

マイクロクエーサーSS 433 からのガンマ線放射

東北大学(学振PD)

木村成生 (Shigeo S. Kimura)

参考文献

Kimura, Murase, Meszaros, 2020, ApJ, 904, 188

2020年度高エネルギー宇宙物理学研究会 2020/12/14



目次

- マイクロクエーサー SS 433
- モデルと物理過程
- 結果と議論
- まとめ

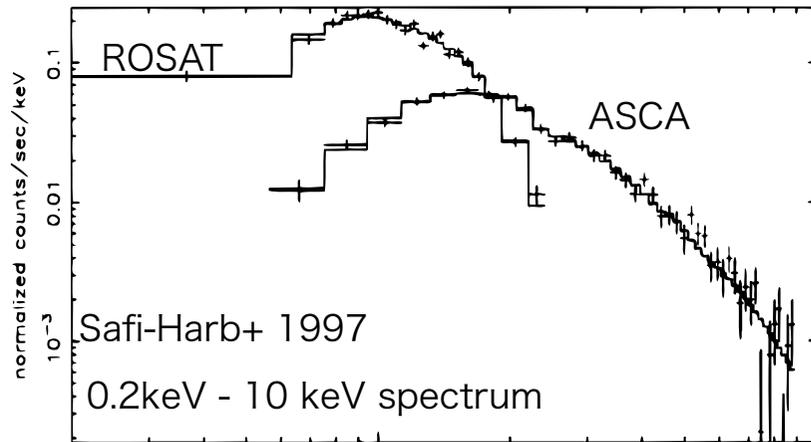
目次

- マイクロクエーサー SS 433
- モデルと物理過程
- 結果と議論
- まとめ

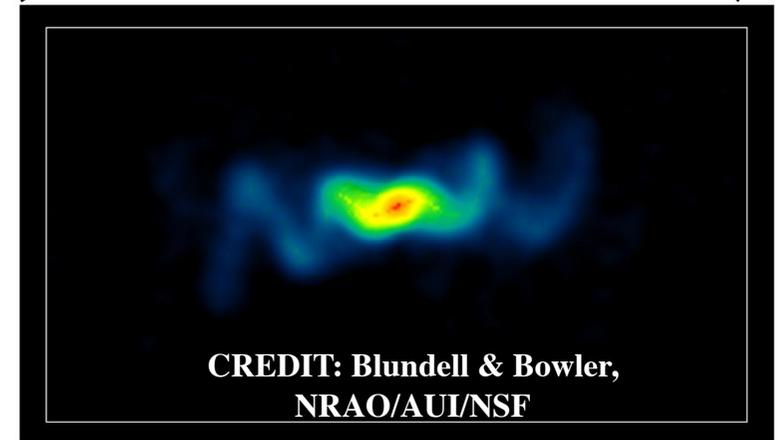
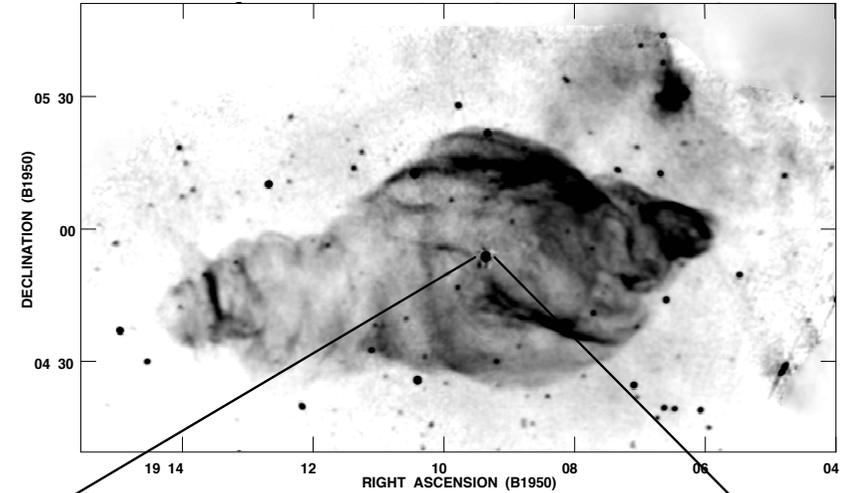
マイクロエーサー SS 4 3 3

See Fabrika 2004 for review

- 歳差運動しているジェットが存在
- W50星雲（超新星残骸？）が付随
- ジェットとW50星雲が相互作用
→X線や可視光で輝く

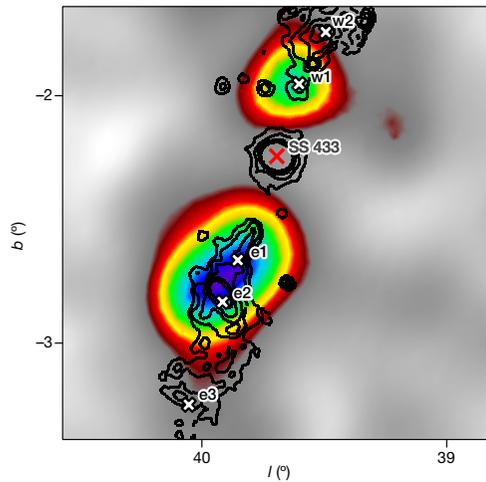
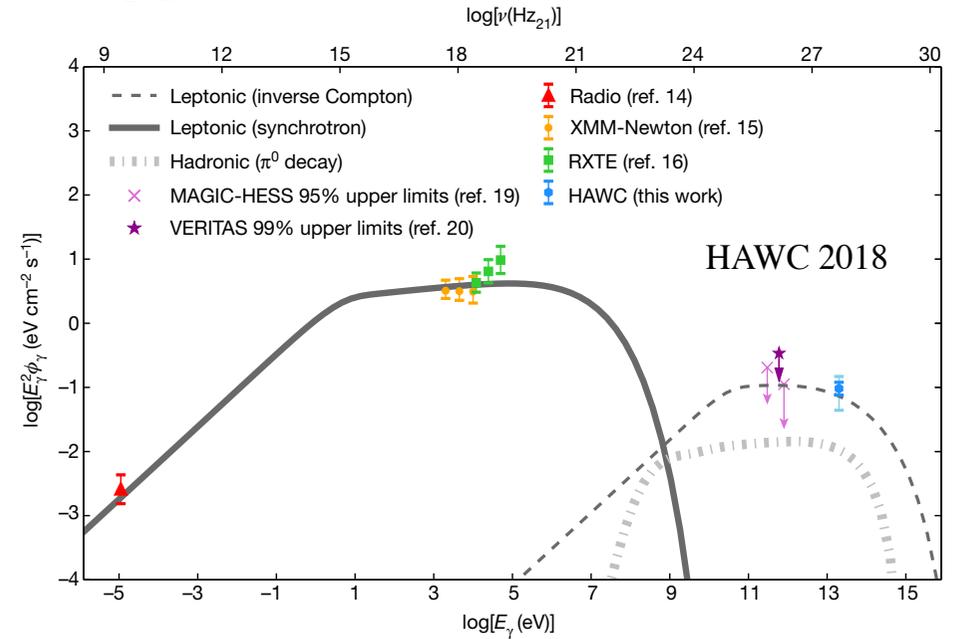


