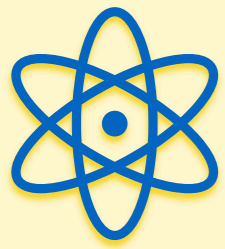


ガンマ線連星LS 5039の X線ガンマ線放射の研究 —マグネター連星の可能性—

Kavli IPMU 高橋忠幸研究室 博士3年

米田 浩基



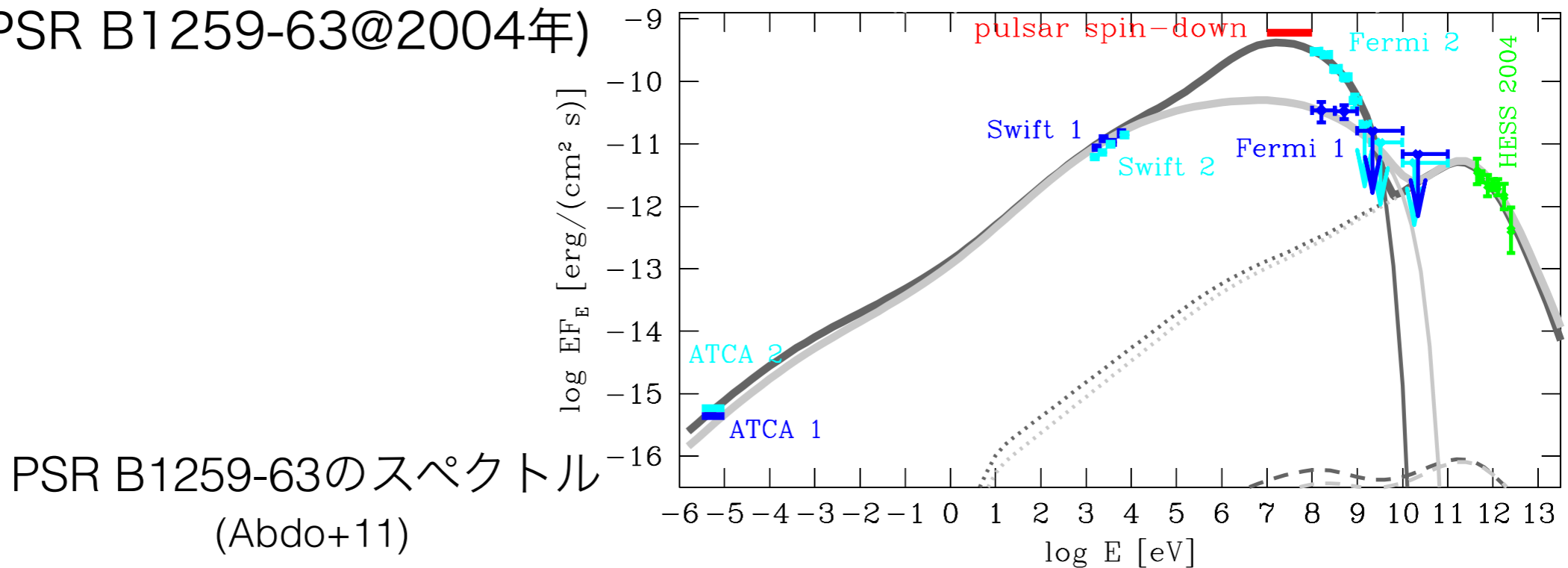
ガンマ線連星とは？

- TeV帯域まで延びる、非熱的な放射スペクトルを示す
 - 1 MeV以上に、放射エネルギーのピークを持つ
- と、X線連星とは極めて異なる特徴を持った連星系

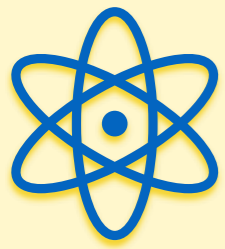
伴星は、数十太陽質量のOB星

GeV/TeV観測技術の向上とともに、2000年代から、8天体、発見

(初検出、PSR B1259-63@2004年)



TeV電子を生成する加速機構が存在 (宇宙の新たな大加速器)
粒子加速・非熱的放射のメカニズムは、現在に至るまで大きな謎

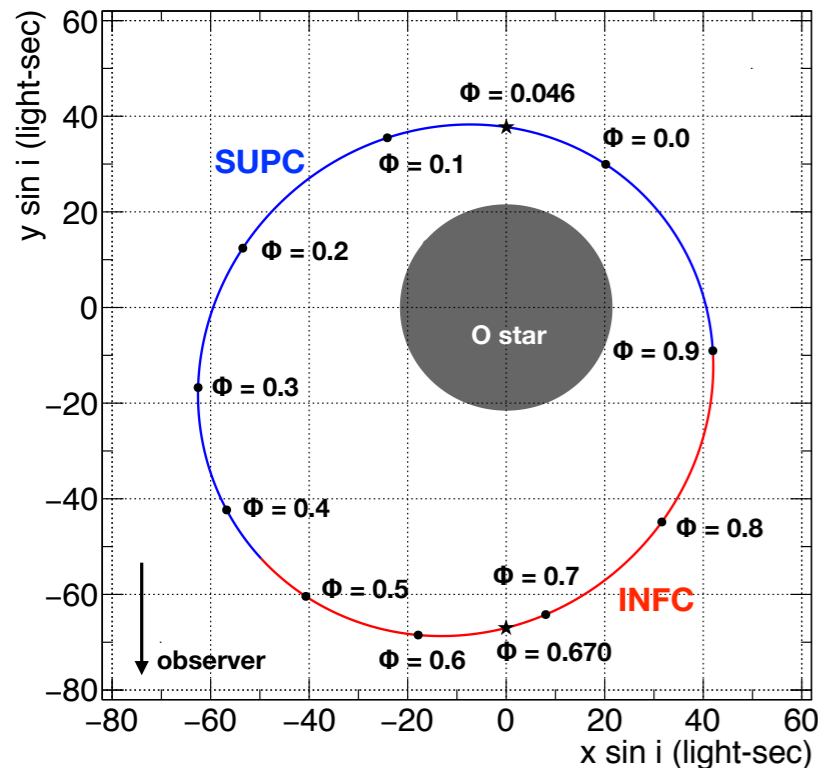


ガンマ線連星 LS 5039

LS 5039は、銀河系内で最も明るい、かつ、軌道周期が短い (3.9日)

→ 軌道全体に渡って、詳細な観測が可能なガンマ線連星

1.4 M_{\odot} の中性子星を仮定したときの軌道



距離 : 2.5 ± 0.1 kpc (Casares+05)

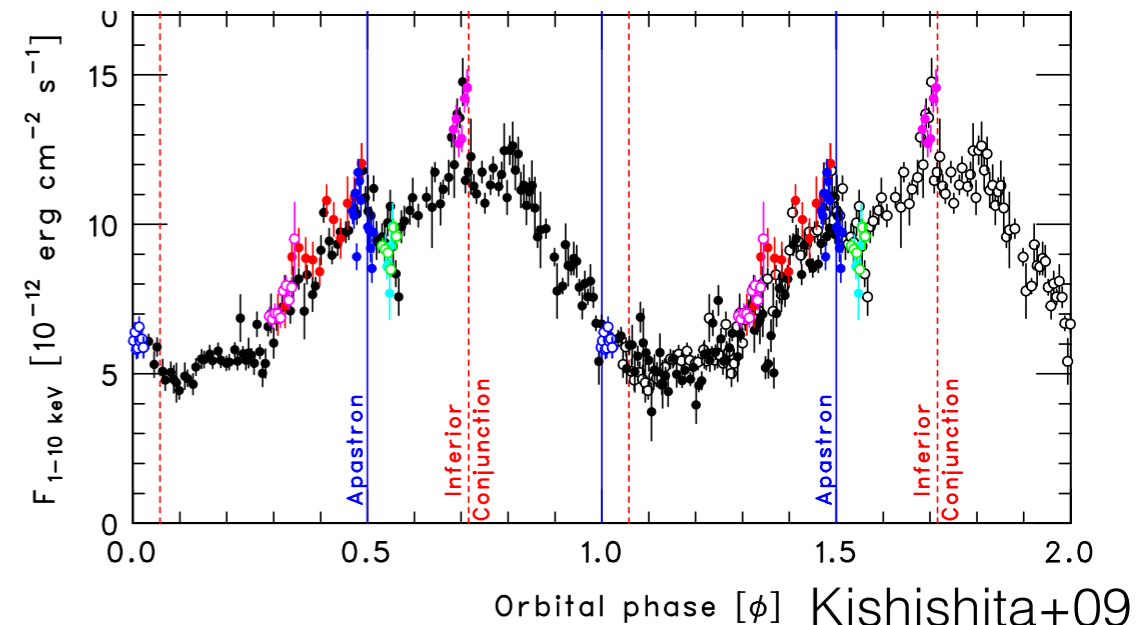
伴星 : $22.9^{+3.4}_{-2.9} M_{\odot}$ のO星

離心率 : 0.35 ± 0.04 (Casares+05)

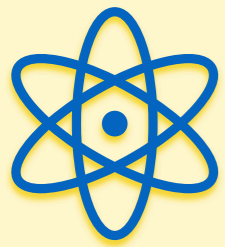
コンパクト星 : $> 1.2 M_{\odot}$ (Aragona+09)

