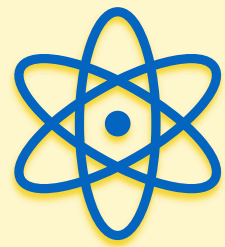


ガンマ線連星 LS 5039 の マグネター連星系の可能性： 硬X線パルスの兆候と強いMeVガンマ線放射

理研 高エネルギー宇宙物理研究室

米田 浩基

牧島一夫(Kavli IPMU/東大理/理研), 榎戸輝揚(理研),
Dmitry Khangulyan(立教大), 峰海里(東大理/Kavli IPMU),
水野恒史(広島大), 高橋忠幸(Kavli IPMU/東大理)



ガンマ線連星 LS 5039

ガンマ線連星とは？

大質量星とコンパクト星の連星系で、TeV帯域まで延びる非熱的な放射を示す。

2000年代に発見。これまでに～10天体。

加速タイムスケールが、秒スケールで生成？

コンパクトで効率のよい粒子加速器

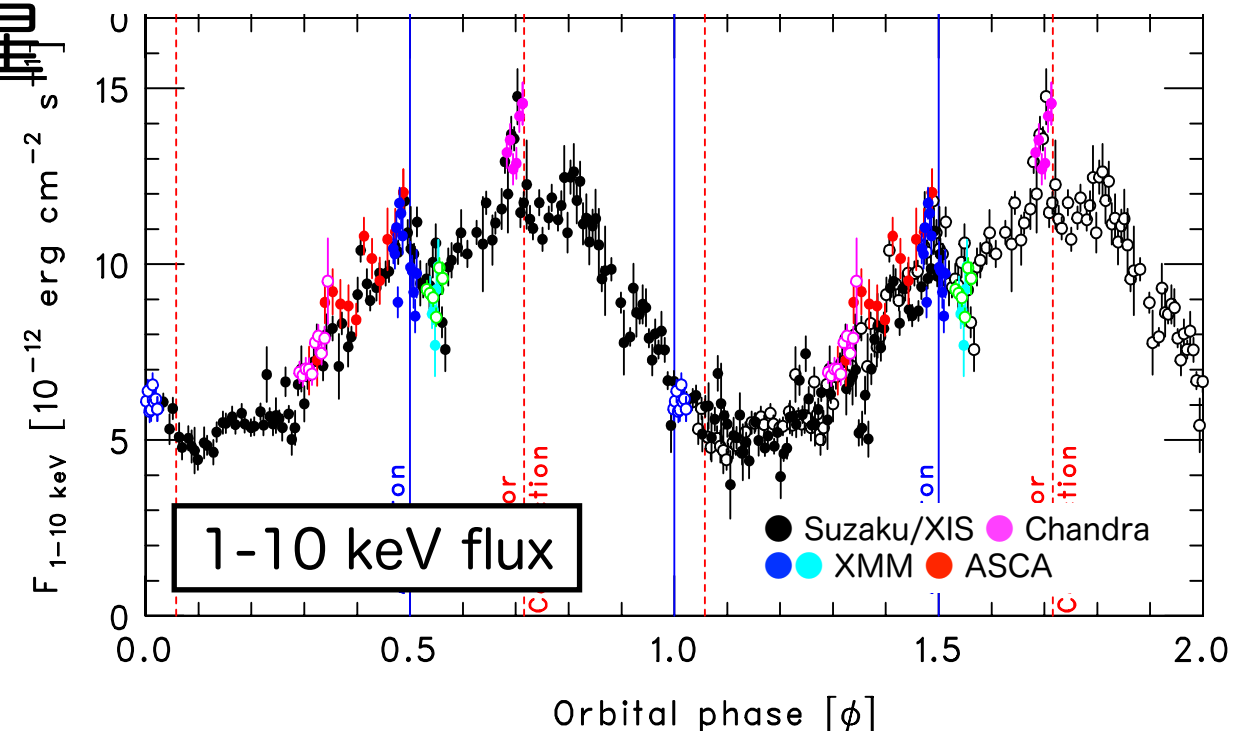
加速機構・放射機構が大きな謎

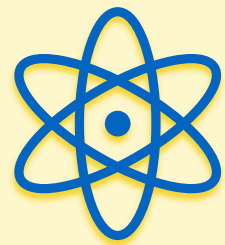
e.g. パルサー風モデル・マイクロクェーサーモデル

LS5039：代表的な明るいガンマ線連星

- ・ 連星周期ライトカーブが安定
- ・ 軌道周期3.9日、**コンパクト星は未知**
- ・ O型星(~23太陽質量)が伴星
- ・ **強いMeVガンマ線の放射**