ASCA: Kotani et al. 1998

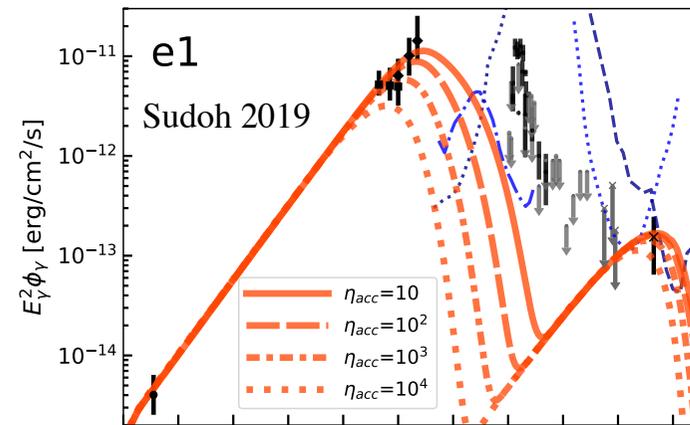


SS433からのTeVガンマ線

- HAWCがSS433の広がったジェットからTeVガンマ線を検出
→ マイクロクエーサーから初
- Leptonic model :
シンクロトロン + 逆コンプトン (CMB)
- 広帯域スペクトルをフィット



HAWC 2018

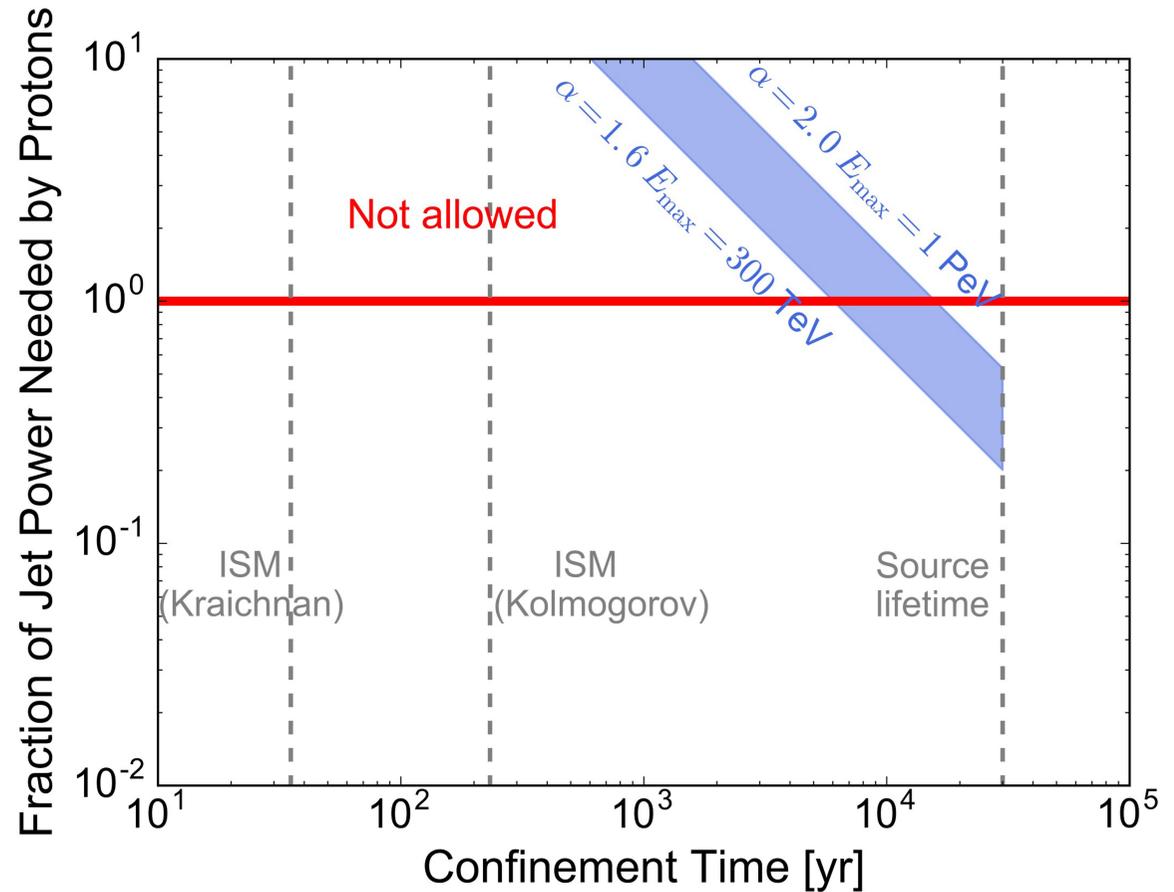


SS433からのTeVガンマ線

HAWC 2018

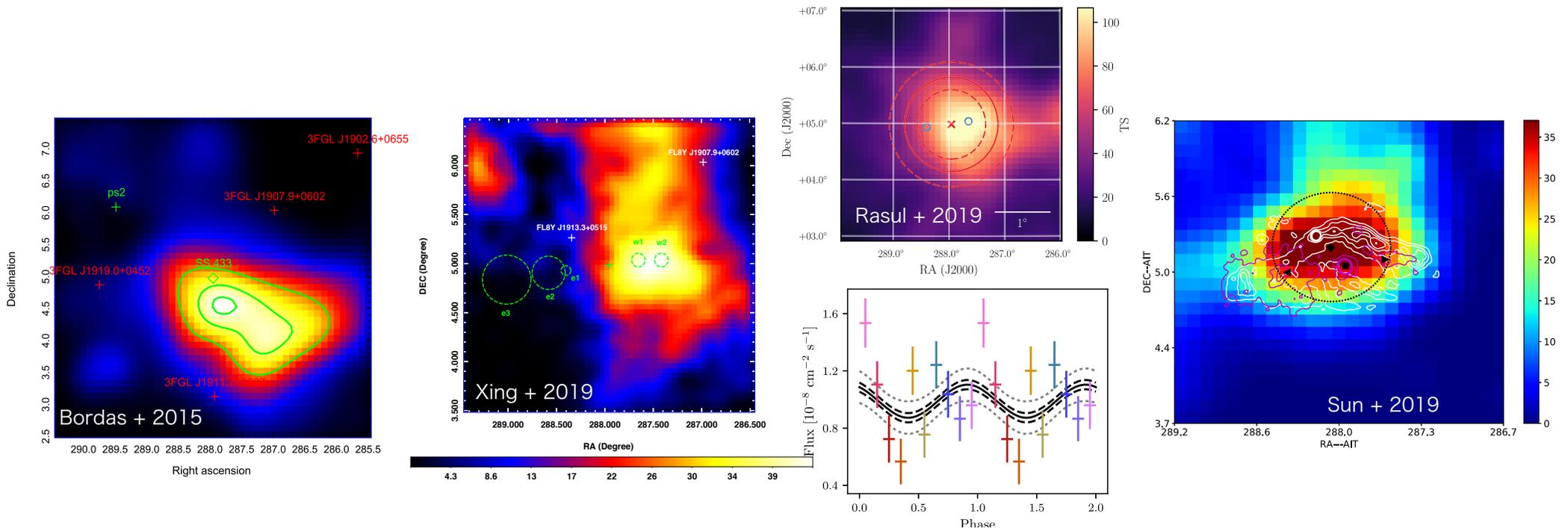
- HAWCがSS433の広がったジェットからTeVガンマ線を検出
→ マイクロクエーサーから初
- Hadronic model :
 $p + p \rightarrow p + p + \pi$
 $\pi \rightarrow 2\gamma$
- energetics から好まれない