コンパクト星が中性子星かブラックホールかは未知

X線の軌道ライトカーブ

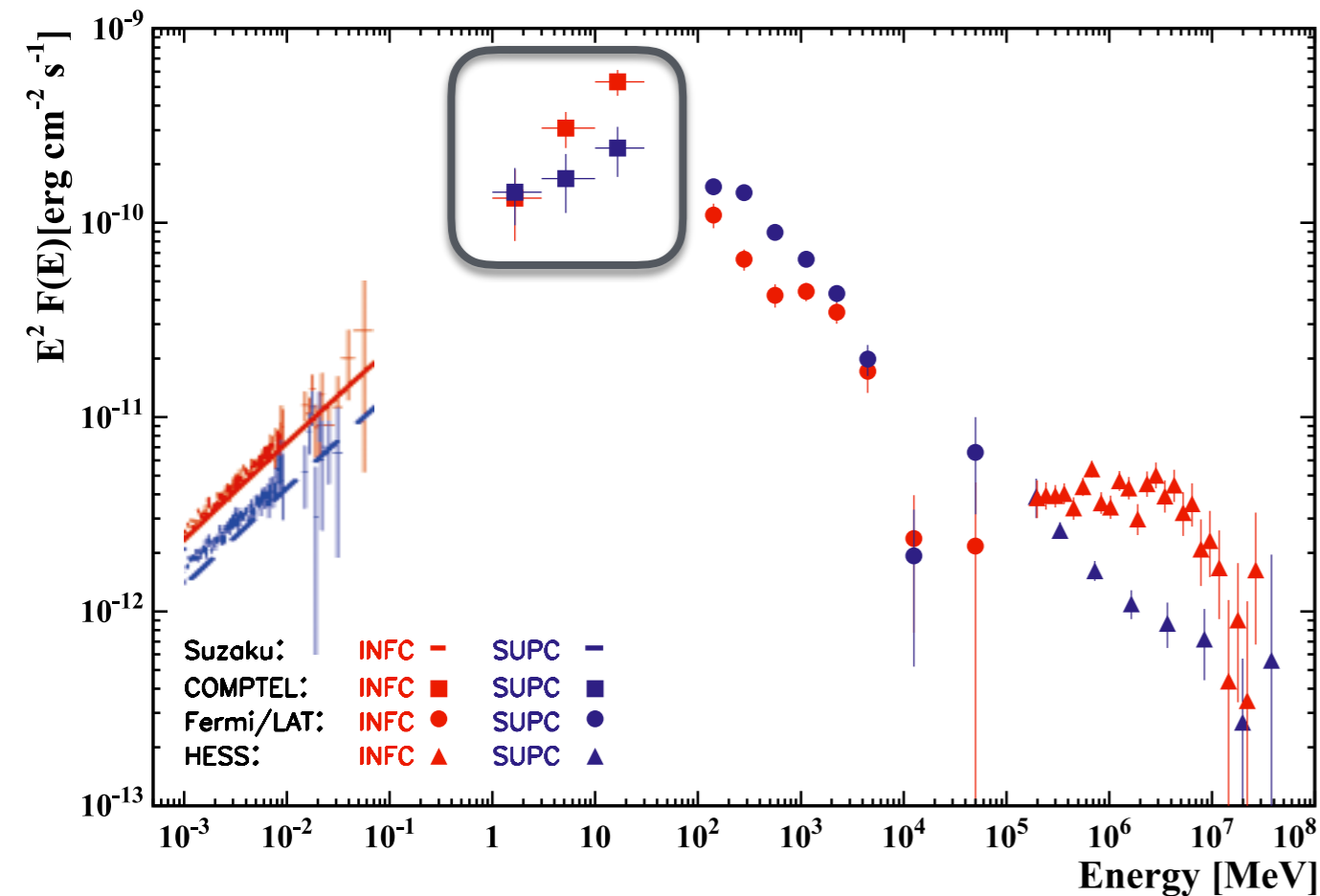


- 電波からTeVガンマ線で観測可能
- X線からTeVまで、連星運動と同期して放射強度が変動

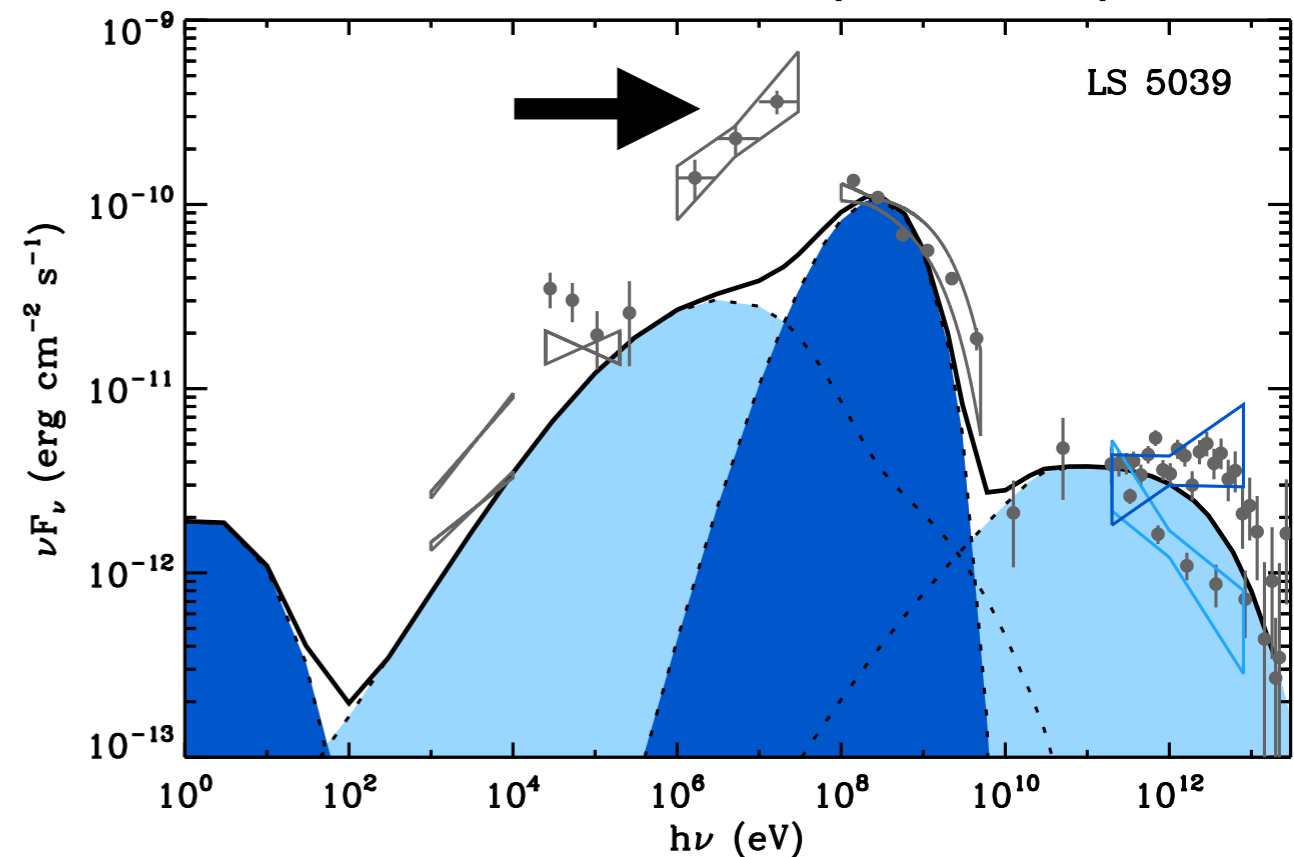


極めて明るいMeVガンマ線放射

CGRO/COMPTEL (1991-2000) の観測データを再解析した結果、
ガンマ線連星LS 5039から、MeVガンマ線放射を発見 (Collmar+14)

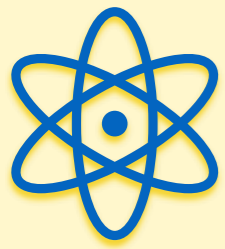


パルサー風モデルによるLS 5039の
スペクトルモデル (Dubus+15)



それまで、マイクロクエーサーモデル・パルサー風モデルだと思われていたが、
このMeVガンマ線放射は、どちらでも説明できない

放射機構の根本的な考えの見直しが必要
MeVガンマ線放射の理解が鍵を握る



MeVでピーク？

シンクロトロン放射のエネルギーピーク

$$h\nu = 67 \text{ MeV} \times \eta^{-1}$$

(※ 電子の最大エネルギーが、
粒子加速と、シンクロトロン冷却の釣り合いで決定されているとき)

粒子加速の効率 η : 実効的に、磁場の $1/\eta$ の大きさの電場で加速

$$\dot{E} = \frac{qBc}{\eta}$$

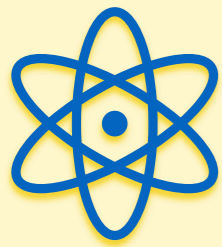
フェルミ加速 →
(既存のモデルが仮定)

$$\eta = 6(V/c)^{-2} \quad V: \text{ショック上流の速度}$$

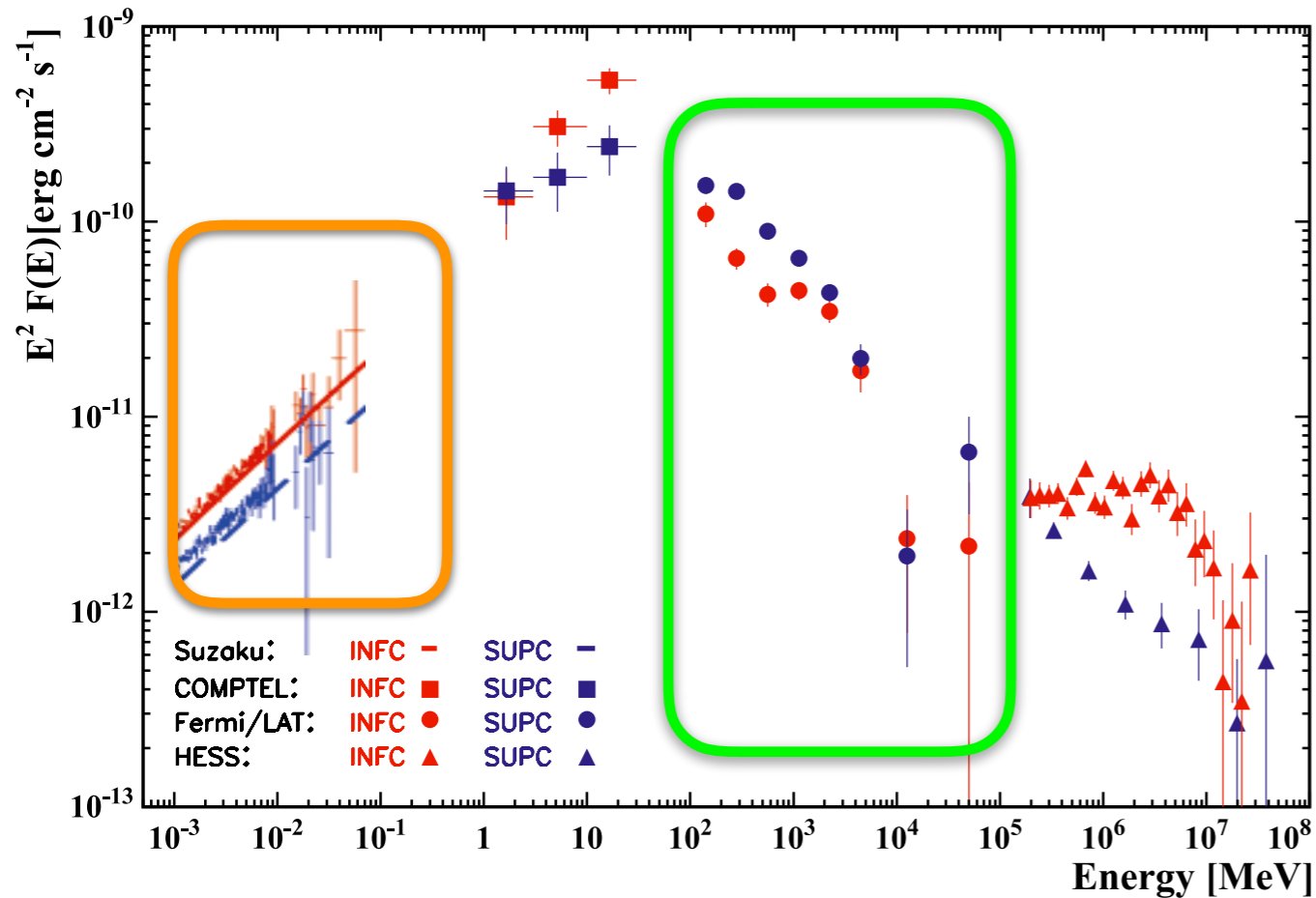
観測されたMeV放射まで伸ばすには → $\eta \sim 1$

→ フェルミ加速でない、極めて高効率の粒子加速機構が存在？

**LS 5039の詳細な観測を通して、
標準的な加速理論を超えた、新しい宇宙粒子加速に迫りたい**



本研究の方針



① 観測的研究

- 硬X線帯域での
スペクトル・パルス探索
→ NuSTAR衛星の高感度観測により実現
- GeV帯域の詳細な解析
→ Fermi衛星11年分のデータ解析により実現

② 理論的なスペクトルの考察

- できるだけ仮定を排除したモデルを構築し、観測データと比較することで、放射機構の物理パラメータに制限。

X線からTeVガンマ線の観測データを包括的に利用し、
ガンマ線連星 LS 5039の放射機構の解明を目指す

研究内容

① 観測的研究

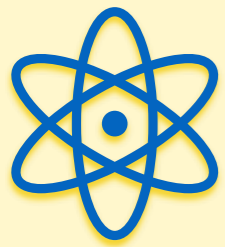
i) **硬X線帯域でのパルス探索** ←今ここ

ii) GeVガンマ線帯域でのスペクトル解析 (Fermi 11年分の解析)

② 理論的なスペクトルの考察

iii) スペクトルモデリングと、観測との比較

iv) LS 5039の放射物理機構の新解釈



パルス探索の目的と、先行研究

LS 5039中のコンパクト星が、
ブラックホールか中性子星かは、未だ分かっていない

もし、中性子星→星自転に伴った周期的なパルス放射が期待

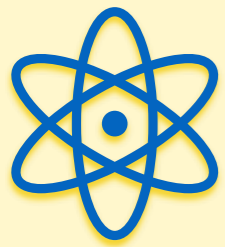
過去の観測では、いずれも未検出

- ・ 電波帯域 (4.1-14.5 μ Jy) : McSwain+11
- ・ 軟X線帯域 (0.3-10 keV) : Rea+11

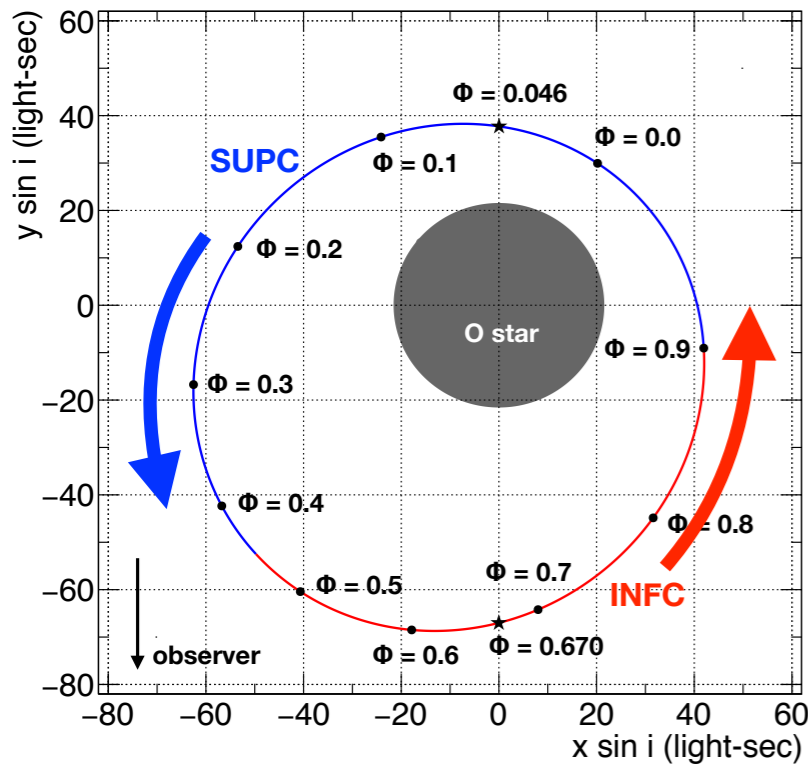
→ 星風による吸収の可能性が議論

- ・ より高エネルギーであれば、星風による吸収が弱い
- ・ 硬X線では、すざくHXD (1.5軌道分)・NuSTAR (1軌道分) の長時間観測データがある

硬X線帯域 (> 10 keV)に注目し、パルス探査を実施



軌道運動によるドップラー効果



軌道運動による効果

- 中性子星の軌道運動の速度 $\sim 0.001 c$
→ ドップラー効果でパルス信号がなまされる
- 軌道運動のパラメータの不定性が大きい
→ 軌道運動を予め補正することが難しい

単純かつ最適な方法

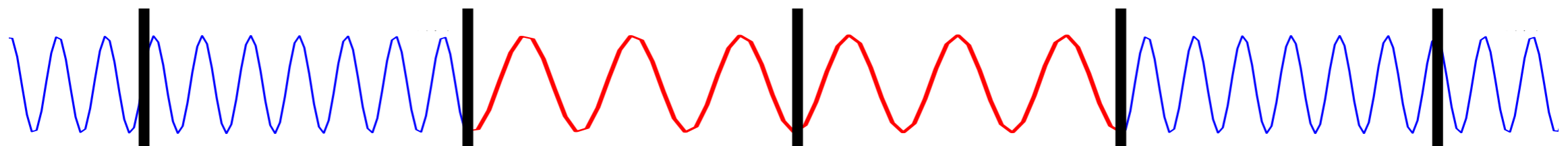
1. 観測データを、以下を満たすように、適当な時間幅 (T_{sub}) ごとに分割する

