

2020年3月2日

高宇連, 博士論文発表会

On the Origin of PeV Electrons in
the Crab Nebula

かに星雲におけるPeV電子の起源の解明

荒川 真範 (立教大学)

1.1 パルサー星雲・かに星雲

パルサー星雲:

パルサー風と周辺物質が衝突（終端衝撃波の形成）してできた天体
 パルサーの回転エネルギーを源として光る、**効率が良い電子の加速器**

かに星雲:

- 自転周期 = 33 msec (パルサー)
- スピンダウン光度: $5 \times 10^{38} \text{ erg s}^{-1}$ (天の川銀河で一番大きい)
- 距離 = 2 kpc
- 1054年に起きた超新星爆発の残骸
(藤原定家の『明月記』)
- 電波からTeVガンマ線まで20桁以上で観測
- X線、TeVガンマ線では、明るい「**標準光源**」
- パルサー星雲から唯一**フレア**が観測

*スピンダウン光度:

パルサーが単位時間あたりに失う回転エネルギー

1.4 pc

青色：X線(Chandra)

緑色：可視光(HST)

赤色：電波(VLA)

1.2 >100 TeVガンマ線放射の観測

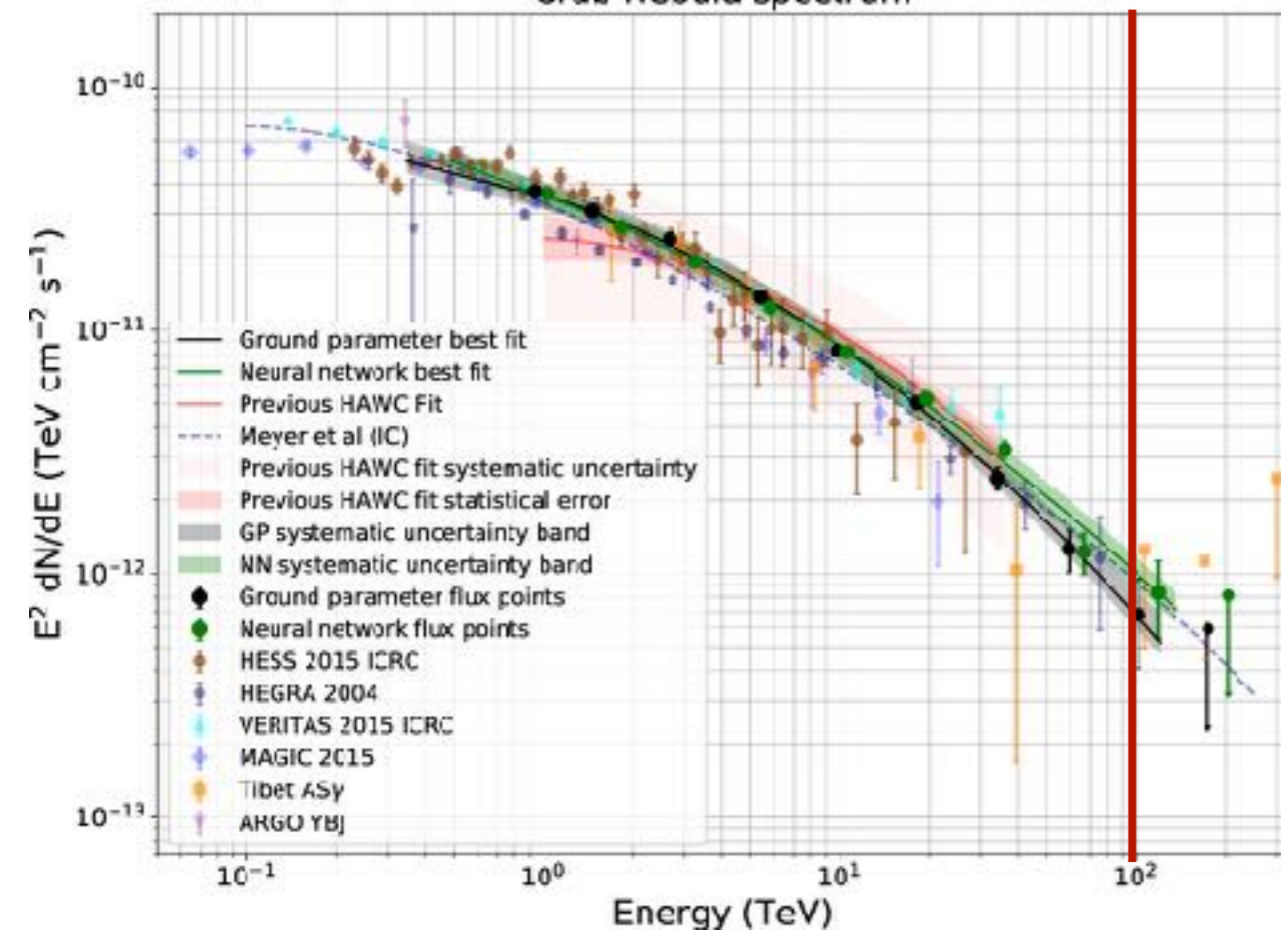
• かに星雲は**明るい**

- > 100 TeVガンマ線が宇宙の天体から初めて検出 (HAWC, Tibet AS γ)
- TeVガンマ線スペクトルは~ 300 TeVまでなめらかに接続

