Area Telescope
A. A. Abdo et al. 2011 ApJ 734 28
doi:10.1088/0004-637X/734/1/28

Hadronic vs Leptonic

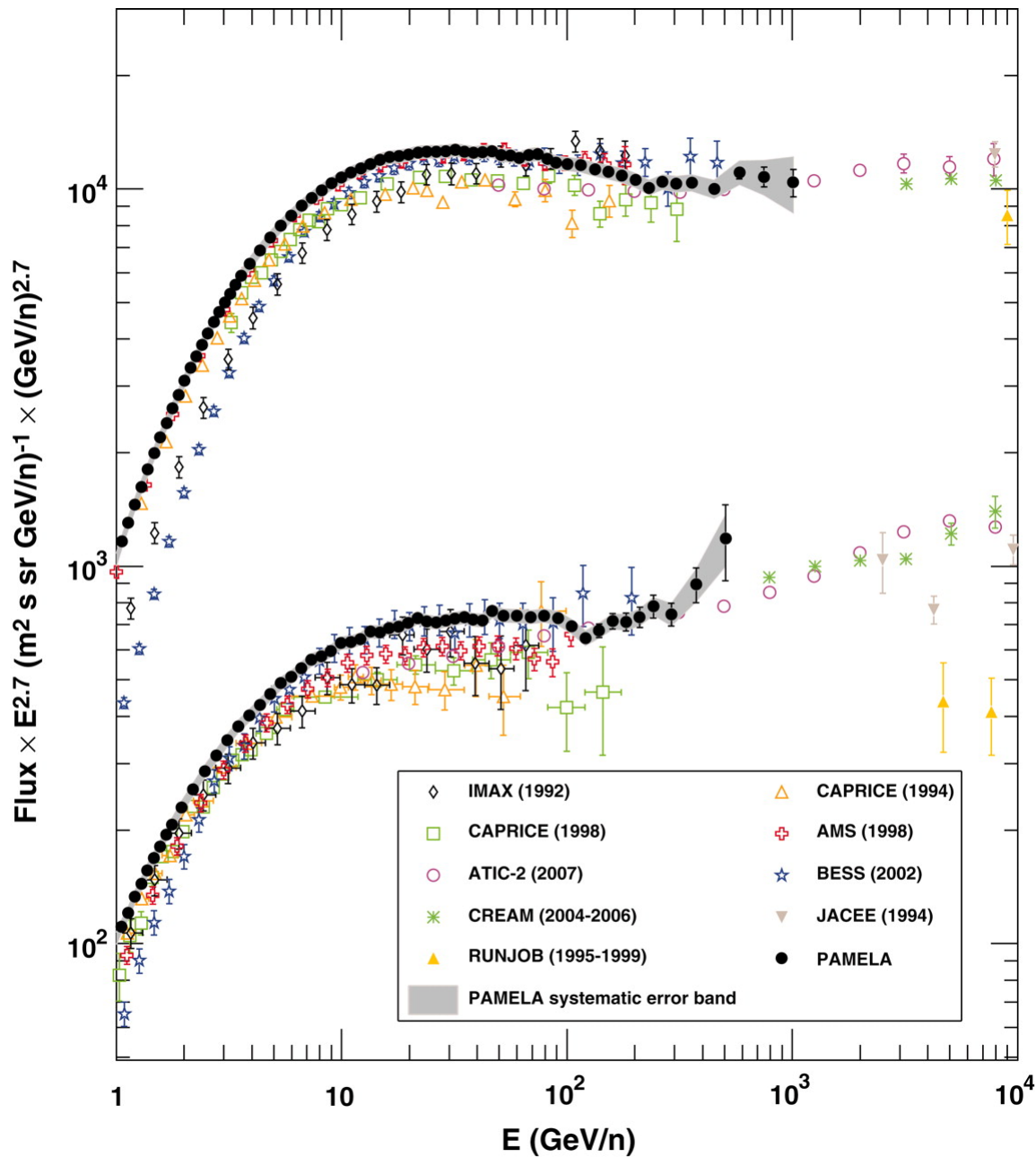
Maximum energy far below the knee





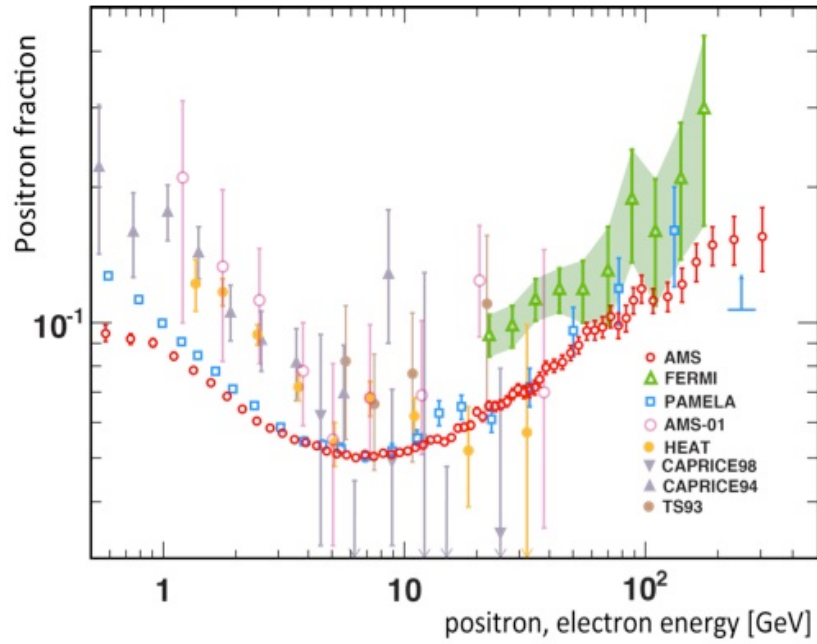
Bartoli et al.
Ap.J 806:20 (2015)