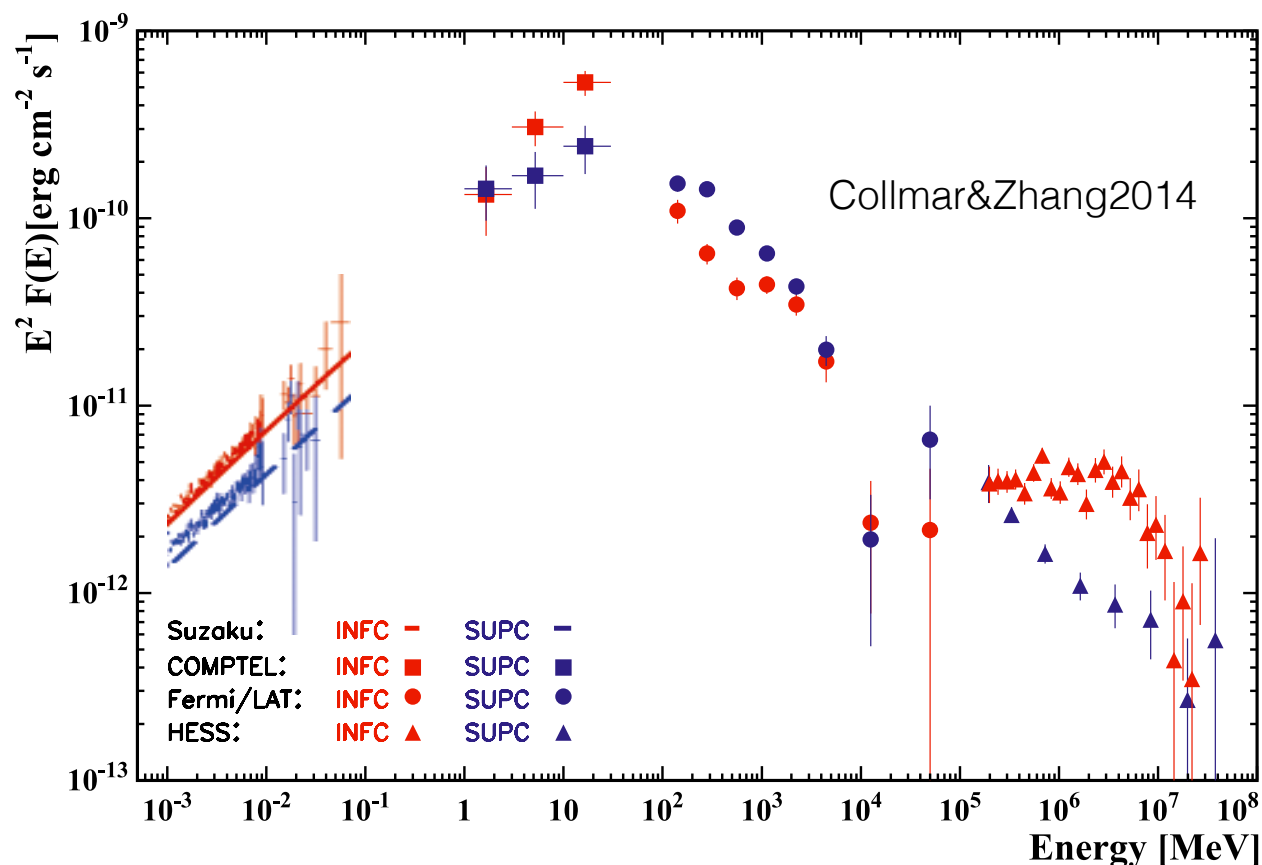
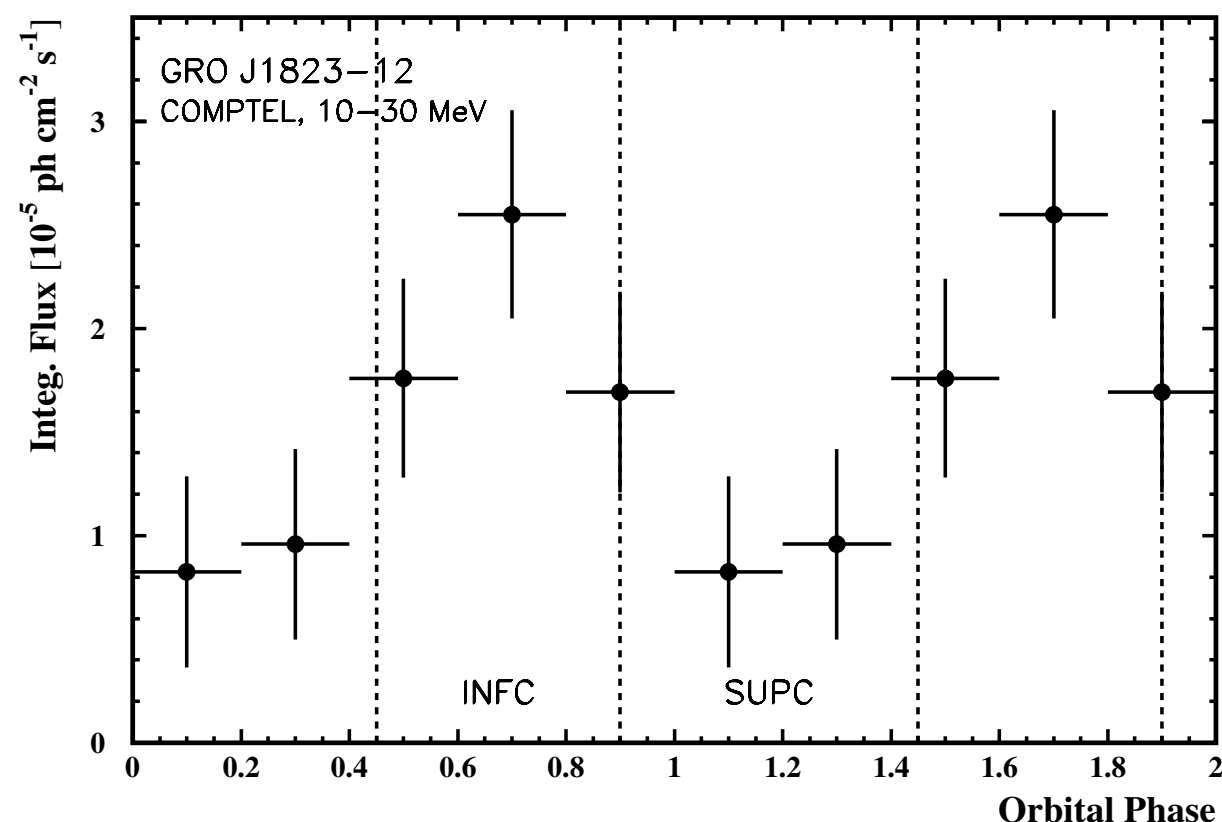
軟X線衛星による
連星周期ライトカーブ (Kishishita+09)





強いMeVガンマ線放射の同定

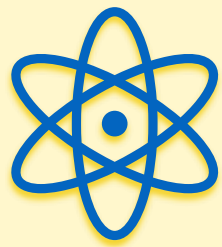
COMPTELの観測データから、
LS 5039と位置が一致+連星周期で変動する成分を確認 (Collmar&Zhang+14)



