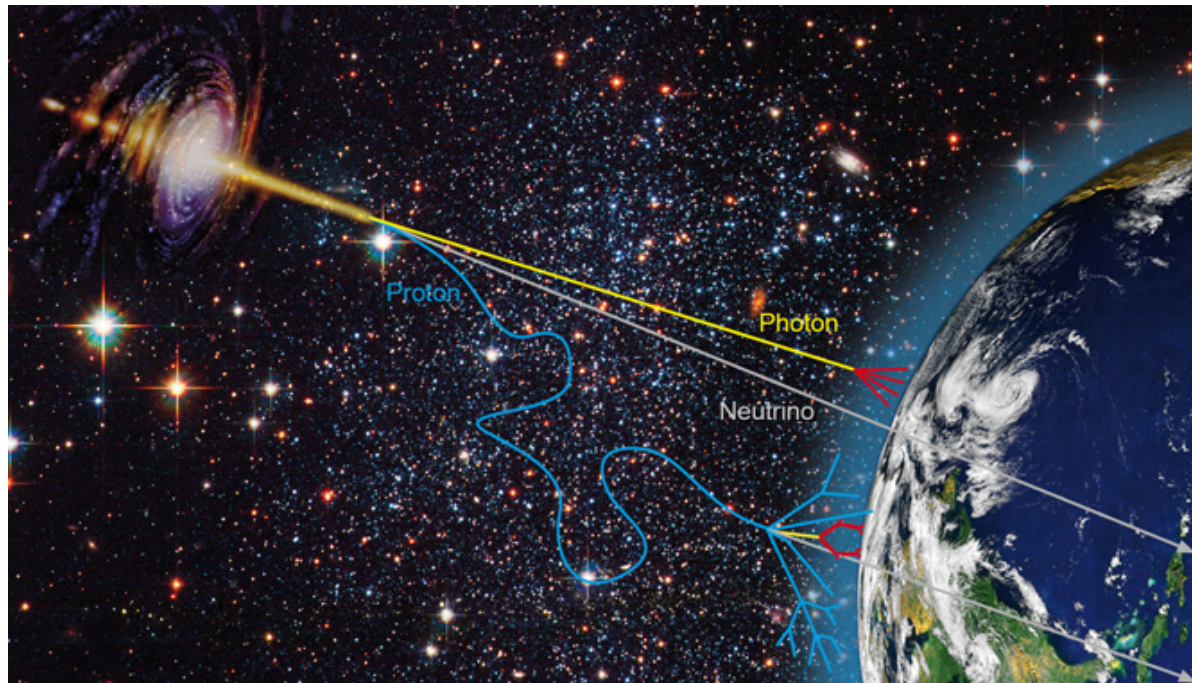


高エネルギー宇宙ニュートリノから展開するマルチメッセンジャー天文学
ブレイザー TXS 0506+056における高エネルギー
ガンマ線放射・ニュートリノ放射・宇宙線加速について
High-energy gamma-ray emission, neutrino emission and
cosmic ray acceleration in the blazar TXS 0506+056

井上 進 (理研) Susumu Inoue (RIKEN)

Elisa Bernardini, Wrijuan Bhattacharya, Konstancja Satalecka (DESY),
Fabrizio Tavecchio (INAF)



稲田知大^A, 岩村由樹^A, 神本匠^B,
櫛田淳子^B, 窪秀利^C, 久門拓^A,
齋藤隆之^A, 櫻井駿介^A, 高橋光成^A,
種田裕貴^B, 辻本晋平^B,
手嶋政廣^{A,D}, 中森健之^E, 永吉勤^A,
西嶋恭司^B, 野崎誠也^C, 野田浩司^A,
Daniela Hadasch^A, 林田将明^A,
平子文^C, 深見哲志^A,
Daniel Mazin^{A,D}, 増田周^C,
他MAGIC Collaboration
東大宇宙線研^A, 東海大理^B,
京大理^C, MPI for Physics^D,
山形大理^E

More details in MAGIC Coll., ApJ 863, L10, arXiv:1807.04300

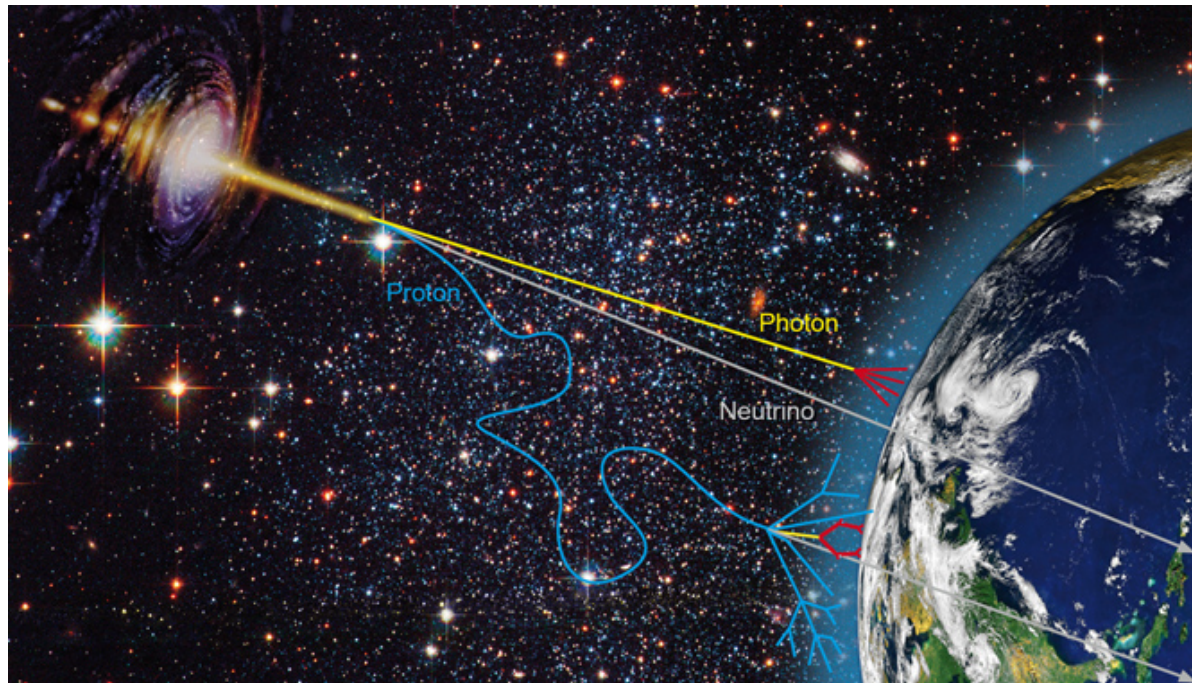
高エネルギー宇宙ニュートリノから展開する電弱天文学 **electroweak**
astronomy