Figure 5. Energy spectrum of the diffuse gamma-ray emission measured by ARGO-YBJ in the Galactic region $65^\circ < l < 85^\circ$, $|b| < 5^\circ$ (dots). The solid line shows the flux according to the *Fermi*-DGE model. The short-dashed line represents its extension following a power law with spectral index -2.6 . The EGRET results (squares) in the same region are also shown. The Milagro result (triangle) for the Galactic region $65^\circ < l < 85^\circ$, $|b| < 2^\circ$ is also given. The long-dashed line and its extension (short-dashed line) represent the flux in this region according to the *Fermi*-DGE model. The spectral energy distribution of gamma-ray emission measured by *Fermi*-LAT in the Galactic region $72^\circ < l < 88^\circ$, $|b| < 15^\circ$ is also reported (stars). The flux in the same region expected from the *Fermi*-DGE model is shown as a dot-dashed line.



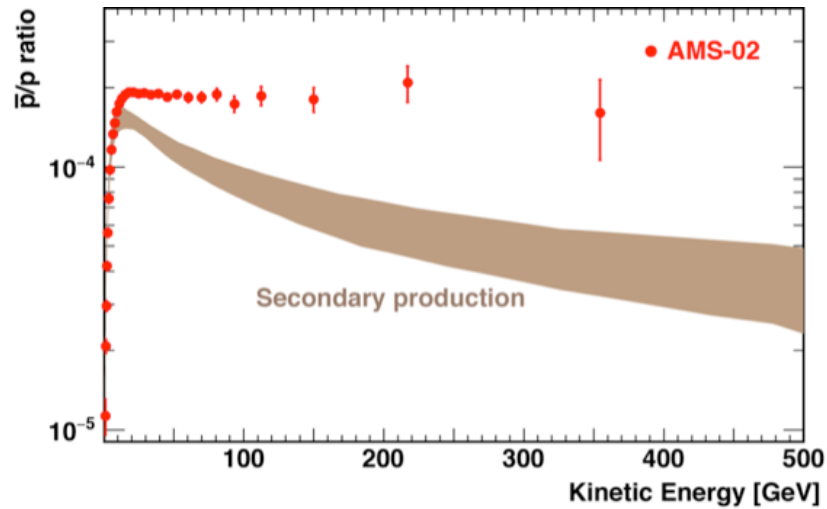
Adriani et al. Science 332, 69 (2011)

Proton and helium absolute fluxes measured by PAMELA above 1 GeV per nucleon, compared with a few of the previous measurements ([16–24](#)).



Positron excess

AMS homepage



Anti-proton excess

Implications (1)

1. 源の供給スペクトルに折れ曲がりがある？
 - 非線形理論
2. 源が2種類ある？ (Tommasetti & Danato ApJ 803 (2015) L15)
 - Soft sources (数100GeV以下) Old SNRs?
 - Hard sources (数100GeV以上) Young SNRs?
 - Knee energy まで加速する源は？
3. 宇宙線伝播機構が異なる？
(Aloisio & Blasi JCAP07 (2013) 001)
 - 低エネルギーでは self-excited Alfvén waves
 - 高エネルギーでは external MHD turbulence

Implications (2)

- 源での2次粒子生成

- 物質通過量 星間物質 $\sim 1 \left(\frac{E}{\text{GeV}} \right)^{-\delta} \text{ g cm}^{-2}$
源 $nm_p c\tau \sim 10^{-2} \left(\frac{\tau}{10^5 \text{ yr}} \right) \text{ g cm}^{-2}$