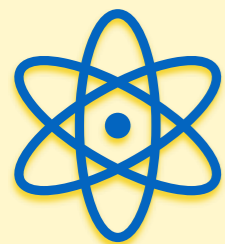
Fourier解析の分解能 ($1/T_{\text{sub}}$) $>$ 軌道運動によるFourierピークの広がり ($0.001/P$)

$$T_{\text{sub}} < 1000 \times \text{Pulse Period}$$

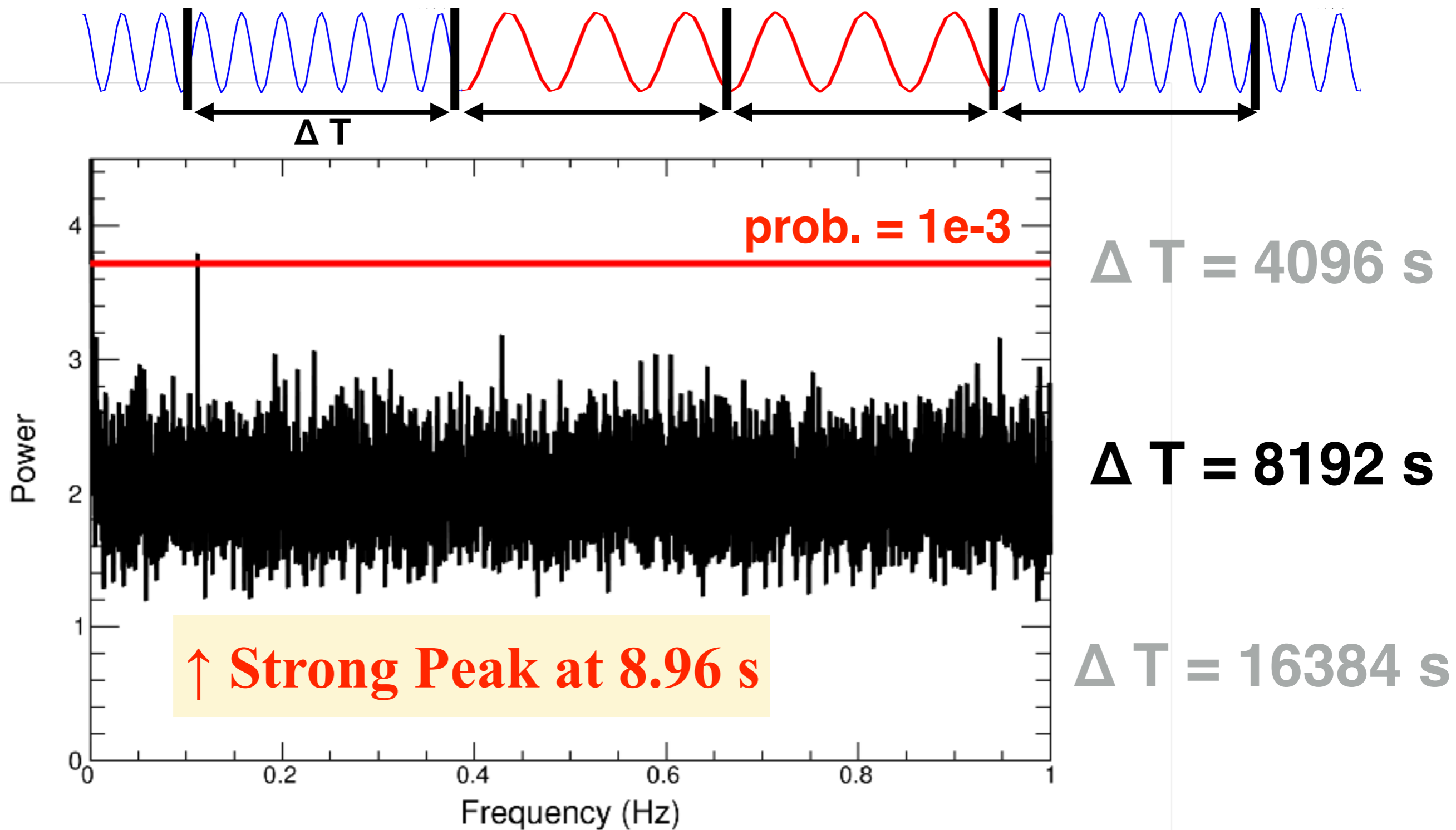
2. 分割データごとに、Fourier解析を実行。それらを平均したパワースペクトルを作成

※ 分割データ中に10 events以上確保するため、1 Hzまでを探索した

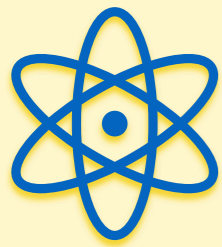




すざくHXD (10-30 keV)の解析結果



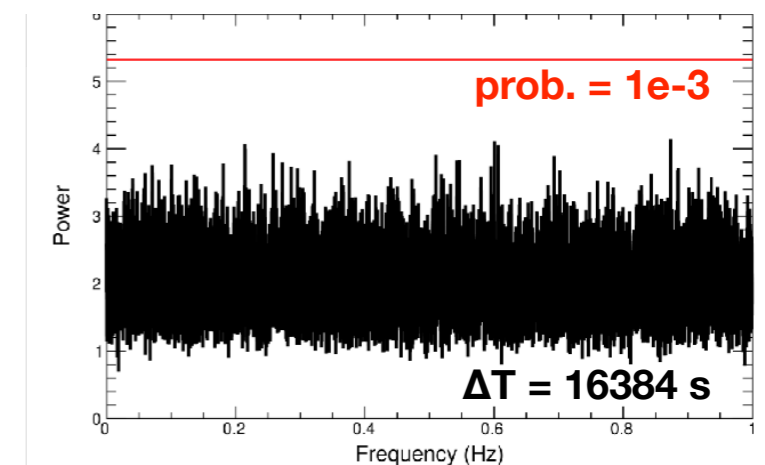
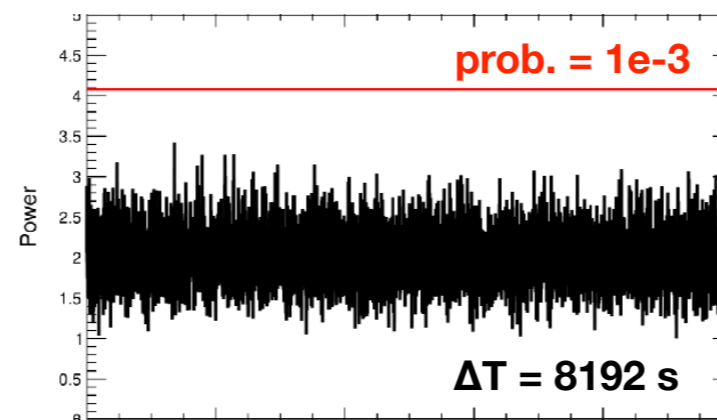
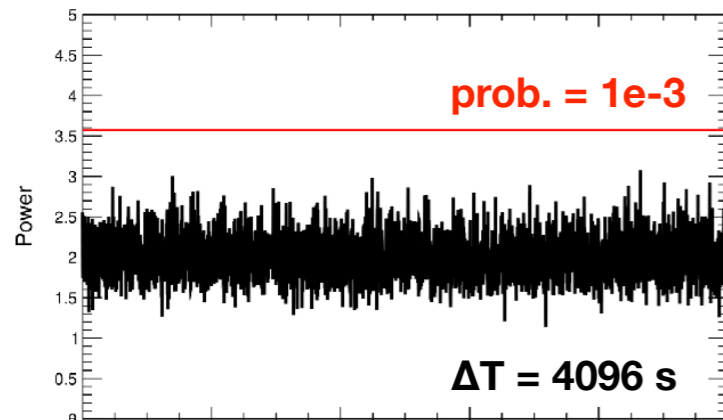
試行数を考慮した偶然確率 1.1×10^{-3} で、8.96 s の周期信号を検出



NuSTAR衛星データの解析結果

NuSTARの観測データ(3-10, 10-30 keV)に同様の解析を実行

E = 10 - 30 keV

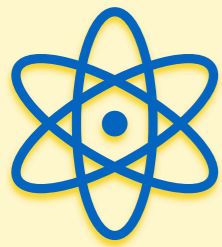


NuSTARでは、有意なピークはなし。より微弱な周期信号を調査

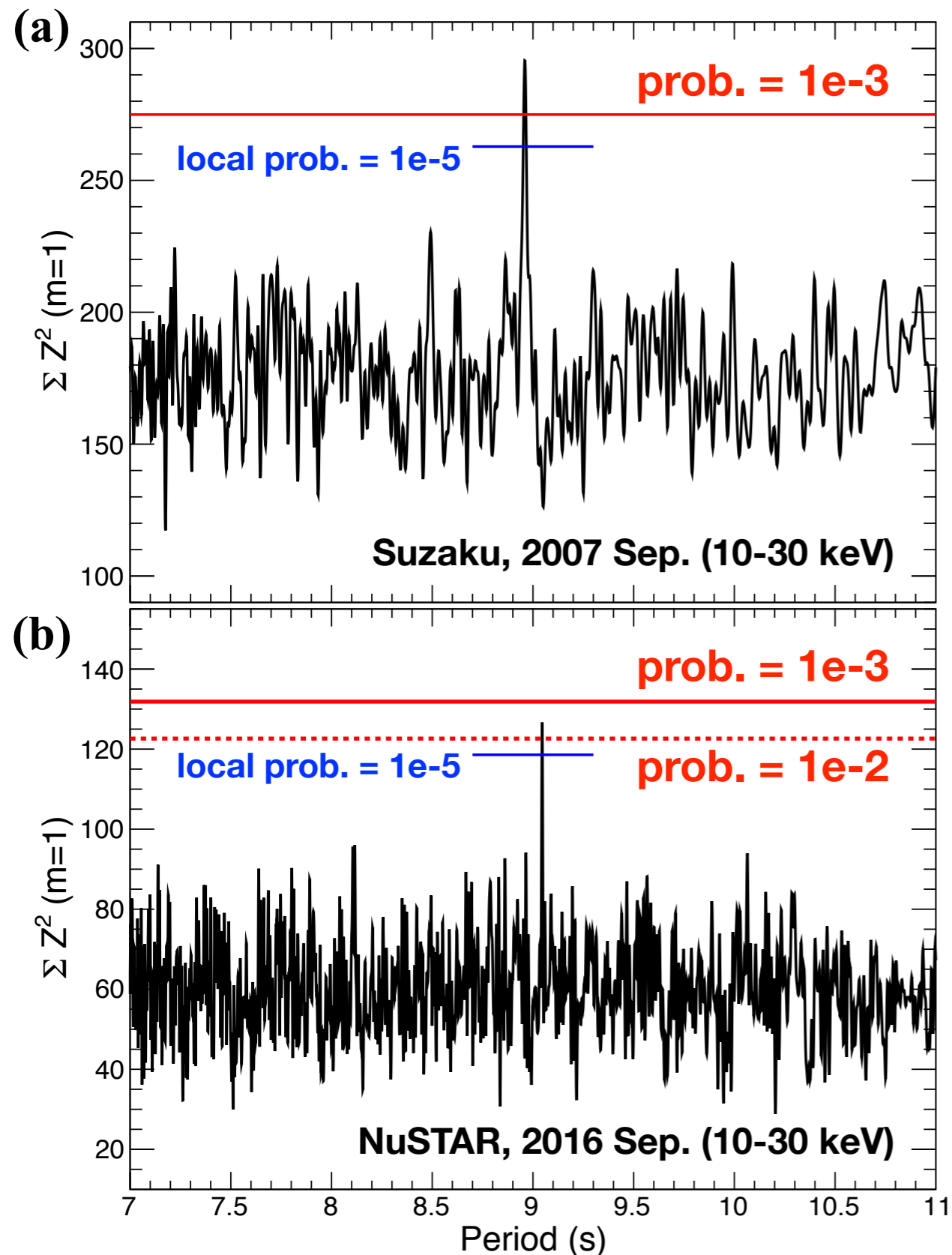
→ 9 s付近に周期信号の兆候がないか調べるため、以下の統計量を利用

Z² 統計 (De Jager+89)
$$Z_m^2 = \frac{2}{N} \sum_{l=1}^{l=m} \left(\left(\sum_i \cos 2\pi l \frac{t_i}{P} \right)^2 + \left(\sum_i \sin 2\pi l \frac{t_i}{P} \right)^2 \right) \simeq 2 \log L$$