ブレーザー TXS 0506+056における高エネルギー ガンマ線放射・ニュートリノ放射・宇宙線加速について

High-energy gamma-ray emission, neutrino emission and
cosmic ray acceleration in the blazar TXS 0506+056

井上 進 (理研) Susumu Inoue (RIKEN)

Elisa Bernardini, Wrijuan Bhattacharya, Konstancja Satalecka (DESY),
Fabrizio Tavecchio (INAF)

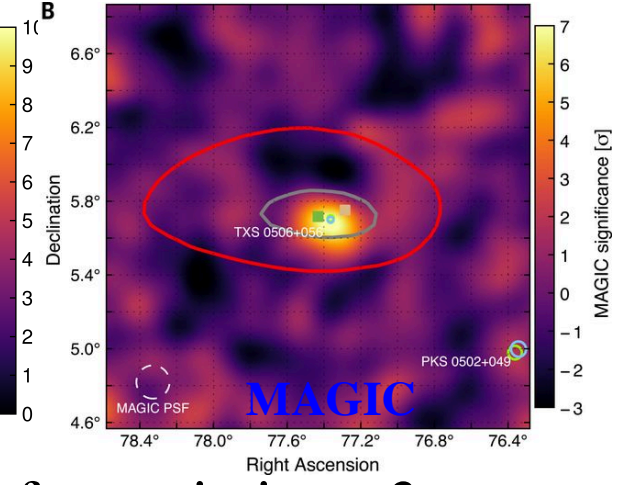
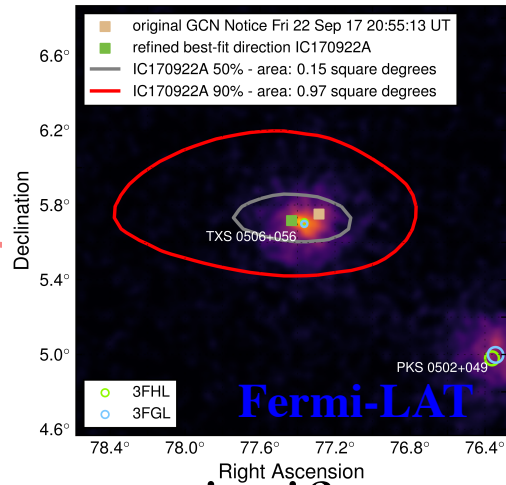
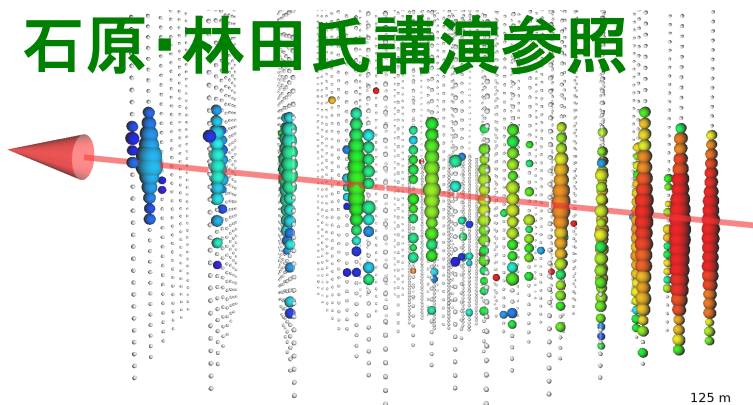


稲田知大^A, 岩村由樹^A, 神本匠^B,
櫛田淳子^B, 窪秀利^C, 久門拓^A,
齋藤隆之^A, 櫻井駿介^A, 高橋光成^A,
種田裕貴^B, 辻本晋平^B,
手嶋政廣^{A,D}, 中森健之^E, 永吉勤^A,
西嶋恭司^B, 野崎誠也^C, 野田浩司^A,
Daniela Hadasch^A, 林田将明^A,
平子文^C, 深見哲志^A,
Daniel Mazin^{A,D}, 増田周^C,
他MAGIC Collaboration
東大宇宙線研^A, 東海大理^B,
京大理^C, MPI for Physics^D,
山形大理^E