- 1次粒子のエネルギーがTeV以上では

- 源 (Old SNRs) での寄与が卓越する可能性

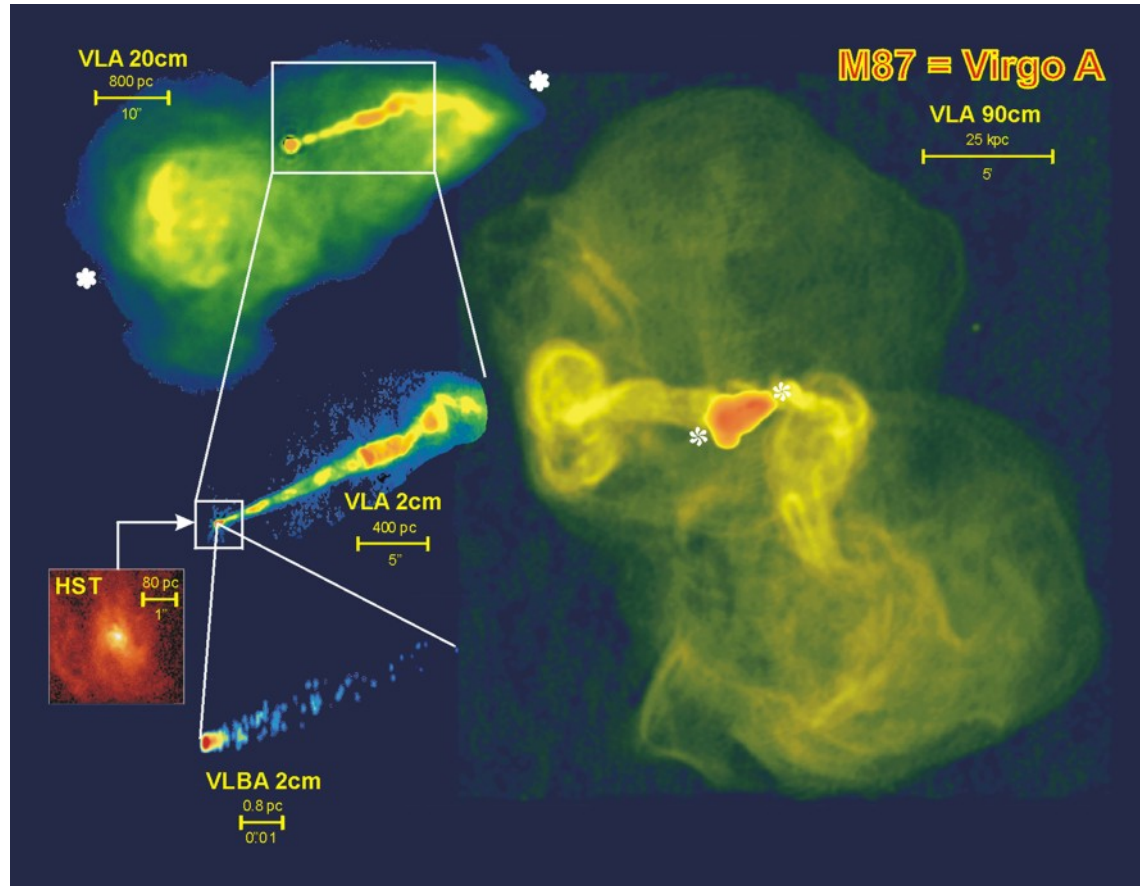
- 2次粒子スペクトルは高エネルギー側でhardになる

- Old SNRsの電磁波観測で検証できるか？

- 2次電子陽電子の高エネルギースペクトルの検証

- 宇宙線はどの時期にSNRから逃れるのか？

相対論的ジェット



NRAO gallery

相対論的ジェットを理解

□ 形成機構

- BH電磁気学
- 組成 (BH磁気圏への粒子注入)
- バルク加速

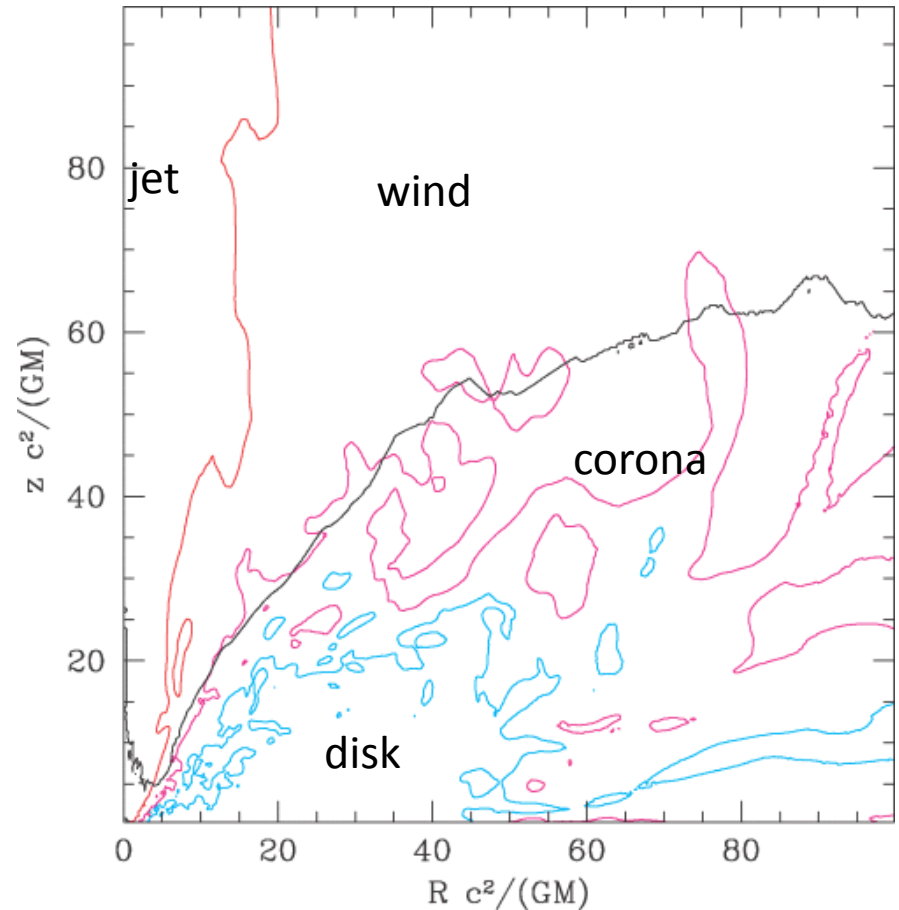