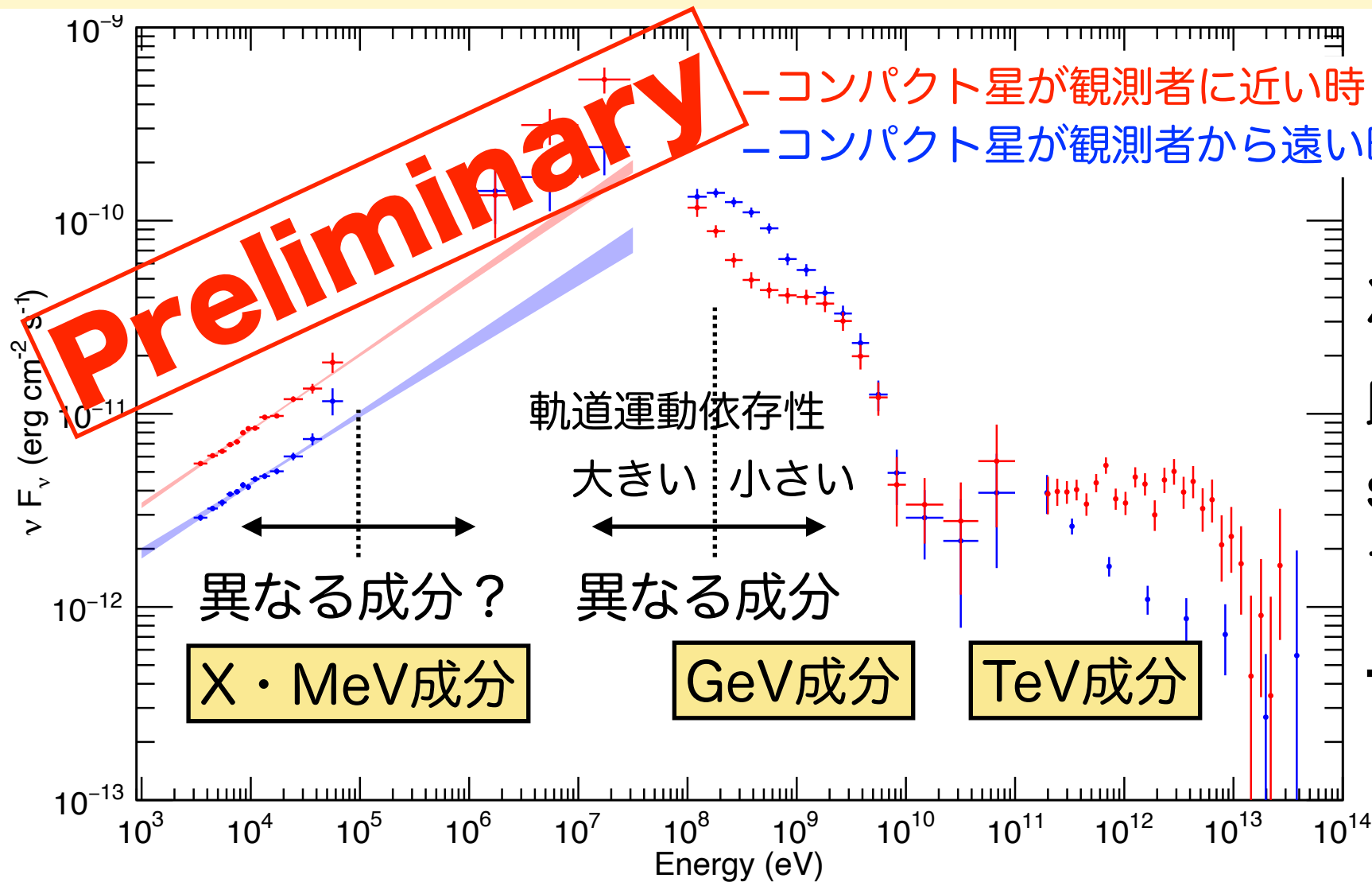
問題点：現状、このMeV放射を説明するモデルがない。

我々は、以下の2通りでアプローチ

1. 高感度データ (NuSTAR・Fermi 11年分) を用いた広帯域スペクトル解析
 2. SuzakuとNuSTARの硬X線データ長時間データを用いた周期探索
- 加速機構の物理条件を明らかにする



X線からTeVまでの広帯域スペクトル



XからTeVまで4成分ある

既存モデルはどれも、MeVからsub-GeVにかけての放射を説明できていない

→ 新たな理論的なチャレンジ!

可能性① シンクロトロン放射

MeV放射を説明するには、以下が必要

- ・ 加速電子のベキ ~ 1 (Fermi加速 ベキ ~ 2)
- ・ 加速効率 $\eta \sim 2-3$ (Fermi加速 $\eta > 10$)
- ・ 対応ICの不在から、 $B \gtrsim 3$ G

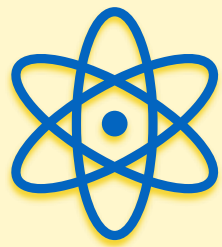
→ 強磁場中での直接加速が、加速機構?