これは背景密度が
 $n = 0.05$ 個/cc
 だった場合の結論



SS433からのGeVガンマ線

- Bordas + 2015: SS 433の南東にGeV天体を検出 ← ジェット軸から外れている
- Xing + 2019: 西側のジェットからGeVガンマ線を検出 ← 東側は検出なし
- Rasul + 2019: 周期的に変光するGeVガンマ線を検出 ← 中心の歳差を反映?
- Sun + 2019: W50全体に広がったGeVガンマ線を検出 ← ジェット起源ではない?



SS433からのGeVガンマ線

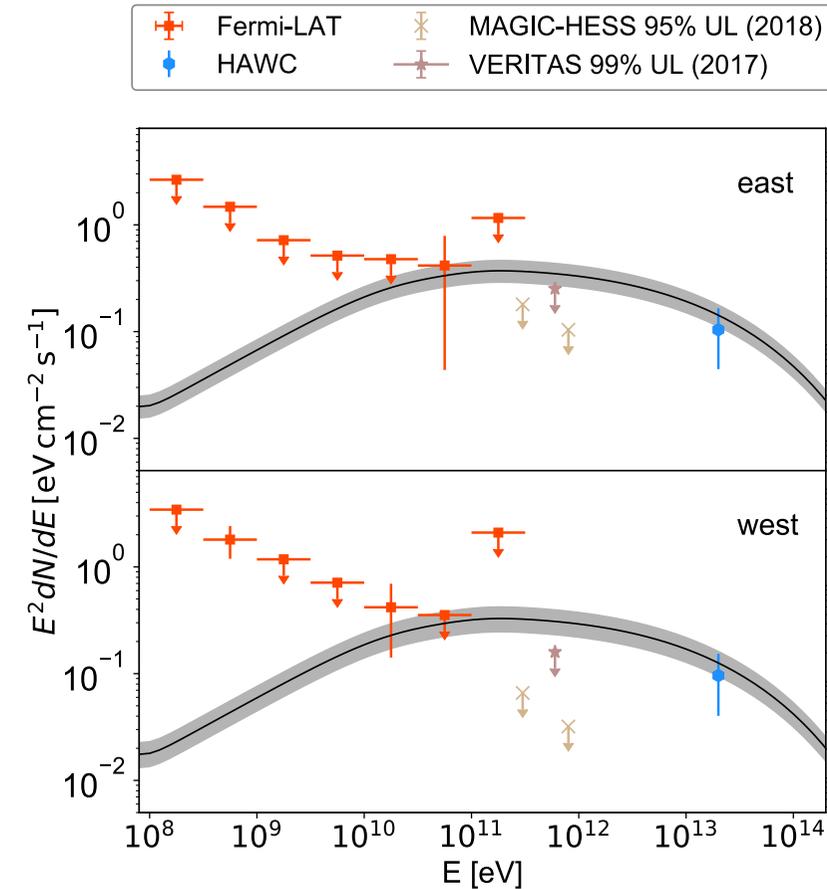
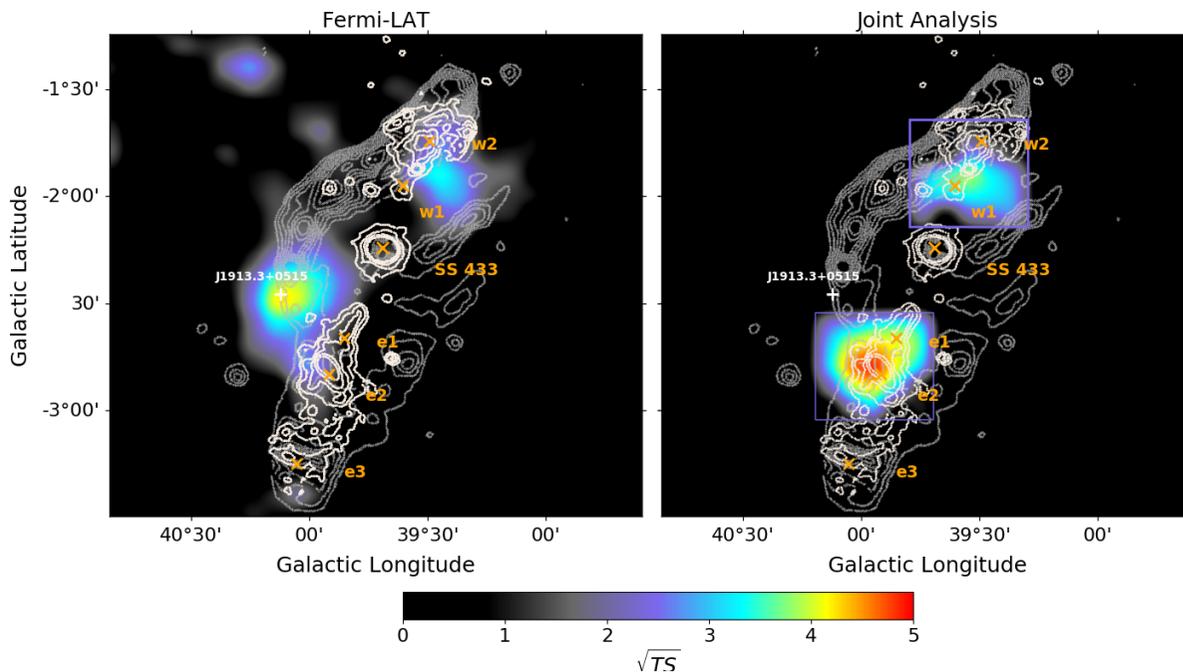
- Fang + 2020