1. 周期を仮定して、畳み込みライトカーブを作成
2. 得られたライトカーブをFourier変換
3. m次までのFourier成分のパワーを足し合わせる



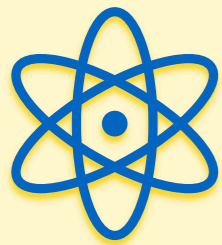
NuSTARでも9sの周期成分の発見



9.046sの周期性の兆候を発見
7-11 s, $\Delta T = 10000$ sのとき、
偶然確率 3.5×10^{-3}

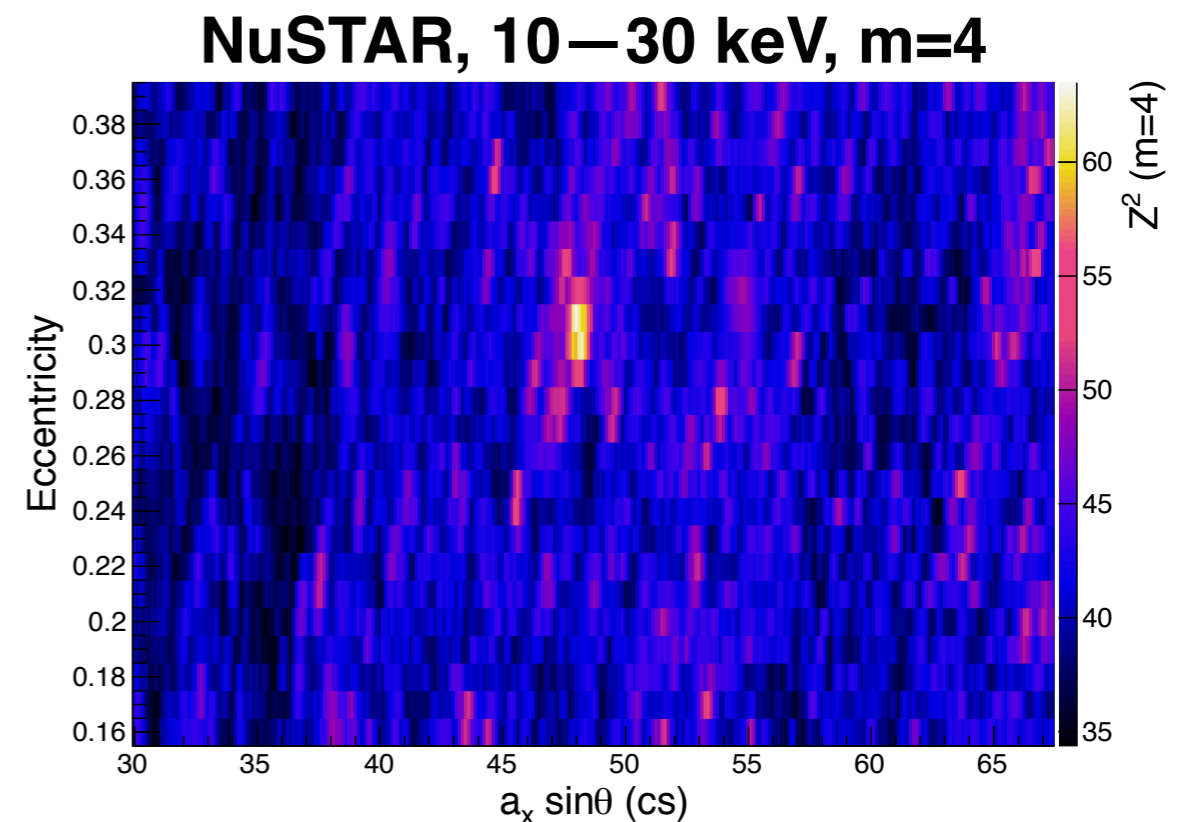
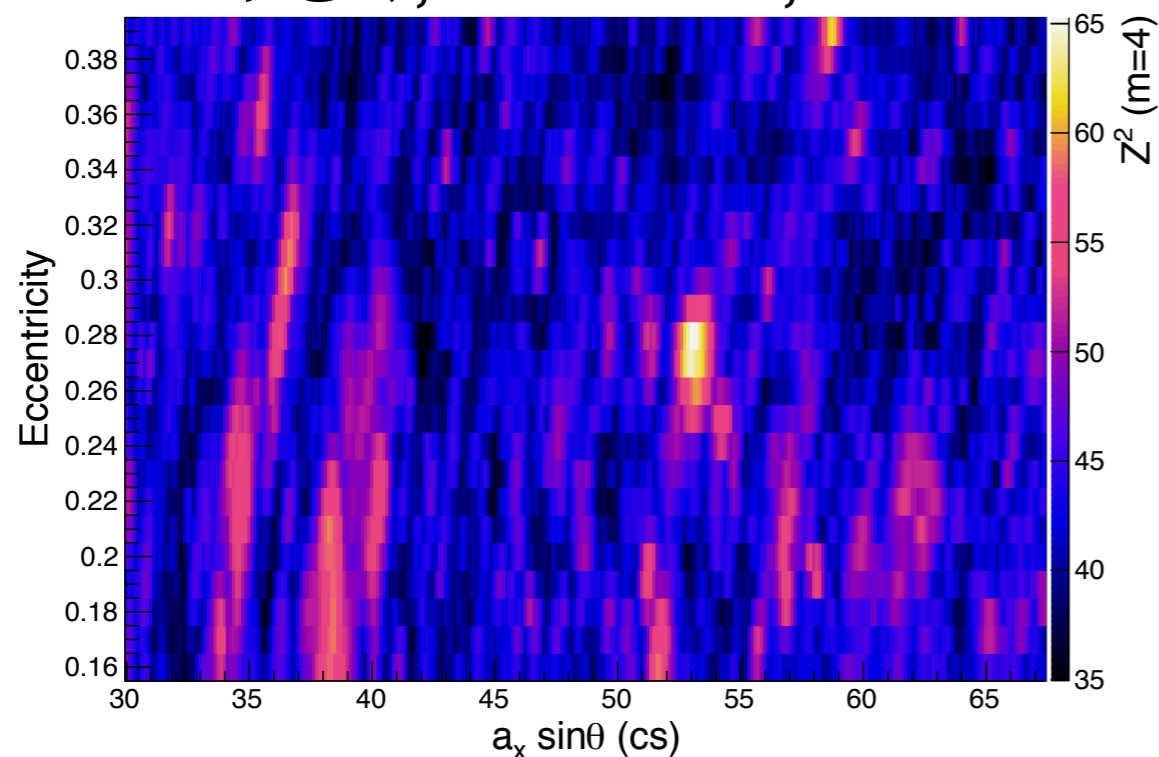
すざく衛星 (2007 Sep.)
 $P = 8.960 \pm 0.009$ s
NuSTAR衛星 (2016 Sep.)
 $P = 9.046 \pm 0.009$ s

↓
LS 5039のコンパクト星が
 $P \sim 9$ s
 $P_{\text{dot}} \sim 3 \times 10^{-10} \text{ s s}^{-1}$
の中性子星であることを強く示唆



軌道運動補正

1. 軌道パラメータを仮定し、中性子星軌道を計算
2. 中性子星の位置による光子到来時間のずれを補正
3. データ分割をせず、ひとつづくのデータを利用して、 Z^2 統計を計算
すざく, 10–30 keV, $m=4$



	$a_x \sin \theta$ [light sec.]	e	ω [deg.]
<i>Suzaku</i>	$53.05^{+0.70}_{-0.55}$	$0.278^{+0.014}_{-0.023}$	$54.6^{+5.1}_{-3.3}$
<i>NuSTAR</i>	$48.1^{+0.4}_{-0.4}$	$0.306^{+0.015}_{-0.013}$	$56.8^{+2.3}_{-3.1}$

両データで軌道パラメータはコンシストでない
軌道運動とは異なるモジュレーションの存在の示唆

研究内容

① 観測的研究

i) 硬X線帯域でのパルス探索

→ 周期 9 秒の硬X線パルスの兆候

ii) GeVガンマ線帯域でのスペクトル解析 (Fermi 11年分の解析) ←今ここ

② 理論的なスペクトルの考察

iii) スペクトルモデリングと、観測との比較

iv) LS 5039の放射物理機構の新解釈

研究内容

① 観測的研究

i) 硬X線帯域でのパルス探索

→ 周期 9 秒の硬X線パルスの兆候

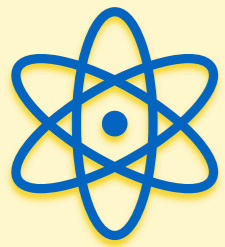
ii) GeVガンマ線帯域でのスペクトル解析 (Fermi 11年分の解析)

→ 1 GeV付近を境目に、異なる放射成分の存在

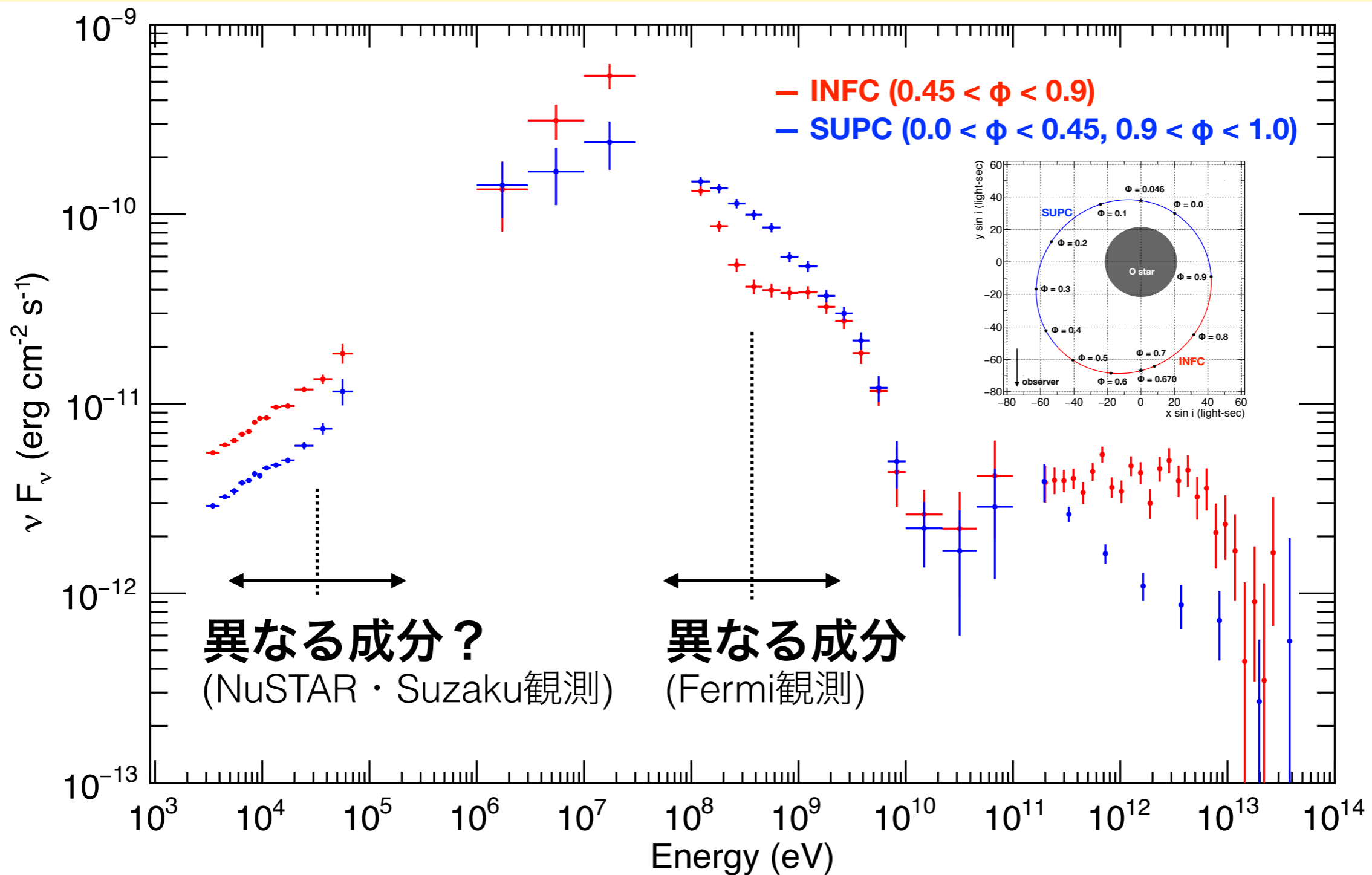
② 理論的なスペクトルの考察

iii) スペクトルモデリングと、観測との比較 ←今ここ

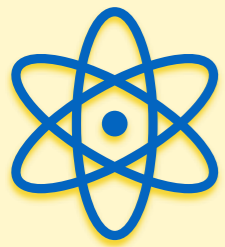
iv) LS 5039の放射物理機構の新解釈



今回、得られたLS 5039のSED



X線・MeVガンマ線の放射機構は、同じ？どのような物理条件？
→ スペクトルモデルとの比較から、物理条件に制限を与える



スペクトルモデル

球対称・一様な放射領域を仮定したスペクトルモデルを構築

大きさ、磁場、伴星からの距離を主なパラメータ

放射領域に注入される電子スペクトル べき指数 2-2.4のpowerlaw分布



注入と冷却が平衡したときの電子エネルギー分布

$$n(\gamma) = \frac{1}{|\dot{\gamma}(\gamma)|} \int_{\gamma}^{\infty} Q(\gamma') d\gamma'$$

定常的な電子分布

冷却率

注入される加速電子のエネルギー分布

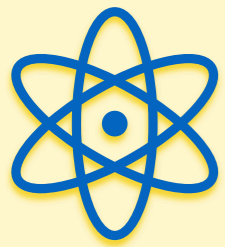
冷却過程

- 逆コンプトン散乱
- シンクロトロン放射
- 断熱冷却

$$\dot{\gamma}_{\text{ad}} = \frac{c}{R_{\text{acc}}} \gamma$$

(放射領域のサイズをパラメータ。放射領域が相対論的に膨張していることを仮定。)