More details in MAGIC Coll., ApJ 863, L10, arXiv:1807.04300

ν / EM observations of IC-170922A / TXS 0506+056

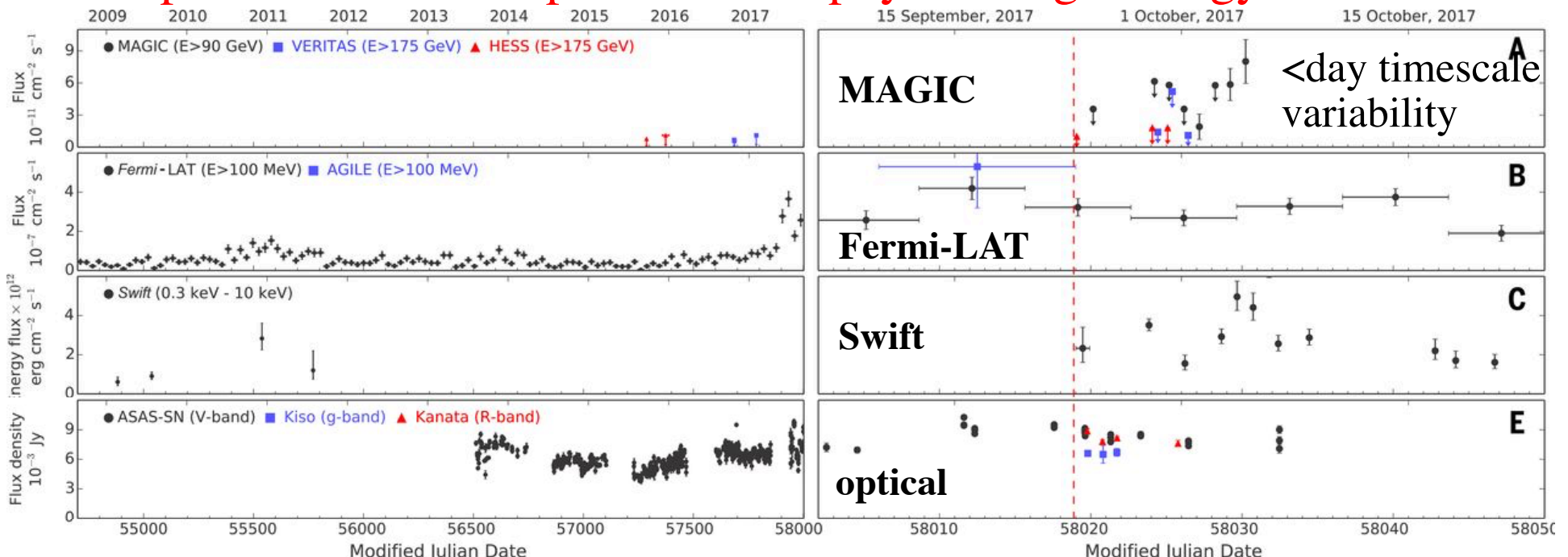
石原・林田氏講演参照



P(astrophysical) $\sim 56.5\%$

$E_\nu \sim 290$ TeV 183 TeV - 4.3 PeV 90% CL significance of association $\sim 3\sigma$

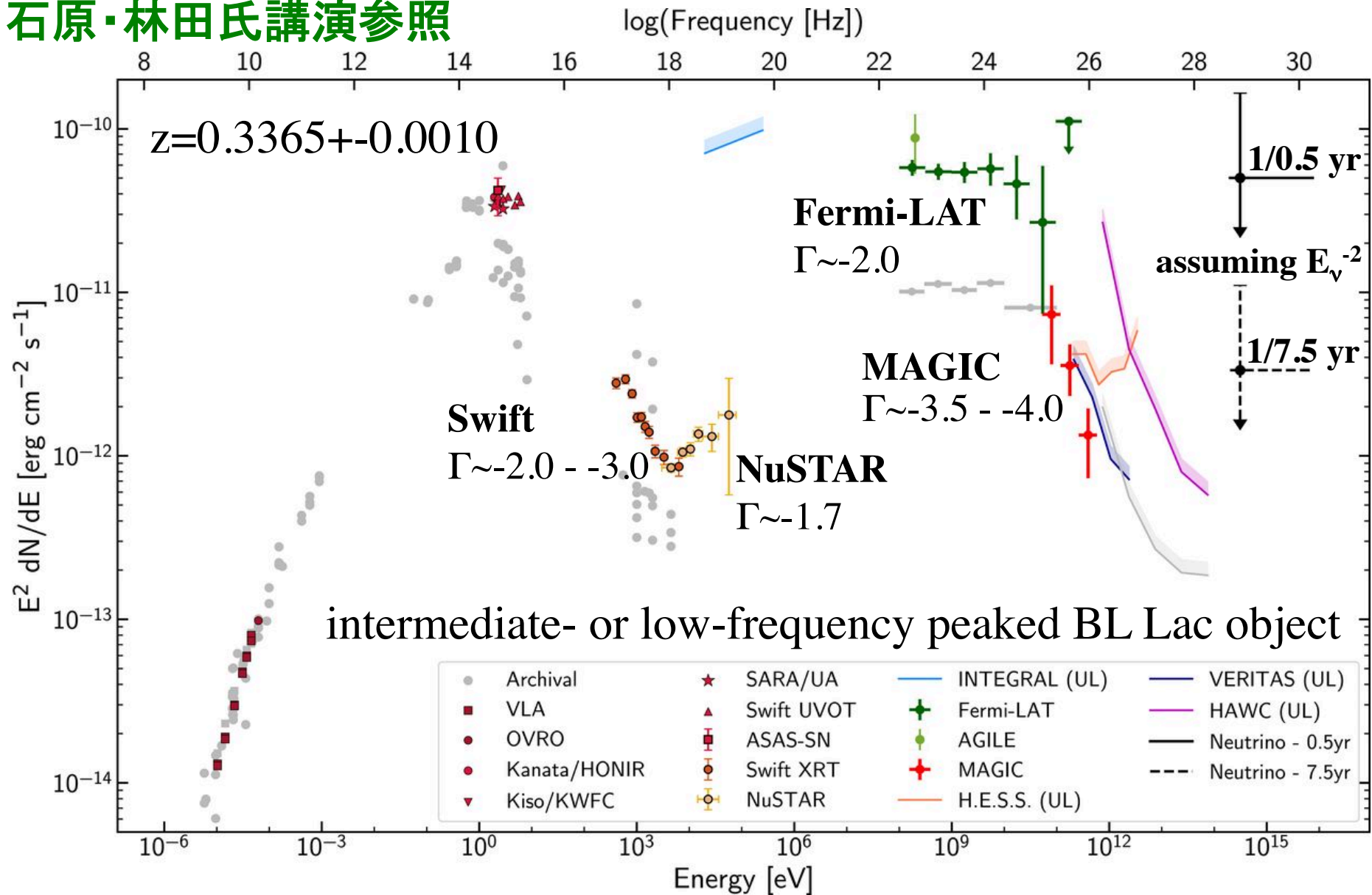
possible source of possible astrophysical high-energy neutrino