可能性② 逆コンプトン散乱

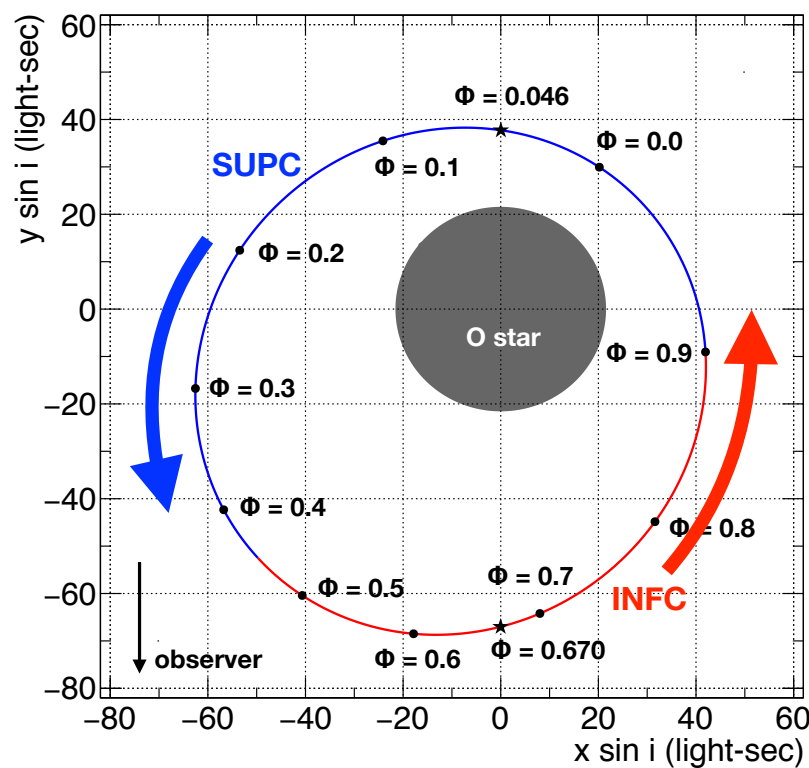
伴星からのUV光子が種光子
+ MeVにピークを作る

→ 電子エネルギーは、 $\sim$ GeV

→ shock領域に、TeV電子に加え、GeV電子?



硬X線でのパルス探索



パルス検出 = 中性子星の証拠、コンパクト星の性質
電波・軟X線では未検出 (星風による吸収か?)

→ 星風による吸収か? 硬X線が有利。

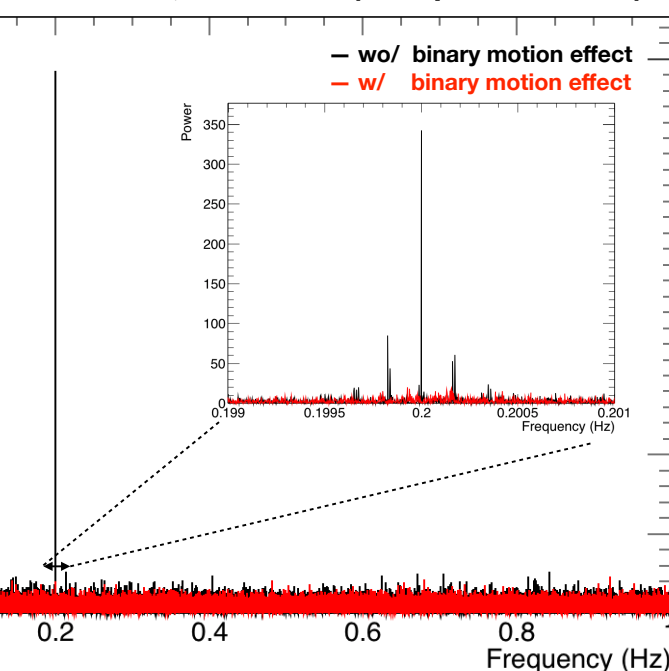
硬X線でのパルス探索の課題

軌道運動のドップラー効果が無視できない

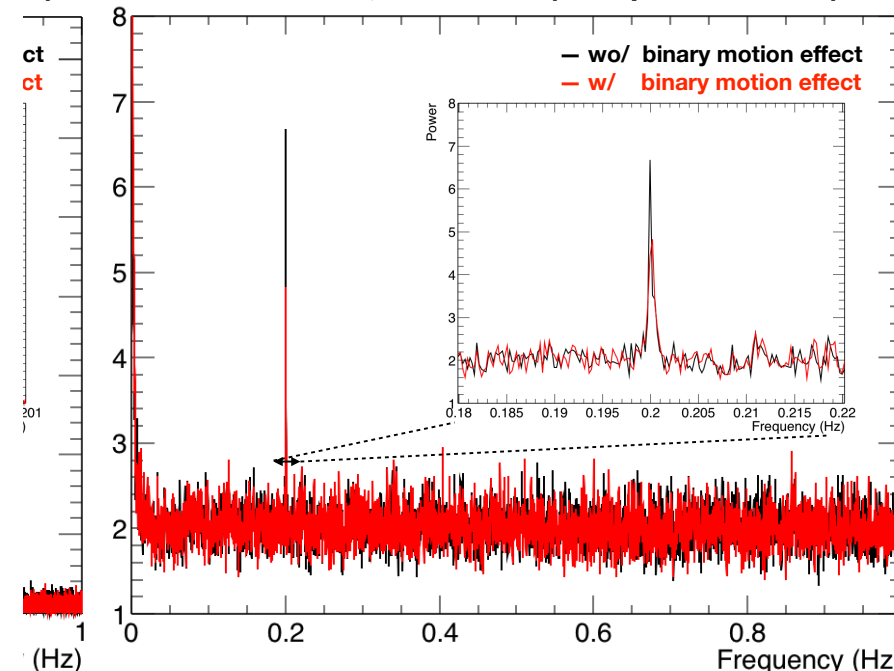
($v = 1 \times 10^{-3} c$, 軌道パラメータも不明)

シミュレーションデータを用いた、
データ分割によるパルス探索のデモンストレーション

Data division, simulation (10% pulse fraction)



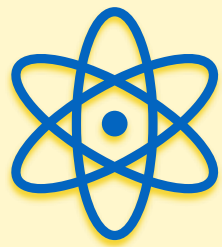
in) $\Delta T = 4192$ s, simulation (10% pulse fraction)