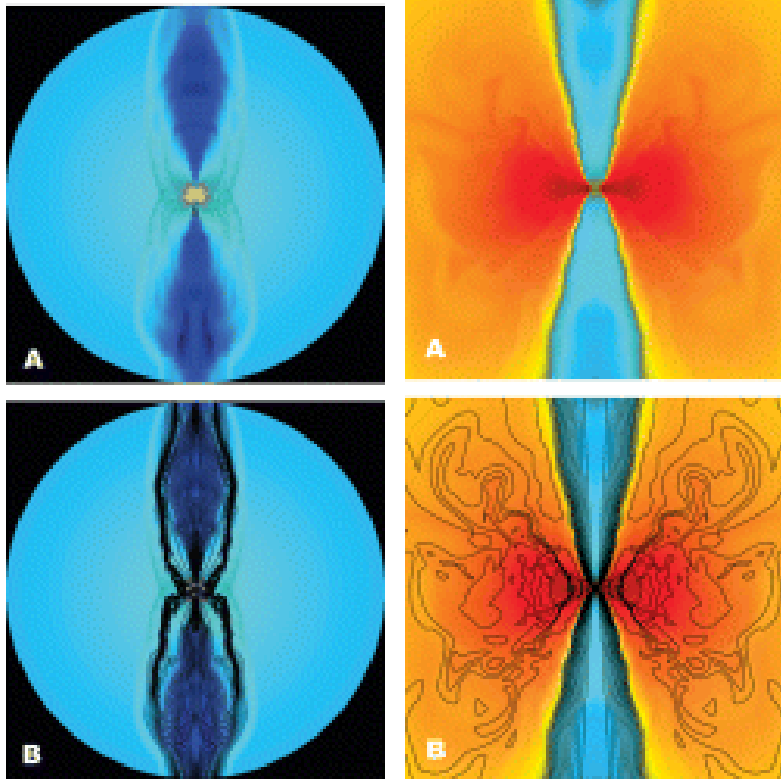
□ 散逸機構

- 内部衝撃波、再収束衝撃波、磁場再結合
- 粒子加速 (DSA、フェルミ2次加速、、、)

□ 観測的検証

- ブレーザースペクトルの多成分性
 - ハドロン成分は見えるか？
- AGN Unification
 - ブレーザー以外のAGNの観測

McKinney (2006) M.N. 368, 1561

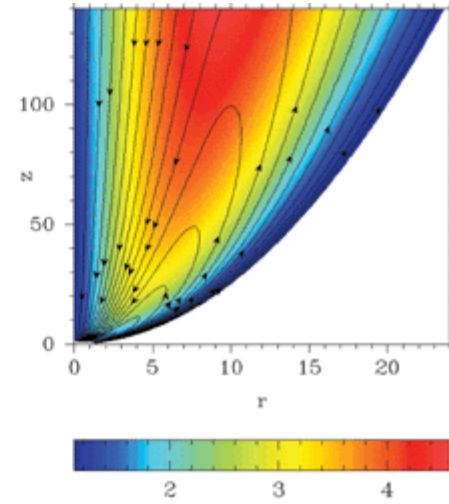
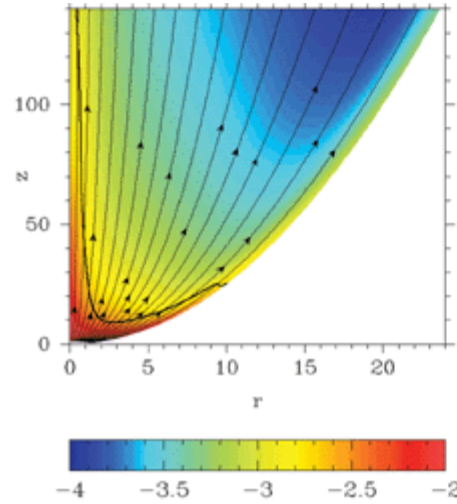