IceCube, Fermi, MAGIC+, 2018, Science 361, eaat1378

ν / EM observations of IC-170922A / TXS 0506+056

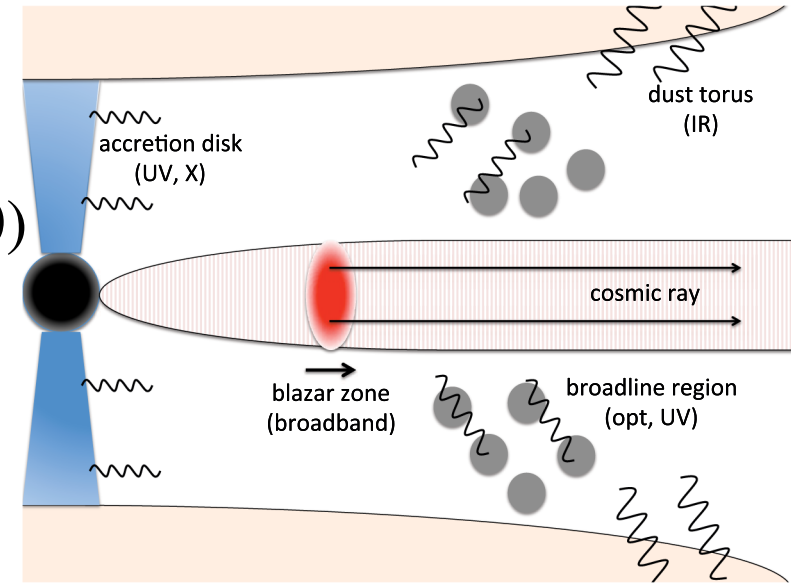
石原・林田氏講演参照



IceCube, Fermi, MAGIC+, 2018, Science 361, eaat1378

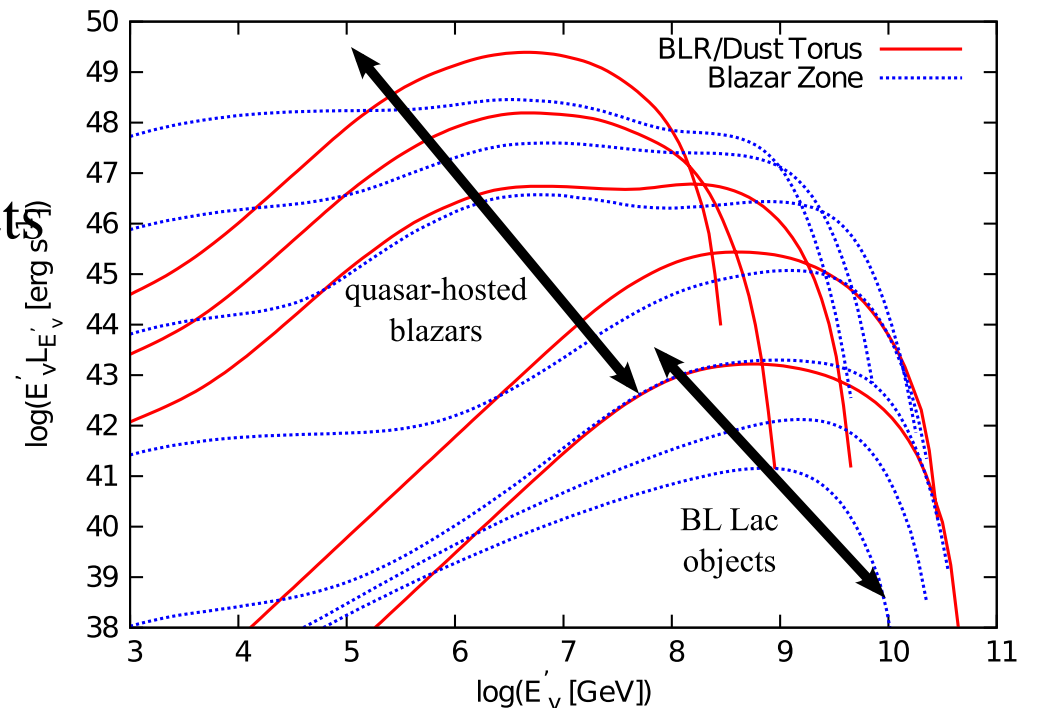
neutrino emission from blazars

- $p\gamma$ generally favored over pp in AGN jets
- target γ $\epsilon'_{\gamma} > \sim 20 m_{\pi} m_p c^4 / E_{\nu} \delta^{-1}$
 $\sim 0.4 \text{ keV} (E_{\nu} / 300 \text{ TeV})^{-1} (\delta / 20)$
- unlike FSRQs, BL Lacs thought to:
 lack bright external γ fields,
 have low internal sync. γ fields
 -> PeV ν production inefficient?