X線シンクロトロンの放射領域はどう制限されるか？



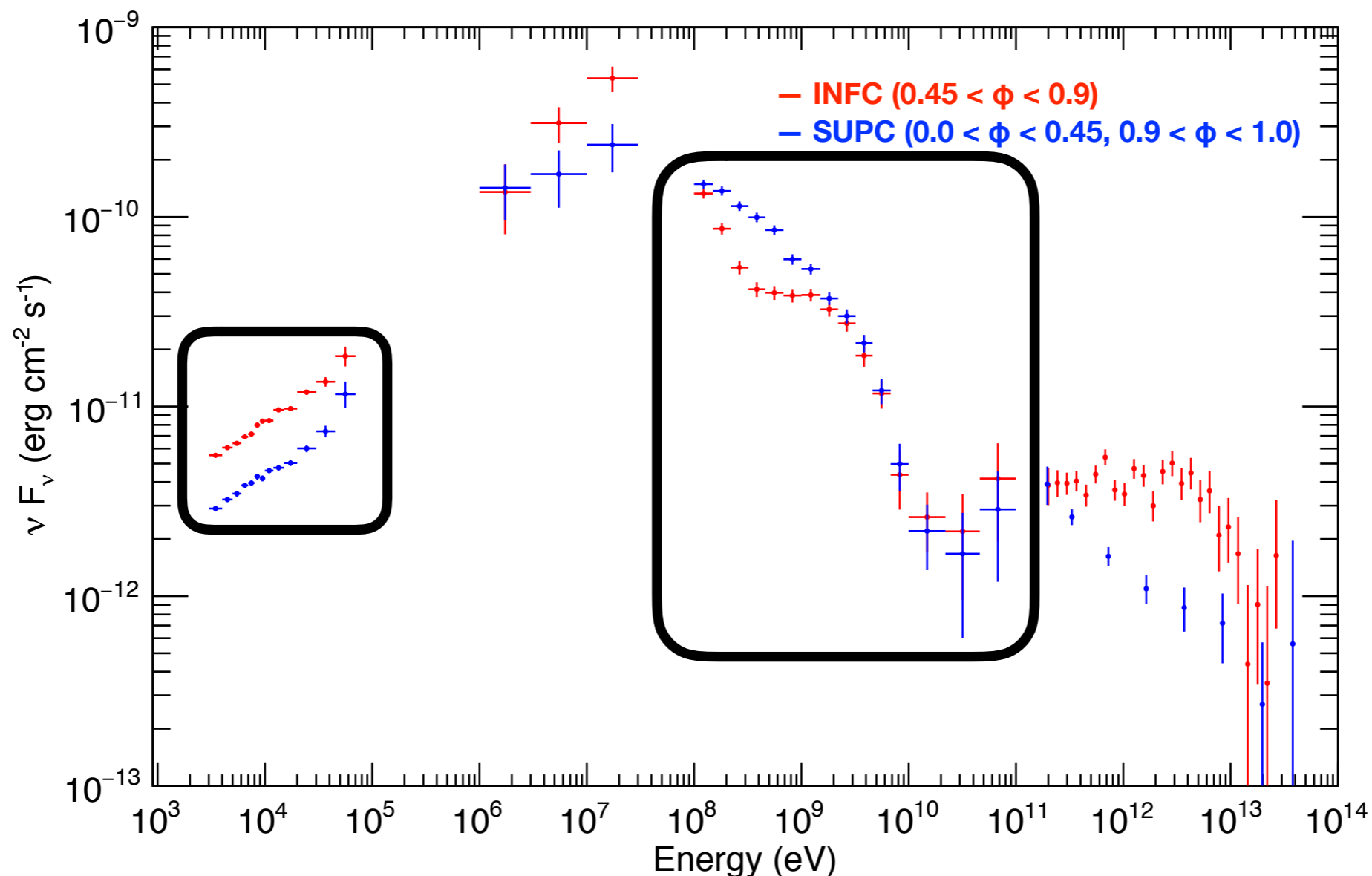
X線放射領域の制限

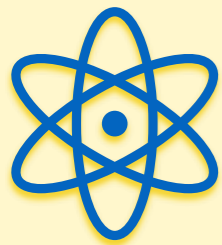
① X線帯域のべき指数 $\Gamma = 1.49 - 1.79$

② X線とGeVガンマ線のフラックス比

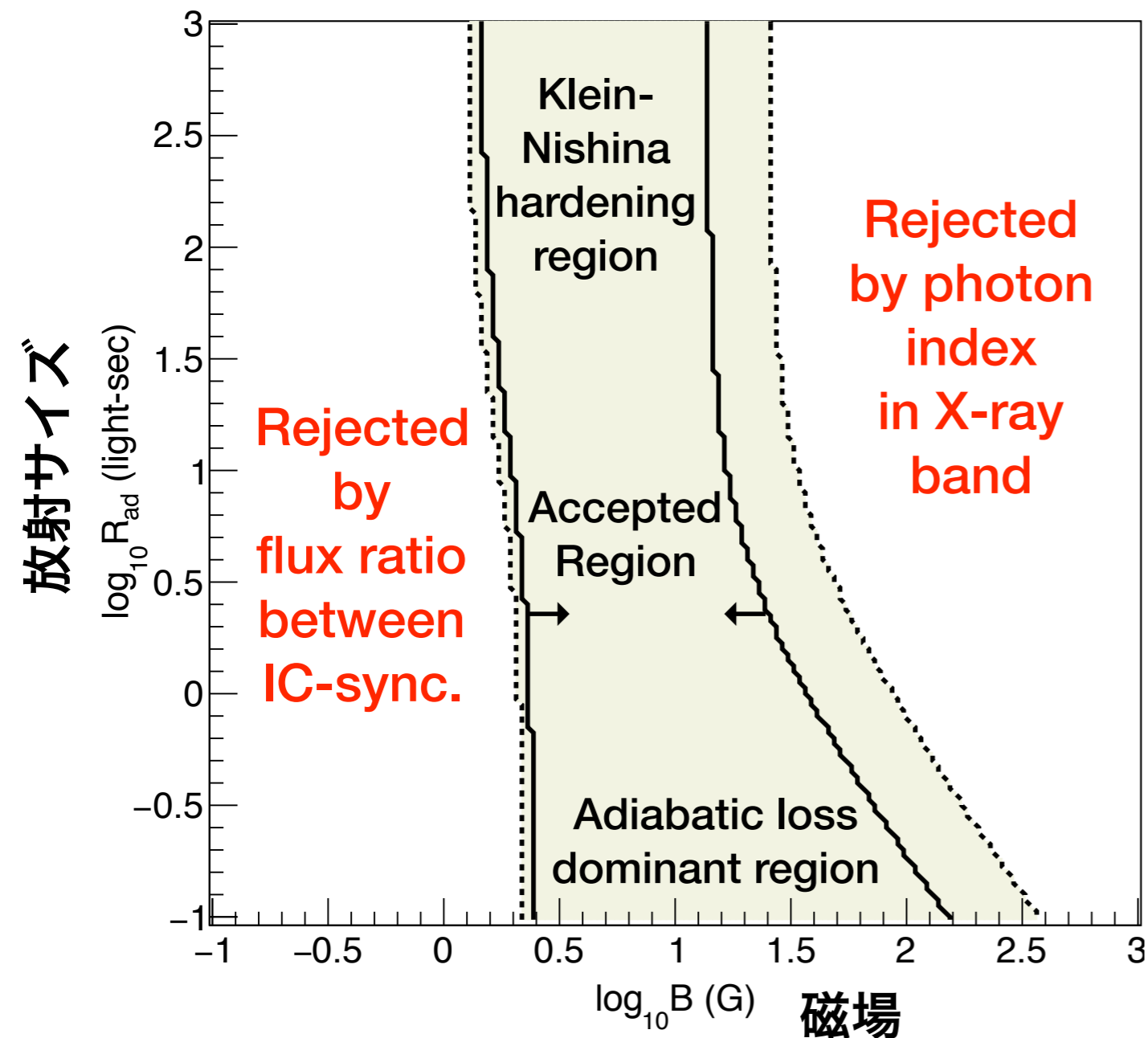
$$\nu F_\nu(E_X = 10 \text{ keV}) / \nu F_\nu(E_{\text{GeV}} = 5 \text{ GeV}) > 0.6$$

を満たす、**(磁場, 放射領域の大きさ)** を求める

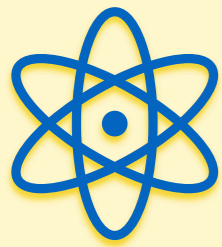




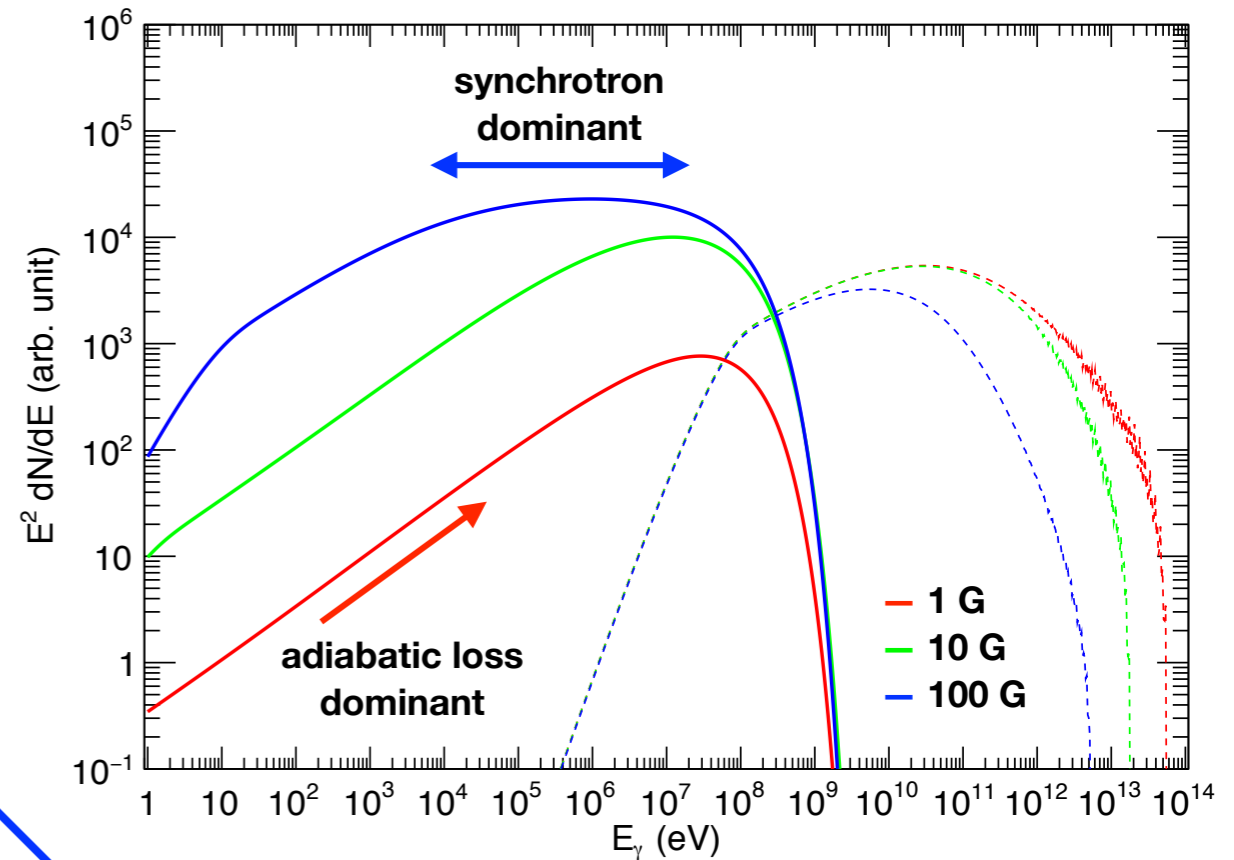
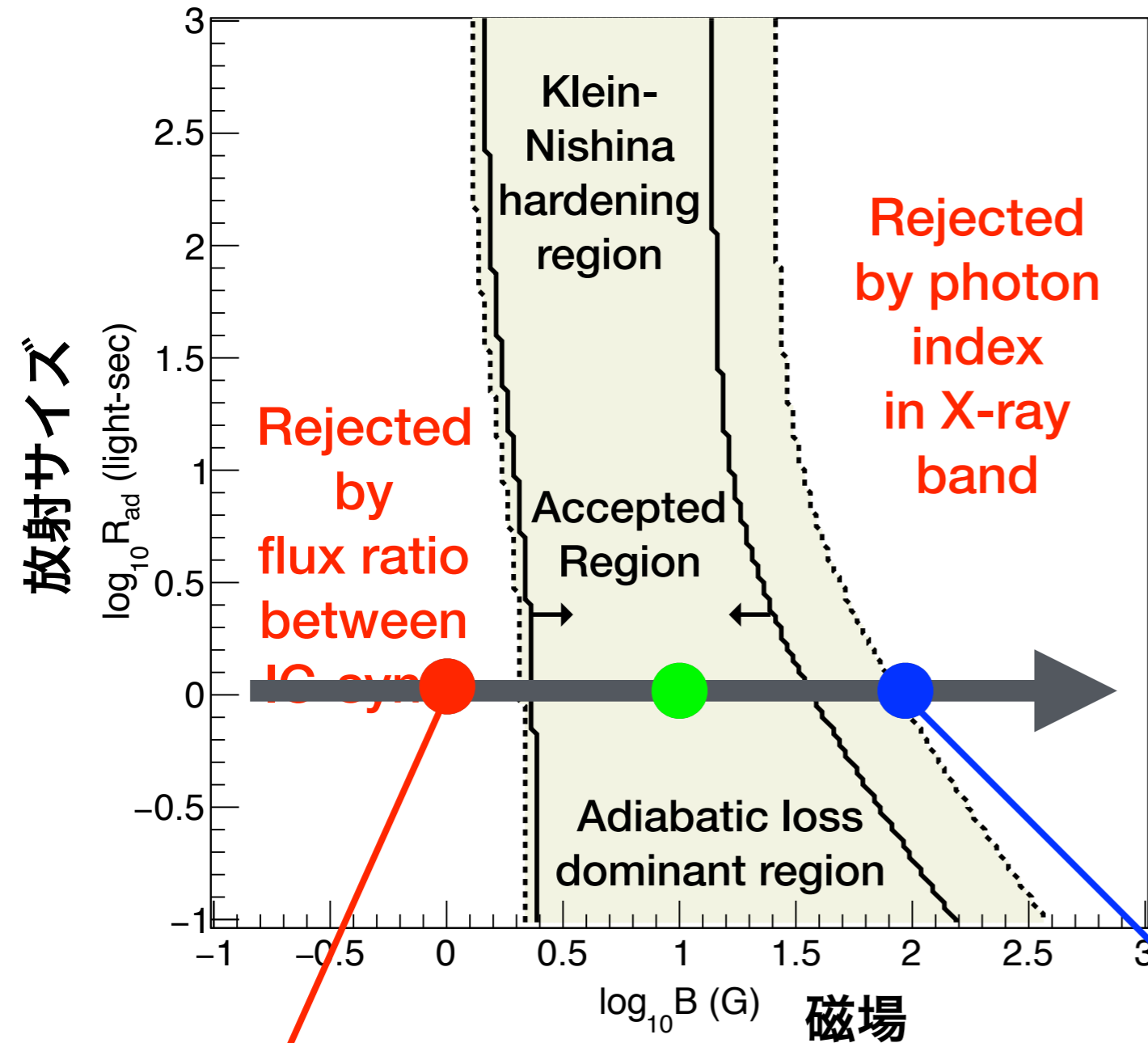
X線放射領域の制限