＊上記の4研究は違うPoint source catalogを使っている

＊上記の4研究は違うresponse functionを使っている

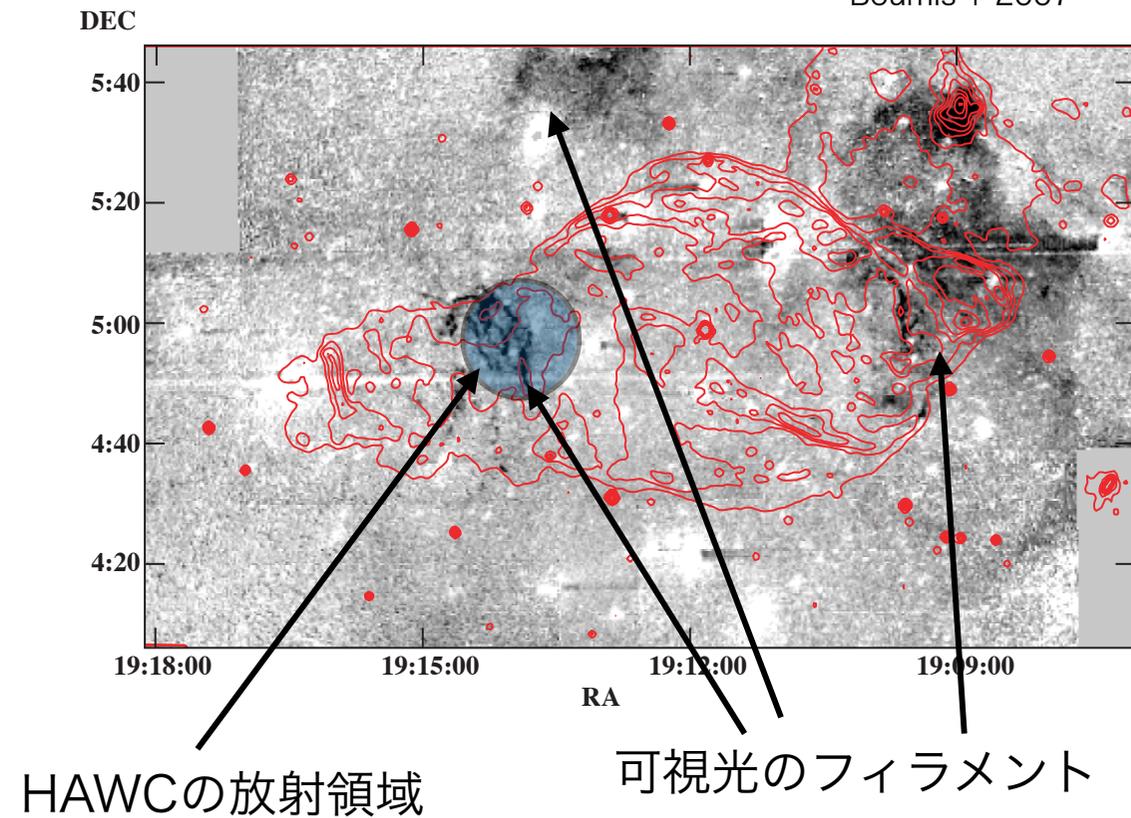
→ SS 433と関係のない点源を引けていない。

- 最新のカタログとresponse functionをHAWCとFermiの両方のデータを使って解析 → フラットなGeV-TeV SED



目的

- TeVガンマ線はハドロン相互作用でも放射される
- SS433のジェットには可視光の輝線で見えるフィラメント構造が付随。その密度は 100 cm^{-3} 程度
→ ハドロン宇宙線と相互作用すれば効率よくガンマ線生成

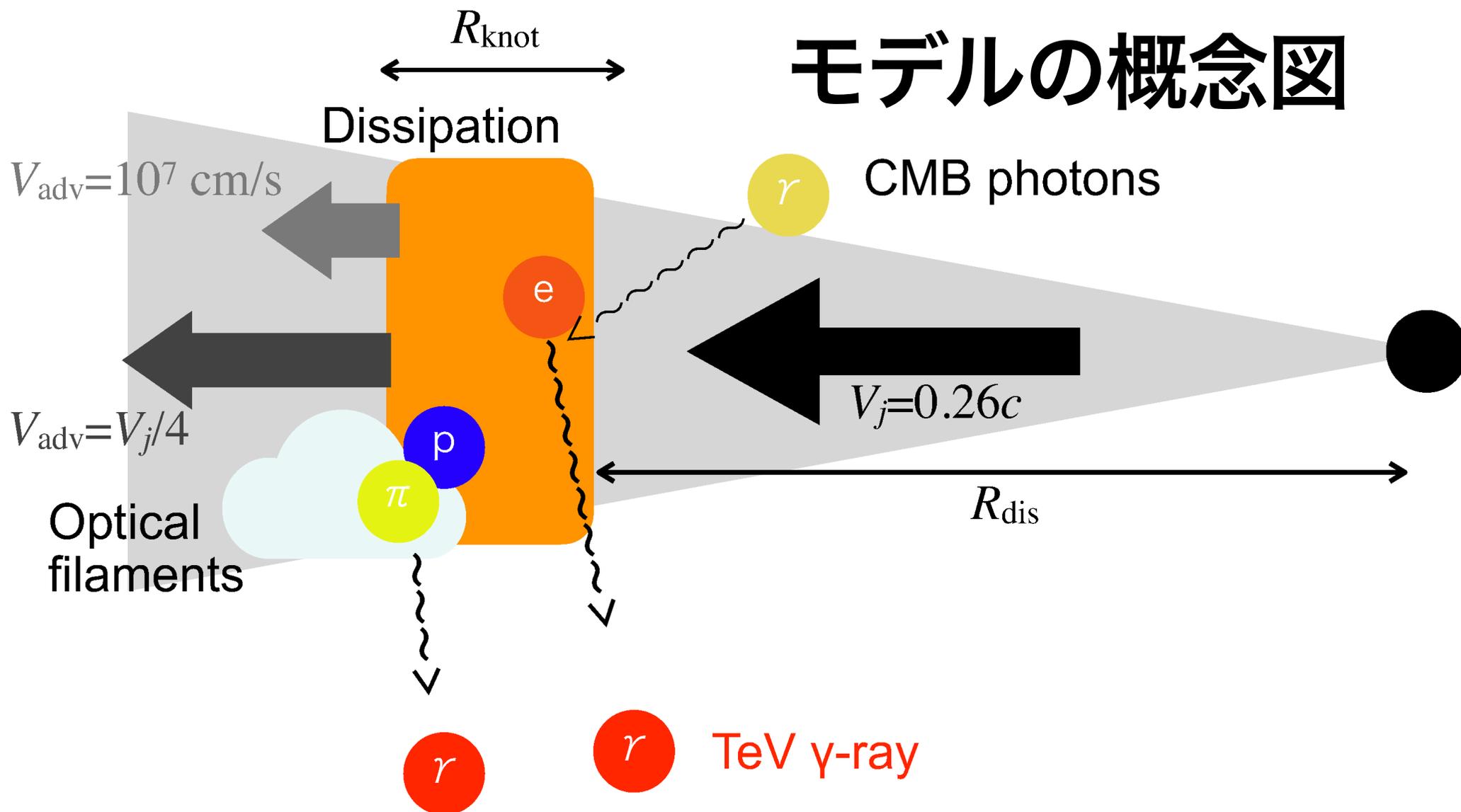


**ハドロンモデルとレプトンモデルの
どちらが良いか議論**

目次

- ・ マイクロクエーサー SS 433
- ・ モデルと物理過程
- ・ 結果と議論
- ・ まとめ

モデルの概念図



基礎方程式

$$N_{E_i} = \frac{4\pi p^2 f_p}{c}$$

$$\frac{\partial N_{E_i}}{\partial t} = \dot{N}_{E_i} + \vec{\nabla} \cdot \left(D_{xx} \vec{\nabla} N_{E_i} - \vec{V} N_{E_i} \right) + \frac{\partial}{\partial E_i} \left(\frac{E_i}{t_{i,\text{cool}}} N_{E_i} + E_i^2 D_{E_i} \frac{\partial}{\partial E_i} \left[\frac{N_{E_i}}{E_i^2} \right] \right)$$