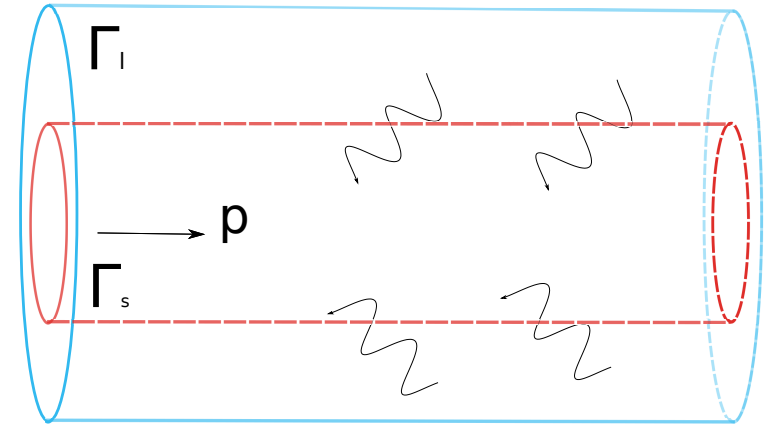
Murase+ 14

- enhanced $p\gamma$ efficiency via external γ fields in BL Lacs?
 sync. from sheath in structured jets?
- questions
 1. hadronic emission?
 2. role of external Compton?
 3. $\gamma\gamma$ absorption?
 4. max proton energy (UHECR)?



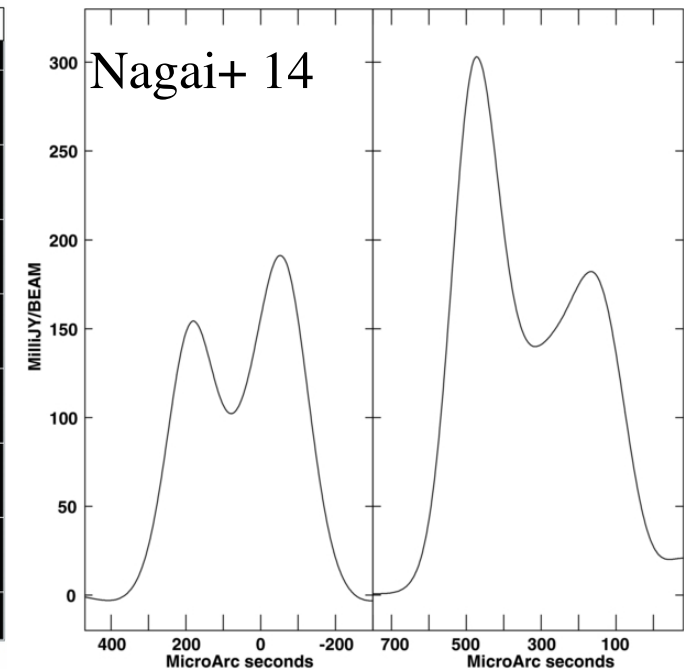
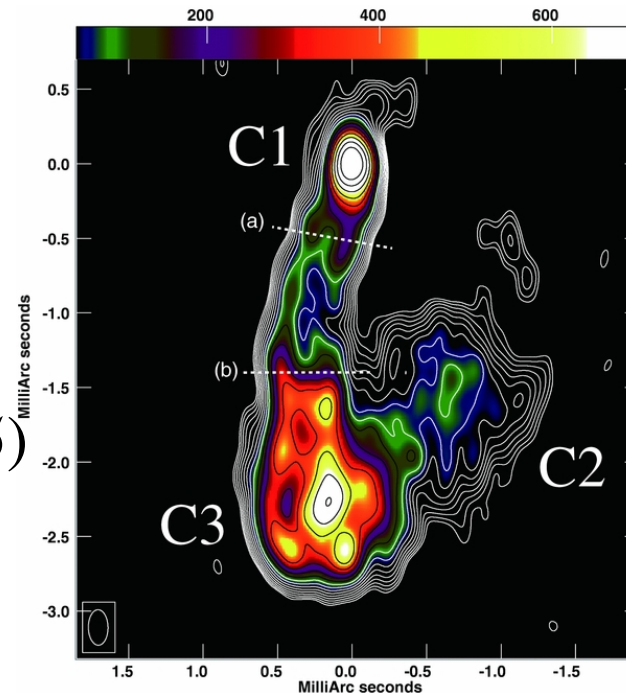
jet-sheath (spine-layer) structure

- jet structure with slower sheath (layer) surrounding faster jet (spine)
- > supported by observations, numerical simulations
- synchrotron photons from sheath seen Doppler boosted in jet frame
- > enhanced target γ for $p\gamma$ ν production, EC emission



Tavecchio+ 14, 15
Righi & Tavecchio 17

limb-brightened structure in radio galaxies
e.g. 3C84 (NGC 1275)



model description

follow Tavecchio+ 14, 15

- emission region: cylindrical with radius R , length $dR=R$,
magnetic field B , Lorentz factor Γ_j , viewing angle θ_v
- electron distribution: broken power-law $E_{e,\min}, E_{e,br}, E_{e,\max}, S_1, S_2$
- proton distribution: power-law E_p^{-2} with exp. cutoff $E_{p\max}$
- photons from sheath with Lorentz factor Γ_s , broken power-law spectrum
- leptonic emission: synchrotron, SSC, EC

hadronic emission

follow Böttcher+ 13, Cerruti+ 15

$p + \gamma_{LE} \rightarrow N + \pi^0, \pi^{\pm}$ photo-meson

$\pi^{\pm} \rightarrow \mu^{\pm} + \nu \rightarrow e^{\pm} + 3\nu$ $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$