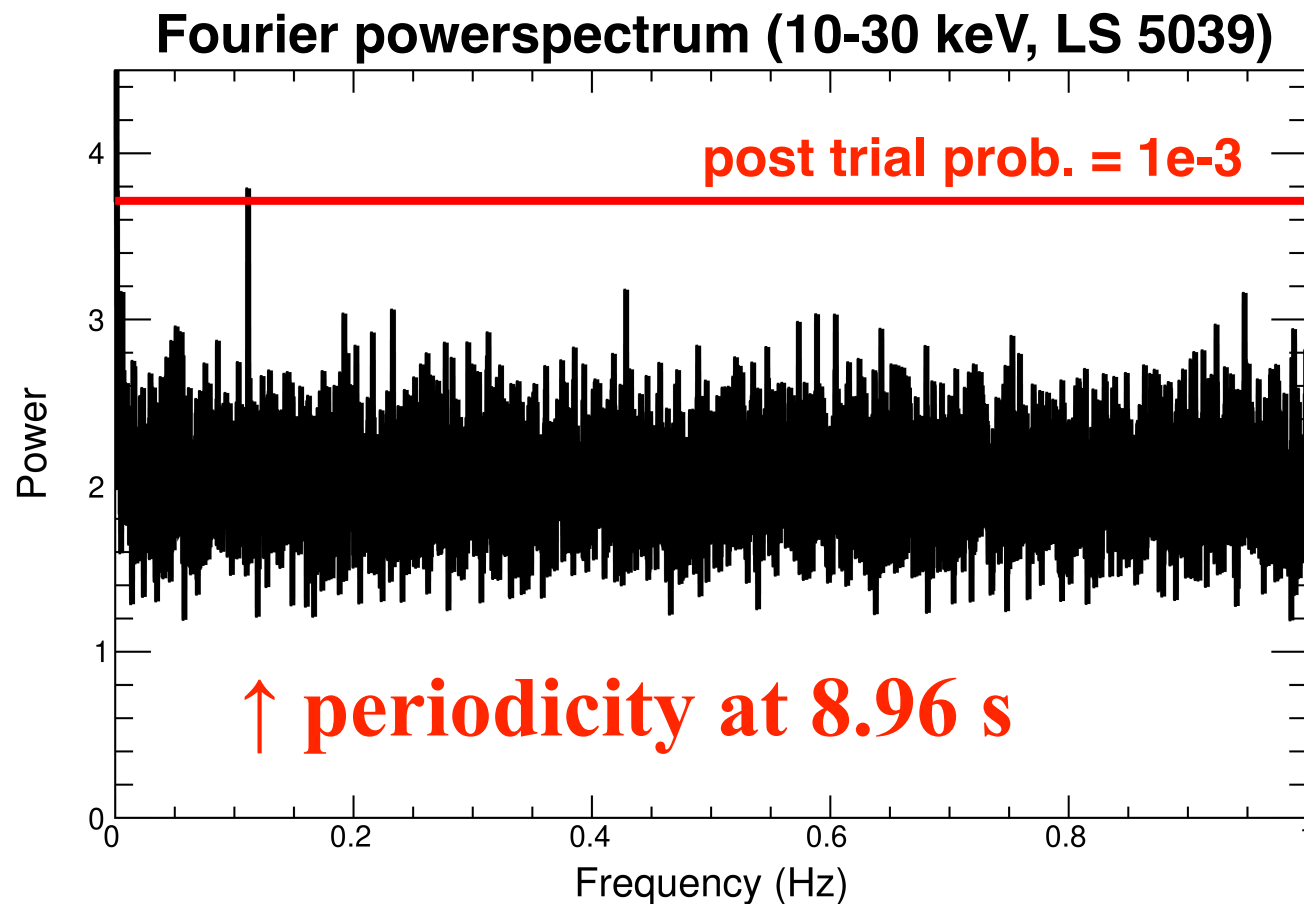
方法

1. データを分割 + 分割データごとに、フーリエ変換
2. フーリエパワースペクトルの平均をとる

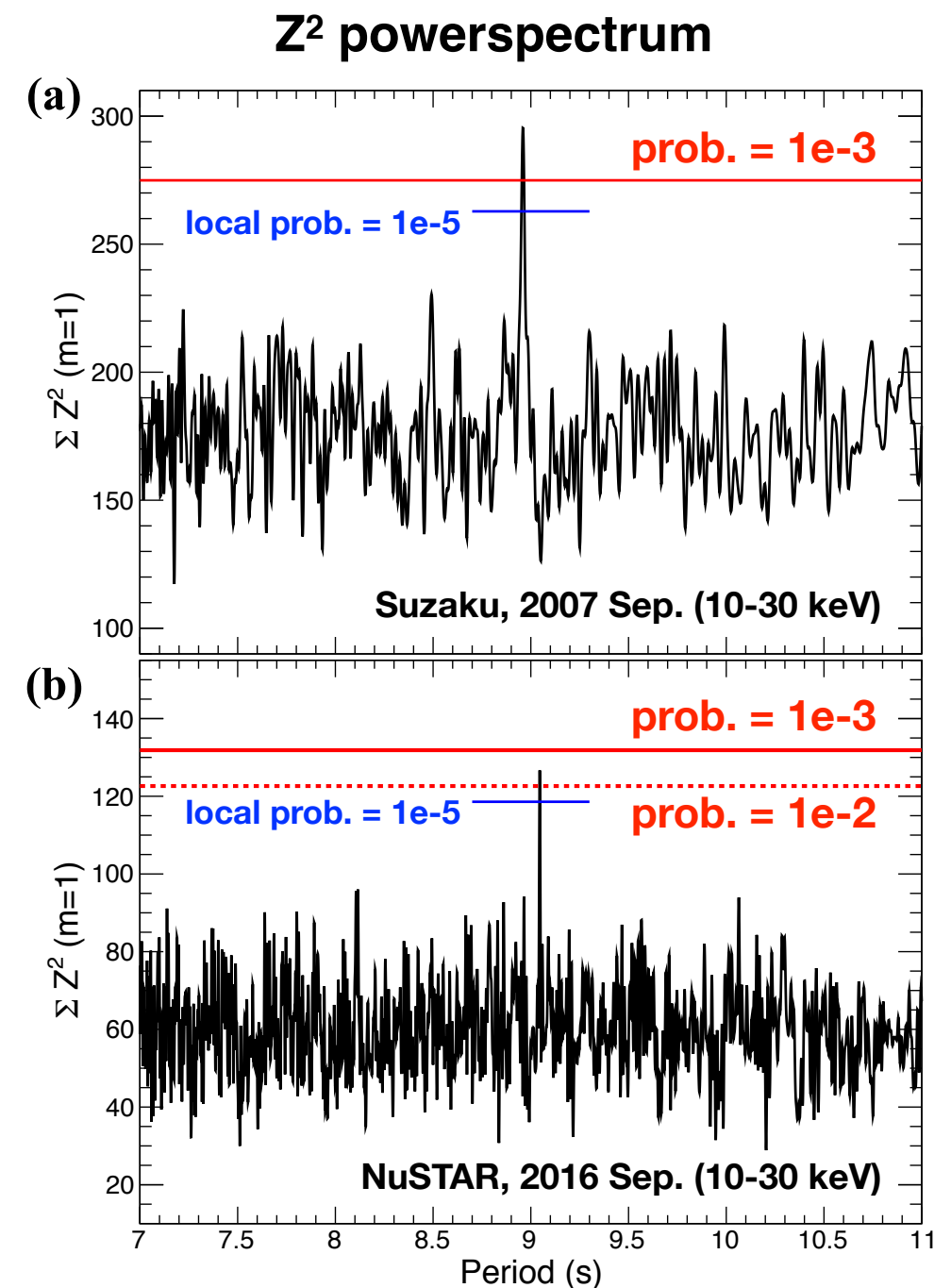
フーリエ分解能を、ドップラー効果と同程度に落とす



9秒周期のパルスの兆候

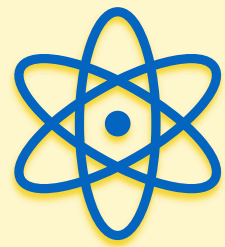


- ・ Suzaku/HXDから、 8.96 ± 0.01 s の周期性を、 1.1×10^{-3} の有意度で確認
- ・ 9年後観測のNuSTARデータからも、 9.046 ± 0.009 sにピークを確認



$P_{\text{NS}} = 9$ s, $\dot{P}_{\text{NS}} = 3 \times 10^{-10}$ s s $^{-1}$ の中性子星の存在を示唆

※ NuSTAR単独では、有意でない（探索範囲を制限）。軌道パラメータに違い → 追観測を計画



9秒パルスの解釈・天体放射のエネルギー源