HAWC

100 TeV

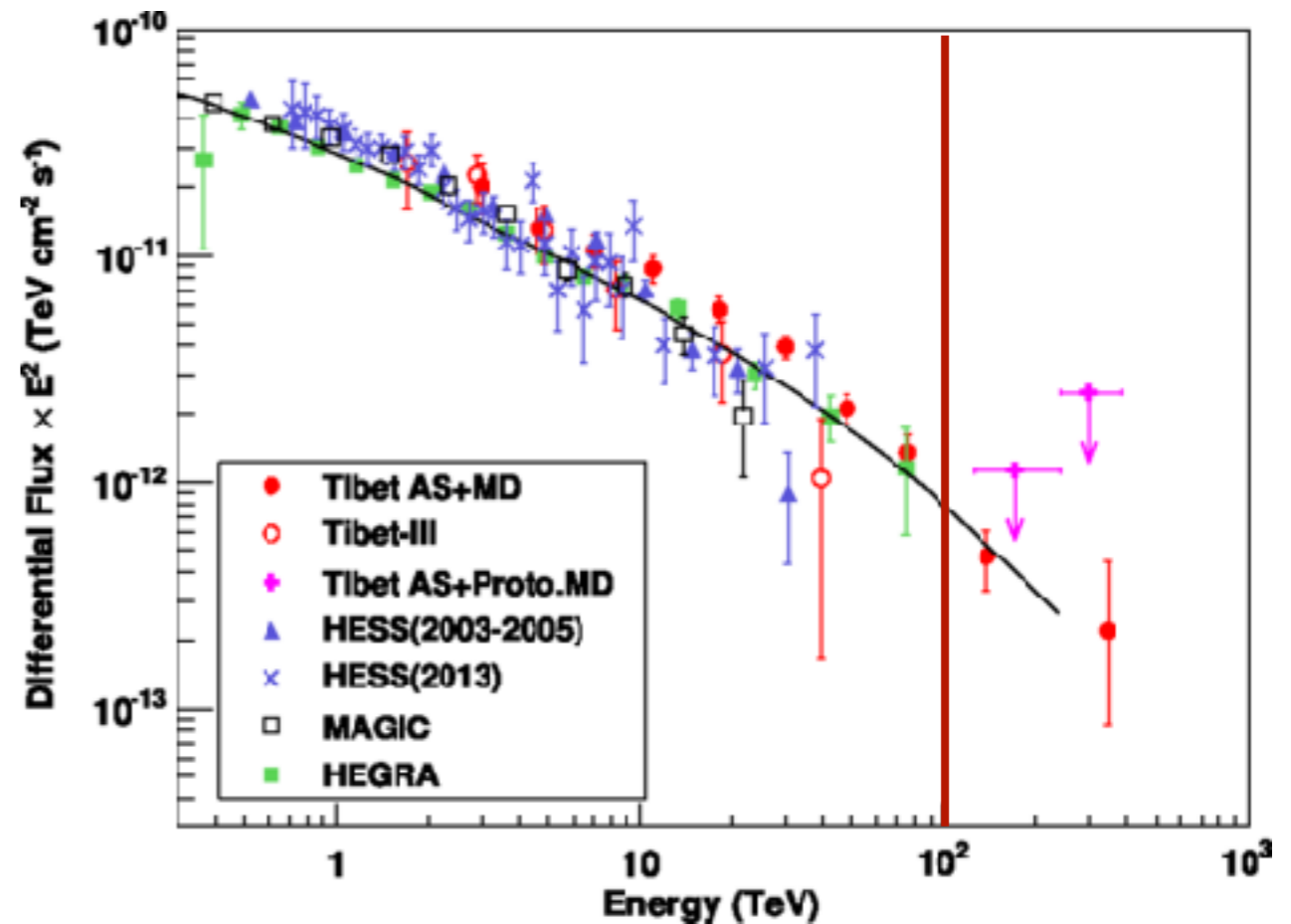
Crab Nebula spectrum



Abeysekara+ 2019

Tibet AS γ

100 TeV



Amenomori+ 2019

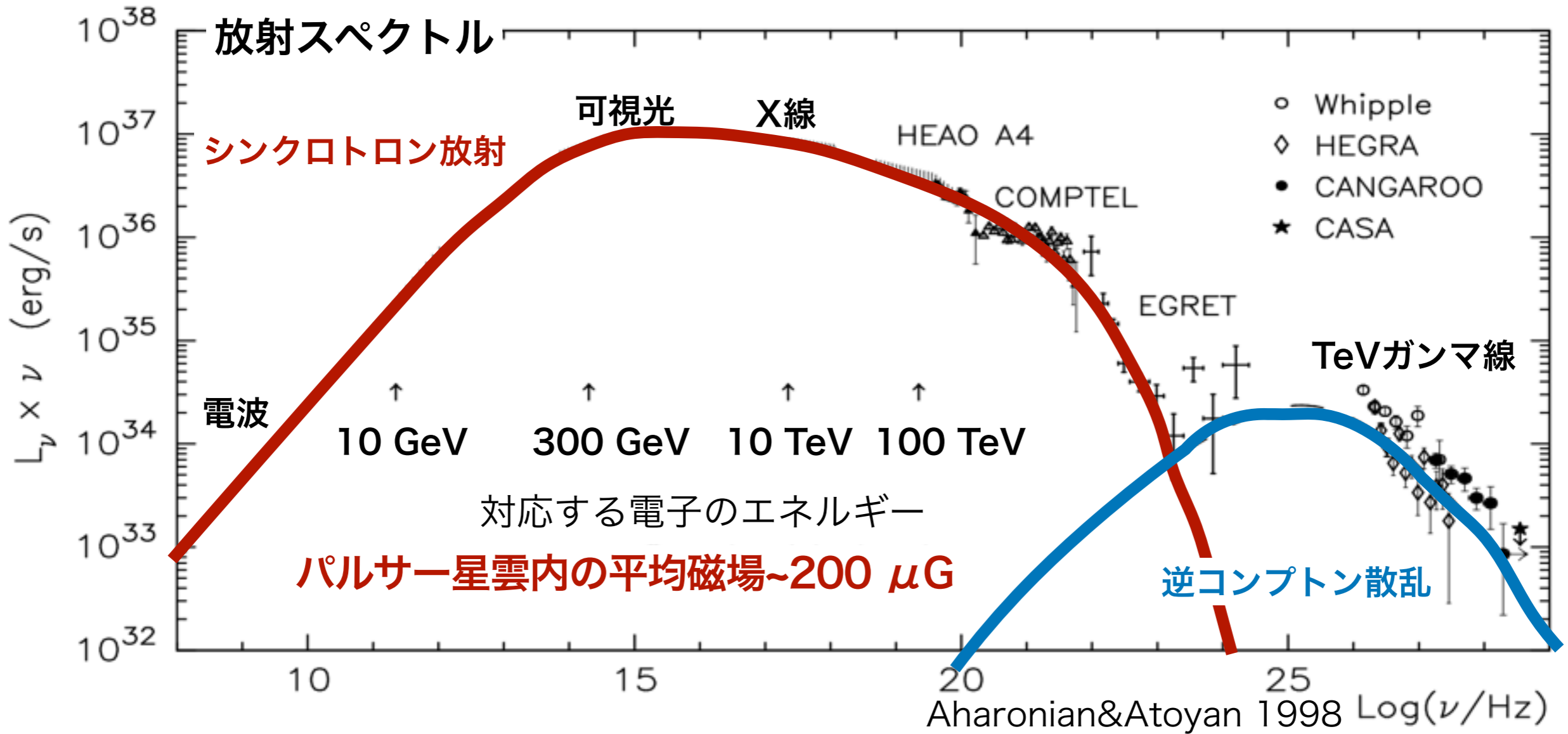
1.3 磁気流体力学(MHD)モデル

- かに星雲からの非熱的放射はMHD flowモデル+シンクロトロン放射/逆コンプトン散乱(IC)で説明できる (e.g. Kennel&Cronitii , Atoyan&Aharonian 1996)

電子は終端衝撃波近傍で注入、放射冷却&断熱損失を伴って伝搬

PeV電子が必要

$$\frac{dN}{dV dE_e} \Big|_{r=R_{TS}} = \begin{cases} A E_e^{-2.4} \exp\left(-\frac{E_e}{2.5 \text{ PeV}}\right), & E_e > E_{e,br} \\ A (E_e/E_{e,br})^{-3/2} E_{e,br}^{-2.4}, & E_e < E_{e,br} \end{cases}$$

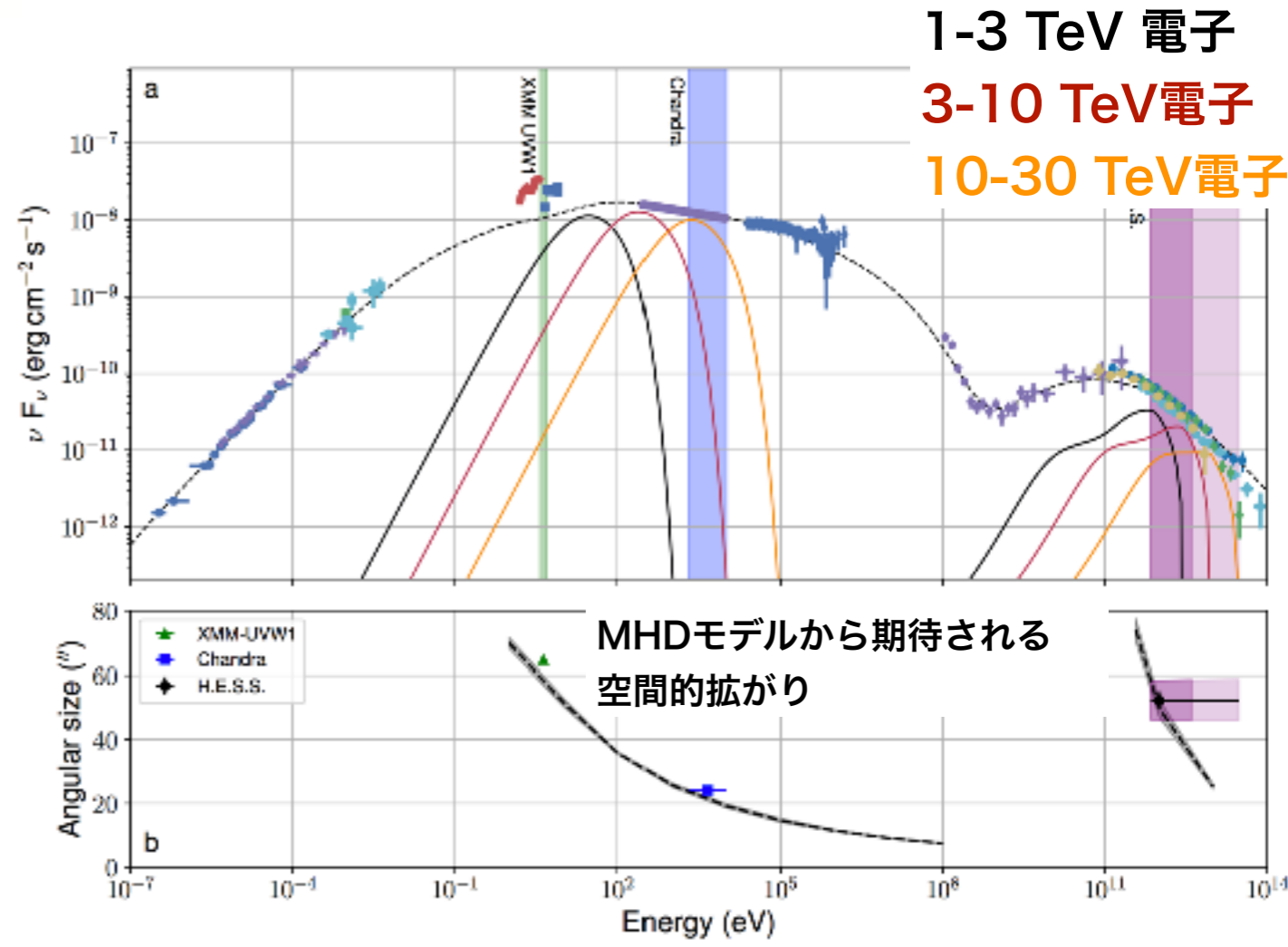
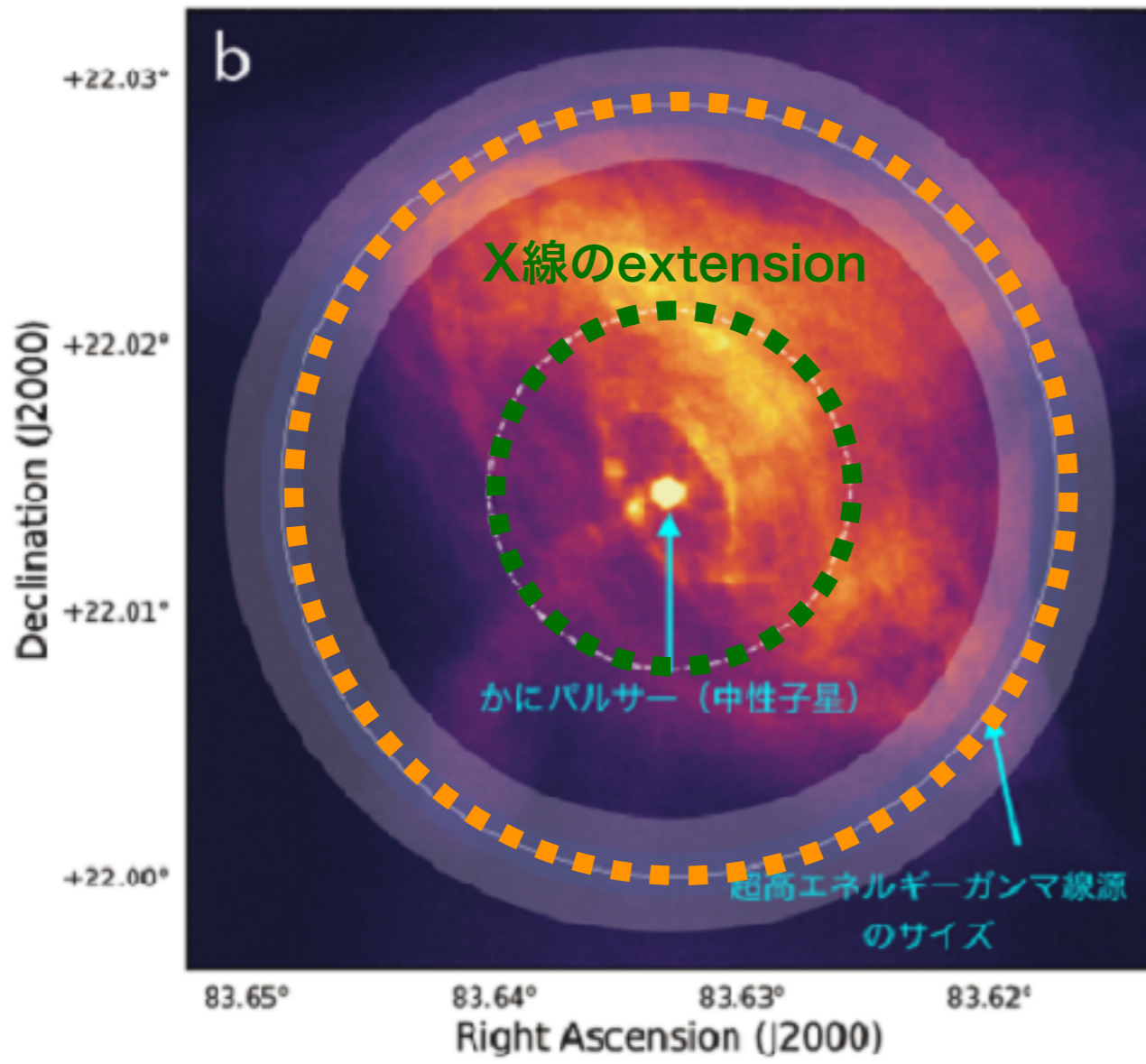


Aharonian&Atoyan 1998 Log(\nu/Hz)

1.4 10 TeV電子の加速領域

- H.E.S.S.によるTeVガンマ線で空間的拡がり観測
 - 観測された拡がりMHDモデル+シンクロトロン/IC放射で説明可能
- => ~10 TeV電子は終端衝撃波近傍で加速**