$\mu^{\pm} + B \rightarrow \mu^{\pm} + \gamma$ muon synchrotron

$p + \gamma_{LE} \rightarrow p + e^+e^-$ photo-pair (Bethe-Heitler)

$\gamma + \gamma_{LE} \rightarrow e^+e^-$ electron-positron
 $e^+e^- + B \rightarrow e^+e^- + \gamma$ sync. cascade

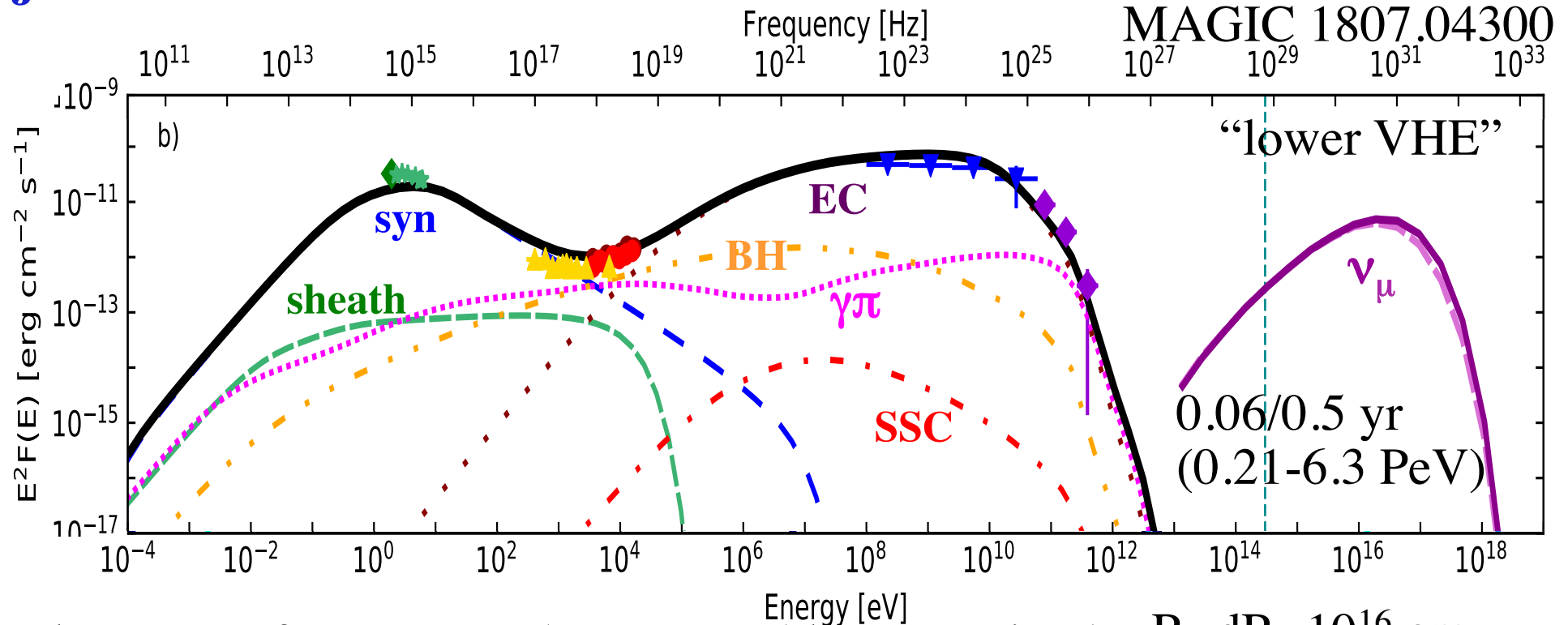
$p + B \rightarrow p + \gamma$ proton synchrotron

Mannheim 93

Mücke+ 02,03

Aharonian 00...

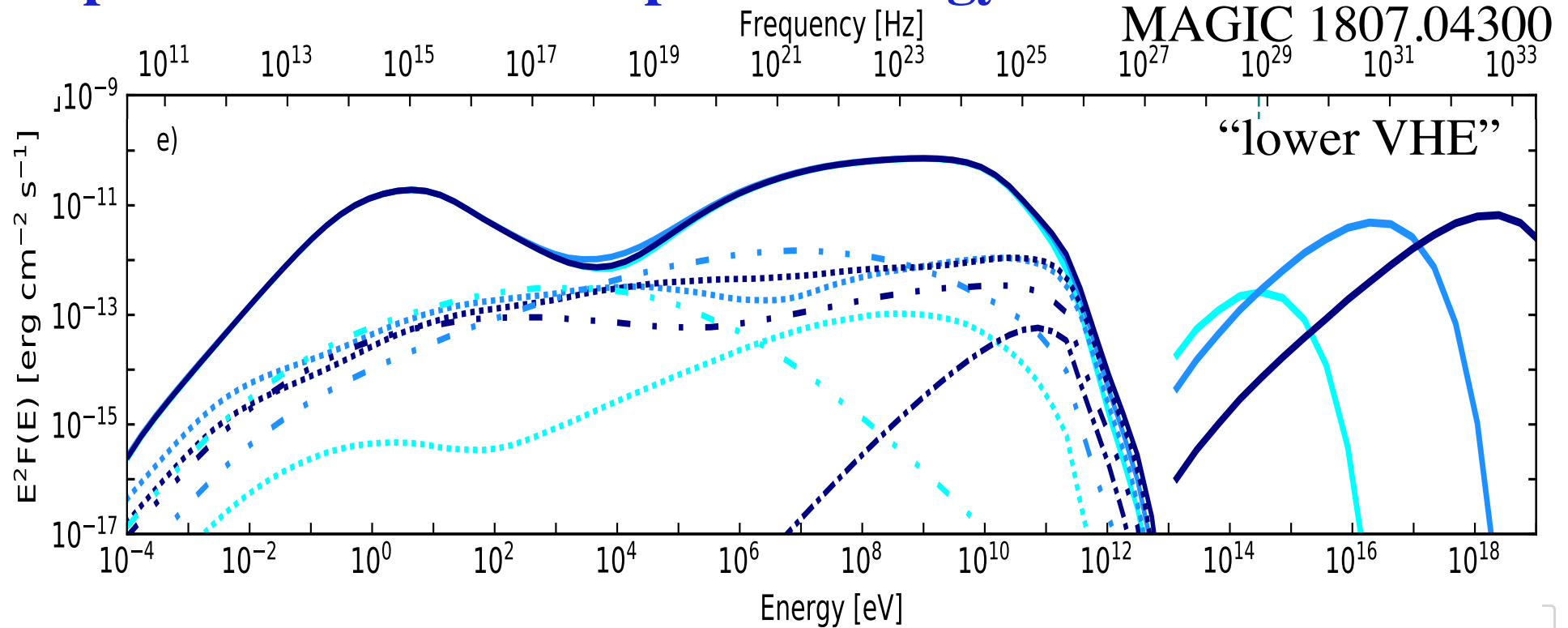
jet-sheath model for electroweak emission