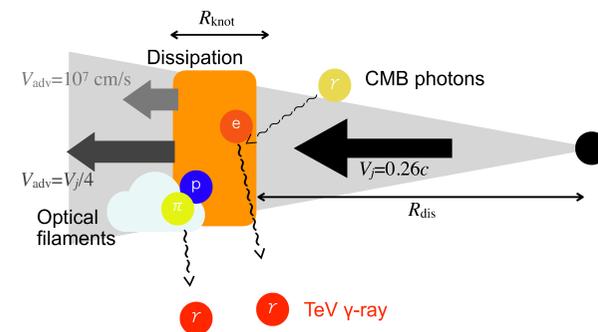
注入
空間拡散
移流
冷却
運動量拡散
(乱流加速)

- 定常 & 乱流再加速を無視 & One-zone近似
→ 単純化した輸送方程式

$$\frac{d}{dE_i} \left(-\frac{E_i}{t_{i,\text{cool}}} N_{E_i} \right) = -\frac{N_{E_i}}{t_{\text{esc}}} + \dot{N}_{E_i}$$

- 単純化した輸送方程式の定式解

$$N_{E_i} = \frac{t_{i,\text{cool}}}{E_i} \int_{E_i}^{\infty} dE'_i \dot{N}_{E'_i} \exp \left(-\int_{E_i}^{E'_i} \frac{t_{i,\text{cool}}}{t_{\text{esc}}} dE'_i \right)$$



物理過程

- 衝撃波加速を仮定→べき型の注入項

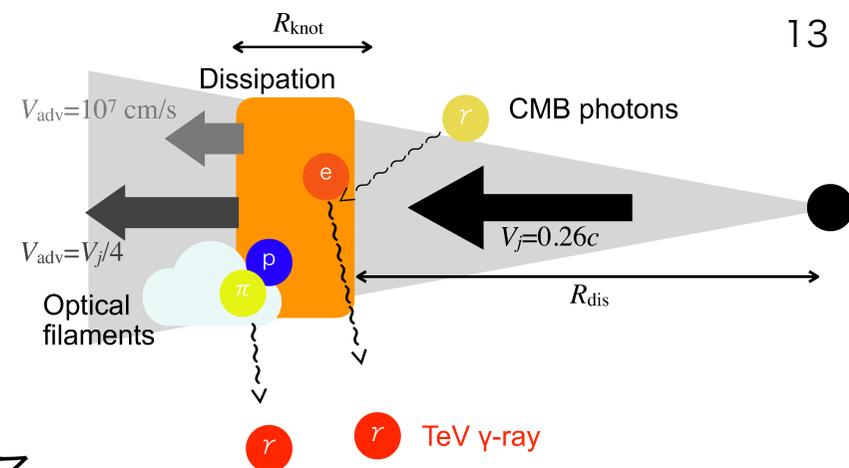
$$\dot{N}_{E_i} = \dot{N}_{i,\text{nor}} \left(\frac{E_i}{E_{i,\text{cut}}} \right)^{-p_{\text{inj}}} \exp\left(-\frac{E_i}{E_{i,\text{cut}}}\right),$$

- 陽子の冷却過程はpp が卓越。p γ は無視できる。

- 電子の冷却はシンクロトロンと逆コンプトン
 - 逆コンプトンの種光子はCMB (Klein-Nishina効果も重要)

- 最高エネルギーは冷却・逃走による損失と加速時間の釣り合い

$$\text{加速: } t_{\text{acc}} \approx \frac{20\xi E_i}{3ceB\beta_j^2}, \quad \text{逃走: } t_{\text{diff}} \approx \frac{\text{拡散}}{2c\xi E_i} \frac{3eBR_{\text{knot}}^2}{2c\xi E_i}, \quad \text{移流} \quad t_{\text{adv}} \approx \frac{R_{\text{knot}}}{V_{\text{adv}}},$$



モデルパラメータ

Fixed parameters

β_j	L_j [erg s ⁻¹]	R_{knot} [pc]	R_{dis} [pc]	ϵ_p	η	d_L [kpc]
0.26	2×10^{39}	8.1	56	0.1	2	5.5

観測から決まっている

Model parameters.

Model	V_{adv} [cm s ⁻¹]	B [μG]	p_{inj}	ϵ_e	n_{eff} [cm ⁻³]
A	1.9×10^9	32	2.0	1.0×10^{-3}	10
B	1.0×10^7	36	1.6	1.5×10^{-4}	0.2
C	1.9×10^9	13	2.1	5.0×10^{-3}	0.01
D	1.0×10^7	18	1.6	2.0×10^{-4}	0.01

- V_{adv} : 移流速度
optical filamentsの移動速度 $\sim 10^7$ cm/s
強い衝撃波: $V_{\text{adv}} \sim V_j/4 \sim 1.9 \times 10^9$ cm/s
- $n_{\text{eff}} = f_{\text{vol}} n_{\text{fil}}$: 有効密度
 $n_{\text{fil}} \sim 100$ cm⁻³はフィラメントの密度
 f_{vol} はvolume filling factor