TeVガンマ線で測定されたextension



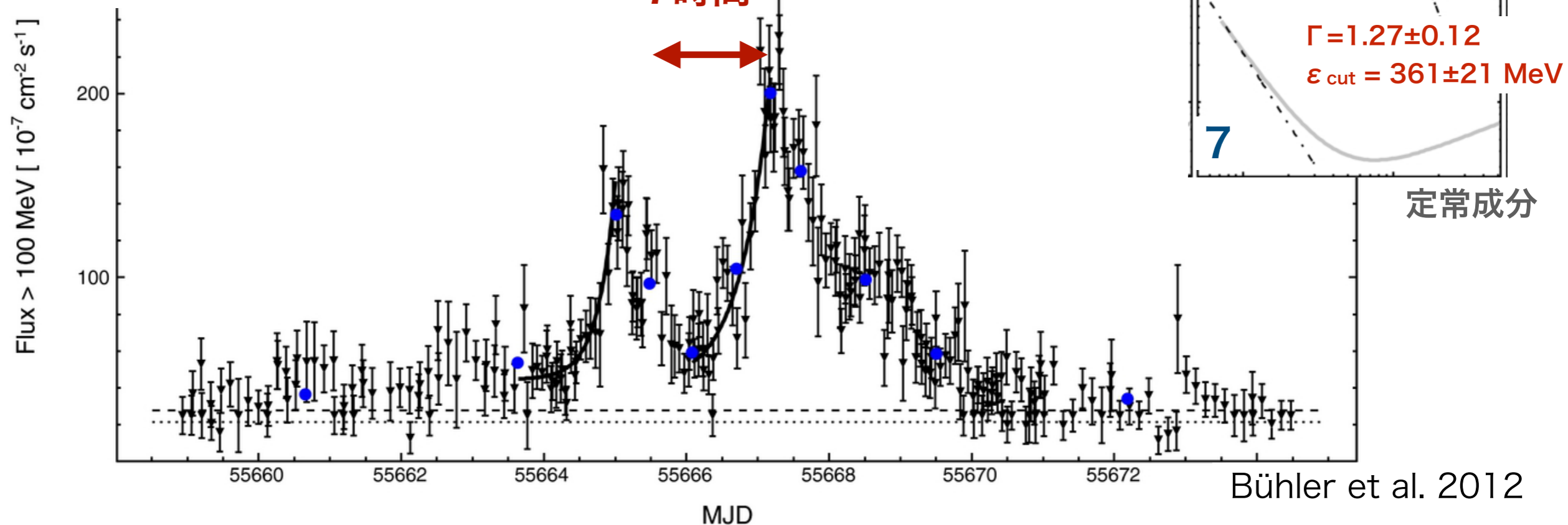
1.5 かに星雲からのフレア

かに星雲は定常で明るい

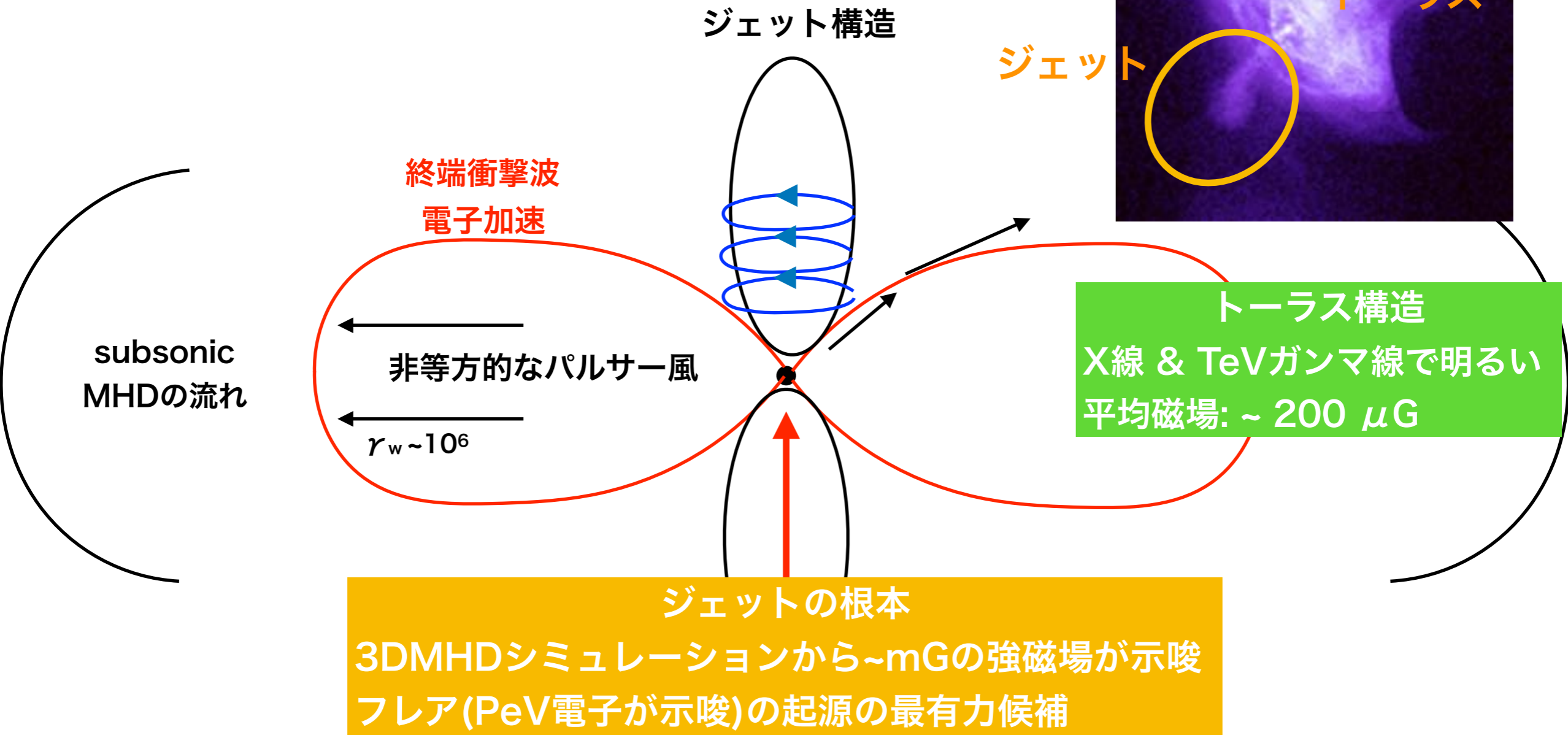
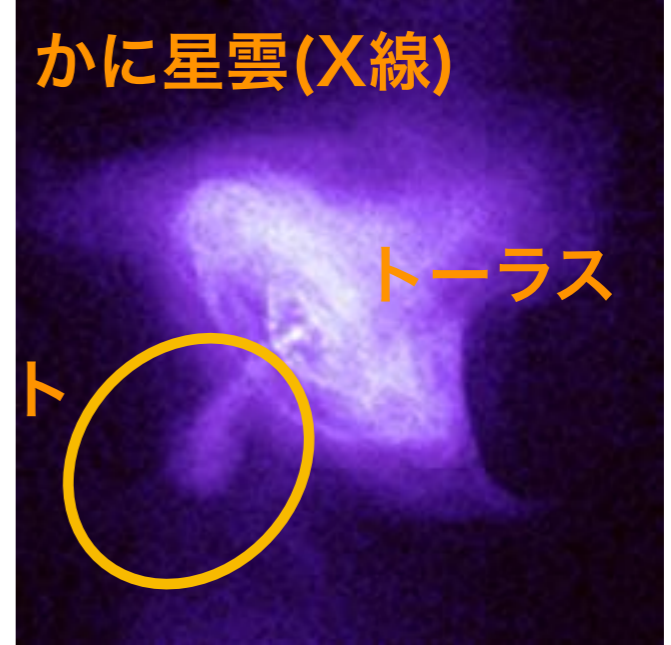
AGILE&Fermiによる突発的な増光、**フレア**の観測 Tavani+(2011) & Abdo+ (2011)

- peak flux $> 3.5 \times 10^{-6}$ ph cm $^{-2}$ s (Bühler and Blandford, 2014), 定常かに星雲の約5倍以上
- **1年に1回**程度
- **dayスケール**の時間変動 => 強磁場 **~ 1 mG** >> 星雲内の平均磁場 ~ 100 - 200μ G
- radiation reaction limit (~ 160 MeV)を超えるカットオフ
=> **磁気リコネクション**によるPeVまでの加速?

2011年4月のフレアの光度曲線
(100 MeV-300 GeV)



1.6 かに星雲の描像と課題



- PeV電子が終端衝撃波で加速されている観測的証拠はまだない
=> **100 TeVガンマ線観測から加速領域への磁場へ制限** (Khangulyan, Arakawa, Aharonian 2020)
- フレアの起源は謎。今までは明るいフレアに着目
=> **弱いフレアの検出からフレアへの理解を深める** (Arakawa+ submitted to ApJ)

2.1 基本的アイデア

- $>100 \mu\text{G}$ の環境下では電子の加速効率 η はシンクロトロン放射冷却で決まる
 - シンクロトロン放射の典型的なエネルギー $\hbar\omega_{\text{syn}} \propto E_e^2 B$ Ee:電子のエネルギー
B:磁場
(電子のエネルギー) \times (**磁場**) $^{0.5} \Rightarrow$ 加速効率と対応
 - シンクロトロン放射冷却 $t_{\text{cool}} \propto E_e^{-1} B^{-2}$
高エネルギー電子からの放射 \Rightarrow 加速領域の磁場をトレース
- シンクロトロン+IC \Rightarrow 放射領域(=加速領域)の磁場が求まる
- $> 50 \text{ TeV}$ のIC放射はクライン・仁科効果によって標的光子はCMBが支配的