- large no. of parameters but reasonably constrained
- SED predominantly leptonic, γ -rays EC (not SSC)
- photopion+BH cascade subdominant but non-negligible in X (+VHE)
- > crucial constraint on proton population
- photopion efficiency $f_{p\gamma}(E_p \sim 6 \text{ PeV}) \sim 10^{-4}$
- > $\tau_{\gamma\gamma}(E_\gamma \sim 12 \text{ GeV}) \sim 0.1$ -> $\tau_{\gamma\gamma}(E_\gamma \sim 100 \text{ GeV}) \sim 1$
consistent with observed GeV-TeV break

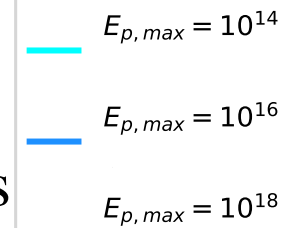
$R=dR=10^{16} \text{ cm}$
 $B=2.6 \text{ G}$
 $\Gamma_j=22, \Gamma_s=2.2$
 $\theta_v=0.8^\circ (\delta_j=40)$
 $E_{p\text{max}}=10^{16} \text{ eV}$
 $L_e=1.6 \times 10^{42} \text{ erg/s}$
 $L_p=3 \times 10^{45} \text{ erg/s(?)}$
 $(L_B=1.2 \times 10^{45} \text{ erg/s})$

implications: maximum proton energy

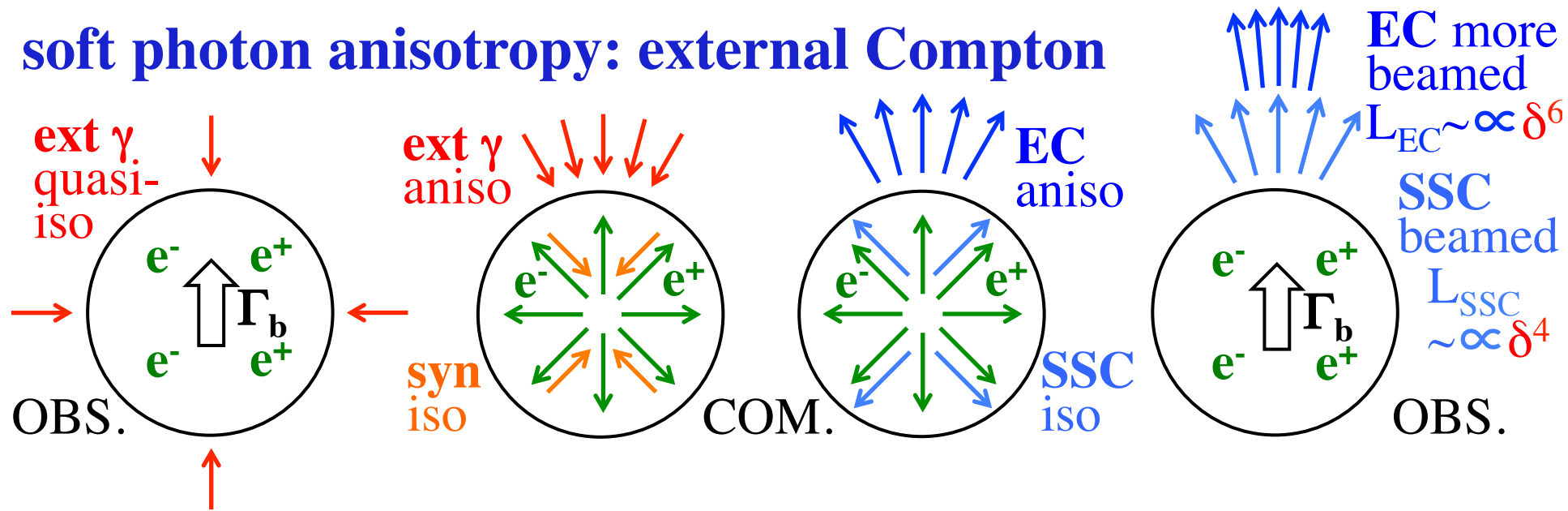


$E_{p,max}$ dependence

- maximum ν yield for $E'_{p,max} \sim 10^{16}$ eV (comoving)
- $E'_{p,max} \sim 10^{16}-10^{18}$ eV: higher $E_{\nu pk}$, lower L_p from X-ray limits
lower EHE ν rate, but not too low to be ruled out ($> \sim 0.01/0.5yr$)
(simultaneously PS ν not too high, $\sim < 0.05/0.5yr$)
- > unclear whether UHECR accelerator or not