A: Hadronic + high V_{adv}

B: Hadronic + low V_{adv}

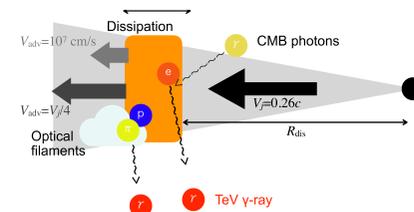
C: Leptonic + high V_{adv}

D: Leptonic + low V_{adv}

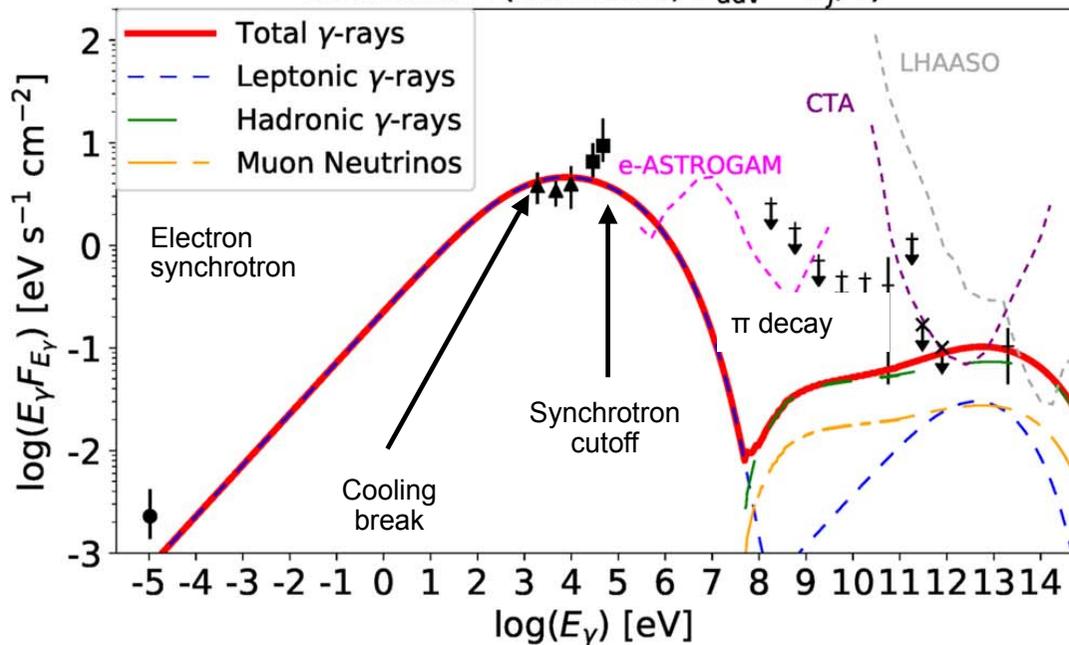
目次

- マイクロクエーサー SS 433
- モデルと物理過程
- **結果と議論**
- 結論

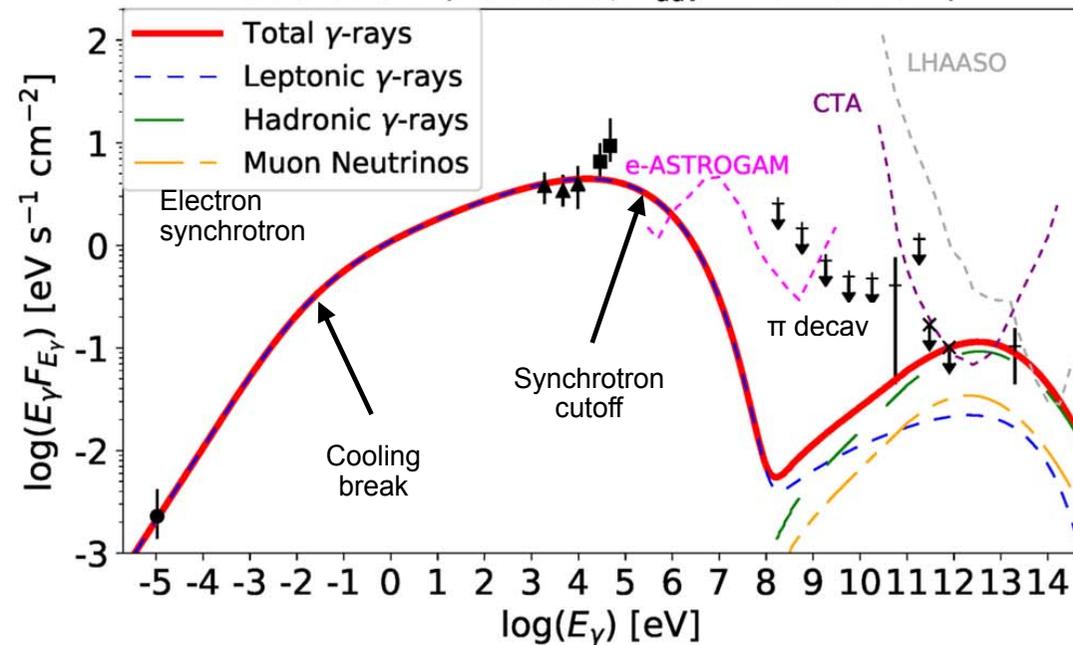
Hadronic models



Scenario A (Hadronic, $V_{adv} = V_j/4$)



Scenario B (Hadronic, $V_{adv} = 10^7 \text{ cm s}^{-1}$)

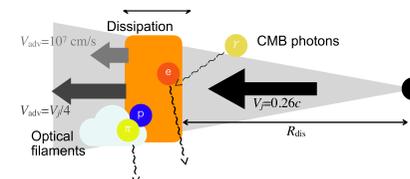


- 移流速度が速いと、cooling breakは高エネルギー側へ
 - * ガンマ線スペクトルはフラットになり観測と無矛盾
- 移流速度が遅いと、cooling breakが低エネルギー側にシフト
 - * 電波を出しすぎないためには、硬いスペクトル指数が必要
 - * 陽子の逃走によるbreakでガンマ線スペクトルを説明

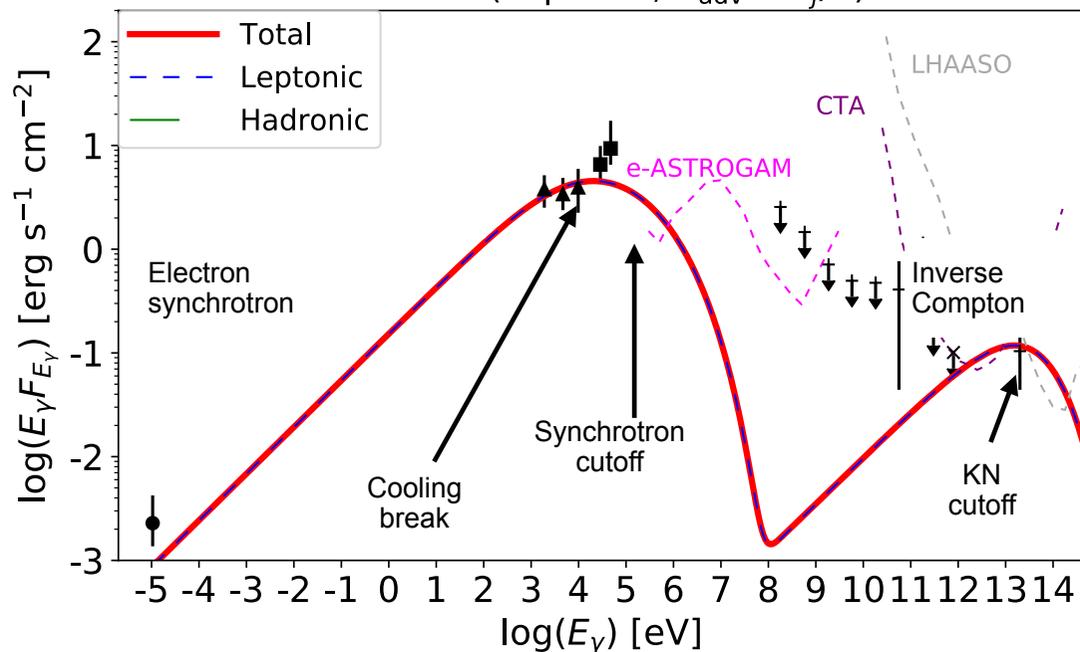
Model parameters.