電子スペクトルの仮定のみから加速領域の**磁場**が決まる

- 100 TeVガンマ線の観測の精度が重要
- 得られた磁場はMHDシミュレーションへの制限も可能になる

*シンクロトロン放射だけでは磁場は決まらない。

2.2 one-zone model計算: 磁場への制限

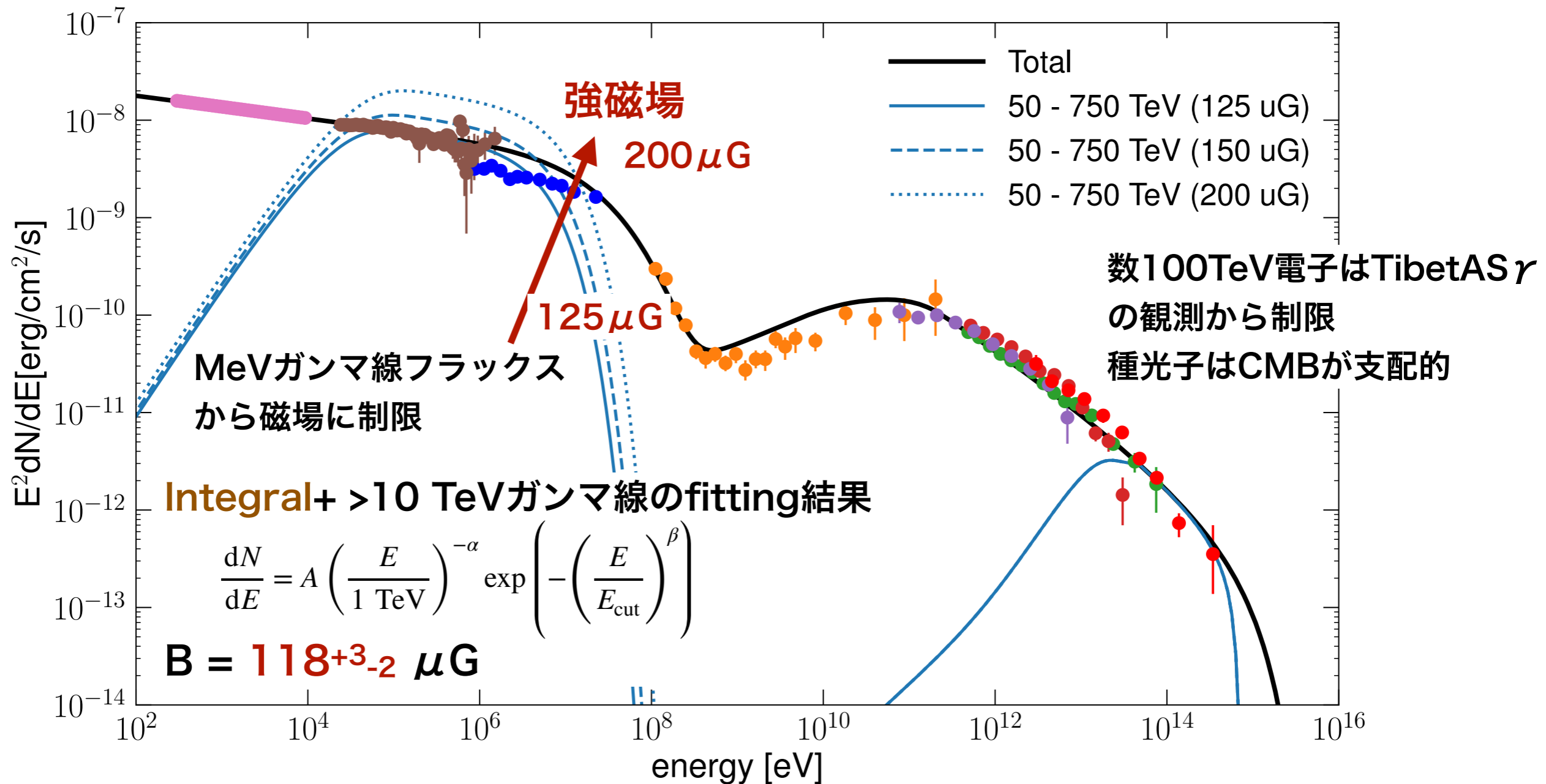
- one-zone modeling:

注入電子スペクトル:

$$\frac{dN}{dE_e} = A \left(\frac{E_e}{1 \text{ TeV}} \right)^{-3.233} \exp \left(- \left(\frac{E_e}{1.893 \text{ PeV}} \right)^2 \right)$$

$$B = 125 \mu\text{G}, 150 \mu\text{G}, 200 \mu\text{G}$$

エネルギー範囲50-750 TeVの電子からの放射スペクトル



2.3 終端衝撃波でPeVまで加速の可能性

- > 100 MeVのガンマ線シンクロトロン放射

$$\hbar\omega_{\text{syn}} \simeq 6 \left(\frac{E}{1 \text{ PeV}} \right)^2 \left(\frac{B}{100 \mu\text{G}} \right) \text{ MeV} \quad \rightarrow \quad \sim 4 \text{ PeV} \text{ の電子が必要 (} B=100 \mu\text{G)}$$

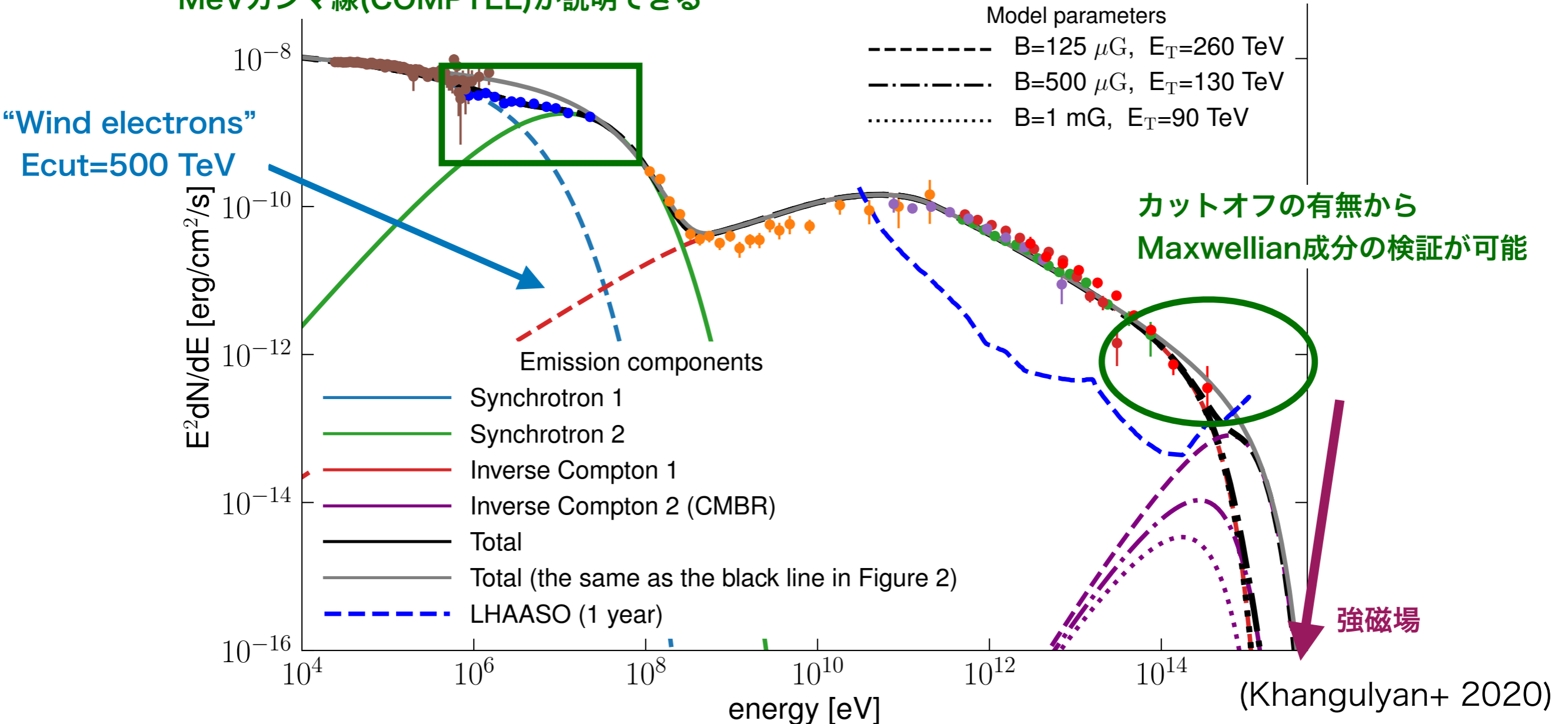
- ジャイロ半径 $r_g = 0.04 \left(\frac{E}{4 \text{ PeV}} \right) \left(\frac{B}{100 \mu\text{G}} \right)^{-1} \text{ pc} \simeq 0.4 R_{\text{ts}}$

- 慣習的には終端衝撃波近傍で加速された電子、“wind electrons”が100 MeVのシンクロトロン放射
 - 1-100 MeV ガンマ線スペクトルはなめらかではない
 - **加速領域に閉じ込めることが困難** (加速領域 ~ ジャイロ半径)

100 MeVのシンクロトロン放射は別の電子成分が起源の可能性

2.4 two-zone model計算: 新しい電子成分¹¹

- “wind electrons” + **Maxwellian** $\frac{dN}{dE_e} = A E_e^2 \exp\left(-\frac{E_e}{E_T}\right)$ 黒線: two-zone model
 MeVガンマ線(COMPTTEL)が説明できる 灰色線: one-zone model



- Maxwellian成分の有無(~100 TeVでカットオフの有無)及び放射領域の磁場(Maxwellianが検出されるか)がLHAASOによって検証可能
- 強磁場起源であればフレアとの関係性も示唆

3.1 Fermi-LATによる観測

- 定常だと考えられていたかに星雲から**予期せぬ**フレアの発見、
未だ起源は不明
- 過去の解析では $>3.5 \times 10^{-6}$ ph/cm²/sの**明るいフレアのみ**に着目
- かに星雲からの~100 MeVシンクロトロン放射は高い変動性