$r \leq 10^4 r_g$
A: density
B: Mag. Field

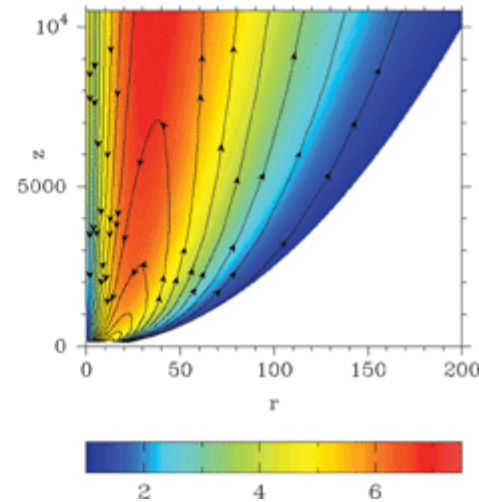
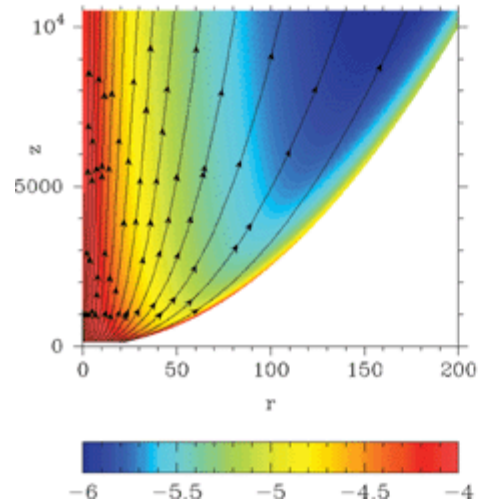
$r \leq 10^2 r_g$
A: density
B: Mag. Field

Komissarov, Barkov, Vlahakis & Konigl (2007) M.N. 380, 51

left:
 $\Gamma\rho$ with B field



right:
 Γ with j field



ジェット形成の理解の進展

- 軸付近の真空領域 (EM field dominated) の存在
- 物質注入 (電子陽電子対、
相対論的中性子 (Toma & FT 2012 ApJ 754, 148))
- 外圧による閉じ込め
 - 軸付近は高密度低速領域
 - 表面付近を除く主要領域で「希薄波加速」が起こる
- M87の1.3mm VLBI観測 (Doeleman et al. 2012 Science 338, 335)
 - 5 – $10r_s$ サイズを分解
 - この領域のシンクロトロン自己吸収解析は $U_B \gg U_e$ を示す (Kino, FT et al. 2015 ApJ 803, 1)