Model	V_{adv} [cm s ⁻¹]	B [μG]	p_{inj}	ϵ_e	n_{eff} [cm ⁻³]
A	1.9×10^9	32	2.0	1.0×10^{-3}	10
B	1.0×10^7	36	1.6	1.5×10^{-4}	0.2
C	1.9×10^9	13	2.1	5.0×10^{-3}	0.01
D	1.0×10^7	18	1.6	2.0×10^{-4}	0.01

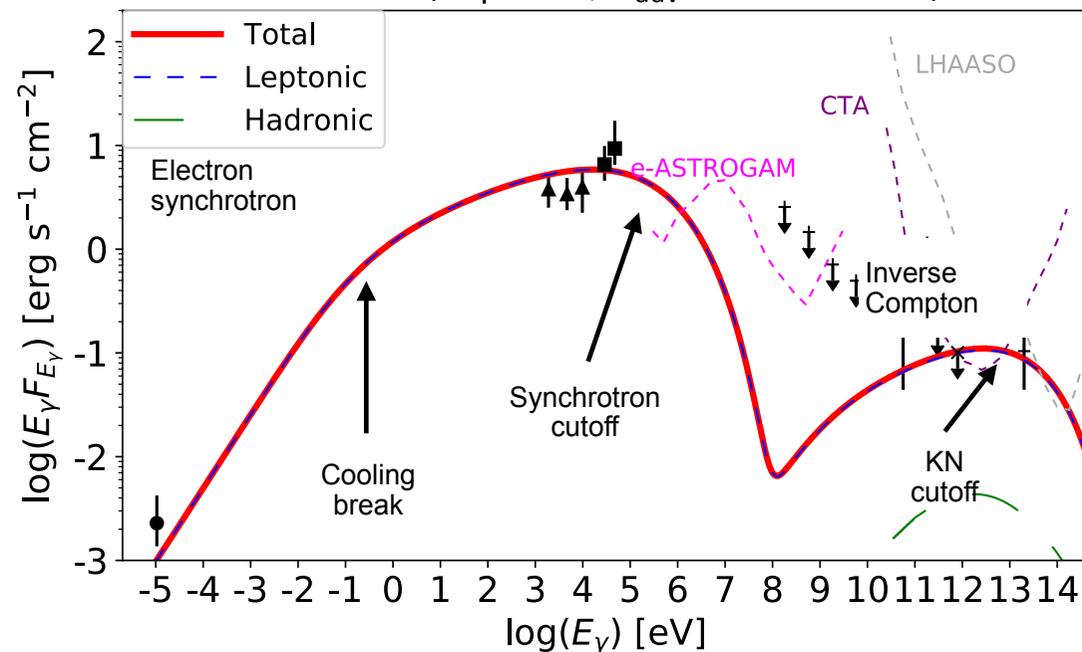
Leptonic models



Model C (Leptonic, $V_{adv} = V_j/4$)



Model D (Leptonic, $V_{adv} = 10^7 \text{ cm s}^{-1}$)



- TeVガンマ線とX線の光度比 $\rightarrow B \sim 10\text{-}20 \mu\text{G}$
- 移流速度が速い場合、cooling breakが高エネルギーになる \rightarrow GeVバンドで硬いスペクトル \rightarrow 観測と矛盾
- 遅い移流速度の場合、冷却によりフラットなスペクトル \rightarrow 広帯域スペクトルを説明可能

Model parameters.

Model	V_{adv} [cm s ⁻¹]	B [μG]	p_{inj}	ϵ_e	n_{eff} [cm ⁻³]
A	1.9×10^9	32	2.0	1.0×10^{-3}	10
B	1.0×10^7	36	1.6	1.5×10^{-4}	0.2
C	1.9×10^9	13	2.1	5.0×10^{-3}	0.01
D	1.0×10^7	18	1.6	2.0×10^{-4}	0.01

高効率な粒子加速が必要

See also Sudoh + 2019

- 全てのモデルでX線は電子からのシンクロトロン放射が担う
- 衝撃波加速された電子からのシンクロトロン放射の最高エネルギー：

$$t_{e,\text{syn}} = \frac{6\pi m_e^2 c^3}{\sigma_T B^2 E_e} = t_{\text{acc}} \approx \frac{20\eta E_i}{3ceB\beta_j^2}, \quad \rightarrow$$

$$\gamma_{e,\text{cut}} \approx \sqrt{\frac{9\pi e\beta_j^2}{10\sigma_T B\eta}} \simeq 2.1 \times 10^9 B_{-4.5}^{-1/2} \eta_0^{-1/2}.$$

- $E_{\gamma,\text{syn}} = \frac{h_p e B \gamma_e^2}{4\pi m_e c}$ を使うと、X線を出す電子のローレンツ因子は

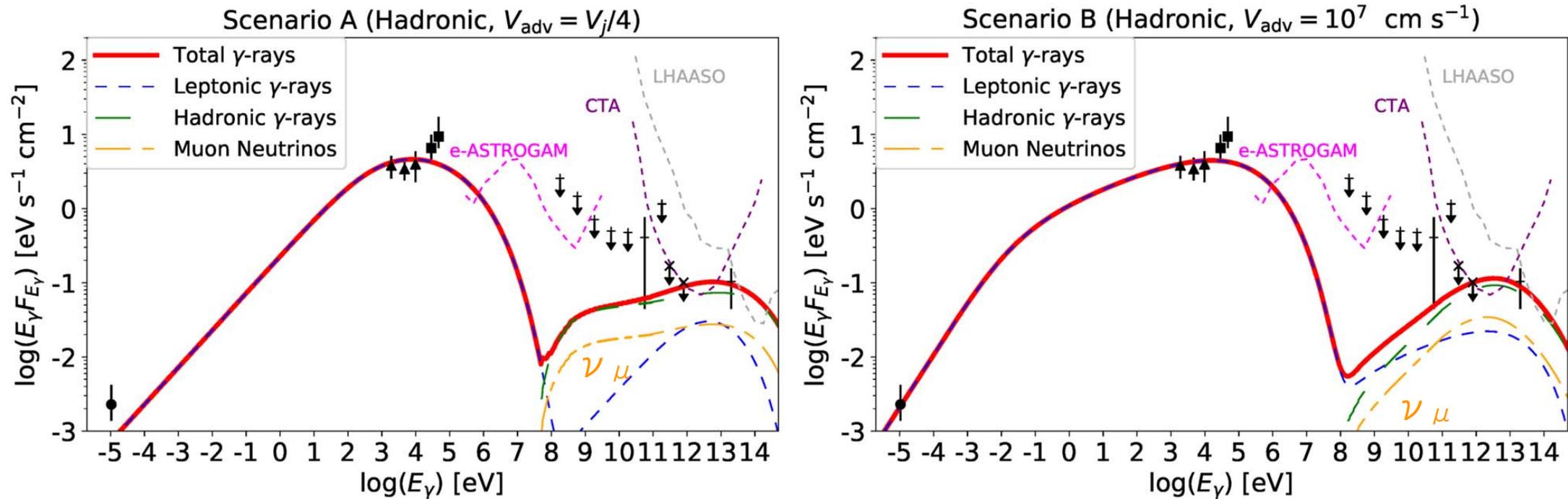
$$\gamma_{e,X} \approx \sqrt{\frac{4\pi m_e c E_\gamma}{h_p e B}} \simeq 4.1 \times 10^8 B_{-4.5}^{-1/2} \left(\frac{E_\gamma}{30 \text{ keV}} \right)^{1/2}$$