X線放射領域の磁場を、8-160 Gに制限 (伴星からの距離 50 光秒)



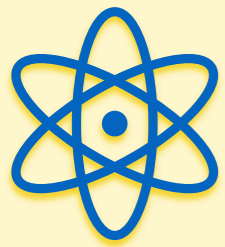
X線放射領域の制限



弱磁場 → ICが大きすぎる

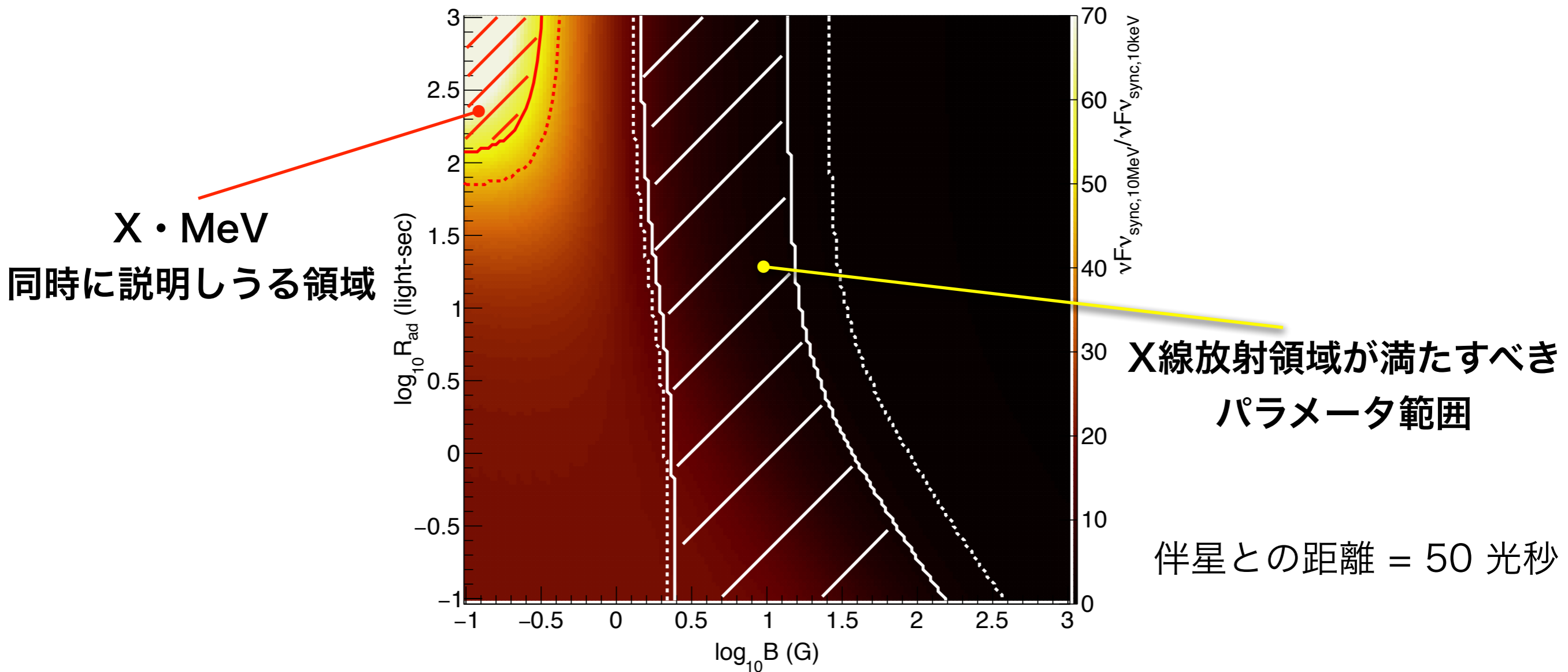
強磁場 → X線スペクトルがソフトすぎる

X線放射領域の磁場を、8-160 Gに制限 (伴星からの距離 50 光秒)



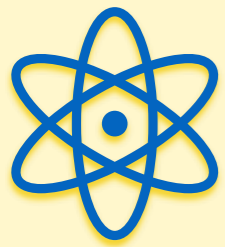
XとMeVは同一の成分か？

X線とMeVガンマ線のフラックス比 $\nu F_\nu(E_{\text{MeV}} = 17 \text{ MeV}) / \nu F_\nu(E_{\text{keV}} = 10 \text{ keV}) > 54$
 を満たす（磁場, 放射領域の大きさ）を求めた



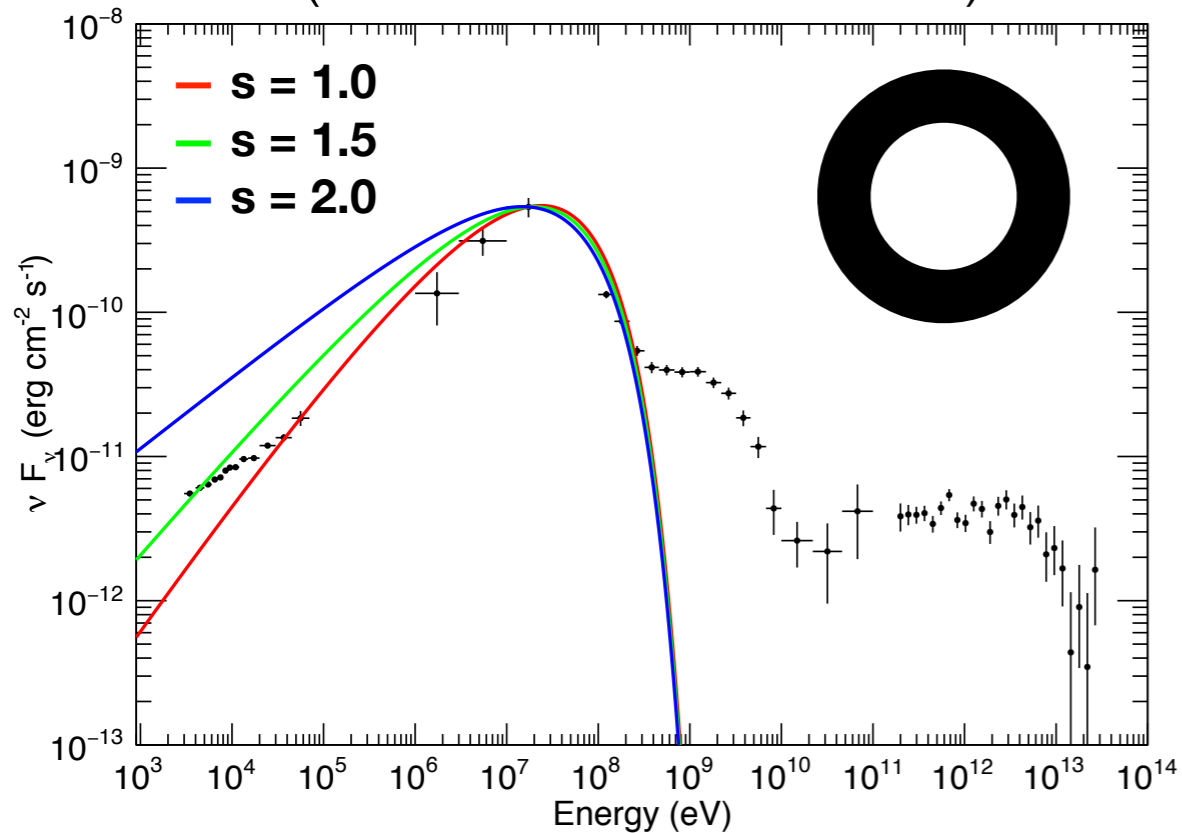
X・MeVを同時に説明できるパラメータは観測から棄却（伴星との距離を変えても同様の結果）

X線とMeVガンマ線の放射起源は異なる！

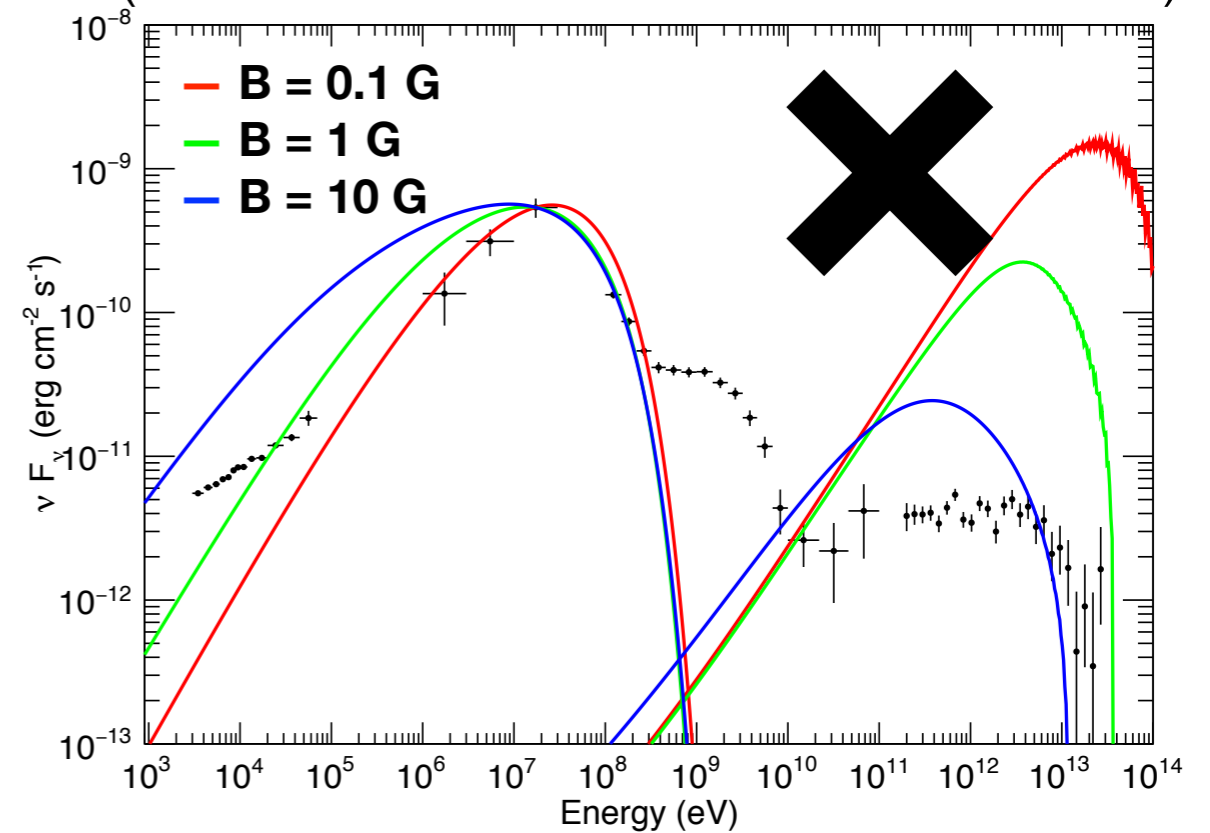


MeVガンマ線放射の性質

放射領域が小さい
(シンクロトロンが卓越)



放射領域が大きい
(逆コンプトン散乱が強くなりすぎる)



- 放射領域に注入される加速電子は、べき1程度の硬いスペクトル
- 加速効率 η が、約2-3と極めて小さい (効率がとてもいい)
- 加速機構への重要な制限!
- 放射領域の大きさは、最低でも10 光秒より小さい
- 磁場は、最低でも数ガウスよりも大きい

研究内容

① 観測的研究

i) 硬X線帯域でのパルス探索

→ 周期 9 秒の硬X線パルスの兆候

ii) GeVガンマ線帯域でのスペクトル解析 (Fermi 11年分の解析)

→ 1 GeV付近を境目に、異なる放射成分の存在

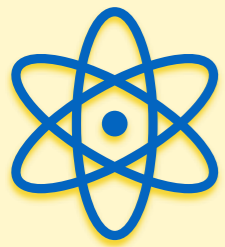
② 理論的なスペクトルの考察

iii) スペクトルモデリングと、観測との比較

→ MeVガンマ線放射は、単独成分で、

注入電子のベキ ~ 1 、加速効率 $\eta \sim 2-3$ のシンクロトロン放射

iv) LS 5039の放射物理機構の新解釈 ←今ここ



パルス放射から、エネルギー源を制限

LS 5039の光度 10^{36} erg/sは、どう説明できるか？

① 中性子星の回転エネルギー ($P_{\text{NS}} \sim 9$ s, $\dot{P}_{\text{NS}} \sim 3 \times 10^{-10}$ s s $^{-1}$)

$$L_{\text{SD}} = \frac{(2\pi)^2 I \dot{P}_{\text{NS}}}{P_{\text{NS}}^3} \sim 10^{34} \text{ erg s}^{-1} \quad (8.1)$$