- ・スピンドOWN光度は、 $1 \times 10^{34} \text{ erg s}^{-1} \ll$ 観測光度 $1 \times 10^{36} \text{ erg s}^{-1}$

- ・星風のエネルギーも、4桁足りない

- ・降着の可能性も、スペクトル+時間変動から難しい

→ 中性子星の磁気エネルギーなら、説明可能

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

→ **超強磁場中性子星「マグネター」が必要（磁気駆動される連星系？）**

- ・周期もマグネターの典型値 (2 - 11s)

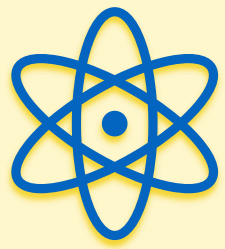
- ・磁場圧により降着が阻害されることが説明可

Bondi 半径 ($1 \times 10^{10} \text{ cm}$) $\lesssim$ Alfven 半径 ($2 \times 10^{10} \text{ cm}$) ($\lesssim$ 光円柱半径 = $4 \times 10^{10} \text{ cm}$)

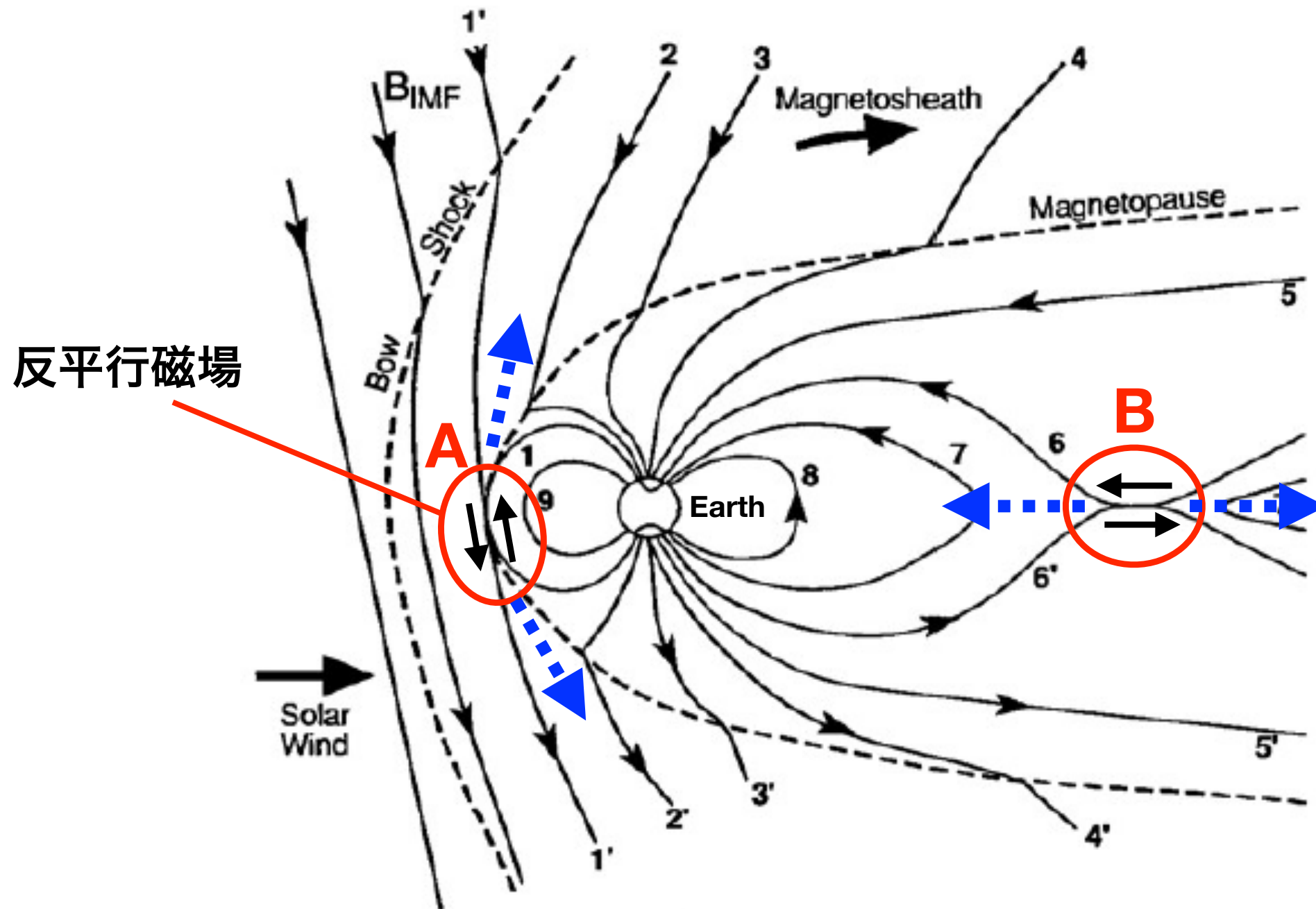
- ・MeV放射の強磁場中での直接加速とマッチ→磁気リコネクション加速?