- 上記二つを組み合わせると加速効率のパラメータの最大値は

$$\eta \approx \frac{9}{20} \frac{h_p e^2 \beta_j^2}{\sigma_T m_e c E_\gamma} \simeq 27 \left(\frac{E_\gamma}{30 \text{ keV}} \right)^{-1}$$

SS433からのニュートリノ放射

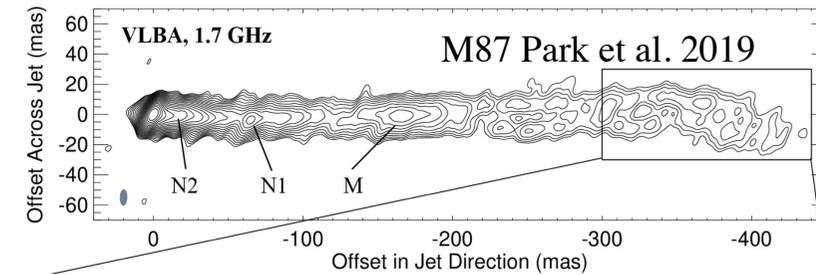
See also Reynoso + 2019



- ニュートリノフラックスはTeV-100 TeV付近で 0.03 eV/s/cm^2
- IceCubeを10年運用でsensitivity $\sim 1 \text{ eV/s/cm}^2 \rightarrow 30$ 倍足りない
- IceCube-Gen2は5倍大きくて各分解能が5倍良い
 \rightarrow で20-30年運用すれば受けられる可能性

AGNジェットとの比較

- AGNジェットのノットとホットスポット
 - * ホットスポット：ジェットの先端にある明るい領域
 - * ノット：ジェットの途中にある明るい点源
- ノットでは Zhang et al. 2018
 - * 十分な減速がない → 移流速度が速い
 - * 観測的にX線でカットオフが見えない
→ 効率的な加速 (η が小さい)
- ホットスポットでは
 - * 十分な減速 → 移流速度が遅い
 - * 可視赤外にカットオフ
→ 加速効率が悪い (η が大きい)
- 我々のモデルは η が小さい
→ 移流速度が大きいモデルが良い？



A: Hadronic + high V_{adv} → Knot

B: Hadronic + low V_{adv} → Hotspot

C: Leptonic + high V_{adv} → Knot

D: Leptonic + low V_{adv} → Hotspot

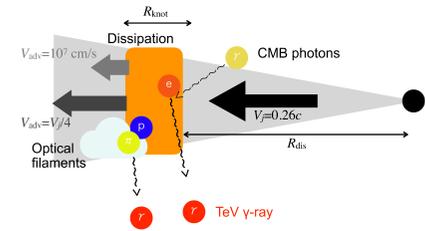
Model	Hadronic		Leptonic	
	A Knot	B Hotspot	C Knot	D Hotspot
HAWC data	○	○	○	○
<i>Fermi</i> data	○	○	×	○
Ambient density	△	○	○	○
AGN analog	○	×	○	×

目次

- マイクロクエーサー SS 433
- モデルと物理過程
- 結果と議論
- 結論

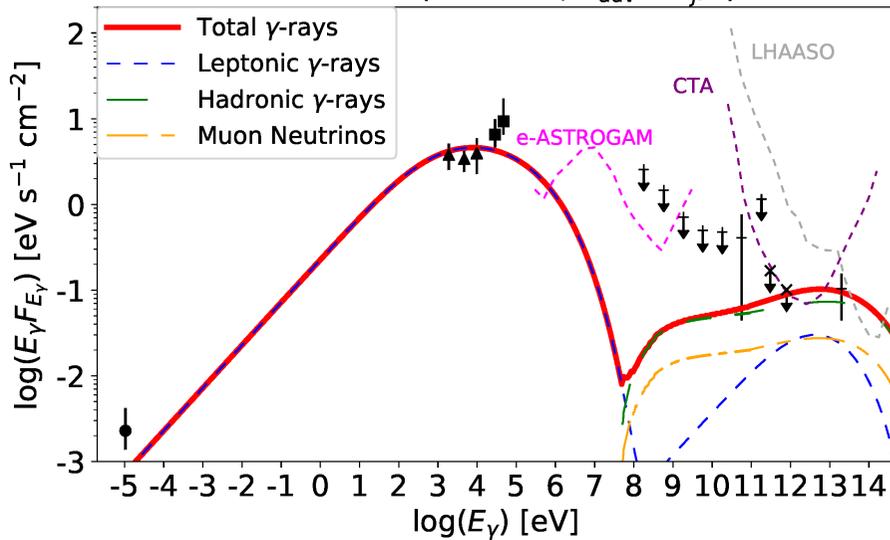
結論

- マイクロクエーサーSS433のジェットからGeV-TeVガンマ線の検出
- **ハドロンモデルもレプトンモデルも観測スペクトルを説明可能**
- AGN jetとの類推から、 V_{adv} が大きい方が良いかもしれない
→ ハドロンモデルが優勢か？
- **モデルの区別にはLHAASOやCTAによる観測が重要となる**

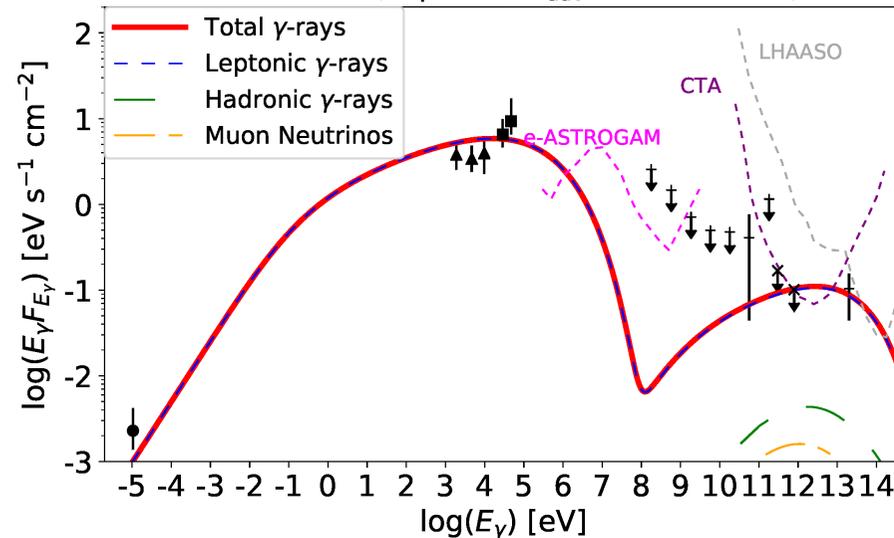


Model	Hadronic		Leptonic	
	A Knot	B Hotspot	C Knot	D Hotspot
HAWC data	○	○	○	○
Fermi data	○	○	×	○
Ambient density	△	○	○	○
AGN analog	○	×	○	×

Scenario A (Hadronic, $V_{adv} = V_j/4$)



Scenario D (Leptonic, $V_{adv} = 10^7 \text{ cm s}^{-1}$)



ご静聴ありがとうございました。