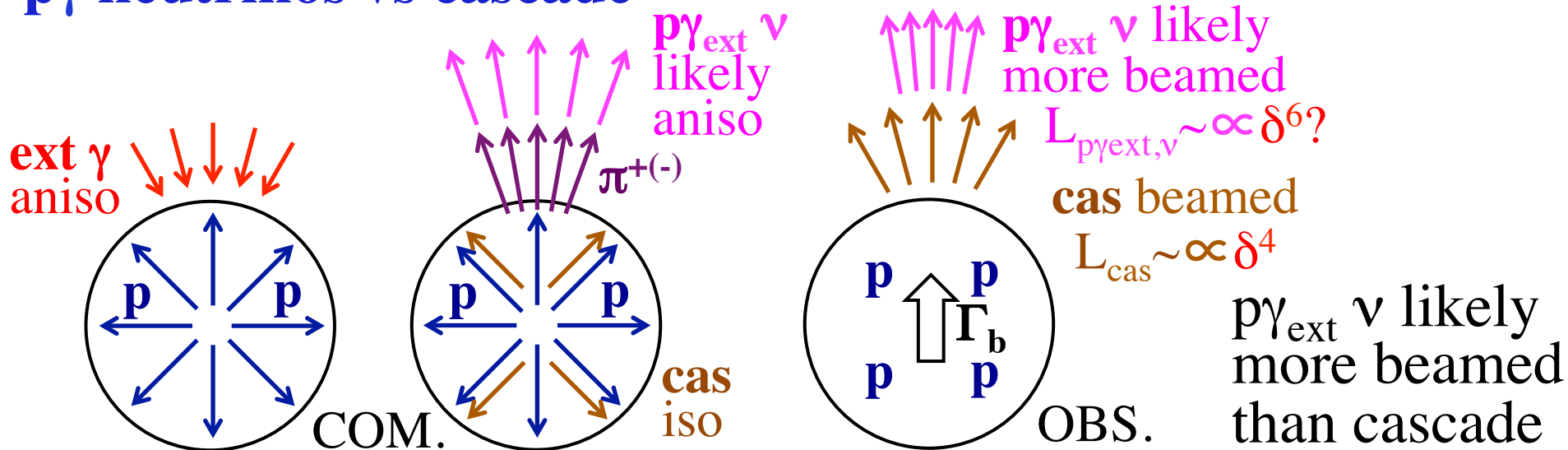


soft photon anisotropy: external Compton



EC robustly more beamed than SSC (or syn.) for quasi-isotropic external photons Dermer 95

py neutrinos vs cascade



まとめ TXS 0506+056 / IC-170922A 電弱観測の解釈

- ~ 300 TeVの ν がLATで明るいBL Lac TXS 0506+056と $\sim 3\sigma$ で同定
- MAGICは1日以下の変動、 $\Gamma \sim 3.5-4.0$ のsteepなスペクトルを観測
- 現実的に期待されるジェットの多層(jet-sheath)構造を考慮し、外層からのsync.光子を $p\gamma$ targetと考える(+若干楽観的になる)ことで電弱観測を整合的に解釈可能
- 多波長放射はleptonic成分(sync.+external Compton)が卓越hadronic成分はsubdominant, X線(+VHE)が重要な制限
- ~ 100 GeVのガンマ線breakは $\gamma\gamma$ 吸収、 ~ 300 TeVの ν の $p\gamma$ 生成と無矛盾
- 陽子の最高エネルギーは原理的に $\sim 10^{18}$ eV (comoving) まで可能だが、現観測からは判断できない(UHECR加速源かどうか?)
- 電弱天文学の幕開け(?): 1イベントの ν でも多くの新たな示唆

課題

- $p\gamma$ ν 生成におけるexternal target photonの異方性の効果
- 他のブレイザーは? なぜHBL, FSRQでなくTXS 0506+056?
- 2014-2015(LATで明るくない期間中)の ν フレアの起源
- diffuse fluxへの寄与

...

まとめ TXS 0506+056 / IC-170922A **電弱**観測の解釈

- ~ 300 TeVの ν がLATで明るいBL Lac TXS 0506+056と $\sim 3\sigma$ で同定
- MAGICは1日以下の変動、 $\Gamma \sim 3.5-4.0$ のsteepなスペクトルを観測
- 現実的に期待されるジェットの多層(jet-sheath)構造を考慮し、外層からのsync.光子を $p\gamma$ targetと考える(+若干楽観的になる)ことで電弱観測を整合的に解釈可能
- 多波長放射はleptonic成分(sync.+external Compton)が卓越 hadronic成分はsubdominant, X線(+VHE)が重要な制限
- ~ 100 GeVのガンマ線breakは $\gamma\gamma$ 吸収、 ~ 300 TeVの ν の $p\gamma$ 生成と無矛盾
- 陽子の最高エネルギーは原理的に $\sim 10^{18}$ eV (comoving) まで可能だが、現観測からは判断できない(UHECR加速源かどうか?)
- 電弱天文学の幕開け(?): 1イベントの ν でも多くの新たな示唆

課題

- $p\gamma$ ν 生成におけるexternal target photonの異方性の効果
 - 他のブレイザーは? なぜHBL, FSRQでか? TXS 0506+056?
 - 2014-2015 (LATで明るくない期間中)の ν
 - diffuse fluxへの寄与
 - ...
- 将来への期待:**
+宇宙線(**大統一**観測)
+重力波(**万物**観測)