② 降着で開放される重力エネルギー

- ・ 回転周期が増加している
- ・ 降着系は熱的なスペクトルを示す
- ・ 降着系によく見られる不安定な時間変動の欠損 から棄却

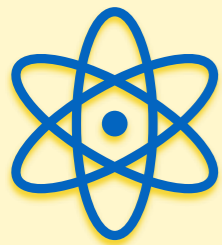
③ 星風の運動エネルギー

$$L_{\text{w}} \sim \frac{1}{2} \dot{M}_{\text{w}} v_{\text{w}}^2 \times \frac{\pi R_{\text{A}}^2}{4\pi D_{\text{sep}}^2} = 6 \times 10^{31} \text{ erg s}^{-1} \quad (8.2)$$

④ 中性子星の磁場エネルギー

$$L_{\text{BF}} = \frac{B_{\text{NS}}^2 R_{\text{NS}}^3}{6\tau} \sim 10^{37} \times \left(\frac{B_{\text{NS}}}{10^{15} \text{ G}} \right)^2 \left(\frac{R_{\text{NS}}}{10 \text{ km}} \right)^3 \left(\frac{\tau}{500 \text{ yr}} \right)^{-1} \text{ erg s}^{-1}, \quad (8.3)$$

中性子星が 10^{15} G程度の磁場を持つ時のみ説明可能！



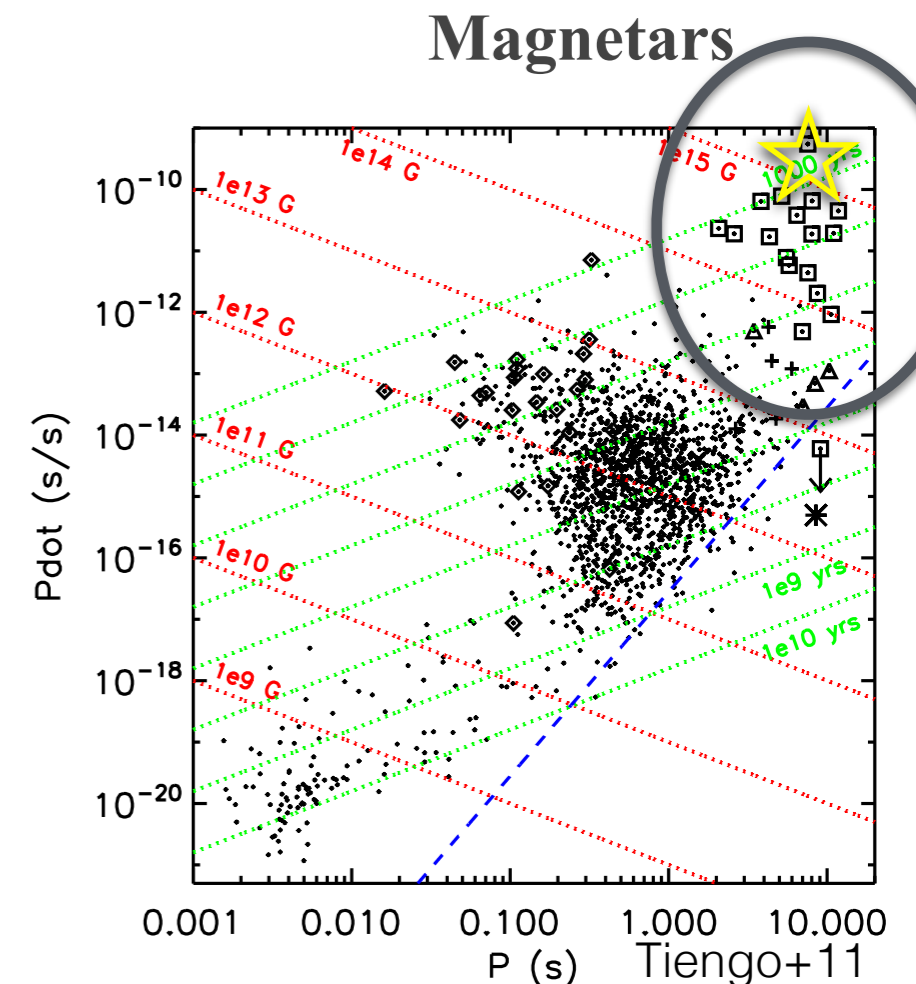
10¹⁵G程度の磁場を持つ中性子星は？

→ マグネター

- 10¹⁴⁻¹⁵ Gの磁場を持つ
- 磁場エネルギーを開放して放射
- 孤立系でののみ、これまで発見

さらに、

- ① 周期9sは、典型的なマグネターと一致
- ② 強磁場によって、重力降着が阻害
(熱的放射がないことを説明)

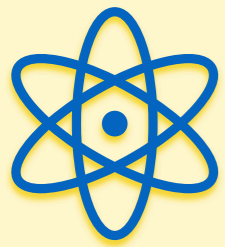


重力捕獲される半径 (Bondi-Hoyle 半径)

$$\bigwedge \quad R_B = \frac{2GM_{\text{NS}}}{v_w^2} \sim 1 \times 10^8 \times \left(\frac{v_w}{2000 \text{ km s}^{-1}} \right)^{-2} \text{ m}$$

磁場圧が卓越する半径 (Alfven 半径)

$$R_{\text{Al}} = \left(\frac{B_{\text{NS}} R_{\text{NS}}^3 D_{\text{sep}}}{\sqrt{2\dot{M}_w v_w}} \right)^{1/3} \sim 2 \times 10^8 \times \left(\frac{B_{\text{NS}}}{10^{11} \text{ T}} \right)^{1/3} \left(\frac{\dot{M}_w}{10^{-6} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}} \right)^{-1/6} \left(\frac{v_w}{2000 \text{ km s}^{-1}} \right)^{-1/6} \text{ m,}$$

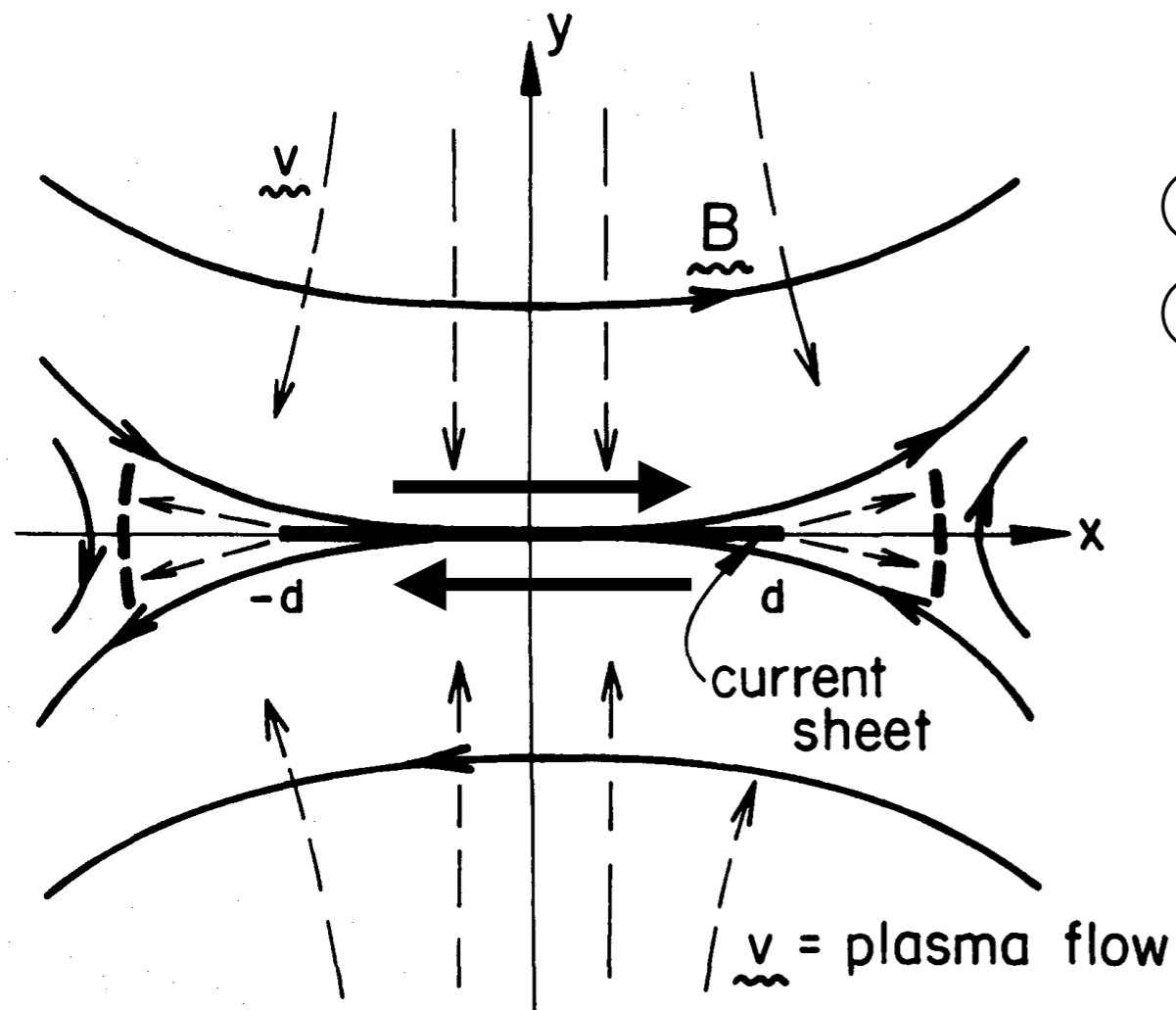


MeVガンマ線放射機構は？

これまでにわかったこと

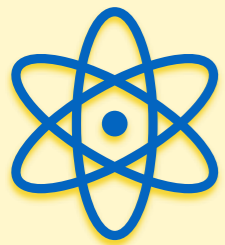
- ・ マグネターの磁場エネルギーが、放射のエネルギー源
- ・ べき指数1程度の注入電子スペクトル
- ・ 効率的な加速機構