現在までに発見されているフレアより強度が弱いフレア, “small flare” が存在する可能性がある。

Fermi-LATによる7.4年間のデータ&Off-pulse解析から系統的&低バックグラウンドな解析のもと、“small flare”の探査を行った。

*LATの空間分解能 (~5 deg at 100 MeV) ではかに星雲とかにパルサーを区別できないため、かにパルサーからの放射が大きなバックグラウンドとなる

3.2 かに星雲からのガンマ線データ解析

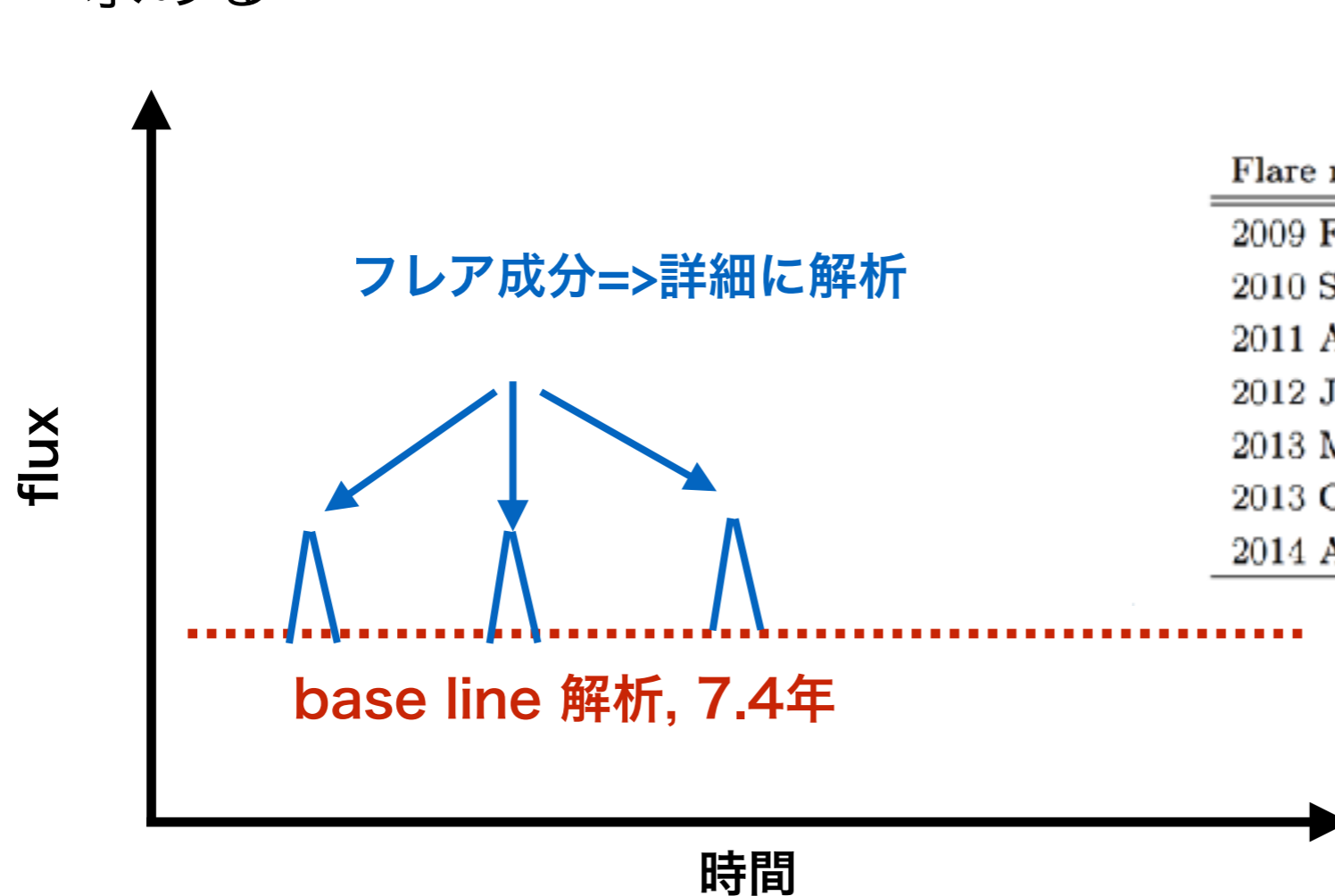
• 解析の流れ

1. 7.4年のデータを使用してbase-lineモデルを決める

* 既知のフレア, "reported flare"は除く

2. 光度曲線(5日, 1.5日)

- 5日(典型的なフレアの明るい期間)ビンの解析から“small flare”の探査
- 検出された“small flare”を1.5日の時間ビンでフレアの時間スケールを求める



“reported flare”

| Flare name | MJD | Reference |
|---------------------------|---------------|--------------------|
| 2009 February | 54855 - 54883 | Mayer (2015) |
| 2010 September | 55446 - 55474 | Mayer (2015) |
| 2011 April | 55653 - 55681 | Mayer (2015) |
| 2012 July | 56098 - 56126 | Mayer (2015) |
| 2013 March | 56343 - 56371 | Mayer (2015) |
| 2013 October ^a | 56568 - 56608 | Rudy et al. (2015) |
| 2014 August ^a | 56869 - 56902 | Rudy et al. (2015) |

3.3 base-line解析

- base-line解析(7.4年), reported flaresは除外

Free (N_{sync}, Γ_{sync}) 光子指数

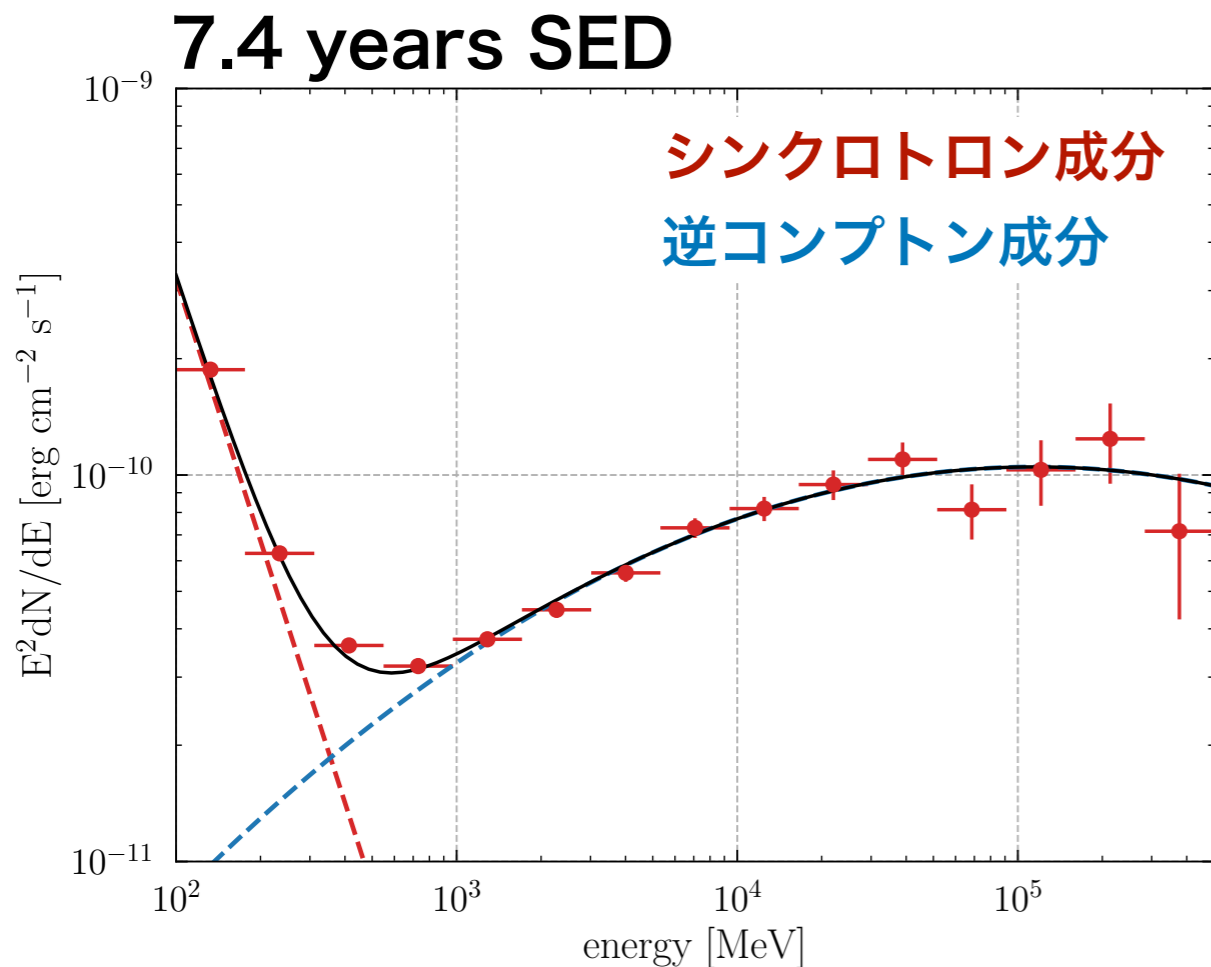
Free (N_{ic}, α, β)

$$\frac{dN}{dE_\gamma dt} = N_{sync} \left(\frac{E_\gamma}{100 \text{ MeV}} \right)^{-\Gamma_{sync}} + N_{ic} \left(\frac{E_\gamma}{1000 \text{ MeV}} \right)^{-(\alpha + \beta \log(E_\gamma / 1000 \text{ MeV}))}$$

かに星雲のガンマ線
スペクトルモデル

シンクロトロン成分

逆コンプトン(IC)成分



シンクロトロン成分:

$$\Gamma_{sync} = 4.27 \pm 0.08$$

$$\text{Flux} = (6.31 \pm 0.23) \times 10^{-7} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

$$\text{energy Flux} = (1.45 \pm 0.06) \times 10^{-10} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

逆コンプトン成分:

$$\alpha = 1.50 \pm 0.04$$

$$\beta = 0.05 \pm 0.01$$

$$\text{Flux} = (1.09 \pm 0.08) \times 10^{-7}$$

$$\text{energy Flux} = (5.46 \pm 0.28) \times 10^{-10} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

3.4 ガンマ線の時間変動

- シンクロトロン成分の光度曲線

Free (N_{sync}, Γ_{sync})

5日ビン解析からconstantモデルと矛盾しない
=>base-lineの結果でFix

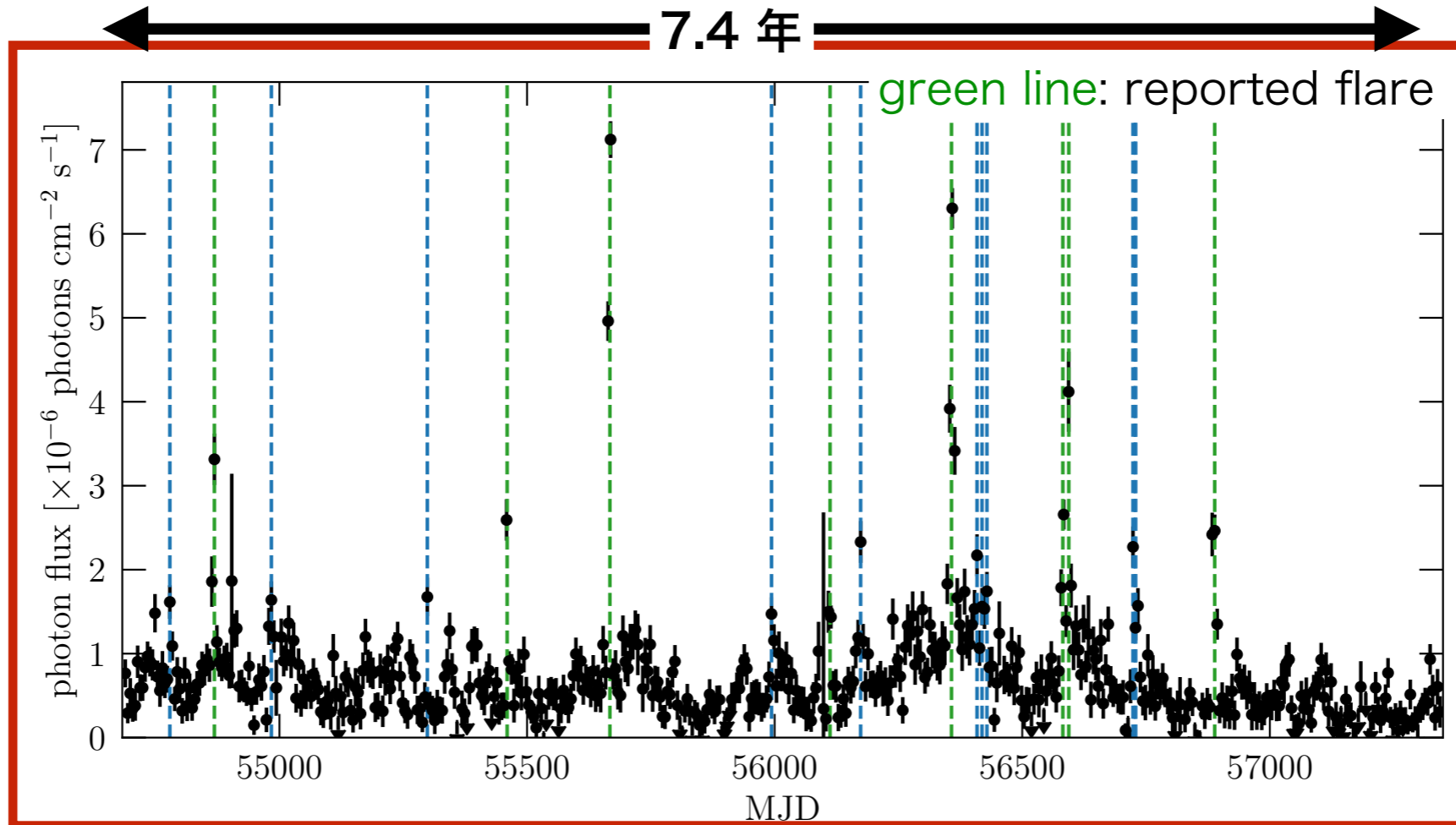
$$\frac{dN}{dE_\gamma dt} = N_{sync} \left(\frac{E_\gamma}{100 \text{ MeV}} \right)^{-\Gamma_{sync}} + N_{ic} \left(\frac{E_\gamma}{1000 \text{ MeV}} \right)^{-(\alpha + \beta \log(E_\gamma / 1000 \text{ MeV}))}$$