- ・LS I+61 303 から、マグネターに似たX-ray flareが検出 (Torres+12)

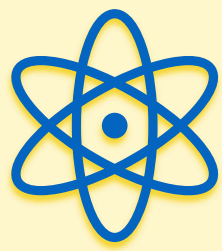
マグネターが、強い星風のある連星系にいるとき、
磁気エネルギー解放+粒子加速が起こるだろうか？
→ 連星系だからトリガーされるリコネクション？



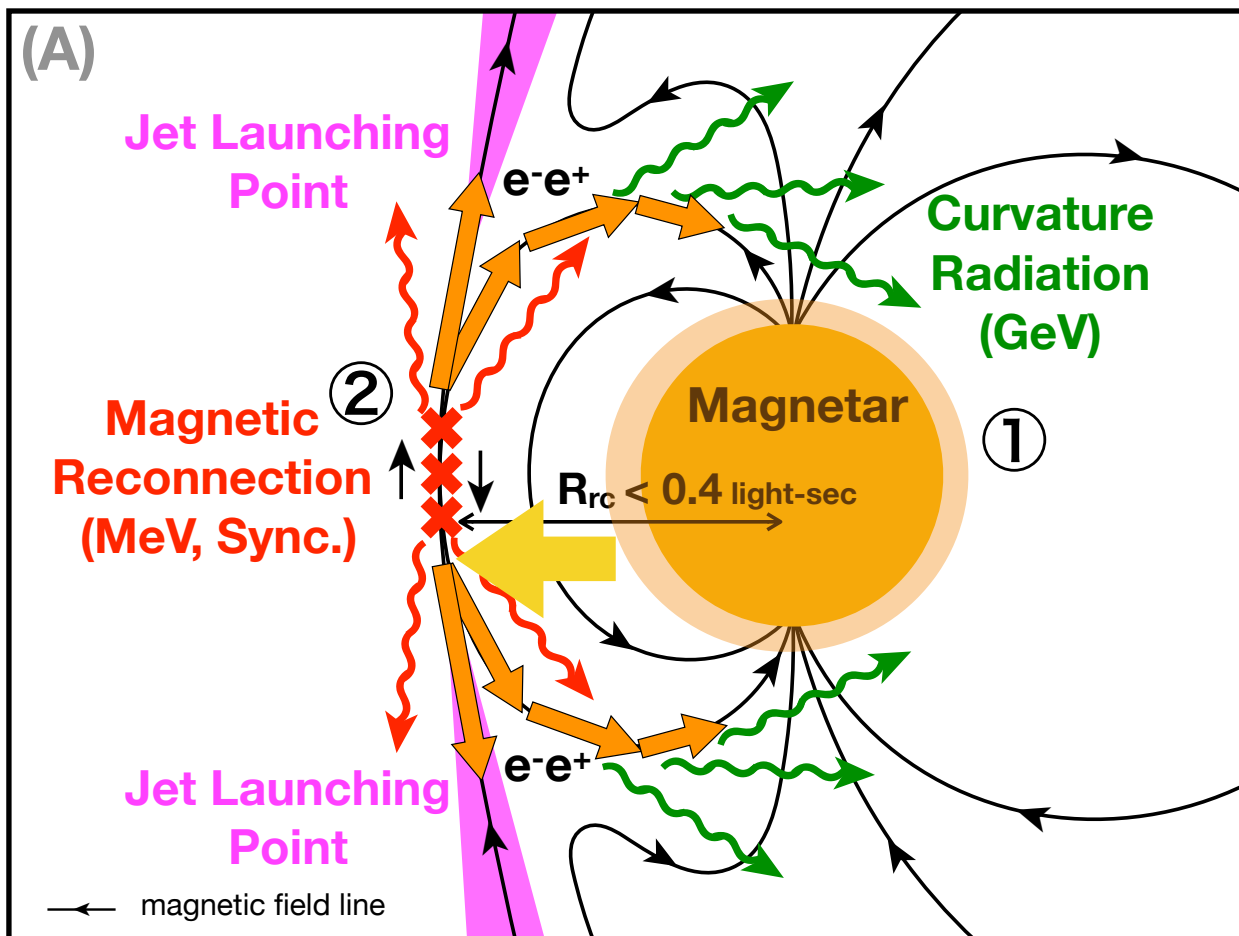
磁気リコネクションの身近な例 -地球と太陽風-



→ 地球磁場とのアナロジーを考えたい
 (地球, 太陽風) ↔ (マグネター, O星からの星風) に置換



新しい加速シナリオ マグネター＋磁気リコネクション



① マグネター表面近くでの 磁気エネルギー解放

- ・ 孤立マグネターと同様の解放機構？
- ・ 磁気エネルギーが、Poynting fluxとして流出

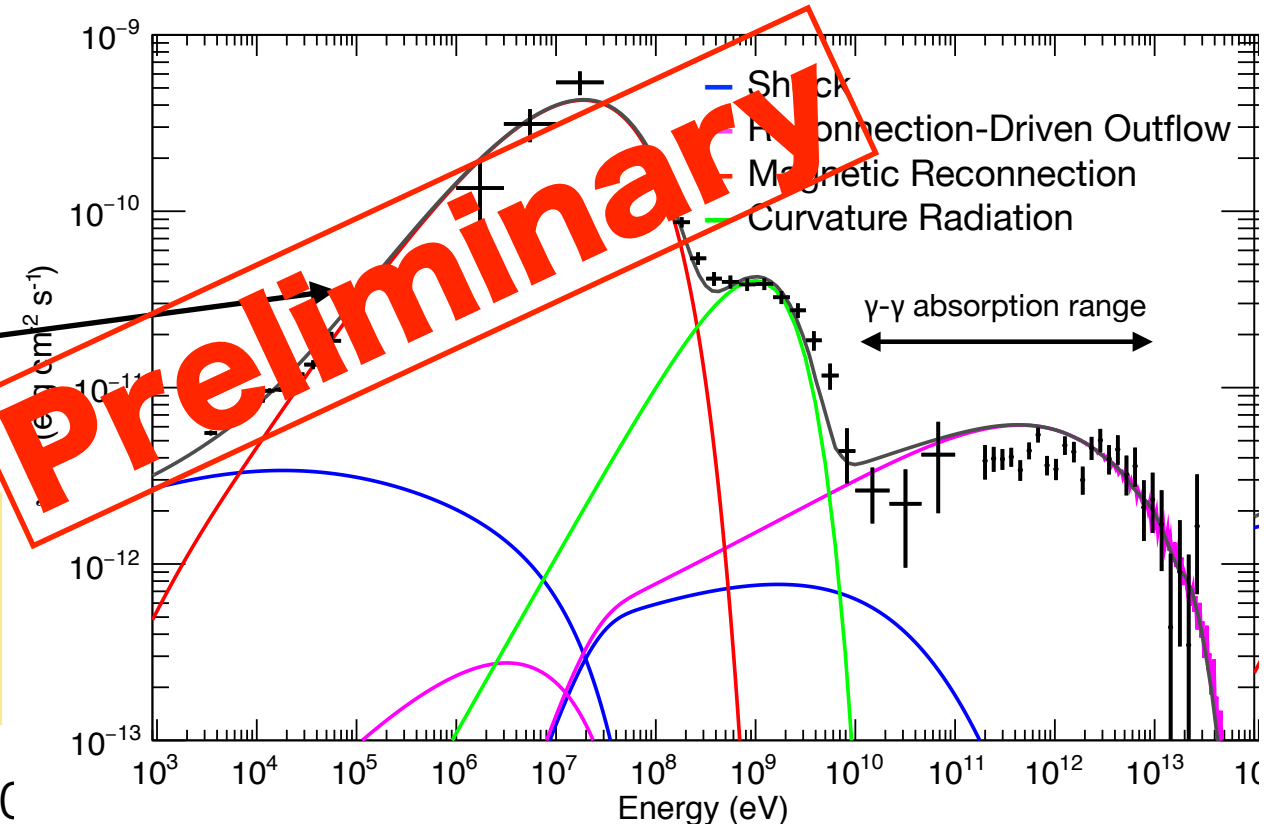
② 磁気圏での磁気リコネクション加速

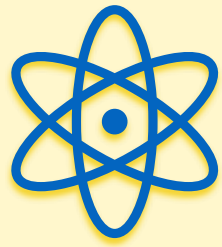
- ・ 星風圧により、磁気圏が変形
→ 反平行磁場が形成。リコネクション
- ・ 太陽風と地球磁場の関係と類似？

③ 加速電子は、シンクロトロン放射で MeV光子を出しエネルギーを失う

- ・ 磁気リコネクションの直接加速から、
硬いスペクトルべきを説明可能

星風をトリガーとして、マグネター近傍での
相対論的磁気リコネクション加速が起こる？





結論

① 典型的なガンマ線連星 LS 5039での広帯域スペクトル解析を実施

- ・ X線からTeVガンマ線まで異なる4つの放射成分の存在が明らかになった
- ・ MeV帯域でピークを持つ成分は、シンクロトロン放射起源と解釈すると、磁気リコネクションのような強磁場での直接的な加速を示唆する

② LS 5039での硬X線パルス探索を実施 (Yoneda et al. 2020, PRL)

- ・ すざく・NuSTARのデータから、9秒周期のパルスの兆候を発見した
- ・ エネルギー源を考えると、強磁場中性子星マグネターの可能性が高い

③ マグネターの磁気エネルギーで駆動する新しい粒子加速モデルの提案

- ・ 星風環境下が、マグネターの磁気エネルギーの解放を促進する
- ・ 星風で磁気圏が変形し、マグネター近傍で磁気リコネクションが起こる
- ・ リコネクション加速された電子がシンクロトロン放射し、MeVガンマ線が生成される