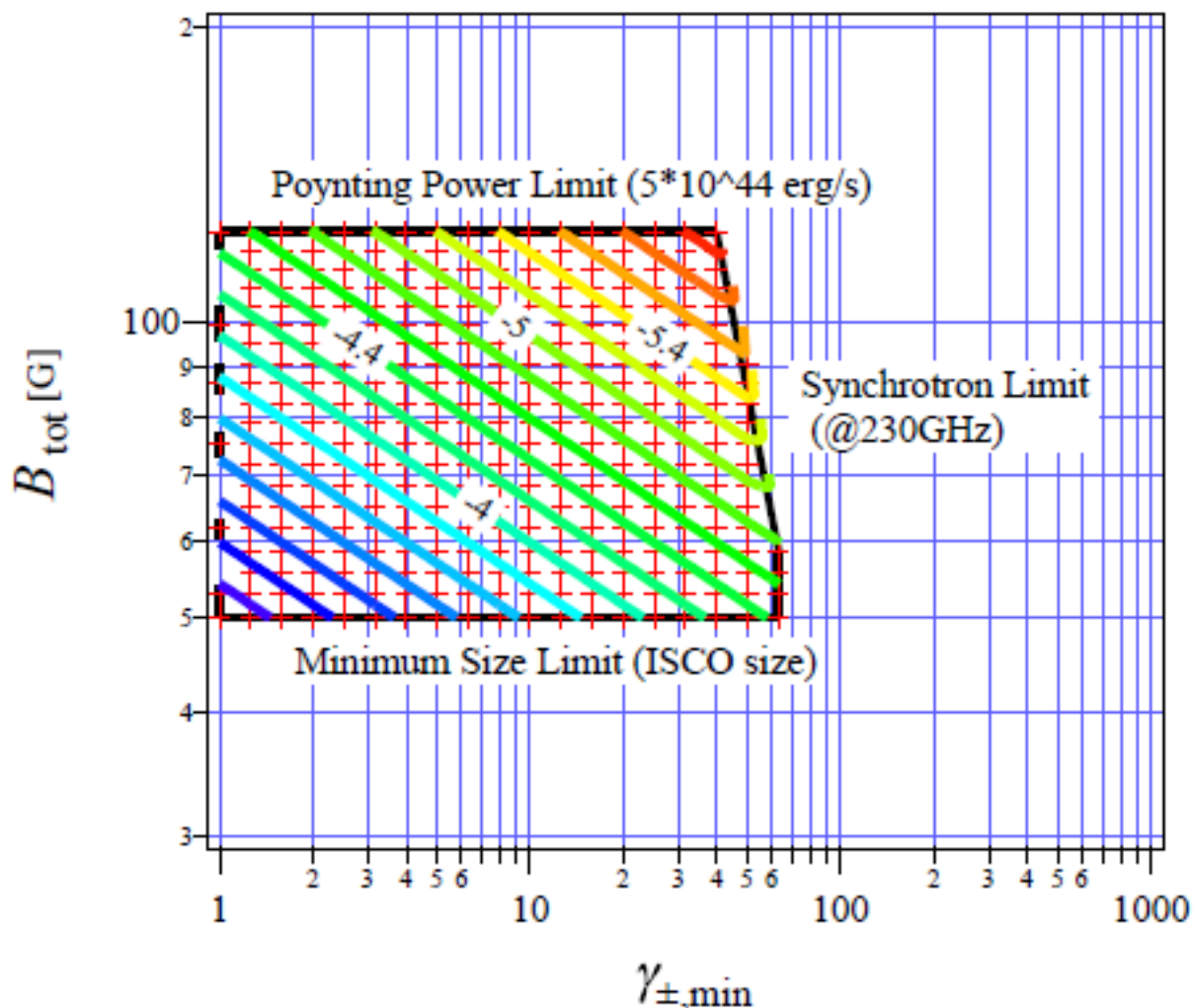


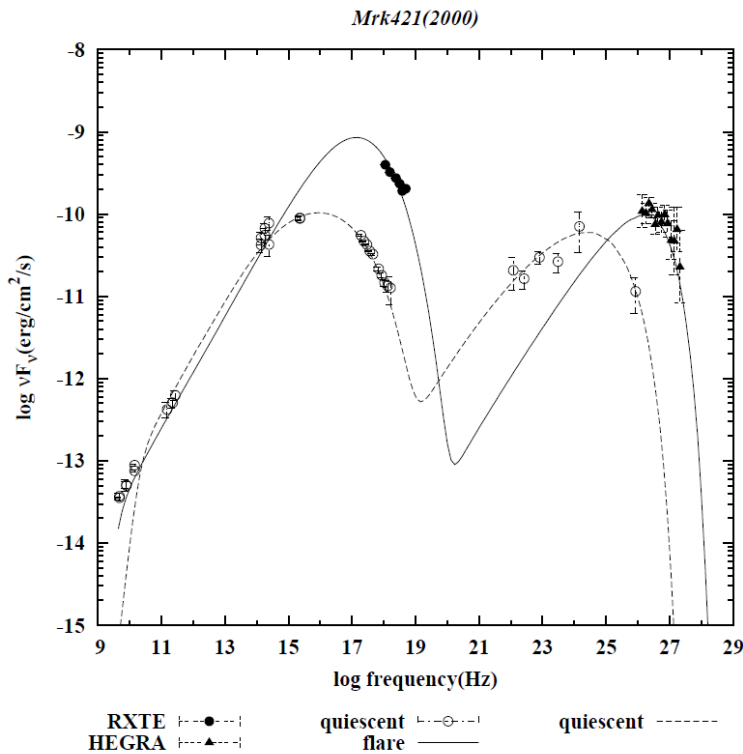
FIG. 3.— The allowed region of $\gamma_{\pm, \text{min}}$ and B_{tot} (the red cross points enclosed by the black trapezoid). The colored contour lines show the allowed $\log(U_{\pm}/U_B)$. The tags $\log(U_{\pm}/U_B) = -4, -4.4, -5,$ and -5.4 are marked as reference values. The physical quantities and parameters adopted are $L_{\text{dot}} = 5 \times 10^{44} \text{ ergs}^{-1}$, and $p = 3.0$.

Blazar spectra (1)

- 基本的にはLeptonic scenario Synchrotron+Comptonで説明できる
- ガンマ線スペクトルや電子スペクトルは
単純な「衝撃波加速+冷却」ではフィットできない例が多々ある
- 電子の最大エネルギーが一理論予測より数桁小さい

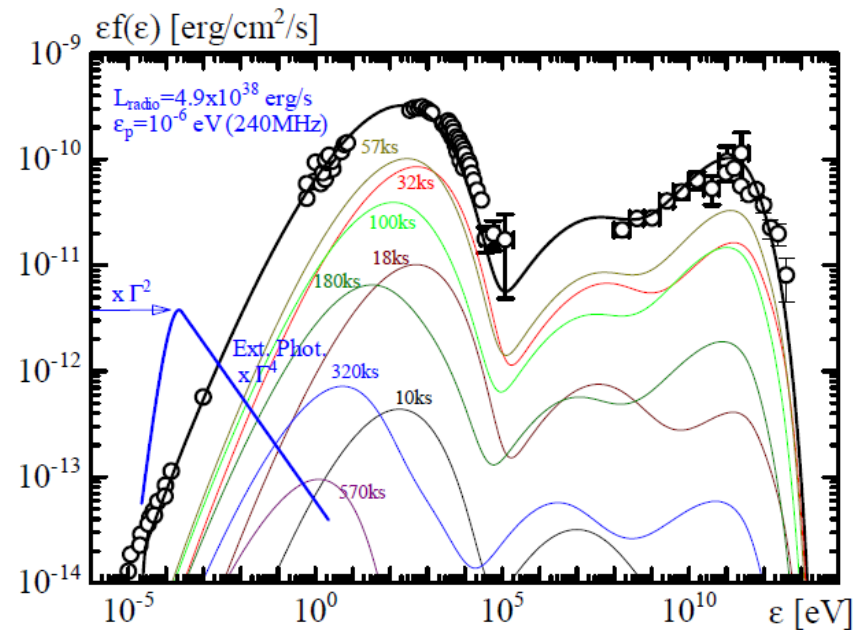
$$\gamma_{\max} = \frac{v_s}{c} \left[\frac{9eB}{80(u_B + u_{\text{soft}})\sigma\xi} \right]^{1/2} \quad (\text{S.Inoue \& FT 1996})$$