かに星雲のガンマ線
スペクトルモデル

シンクロトロン成分

IC

シンクロトロン成分5日ビン光度曲線(> 100 MeV)



(Arakawa+ submitted to ApJ)

3.5 “small flare”の探査

- 小フレア, “small flare”の探査

$$\frac{dN}{dE_\gamma dt} = \underbrace{N_{sync} \left(\frac{E_\gamma}{100 \text{ MeV}} \right)^{-\Gamma_{sync}}}_{\text{シンクロトロン}} + \underbrace{N_{ic} \left(\frac{E_\gamma}{1000 \text{ MeV}} \right)^{-(\alpha + \beta \log(E_\gamma / 1000 \text{ MeV}))}}_{\text{IC}} + \underbrace{N_{flare} \left(\frac{E_\gamma}{100 \text{ MeV}} \right)^{-\Gamma_{flare}}}_{\text{シンクロトロンフレア}}$$

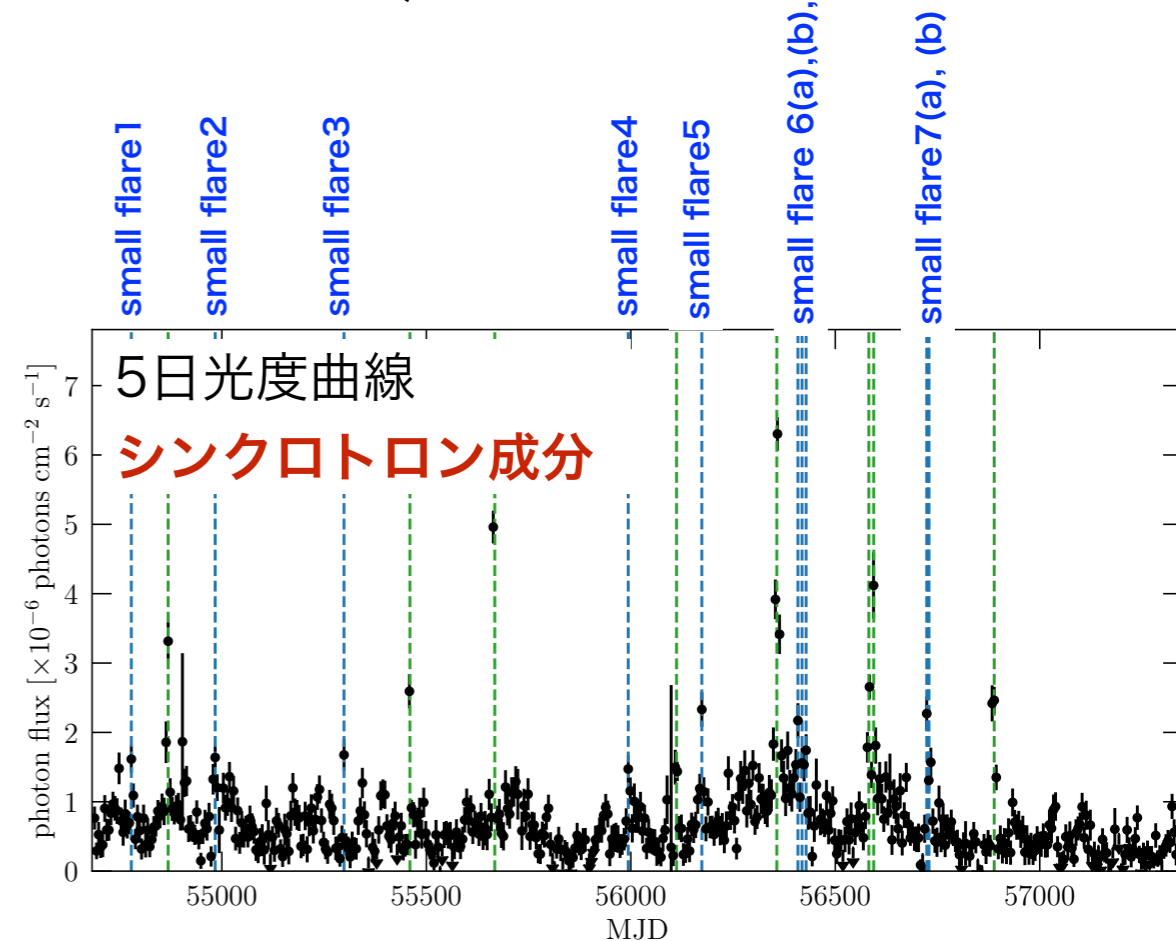
base-lineの結果でFix base-lineの結果でFix Free ($N_{flare}, \Gamma_{flare}$)

シンクロトロンフレア 成分のTS が 29以上(=5 σ 自由度=2)を小フレア, “small flare”と定義

検出できた”small flare”

post trial
(525 trials)

| Name | Bin midpoint (MJD) | TS (significance*) |
|-------------------------------------|---------------------|--|
| small flare 1 | 54779 | 32.6 (4.1 σ) |
| small flare 2 ^b | 54984 | 32.4 (4.1 σ) |
| small flare 3 | 55299 | 34.4 (4.3 σ) |
| small flare 4 ^c | 55994 | 37.3 (4.6 σ) |
| small flare 5 | 56174 | 78.2 (7.8 σ) |
| small flare 6 (a), (b), (c) | 56409, 56419, 56429 | 59.4, 30.2, 30.9 (6.5 σ , 3.8 σ , 3.9 σ) |
| small flare 7 (a), (b) ^d | 56724, 56734 | 93.4, 66.0 (8.7 σ , 7.1 σ) |



”reported flare”は全て検出

3.6 各々のフレアのtime profile

- 典型的な時間スケールを求める

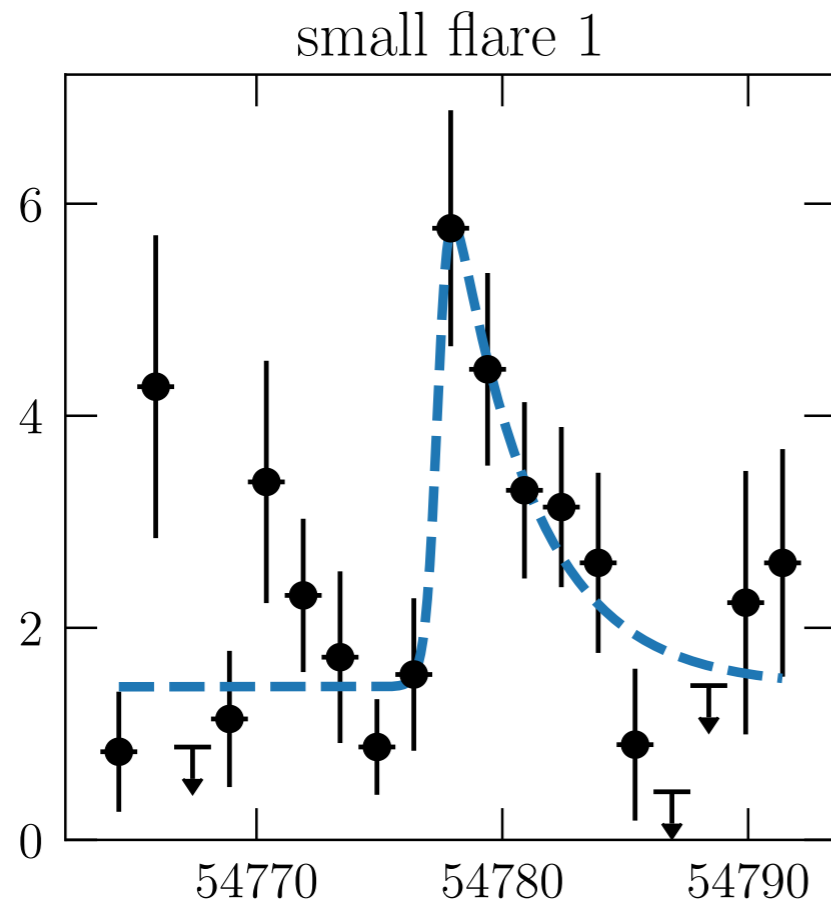
“small flare”の個数は5日ビンで決定

シンクロトロン1.5日ビン光度曲線 (> 100 MeV)