これらは、「磁場が重要な役割を果たす直接加速」の存在を示唆
→ 磁気リコネクション！

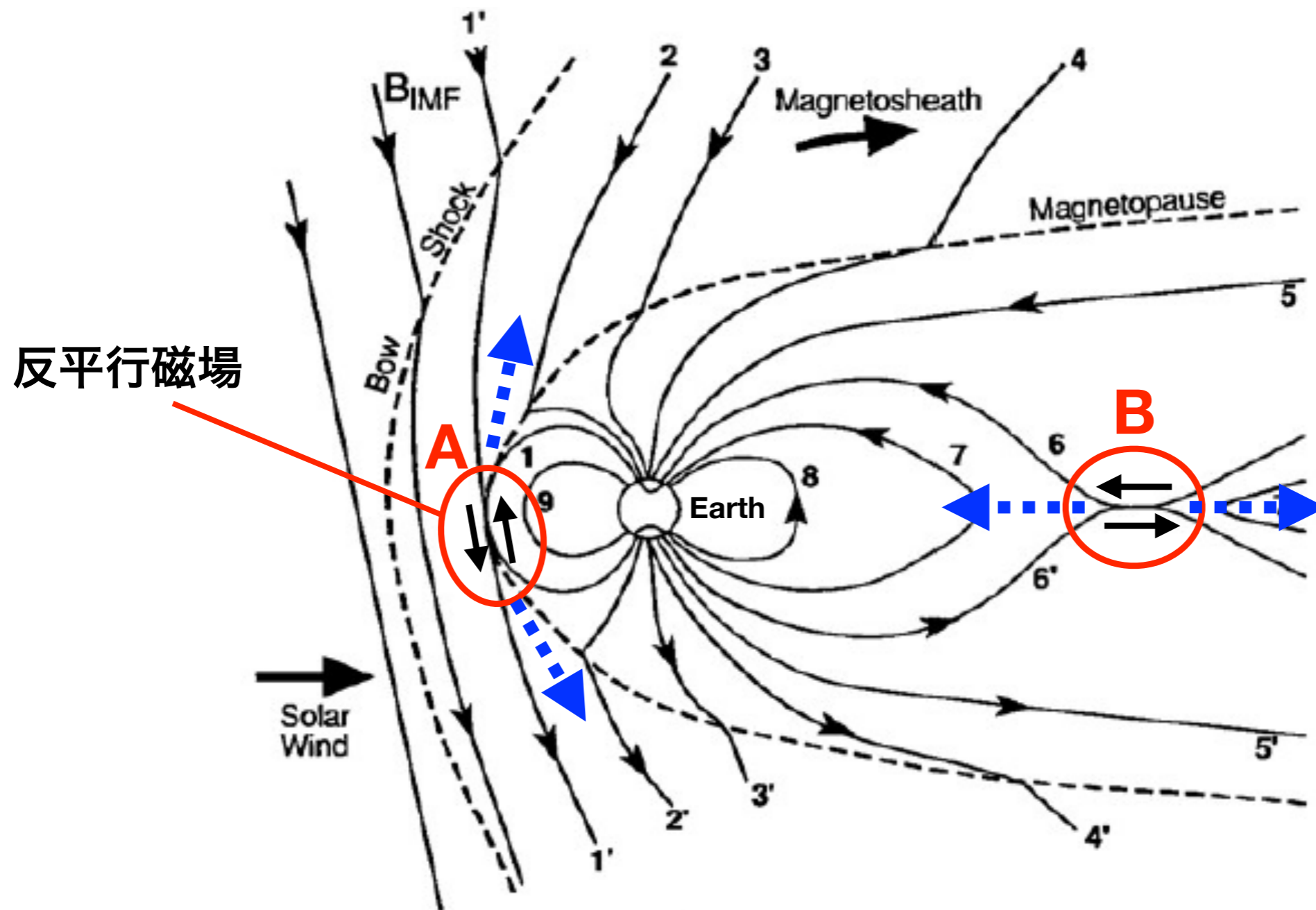


- ① まず、反平行磁場が存在している
- ② 磁場がつなぎ変わることで、荷電粒子が直接加速（画面左右方向）

では、磁気リコネクションは、連星系で、あり得るのか？

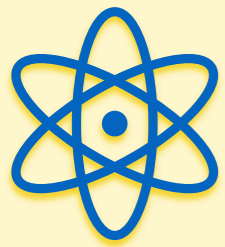


磁気リコネクションの身近な例 -地球と太陽風-

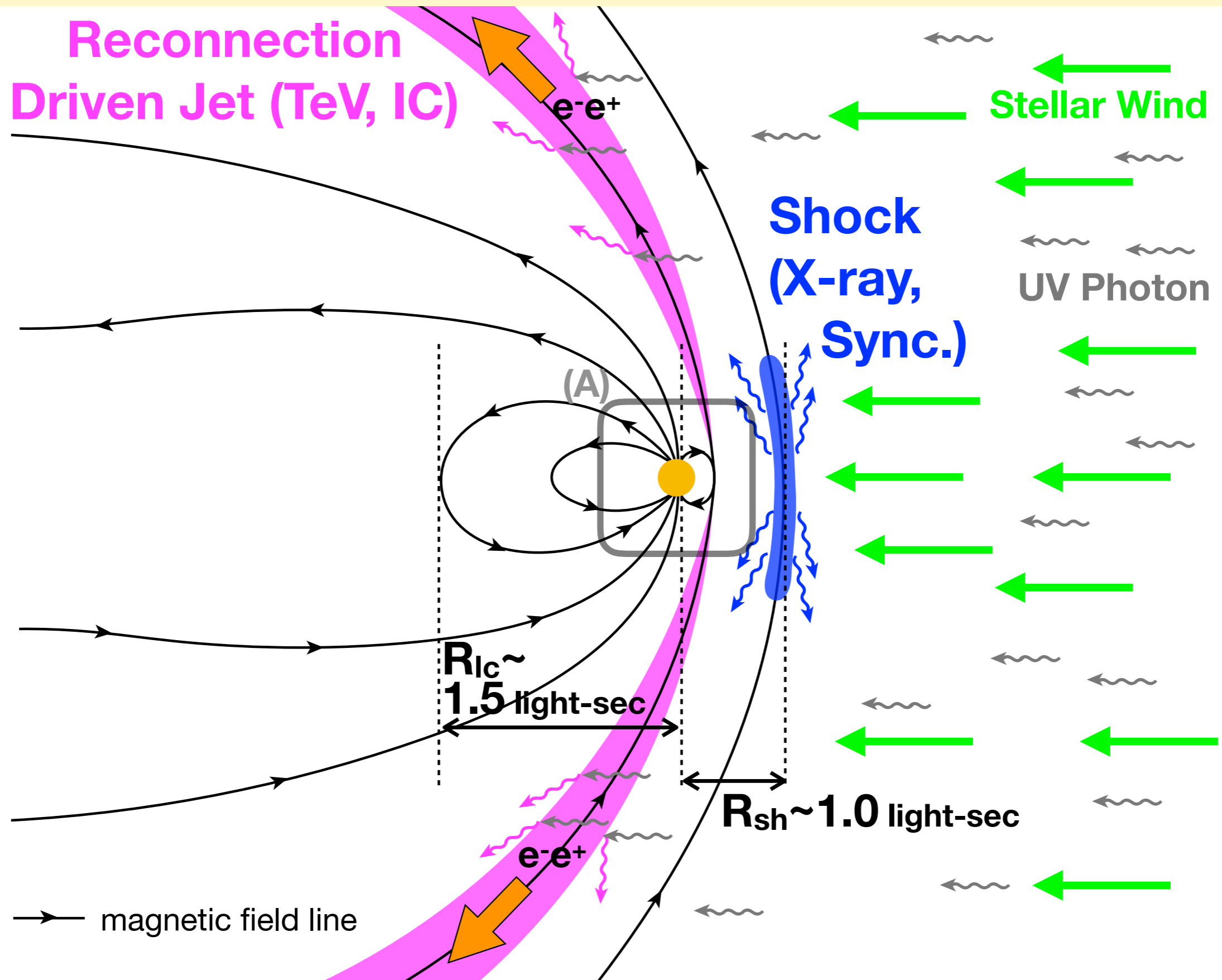


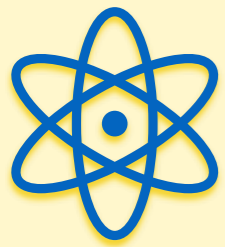
→ 地球磁場とのアナロジー

(地球, 太陽風) ↔ (マグネター, 0星からの星風) に置換

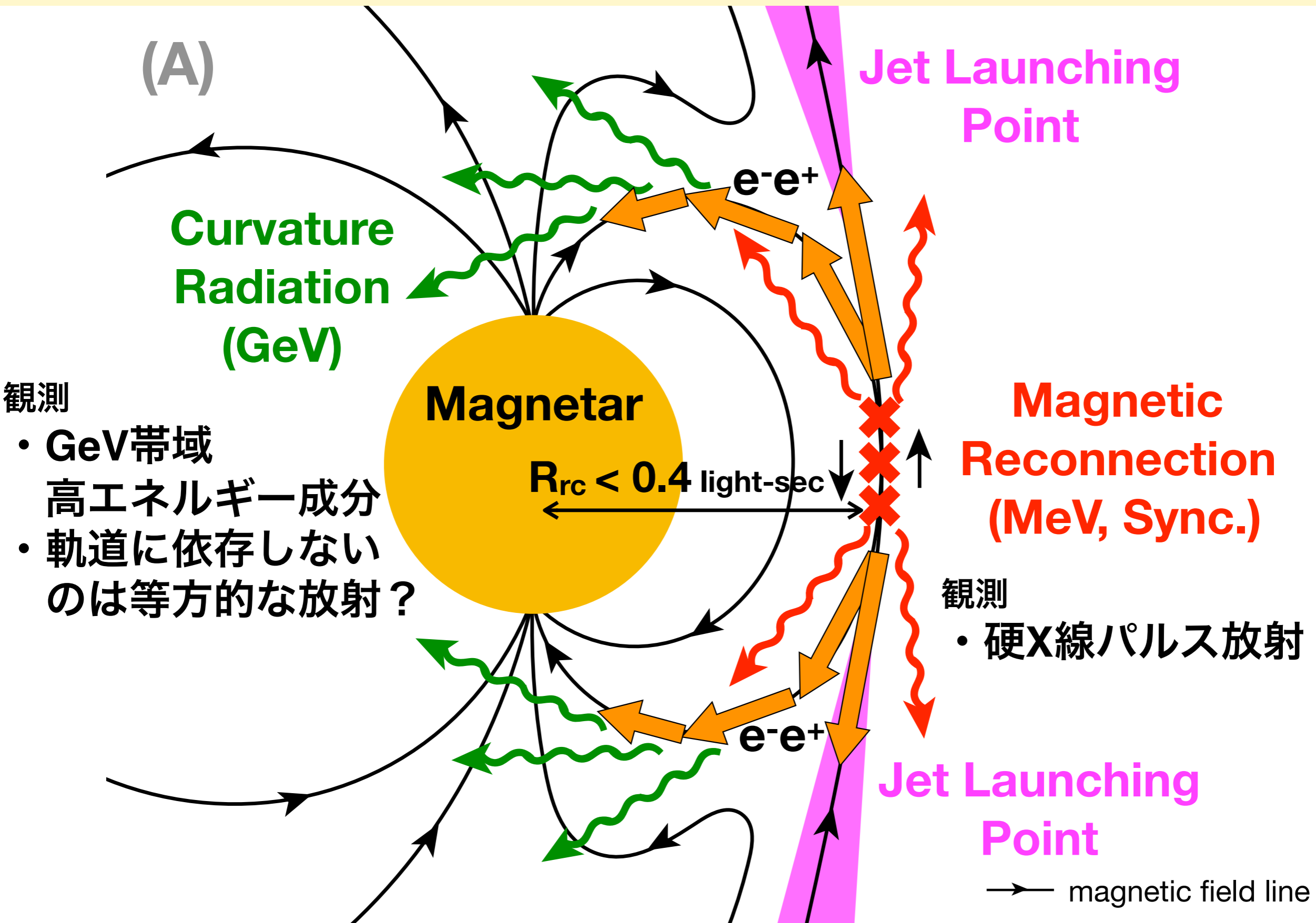


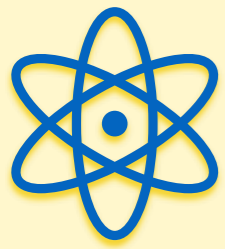
LS 5039における磁場構造の提案



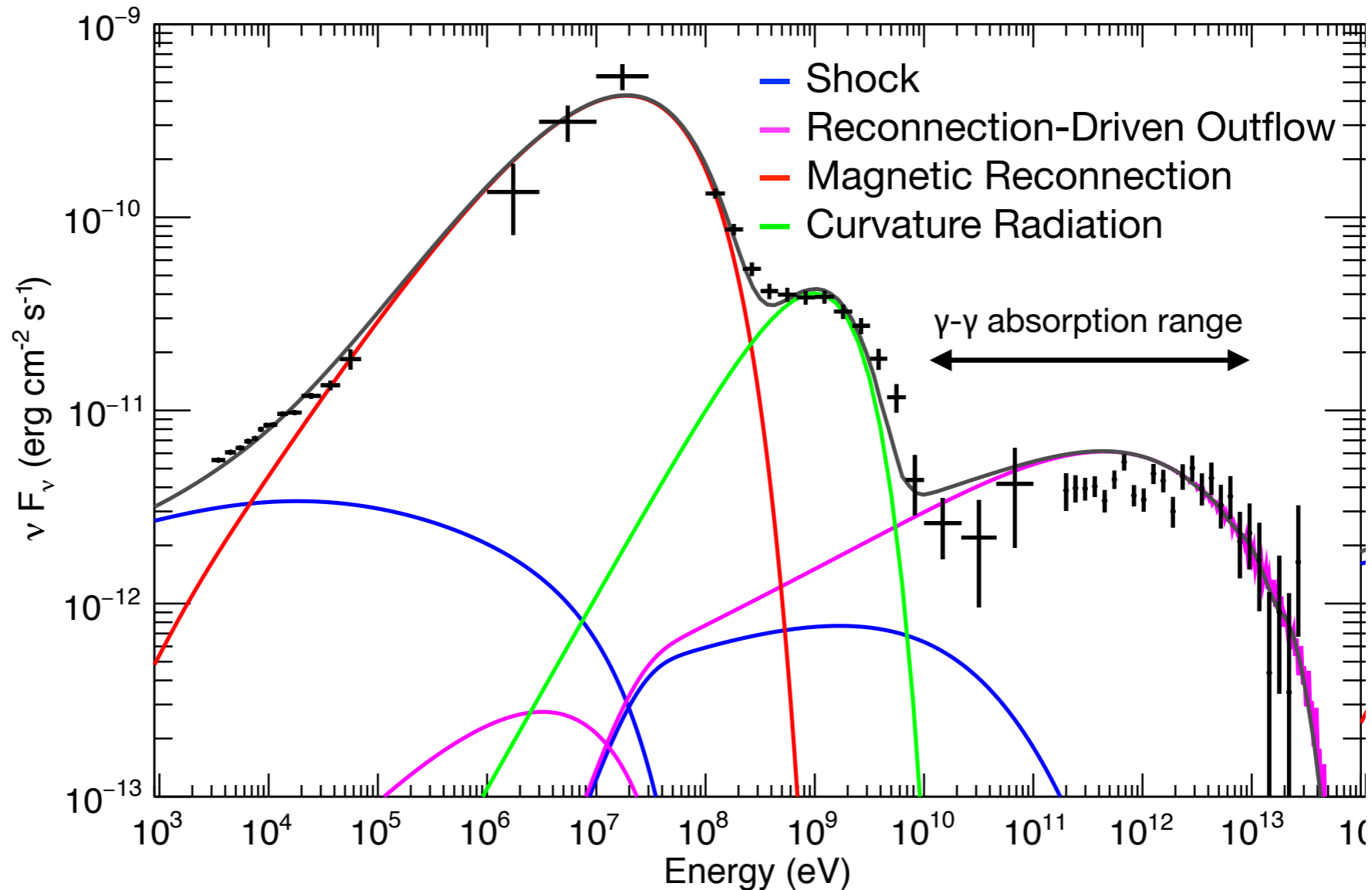


LS 5039における磁場構造の提案





マグネター仮説でのスペクトルモデル

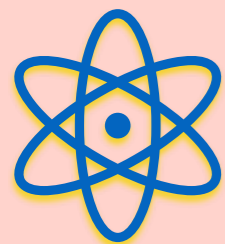


① 直接加速 $\eta \sim 1$

② 磁場 (シンクロトロン放射) → MeVにハードなスペクトル

$$h\nu = 67 \text{ MeV} \times \eta^{-1}$$

次世代MeVガンマ線観測によって、同様の現象が見えてくる？



本研究の結論と、宇宙物理学的意義

- LS 5039の非熱的放射は、 10^{15} G程度の磁場を持つマグネターの磁気エネルギーによって、駆動されている
- 外部からの星風により、マグネター磁気圏内に反平行磁場が形成。結果、磁気リコネクションが効率に起こる

「磁気リコネクション」による、粒子加速の可能性

- 磁気リコネクションがTeVまで電子を加速している、初めての証拠？

MeVガンマ線観測の重要性

- 次世代MeVガンマ線観測が実現すれば、同様の現象が見つかる
→ GRAMS, SMILE, AMEGOなどの次世代ミッションに期待！

連星におけるマグネターの初めての発見か

- 未解明のマグネターの誕生過程・放射機構に大きなインパクト