- **2次フェルミ加速の可能性？**
- Log-parabolicの方がフィットがよい場合が多い
 - これは2次フェルミ加速を意味するか？
 - この関数形は加速素過程の**グリーン関数**に対応している
 - **むしろ、インジェクション過程の非連続性を示唆するのでは？**



岩清水修論 (2002)
Shock acc.+cooling

Mrk 421 with Ext. Radio Photon



Asano et al. (2013) Ap.J.
A specific multi-zone;
2-nd Fermi acc.
Injection history dependent

Kakuwa et al. MN (2015)

one-zone; 2-nd Fermi; diffusive escape

Table 1. Physical parameters used in the calculation shown in Figure 2.

unit	Γ	B G	R_{esc} 10^{14}cm	V 10^{47}cm^3	L_{inj} 10^{39}erg s^{-1}	β_w	q	$\zeta\lambda_{\text{max}}^{1-q}$ 10^{-14}cm^{1-q}	γ_{inj}
Mrk 421	35	0.081	3.5	1.9	1.6	0.16	1.85	4.7	10
Mrk 501	31	0.014	28	95	15	0.23	1.92	0.12	10

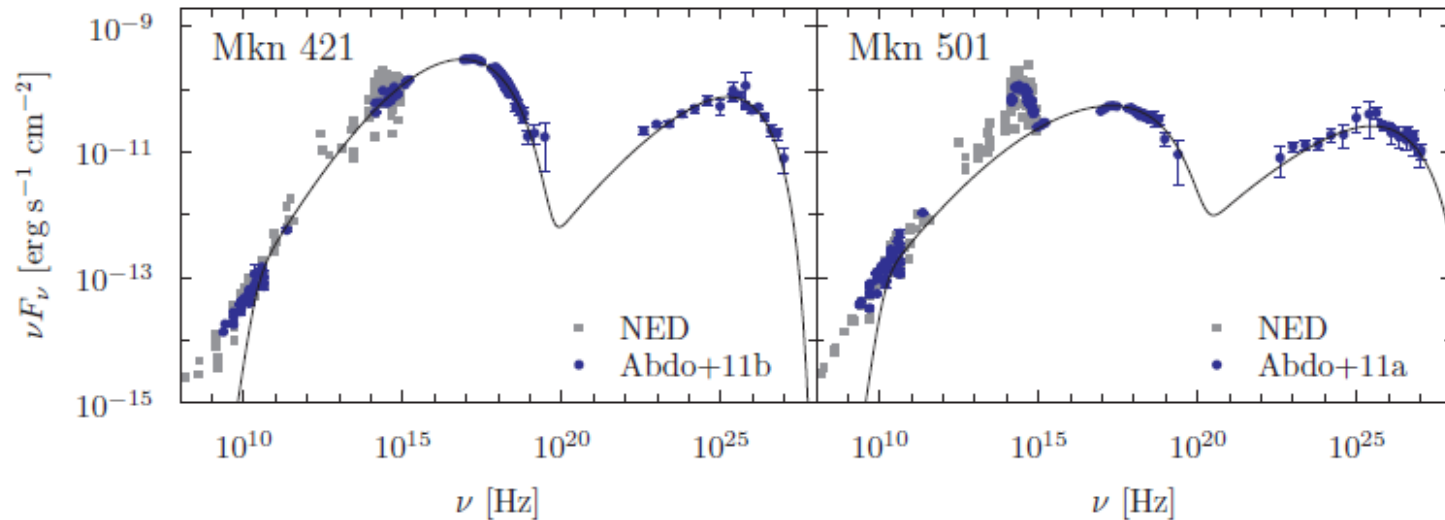


Figure 2. Comparison between the model SEDs (solid curve) and the observational ones (blue circle). The left panel is for Mrk 421, and the right panel is for Mrk 501, where the observational data are taken from Abdo et al. (2011b) and Abdo et al. (2011a), respectively. Non-simultaneous archival data taken from NED are plotted with the gray squares below 10^{15} Hz, for reference.

Blazar spectra (2)

- 陽子が含まれていればこれも加速されるのが自然
- Hadronic componentは見えるか？
 - Photo-meson production + cascade
$$p + \gamma \rightarrow p(n) + \pi^0(\pi^+)$$
 - Bethe-Heitler + electron/positron synchrotron
$$p + \gamma \rightarrow p + e^+ + e^-$$
- Cons: 断面積が小さい。閾値が大きい。
- Pros: 陽子はより高エネルギーまで加速されうる。
エネルギー密度も電子より大きくてよい。
- Secondary electrons/positronsはPrimary electronsより高エネルギーにインジェクションされる
- Secondary electron/positronによるシンクロトロン放射やコンプトン散乱成分は見えるか？