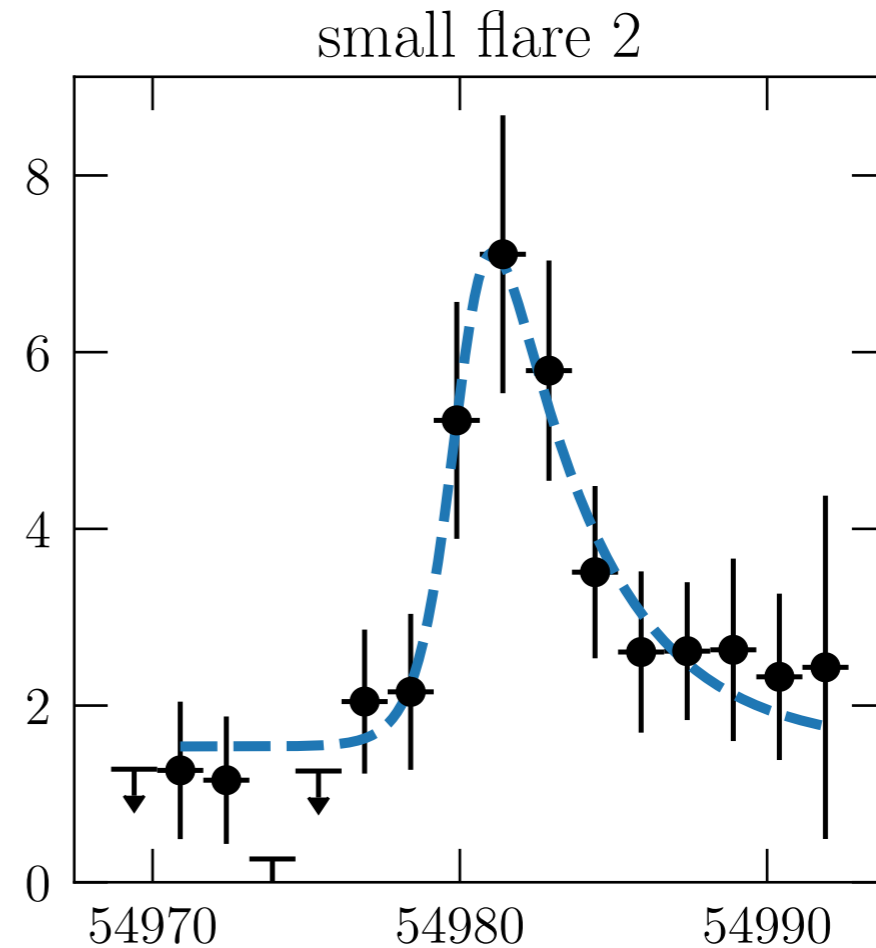
fitting function (e.g. Abdo+2010)

$$F(t) = F_b + \sum_i^N \frac{F_{i,0}}{e^{-(t-t_{i,0})/\tau_{i,rise}} + e^{-(t-t_{i,0})/\tau_{i,decay}}}$$

rise time decay time



$\tau_{rise} = 0.3 \pm 0.4$ day
 $\tau_{decay} = 3.3 \pm 1.7$ day



$\tau_{rise} = 0.7 \pm 0.5$ day
 $\tau_{decay} = 3.2 \pm 1.3$ day

3.6 各々のフレアのtime profile

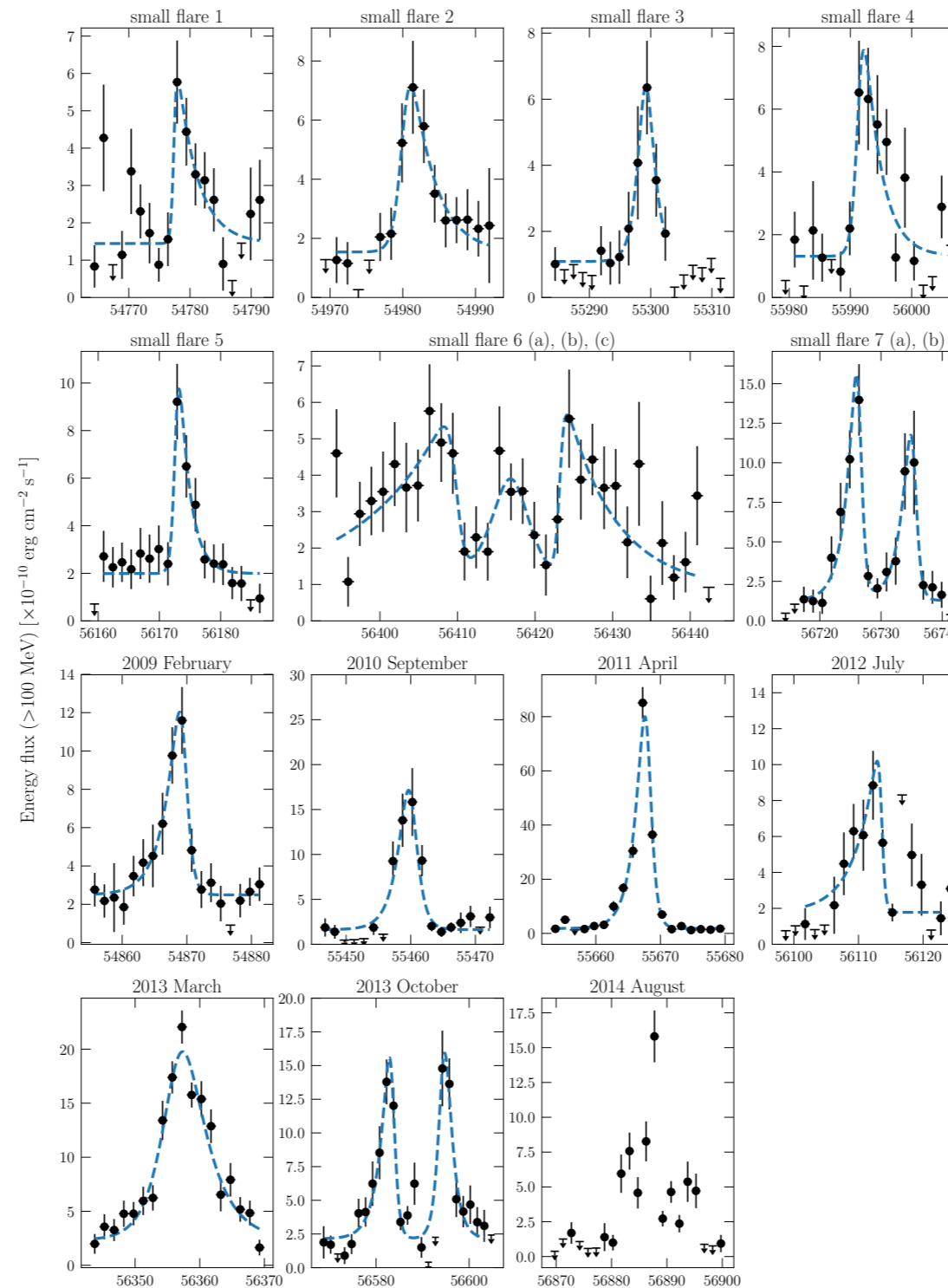
- 典型的な時間スケールを求める

“small flare”の個数は5日ビンで決定

fitting function (e.g. Abdo+2010)

$$F(t) = F_b + \sum_i^N \frac{F_{i,0}}{e^{-(t-t_{i,0})/\tau_{1,rise}} + e^{-(t-t_{i,0})/\tau_{1,decay}}}$$

rise time decay time



(Arakawa+ submitted to ApJ)

3.6 各々のフレアのtime profile

- 典型的な時間スケールを求める

fitting function (e.g. Abdo+2010)

$$F(t) = F_b + \sum_i^N \frac{F_{i,0}}{e^{-(t-t_{i,0})/\tau_{i,rise}} + e^{-(t-t_{i,0})/\tau_{i,decay}}}$$

| flare id | F_b [$\times 10^{-10}$ erg cm $^{-2}$ s $^{-1}$] | F_0 [$\times 10^{-10}$ erg cm $^{-2}$ s $^{-1}$] | τ_{rise} [day] | τ_{decay} [day] | t_0 [MJD] |
|-------------------|---|---|------------------------|-------------------------|----------------|
| small flare 1 | 1.4 ± 0.2 | 5.6 ± 2.0 | 0.3 ± 0.4 | 3.3 ± 1.7 | 54777.4 ± 1.0 |
| small flare 2 | 1.5 ± 0.4 | 9.0 ± 2.6 | 0.7 ± 0.5 | 3.2 ± 1.3 | 54980.2 ± 0.7 |
| small flare 3 | 1.1 ± 0.4 | 10.6 ± 2.8 | 1.1 ± 1.0 | 1.3 ± 0.9 | 55299.1 ± 1.6 |
| small flare 4 | 1.3 ± 0.4 | 10.6 ± 3.1 | 0.6 ± 0.4 | 2.7 ± 1.1 | 55991.4 ± 0.6 |
| small flare 5 | 2.0 ± 0.3 | 12.5 ± 4.2 | 0.4 ± 0.2 | 1.8 ± 0.8 | 56172.7 ± 0.5 |
| small flare 6 (a) | 0.8 ± 1.4 ^a | 5.2 ± 1.7 | 11.7 ± 8.2 | 0.6 ± 0.5 | 56409.8 ± 0.7 |
| small flare 6 (b) | 0.8 ± 1.4 ^a | 6.1 ± 3.0 | 2.5 ± 3.0 | 2.2 ± 3.0 | 56417.0 ± 3.8 |
| small flare 6 (c) | 0.8 ± 1.4 ^a | 5.6 ± 1.5 | 0.3 ± 1.3 | 6.7 ± 6.8 | 56423.2 ± 1.3 |
| small flare 7 (a) | 1.3 ± 0.5 ^a | 24.6 ± 5.8 | 1.6 ± 0.6 | 0.5 ± 0.1 | 56726.4 ± 0.4 |
| small flare 7 (b) | 1.3 ± 0.5 ^a | 18.2 ± 6.3 | 1.7 ± 0.7 | 0.6 ± 0.3 | 56735.3 ± 0.6 |
| 2009 Feb | 2.5 ± 0.3 | 16.3 ± 3.8 | 2.3 ± 0.9 | 0.7 ± 0.3 | 54869.5 ± 0.6 |
| 2010 Sep | 1.6 ± 0.3 | 30.0 ± 6.6 | 1.7 ± 0.6 | 1.0 ± 0.3 | 55460.0 ± 0.6 |
| 2011 Apr | 1.8 ± 0.3 | 142.7 ± 10.8 | 1.6 ± 0.1 | 0.6 ± 0.1 | 55668.0 ± 0.1 |
| 2012 July | 1.8 ± 0.6 | 11.2 ± 3.5 | 3.3 ± 1.4 | 0.3 ± 1.2 | 56113.6 ± 0.8 |
| 2013 Mar | 2.3 ± 0.5 | 34.2 ± 2.0 | 2.4 ± 0.4 | 3.6 ± 0.6 | 56356.8 ± 0.6 |
| 2013 Oct (a) | 2.1 ± 0.3 ^a | 23.5 ± 3.6 | 2.1 ± 0.5 | 0.7 ± 0.2 | 56583.4 ± 0.3 |
| 2013 Oct (b) | 2.1 ± 0.3 ^a | 27.0 ± 4.8 | 1.0 (fixed) | 1.5 ± 0.5 | 56594.5 ± 0.6 |