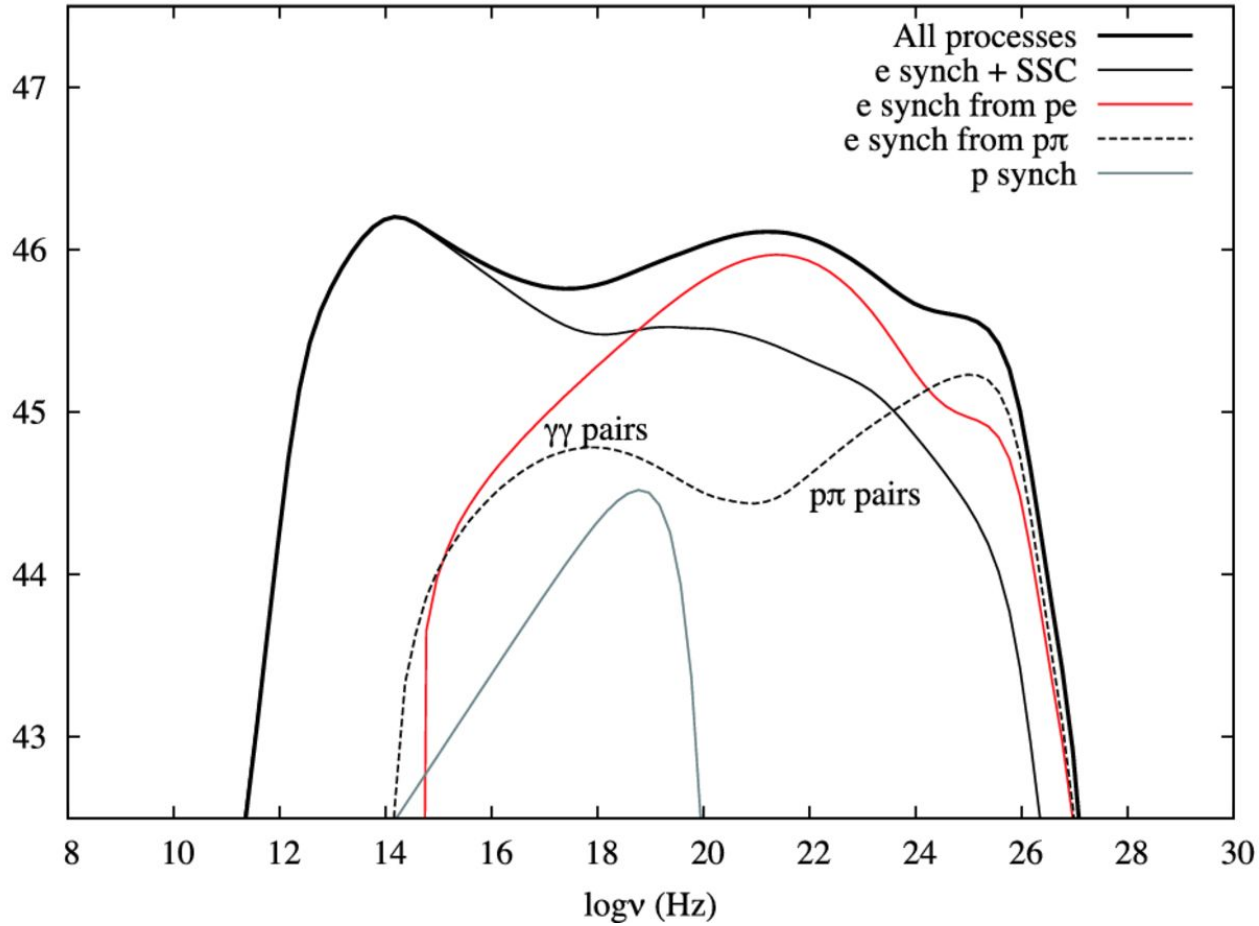


Table 1. Input parameters for the base-line models discussed in text.

Parameter	Model A	Model B
B (G)	0.1	10
r_b (cm)	3×10^{16}	3×10^{15}
δ	30	15
$\gamma_{e,\min}$	1	3×10^2
$\gamma_{e,\max}$	3×10^5	3×10^6
s_e	2.0	2.5
ℓ_e^{inj}	1.2×10^{-6}	2×10^{-3}
$\gamma_{p,\min}$	1	1
$\gamma_{p,\max}$	1.2×10^7	6.3×10^6
s_p	2.0	2.0
ℓ_p^{inj}	10^{-3}	1.2×10^{-2}

まとめ(1)宇宙線の起源

- SNR
 - Leptonic/Hadronicの切り分け
 - 年齢、環境によって加速される宇宙線はどう異なるか？
 - **knee energy CRはどこで生成されるか？**
 - 源内部で生成される二次粒子の寄与の程度
 - **e^{\pm} 、 \bar{p} 異常問題**
 - 源周囲と星間空間での伝播過程
 - **Spectral break と非等方性の起源、CR generated MHD waves**
- Galaxies, Clusters & Background
 - 宇宙線の普遍性
 - CRs above the knee energy, ICECUBE neutrinos との関連

まとめ(2) 相対論的ジェット

- 多成分の切り分け
 - Internal shocks/recollimation shocks
 - Leptonic/hadronic
 - ガンマ線にハドロン起源成分が見えるか？
- 粒子加速過程
 - DSA, 2-nd Fermi, B-reconnection
 - Log-parabolic spectrumの意味
 - Impulsive injection
- ジェットの起源
 - 理論の進展 BH電磁気学の理解が進む
 - M87 EHT Horizonスケールの分解