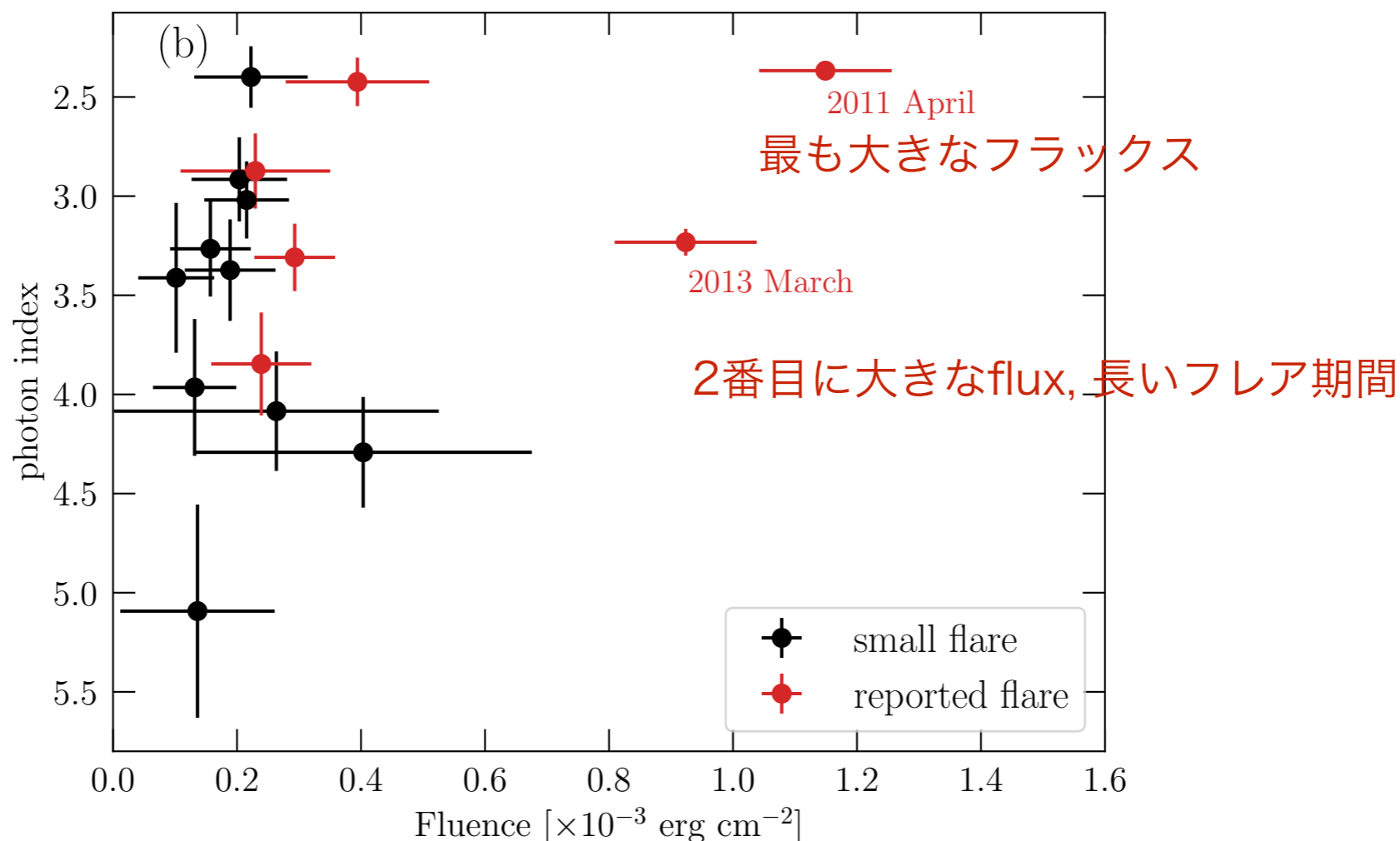
フレアの典型的な時間スケールはrise time、decay timeともにdayスケール

3.7 “small flare” と “reported flares” の比較

• “small flare” vs. “reported flares”

フルーエンス [erg cm⁻²] vs. 光子指数

フルーエンス: フレア期間 (t_{peak}-t_{rise}) — (t_{peak}+t_{decay}) のフラックス×フレア期間(t_{rise}+t_{decay})



- “small flare” と “reported flare” には大きな差が見られない
- **弱いフレアの頻度が高い** (2011 Apr, 2013 Marchは例外的に大きいことを示唆)
- LATでは検出できないようなより弱いフレア成分の存在を示唆

3.8 “small flare”生成場所の物理的環境

- “small flare”生成領域の磁場:

- 観測された“small flare”の典型的な時間スケール=> day

- ドップラーブーストを無視
- “small flare”生成領域内で一様な磁場

rise time = 加速時間:
$$B \simeq 1 \eta^{2/3} \left(\frac{\tau_{\text{acc}}}{1 \text{ day}} \right)^{-2/3} \left(\frac{\varepsilon}{100 \text{ MeV}} \right)^{1/3} \text{ mG}$$

η : 加速効率パラメータ
 $\eta > 1 \Rightarrow$ MHD regime
 $\eta = 1 \Rightarrow$ 磁気リコネクション

decay time = シンクロトロン放射冷却でエネルギーを失う時間:

$$B \simeq 1 \left(\frac{\tau_{\text{cool}}}{2 \text{ day}} \right)^{-2/3} \left(\frac{\varepsilon}{100 \text{ MeV}} \right)^{-1/3} \text{ mG}$$

- ✓ dayスケールの時間変動から決まる磁場: $\sim 1 \text{ mG}$
 - ✓ 放射モデルから期待されるPWN内の平均磁場: $\sim 200 \mu\text{G}$
- => “small flare”の起源は放射モデル計算から期待される領域とは異なる。**

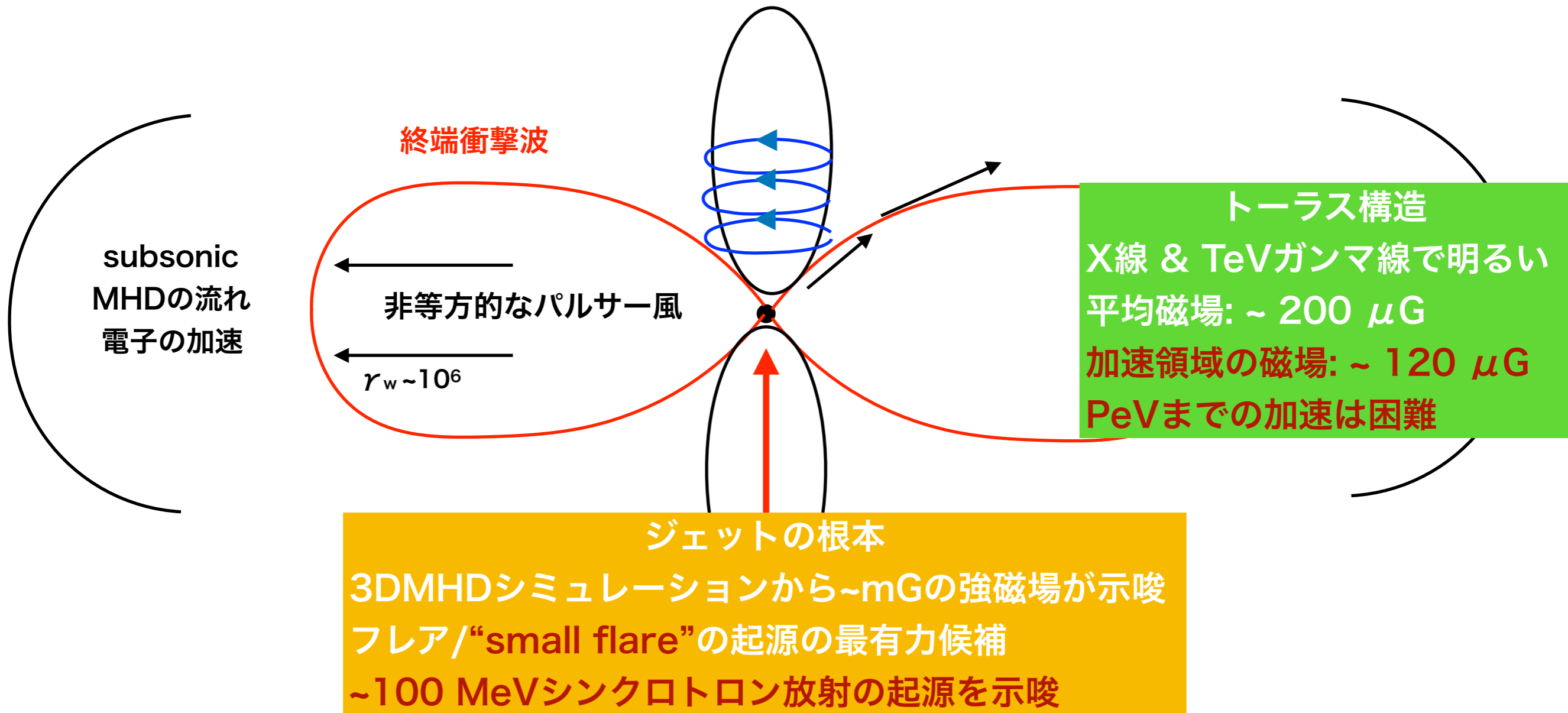
3.9 “small flare”の意義、起源

- ・ 7.4年のデータを用いて”small flare”の存在を示した
 - ・ フレアは年に1回程度のレアな現象ではない
 - ・ 強度が弱いフレアの頻度が高い
 - ・ “small flare”よりも弱い成分の存在が示唆
- ⇒ フレアの強度、時間変動に着目した研究だけではなく、**フレアの統計的な強度分布**に関する理論研究の必要性
- ・ ”small flare”はday scaleの時間変動
 - ・ “small flare”は”reported flare”と同じ強磁場環境下~1 mGに起源
 - ⇒ おそらく同じ領域、ジェットの根本が最有力候補

強磁場環境に起源を持つフレアからの100 MeVガンマ線への寄与が小さくない or の大部分を担っている (かもしれない)

4. 結論

- PeV電子 (100 MeVシンクロトロン放射)の起源



かに星雲からの $\sim 100 \text{ MeV}$ シンクロトロン放射の大部分が
強磁場領域 $\sim 1 \text{ mG}$ である可能性を提示

5. まとめ

- > 100 TeVガンマ線から加速領域の物理環境への制限
 - 加速領域の磁場 $\sim 120 \mu\text{G}$
 - PeV電子を閉じ込めるのは困難
 - 100 MeVガンマ線は“wind electron”とは**別成分**からの放射を示唆
 - “wind electron” + **Maxwellian**で説明可能,
 - **Maxwellian**成分の存在及び磁場は将来TeVガンマ線観測で検証可能
- “small flare”の検出
 - 7.4年のデータを用いて系統的にフレアの探査を行った
 - 弱いフレアがメイン&より弱いフレアの存在が示唆
 - フレア成分が定常成分への寄与を示唆
 - フレアの時間スケールは**day**スケール
 - $\sim 1\text{mG}$ の強磁場 \gg かに星雲内の平均磁場 $\sim 200 \mu\text{G}$

かに星雲内でのPeV電子は $\sim 1\text{mG}$ の強磁場環境に起源を持つ可能性を提示